

## 6 メンテナンスサイクルの効率化・信頼性向上に関する研究

研究期間：平成 28 年度～令和 3 年度

プログラムリーダー：橋梁構造研究グループ長 金澤 文彦

研究担当グループ：CAESAR（橋梁構造研究グループ）、iMaRRC（材料資源研究グループ）、地質・地盤研究グループ（特命上席）、技術推進本部（先端技術チーム）、道路技術研究グループ（舗装チーム、トンネルチーム）、寒地保全技術研究グループ（寒地道路保全チーム）、技術開発調整監（寒地機械技術チーム）

### 1. 研究の必要性

現在、社会資本の高齢化が急速に進展している。笹子トンネルの事故など、一部では劣化等に伴う重大な損傷が発生し、大きな社会問題となっている。こうした社会資本ストックの老朽化に対応するため、国土交通省では第 4 次社会資本整備重点計画（H27～R3）において「社会資本の戦略的な維持管理・更新」を重点目標に掲げ、関連施策を重点的に推進している。

例えば道路構造物に関しては、法改正に基づく点検の義務化が定められ、H26 年度より全ての道路管理者が点検等の維持管理を実施しているところである。ただし、点検・調査の効率化や高度化、健全性の合理的な評価や優先順位の付け方、不具合実態や現場条件に適合した補修補強方法など、現状では維持管理の実施に際して様々な技術的課題を抱えている。また、社会資本の多くは市町村が管理しているが、求められるサービス水準に対応した維持管理手法が明らかとなっておらず、点検等の維持管理実施に際しての課題となっている。

### 2. 目標とする研究開発成果

本研究開発プログラムでは、メンテナンスサイクルの各フェイズ（点検・調査、診断、措置（補修補強））における主要な技術的課題を解決する。また、市町村管理物のサービス水準への配慮など多様な管理レベルに対応した維持管理技術を開発する。

以上により、メンテナンスサイクルの技術面でのスパイラルアップを実現し、社会資本の健全性確保に貢献するために、以下の達成目標を設定した。

- (1) 多様な管理レベル（国、市町村等）に対応した維持管理手法の構築
- (2) 機器活用による調査・監視の効率化・高度化技術の開発・評価
- (3) 措置が必要な部位・箇所の優先度決定手法の構築
- (4) 既往事象・現場条件に対応した最適な維持修繕手法の構築、構造・材料の開発・評価

### 3. 研究の成果・取組

「2. 目標とする研究開発成果」に示した達成目標に関して、令和元年度に実施した研究の成果・取組について要約すると以下のとおりである。

#### (1) 多様な管理レベル（国、市町村等）に対応した維持管理手法の構築

##### <管理用施設（接合部）関連>

道路トンネル内にはジェットファン等の附属物が設置されており、それらの多くはあと施工アンカー（以降、アンカー）により取付金具を介して覆工に固定されている。トンネルの維持管理においては、覆工のみならず、取付金具類の取付状態の点検を行うこととされている。ただし、アンカーに関連した不具合発生時の耐荷力の評価に関する手法は確立されているとは言えず、目視や触診等により経験的に判断しているのが現状である。このような状況を踏まえ、令和元年度は、コンクリートの状態が締固め不足の場合と、通常のアンカーよりも定着部を広げる等の対策を行った先付けアンカーとした場合に着目し、それらが引抜き耐力に与える影響について室内

試験により検討した。その結果、どちらも耐力の減少が確認され、そのような状況では留意が必要であることを示した。引抜き耐力は、締固め不足の場合は標準より1割程度減少した。また、先付けアンカーの場合は2割程度増加したが、その割合はコーン状破壊面積から想定される割合よりも小さい結果となった。

#### <舗装関連>

令和元年度は、路面平坦性を加速度ビッグデータから推定する手法について検討を行った。その結果、閾値を超過する加速度データの割合と IRI 値との間に相関関係があり、加速度ビッグデータから IRI 値が高い箇所の把握ができることを確認した。

### (2) 機器活用による調査・監視の効率化・高度化技術の開発・評価

#### <橋梁関連>

RC 床版では、車両の輪荷重による疲労に加え、凍結融解や凍結防止剤散布による塩分浸透、骨材のアルカリ骨材反応等の複合作用によって、床版上面の土砂化が発生し、抜け落ちに至る場合がある。本研究では、非破壊検査技術の一つである電磁波レーダを使用した床版上面の滞水検出手法について検討を行い、劣化が生じる前に潜在的な劣化箇所をスクリーニングすることで、効率的な道路橋の維持管理の実現に貢献するものである。令和元年度は、実橋を対象として、電磁波レーダを活用し、床版上面の滞水を検知することが可能であることを確認した。

#### <舗装関連>

令和元年度は、移動式たわみ測定装置 (MWD) について、現道の交通状況に応じた測定が可能となるよう新たなドップラセンサを開発した。また、土研構内での検証の結果、FWD により許容たわみ量の目安を超過した箇所の約 80% を MWD でも抽出できることを確認した。また、電磁波伝播速度の推定に舗装道路の特性を活かした点散乱点を利用した手法の応用を図り、0.01m/ns より高精度の推定速度で境界深度の推定が行えることを示した。

### (3) 措置が必要な部位・箇所の優先度決定手法の構築

#### <橋梁関連>

1) 高度経済成長期に建設された膨大な道路橋ストックの高齢化が進む中で、吊橋や斜張橋などの吊構造形式橋梁に用いられるケーブルの腐食損傷は、橋全体系の安全性に極めて大きな影響を及ぼす可能性がある一方、ポリエチレン被覆や塗装などの防食被覆によって覆われていることでケーブル内部の状態を把握するのが容易でなく、ケーブル内部の状態を適切に調査・診断する技術が求められている。そこで、斜張橋やエクストラドーズド橋に用いられるポリエチレン被覆ケーブルを対象に内部の温湿度計測を実施し、温湿度によるケーブル内部の腐食環境評価の可能性について検討した。その結果、PE 被覆の一部に小径の削孔を施して行う内部空隙の温湿度計測とケーブル素線表面の直接目視確認を行うことで、PE 被覆ケーブル内部が耐久性上問題となるような腐食環境となっている可能性を推定することなどに関する知見が得られた。

2) 道路橋は、5 年に 1 回を基本とした定期点検が義務化されているものの、措置の実施率は低く、特に予防保全型の修繕は進んでいない。持続的に橋の機能を保持していくためには、適切な診断を行い、予防保全対策を行いながら円滑なメンテナンスサイクルを実現していく必要がある。令和元年度は、信頼性の高い診断や予防保全対策の推進を目的として、AI を活用した橋の診断に関する検討を行った。適切な診断をするために必要な情報として「診断セット」を作成し、AI を活用した診断システムのプロトタイプ (RC 床版) を開発した。

#### <舗装関連>

令和元年度はひび割れの位置と FWD たわみ量の関係について解析にて分析した。これにより、ひび割れの程度や位置が、FWD たわみ量に及ぼす影響が把握できた。加えて、構造的損傷をもたらす現場条件の因果関係について、過去 40 年程度の主要な文献の記載事項を網羅するとともに、実道で新たに開削調査を実施した知見を統合し、体系的に整理した。さらに、高周波表面波探査の問題点を解消するために、地中レーダにより事前に舗装構造の深度分布を特定する手法の開発を進めた。地中レーダにより路盤厚や路床深度および境界分布の把握が行えることにより、S 波速度の特定精度を向上することができる。

#### <管理用施設 (機械設備) 関連>

土木施設に導入されている各種の土木機械設備は、非常に重要な役割を果たしているが、施設数の増大、老朽化の進行、限られた維持管理予算の相反する条件下で、より適切なライフサイクルマネジメントの導入が進められている。本研究では、機能回復時間等を考慮した信頼性評価による機器・部品の重要度判断や、保全方法の最適化を検討し、それらの総合的なマネジメント手法を確立することを目的としている。令和元年度は、機械設備の故障時からの機能回復能力の定量化方法に関する評価基準の見直しと、設備維持管理業務への活用に向けた検討を行い、「機能回復指標算定マニュアル（素案）」を作成した。

#### **(4) 既往事象・現場条件に対応した最適な維持修繕手法の構築、構造・材料の開発・評価**

##### **<橋梁関連>**

1) 高度成長期に集中的に整備された橋梁が一斉に高齢化を迎える中、さまざまな再劣化要因による損傷事例が報告されており、その一環として既設 PC 橋の補修後における表面被覆工法の性能評価が求められている。令和元年度は、補修後の表面被覆工法の性能を時間経過に着眼して確認するため、塩害対策として補修され 10 年程度経過したのちに撤去された既設 PC 橋を対象に、外観調査、塗膜調査（遮塩性等）、塩化物イオン量調査および中性化深さの調査を実施した。その結果、補修後 10 年程度経過した塗装の性能について、塗装の組成調査結果は調査箇所により異なるが、所定の遮塩性を有していることおよび、塗装による補修時には、表面の塩化物イオン量が最も高く、内部ほど低い傾向であったが、今回調査時には表面より内部の方が高くなる傾向であることなどの知見が得られた。

2) 塗布材料や部位の違いによりコンクリート内部の含水状態が変化し、鉄筋腐食環境に影響を及ぼすことから、補修においては水分等のコンクリート内部の環境状態を制御することが重要になる。表面保護工法による補修設計を高度化し、効果や信頼性を向上させることを目的として、令和元年度は、表面保護工法の塗布部位に関する腐食抑制効果の長期耐久性評価として、供試体暴露 5 年後までの鋼材腐食状況を調査し、塗布部位の影響や含浸材の効果を調べ鉄筋腐食状態への影響を把握した。さらに、実大桁における水分状態の年間変動を観測した。その結果、表面被覆や含浸材の種類と塗布範囲による水分状態の相違によるとみられる腐食抑制効果への影響が把握できるなどの知見が得られた。

##### **<舗装関連>**

つくば市内の舗装を対象に現道採取材を用いた試験から、表面近傍 1cm 程度のアスファルト劣化が顕著であることがわかっており、軽交通道路では、遮水性確保による路盤保護とともに特に表面劣化やひび割れの処置が延命化に直結する。令和元年度は、予防保全が可能となる表面処理工法の適用目安を示すため、損傷段階や交通/環境条件が異なる複数の現道における試験舗装による検証を行った。1.3 年目までの追跡調査からは、下層状態が比較的健全であれば交通量に応じた工法選定により路面機能の維持が可能であることが示唆された。

##### **<管理用施設（機械設備）関連>**

土木施設に導入されている各種の土木機械設備は、非常に重要な役割を果たしているが、施設数の増大、老朽化の進行、限られた維持管理予算の相反する条件下で、より適切なライフサイクルマネジメントの導入が進められている。そこで、機能回復時間等を考慮した信頼性評価による機器・部品の重要度判断や、保全方法の最適化を検討し、それらの総合的なマネジメント手法を確立することを目的として、令和元年度は、点検診断が容易な機械設備構造の検討として、ディーゼルエンジン内の内視鏡診断に関する調査と、設備の凍結による損傷を防止するための水抜き機構の基礎試験を実施し、課題を抽出した。

##### **<管理用施設（接合部）関連>**

コンクリート内部におけるあと施工アンカーの長期的な挙動については、十分に解明されておらず、信頼性の高い耐久性評価手法などの知見が得られていないのが現状である。そこで、各種の環境条件があと施工アンカーの耐力や破壊モードに与える影響を解明し、その評価手法を構築することを目的として、令和元年度は過年度に引き続き、コンクリートのアルカリ成分によるアンカー接着剤への影響を把握するため、水酸化カリウム水溶液への浸せきによるアンカー接着剤の経時変化を評価した。また、湿潤なコンクリート内部でアンカーに持続荷重が作用する場合の挙動や、アンカー接着剤の高温時の挙動について検討した。その結果、各環境下でのアンカー接着剤の接着強度の変化に関する知見が得られた。

道路トンネルのジェットファンの取付け等に使用される金属系あと施工アンカーを主な対象とし、設計、施工、維持管理の合理的な方法の確立を目的として、令和元年度は、持続的な荷重がアンカーの引張耐力に及ぼす影響や、アンカーに吊金具を取り付けた際に生じる軸力の経時変化等について検討を行った。この結果、ジェットファンの荷重が持続的に作用したとしてもアンカーの引張耐力には影響が生じないと見込まれることや、吊金具等を取り付けるときに締付けトルクを管理しても個々のアンカーに導入される初期軸力には大きなばらつきが生じること、この軸力は経時的に低下することなどを明らかにした。

# STUDY ON EFFICIENCY AND IMPROVEMENT OF RELIABILITY OF THE MAINTENANCE CYCLE

**Research Period** : FY2016-2021

**Program Leader** : Director of Bridge and Structural Engineering Group  
KANAZAWA Fumihiko

**Research Group** : Center for Advanced Engineering Structural Assessment and Research  
(Bridge and Structural Engineering Group)  
Innovative Materials and Resource Research Center  
(Materials and Resources Engineering Group)  
Geological and feature ground Engineering Group  
(Chief Researcher for Road Slope Management)  
Construction Technology Research Department  
(Advanced Technology Research Team)  
Road Technology Research Group (Tunnel Team, Pavement Research Team)  
Cold Region Maintenance Technology Research Group  
(Road Maintenance Research Team)  
Technology Development Coordination (Machinery Technology Research Team)

**Abstract** : In this R & D program, major technical problems in each phase of the maintenance cycle (inspection, survey, diagnosis, measures (repair reinforcement)) have been solving. We will also develop maintenance management technologies that respond to diverse management levels, such as consideration of service levels of municipal managed items.

In conclusion, in order to achieve spiral up in the technical aspect of the maintenance cycle and to contribute to securing the soundness of infrastructure, the following objectives were set.

- (1) Development of the maintenance technology corresponding to a variety of management levels (country, cities, towns and villages)
- (2) Development of the efficiency, advancement technology of an investigation, the monitoring by the apparatus utilization
- (3) Development of the priority decision technique of a part, a point needing measures
- (4) Development of the most suitable maintenance repair technique, structure and materials corresponding to past phenomenon, the spot condition

**Key words** : maintenance, structures, materials, tunnel, pavement, machinery

## 6.1 多様な管理レベル（国、市町村等）に対応した維持管理手法の構築

### 6.1.1 先端的維持管理技術による管理用施設（接合部）マネジメントに関する研究

担当チーム：道路技術研究グループ（トンネル）

研究担当者：日下敦、巽義知

#### 【要旨】

道路トンネル内にはジェットファン等の附属物が設置されており、それらの多くはあと施工アンカー（以降、アンカー）により取付金具を介して覆工に固定されている。トンネルの維持管理においては、覆工のみならず、取付金具類の取付状態の点検を行うこととされている。ただし、アンカーに関連した不具合発生時の耐荷力の評価に関する手法は確立されているとは言えず、目視や触診等により経験的に判断しているのが現状である。このような状況を踏まえ、コンクリートの状態が締固め不足であること、およびアンカーを、落下を抑制する構造として定着部を広げた先付けアンカーとすることが引抜き耐力に与える影響について実験により検討した。

キーワード：山岳トンネル、あと施工アンカー、先付けアンカー、引抜き実験

#### 1. はじめに

道路トンネル内ではジェットファン等の附属物が設置されている。それらの多くは、写真-1に示すように、あと施工アンカー（以降、アンカー）により、取付金具（吊金具、方向安定金具、ターンバックルなどの総称）を介して覆工に固定されている。トンネルの維持管理においては、覆工のみならず、取付金具類の取付状態の点検を行うこととされている<sup>1)</sup>。ただし、アンカーに関連した不具合発生時の耐荷力の評価に関する手法は確立されているとは言えず、目視や触診等により経験的に判断しているのが現状である。取付金具類の健全性が不明確な状況で応急的にバックアップ金具を設置して安全を担保する等の事例があり、維持管理における経済的負担の増大が懸念される。

このような状況を踏まえ、本研究では過年度、アンカーの維持管理に資する基礎的な情報を得ることを目的として、アンカー周辺のコンクリートのひび割れやアンカーの打込み状態がアンカーの引抜き耐力に与える影響等を室内実験により検討している<sup>2) 3)</sup>。

アンカーの引抜き耐力に影響する要因としては、他にも施工不良で締固め不足の状態にあることが考えられ、その影響についての検討が必要と考える。また、接合構造に関し、落下を抑制し、維持管理の負担を軽減する構造の検討が必要と考える。そこで、本年度はコンクリートが締固め不足の状態にあること、およびアンカーを、落下を抑制する構造として定着部を広げた先付けアンカーとすることが引抜き耐力に与える影響について実験により検討した。



写真-1 ジェットファンの設置状況の例

#### 2. 実験概要

ケース数は表-1に示す3ケースとした。ケース1は標準として21-12-20Nの配合のコンクリートにあと施工アンカーを設置した。ケース2はケース1と同配合のコンクリートに先付けアンカーを設置した。ケース3はケース1と同配合のコンクリートをバイブレータ無しで打設して表面をコテで均し、あと施工アンカーを設置した。

ケース1、3のあと施工アンカーの実験手順は図-1に示す通り、供試体に削孔した後、金属系あと施工アンカー（スリーブ打込み式、ねじ径M16、スリーブ長60 mm、ステンレス製）を打ち込み、図-2に示す装置でアンカーを引抜いた。なお、削孔長は標準の68mmとした。ケース2の先付けアンカーの実験手順は、先付けアンカー（ねじ径M16、定着部100mm×100mm×9mm鋼板）を深さ68mmとなる位置（図-4参照）に設置した後、コンクリートを打設し、先付けアンカーを引き抜いた。なお、ケース2ではコーン状破壊の面積が広がるのが予測されたため、引抜き装置下部の支圧板は使用せず、受桁は供試体端部に配置した。

供試体の大きさと1体あたりのアンカーの本数は、ケース1、3は図-3の通り、長さ120cm×幅80cm×厚さ30cmの供試体に3本のアンカーを、ケース2は図-4の通り、長さ100cm×幅100cm×厚さ30cmの供試体に1本のアンカーを設置した。試験本数は各ケース3本とした。

材料試験用の円柱型管理供試体の一軸圧縮強さは試験日(材齢13日)において22.3N/mm<sup>2</sup>、材齢35日において28.6N/mm<sup>2</sup>であった。

なお、ケース3の供試体の表面は、標準と同様にコテで均したため、外観は標準と変わらないが、供試体から採取したコアで確認される内部には空隙が多くみられた(写真-2)。供試体から採取したコアの材齢35日の圧縮強度は24.3N/mm<sup>2</sup>であり、管理供試体よりも低い値であった。

表-1 実験ケース

ケース	状態	概要	試験回数
1	標準 (あと施工アンカー)	標準(21-12-20N)のコンクリートにあと施工アンカーを設置	3
2	先付けアンカー	標準(21-12-20N)のコンクリート打設前に先付けアンカーを設置	3
3	締固め不足	標準(21-12-20N)のコンクリートをバイブレータ無しで打設	3



写真-2 締固め不足の供試体から採取したコア

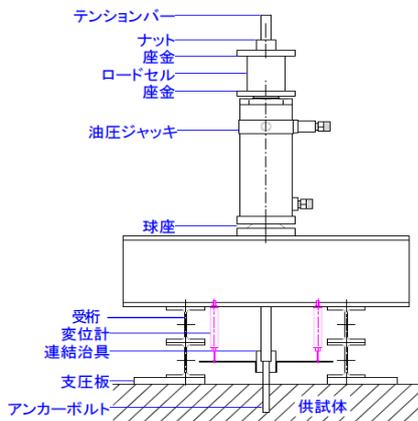


図-2 引抜き装置の概要

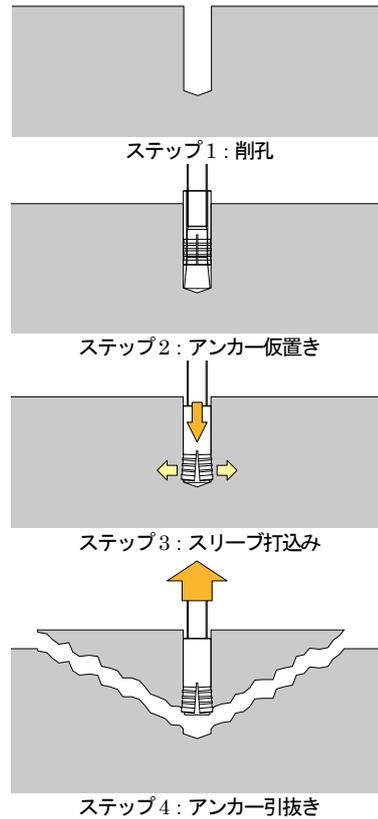


図-1 アンカー引抜き試験手順

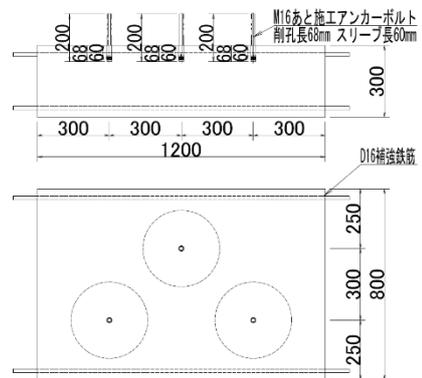


図-3 ケース1、3の供試体製作図

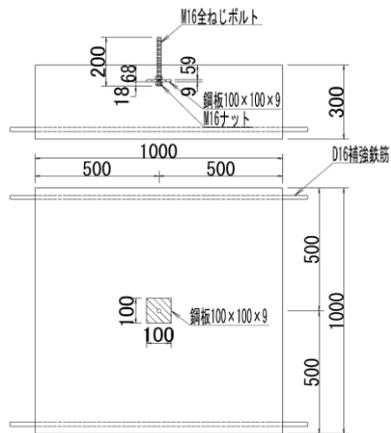


図-4 ケース2の供試体製作図

3. 実験結果および考察

3.1 引抜き耐力

破壊形状は、全ケースにおいて、先行研究 2)3)と同様に図-1 のステップ 4 のようなコーン状破壊となった。引抜き荷重-変位関係を図-5 に、引抜き耐力（最大荷重）を図-6 に示す。

先付けアンカーとしたケース 2 では、引抜き耐力の平均値が 48.8kN となり、標準のケース 1 の平均値 39.8kN に対し 2 割程度増加した。荷重-変位関係の傾きに注目すると、先付けアンカーは他のケースと比較して傾きが大きいものとなった。あと施工アンカーは定着部において、ボルトとスリーブ間やスリーブと孔壁間でクリープが生じるのに対し、先付けアンカーは定着部が強固に固定され、変位が抑えられるためと考えられる。

コンクリートが締固め不足であるケース 3 では、引抜き耐力の平均値が 35.9kN となり、標準のケース 1 に対し 1 割程度減少した。上述した通り、締固め不足の供試体から採取したコアの圧縮強度は管理供試体のものよりも小さく、強度が上がらずに引抜き耐力が低下したことが考えられる。また、コアには空隙が多く見られたため、維持管理において、このような状態が覆工表面や内部に見られる場合は留意が必要と考えられる。

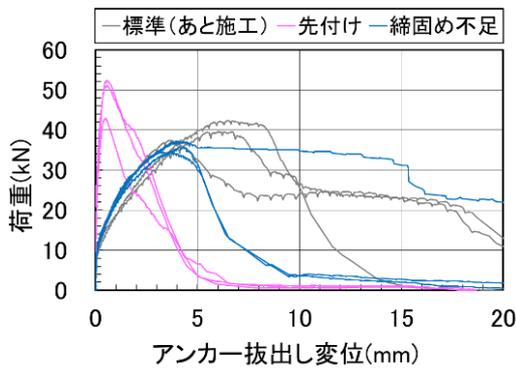


図-5 荷重-変位関係

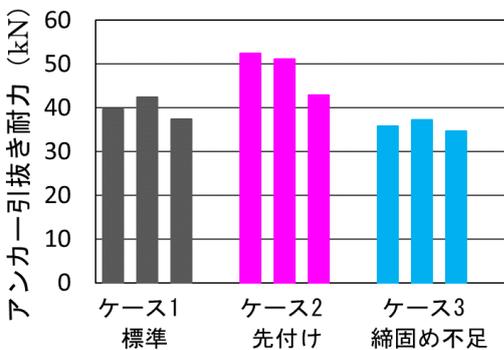


図-6 引抜き耐力

3.2 先付けアンカーの引抜き耐力考察

先付けアンカーの引抜き耐力に関し、あと施工アンカーからの増加の割合について考察する。

文献 4)を参考とした引抜き耐力算定式の式(1)より、あと施工アンカーと先付けアンカーの引抜き耐力の計算値を求めると表-2 の通りとなる。

$$T_c = K_t \alpha A_c \sqrt{f'_c} \quad (1)$$

- ここに、 $T_c$  : コーン状破壊の引抜き耐力
- $K_t$  : 使用期間の長さの影響を表す係数 (= 1)
- $\alpha$  : あと施工アンカーの種類を表す係数 (= 0.31)
- $A_c$  : 母材コンクリートのコーン状破壊面の有効水平投影面積 (mm<sup>2</sup>、図-7参照、  
 あと施工アンカー :  $\pi l_e (l_e + D_a)$ 、  
 先付けアンカー :  $\pi l_e^2 + 400 l_e$  )
- $l_e$  : 有効埋込み長さ(あと施工アンカー:60 mm、先付けアンカー59mm)
- $D_a$  : アンカー本体の外径 (= 21.7 mm)
- $f'_c$  : 母材コンクリートの圧縮強度 (= 22 N/mm<sup>2</sup>)

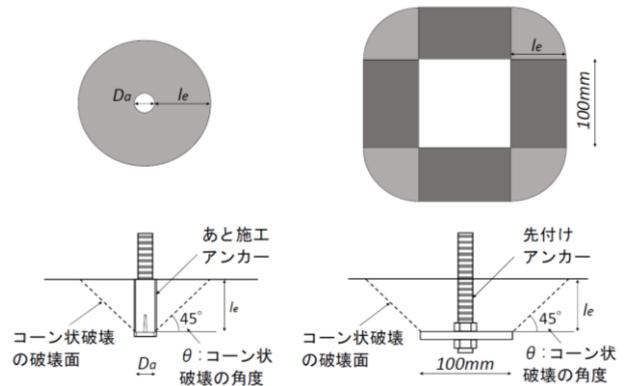


図-7 有効水平投影面積

表-2 引抜き耐力の計算値と実験値

	単位	あと施工	先付け	増加割合	
コーン状破壊の角度	$\theta$	°	45	45	-
有効水平投影面積	$A_c$	mm <sup>2</sup>	15,400	34,536	2.2
引抜き耐力の計算値	$T_c$	kN	22.4	50.2	2.2
引抜き耐力の実験値		kN	39.8	48.8	1.2

あと施工アンカーの引抜き耐力の計算値は実験値より小さく安全側の結果となった。一方、先付けアンカーの計算値は実験値より大きく危険側の結果となった。

引抜き耐力の増加の割合に着目すると、計算値では、引

抜き耐力は有効水平投影面積に比例し、先付けアンカーの引抜き耐力はあと施工アンカーの2.2倍になるのに対し、実験値は1.2倍であり増加の割合が小さい。

ここで、有効水平投影面積を求める際のコーン状破壊の角度に着目すると、算定式ではコーン状破壊の角度を45°として計算している(図-7)。これに対し、本実験でのコーン状破壊の角度はあと施工アンカーと先付けアンカーともに平均20°程度であった(写真-3、-4、表-3)。

コーン状破壊の角度が異なる場合の有効水平投影面積の計算値は表-4の通りとなる。コーン状破壊の角度が小さくなるほど、先付けアンカーのコーン状破壊の有効水平投影面積に関し、あと施工アンカーからの増加割合が小さくなり、20°の値は1.5と実験値1.2に近づく。本実験の先付けアンカーのような定着部を広げたアンカーを用いる際は、コーン状破壊の角度に留意が必要と考えられる。

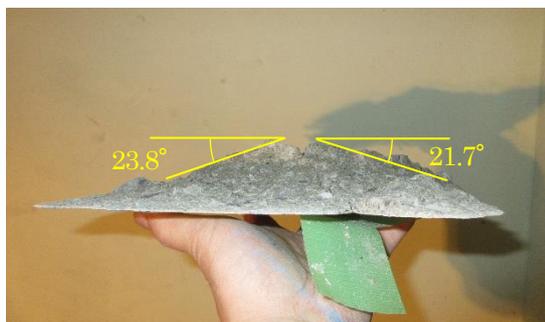


写真-3 ケース1のコーン状破壊の例

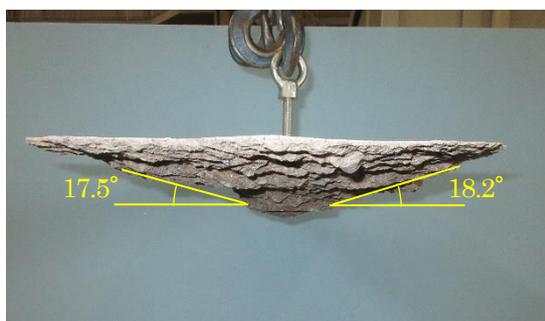


写真-4 ケース2のコーン状破壊の例

表-3 コーン状破壊の角度

ケース名	整理番号	コーン状破壊の角度(°)		
		左	右	平均
ケース1 (標準-あと施工アンカー)	1	23.8	21.7	22.8
	2	15.2	18.4	16.8
	3	26.1	9.5	17.8
			平均	19.1
ケース2 (先付けアンカー)	1	17.5	18.2	17.9
	2	24.7	19.3	22.0
	3	21.4	23.4	22.4
			平均	20.8

表-4 コーン状破壊の角度別の有効水平投影面積

コーン状破壊の角度(°)	有効水平投影面積(mm <sup>2</sup> )		増加割合
	あと施工アンカー	先付けアンカー	
45	15,400	34,536	2.2
30	41,014	73,684	1.8
20	96,611	147,391	1.5

#### 4. まとめ

アンカーの引抜き実験より、コンクリートが締固め不足である場合は引抜き耐力が標準より1割程度減少することを確認した。供試体から採取したコアに空隙が多く見られたことから、維持管理において、このような状態が覆工表面や内部に見られる場合は留意が必要と考えられた。

定着部を広げた先付けアンカーの引抜き耐力については、標準よりも2割程度増加することを確認した。しかし、その割合は算定式から想定される割合2.2倍よりも小さい。算定式で想定されているコーン状破壊の角度(45°)が実験値(20°程度)と異なることが原因と考えられ、本実験の先付けアンカーのような定着部を広げたアンカーを用いる際には留意が必要と考えられた。ただし、本実験結果は限定的な条件における結果であり、今後も引続き検討を進めていく予定である。

#### 参考文献

- 1) 国土交通省道路局：道路トンネル定期点検要領 平成31年2月、pp.14-18、2019
- 2) 日下敦、淡路動太、河田皓介、砂金伸治：トンネル内あと施工アンカーの引抜き試験に関する基礎的実験、土木学会年次学術講演会概要集、第70回、第6部門、No.VI-331、pp.661-662、2015
- 3) 日下敦、小出孝明、砂金伸治：トンネル内の金属系あと施工アンカーの引抜き耐力に関する基礎的実験、トンネル工学報告集、第27巻、1-46、2017.11
- 4) 土木学会：コンクリートのあと施工アンカー工法的设计・施工指針(案)、pp.37-52、2014

## 6.1 多様な管理レベル（国、市町村等）に対応した維持管理手法の構築

### 6.1.2 舗装マネジメントの効率化に関する研究

担当チーム：道路技術研究グループ（舗装）、  
寒地保全技術研究グループ（寒地道路保全）、  
地質・地盤研究グループ（特命）、材料資源研  
究グループ（先端材料・高度化）

研究担当者：藪雅行、木村孝司、齋藤清志、西  
崎到、稲崎富士、寺田剛、丸山記美雄、渡邊一  
弘、尾西恭亮、佐々木巖、星卓見、大浦正樹、  
若林由弥

#### 【要旨】

本研究は、多様な管理レベル下にある舗装を対象に、舗装マネジメントの事例分析や、舗装の構造破損及び路面破損の実態調査、既設舗装の路面性状把握技術の改善等を通じ、新たな路面評価手法を提案することを目的としている。平成 28 年度は、重交通道路については修繕工事前後の路面・構造調査を、軽交通道路においては路面性状データの分析を通じて路面破損の形態について分析を行った。その結果、重交通道路の修繕工法の選定にあたってはコア抜きより有益な情報が得られること、軽交通道路ではボトムアップ疲労ひび割れの発生比率が高いこと等を明らかにした。平成 29 年度は、重交通道路を想定し、アスコン層の内部損傷を模擬した供試体に対する赤外線調査手法を用いた内部損傷の評価手法の検討を実施し、アスファルト層の内部損傷が面的に広がっている個所では、路面温度の日最高温度や日最高温度からの低下傾向が健全部と異なることを把握した。軽交通舗装区間の路面性状を把握する低廉な手法として、車両に搭載した加速度計によって算定した国際ラフネス指数 IRI を活用する手法を検討した結果、計測やデータの表示が比較的容易であり、IRI 値と修繕要否判断との間に関連があることを確認した。平成 30 年度は、軽交通舗装区間の路面性状を把握する手法として自治体管理の幹線及び生活道路の IRI を計測した結果、面的把握に有効な手段であることと、舗装の損傷と IRI 値の間に関連があることを確認した。令和元年度は、路面平坦性を加速度ビッグデータから推定する手法について検討を行った。その結果、閾値を超過する加速度データの割合と IRI 値との間に相関関係があり、加速度ビッグデータから IRI 値が高い箇所の把握ができることを確認した。

キーワード：舗装、構造破損、路面破損、実態調査、コア抜き、疲労ひび割れ

#### 1. はじめに

多様な管理レベル下にある舗装については、その管理レベルに対応した路面評価手法が求められる。そのためには、様々な性格を有する道路の舗装を対象に、損傷の実態を把握することが必要である。

平成 28 年度は、重交通道路については修繕工事前後の路面・構造調査を、軽交通道路においては路面性状データの分析を通じて路面破損の形態について分析を行った。

平成 29 年度は、アスコン層の様々な内部損傷を模擬した供試体を作成し、それら供試体に対して赤外線調査手法を用いた内部損傷の評価手法の検討を行った。

平成 30 年度は、路面平坦性指標 IRI の簡易な計測手法で自治体管理の幹線及び生活道路を計測し舗装の損傷と IRI 値との関連を検討した。

令和元年度は、路面平坦性を加速度ビッグデータから推定する手法について検討を行った。

#### 2. 重交通道路における舗装の損傷実態調査

##### 2.1 背景

平成 28 年 10 月に策定された「舗装点検要領」（以下、「点検要領」という。）においては、損傷の進行が早い道路等に分類されたアスファルト舗装について、表層の供用年数に対する使用目標年数の設定を通じ、早期に劣化した区間に対しては詳細調査を実施した上で適切な措置を選定することが求められている。点検要領に基づくメンテナンスサイクルを運用していく上で、今後はより一層詳細調査の重要性が増してくると考えられる。詳細調査の手法としては、FWD たわみ量調査、コア抜き調査及び開削調

査が点検要領の付録に例示されているが、開削調査は交通規制面等での制約が大きく、現場実務においては FWD たわみ量調査やコア抜き調査が主体になるものと考えられる。しかしながら、それら詳細調査に基づく工法選定が、舗装の構造的健全度の回復度にどのような影響を与えるかはあまり明らかになっていない。

本研究では、コア抜き調査をもとに修繕工法を選定した修繕工事現場にて、FWD たわみ量調査を修繕工事の前後で実施し、舗装の構造的健全度の回復状況に関して実態調査を行った。

## 2.2 調査箇所

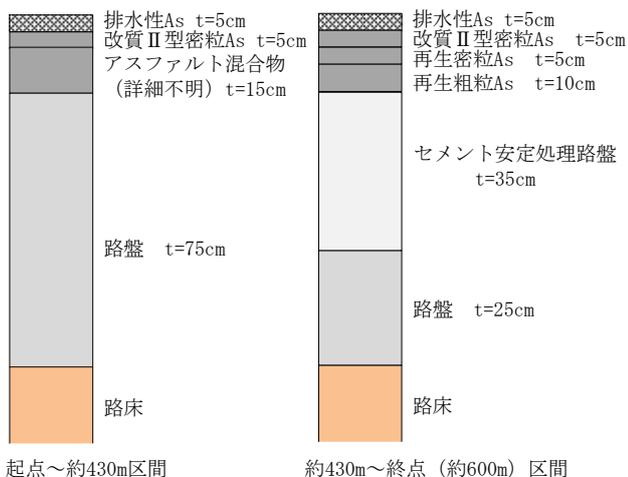


図 2-1 舗装構成

調査箇所は、コア抜き調査結果をもとに修繕工法を選定した修繕工事現場とした。場所は、関東地方整備局管内の直轄国道（往復 2 車線）であり、平成 22 年道路交通センサス<sup>2)</sup>では、大型車交通量は舗装計画交通量 N6 区分に該当する道路である。線形はほぼ直線であり、工事延長は L=約 600m（上下線とも）である。

修繕工事前の舗装構成は、過去の修繕工事の設計図書の情報をもとにすると、起点側から約 430m を境に変化しているものとなっており、その舗装構成を図 2-1 に示す。いずれもアスファルト混合物層（以下、「アスコン層」という。）厚は 25cm であり、また図中の路盤は舗装構成より粒状路盤と考えられる。なお、前回修繕工事は今回修繕工事の 16 年前に実施しており、起点側から約 430m までは 2 層（t=10cm）の切削オーバーレイ、約 430m 以降は舗装打換え（図 2-1 中のセメント安定処理路盤層より上の施工）である。

## 2.3 現場内のコア抜き本数

当該工事現場では、工事着手前に区間内のコア抜き調査が行われている。コア抜き調査は、道路管理者の指示の下、修繕工事受注業者が修繕前の路面の損傷状況を元に調査箇所を選定して実施し、その結果コア本数は下り車線が 11 本、上り車線が 13 本であった。



図 2-2 コア抜き調査結果

### 2. 4 コア抜き調査結果を踏まえた修繕工法の選定

前節に示したコア抜き調査により、アスコン層内の損傷は様でないことが明らかとなった。具体的には、表層の路面側を起点としたひび割れ（トップダウンひび割れ）が中間層までにとどまっているもの、ひび割れからの雨水の浸入に起因すると想定される層間剥離を引き起こしているもの、さらに進行して中間層、基層やアスファルト安定処理層部の混合物自体が剥離を引き起こしているもの、及びアスコン層（ $t=25\text{cm}$ ）を貫通しているものと様々であった。当該修繕現場では、これらの状況を踏まえ、ひび割れ深さが  $15\text{cm}$  以上入っている区間をアスファルト混合物層の全層（ $t=25\text{cm}$ ）打換え、それ以外の区間を 2 層（ $t=10\text{cm}$ ）の切削オーバーレイと修繕工法が選定された。このように、同一現場内でもアスファルト混合物層内部の損傷は様々となりうることを認識しておく必要がある。当該現場のコアの状況を図 2-2 に示す。なお、図中のうち、「アスコン層内部の混合物自体の剥離が進行／ひび割れがアスコン層を貫通」の写真の一部は、コア側面のひび割れ部分のチョークによるトレースができていない。

### 2. 5 修繕工事前の路面性状調査

当該修繕工事区間において、修繕前に路面性状調査を行った。その結果を表 2-1 に示す。これより、上下車線共に損傷は進行しており、また、どちらかと言えばひび割れによる損傷が卓越した区間であることが分かる。実際の現場では、ひび割れの他車輪通過部にわだち部オー

表 2-1 修繕工事前の路面性状調査結果

路面性状		下り車線	上り車線
ひび割れ率 (%)	区間平均	24	31
	最大値 (10m 単位)	69	72
わだち掘れ量 (mm)	区間平均	17	17
	最大値 (10m 単位)	32	46
平坦性 (mm)	区間平均	2.8	3.1



写真 2-1 修繕工事現場の路面状況

バーレイ工（レーンパッチング）の実施箇所が点在しており、日常的な維持管理に苦慮していた様子が観察される路面状況であった。修繕前の路面の代表写真を写真 2-1 に示す。

### 2. 6 修繕工事前後の FWD たわみ量調査

修繕工事前後において、OWP 上で起点から 20m 間隔で FWD たわみ量調査を実施した。上下車線とも、路線の

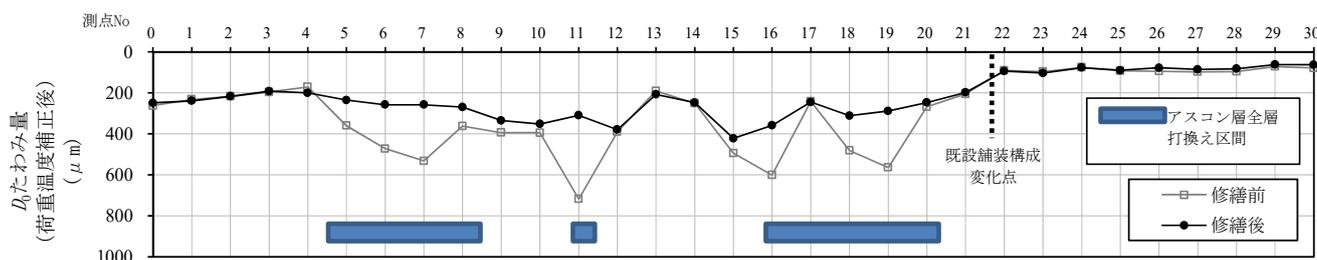


図 2-3 修繕工事施工前後の D0 たわみ量の比較（下り車線）

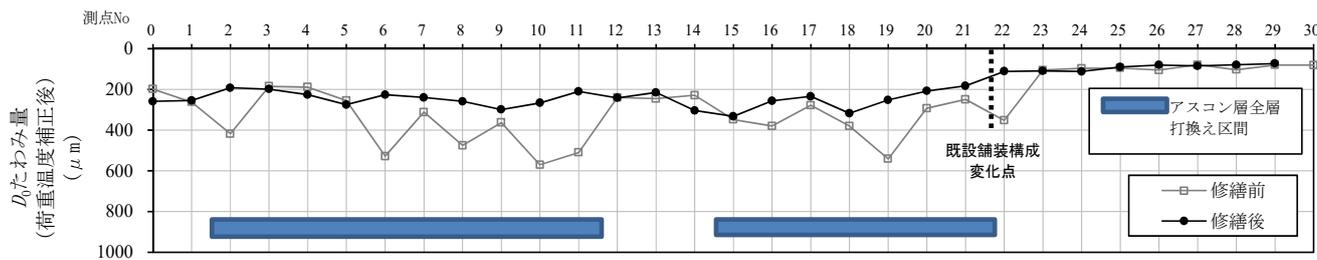


図 2-4 修繕工事施工前後の D0 たわみ量の比較（上り車線）

起点側を測点 No.0 とし、順に 20m 間隔で測点を振り、終点側を測点 No.30 とした。また、FWD たわみ量については、「舗装性能評価法—必須および主要な性能指標編—」<sup>3)</sup>に従い、20°C 換算で補正している。

舗装の構造的健全度として、路床を含めた舗装全体の支持力を示す載荷点直下の D0 たわみ量に着目し、それをグラフ化したものを図 2-3、2-4 に示す。また、同図中には、アスコン層全層 (t=25cm) 打換えの区間を表示している。この表示以外の区間は、t=10cm の切削オーバーレイの区間である。これより、当該現場では、2.4 に示したコア抜き調査によるひび割れ深さに着目した修繕工法の選定が、舗装の構造的健全度の概ね均一なレベルへの回復に大きく寄与したことが分かる。渡邊らは、別の現場にて一律の一層切削オーバーレイを実施した場合の修繕前後の構造評価を行った結果、当該区間内の構造的健全度のバラツキは概ねそのままであったことを報告している<sup>4)</sup>。この報告と照らし合わせると、構造的健全度の回復を目的とする場合は、詳細調査を通じた適切な修繕工法の選定が効果的であることが分かる。この結果については、平成 29 年度の日本道路会議等の場を通じて発表し、路盤の健全性の保護を通じた舗装の長寿命化という舗装点検要領の考え方の普及をはかった。なお、実際の修繕工事は、構造面のみならず路面機能面など様々な理由を勘案し道路管理者が総合的な判断のもとその区間・内容を決定するものであり、本報はその是非を議論するものではないことを申し添える。

当該現場では、多数のコア抜きによるアスコン層内部の損傷確認を実施したが、現場制約条件等から全ての現場で同様の取組を実施することは困難と考えられる。今後は、非破壊で面的にアスコン層内部の損傷状況を把握する手法の検討が必要と考えられる。

### 3. アスコン層内部損傷の評価手法の検討

#### 3.1 背景

前章より、アスコン層内部の損傷状況を把握することが構造的健全度の一律なレベルへの回復の観点から重要であることが明らかになった。コア抜き調査は直接的にアスコン層内部の損傷状況を確認できるが、破壊調査であり、現場制約の条件等から、非破壊で把握する手法が望ましい。

アスコン層内部に損傷が存在すると、アスコン層内に不連続面が存在することとなる。このような不連続面の有無により、太陽の日射によるアスコン層内部への熱伝導の過程が変化し、舗装路面の表面温度に差異が生じることが考えられる<sup>5)</sup>。

早野ら<sup>6)</sup>は、舗装の内部損傷を擬似的に再現した供試体を室内に設置し、ライトにより日照を再現し、その表面温度についてサーモグラフィを用いて観測している。その結果、舗装の内部損傷の有無により、表面温度に差異が生じることを報告しているが、気温、日射量等の気象を再現した環境試験装置内での観測であり、また空港舗装を対象としているため、4時、15時及び22時を想定した時刻での供試体の表面温度を観測となっている。また、前川ら<sup>7)</sup>は、内部損傷を模擬した供試体を屋外に設置して表面温度を観測しているが、これも空港舗装を対象としているため、14時、19時、23時前後での3点の測定となっている。道路舗装は常時一般交通に供しており、時間を定めた定期的な表面温度の観測は通常困難であり、もっとも計測に適した時間帯の検討にあたっては、屋外で直接日射に暴露した状況下にて、よりきめ細かに表面温度を測定し、内部損傷を効果的に把握する時間帯等について検討を行うことが有効と考えられる。

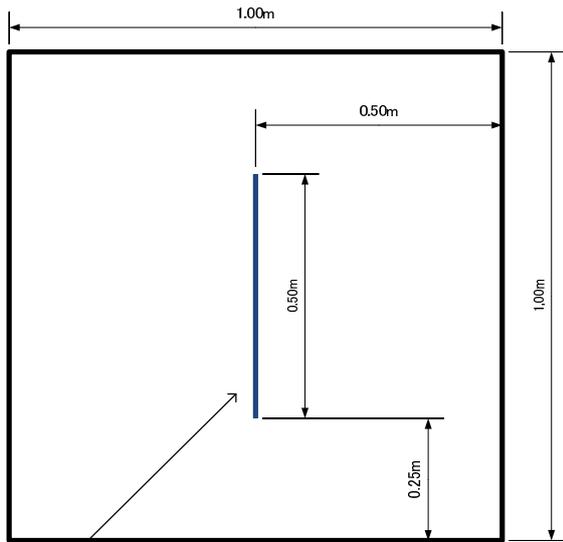
そこで、本研究では、舗装の様々な内部損傷を模擬した供試体を屋外に設置し、サーモグラフィを用いて、その表面温度の経時変化をきめ細かく観測し、内部損傷の存在が表面温度にどのような差異を生じさせるか実験を行うこととした。

#### 3.2 供試体の作成

供試体の作成にあたっては、トップダウンクラックが多いとされる重交通道路を想定し、雨水の浸透によるアスコン層の内部損傷を想定した。具体的には、5cmのアスコン層3層(表層・中間層・基層)からなる供試体とし、供試体・損傷の大きさは図 3-1 および図 3-2 に示すとおりとし、図 3-3 に示す断面を有する8種類の供試体を作成した。供試体の設置場所は、土木研究所舗装走行実験場の構内であり、均一な日射が確保できるような場所を選定している。それぞれの供試体の間隔は50cmとした。

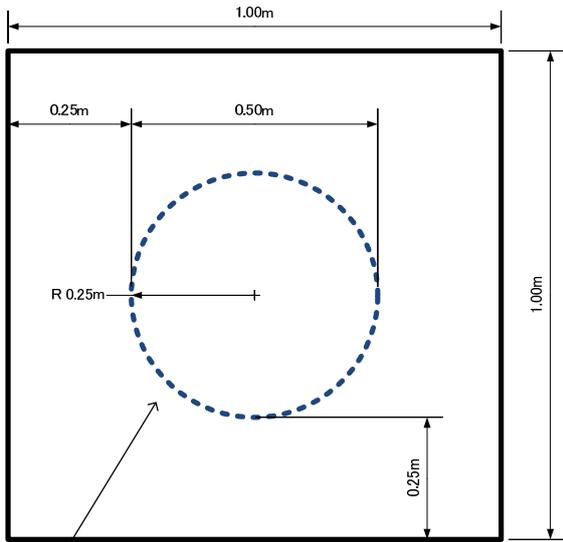
なお、施工基盤は供試体の下に厚さ10cmの粒状路盤を設け、表層用アスファルト混合物は最大粒径13mmの新規密粒度混合物、中間層・基層用のアスファルト混合物は最大粒径20mmの新規粗粒度アスファルト混合物とした。模擬ひび割れは、設置対象とする層の施工時に、厚さ1mmの金属板(写真 3-1)を供試体に差し込みながらアスファルト混合物を敷均し、転圧し、その後に当該金属板を引き抜いていくこととした。中間層の模擬剥離は、半径25cmの円形木枠を供試体中心部に設置(写真 3-2)し、円形木枠の周りにアスファルト混合物を敷均し、転圧し、その後円形木枠を取り外し、設置後に粗粒度アスファルト混合物の骨材配合からなる骨材を敷均し、転圧し、その後の表層

6 メンテナンスサイクルの効率化・信頼性向上に関する研究



模擬クラック

図 3-1 供試体と模擬ひび割れの大きさ



模擬剥離・模擬層間剥離

図 3-2 供試体と模擬剥離、層間剥離の大きさ

を敷設することとした。層間剥離は、供試体中心部に半径 25cm、厚さ 5mm 程度で砂を敷均し (写真 3-3)、その後上部の層を敷設することによって作成することとした。なお、いずれの供試体においても、健全部の層間にはタックコート塗布している。



写真 3-1 模擬ひび割れ作成

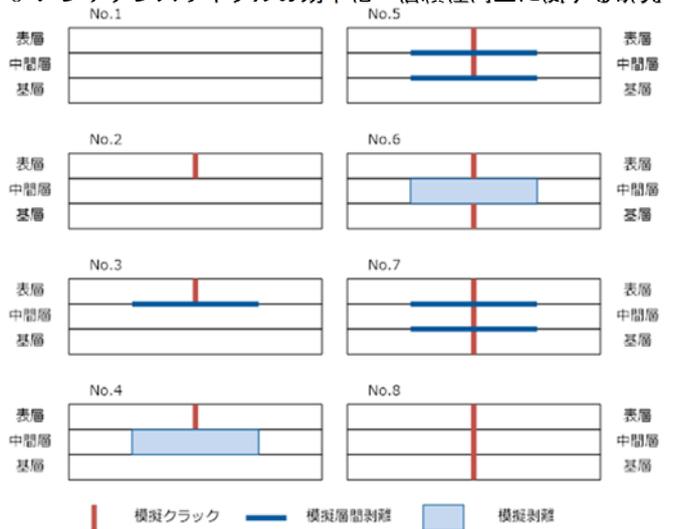


図 3-3 各供試体の断面



写真 3-2 模擬剥離部の円形木枠の設置



写真 3-3 模擬層間剥離作成

3.3 サーモグラフィ評価試験

様々なアスコン層内部損傷を模擬した供試体に対して、サーモグラフィを用いて表面温度の経時変化を 1h 置きに実施した。

使用したサーモグラフィは、現場での適用性を考慮して、安価に入手可能で、かつ可搬性が高いスマートフォンに接続してデータを取得する機種とした。熱画像解像度は 160×120 (155 万画素)、計測温度範囲は -20~400°C、温度分解能は 0.15°C、視野角は 55×43°の諸元を有しているものである。

試験実施日は平成 29 年 11 月 7 日であり、近傍のアメダス観測地点 (つくば (銚野)) の当日の気象データは表 3-1 に示すとおりである。なお、供試体作製後に模擬ひび割れから人為的に水を挿入したところ、層間を使って供試体端部から水の浸みだしを確認し、供試体によってその浸

みだし量はまちまちであった。これは、小さい供試体でありタンパ等の小型機械を中心とした締固めであったため、層間部での付着性にバラツキが生じたためと考えられる。そのため、内部の模擬損傷に雨水がたまっている状態という統一条件での試験の実施が困難であり、供試体が乾燥状態という条件下での比較試験とした。なお、上記アメダス観測地点において、試験前日及び前々日も晴天で降雨量は0mmであり、各供試体の内部は乾燥している状態を保持している状態と考えられる。

表 3-1 試験当日 (H29. 11. 7 の気象データ)

時刻	天気	日射量 (MJ)	気温 (°C)	降水量 (mm)	時刻	天気	日射量 (MJ)	気温 (°C)	降水量 (mm)
0	晴れ	0	5.8	0	12	晴れ	2.15	16.6	0
1	晴れ	0	5.6	0	13	晴れ	2.01	17.6	0
2	晴れ	0	5.0	0	14	晴れ	1.66	18.6	0
3	晴れ	0	4.8	0	15	晴れ	1.14	19.3	0
4	晴れ	0	4.5	0	16	晴れ	0.53	18.9	0
5	晴れ	0	3.9	0	17	晴れ	0.07	13.8	0
6	晴れ	0	3.8	0	18	晴れ	0	12.0	0
7	晴れ	0.14	5.4	0	19	晴れ	0	11.3	0
8	晴れ	0.7	7.6	0	20	晴れ	0	11.6	0
9	晴れ	1.31	10.8	0	21	晴れ	0	10.9	0
10	晴れ	1.8	13.6	0	22	晴れ	0	10.2	0
11	晴れ	2.1	15.5	0	23	晴れ	0	9.7	0

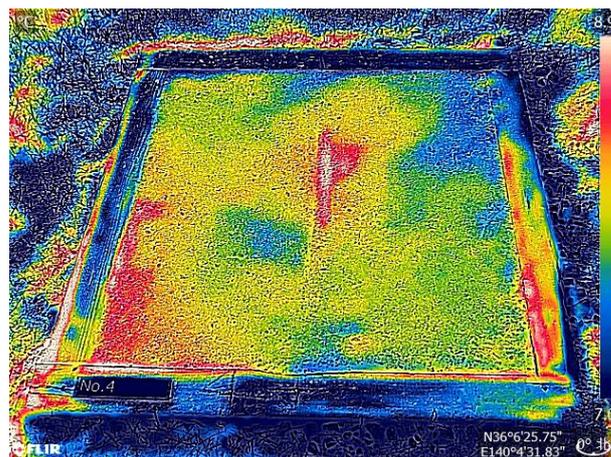


図 3-4 サーモグラフィによる撮影結果の例

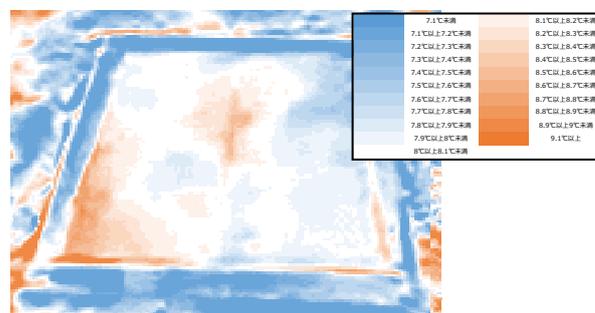


図 3-5 温度分布の処理例

図 3-4 に用いたサーモグラフィで得られた温度画像のデータの例を示す。この温度データの評価にあたり、供試体端部は供試体と熱伝導率が異なる木製型枠が接触している影響を受けていることに留意が必要であることが分かる。その影響を避けるため、ひび割れに沿って幅 20cm×60cm 程度内の表面温度の平均値を基準値として、サーモグラフィの温度分解能である 0.1°C 刻みでグラデーション化した処理の例を図 3-5 に示す。

各供試体の表面温度について、端部から 10cm の範囲を除いた部分 (供試体中央部) の平均温度の最高値及び経時変化を図 3-6、表 3-2 に示す。健全な供試体である No.1 供試体が最も低く、表層のひび割れ模擬、及び表層のひび割れと表層・中間層間の層間剥離ことどまる No.2、3 供試体が次いで低い。その次の低いのは No.8 供試体となるが、No.8 供試体はひび割れがアスコン層を貫通しているのみで、熱伝導の遮断が生じる層間剥離・内部剥離が存在していない影響が出ていると考えられる。それ以外の面的に損傷がひろがっている供試体 (No.4~7) との供試体中央部の最高温度の差は 1.5~2°C 近くにも及び、表面の最高温度の差に着目することにより、面的に広がっている損傷を検知する可能性があることがわかる。

次に、各供試体における供試体中央部の最高温度と 11 時及び 14 時時点の平均温度の差を図 3-7 に示す。この経時変化の傾向も前述と同様、内部損傷が面的に広がっている供試体については、熱伝導が遮断されて表面側に熱がたまりやすい傾向が最高温度を示す前後 2 時間程度で顕著に出ることが分かる。特に、ピークアウト後の表面温度の低下時点で顕著であり、面的に損傷の有無の違いにより、温度差は 2°C~3°C 前後にも及ぶ。

これらのことより、アスファルト層の内部損傷がある箇所においては、健全部との路面温度の違いが、表面温度の最高温度、最高温度からの低下過程で顕著に表れることがわかった。

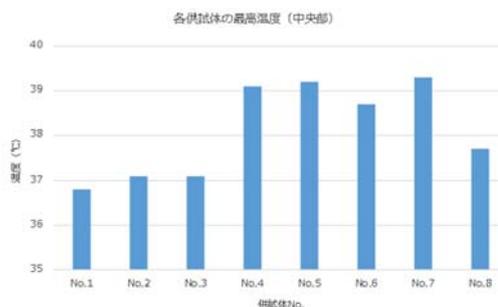


図 3-6 供試体中央部の平均温度の最高値

表 3-2 供試体中央部の平均温度の最高値と推移

時刻	表面温度 (°C)							
	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6	No.7	No.8
7	7.2	8.0	7.7	8.2	7.9	7.4	8.1	7.4
8	10.9	12.0	11.1	14.5	14.6	14.2	14.4	13.7
9	18.3	20.5	19.8	20.6	20.7	20.5	20.9	20.3
10	29.9	30.6	30.2	31.1	30.9	30.9	31.5	30.1
11	33.4	33.6	33.1	34.0	33.8	33.4	34.5	35.2
12	35.9	36.9	37.1	37.7	39.2	38.3	39.3	37.7
13	36.8	37.1	37.0	39.1	38.7	38.7	39.0	37.2
14	34.6	34.0	34.5	34.5	34.1	33.9	34.2	36.4
15	29.6	29.5	29.8	32.7	31.4	31.4	31.9	31.0
16	25.1	24.7	25.2	25.4	24.2	25.1	25.5	25.2
17	19.7	19.2	19.4	19.4	18.4	18.5	20.0	19.8
18	18.4	17.8	18.3	18.2	17.6	17.6	18.0	18.4

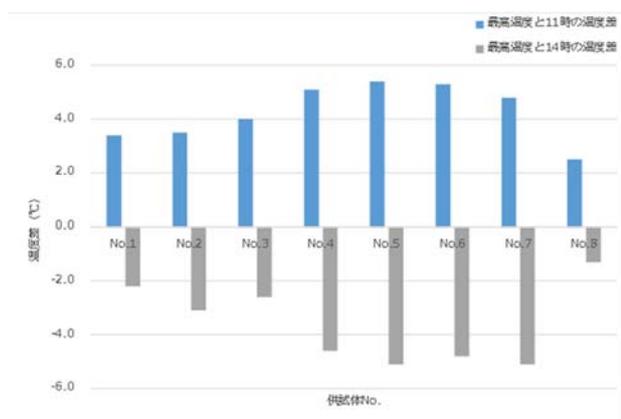


図 3-7 供試体最高温度と 11 時及び 14 時時点の平均温度の差

#### 4. 軽交通道路における舗装の損傷実態調査

##### 4. 1 背景

重交通道路と軽交通道路では、舗装の損傷形態に応じて点検診断時の着目点や維持管理手法が異なる可能性があるため、本研究では重交通道路と軽交通道路の損傷状況の特徴を把握する調査を行った。

##### 4. 2 調査方法

北海道内の国道約 6,500km を対象にアスファルト舗装の損傷実態を把握した。具体的には、現道の目視調査を行って、舗装管理支援システムに記録されているデータの区間毎(約 100m 単位)のひび割れ種類を判別し、どのような種類のひび割れがどのような条件の路線に多いかを調べた。判別したひび割れの種類は以下の 4 種類である。通過車両の繰返し载荷によって発生し舗装下面から上層に向かって伸びるボトムアップ型疲労ひび割れ (以下、ボトムアップひび割れ)、舗装表面から下層に向かって伸びるトップダウン型疲労ひび割れ (以下、トップダウンひび割れ)、路床内の水分が凍結して形成されるアイスレンズが成長することで生じる凍上ひび割れ、気温の上昇・下降に

よるアスファルト混合物の温度応力によって生じる低温ひび割れである。一つの区間に複数種類のひび割れが発生している場合には、複数種類のひび割れが発生している区間として扱った。目視調査のデータを基に、ボトムアップひび割れ、トップダウンひび割れおよび凍上ひび割れに関しては、ひび割れ率が 5.0%以上の区間数を 10km 毎にカウントして地図上に表示した。低温ひび割れに関しては、1km 当たりの低温ひび割れ発生本数をカウントして地図上に表示した。さらに、各々のひび割れが N<sub>4</sub>、N<sub>5</sub>、N<sub>6</sub>、N<sub>7</sub> 交通断面のうちどのような区間に多いのかを整理した。ちなみに本研究では、N<sub>4</sub>、N<sub>5</sub> 交通を軽交通道路区間として扱っているため留意されたい。

なお、調査は自動車専用道路を除く下り車線を対象とし、構造物区間やコンクリート舗装区間など表 4-1 に該当するデータの区間長を除外した上で集計した。これらのデータを除外した理由は、一般的なアスファルト舗装区間に比べて舗装構成や基盤条件が特殊であり、除外するのが妥当と考えたためである。

表 4-1 除外区間一覧 (単位 : m)

項 目	延長(m)
舗装延長	6,584,198
除外区間	
① 構造物	177,348
② 最新ひび割れ率が空欄	109,396
③ 最新調査後に工事	1,331,079
④ 上り・及び自専道	152,190
⑤ 最新調査時からルート変更・通行止め	16,702
⑥ Co舗装区間	135,109
⑦ 累積大型車交通量が空欄、舗装厚不明	127,112
舗装延長 - 除外区間	4,535,262

##### 4. 3 調査結果

図 4-1 にボトムアップひび割れの発生分布図を、図 4-2 にトップダウンひび割れの発生分布図を、図 4-3 に凍上ひび割れの発生分布図を、図 4-4 に低温ひび割れの発生分布図を示す。図 4-1 より、ボトムアップひび割れは、道内の広い範囲に発生しており、主に郊外部において多く発生していることがわかる。図 4-2 より、トップダウンひび割れは札幌近郊と札幌函館間や札幌旭川間などの幹線道路での発生が多い。図 4-3 と図 4-4 より、凍上ひび割れと低温ひび割れは道北地域や道東地域の内陸部に多く発生していることが分かる。表 4-2 には各ひび割れの発生延長及び調査集計区間の延長に対する発生比率を示す。赤枠で囲んだ部分に着目すると、ボトムアップひび割れ、凍上ひび割れ、低温ひび割れは N<sub>4</sub>、N<sub>5</sub> 交通断面などの舗装厚の薄い軽交通路線に多く発生していることが分かる。一方、トップダウンひび割れは N<sub>6</sub>、N<sub>7</sub> 交通断面などの混合物層厚が厚い重交通路線に発生している傾向が見られる。

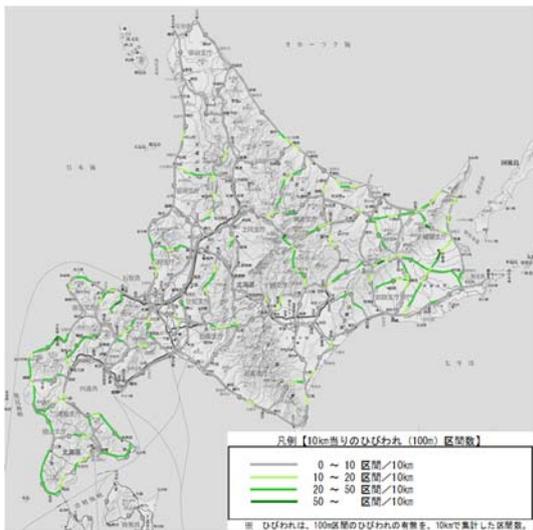


図 4-1 ボトムアップひび割れの発生分布図

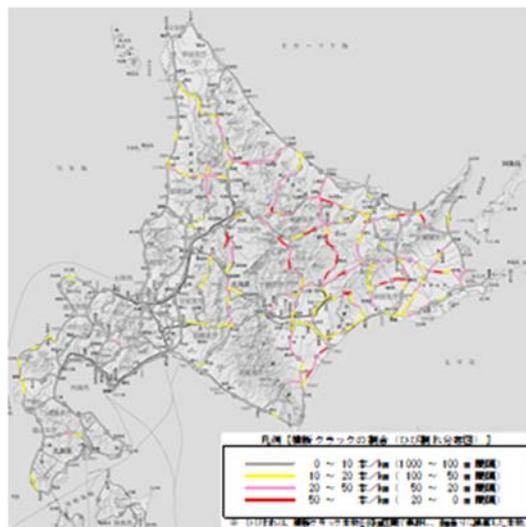


図 4-4 低温ひび割れの発生分布図

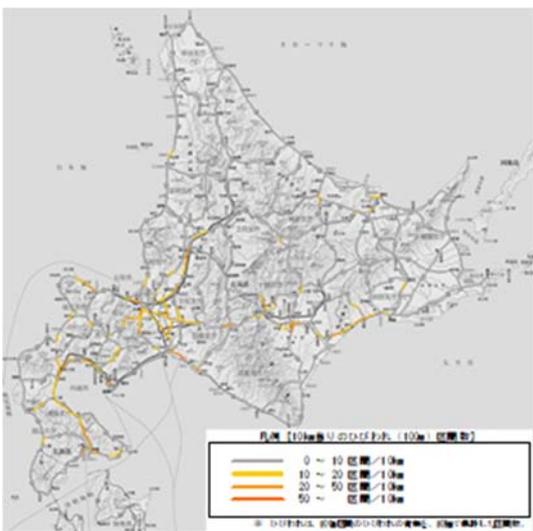


図 4-2 トップダウンひび割れの発生分布図

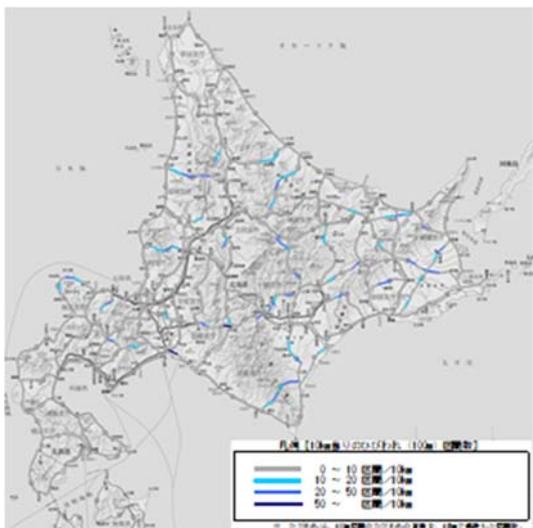


図 4-3 凍上ひび割れの発生分布図

軽交通路線は混合物層厚が薄いため、作用する力に対する抵抗性が小さく、様々なひび割れが発生し易いと推察される。軽交通区間では、特にボトムアップひび割れの発生区間延長が最も長く、次いで低温ひび割れ、凍上ひび割れの順であることが着目される。つまり、軽交通区間ではボトムアップひび割れに対する対処が最も多くなると理解できる。

表 4-2 各ひび割れの発生延長及び調査集計区間の延長に対する比率

交通量区分	As混合物層厚 (cm)	14cm未満	14cm以上 20cm未満	20cm以上 30cm未満	30cm以上	合計
		A	B	C	D	
ひび割れ種別	旧	$N_4$	$N_5$	$N_6$	$N_7$	4,535,262
	調査集計区間の延長(m)	2,557,530	1,353,654	508,295	115,783	
ボトムアップひび割れ	ひび割れ発生区間の延長(m)	336,044	150,288	10,135	932	497,399
	調査集計区間の延長に対する発生区間比率(%)	13.1%	11.1%	2.0%	0.8%	11.0%
トップダウンひび割れ	ひび割れ発生区間の延長(m)	131,273	62,707	46,451	7,845	248,276
	調査集計区間の延長に対する発生区間比率(%)	5.1%	4.6%	9.1%	6.8%	5.5%
凍上ひび割れ	ひび割れ発生区間の延長(m)	112,752	59,233	11,036	113	183,134
	調査集計区間の延長に対する発生区間比率(%)	4.4%	4.4%	2.2%	0.1%	4.0%
低温ひび割れ	ひび割れ発生区間の延長(m)	229,742	105,960	13,781	995	350,478
	調査集計区間の延長に対する発生区間比率(%)	9.0%	7.8%	2.7%	0.9%	7.7%

以上のように、交通断面によってひび割れ損傷の形態は異なっている。N<sub>4</sub>、N<sub>5</sub>交通断面などの混合物層厚の薄い軽交通路線区間に着目すると、ボトムアップひび割れや低温ひび割れ、凍上ひび割れが発生しやすいことが確認された。N<sub>4</sub>、N<sub>5</sub>交通断面などの軽交通路線区間の舗装マネ

ジメントならびに舗装維持修繕計画を考える場合には、これらの損傷形態への対処方法を検討することが大切である。特に、ボトムアップひび割れは広い範囲で発生している実態にあり、今後舗装の老朽化が進行するにつれて増加する性質のひび割れであると考えられるため、要点であるといえる。

5. 目的や道路管理体制に応じた低廉な路面性状調査技術の開発

5. 1 背景

軽交通舗装は供用延長が膨大であるため、その路面性状を把握するための手法は、経済的に安価で手間のかからない手法であることが望まれる。そこで、平坦性指標を活用した低廉な点検調査手法について検討を進めた。



図 5-1 IRI 計測装置搭載車両



図 5-2 IRI 計測路線区間(1)



図 5-3 IRI 計測路線区間(2)

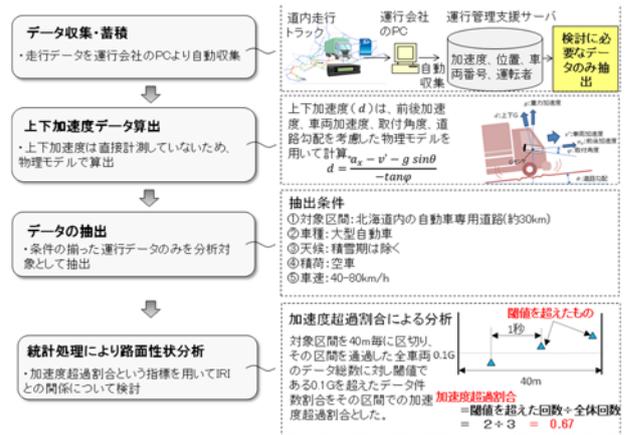


図 5-4 加速度ビックデータによる平坦性推定方法

5. 2 調査方法

車両バネ上およびバネ下に設置した加速度計の加速度値から、リアルタイムで国際ラフネス指数(International Roughness Index、以下、IRD)を計測する装置(図 5-1)を用い、地方自治体が管理する軽交通道路において IRI 計測を実施した。この計測装置は、2 個の加速度計と GPS センサ、アンプおよびデータ処理ソフトを内蔵したモバイルパソコンから構成され、任意の車両に取り付けることができ、走行しながらの計測が可能であることから、計測が非常に容易で短時間で広い範囲を計測できるため、経済的な負担も少ないことが特徴である。計測対象とした路線は、図 5-2 に示す 12 の路線区間及び図 5-3 に示す 24 の路線区間である。図 5-2 の計測路線区間は、道路管理者が修繕を実施する予定の区間と、健全と判断した路線区間があり、IRI 計測を行い、両者の IRI 値にどのような差異が見られるかを解析した。図 5-3 の計測路線区間は、自治体管理の幹線及び生活道路であり、面的な IRI の把握とあわせ IRI と舗装損傷の関係について検討した。

また、大型自動車に積載された機器から自動的に蓄積される上下加速度のビックデータを用いて路面平坦性を推定する方法について、図 5-4 に示す手順で検討を行った。この手法は、運行中の大型車両群から自動的に蓄積される加速度データを統計処理することによって任意の場所での路面平坦性を把握しようというものである。現場での計測作業を行う必要がなく、道路管理者の費用負担軽減や省力化が期待できる。

5. 3 調査結果

IRI を計測した結果は、図 5-5 及び図 5-6 に示すようにマップに表示することが可能であり、どの位置の IRI が悪いのかを視覚的に判別できる。また、図 5-2 に示した健全区間と修繕区間における IRI が 4 以上の割合を図 5-7 に示す。維持修繕が必要と判断された路線区間は、IRI4 以

上のデータ割合が高い傾向にあることが確認された。

図 5-3 に示した区間における実際に舗装が損傷している箇所数と IRI の関係を図 5-8 に示す。IRI 値の高い箇所は何らかの損傷が生じている箇所である傾向にあることが確認された。

路面平坦性を加速度ビックデータから推定する手法についての整理結果を図 5-9 及び図 5-10 に示す。図 5-9 からは、閾値である 0.1G を超過する加速度データの割合(以下、加速度超過割合)と、IRI 値との間に相関関係が確認できた。また、図 5-10 からは、IRI 値が高いところでは加速度の超過割合も高くなっており、加速度の超過割合が高い箇所の延長方向の位置を把握することで、IRI 値が高い箇所の把握ができることが分かる。加速度ビックデータを本手法の手順で統計処理することで、任意の場所や時間における路面平坦性を把握できることが確認された。

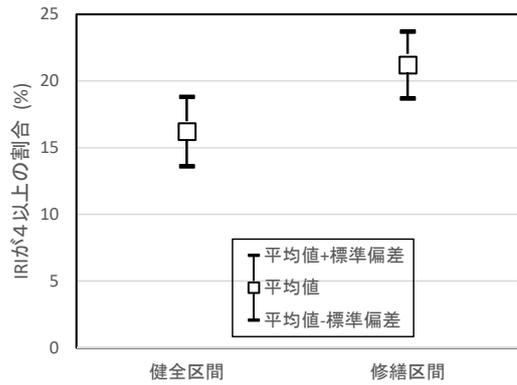


図 5-8 舗装損傷箇所数と IRI の関係

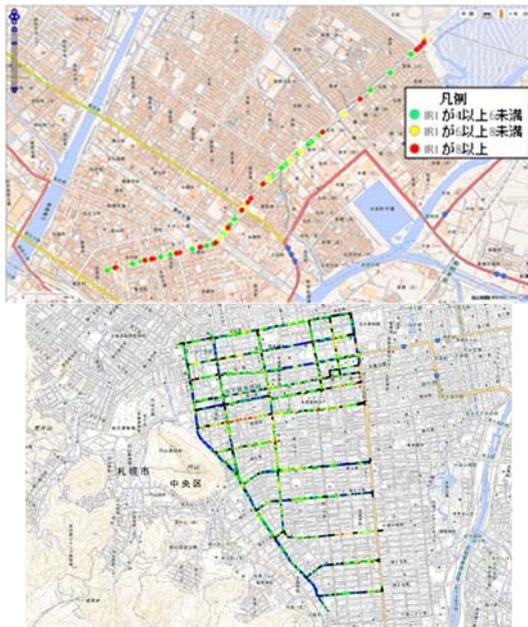


図 5-6 IRI 計測マップ表示の一例(2)

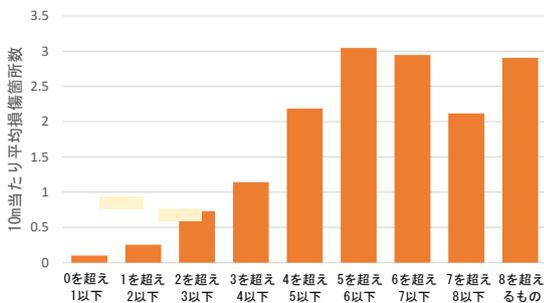


図 5-7 修繕判断と IRI の対応関係

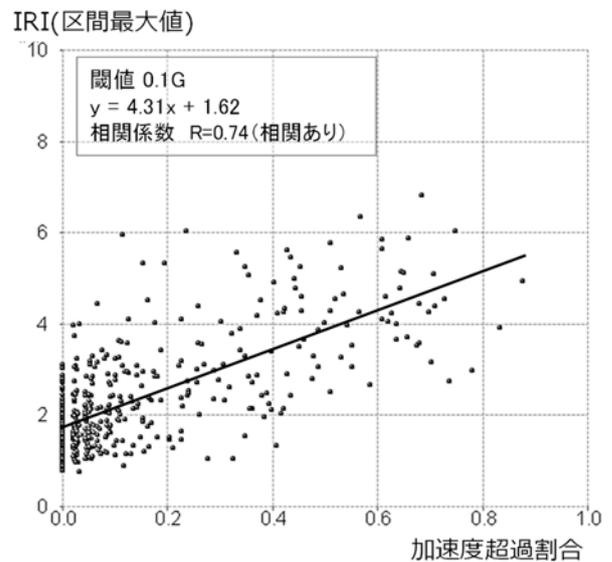


図 5-9 IRI 値と加速度超過割合の関係

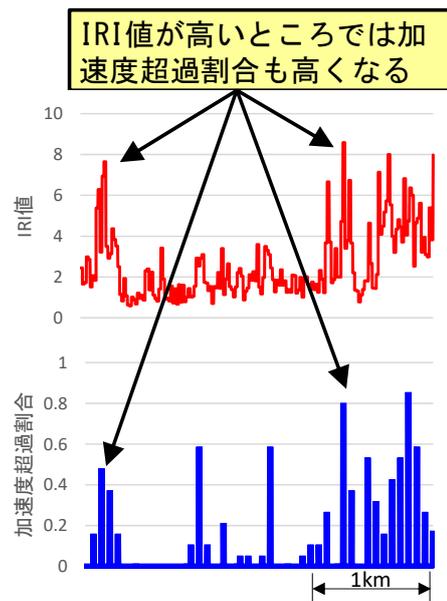


図 5-10 IRI 値と加速度超過割合の位置関係

## 5. まとめ

平成 28 年度においては、重交通道路に該当する、関東地方整備局管内の直轄国道において、コア抜き調査結果をもとにした修繕工法の選定が、舗装の構造的健全度の概ね均一なレベルへの回復に寄与したことを明らかにした。点検要領に基づく舗装のメンテナンスサイクルにおいては、損傷の進行が早い道路等における早期劣化区間について、詳細調査の実施を通じた適切な措置が求められるが、本調査結果により詳細調査としてコア抜きによる舗装の内部損傷の把握の重要性を示唆するものとなった。

平成 29 年度においては、前年度で内部損傷の把握の重要性が明らかになったことより、アスコン層の内部損傷を模擬した様々な供試体を作成し、サーモグラフィを用いた評価試験を行った。その結果、アスファルト層の内部損傷が面的に広がっている個所では、路面温度の日最高温度や日最高温度からの低下傾向が健全部と異なることを把握した。

平成 30 年度においては、軽交通舗装区間の路面性状を把握する手法として、自治体管理の幹線及び生活道路の IRI 計測を行い、面的把握の有効性の確認、舗装の損傷と IRI の関係を把握した。

令和元年度においては、路面平坦性を加速度ビッグデータから推定する手法について検討を行った。その結果、閾値を超過する加速度データの割合と IRI 値との間に相関関係があり、加速度ビッグデータから IRI 値が高い箇所の把握ができることを確認した。

また、路面性状データの分析を通じ、舗装断面によってひび割れ損傷の形態は異なっており、アスコン層の薄い軽交通道路においては、ボトムアップひび割れや低温ひび割れ、凍上ひび割れが発生しやすいことが確認された。舗装のメンテナンスサイクルにおける適切な措置の選定にあたっては、損傷原因を究明・推定することが重要であり、

軽交通道路特有のこれらの損傷形態の整理、軽交通舗装区間における簡易な路面性状把握手法がメンテナンスサイクル上の適切な措置を選定する上で有効な情報となると考えている。今後、引き続き舗装の損傷の実態調査を継続すると共に、非破壊調査による舗装の内部損傷の検出手法の検討等を行う予定である。

なお、重交通道路の損傷実態調査は、(公社)日本道路協会舗装委員会舗装設計施工小委員会の活動の一環で実施したものであり、また道路管理者及び修繕工事施工業者の多大なるご協力の下実施したものである。ここに記して関係各位に謝意を表す。

## 参考文献

- 1) 武藤聡、久保和幸、藪雅行：「舗装点検要領」の策定について、舗装、Vol.52、No.1、pp.11-15、2017.1
- 2) 国土交通省道路局：平成 22 年度全国道路・街路交通情勢調査
- 3) (公社)日本道路協会：舗装性能評価法—必須および主要な性能指標編一、pp.10-19、2013.4
- 4) 渡邊一弘、増戸洋幸、篠塚政則、上島壯：短い測定間隔による修繕前後の構造評価結果、土木学会論文集 E1 (舗装工学)、Vol.72、No.3、pp.177-185、2016.12
- 5) 坪川将丈：空港舗装の設計・維持管理手法の高度化に関する研究、国土技術政策総合研究所研究報告、No.41、pp.4-5、2010.3
- 6) 早野公敏、水上純一、鈴木哲雄：層間剥離を有するアスファルト混合物層の表面温度分布特性に関する実験的検討、地盤工学ジャーナル、Vol.2、No.1、pp.1-11、2007.3
- 7) 前川亮太、蘇凱・水上純一、坪川将丈：空港アスファルト舗装剥離の非破壊探査方法の提案、港湾空港技術研究所報告、Vol.48、No.4、pp.71-87、2009.12

## 6.2 機器活用による調査・監視の効率化・信頼性向上技術の開発・評価

### 6.2.1 既設橋の合理的な性能評価手法および補修・補強方法に関する研究

担当チーム：橋梁構造研究グループ

研究担当者：石田雅博、野田翼

#### 【要旨】

近年、床版上面の土砂化により、床版の抜け落ちが発生する事例が見られる。床版の土砂化は、床版上面から水が浸入することにより促進され、床版下面からの点検では発見することが難しい。そこで、RC床版の劣化メカニズムを整理した上で、土砂化が発生する前に床版上面の水の浸入を検知し、排水や遮水等を行うことにより長寿命化を図ることを目的として研究を実施している。令和元年度は、北海道開発局および東北地方整備局等の橋梁で、電磁波レーダによる水の浸入の検知の試験を実施した。

キーワード：床版、土砂化、電磁波レーダ

#### 1. はじめに

道路橋定期点検要領では、橋長2.0m以上の道路橋において、5年に1回を基本とする近接目視点検が義務化されている。定期点検での既設床版の劣化・損傷状況の点検は、床版下面からの外観目視および舗装面のひび割れの点検によるもので実施されている<sup>1)</sup>。しかし、輪荷重による疲労、材料劣化等による土砂化の要因と定期点検における舗装のポットホールや床版下面のひび割れおよび漏水痕などの外観変状との相関が明確でなく、現状の目視点検では、床版の抜け落ちのリスクを見落とす可能性がある。

床版の設計基準では、建設省道路局長通達(S42)以降、最小床版厚および配力鉄筋量の見直しによる疲労損傷への対策が実施<sup>2)</sup>されているが、スパイクタイヤ規制(H5)以降、凍結防止剤の散布量が増加しており<sup>3)</sup>、塩分を含んだ水が床版へ浸入し、床版下面に変状が発生していなくても、床版上面が土砂化している事例が発生している。写真-1は、供用後10年経過後の舗装開削後の状況である。また、写真-2に5年前の定期点検時には損傷度判定が低く、対策不要と判定されていた箇所が、数年後に床版下面の抜け落ちが発生した事例を示す。このように床版の土砂化は、損傷の進行が速いことが特徴となっている。これらは、路面からの水が床版上面に浸入し、疲労を促進する<sup>4), 5)</sup>だけではなく、凍害、塩害等のコンクリートの劣化を誘発する<sup>6)</sup>ことが原因と推定される。床版上面の滞水は、舗装や床版の変状からその有無を推測することは可能だが、多くの場合には変状箇所の舗装を開削して初めて確認され、この時点で既に床版の性能が著しく低下していることがある。また、変状箇所の舗装開削により局所的な滞水を確認すること

は可能であっても、滞水箇所を面的に把握することはできず、潜在的な劣化箇所を特定することは困難なのが現状である。

膨大な量の道路橋を効率的に維持管理するためには、劣化が生じる前に潜在的な劣化箇所をスクリーニングし、日常点検や定期点検において重点的に点検していくことが必要となる。そこで、非破壊検査技術の一つである電磁波レーダを使用した床版上面の滞水検出手法について検討を実施した。



写真-1 舗装開削後の土砂化が進行した事例



(a) 5年前の定期点検時

(b) 床版下面の抜け落ち時

写真-2 床版下面の抜け落ち事例

## 2. RC床版の劣化メカニズムと予防保全について

### 2.1 床版の劣化状態の定義

本研究における想定される床版の劣化状態の定義を図-1に示す状態①～⑥の劣化段階で定義する。床版では、図-1の車両走行時の輪荷重による劣化に加えて、寒冷地における凍結融解作用や凍結防止剤散布による塩害、骨材の

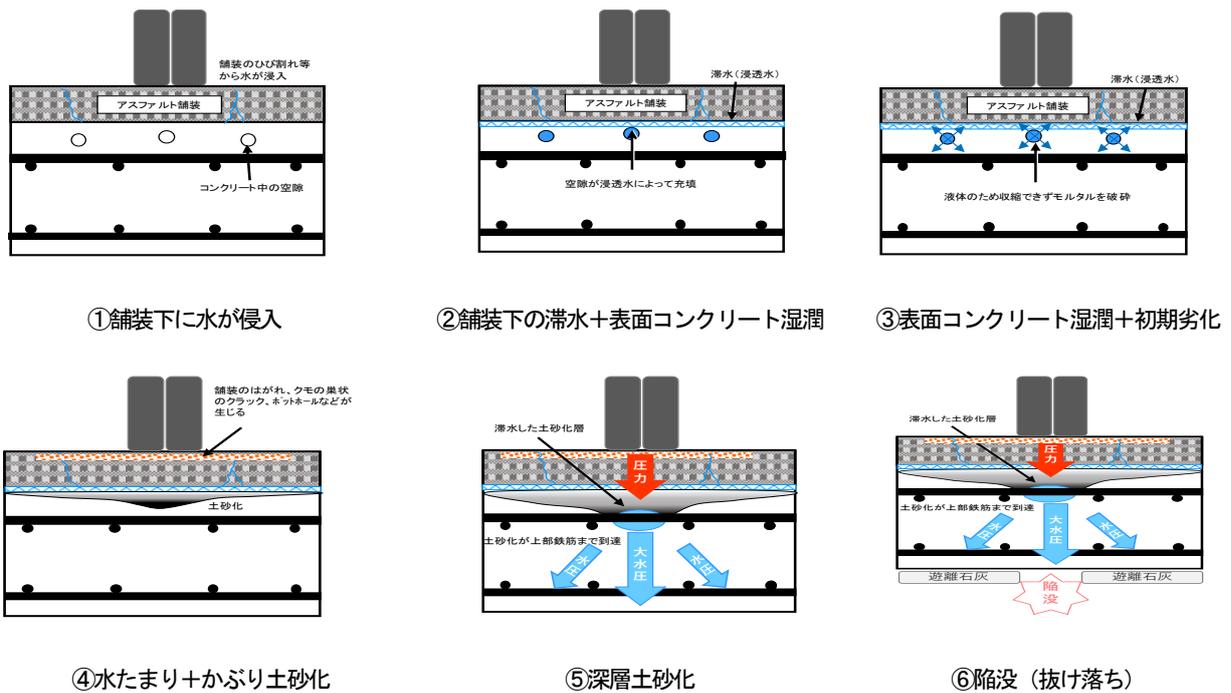


図-1 土砂化 (輪荷重による) メカニズム

アルカリ骨材反応等の複合作用によって、床版上面の土砂化が発生し、最終的には抜け落ちに至る場合があると考えられる。

#### 1) 状態① 舗装下に水が浸入

降雨後に舗装の施工目地や伸縮装置・地覆境界、舗装のひび割れ等から床版上面に水が浸入する。

#### 2) 状態② 舗装下の滞水+表面コンクリート湿潤

排水不良により路面からの浸入水があると、床版上面の滞水および床版上面が湿潤状態になり、空隙が水分でみたまされる状態。排水不良により、路面水が適切に排水されないと、飽和状態が続き、次の状態に進みやすくなる。

#### 3) 状態③ 表面コンクリート湿潤+初期劣化

輪荷重により、充填された細孔空隙中の水圧により周囲のモルタルが破碎され、土砂化が始まる。床版の表面的な劣化や水平ひび割れが発生する。

#### 4) 状態④ 水たまり+かぶり土砂化

床版上面に土砂化した層が広がる。舗装面に舗装の剥がれ、ポットホール、蜘蛛の巣状クラック等の損傷が顕在化する。

#### 5) 状態⑤ 深層土砂化

水平ひび割れにより脆弱化した層が床版厚の半分程度まで広がり、床版上面鉄筋位置まで及ぶ。また、滞水層があると、輪荷重により大きな水圧が生じ、床版上面に土砂化した層が広がる。

#### 6) 状態⑥ 陥没 (抜け落ち)

床版下面に遊離石灰が広範囲に噴出する。土砂化した床版の直下では、突然の陥没の可能性がある。

## 2.2 床版の予防保全に関する診断

土砂化の原因は水で、水がなければ発生しない。予防保全のためには、床版の土砂化した箇所を見つけても手遅れである。床版の予防保全に関する措置が、状態③までの状態で実施できれば効率的なメンテナンスサイクルが実施できると考えられる。また、状態⑤での床版の補修では、土砂化箇所をウォータージェット等により適切に除去する必要があり、架橋地点での条件によっては、大規模な仮設足場や長期間の交通規制を実施する必要があり、補修期間やコストが増大する傾向にある。

床版の予防保全には劣化の主要因である舗装下の滞水箇所の早期検知を行い、浸入経路を診断し、排水・遮水等の予防保全措置を実施することが重要である。このため、電磁波レーダによる床版上面の滞水箇所の検知が可能であれば床版の予防保全診断が可能であると判断した。

## 3. 橋梁床版における電磁波レーダの適用

### 3.1 電磁波レーダ法

電磁波レーダ法は、電磁波が金属以外の媒質を透過し、透過した媒質と異なる比誘電率を持つ媒質の境界で反射する性質を利用し、物質内部を非破壊で探査する手法である<sup>7)</sup>。探査原理は、図-2に示すように、電磁波を媒質中に送信器から放射 (以下、送信波) し、反射した電磁波 (以

下、反射波)を受信アンテナで受信し、反射波が返ってくるまでの時間から深さ方向の位置を推定するものである。平面的な位置は、距離計を内蔵した装置を移動させることにより、位置情報を得る。

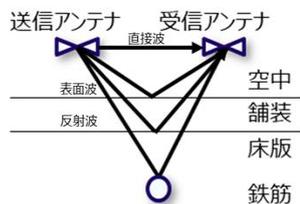


図-2 電磁波レーダ概要

### 3.2 橋梁床版における電磁波レーダの適用

コンクリートの非破壊検査に電磁波レーダを適用することにより、短時間に大量のデータをえることができる。しかし、各種境界面や異なる物質等からの雑信号が目標物からの信号と混合されてしまうため、解析に専門的な知識と経験が要求される。特に橋梁床版部のように、舗装とコンクリート床版の各層別構成材料(媒質)が異なる場合は、各媒質の電気的性質の差により電磁波の位相速度と反射および透過特性等が一層複雑に変化する。そのため、電磁波の基本伝搬特性を事前に整理して検討する必要がある<sup>8)</sup>。

### 4. 電磁波レーダ(ハンディタイプ)による調査と水分量

北海道開発局管内の積雪寒冷地で、冬季期間は路面の凍結防止のため、凍結防止剤を散布している橋梁において調査を実施した。なお、床版防水工は未施工である。

調査橋梁において、路面が健全な箇所と舗装の部分補修箇所の2箇所(写真-3)で、ハンディタイプの電磁波レーダ(周波数2,700MHz)による計測を実施した。計測箇所において、床版の状態を確認するために80cm×80cmの舗装開削を実施した。舗装開削後、床版上面の水分を確認するために、電気抵抗式水分計を用いて床版上面の水分量を計測した<sup>9)</sup>。

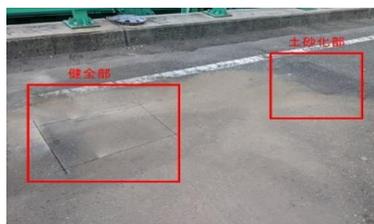


写真-3 調査箇所

#### (1) 健全部

写真-4に示すように、開削後の床版上面は打音点検の結果、健全な状態であることを確認した。水分計のカウン

ト値は103となり乾燥状態であった。

測線に沿った床版の断面を計測結果で確認すると(図-3)、舗装と床版の境界面が白く明確に確認できる。また鉄筋による反射も明確に確認できている。

#### (2) 土砂化部

写真-5に示すように、開削後に土砂化を確認した。水分計のカウント値は663となり、高い水分量を計測した。これは、舗装補修部の施工目地からの水の浸入が疑われる。図-4に電磁波レーダによる計測結果を示す。舗装と床版面の境界面が不連続で不鮮明な箇所があり、一部反射波の振幅が大きく白く表示されている箇所が確認出来る。これは、土砂化した箇所の含水率が高くなり、滞水している可能性がある。健全なコンクリートの比誘電率が6~10程度であるのに比べて、水の比誘電率が81であるため<sup>10)</sup>、境界面での反射波の振幅が大きくなった影響と考えられる。

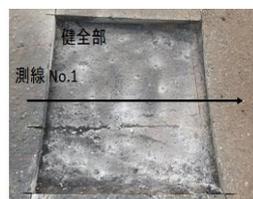


写真-4 舗装開削  
(健全部)

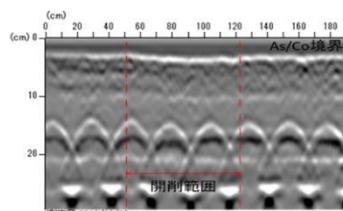


図-3 計測断面図(測線 No. 1)



写真-5 舗装開削  
(土砂化部)

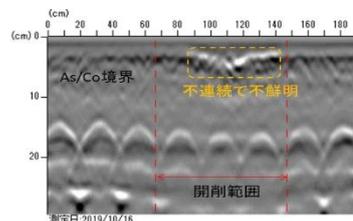


図-4 計測断面図(測線 No. 2)

### 5. 電磁波レーダ(車載式)を用いた滞水箇所の検出

東北地方整備局管内の積雪寒冷地に位置する橋梁にて車載式電磁波レーダを用い計測を実施した。計測は、一般交通の中で路面に向かって電磁波を輻射し、反射信号を受信することで行った。測定速度は、推奨40km/hから最大80km/hであり、計測時に交通規制は不要である。計測システムの外観および仕様について、写真-6、表-1に示す。測定車両には路面撮影用のラインセンサカメラが設置されており、電磁波レーダ計測と同時に路面のひび割れを検出することも可能である。



写真-6 車載式電磁波レーダ外観

表-1 車載式電磁波レーダ仕様

項目	仕様	性能
測定速度	推奨 40km/h	80km/h
距離測定	車速信号取得	精度±0.3%以内
電磁波	マルチステップ周波数方式	200MHz~3GHz
	アンテナ幅 1.8m	有効測定幅員 1.5m
	チャンネル数 21	走行方向 7.5cm 間隔 走行直角方向 7.5cm 間隔 深さ方向 1.0cm 間隔

調査橋梁は、上下線分離の橋梁で調査を実施した。下り線は、平成 24 年に架設された 6 径間連続非合成鋼桁 (H14 道示適用) の橋梁である。上り線が昭和 55 年に架設された 3 径間連続鋼桁 2 連で架設後約 40 年経過した橋梁 (S47 道示適用) である。上り線は、疲労によると考えられるひび割れが床版に生じていたために H23 年に床版防水工及び床版下面への炭素繊維シート補強を実施している。

図-5、図-6 に電磁波レーダ計測結果を示す。それぞれ舗装と床版上面の境界位置での平面スライス画像と平面図の赤線箇所での縦断スライス図となっている。

比較的供用年度が新しい下り線の舗装と床版上面の境界位置での平面スライス画像を確認すると色の変化が少ない一様な反射が取得されることがわかる。縦断スライス図を確認すると、舗装と床版の境界面の反射が確認できる。また、鉄筋の反射が確認できる。

上り線の床版上面位置での平面スライス画像を確認すると、下り線の画像と比較して、白くまだら模様が確認できる。健全な床版を計測する場合、舗装とコンクリートの境界面の反射波を計測する。しかし、舗装下に滞水がある場合、舗装と滞水箇所の水の反射波を計測する。水の比誘電率は 81 と大きく、大きな振幅として反射波を計測する。このため、白いまだら模様箇所は、滞水等の影響により、健全な床版上面での反射に比べて強く反射したためと考えられる。特に白くなっている箇所を確認すると、舗装の打継目、地覆端部や伸縮装置付近に強く反応がでている。縦断スライス画像を確認すると連続した舗装と床版の境界面の反射が連続していない箇所が確認できる。

また、床版上面での強い反射により、電磁波が遮られた結果、鉄筋の反射が確認できない。当該箇所は、舗装の部分補修の実施と、橋面防水工の再施工を実施していたが、調査時に、補修箇所の隣接箇所にて再び泥の噴出が確認され、土砂化が発生していると考えられる。

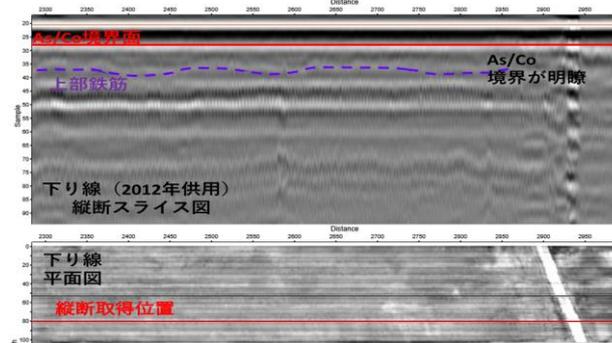


図-5 下り線 (H24 架設) の電磁波レーダ画像

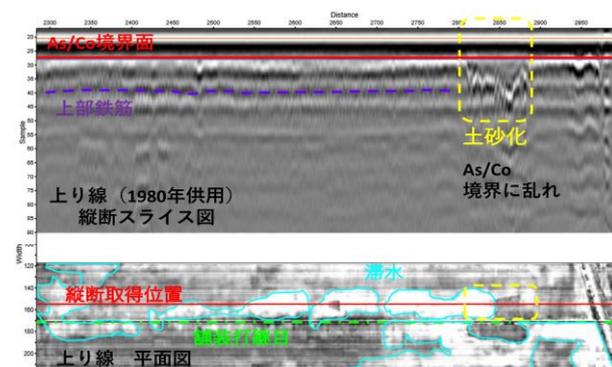


図-6 上り線 (S55 架設) の電磁波レーダ画像

次に同じ東北地方整備局管内の橋梁における調査結果を示す。調査橋梁は、積雪寒冷地に位置する橋梁であり、冬季期間は路面に多量の凍結防止剤を散布している横断勾配 2.0%のプレートガーダー橋である。床版下面には、ひび割れや遊離石灰の析出が確認されている。

写真-7 に路面画像、図-7 に舗装と床版上面との境界面での電磁波レーダによる計測平面図を示す。白いまだら模様が確認でき、床版上面での滞水等の劣化が疑われる。電磁波レーダの計測結果をもとに、床版と舗装の境界面における反射波の最大振幅値と、直接波の最大振幅値の比を、反射強度として表現する。筆者らは舗装開削後の滞水箇所と健全部における反射強度分布を確認し、反射強度分布に明確に差が出ることを確認している。調査結果をもとに、反射強度が 0.26 以上の箇所を滞水箇所と分類<sup>11)</sup>する。図-8 に反射強度による滞水箇所の分類と分布を示す。分布図より、横断勾配が低い側の地覆部、舗装の施工目地、舗装補修箇所周辺に滞水の反応があることがわかる。

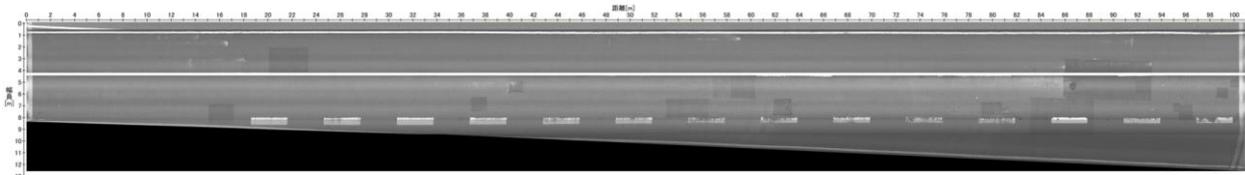


写真-7 路面画像

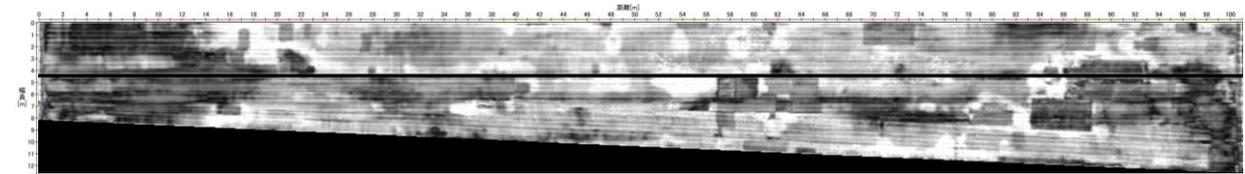


図-7 電磁波レーダ計測平面図 (床版上面)

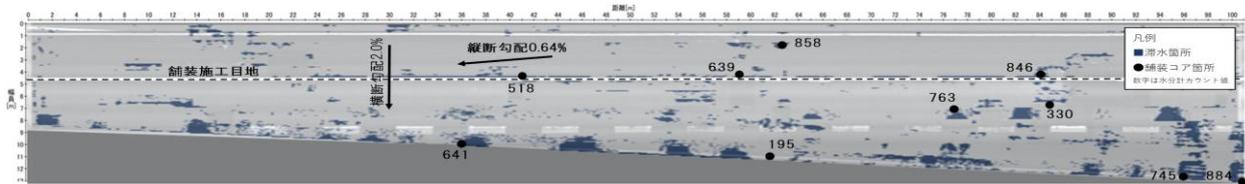


図-8 反射強度による滞水箇所の分類

滞水状態を確認するために、乾式舗装コア抜きを実施し、削孔箇所にて電気抵抗式水分計により水分量を計測した。舗装施工目地箇所での計測箇所や横断勾配の低い箇所の地覆部にて計測値が大きくなった。滞水箇所の分布図とおおむね一致する結果となり、反射強度を抽出することにより、滞水箇所を検出する事が可能であると考えられる。

## 6. まとめ

本研究では、電磁波レーダを活用することによる、橋面上の滞水検出手法としての適用可能性を検討するため、実橋における電磁波レーダによる計測を行った。その結果、舗装と床版の境界面における反射波の信号強度を抽出することにより、床版上面の滞水箇所を検出することが可能であることを確認した。

今後は、追加調査により適用性と精度を引き続き検証していく。

## 参考文献

- 1) 国土交通省道路局：道路トンネル定期点検要領 平成31年2月、pp.106、2019
- 2) 国土交通省国土技術政策総合研究所：道路橋床版の疲労耐久性評価に関する研究、国土技術政策総合研究所資料、第472号、pp.5-6、2008
- 3) 国土交通省国土技術政策総合研究所：凍結防止剤散布と沿道環境、国土技術政策総合研究所資料、第412号、pp.6-32、2007
- 4) 松井繁之：移動荷重を受ける道路RC床版の疲労強度と水の影響について、コンクリート工学年次論文報告書、Vol.9、No.2、pp.627-632、1987
- 5) 阪神高速道路公団、阪神高速道路技術センター：道路橋RC床版のひび割れ損傷と耐久性、1991
- 6) 日本コンクリート工学協会：融雪剤によるコンクリート構造物の劣化研究委員会報告書・論文集、1999
- 7) 小林一輔、魚本健人、加藤潔、広野進：コンクリート構造物の非破壊検査、森木出版株式会社、pp.78-104、1990
- 8) 朴錫均、魚本健人：レーダ法による多層コンクリート床版の非破壊検査のシミュレーション解析、土木学会論文集、No.538、V-31、pp.95-104、1996
- 9) 谷倉泉、榎園正義、後藤昭彦：床版防水工における水分計の適用性に関する研究、構造工学論文集、Vol.59A、2013
- 10) 物理探査学会：物理探査ハンドブック、手法編、1998、第7章、pp.404
- 11) 松本直士、大島義信、野田翼、尾西恭亮、石田雅博：電磁波レーダ法を用いたRC床版の定量的状態判別手法、構造工学論文集、Vol.66A、2020

## 6.2 機器活用による調査・監視の効率化・信頼性向上技術の開発・評価

### 6.2.2 舗装マネジメントの効率化に関する研究

担当チーム：道路技術研究グループ（舗装）、  
寒地保全技術研究グループ（寒地道路保全）、  
地質・地盤研究グループ（特命）、材料資源研  
究グループ（先端材料・高度化）

研究担当者：藪雅行、木村孝司、齋藤清志、西  
崎到、稲崎富士、寺田剛、丸山記美雄、渡邊一  
弘、尾西恭亮、佐々木巖、星卓見、大浦正樹、  
綾部孝之

#### 【要旨】

本研究は、移動式たわみ測定装置や地中レーダを用いた調査手法の改善等を通じ、より効率的な既設舗装の構造的特性の把握技術を提案することを目的としている。平成 28・29 年度は、移動式たわみ測定装置や多チャンネル高速牽引型地中レーダ探査システムの実用化に向け、それぞれ測定値に含まれる誤差の軽減策や測定装置の仕様について検討を行った。平成 30・令和元年度は、MWD における新たなドップラセンサを開発するとともに、電磁波における舗装の境界深度の推定手法を発展させた。

キーワード：舗装、移動式たわみ測定装置、地中レーダ、MWD、GPR

#### 1. はじめに

舗装の維持修繕工法の選定等に当たっては、既設舗装の構造的特性を把握することが求められる。現在、非破壊での構造調査としては重錘落下式たわみ測定装置（FWD：Falling Weight Deflectometer）を用いたものがあるが、各測点での測定であること、交通規制が必要であること等の課題がある。そこで、本研究では、より効率的な既設舗装の構造的特性の把握技術を提案することを目的としている。

平成 28 年度は、移動式たわみ測定装置（MWD）及び多チャンネル高速牽引型地中レーダ（GPR）探査システムの実用化に向け、それぞれ測定値に含まれる誤差の軽減策や測定装置の仕様について検討を行った。

平成 29 年度は、MWD のたわみ計測値の補正方法に関する検討として従来の板バネ車両からエアサスサスペンション車両に測定機器を移設し、車両のサスペンションの違いが取得データに与える影響の検証とドップラー振動計の角度変化による測定誤差を補正する方法を検討した。また、舗装用地中レーダ探査装置の探査性能の安定化改良のための仕様設計および性能特性評価を行った。

平成 30 年度は、MWD の実道での検証を行うとともに、測定値から舗装のたわみ量を算出するための解析プログ

ラムを作成した。また、地中レーダにより路盤の水分率分布の傾向を捉えた。

令和元年度は、MWD について、現道の交通状況に応じた測定が可能となるよう新たなドップラセンサを開発した。また、土研構内での検証の結果、FWD により許容たわみ量の目安を超過した箇所約 80%を MWD でも抽出できることを確認した。また、電磁波伝播速度の推定に舗装道路の特性を活かした点散乱点を利用した手法の応用を図り、0.01m/ns より高精度の推定速度で境界深度の推定が行えることを示した。

#### 2. 移動式たわみ測定装置の実用化に向けた検討

##### 2.1 サスペンションの異なる車両の検討

MWD に使用している車両は、サスペンションにリーフスプリング（板バネ）を使用しており、走行中の振動が非常に大きい。図 2-1 に示すように、路面の凹凸が大きい箇所では車両が振動した際、測定値がセンサの許容レンジを越えてしまうと、測定値が飛んでしまう。現在使用しているドップラー振動計は、測定値に対して低周波の成分を捉えるような処理が行われており、一度値が飛んでしまうと前の値をホールドしたまま数秒間復帰しない。

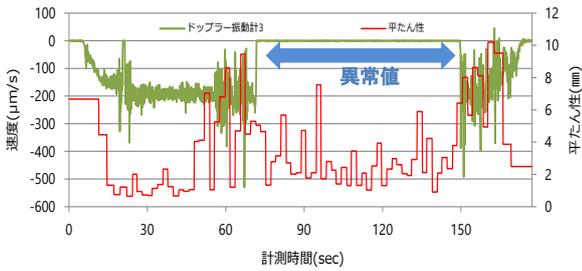


図 2-1 振動による測定値の飛び

この飛びを残した状態で解析を行うと、本来のたわみ量に対し誤差が大きい値が算出されてしまう。

センサの飛びを抑えるためには、センサ自体を改良するか、振動の少ない車両を使用する方法が効果的であると考えられる。そこで、現在の MWD とサスペンションの異なる車両を使用し研究所の外周路を走行し、上下方向加速度について比較を行った。

図 2-2 および図 2-3 に、時速 40km/h で走行し車両の上下方向の加速度およびそのスペクトル解析結果を比較した結果を示す。上下方向の振動については、エアースプリングを用いることで、リーフスプリングを使用時に生じていた高周波の大きな加速度が低減されることが分かる。続いてスペクトル解析結果を見ると、リーフスプリングでは 3.0Hz および 35.0Hz、エアースプリングでは

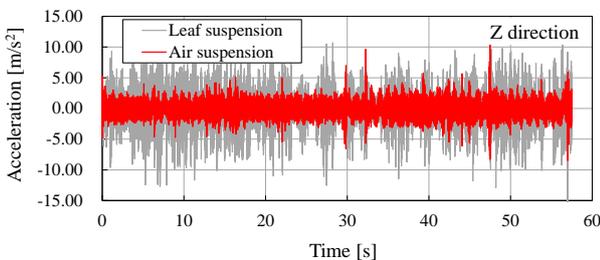


図 2-2 上下加速度の比較

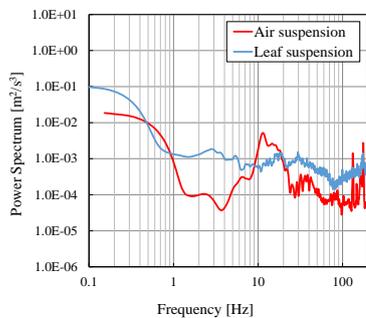


図 2-3 上下加速度のスペクトル解析結果の比較

1.1Hz および 17.5Hz 程度の振動が卓越しており、エア-

スプリングの方が固有振動数は低いものと考えられる。

振動の大きさ自体はエアースプリングを採用することで低減することができ、ドップラー振動計による測定時に測定値の飛びが発生する頻度は少なくすることが出来ると考えられる。

H29 年度は、MWD に使用している車両をエアースプリング車へと変更し、ドップラー振動計による測定値の飛びの発生が抑制できるか検証を実施した。

土研構内での計測の結果、エアースプリング車にすることで、車両の振動成分が小さくなり、ドップラー振動計の飛びが発生しないことを確認した。

2. 3 レーザー変位計による車両姿勢の測定

ドップラー振動計の受信部は、厳密には真下を向いているわけではなく、垂直方向に対して 2~3°程度の角度をつけた状態で取り付けられている。従って、図 2-4 に示すように測定した値には車両の速度成分が含まれており、以下の式(1)に従い、車両の速度成分を取除く必要がある。

$$\frac{dw}{dt} \approx u - v \sin \theta \dots\dots\dots(1)$$

現在は走行中のセンサの角度は一定であるという仮定のもと、測定前に  $\theta$  を求め速度成分を除去しているが、車両は走行中に姿勢が変化するため、 $\theta$  は一定でない。そのため、特に姿勢の変化が大きくなる箇所については特に誤差が大きくなると考えられる。

ドップラー振動計の動的な角度変化を計測するためには、走行中の車両の姿勢を計測する必要がある。

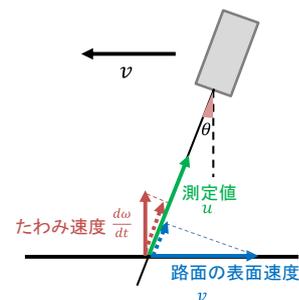


図 2-4 センサの角度とたわみ速度の関係

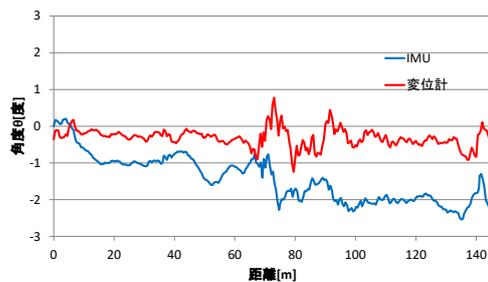


図 2-5 レーザー変位計と IMU の角度比較

計測手法としては、ジャイロセンサを使用する方法が一般的であるが、非常に高価であるため、将来的な実務での適用を考えると費用面での課題がある。そこで、たわみ測定用に設置しているレーザー変位計を用いて簡易に車両の姿勢を測定する方法について、検討を実施した。

検討においては、路面のプロファイルを取得するために3つのレーザー変位計を使用しており、更にIMUによる姿勢計測機能も有するタイプの路面性状測定車を使用した。

図2-5に測定結果を示す。車両の傾きは0.5m間隔で算出した。単純に角度の値で比較するとレーザー変位計による角度とIMUによる角度に一致性は見られなかったが、大小関係の傾向については一定の類似性が見られた。

H29年度は、MWD測定車の車体に設置したレーザー変位計にて得られる車両の傾きが正確に計測できるかを検証するため、土研構内にてMWD測定を実施した。

測定では、式(1)に示す $\theta$ の精度を確認する必要があるため、たわみが発生しない( $u=0$ )連続鉄筋コンクリート舗装を対象とした。式(1)で示す $u$ (たわみ速度)はゼロであるため、 $dw/dt=vsin\theta$ となれば、レーザー変位計で計測した車両の傾きが正確であることを確認できるため、連続鉄筋コンクリート舗装上での計測とした。

計測結果を図2-6に示す。ドップラー振動計にて得られた計測値( $dw/dt$ )と、走行速度成分( $vsin\theta$ )がほぼ一致する結果となり、レーザー変位計にて車両の傾きをほぼ正確に計測できていることを確認した。

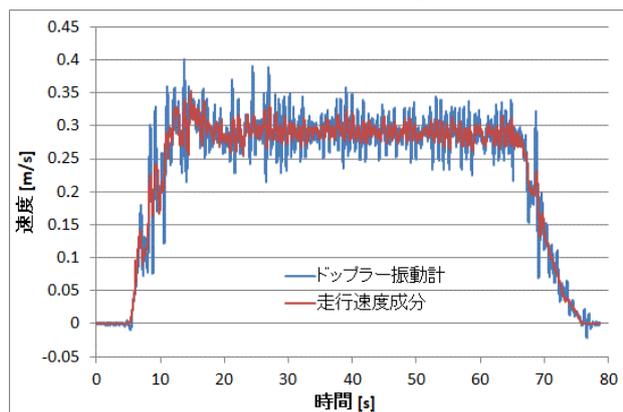


図2-6 たわみ速度測定結果

## 2.4 実道での検証

H30年度はこれまでの検討結果を踏まえ、土研外周路にてMWDによる測定を行い、FWDたわみ量との比較を行った。測定結果を図2-7に示す。たわみ量の小さい箇所ではFWDたわみ量との差異が見られるが、たわみ量

の大きい箇所ではFWDたわみ量との一致が確認できた。また、合計3回の測定を実施しているが、概ね再現性も良好であることが確認できた。

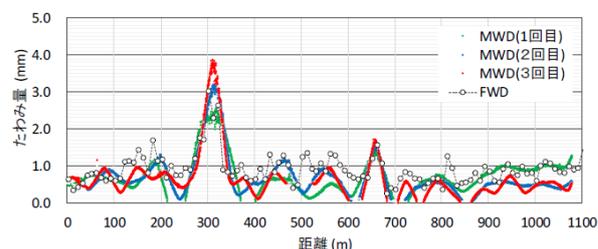


図2-7 MWDたわみ量とFWDたわみ量の比較

## 2.5 解析プログラムの作成

H30年度は、MWDで測定したたわみ速度からたわみ量を算出するための解析プログラムを作成した。これまでたわみ量の算出にあたり、多くの処理が必要となるとともに高度な技術が必要であり膨大な時間を要していたが、プログラム化することにより高度な技術がなくても瞬時に解析することが可能となった。

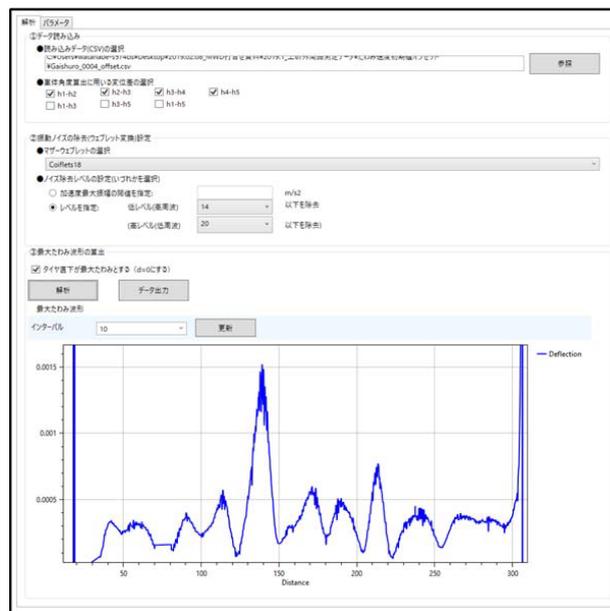


図2-8 MWDたわみ量の解析プログラム

## 2.6 MWDを用いた舗装の健全度評価手法の検討

MWDにより得られた舗装のたわみ量を用いて、舗装の健全度評価手法の検討を行った。

R1年度は、既存知見である許容たわみ量の許容値の目安(以下、「許容値」という。)を参考として、FWD測定結果のうち許容値を超過した箇所において、MWDを用いて抽出可能か検討を実施した。なお、測定は土研外周路で実施し、外周路の舗装断面はN7交通相当で許容

値は0.9mmである。図2-9に舗装の健全度評価の検討結果を示す。検討の結果、FWDにおいて許容値たわみ量を超過した箇所において、約80%をMWDにおいても抽出できていることを確認した。

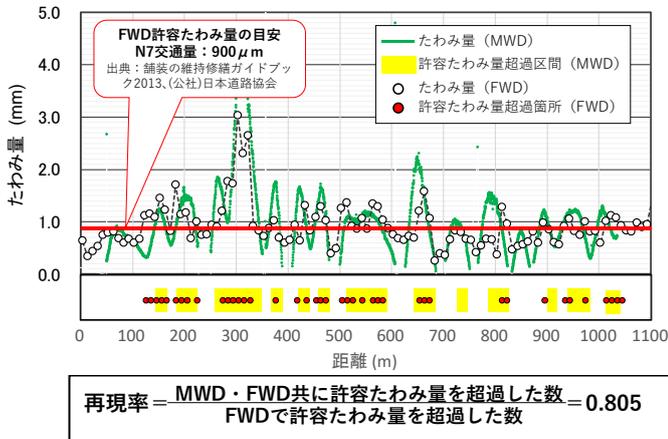


図2-9 舗装の健全度評価の検討結果

### 2.7 MWD測定に適したドップラセンサの開発

既設ドップラセンサは、車両に取り付けて測定した場合、車速30km/h程度以上になると振動の影響でデータ取得が不可能となる等、安定した測定が困難であったため、現道において交通状況に応じた測定を可能となるよう、様々な走行速度での測定が可能なドップラセンサの開発を進めている。

R1年度は、ドップラセンサの試作機（以下、「開発センサ」という。）を制作し、様々な走行速度（20～100km/h）で良好にデータが取得できるか検証を行った。なお、測定は土研試験走路で実施した。図2-10に開発ドップラセンサの測定結果を示す。測定の結果、開発センサを用いることで、これまで測定が不可能であった30km/h以上の車速でも良好にデータを取得できることを確認した。

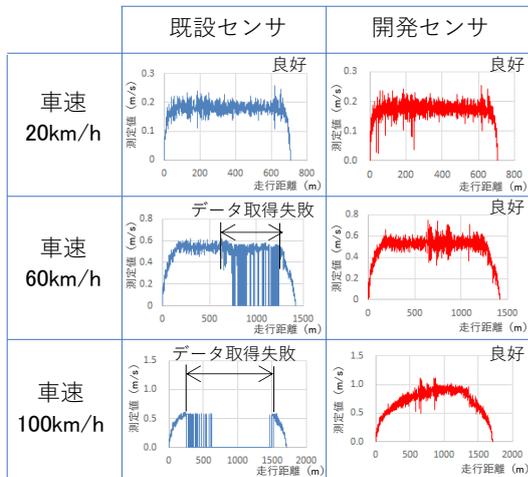


図2-10 開発ドップラセンサの測定結果

### 3. 多チャンネル高速牽引型 GPR 探査システムの実用化に向けた検討

#### 3.1 多チャンネル GPR 実証試験装置

多チャンネル地中レーダの普及が進んでいる。1回の高速度走査で同時に複数の地点における記録を取得できるため、一般交通速度による1～2回の走行で車両道路の1車線分相当を調査可能となる仕様性能を有する。GPR探査の高分解能および高再現性を活かして路盤変状の検出が可能となれば、舗装のメンテナンスに有用な測定手法となることが見込まれる。

一般的に、空洞調査用にはボウタイ型のアンテナが用いられており、舗装道路の表層層厚の測定にはホーン型のアンテナが用いられている。高速走査を実現するために、地中レーダのアンテナ面と道路表面との間にはある程度の距離が存在するケースが多い。しかし、この隙間は強い多重反射を生じる。背景除去処理の適用により多重反射ノイズを抑制することが可能であるが、水平境界からの反射信号の振幅も低下させてしまう。

地表接合型のボウタイ型アンテナによる地中レーダ装置を高速度で走査させて道路の探査が行えれば、ホーン型アンテナよりも深い探査深度の多チャンネルの記録が取得でき、路床を含む舗装道路構造全体の状態の探査には適している。そこで、地表接合型で地上への漏洩電磁波が抑制された設計のボウタイ型アンテナを備えた地中レーダ装置による舗装道路探査の適用試験を行った。

ハンディ型（図3-1）と車両牽引型（図3-2）の2種類の性能評価を行った。どちらも送信器4ch、受振器8chが配置された装置となっている。アンテナ面と路面との間の距離は、ハンディ型はほぼ接触した状態で、車両牽引型は5～10mmに調整されている。

アンテナ配置を図3-3に示す。送受信の組み合わせは32組となり、これらから約75mm離れた異なる地点の送受信記録が計14点同時に取得できる。送受信間隔の異なる記録の取得も可能で、伝播速度の推定が可能である<sup>2)</sup>。電磁波は直交性を有するコード搬送信号の送信方式<sup>1)</sup>であり、一般的なパルスやステップ周波数方式と異なる。現時点では、他の既存方式と大きな性能差は認められないが、今後の開発で同時送信による大幅な探査速度の向上が見込まれる。

多チャンネル記録は、土木研究所内の舗装走行実験場で試験記録を取得した。歩行移動速度と車両移動速度の2種類の探査を行い、どちらもサンプリング間隔は0.1nsで記録を取得した。走査位置はRTK-GNSSにより0.05～0.1秒間隔で測位した。



図 3-1 ハンディ型多チャンネル GPR



図 3-2 車両牽引型多チャンネル GPR

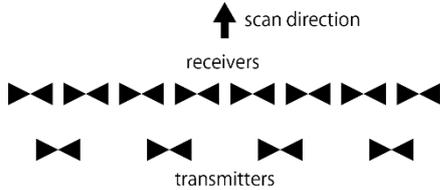


図 3-3 多チャンネル GPR のアンテナ配置

### 3. 2 高速走行試験

試験で用いた多チャンネル GPR の特徴は、アンテナ面と道路路面間の距離が、5~10mm の大変小さな隙間に調整されている点である。このため、アンテナと道路路面との電磁波の伝搬接合が良好となり、空中への損失や多重反射による雑音が抑制される。一方、高速走行により路面の起伏の影響を強く受け、データ品質が変化することが懸念される。

走査速度を変更させて同一地点を探索した記録を図 3-4 に示す。それぞれ、時速 20km と 60km で走行して取得した記録断面である。記録品質として大きな相違は認められず、高速走査においても十分な記録品質で記録が取得できている。

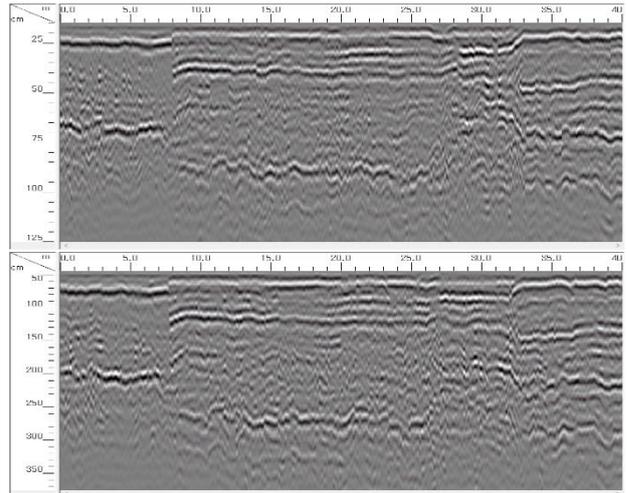


図 3-4 走行速度による記録の相違。上から 20km/h、60km/h で走行時に取得した記録。

### 3. 3 深度スライス断面による埋設物のイメージング

管状埋設物の検知性能を、深度スライス断面で評価する。多チャンネル GPR による記録を図 3-5 に示す。縦断方向のみ 7 回の走査で得られた 98 測線を用いている。探索時間は準備撤収を除いて 10 分程度である。管状埋設物を明瞭にイメージングできている。

多チャンネル GPR では、シングルチャンネル GPR に比べて少ない走査回数で高密度な測線記録が得られることから、縦断方向の記録のみで、横断方向だけでなく縦断方向の管状埋設物の検知に成功している。

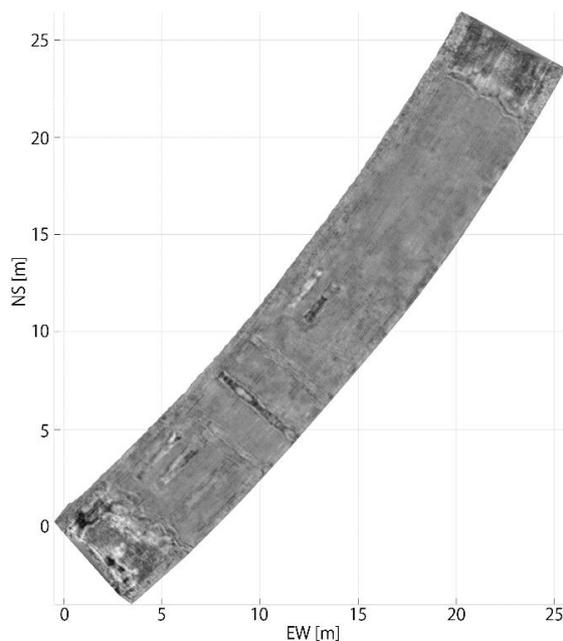


図 3-5 多チャンネル GPR 記録の深度スライス断面による管状埋設物のイメージング

### 3. 4 路盤路床構造の検出

地中レーダ記録にNMO補正を適用し、ゼロオフセットプロファイル(送受信点が同一点にある記録)を作成した。NMO補正には伝播速度分布が必要となる。多チャンネル地中レーダシステムには複数の送受信アンテナが配備されており、異なる送受信間隔の記録を解析することによりRMS(2乗平均)速度を推定することができる。

図3-6に試験地で推定した区間速度例を示す。

図3-7は試験探査のゼロオフセットプロファイル例を示す。探査断面は舗装構造が変化する継ぎ目に相当し、明瞭にアスコン層と上部路盤層の浅部境界を捉えている。ゼロオフセット記録では空中を伝播する直接波の影響が抑制されている。浅部道路構造と比較的深部の路面下空洞を高速走査記録を用いても同時に捉えることができる可能性がある。

クラッシュヤーランと路床、または、アスファルト安定化処理層の間の境界が明瞭に確認できる。一方、クラッシュヤーランと粒度調整碎石層の境界は明瞭な境界を確認することができない。一方、アスコン層と粒度調整碎石層との間の境界は明瞭に確認できるが、アスコン層とアスファルト安定化処理路盤層の間の境界では明瞭な反射イベントを捉えられていない。

同じ道路区間で異なる場所を走査した複数の記録を取得し、地中レーダの3次元データセットを用意した。このデータから水平スライス断面が可能となる。図3-8は表層からわずか12cmの浅部断面例であり、アスコン層下部の水平境界をイメージング可能であることを示している。図3-7の右側は図3-8の北部域(右側)に相当する。南部域の境界は明瞭であるが北部域の振幅は小さいことがわかる。

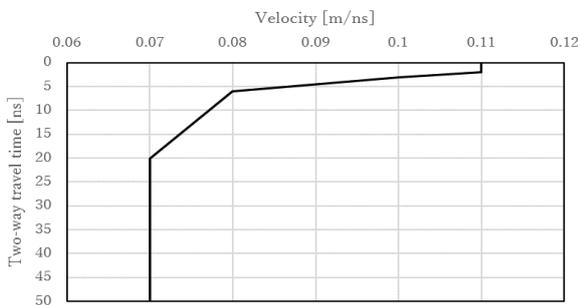


図3-6 舗装道路のRMS速度分布例

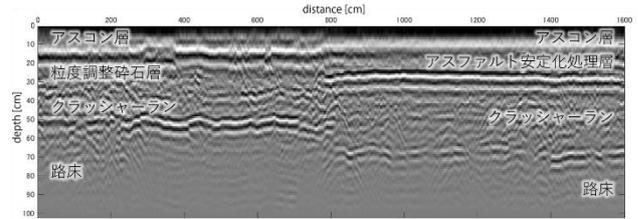


図3-7 舗装道路の記録断面例

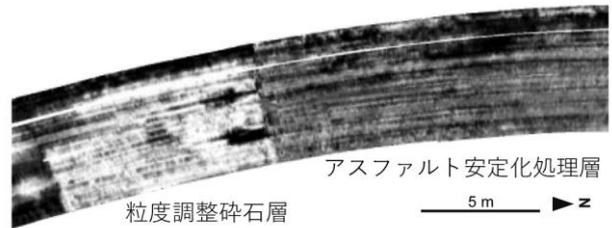


図3-8 舗装道路の深度スライス断面例

### 3. 5 路盤の水分率分布の推定

舗装道路の損傷を促進させる要因に水分が関係していると考えられている。電磁波の伝播速度は水分率と高い相関を有するため、電磁波の伝播速度を求めれば、水分の分布を推定することができる。電磁波の伝播速度は、伝播経路の異なる応答記録の解析により行える。点散乱体の場合は、アンテナの位置を変えて測定した記録を用いることができるが、舗装道路の場合は明瞭な点散乱体が少ないため、送受信点の中心位置は同じであるがアンテナの間隔が異なる記録を用いる必要がある。多チャンネル地中レーダでは、送受信点位置の異なる記録を同時に得ることができ、これを解析に用いた。

図3-7や図3-8の記録と同じ場所の路盤の電磁波伝播速度の推定値を図3-9に示す。電磁波の伝播速度が速いと一般的に水分率が低い傾向があるため、水分率の大きさを平面分布として捉えることができる。ただし、電磁波速度と水分率は線形関係ではないため、水分率の値の推定は室内試験による検証などが必要となり、今後の課題となる。

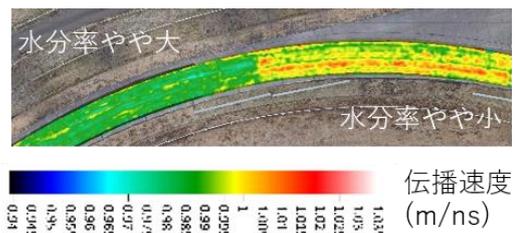


図3-9 路盤の電磁波伝播速度の推定

### 3. 6 電磁波伝播速度の決定手法

舗装道路の構造深度の決定や水分率の推定には、正確な電磁波の伝播速度の決定が必要となる。速度決定手法として、舗装路盤に多数存在する回折波形の利用を提案する。図3-10に適切な電磁波伝播速度に基づく記録断面の補正結果を示す。回折波形はマイグレーション処理を適用することにより散乱点に還元できる。図3-10の下図では3m付近の4つの散乱点が明瞭に還元されている。回折波形を用いることにより0.005~0.01m/nsの精度で伝播速度の決定が可能であることがわかり、深度決定精度の向上を図ることができる。ただし、適切な処理には専門技術が必要となるため、自動処理による速度決定手法の開発に取り組む。また、舗装構造は、アスコン層が0.13~0.16m/ns、路盤が0.10~0.11 m/ns、路床が0.06~0.08 m/nsと、伝播速度に明瞭な相違が存在することがわかり、速度の推定により構成媒質の判別も可能となる。

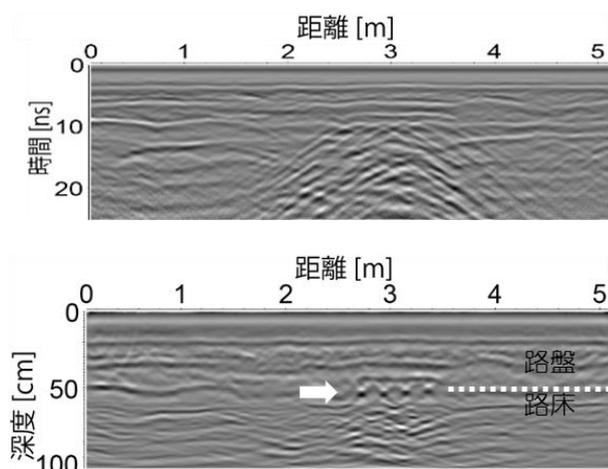


図3-10 適切な電磁波伝播速度による記録断面の補正  
(上：補正前，下：補正後)

### 4. まとめ

MWDの精度向上に向けた検討として、車両のサスペンションによる振動比較とレーザー変位計による車両角度測定の見直しを行った。H29年度は移動式たわみ測定装置の実用化に向け、測定データから車両振動等のノイズの除去しより精度の高い路面のたわみ量を計測する方法

について検討を行った。その結果、車両を従来の板バネ車をエアサスペンション車両とすることにより車両振動等のノイズをより効率よく除去できること、また、車両の傾斜を測定する機器を車両に取り付けて、この車両の傾斜をたわみ量の算定に反映させることにより、より精度の高いデータを取得できることがわかった。H30年度は、実道での検証の結果、FWD たわみ量と概ね一致していることを確認するとともに、解析プログラムを作成し、高度な専門知識がなくても短時間でたわみ量を算出することを可能にした。今後は、実道での計測を重ねる精度向上を目指す。

また、外部への漏洩電磁波が抑制された多チャンネルGPRの仕様設計および性能評価を行った。高速度走査においても低速度時と大きな差異のない良好な記録取得が行えることを確認した。地表接続型アンテナを備えた多チャンネル地中レーダは多重反射が抑制された地中記録を取得することができ、背景除去処理を適用せずに道路内部構造の水平境界を明瞭に捉えることができる。NMO補正はアスコン層下部の浅部境界の特定に有用である。舗装道路を高速度走査で探査可能な、地表接続型のポウタイ型アンテナを備えた地中レーダは、道路内部状態の状態把握に有用である。また、既往の記録に追加解析を適用するだけで、水分率を推定できる可能性が示された。電磁波伝播速度の推定に舗装道路の特性を活かした点散乱点を利用した手法の応用を図り、0.01m/nsより高精度の推定速度で境界深度の推定が行えることを示した。今後は、現場への実装を目的とした技術改良に取り組む。

### 参考文献

- 1) 尾西恭亮、木佐貫寛、Reeves Bryan：地中レーダーの稠密探査記録におけるCMP重合処理、第135回物理探査学会学術講演会講演論文集、pp.80-83、2016.1
- 2) Reeves, B. : Noise modulated GPR: Second generation technology, 15th International Conference on Ground Penetrating Radar, 6p., 2014.6

## 6.3 措置が必要な部位・箇所の優先度決定手法の構築

### 6.3.1 既設橋の合理的な性能評価手法および補修・補強方法に関する研究 (1)

担当チーム：橋梁構造研究グループ

研究担当者：上仙靖、坂本佳也

#### 【要旨】

高度経済成長期に建設された膨大な道路橋ストックの高齢化が進む中で、近年、吊橋や斜張橋などでのケーブル破断による落橋が発生している。吊橋や斜張橋などの吊構造形式橋梁に用いられるケーブルの腐食損傷は、橋全体系の安全性に極めて大きな影響を及ぼす可能性がある一方、ポリエチレン被覆や塗装などの防食被覆によって覆われていることでケーブル内部の状態を把握するのが容易でなく、ケーブル内部の状態を適切に調査・診断する技術が求められている。本研究では、斜張橋やエクストラドーズド橋に用いられるポリエチレン被覆ケーブル内部の温湿度計測を実施し、温湿度によるケーブル内部の腐食環境評価の可能性について検討した。

キーワード：斜張橋、ポリエチレン被覆ケーブル、温湿度、計測、維持管理

#### 1. はじめに

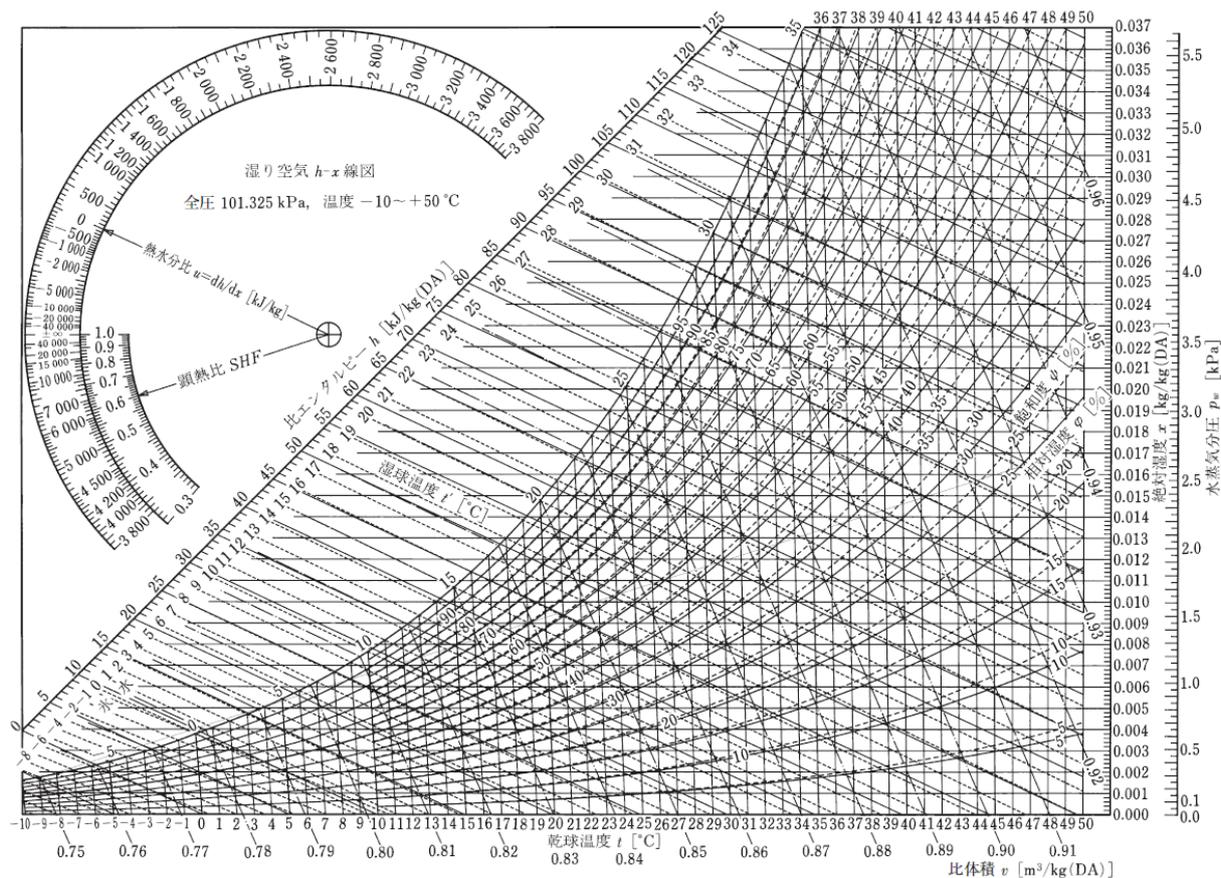
吊構造形式橋梁では、吊材に使用されるケーブルが耐荷性能において重要な役割を担っている。そのため、鋼製ケーブルでは供用中に耐荷性能が損なわれることがないように腐食に対する耐久性能を確保するための措置が施されてきている。防食方法としては、古くより亜鉛めっき鋼線を使用したり塗装によって表面を被覆することが行われてきたが、1989年に建設された横浜ベイブリッジで使用されて以後、工場で全長をポリエチレンで被覆したケーブル（以下、「PE被覆ケーブル」という。）も多くの吊構造形式橋梁で使用されてきている<sup>1)</sup>。

PE被覆ケーブル全長の被覆は、一般に製作工場内の降雨などの影響が排除できる環境において施工されることから、良好な施工品質が得られやすく、用いられるPE被覆そのものが高い環境遮断性能と化学的な安定性を有することもあり、良好で長期にわたる防食性能の維持が期待される。しかし、ポリエチレン被覆そのものは現場での架設中や供用中の飛来物との衝突や擦過、打撃等によって損傷する可能性があり、その場合には被覆の損傷部から雨水等が内部に浸入する可能性も否定できない。このような場合、内部のケーブル素線の状態をPE被覆の上から確認することは難しく、ケーブルの腐食が広範囲に進行してもPE被覆表面には異常が現れないためにケーブルに耐荷性能の深刻な低下が生じて認識できないという課題

がある。過去には、エクストラドーズド橋のPE被覆ケーブルで、素線の腐食が深刻化した結果、外観に変状が確認されることなく供用中に突然ケーブルが破断する事故も報告されている<sup>2)</sup>。

PE被覆ケーブルの内部のケーブル素線の状態を確認する方法としては、被覆の一部を除去して直接目視する方法や被覆を除去することなくケーブル素線の腐食による断面減少量を推測する非破壊調査手法として全磁束法<sup>3) 4)</sup>が実用化されているものの、これらの方法はいずれも既に発生している腐食の有無や進行程度を確認するものであるが、ケーブルを構成する素線の多くで腐食が進行した段階では耐荷性能の回復や素線本体に施された亜鉛めっきなどの防食の補修は困難であり、予防保全の観点からは必ずしも有効な方法とはいえない。

このような背景を踏まえて、本研究は、道路橋に一般に使われているPE被覆ケーブルを対象として、本来閉鎖空間であるはずのPE被覆ケーブル内部が供用後に一貫して密閉性が保持され、雨水の浸入等によって内部の腐食環境に変化が生じていないことを、PE被覆ケーブルの内部の温湿度環境から推定する手法が構築できるかどうかという点を主眼として、これまでほとんど把握されていない実際のPE被覆ケーブル内部の温湿度の変化を継続的に追跡するとともに、その変化の特徴を明らかにすることを試みた。

図-1 湿り空気線図<sup>5)</sup>

## 2. 温度と湿度の関係

橋梁で一般に用いられる PE 被覆ケーブルには亜鉛めっき鋼線が用いられていることが多く、めっきの損耗や鋼線本体の腐食に対する外的要因としてはその表面が曝される温湿度の条件が支配的なものと考えられる。

PE 被覆ケーブルは、工場建屋内部の通常の大気環境下で集束されたケーブル素線周囲に PE 被覆が両端部以外全長にわたりシームレスに形成される。集束されたケーブル素線は相互に密着しているものの通常 19~25%程度の空隙があり、最外層も素線の表面形状がそのまま外周を形成するため、凹凸があり PE 被覆と最外層のケーブル素線の間にも空隙が生じ、素線表面は両端部が密閉されるまでケーブルの置かれた大気と同じ温湿度の空気が空隙を満たした状態となっている。

通常の大気のようにある程度 (通常 1~3%程度) の水蒸気を含む空気は湿り空気と呼ばれ、水蒸気と水蒸気を取り除いた乾き空気の和と捉えることができる。湿り空気の温湿度の状態は、圧力が一定であるとの条件を置くことで、図-1 のような湿り空気線図 (図は、

圧力 1013hPa の場合) で表されることが知られている。図-1 中の乾球温度は一般的に温度、ある温度における飽和水蒸気分圧に対する水蒸気分圧の割合である相対湿度は一般的に湿度と呼ばれるものであり、縦軸の絶対湿度は水蒸気を取り除いた乾き空気 1kg に対する水蒸気の質量である。例えば、25°C で相対湿度 50%RH の空気に含まれる絶対湿度は 0.010kg/kg<sup>6)</sup> であり、最大で相対湿度 100%RH となる 0.020kg/kg<sup>7)</sup> まで水蒸気を含むことができる。また、絶対湿度の変動がない場合、25°C で相対湿度 50%RH の空気は 14°C まで低下すると相対湿度 100%RH となり、さらに温度が低下すると結露が生じる条件となったと判断できる。すなわち十分な容積があり圧力は大きく変動しない条件で、水分の出入りがない外気と遮断された密閉空間であれば、その空間の温度と相対湿度を計測できれば、結露が生じる可能性の程度や結露時間の推定ができる。

## 3. 研究の概要

本研究では、初めに基礎的な検討として PE 被覆ケーブルとの比較を目的に、内部空間が円筒状でか

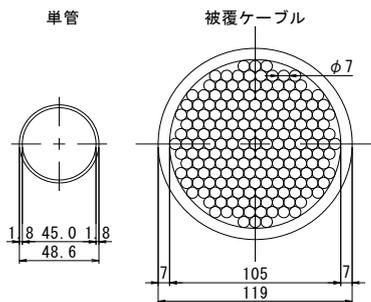


図-2 ケーブル及び単管の断面

表-1 ケーブル及び単管の断面諸元

	外径 (mm)	内径 (mm)	面積 (mm <sup>2</sup> )	鋼線 面積 (mm <sup>2</sup> )	断面当たり の空隙面積 (mm <sup>2</sup> )
ケーブル	119	105	8659	7197	1462
単管	48.6	45	1590	—	1590

表-2 ボタン型温湿度計の諸元

測定範囲	温度	-20℃ ~ +70℃
	相対湿度	0%RH ~ 95%RH
測定精度	温度	±0.8℃
	相対湿度	±5%RH
湿度センサー	高分子静電容量式	
寸法	φ17mm×t6mm	

つ両端の開口部を閉塞することで確実に外気と遮断された状態を作ることができる鋼製単管による温湿度の連続計測を行った。

対象とする PE 被覆ケーブルは道路橋で比較的多く用いられる図-2 に示す断面構成のものを対象とし、これと同等の断面当たりの空隙面積を有する鋼製単管内外の温湿度挙動を把握するとともに、図-2 の断面構成の PE 被覆ケーブルについて長さや外気環境の異なる条件下で内外の温湿度の計測を行い、計測結果の比較を行った。

#### 4. 模擬閉鎖空間における温湿度計測

##### 4.1 計測方法

実際の道路橋で使われている PE 被覆ケーブルの内部は、十分な厚さのある PE 被覆によって高い密閉環境になると考えられる。そこで、初めにそのような密閉空間でかつある程度以上の長さのある空間が斜め配置される条件において、内部の温湿度がどのように変化するかを把握する目的で、「密閉空間」でかつ「空間の斜め配置」という点で条件が明確な鋼製の単



写真-1 ボタン型温湿度計の設置状況

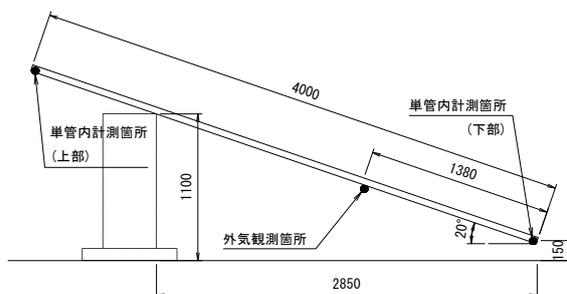


図-3 単管設置状況



写真-2 単管の密閉状況

管を用いた模擬閉鎖空間の温湿度の挙動の把握を行った。

使用した単管は JIS G 3444 (一般構造用炭素鋼鋼管) で、別途計測する PE 被覆ケーブルと断面当たりの空隙面積に近い φ48.6mm、厚さ 1.8mm の断面のものである。ケーブル及び単管の断面を図-2 に、断面当たりの空隙面積を表-1 に示す。

温湿度の計測には表-2 に示す諸元のボタン型の温湿度計 (ハイグロクロン) を使用した。計測期間中は 10 分毎に自動で温湿度の測定を行うよう設定した。

温湿度計は、単管内部計測用には写真-1 に示すようにフィットライトテープ No.738 (以下、「養生テープ」という。) で図-3 に示すように斜めに設置した単管の上下端の内面のそれぞれ下側に設置した。そして単管上下端の開口部にポリプロピレン製のキャップで栓をした上でさらに養生テープ及びポリ塩化ビニル粘着テープを重ね巻きして密閉した (写真-2)。単管の傾斜角度は、斜張橋のケーブルを念頭に、約 20 度とした (図-3)。

表-3 単管での計測ケース

ケース	単管延長	設置環境	計測箇所	水の有無	計測期間
P4.0内U無	4.0m	屋内	上部	無し	2018/6/7~11
P4.0外U無	4.0m	屋外	上部	無し	2018/6/13~15
P4.0外L無			下部		
P1.8外U有	1.8m	屋外	上部	有り	2018/7/18~23
P1.8外L有			下部		
P4.0外U無W	4.0m	屋外	上部	無し	2019/1/8~18
P4.0外L無W			下部		



写真-3 設置環境の屋内で用いる倉庫



写真-4 設置環境の屋内で用いる倉庫の内部

#### 4. 2 計測ケース

種々の環境下における温湿度の挙動を把握するため、単管延長、設置環境、計測箇所、計測開始時点で液体として存在する水の有無をパラメータとして、表-3に示すケースで実験を実施した。なお、表-3中の設置環境の屋内は、写真-3、4に示す大型倉庫（縦30m×横30m×高さ14m、茨城県つくば市）内であり、倉庫外に暴露した屋外と異なり、直射日光や降雨や風の影響のない環境である。なお、倉庫内は実験期間を通して換気や空調設備等による人工的な温湿度操作は行っていない。

#### 4. 3 計測結果

##### (1) 単管内部に水がない場合の温湿度計測

単管内部に事前に液体の水を入れない状態で計測を開始した条件で屋内に置いた単管内部（ケース P4.0内U無）と外気（単管近くの屋内空間）の温湿度の計測結果を図-4に示す。計測期間中に両者とも約10度

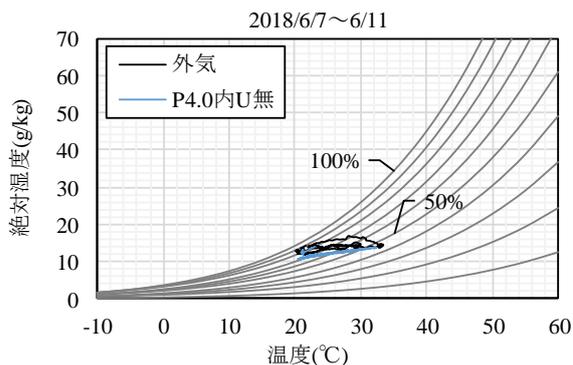


図-4 ケース P4.0内U無での計測結果

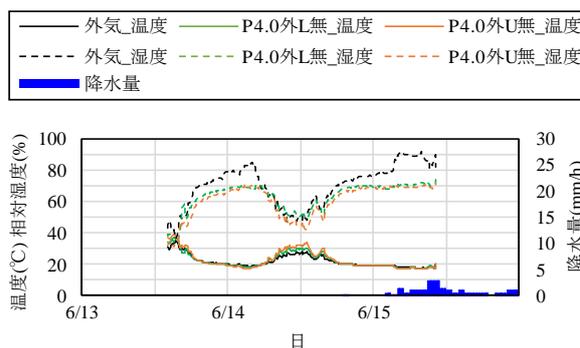


図-5 ケース P4.0外L無・P4.0外U無の温湿度の経時変化

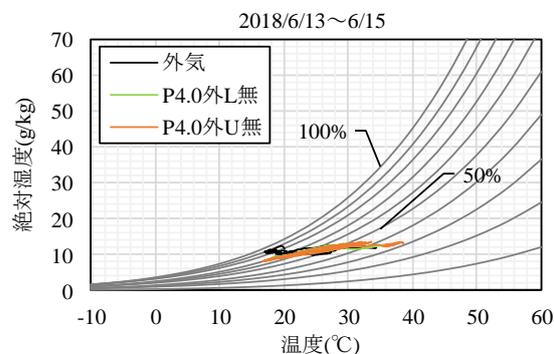


図-6 ケース P4.0外L無・P4.0外U無での計測結果

の温度変化が計測された。この間、単管内部では温度に関係なく、絶対湿度はほぼ一定値が計測されており、相対湿度も100%に至っておらず、単管内外で水蒸気の出入りや結露は生じていなかったと考えられる。

単管を屋外環境に置いた場合の計測結果を図-5、6に示す。図中の降水量は気象庁による「つくば」の観測データである。なお、単管表面が直射日光や風に晒されることなどから、単管内部の空気の温湿度の計測値が位置によって異なる可能性があるため、斜めに設置した4.0mの単管の上端に近い部位と下端に近い部

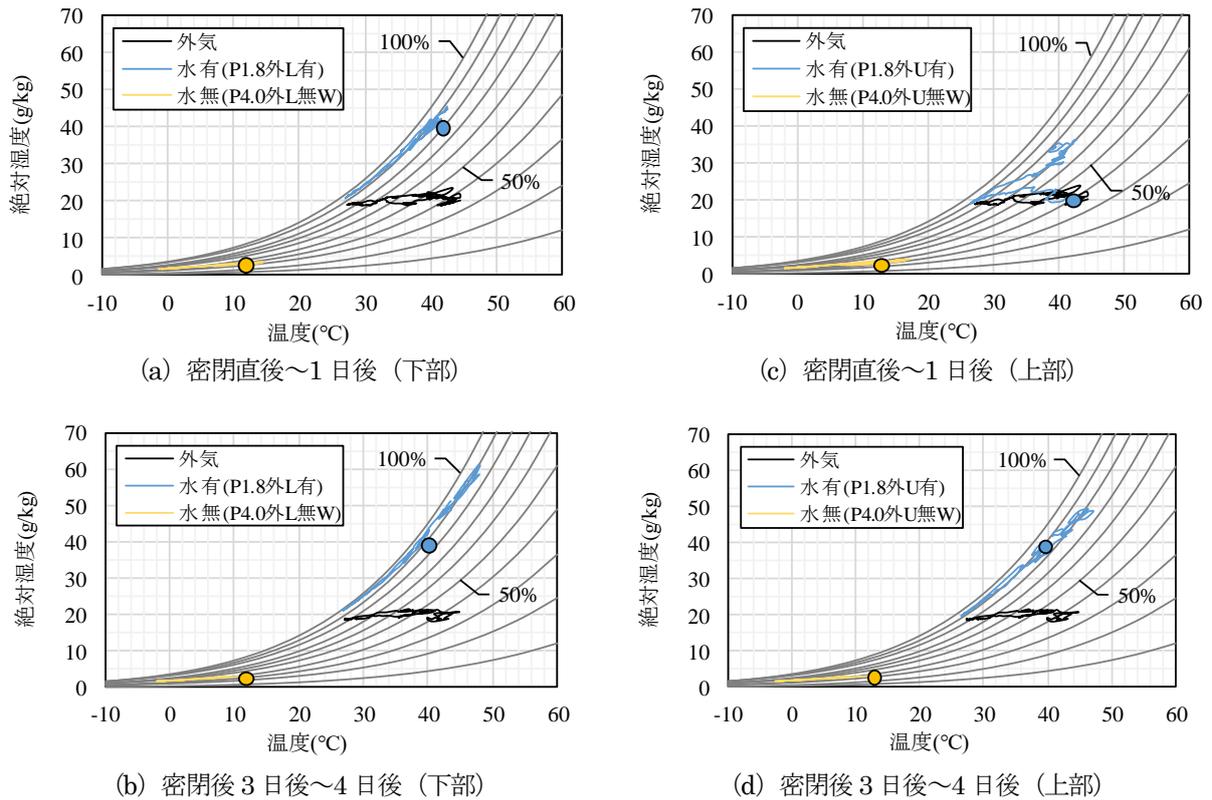


図-7 ケース P1.8 外 L 有・P1.8 外 U 有及びケース P4.0 外 L 無 W・P4.0 外 U 無 W での計測結果

位の 2 箇所に温湿度計を設置して計測を行った。

図-5 に示すように、外気は計測期間中に 20℃以上の変化があったが、日の最低温度付近では外気と単管内部の温度が概ね一致している一方、日の最高温度付近では単管内部の温度が外気を上回っており、直射日光の影響を受けることや密閉されていることで外気より大きな温度変化が生じる環境になると考えられる。

図-6 に示すように、単管内部の絶対湿度は、上下部いずれも計測中は温度に関係なくほぼ一定で推移しており、単管を樹脂栓等で密閉して斜め配置する本実験方法で斜張橋の斜ケーブルの一部を模擬した密閉空間が再現できていると考えられる。なお、単管上下端の温湿度の計測結果は 4m 長さの本実験ではほぼ一致しているものの完全には一致していない。これは日射や風など様々な影響によって 4m 程度の短い単管の内部でも外気環境によっては、温度や内部の空気の温度が均一にはならないことによるものと考えられる。実際の斜張橋のケーブルでは数十 m 以上のものも使われており、屋外で斜め方向に形成された密閉空間内部において、任意の位置での空間の温湿度を特定

の個所で計測された温湿度データから正確に推定するためには、温湿度が空間内部でどのように分布するのかについて今後明らかにする必要がある。

#### (2) 単管内部に水がある場合の温湿度計測

結露が生じるなど何らかの理由で、ほとんどあるいは完全に水蒸気の自由な出入りがない閉鎖された空間に液体の水が存在する状況でどのような温湿度変化が計測されるのかを明らかにするため、4.3(1)と同様に単管上下端を写真-2 に示すように樹脂栓で密閉する直前に、下端に少量の常温の水を封入して温湿度の計測を行った。なお、できるだけ水の有無による影響のみが把握できるよう、単管は 4.3(1)の検討で用いたものより短い (1.8m) ものをを用いた (ケース P1.8 外 U 有、P1.8 外 L 有)。

図-7 に計測結果を示す。図-7 中の(a)、(c)は端部の密閉直後～1日後、(b)、(d)は密閉後 3 日後～4 日後の計測結果をプロットしたもので、図中の丸は各ケースの計測の開始点である。比較として水無しのケース P4.0 外 U 無 W、P4.0 外 L 無 W の計測結果も図-7 に示す。

図-7(a)、(c)に示すように、上部では計測開始直後の相対湿度がしばらく 40～80%RH で推移している

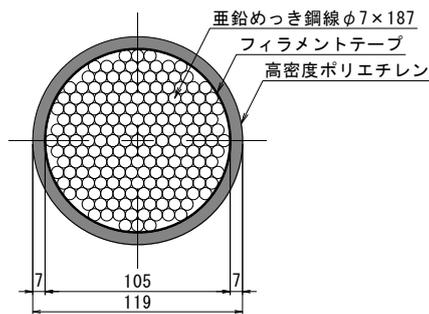


図-8 撤去ケーブル断面



写真-5 撤去ケーブルの切断状態

のに対して、下部は密閉直後からすぐに相対湿度100%RH 付近となり、空気線図で温度変化に伴って相対湿度が100%に近い位置をプロットが推移していることがわかる。このように液体の水が存在すると水蒸気が供給されることで相対湿度が一定に保たれ、絶対湿度が変化するようなデータが計測されることがわかる。なお、図-7の(c)と(d)を比べるとわかるように、液体の水のある下端から距離のある単管上部の計測データも密閉後数日後には、下部と同様に相対湿度が100%RH 付近で推移するようになっている。

## 5. 撤去ケーブルを用いた温湿度計測

### 5.1 計測概要

実橋で用いられる PE 被覆ケーブルは内部に素線があることや内外気を分ける被覆の材質や色も異なるため、断面当たりの空隙面積がほぼ同じであっても単管とは内部の温湿度の変化の様態が異なる可能性がある。そこで単管で行った方法と同様の手法による温湿度計測を行い、内部での水の有無の可能性を推定可能かどうかについて検討を行った。なお、極短いケーブルを架橋地点付近などに暴露してケーブル内外の温度を計測した事例<sup>6)</sup>はいくつかあるものの、主に素線の温度と表面温度の関係や気温や日射と表面温度の関係に着目しており、ケーブル内の空気の温湿度に着目したものは少ない<sup>8)</sup>。また、このような極短いケーブルで両端が切断された状態で開放されている場合、空気の温度や素線の温度は実際に架橋されている密閉された長いケーブルのものとは乖離があると考えられる。さらに、湿度についても外気と同じにな



写真-6 撤去ケーブル保管状況

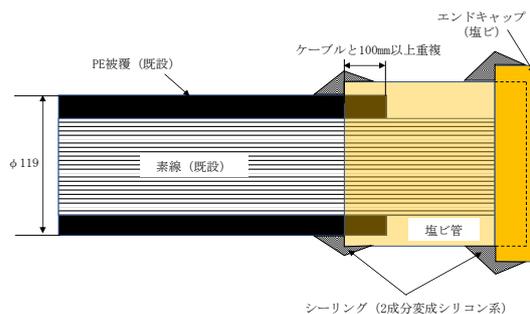


図-9 撤去ケーブルの端部処理の仕様

ると考えられ、実橋の温湿度を推測できる情報は得られていない可能性が高い。そこで、本論では試験体実際に供用している斜張橋で交換のために撤去した PE 被覆ケーブル (以下、「撤去ケーブル」という。) を用いた。

### 5.2 計測方法

撤去ケーブルは、図-8 に示すようにφ7mm の垂鉛めっき鋼線 187 本により構成されており、その表面に高密度ポリエチレン被覆による防食加工を施したものである。撤去ケーブルは、片側が工場でのケーブル製作時に施工された定着部のままで、他方は写真-5 に示すように撤去にあたって切断した状態となっていた。これを写真-3 の倉庫内で約 4 ヶ月保管し、密閉前にケーブル内部の空隙が保管している屋内の空気とほぼ同じものとなるようにした (写真-6)。その後、PE 被覆に損傷がないことを目視調査で確認した上で、切断面側を図-9 の仕様で閉塞した後、さらに全体を防水気密テープ No.8067 及び配管保護テープ (キャンバステープ) で被覆して密閉した。密閉直前の屋内の外気の温湿度は、図-4 の空気線図上のプロットの推移から、相対湿度は 100% 近くにまで上昇することなく推移しており、同じ時期に行った単管の実験結果と比べても、密閉時点で撤去ケーブル内部に液体として水が存在していないものと判断できる。

温湿度の計測にはケーブル型のワイヤレス温湿度計 (TKR02WS) を使用した。温湿度計の諸元を表-

表-4 ケーブル型ワイヤレス温湿度計の諸元

測定範囲	温度	-40℃ ~ +125℃
	相対湿度	0%RH ~ 95%RH
測定精度	温度	±0.3℃
	相対湿度	±3%RH
湿度センサー	高分子静電容量式	
寸法 : B×L×t	43mm×72mm×6mm	



写真-8 温湿度計設置状況 (撤去ケーブル)



写真-7 削孔時の状況

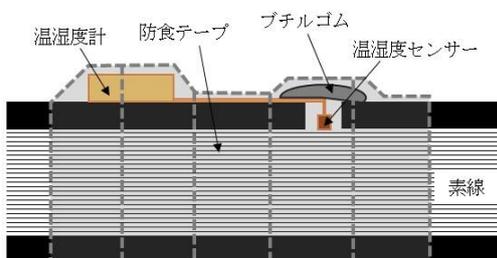


図-10 温湿度計設置概要図

4に示す。計測したデータは無線通信により携帯電話等の通信端末へ随時データを送信することが可能であるため、計測開始後から密閉状態を保ったまま連続してデータを取得することができる。計測期間中は10分毎に自動で温湿度の測定を行うよう設定し、試験開始から連続して計測を行った。

温湿度計の設置にあたり、PE被覆の側面にφ10mmでケーブル素線を損傷させないように慎重にドリル削孔を行い、PE被覆と素線の間に素線に巻き付けて施工されているフィラメントテープも孔部分だけカットして取り出し素線表面が外観できる状態とした(写真-7)。その後、温湿度計をセンサー部ができるだけ素線に近い空間に位置するように素線直近まで差し込むようにして設置し、削孔部は図-10及び写真-8に示すように密閉と止水の処理を施した。具体的には、削孔箇所をブチルゴムで覆った後、自己融着型防食テープ(ラプコテープM)でブチルゴム部全体を覆うように巻き付けた。

### 5.3 計測ケース

撤去ケーブルの計測箇所及び計測期間を表-5及び

表-5 撤去ケーブル計測箇所及び計測期間

計測対象	No.	計測箇所		計測期間
撤去ケーブル	下-W	下部	西向き	2018/7/20~
	上-W	上部	西向き	2019/3/31
	下-E	下部	東向き	2018/10/31~
	中-W	中部	西向き	2019/3/31
外気	-	-	-	2018/7/20~ 2019/2/6

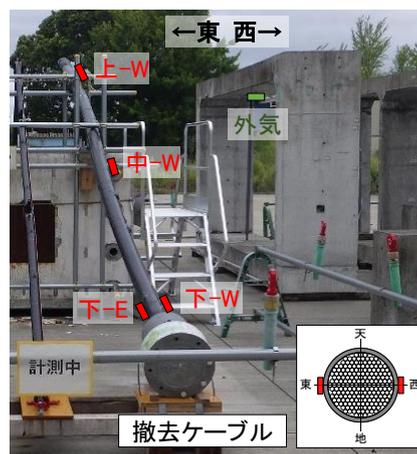


写真-9 撤去ケーブル計測箇所図

写真-9に示す。

撤去ケーブル試験体は全長が7mであり、単管試験と同様に実橋を想定してほぼ全長が18度~20度の傾斜となるように架台に固定した。温湿度計は、撤去ケーブル西側の側面を基本として、延長方向に複数配置し、下部のみ断面方向の傾向を把握するために東側の側面に設置した。ここで、文献8)に示すように、ケーブル内の腐食環境は断面位置によって異なると考えられるが、実橋での適用を考慮した場合、断面の内側を計測することは困難であるため、今回は断面の外側の温湿度のみに着目した。なお、断面方向の内外の違いについては、今後内部環境の数値シミュレーションによる検討を行う予定である。

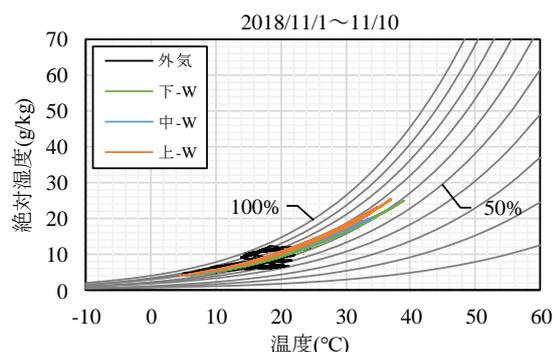


図-11 撤去ケーブルの延長方向の計測結果

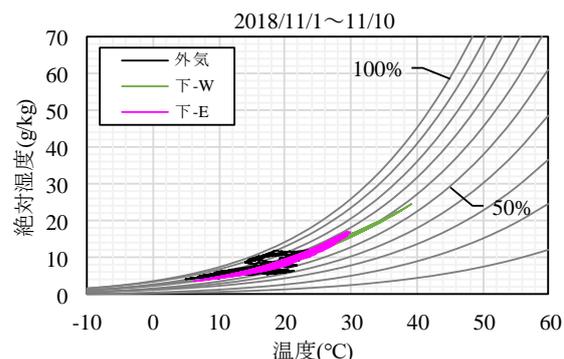


図-12 撤去ケーブルの断面方向の計測結果

## 5. 4 計測結果

### (1) 延長方向の温湿度状況

図-11 に湿り空気線図にプロットした撤去ケーブルの延長方向の温湿度計測結果を示す。期間は2018/11/1～11/10である。いずれのデータでも、温度変化に伴って絶対湿度が変化するようなプロットとなっており、絶対湿度がほぼ一定の位置にプロットされた内部に水がない単管とは異なる結果が得られた。

完全に密閉された閉鎖空間で、水分がすべて水蒸気として存在する場合に、水蒸気量が一定に保たれることから絶対湿度は一定と考えられ、単管のデータにおいてもこのような傾向が観測された。撤去ケーブル内の計測データがこのように絶対湿度が変化するようなプロットとなった原因としては、内部空間が単管のような単純な空洞ではなく密に素線があることにより、計測温度と素線間の空隙の温度に乖離が生じ、部分的に素線表面で結露が生じている可能性がある。その他にも、樹脂材であるPE被覆材の表面で水蒸気の吸収・放出が生じた可能性も考えられるが、これについてはPE被覆材である高密度PEの吸水率は僅かであること<sup>9)</sup>や透湿度の値の根拠となる試験体の厚さ(=25 $\mu$ m)<sup>9)</sup>に対して実橋のPE被覆材が7mmと十分な厚さを有していることから、その影響は少ないと考えられる。なお、今回の一連の実験ではこれらについて断定できるデータまでは得ていないため、今後さらなるデータの蓄積と数値シミュレーションによる再現を行っていく予定である。

図-11の結果からは、計測された相対湿度はいずれも100%に至るには余裕があることから、結露により液体の水が生じていたとしてもその期間や量は限定的と考えられ、継続的に高い湿度環境になっていたり高い頻度で多くの結露水が内部に滞留しているかどうかの判断は亜鉛めっきの素線を集束したPE被覆

ケーブルであっても、内部の温湿度データを空気線図上にプロットすることである程度判断できる可能性があると考えられる。なお、本橋の仕様と類似した道路橋に用いられた亜鉛めっき鋼線の腐食については、北川らなどの研究<sup>10)</sup>により100%に近い湿度環境が長期的に継続したり、極めて高い頻度で出現しない限り長期に耐久性が維持され、深刻な素線母材の腐食に至る可能性は少ないことが明らかにされている。

### (2) 断面方向の温湿度状況

PE被覆ケーブルは比熱の異なる材料で複雑に構成され、特に内部に集束された素線が密に存在する断面であることから、延長方向に同じ位置での断面方向の内部空気の温湿度が同じでない可能性が考えられた。そこで同じ断面で左右対称に相対する位置から温湿度計を挿入して素線とPE被覆の間の空間の温湿度データを取得した。期間は2018/11/1～11/10で図-11の計測と同時に行っている。

図-12に延長方向下側の断面方向の温湿度計測結果を湿り空気線図にプロットしたものを示す。両者で日射の影響により温度変化の範囲は異なっているが、湿り空気線図上のプロットの履歴は重なるように推移しており、温湿度変化の傾向は断面内では概ね同じと考えられる。また、絶対湿度が変化したようなプロットが得られることも両者で同様である。

## 6. 実橋ケーブルでの温湿度計測

### 6. 1 計測概要

撤去ケーブルを用いた温湿度計測結果から、実大のPE被覆ケーブル内部の温湿度計測を行うことで、PE被覆ケーブル内部が結露等によって常時あるいは高度で液体の水が存在している可能性が高いかどうかを推測できる可能性があると考えられたことから、別途実際の斜張橋のケーブル(以下、「実橋ケーブル」という。)で行った内外の温湿度の長期連続計測の結果

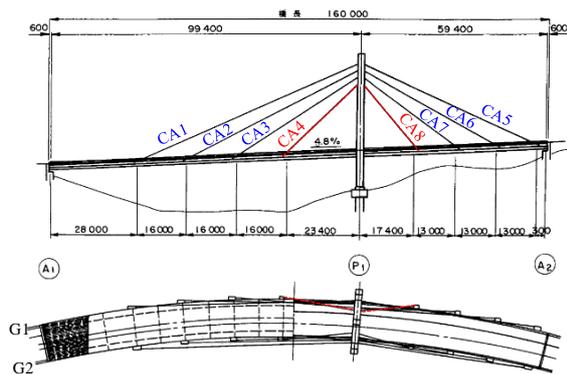


図-13 対象とする実橋ケーブルを有する斜張橋



写真-10 損傷したケーブルのよれ

表-6 実橋ケーブル計測対象及び計測期間

計測対象	No.	計測期間
実橋ケーブル	CA4-G1	2018/4/20~2019/3/5
	CA8-G1	

について考察する。

### 6.2 計測方法

対象とした実橋ケーブルは、図-13 に示す供用中の2径間の鋼斜張橋のケーブルである。本橋は地震による損傷を生じたが、ケーブルについても耐荷性能や耐久性に関して様々な観点から健全性等の評価が行われた結果、最終的に16本のうち、8本(CA3、4、7、8)が残置されたものの、8本(CA1、2、5、6)は交換されることとなった。写真-10に地震後に異常が確認されたケーブルの外観例を示す。

図-13に計測対象とする実橋ケーブル、表-6に計測期間を示す。本論では長期間計測した実橋ケーブルCA4-G1、CA8-G1の結果をもとに考察する。なお、写真-11に示すように、本橋は路面位置付近にケーブルを桁に定着するための定着体から伸びた鞘管の先端がでておりそこにケーブルカバーが設置されている。そして鞘管の口元部分でシール材が充填されており、ケーブル表面にアクセスできるのはケーブルカバーより上の部分に限られる。計測ではできるだけ斜



写真-11 温湿度計設置状況(実橋ケーブル)

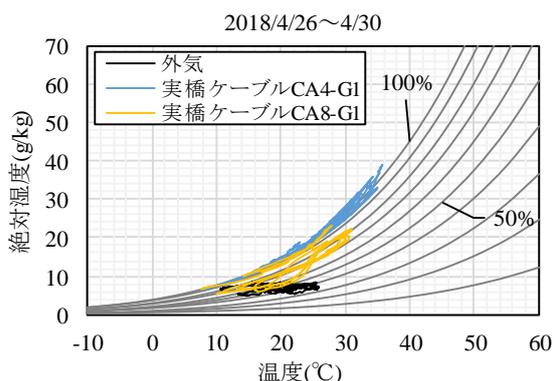


図-14 実橋ケーブルでの計測結果

ケーブル全長の下で行うため、ケーブルカバー直近の位置でPE被覆に削孔を行って温湿度計を設置した。削孔方法及び温湿度計の設置方法は5.の撤去ケーブルの場合と同様であるが、計測中にセンサーを容易にチェックできるように図-10中のブチルゴムの代わりに、透明の気泡緩衝材を貼付した上から防水テープを巻き付ける仕様とした。設置状況を写真-11に示す。

### 6.3 計測結果

図-14に湿り空気線図にプロットした実橋ケーブルCA4-G1及びCA8-G1の温湿度計測結果を示す。なお、計測地点近傍の気象庁のデータからは、計測期間中に降雨はなかったと考えられる。図-14に示すように、外気は温度変化に関係なく、絶対湿度一定の状態プロットが推移するのに対して、ケーブル内部は温度変化につれて絶対湿度が変化するプロットとなっている。特に、CA4-G1では相対湿度が100%RH付近で推移しており、同時計測したCA8-G1との比較からも内部が高い湿度環境にあることが推測された。

CA4-G1の削孔部での素線表面の外観性状を写真-12に示す。写真中のPE被覆以外の素線表面の黒い部分はPE被覆の削り屑であり、素線の垂鉛めっきの顕著な傷等の損傷や素線表面の腐食を疑わせるような変色や赤錆は全く見られず、垂鉛めっきの表面に



写真-12 素線表面の外観性状の例

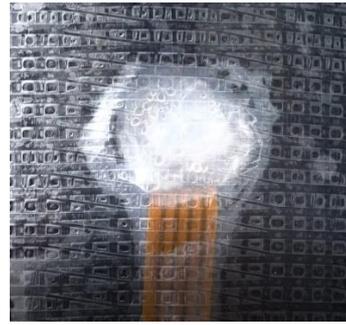


写真-13 計測孔に付着した水滴

軽微な変色（白錆）が見られる程度であったが、軽微な変色すら確認されなかった他の削孔したケーブルよりもケーブル内部がより高湿度な環境にあることが疑われており、温湿度計測結果はこれらと矛盾しない。

現在の道路橋で用いられる PE 被覆ケーブルは工場であらかじめ被覆され、極めて高い防食機能を有していることから、長期に渡り白錆が広範囲に発生するような状況になることを想定していない。そのため、本論のように一部であっても白錆が実際に生じていることが確認されると、ケーブル内部に供用後に雨水の浸入等があった可能性を示唆していると判断でき、被覆の健全性や今後の腐食が進展する可能性があるかどうかを詳細調査するなど、維持管理の高度化にもつながる情報となり得ると考えられる。ただし、より高い信頼性で推定できるためには、削孔位置も確実に錆が先行して発生しやすい位置で行うなどの検討も必要となるが、少なくとも一部であっても削孔位置で実際に白錆が確認できること及びそのようなケーブルを実際に確認したことは、維持管理の参考になる情報を得たと考えられる。

なお、CA4-G1 で防水テープ下の計測孔の確認を行った際に、写真-13 に示すように削孔内部に結露水の付着も確認された。

CA4-G1 が CA8-G1 に比べ高湿度な環境であると推測された原因として、CA4-G1 では計測孔の上方面で照明柱との接触や補修の痕跡が見られたことから、内部に水が浸入した可能性が考えられる。なお、これに対しては被覆の補修を行った上で除湿対策を行い、別途検討を行った閉塞方法により閉塞を行っている。

以上のように、実橋においても、PE 被覆ケーブル内部の温湿度計測結果から、ケーブル内部に高い頻度での結露が生じていることを推測できる可能性があることが確認された。ただし、撤去ケーブルでも確認されたように長く斜め方向に張られたケーブル内部の空間の温湿度は部位によっても異なり、さらにケー

ブル周りの大気温度やケーブル表面の温度も日射の影響や風の影響によっても複雑に変化して均一でないと考えられる。さらに液体となった水が流下するなどにより最も厳しい湿度環境となるのは桁内にある定着部の付近と考えられるが、実橋では本橋のようにケーブル最下端部の表面にはアクセスが困難な場合が多いと考えられる。

実橋のケーブル内部の温湿度計測による素線の腐食環境の評価を精度よく行うためには、様々なケーブル条件において限られた計測箇所からのデータからケーブル各部の温湿度条件を推測する方法の確立が必要である。

因みに、一般に表面に継ぎ目等の弱点がなく極めて高い防食機能を有する PE 被覆ケーブルの被覆への削孔は、防食上の弱点を生じさせる危険性があり極力避ける必要がある。本検討にあたっては、被災により交換した実際のケーブルを用いて削孔から削孔後の閉塞方法に至るまで別途、耐圧試験を含む気密性試験などを多数行って仕様と手順を確立した上で、材料品質や施工品質の確保にも十分配慮して実験を行っている。

## 7. まとめ

様々な条件下での PE 被覆ケーブル内部の温湿度変化の特徴を把握するために、模擬閉鎖空間（単管）と PE 被覆ケーブルとして撤去ケーブル及び実橋ケーブルで温湿度計測を実施した。本研究で得られた主な知見を以下に述べる。

- (1) 道路橋で一般的に用いられてきた PE 被覆ケーブルでは、PE 被覆の一部に小径の削孔を施して行う内部空隙の温湿度計測とケーブル素線表面の直接目視確認を行うことで、PE 被覆ケーブル内部がケーブルの耐久性上問題となるような腐食環境となっている可能性が高いかどうかについて推定できる可能性がある。

- (2) 長さのある PE 被覆ケーブル内部の一部で計測される温湿度データからは、密閉しているにも関わらず圧力一定の仮定における湿り空気線図上で、温度に応じて絶対湿度が変化するようなデータが得られる結果となった。今後は、その原因として考えられる集束された多数の素線表面の温度と一部の空間で計測される温度の関係などの説明が必要である。
- (3) PE 被覆ケーブル内の湿度分布は、今回の実験の延長 (7m) では、延長方向及び断面方向で絶対湿度に差がない結果となった。そのため、実橋で計測を行う場合、作業が容易な斜ケーブル下部での計測を行うことで、PE 被覆ケーブル内部全体の温湿度状況を把握できる可能性が高い。

今後は、ケーブル内部の温湿度状況とケーブル素線の腐食の関係について、ケーブル内部に注水した撤去ケーブルを用いた温湿度計測、ケーブル内部の湿度の数値シミュレーション及び腐食促進試験を行う。これらの結果も踏まえて、PE被覆ケーブルの予防保全に資するPE被覆ケーブル内部の腐食環境評価方法の提案に向けた検討を行うとともに、吊構造形式橋梁の適切な維持管理方法の確立に向けて産学官と連携して検討を継続する予定である。

### 参考文献

- 1) 土木学会：鋼構造シリーズ 20 鋼斜張橋—技術とその変遷—2010年版、pp. 1-7、2011
- 2) 神田隆仁、船木孝仁、高橋昌平、高野優、越前谷宏昭：雪沢大橋ケーブル破断への対応と今後の維持管理について、平成 26 年度東北地方整備局管内業務発表会、2014
- 3) 小川和也、前田泰男、明石良男、守谷敏之：吊橋ハンガーロープの全磁束法による腐食度評価、土木学会第 56 回年次学術講演会、pp. 186-187、2001
- 4) 小川和也、前田喜宏、明石良男、守谷敏之：吊橋ハンガーロープの非破壊検査、土木学会第 57 回年次学術講演会、2002
- 5) 空気調和衛生工学会：空気調和・衛生工学便覧 第 14 版 1 基礎編、p. 46、2010
- 6) 新家徹、頭井洋、大谷修、湊理由：架設途中における吊橋ケーブルの温度応答に関する研究、土木学会論文報告書、第 302 号、pp. 15-30、1980
- 7) 長谷川鑑一、原田康夫、清田鎌次、押尾祐三、遠藤秀雄：吊橋ケーブルの温度測定実験、橋梁と基礎、Vol. 9、No. 10、pp. 42-48、1975
- 8) 古家和彦、北川信、中村俊一、鈴木恵太、聖生守雄：吊橋ケーブルの腐食機構に関する研究、土木学会論文集、No. 637/IV-45、pp. 103-114、1999
- 9) 大阪市立工業研究所、プラスチック技術協会：プラスチック読本 第 21 版、pp. 45-46、2015
- 10) 北川信、古家和彦、中村俊一、鈴木恵太：吊橋ケーブル送気乾燥システムの防食性能に関する研究、土木学会論文集、No. 672/IV-50、pp. 145-154、2001

## 6.3 措置が必要な部位・箇所の優先度決定手法の構築

### 6.3.2 既設橋の合理的な性能評価手法および補修・補強方法に関する研究(2)

担当チーム：橋梁構造研究グループ

研究担当者：石田雅博、澤田守、廣江亜紀子、  
江口康平

#### 【要旨】

道路橋は、5年に1回を基本とした定期点検が義務化されているものの、措置の実施率は低く、特に予防保全型の修繕は進んでいない。持続的に橋の機能を保持していくためには、適切な診断を行い、予防保全対策を行いながら円滑なメンテナンスサイクルを実現していく必要がある。そこで、信頼性の高い診断や予防保全の推進を目的として、AIを活用した橋の診断に関する研究を実施している。令和元年度は、適切な診断をするために必要な情報として「診断セット」を作成し、AIを活用した診断システムのプロトタイプ（RC床版）の開発を行った。

キーワード：道路橋、診断、AI、予防保全

#### 1. はじめに

近年、道路橋の老朽化が進みメンテナンスの重要性が高まるなか、平成26年より橋長2.0m以上の道路橋について5年に1回を基本とした近接目視点検が義務化され、令和元年度からは2巡目の点検が始まっている。橋の状態を把握するようになった一方で、措置については進んでいない状況にある。図-1に定期点検1順目における修繕実施状況を示す。措置の実施率は低く、特に予防保全型の修繕は進んでいない<sup>1)</sup>。

この要因として予算の制約等が考えられるものの、その他の要因として、診断の信頼性が考えられる。図-2にメンテナンスサイクルにおける技術的な課題を示す。信頼できる診断でなければ、措置が円滑に流れていかない。また、措置が円滑に流れなければ、重傷な橋が増加し維持管理コストが増大して持続的な道路橋の機能の確保が難しくなると考えられる。このため、適切な診断を行い、適切なタイミングで予防保全対策を行い、持続可能なメンテナンスサイクルを実現させることが重要である。

また、団塊の世代の退職等により専門知識を持った技術者の減少の問題も顕在化してきており、技術の継承についても大きな課題となっている。特に、地方公共団体においては、点検や診断等の実務を担う技術者の不足が顕在化しており支援が急務となっている。

このような背景から、本研究では、道路橋の診断の信頼性向上に向けて課題を抽出した上で、必要となる考え方や情報を整理し、AIを活用した診断を支援するシステムのプロトタイプの開発を行った。

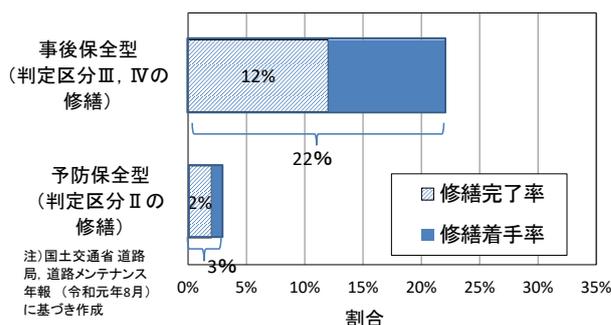


図-1 定期点検1順目における修繕実施状況<sup>1)</sup>

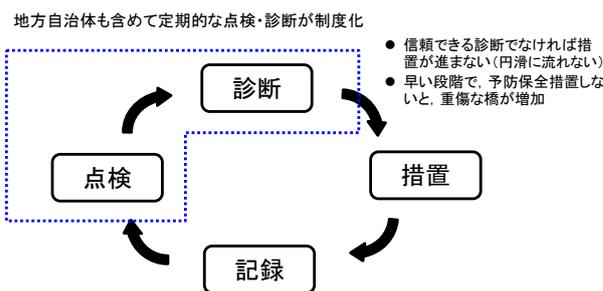


図-2 メンテナンスサイクルにおける技術的な課題

## 2. 信頼性の高い診断に向けたアプローチ

### 2.1 課題の抽出・整理

橋をメンテナンスしていくための補修補強において、これまでに再劣化、早期劣化の事例について報告されている。各種の技術が開発され、現場に適用されてきているが、その効果が適切に発揮されないケースが存在する。

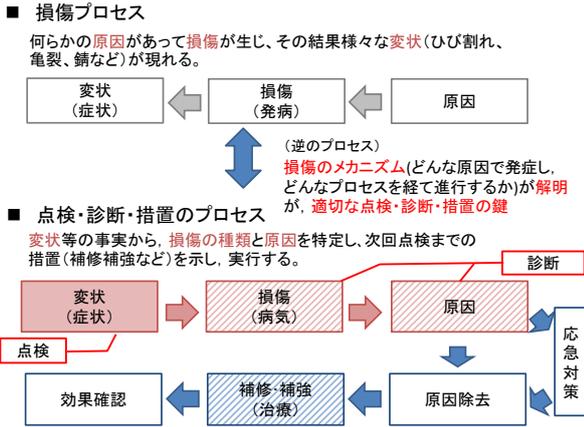


図-3 損傷メカニズムの解明の必要性

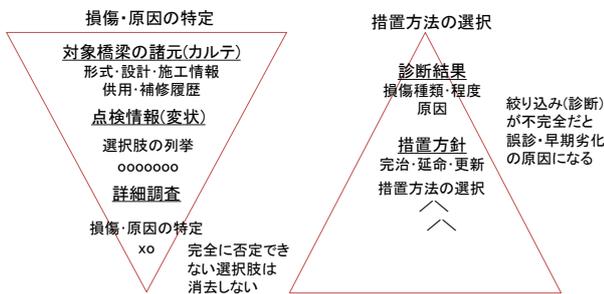


図-4 論理的診断の基本パターン

その原因として、損傷のメカニズムに対応した工法や材料の選定となっていないことが挙げられる。

図-3に損傷のプロセスと点検・診断・措置のプロセスを示す。橋に生じる損傷は、何かしらの原因があり、損傷が発生して進行し、その結果、様々な変状が現れる。他方、点検・診断・措置のプロセスは、変状を見つけて記録し、損傷と原因を特定した上で、健全性を診断し、原因の除去を含めて補修補強を行う。損傷は、医療で例えるなら、病気に該当し、病気やその原因を特定又は絞り込んだ上で処方することとなり、橋の診断においても必要となる。図中の損傷のプロセスに対して、点検・診断・措置では逆向きにその情報を取得し特定していくことになる。信頼性の高い診断の実現に向けては、どのような原因で損傷が生じ、どのようなプロセスを経て進行するかという損傷のメカニズムを解明することが重要と考えられる。なお、完全な解明が難しい場合もあり、多くのデータから推定される仮説で対応する部分もあると想定されるが、メカニズムに対応した措置を行うことが重要である。このため、橋の損傷のメカニズムを明らかにし、損傷が進む前に早期発見、早期対策を行っていく予防保全型メンテナンスのための情報を体系的に整理していく必要があると考えられる。

前述の通り、診断は、点検で得られた様々な情報に基

づき、総合的に判断する行為である。その中で、信頼性を確保するためには、論理的なロジックにより判断をすることも重要となる。

図-4に論理的な診断の基本パターンを示す。熟練診断技術者は、対象橋梁の諸元や架橋環境条件、補修履歴、過去の点検記録等の情報をまず確認し、その後、点検で確認された変状から橋に生じている可能性のある損傷やその要因を列挙する。特定や絞り込みするうえで情報が不足する場合には、詳細調査を行う。熟練の診断技術者は、有する知識と経験（暗黙知を含む）に基づき、各種の情報から矛盾がないよう絞り込みを行う。その際、必ずしも一つに特定する必要は無く、完全に否定できない選択肢は消去せず、絞り込みを行うことが重要となる。

損傷や原因を特定した後、メカニズムに対応した措置方法を選択していくこととなる。その際、損傷の原因を取り除き健全な状態に戻す措置を目指すのか、損傷の原因の除去が完全に除去することは困難であるため損傷の進行を止める又は遅らせて今のレベルで長く使う措置とするのか、緊急的な措置をとるのか等の措置の方針を決めることが重要である。その方針に基づき、架橋環境条件、交通規制などの施工が可能な時期や期間、それら条件から定まる施工等における制約条件など、各種の条件に基づき、効果が発揮される具体的な措置方法を選択していくこととなり、このような論理的なプロセスで検討することが重要となる。

2.2 診断セット

メンテナンスサイクルを確実かつ円滑にまわしていくためには、橋に生じる損傷のメカニズムを明らかにし、そのメカニズムに応じて、点検で何をどのレベルで検知し、何を根拠に健全性等の診断を行い、どのような措置の方針とすべきかなど、一連で整理することが重要となる。この橋に生じる損傷のメカニズムと点検・診断・措置の一連のセット情報を「診断セット」と称して、この整理を行った。表-1にRC床版の診断セットの項目を示す。ここでは、

表-1 RC床版の診断セットの項目

項目	概要(項目分けの考え方)
1. 疲労	床版下面から変状が進行する損傷
2. 土砂化	主として床版上面から変状が進行する損傷(措置において共通する考え方は、上からの水の供給を遮断すること)
2.1 輪荷重	
2.2 凍害	
2.3 凍結防止剤による塩害	
2.4 アルカリ骨材反応	
3. 飛来塩による塩害	各種表面から変状が進行する損傷(海から飛来する塩分に起因)
4. 海砂による塩害	各種表面から変状が進行する損傷(建設時のコンクリート内在する塩分に起因)

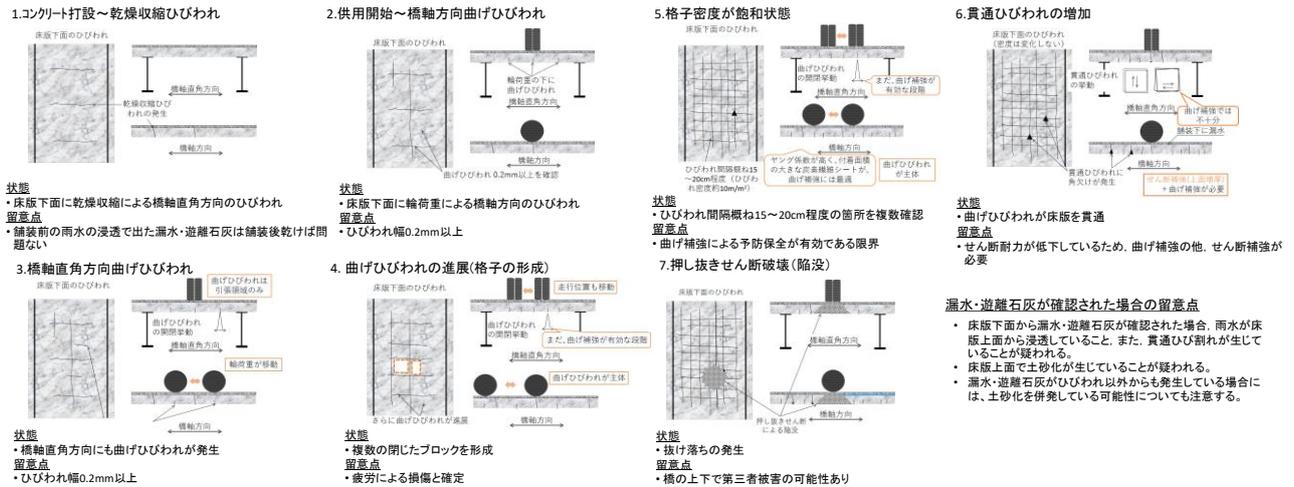


図-5 RC床版の疲労損傷のメカニズム

表-2 RC床版の疲労損傷の診断の着目点と措置方針

【対象: 桁間の床版】(張出床版を含まない)					
No	変状の状況	診断の決め手となる情報	追加情報	措置の方針	工法例
1	乾燥収縮によるひびわれが発生	・ひびわれの発生	—	経過観察	—
2	乾燥収縮によるひびわれに加え、横軸方向に曲げひびわれが発生	・ひびわれ幅0.2mm以上 ・連続的なブロックは形成されていない	—	予防保全 (曲げ補強)	炭素繊維接着 +床版防水
3	乾燥収縮や横軸方向の曲げモーメントによるひびわれに加え、横軸直角方向に曲げひびわれが発生	・ひびわれ幅0.2mm以上 ・連続的なブロックは形成されていない	—	+遮水	—
4	ひびわれが格子状(亀甲状)に進展	・複数の閉じたブロックを形成 <sup>7)</sup>	・漏水・遊離石灰を併発していない ・漏水・遊離石灰を併発している	事後保全 (曲げ補強) または床版更新 +遮水	炭素繊維接着+ 上面増厚 or 床版部分打替 えor 床版全面取替 え+床版防水
5	格子密度が飽和状態	・鉄筋間隔程度(概ね15cm~20cm)の間隔でひびわれが発生している箇所を複数確認	—	緊急対応(規制+敷脚板+床版更新)	床版部分打替え or 床版全面取替え
6	貫通ひびわれの増加	・曲げひびわれが全厚を貫通 ・貫通ひびわれに角落ち	—	—	—
7	抜け落ちの発生	・押し抜きせん断による陥没の発生	—	—	—

表-3 AIの3つのアプローチ<sup>2)</sup>

アプローチ	概要	ルール生成	推論処理
ルールベース・アプローチ	・専門家の知識やノウハウを人手によってルール化し、そのルールに従ってデータを処理 IF(条件) then(処理1) else(処理2) : エキスパートシステム	人間が入力	機械
統計・確率論的アプローチ	・データに内在する因果関係を確率的に記述する統計手法(ベイジアン・ネットワーク)を使ってデータを処理 Aである確率:98% Bである確率:17% ⇒ Aが妥当	機械	機械
脳科学的アプローチ	・脳科学の研究成果を取り入れ、脳の神経活動を再現する数学的モデル(ディープ・ニューラル・ネットワーク)を使ってデータを処理 : ディープラーニング	機械	機械

実態や実務への反映を考慮し、4つに大分類し、土砂化は、輪荷重に起因するほか、その他の要因が複合的に作用して生じると考えられることからさらに4つに分類している。

図-5にRC床版の疲労損傷のメカニズムを、表-2にメカニズムに対応した診断の着目点と措置方針を例示する。説明性を確保する観点からも、損傷のメカニズムを分かりやすく図示し、その状態の段階的な経過を整理した。その状態に対して、予防保全が可能な段階など、措置方針を区分し、さらにその状態を特定するために必要となる情報を整理した。なお、作成にあたっては、実務に携わる熟練診断技術者を含むメンバーで検討会を行い、作成を行った。

### 3. 診断AI システム

#### 3.1 診断におけるAI の活用

表-3のとおり、AIの開発には主に3つのアプローチがあるとされている。エキスパートシステムに代表されるル

ールベースのアプローチは、専門家の知識やノウハウを人手でルール化し、そのルールに従ってデータを処理するもので、出力された結果について判断根拠を説明することができる。また、統計・確率論的アプローチは、データ間の因果関係を確率的に記述してデータを処理するもので、ルールベースのシステムに確率で柔軟性を持たせたもので、同じく出力結果の判断根拠を説明することができる。一方で、ディープラーニングに代表される脳科学的アプローチは、脳の神経活動を再現する数学モデルであるニューラルネットワークの階層を深くしてデータを処理するもので、結果を導く過程はブラックボックスになっている。信頼性の高い診断では、診断についての納得のいく説明がされることが重要となる。このため、診断を支援するためのAIとして、エキスパートシステムに代表されるルールベースのアプローチを採用した。

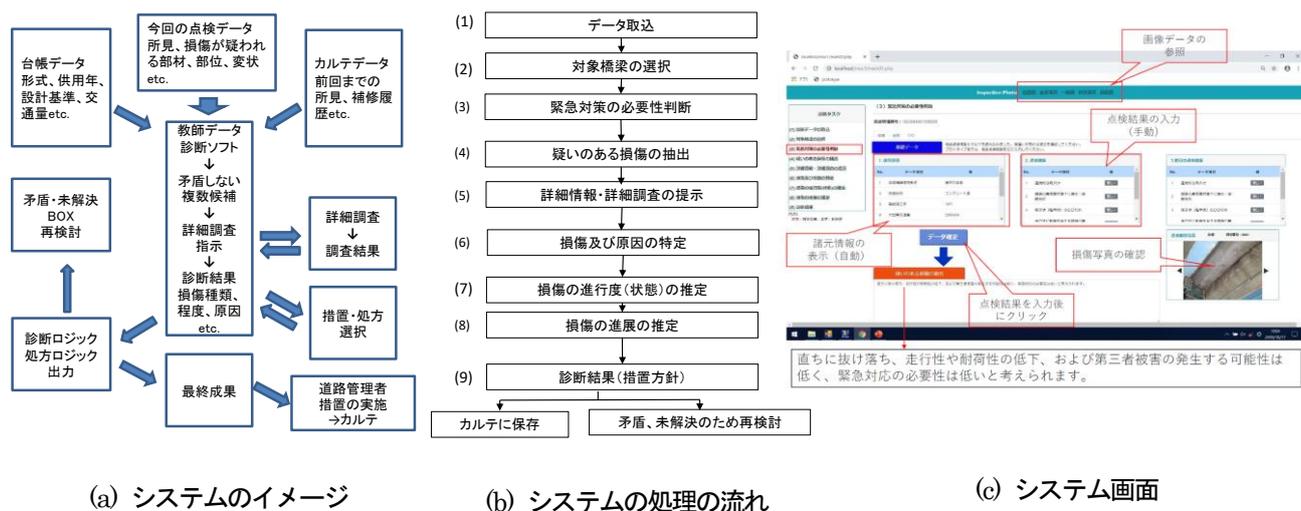


図-6 診断AIシステムのプロトタイプ概要

### 3.2 診断AIシステム

前述の診断セットをもとに、診断のフローを作成し、診断AIシステムのプロトタイプ（RC床版）を構築した。システム処理の流れを図-6に示す。(1) 台帳データ（橋梁形式、供用年、設計基準、交通量等）、今回の点検データ（所見、損傷が疑われる部材、部位、変状等）、カルテデータ（前回までの所見、補修履歴等）などデータを取り込み、(2) 対象となる橋梁を選択する。(3) (1)で取り込んだ情報から緊急対策の必要性を判断したのち、(4) 疑いのある損傷候補を複数抽出する。(5) システムが損傷を確定するための追加情報取得の必要性を提案し、必要に応じて管理者が詳細調査を実施する。(6) ここまでに得られた情報をもとに損傷及び原因を特定するとともに、(7) 損傷の進行度（状態）の推定、(8) その後の損傷の進展を推定して、(9) 措置方針を含めた診断結果を出力し、道路管理者の措置の実施内容をカルテに保存する。また、診断セットの情報との矛盾や情報不足で損傷の特定はできないものの、可能性が捨てきれない事象など診断結果として成果を得られなかったものについては、矛盾・未解決な再検討事例として保存し、研究や調査が進んで解決できるまで保留しておく。

このシステムが提案する診断・措置方針は、診断セットに基づいているため、診断に至った過程の確認が可能である。そのため、経験の少ない作業者が点検・診断を行う場合にも根拠に基づいた信頼性の高い診断が可能となる。ただし、橋の構造条件、架橋環境条件、損傷の種類・程度が多岐に渡り、その中で診断は、各種の情報を組み合わせて総合的に行うものである。ここで示したシステムは、診断を支援するものであり、最終的な判断は人間で行うものとなる。現場実務において適用性等を検証して改善をしてい

くなかで、人の判断に頼る部分を少なくし、より効率的に信頼性の高い橋梁の診断が実現できる可能性がある。

### 4. まとめ

本研究では、橋の診断における信頼性向上や効率化を目的として、適切な診断をするための課題を抽出・整理し、その課題を解決するために必要な情報として、RC床版を対象に、損傷のメカニズムと点検・診断・措置の一連の技術情報を整理した「診断セット」を作成した。そして、信頼性の高い診断を支援するAI技術として、エキスパートシステムを採用し、AI技術を活用した診断システムのプロトタイプ構築を行った。

今後は、診断AIシステムの拡張や点検におけるシステムとの連携についての検討を進めるとともに、現場事務への適用性等の検証を行い、改善を図っていく予定である。

### 参考文献

- 1) 国土交通省道路局：道路メンテナンス年報、111p、2019.8
- 2) オルタナティブ・ブログ：【図解】コレ1枚でわかる人工知能の3つのアプローチ ITソリューション塾  
<https://blogs.itmedia.co.jp/itsolutionjuku/2015/12/13.html> (2020.6 閲覧)

## 6.3 措置が必要な部位・箇所の優先度決定手法の構築

### 6.3.3 舗装マネジメントの効率化に関する研究

担当チーム：道路技術研究グループ（舗装）、  
寒地保全技術研究グループ（寒地道路保全）、  
地質・地盤研究グループ（特命）、材料資源研  
究グループ（先端材料・高度化）

研究担当者：藪雅行、木村孝司、齋藤清志、西  
崎到、稲崎富士、寺田剛、丸山記美雄、前川亮  
太、尾西恭亮、佐々木巖、星卓見、大浦正樹

#### 【要旨】

本研究は、既設舗装を対象に維持修繕を行う際の優先度決定手法の構築に向け、新たな路面評価手法を提案すること及び非接触表面波探査手法を用いた舗装の局所的な構造評価を提案することを目的としている。平成 28～29 年度は、重交通道路については修繕工事前後の路面・構造調査を、軽交通道路においては路面性状データの分析を通じて路面破損の形態について分析を行った。また、非接触高周波表面波探査システムの開発に向け、S 派速度構造に基づく舗装の劣化度評価手法を提案した。平成 30 年～令和元年度は、舗装路面のひび割れが FWD たわみに及ぼす影響を分析するとともに、地中レーダに関する深度分布の特定手法の開発を進めた。

キーワード：舗装、構造破損、路面破損、実態調査、表面波探査、S 波

#### 1. はじめに

舗装の維持修繕を行う際の優先度決定手法の構築に向け、路面特性及び構造特性の面から、既設舗装を適切に評価することが求められる。本研究では、措置が必要な部位・箇所の優先度決定手法の構築に向け、新たな路面評価手法及び局所的な構造評価手法を提案することを目的としている。

平成 28 年度は、重交通道路については修繕工事前後の路面・構造調査を、軽交通道路においては路面性状データの分析を通じて路面破損の形態について分析を行った。また、局所的な構造評価手法に関しては、非接触表面波探査手法を用いた、S 波速度構造に基づく舗装の劣化度評価手法を提案した。

平成 29 年度は、構造的健全度の回復を目的とする場合は、詳細調査を通じた適切な修繕工法の選定が効果的であることが分かったため、日本道路会議等の場を通じて発表し、路盤の健全性の保護を通じた舗装の長寿命化という舗装点検要領の考え方の普及をはかった。また、舗装路盤に適した表面波解析手法として、非接触高周波表面波探査の効率を向上させる改良技術を検討し、高周波の表面波を探査可能な装置を作製した。

平成 30 年度は路盤の健全性が損なわれた場合の詳細

調査のあり方を検討するため、詳細調査のうち路盤の状況を直接的に把握できる開削調査について分析を行った。また非接触高周波表面波探査装置の実用性を向上させた。

令和元年度はひび割れの程度や位置が、FWD たわみ量に及ぼす影響を解析に基づいて把握するとともに、舗装の構造的損傷をもたらす現場条件の因果関係を体系的に整理した。さらに、高周波表面波探査の問題点を解消するために、地中レーダにより事前に舗装構造の深度分布を特定する手法の開発を進めた。

## 2. 重交通道路における舗装の損傷実態調査

### 2.1 背景

平成 28 年 10 月に策定された「舗装点検要領」（以下、「点検要領」という。）においては、損傷の進行が早い道路等に分類されたアスファルト舗装について、表層の供用年数に対する使用目標年数の設定を通じ、早期に劣化した区間に対しては詳細調査を実施した上で適切な措置を選定することが求められている。点検要領に基づくメンテナンスサイクルを運用していく上で、今後はより一層詳細調査の重要性が増してくると考えられる。詳細調査の手法としては、FWD たわみ量調査、コア抜き調査及び開削調査が点検要領の付録に例示されているが、

開削調査は交通規制面等での制約が大きく、現場実務においては FWD たわみ量調査やコア抜き調査が主体になるものと考えられる。しかしながら、それら詳細調査に基づく工法選定が、舗装の構造的健全度の回復度にどのような影響を与えるかはあまり明らかになっていない。

本研究では、損傷の範囲が表層・基層である場合を対象に、コア抜き調査をもとに修繕工法を選定した修繕工事現場にて、FWD たわみ量調査を修繕工事の前後で実施し、舗装の構造的健全度の回復状況に関して実態調査を行った。

次に損傷範囲が路盤に至っている場合を対象に、開削調査に至る前の、路面性状調査や FWD たわみ量調査の結果から、どのような調査結果の場合に開削調査を実施するかが重要であるか、実大の走行実験を通じて分析した。

### 2.2 調査箇所

調査箇所は、コア抜き調査結果をもとに修繕工法を選定した修繕工事現場とした。場所は、関東地方整備局管内の直轄国道（往復2車線）であり、平成22年道路交通センサス<sup>2)</sup>では、大型車交通量は舗装計画交通量N6区分に該当する道路である。線形はほぼ直線であり、工事延長はL=約600m（上下線とも）である。

修繕工事前の舗装構成は、過去の修繕工事の設計図書の情報をもとにすると、起点側から約430mを境に変化しているものとなっており、その舗装構成を図2-1に示す。いずれもアスファルト混合物層（以下、「アスコン層」

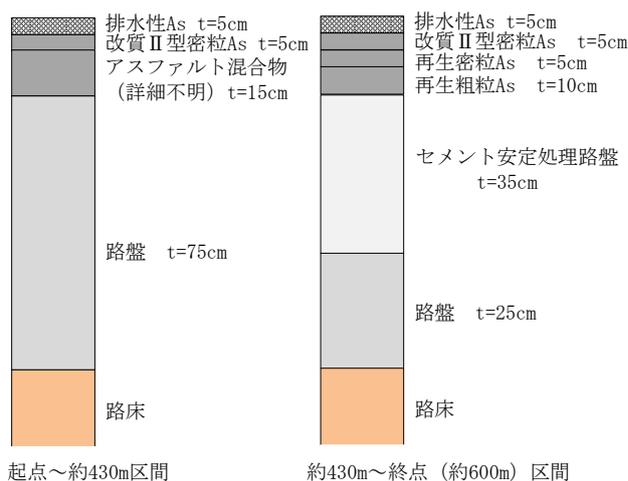


図2-1 舗装構成

という。)厚は25cmであり、また図中の路盤は舗装構成より粒状路盤と考えられる。なお、前回修繕工事は今回修繕工事の16年前に実施しており、起点側から約430mまでは2層(t=10cm)の切削オーバーレイ、約430m以降は舗装打換え(図2-1中のセメント安定処理路盤層より上の施工)である。

### 2.3 現場内のコア抜き本数

当該工事現場では、工事着手前に区間内のコア抜き調査が行われている。コア抜き調査は、道路管理者の指示の下、修繕工事受注業者が修繕前の路面の損傷状況を元に調査箇所を選定して実施し、その結果コア本数は下り車線が11本、上り車線が13本であった。

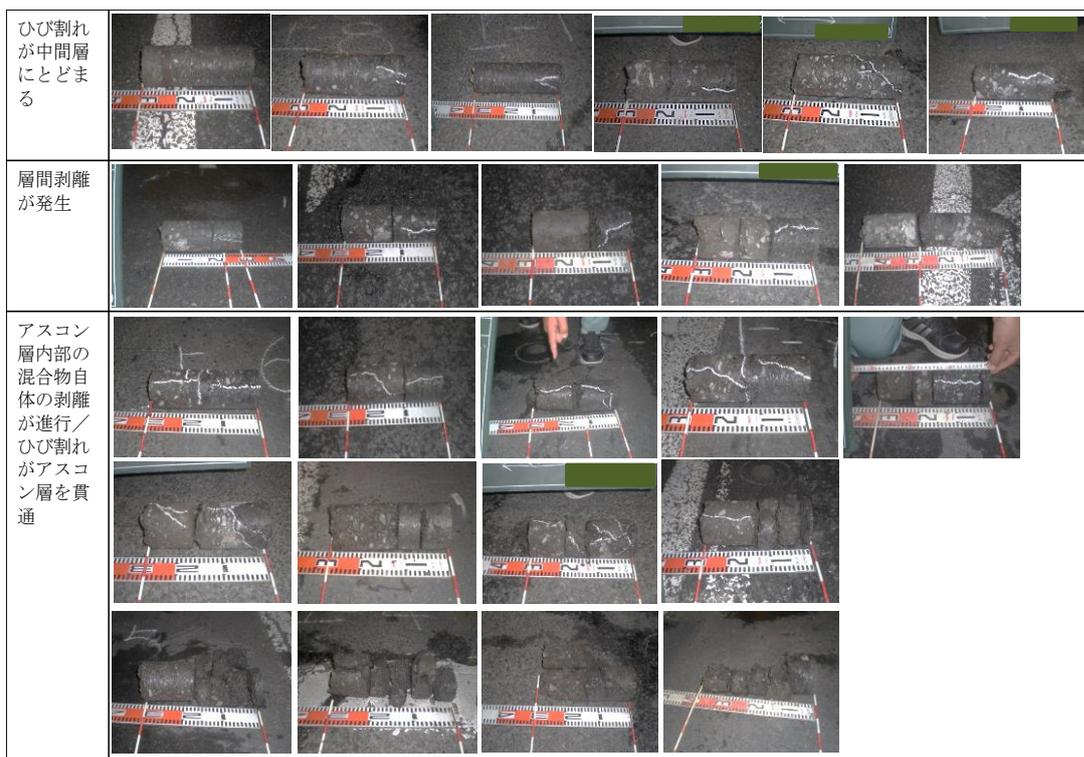


図2-2 コア抜き調査結果

### 2. 4 コア抜き調査結果を踏まえた修繕工法の選定

前節に示したコア抜き調査により、アスコン層内の損傷は様でないことが明らかとなった。具体的には、表層の路面側を起点としたひび割れ（トップダウンひび割れ）が中間層までにとどまっているもの、ひび割れからの雨水の浸入に起因すると想定される層間剥離を引き起こしているもの、さらに進行して中間層、基層やアスファルト安定処理層部の混合物自体が剥離を引き起こしているもの、及びアスコン層（ $t=25\text{cm}$ ）を貫通しているものと様々であった。当該修繕現場では、これらの状況を踏まえ、ひび割れ深さが15cm以上入っている区間をアスファルト混合物層の全層（ $t=25\text{cm}$ ）打換え、それ以外の区間を2層（ $t=10\text{cm}$ ）の切削オーバーレイと修繕工法が選定された。

このように、同一現場内でもアスファルト混合物層内部の損傷は様々となりうることを認識しておく必要がある。当該現場のコアの状況を図2-2に示す。なお、図中のうち、「アスコン層内部の混合物自体の剥離が進行／ひび割れがアスコン層を貫通」の写真の一部は、コア側面のひび割れ部分のチョークによるトレースができていない。

### 2. 5 修繕工事前の路面性状調査

当該修繕工事区間において、修繕前に路面性状調査を行った。その結果を表2-1に示す。これより、上下車線共に損傷は進行しており、また、どちらかと言えばひび割れによる損傷が卓越した区間であることが分かる。実際の現場では、ひび割れその他車輪通過部にわだち部オーバーレイ工（レーンパッチング）の実施箇所が点在しており、日常的な維持管理に苦慮していた様子が観察される路面状況であった。修繕前の路面の代表写真を写真2-1に示す。

### 2. 6 修繕工事前後のFWD たわみ量調査

修繕工事前後において、OWP上で起点から20m間隔

表 2-1 修繕工事前の路面性状調査結果

路面性状		下り車線	上り車線	
ひび割れ率 (%)	区間平均	24	31	
	最大値 (10m 単位)	69	72	
わだち掘れ量 (mm)	区間平均		17	17
	最大値 (10m 単位)		32	46
平坦性 (mm)	区間平均		2.8	3.1

でFWD たわみ量調査を実施した。上下車線とも、路線の起点側を測点No.0とし、順に20m間隔で測点を振り、終点側を測点No.30とした。また、FWD たわみ量については、「舗装性能評価法—必須および主要な性能指標編—」<sup>3)</sup>に従い20°C換算で補正している。



写真 2-1 修繕工事現場の路面状況

舗装の構造的健全度として、路床を含めた舗装全体の支持力を示す載荷点直下のD0 たわみ量に着目し、それをグラフ化したものを図2-3、2-4に示す。また、同図中には、アスコン層全層（ $t=25\text{cm}$ ）打換えの区間を表示し

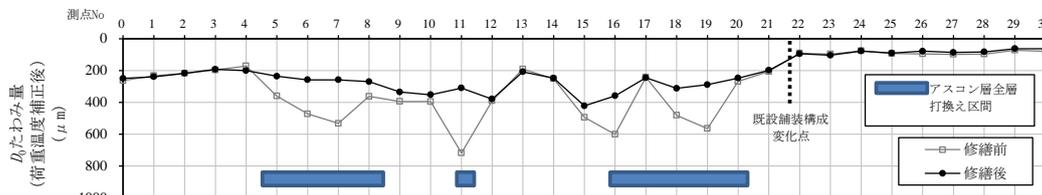


図 2-3 修繕工事施工前後のD0 たわみ量の比較（下り車線）

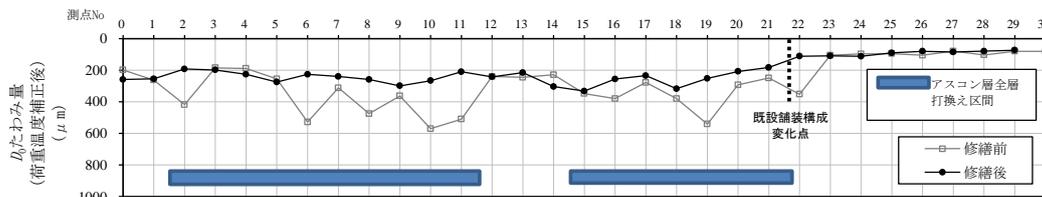


図 2-4 修繕工事施工前後のD0 たわみ量の比較（上り車線）

ている。この表示以外の区間は、 $t=10\text{cm}$ の切削オーバーレイの区間である。これより、当該現場では、2.4に示したコア抜き調査によるひび割れ深さに着目した修繕工法の選定が、舗装の構造的健全度の概ね均一なレベルへの回復に大きく寄与したことが分かる。渡邊らは、別の現場にて一律の一層切削オーバーレイを実施した場合の修繕前後の構造評価を行った結果、当該区間内の構造的健全度のバラツキは概ねそのままであったことを報告している<sup>4)</sup>。この報告と照らし合わせると、構造的健全度の回復を目的とする場合は、詳細調査を通じた適切な修繕工法の選定が効果的であることが分かる。この結果については、平成29年度の日本道路会議等の場を通じて発表し、路盤の健全性の保護を通じた舗装の長寿命化という舗装点検要領の考え方の普及をはかった。なお、実際の修繕工事は、構造面のみならず路面機能面など様々な理由を勘案し道路管理者が総合的な判断のもとその区間・内容を決定するものであり、本報はその是非を議論するものではないことを申し添える。

当該現場では、多数のコア抜きによるアスコン層内部の損傷確認を実施したが、現場制約条件等から全ての現場で同様の取組を実施することは困難と考えられる。今後は、非破壊で面的にアスコン層内部の損傷状況を把握する手法の検討が必要と考えられる。

## 2.7 路盤損傷時の開削調査に関する実験

舗装走行実験場において試験舗装を構築し、実大載荷実験を実施した。路盤における損傷を早期に発現させるために、疲労破壊輪数が10万輪程度になる構造の試験舗装を軟弱路床上に構築した。試験舗装の断面図を図2-5、に示す。試験舗装はアスファルト混合物層および粒状路盤層からなる2層とした。既設路床のCBRは2.0であり、試験舗装の等値換算厚さ $T_A$ が19cmであることから、算出される疲労破壊輪数は約8万輪となる。当該実験では25万輪まで促進載荷を実施し、所定の走行輪数ごとに調査を実施した。

開削調査に先立って、路面性状調査並びにFWD調査を実施した。路面性状測定結果として図2-6に走行輪数に対するひび割れ率の推移を、図2-7に路面横断形状の変化を示す。ひび割れについては10万輪走行までは発現せず、その後20万輪および25万輪走行の時点にかけて増加傾向となった。わだち掘れ深さについては、1.5万輪走行時に約20mmまで急増した後、10万輪で約30mm、40万輪で40mmと漸増した。20万輪時点以降はわだち掘れの進展がみられなかった。

次にFWDによる載荷部直下のたわみ量D0の測定結

果を示す。図2-8より、10万輪走行まではたわみ量が減少し支持力が増加する傾向がみられた。その後、ひび割れの生じた20万輪走行以降において、たわみ量の微増傾

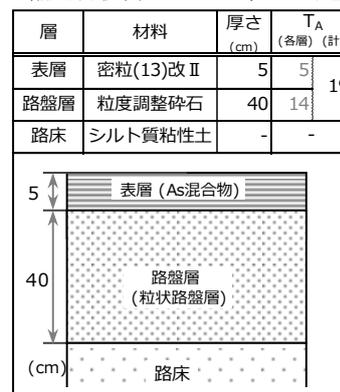


図2-5 実大載荷実験の試験断面

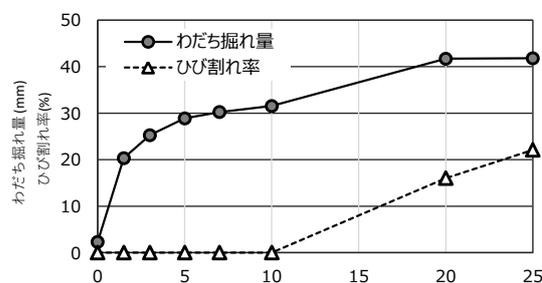


図2-6 走行輪数に対するひび割れ率の推移

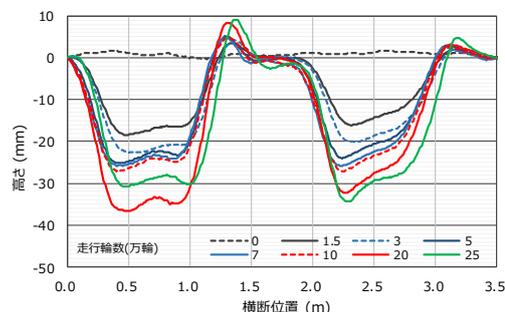


図2-7 路面横断形状の変化

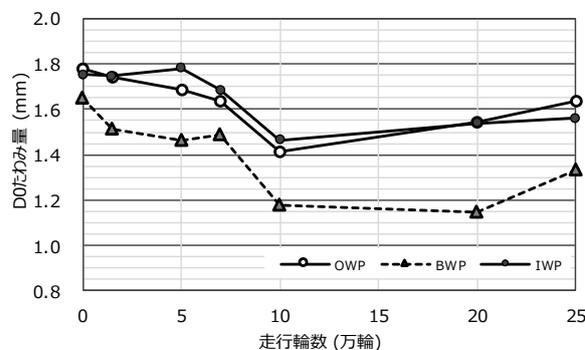


図2-8 FWD たわみ量

向がみられた。

25万回の載荷終了後に、開削調査を実施した。写真2-2に舗装の状況を、図2-9に各層上面位置を示す。表層の厚さはわだち掘れの箇所においても、載荷前後で変化が小さく、わだち掘れの深さは路盤層の変形に起因するところが大きいことが把握できた。

以上のとおり、わだち掘れの進展に対してひび割れの発生が遅れていた間に、FWD たわみ値が減少する傾向がみられた。このことから推察すると、アスコン層が薄いため路盤に塑性変形が発生するとともに、剛性が高まったものと考えられる。また20万輪走行時にひび割れが確認されて以降は、表層および路盤層においてFWD たわみ値の増加傾向がみられた。このことから、ひび割れの進展が舗装の構造的損傷に影響を与えていることが示唆される。

**2.8 路面のひび割れがFWD たわみに及ぼす影響**

一定以上の損傷が進行した舗装の構造状態を把握するために、路面に生じるひび割れがFWD たわみ量に及ぼ



写真 2-2 開削調査時の舗装状況

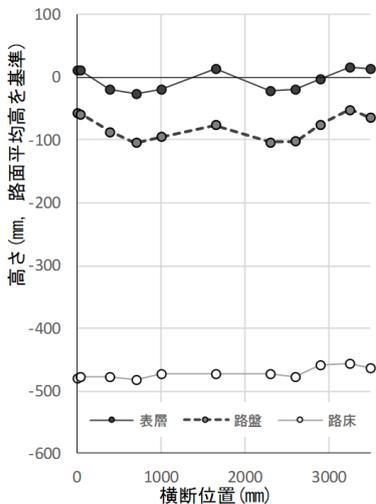


図 2-9 開削調査時の舗装の各層厚

す影響の把握が重要である。そこで、ひび割れの程度や、ひび割れと FWD 載荷版との間隔によって、たわみ量がどのように変化するか、FEM 解析を用いて分析した。解析モデルの一例を図 2-10 に示す。

図 2-11 のように、固定されたひび割れ位置に対して FWD 載荷版の位置を変化させ、発生する FWD たわみ量を計算した。その結果、直径 30cm の載荷版に関して、載荷版中心をひび割れから 20cm 程度離せば、ひび割れによる FWD たわみ量への影響は小さいと考えられる。今後、実大実験と解析結果を統合することにより、舗装の状態ごとにひび割れと FWD たわみとの関係を体系的に把握する。

**2.9 舗装の損傷の体系化に関する検討**

舗装の損傷に関するこれまでの調査・実験を踏まえ、舗装の構造的損傷をもたらす現場条件の因果関係について、過去 40 年程度の主要文献や新たな開削調査での知見を統合し、体系的に整理した。その結果を図 2-12 に示す。

アスファルト舗装の損傷パターンは舗装構成や地域特性によって多種多様であり、材料に関するひとつの劣化現象が複数の損傷の原因になることや、ある損傷が別の

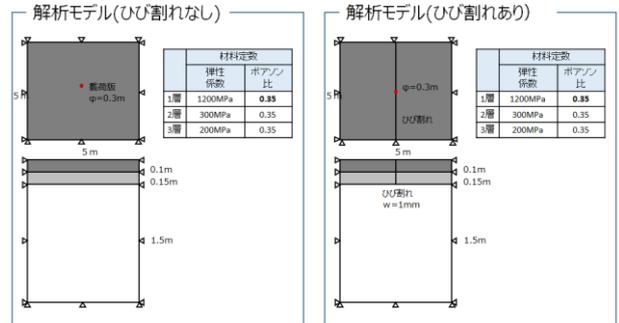


図 2-10 路面ひび割れと FWD たわみに関する解析モデル例

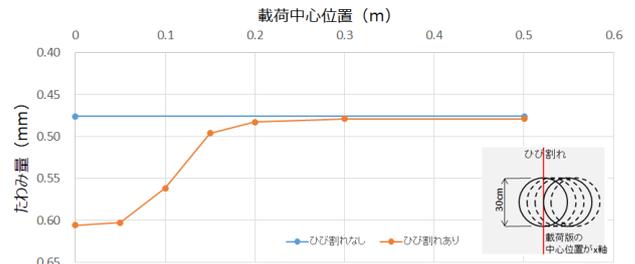


図 2-11 載荷版の位置とたわみ量に関する解析結果

損傷の原因になる等の場合がある。しかし、既往の知見では、損傷同士の因果関係や経時的進展を体系的に俯瞰できるように示したものがなく、道路管理における点検・診断・措置を合理的に判断する際の課題のひとつとなっていた。



### 3. 軽交通道路における舗装の損傷実態調査

#### 3.1 背景

重交通道路と軽交通道路では、舗装の損傷形態に応じて点検診断時の着目点や維持管理手法が異なる可能性があるため、本研究では重交通道路と軽交通道路の損傷状況の特徴を把握する調査を行った。

#### 3.2 調査方法

北海道内の国道約6,500kmを対象にアスファルト舗装の損傷実態を把握した。具体的には、現道の目視調査を行って、舗装管理支援システムに記録されているデータの区間毎(約100m単位)のひび割れ種類を判別し、どのような種類のひび割れがどのような条件の路線に多いかを調べた。判別したひび割れの種類は以下の4種類である。通過車両の繰返し載荷によって発生し舗装下面から上層に向かって伸びるボトムアップ型疲労ひび割れ(以下、ボトムアップひび割れ)、舗装表面から下層に向かって伸びるトップダウン型疲労ひび割れ(以下、トップダウンひび割れ)、路床内の水分が凍結して形成されるアイスレンズが成長することで生じる凍上ひび割れ、気温の上昇・下降によるアスファルト混合物の温度応力によって生じる低温ひび割れである。一つの区間に複数種類のひび割れが発生している場合には、複数種類のひび割れが発生している区間として扱った。目視調査のデータを基に、ボトムアップひび割れ、トップダウンひび割れおよび凍上ひび割れに関しては、ひび割れ率が5.0%以上の区間数を10km毎にカウントして地図上に表示した。低温ひび割れに関しては、1km当たりの低温ひび割れ発生本数をカウントして地図上に表示した。さらに、各々のひび割れがN<sub>4</sub>、N<sub>5</sub>、N<sub>6</sub>、N<sub>7</sub>交通断面のうちどのような区間に多いのかを整理した。ちなみに本研究では、N<sub>4</sub>、N<sub>5</sub>交通を軽交通道路区間として扱っているので留意さ

りたい。

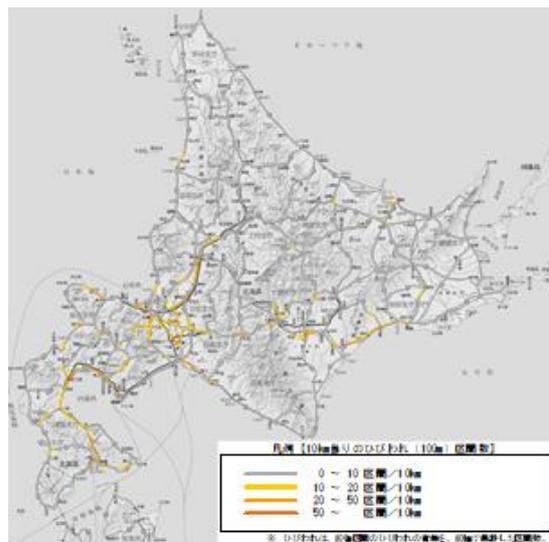


図3-2 トップダウンひび割れの発生分布図

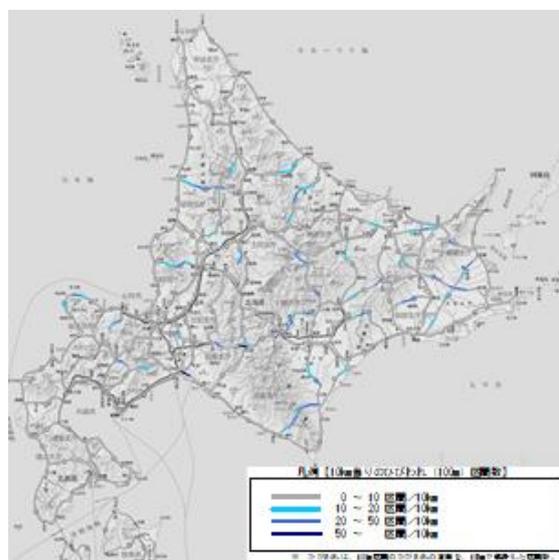


図3-3 凍上ひび割れの発生分布図

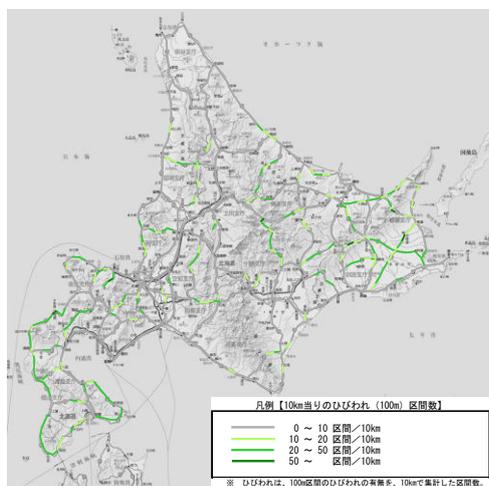


図3-1 ボトムアップひび割れの発生分

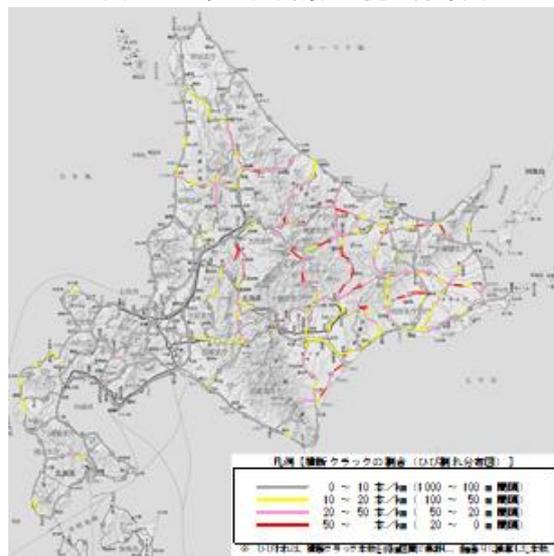


図3-4 低温ひび割れの発生分布図

表 3-2 各ひび割れの発生延長及び調査集計区間の延長に対する比率

交通量区分	As混合物層厚 (cm)	14cm未満	14cm以上 20cm未満	20cm以上 30cm未満	30cm以上	合計
		A	B	C	D	
ひび割れ種別	旧	N <sub>4</sub>	N <sub>5</sub>	N <sub>6</sub>	N <sub>7</sub>	
	現	N <sub>4</sub>	N <sub>5</sub>	N <sub>6</sub>	N <sub>7</sub>	
	調査集計区間の延長(m)	2,557,530	1,353,654	508,295	115,783	4,535,262
ボトムアップひび割れ	ひび割れ発生区間の延長(m)	336,044	150,288	10,135	932	497,399
	調査集計区間の延長に対する発生区間比率(%)	13.1%	11.1%	2.0%	0.8%	11.0%
トップダウンひび割れ	ひび割れ発生区間の延長(m)	131,273	62,707	46,451	7,845	248,276
	調査集計区間の延長に対する発生区間比率(%)	5.1%	4.6%	9.1%	6.8%	5.5%
凍上ひび割れ	ひび割れ発生区間の延長(m)	112,752	59,233	11,036	113	183,134
	調査集計区間の延長に対する発生区間比率(%)	4.4%	4.4%	2.2%	0.1%	4.0%
低温ひび割れ	ひび割れ発生区間の延長(m)	229,742	105,960	13,781	995	350,478
	調査集計区間の延長に対する発生区間比率(%)	9.0%	7.8%	2.7%	0.9%	7.7%

なお、調査は自動車専用道路を除く下り車線を対象とし、構造物区間やコンクリート舗装区間など表 3-1 に該当するデータの区間長を除外した上で集計した。これらのデータを除外した理由は、一般的なアスファルト舗装区間に比べて舗装構成や基盤条件が特殊であり、除外するのが妥当と考えたためである。

表 3-1 除外区間一覧 (単位 : m)

項目	延長(m)
舗装延長	6,584,198
除外区間	
① 構造物	177,348
② 最新ひび割れ率が空欄	109,396
③ 最新調査後に工事	1,331,079
④ 上り・及び自専道	152,190
⑤ 最新調査時からルート変更・通行止め	16,702
⑥ Co舗装区間	135,109
⑦ 累積大型車交通量が空欄、舗装厚不明	127,112
舗装延長 - 除外区間	4,535,262

3. 3 調査結果

図 3-1 にボトムアップひび割れの発生分布図を、図 3-2 にトップダウンひび割れの発生分布図を、図 3-3 に凍上ひび割れの発生分布図を、図 3-4 に低温ひび割れの発生分布図を示す。図 3-1 より、ボトムアップひび割れは、道内の広い範囲に発生しており、主に郊外部において多く発生していることがわかる。図 3-2 より、トップダウンひび割れは札幌近郊と札幌函館間や札幌旭川間などの幹線道路での発生が多い。図 3-3 と図 3-4 より、凍上ひび割れと低温ひび割れは道北地域や道東地域の内陸部に多く発生していることが分かる。

表 3-2 には各ひび割れの発生延長及び調査集計区間の

延長に対する発生比率を示す。赤枠で囲んだ部分に着目すると、ボトムアップひび割れ、凍上ひび割れ、低温ひび割れは N<sub>4</sub>、N<sub>5</sub> 交通断面などの舗装厚の薄い軽交通路線に多く発生していることが分かる。一方、トップダウンひび割れは N<sub>6</sub>、N<sub>7</sub> 交通断面などの混合物層厚が厚い重交通路線に発生している傾向が見られる。軽交通路線は混合物層厚が薄いため、作用する力に対する抵抗性が小さく、様々なひび割れが発生し易いと推察される。軽交通区間では、特にボトムアップひび割れの発生区間延長が最も長く、次いで低温ひび割れ、凍上ひび割れの順であることが着目される。つまり、軽交通区間ではボトムアップひび割れに対する対処が最も多くなると理解できる。以上のように、交通断面によってひび割れ損傷の形態は異なっている。N<sub>4</sub>、N<sub>5</sub> 交通断面などの混合物層厚の薄い軽交通路線区間に着目すると、ボトムアップひび割れや低温ひび割れ、凍上ひび割れが発生しやすいことが確認された。N<sub>4</sub>、N<sub>5</sub> 交通断面などの軽交通路線区間の舗装マネジメントならびに舗装維持修繕計画を考える場合には、これらの損傷形態への対処方法を検討することが大切である。特に、ボトムアップひび割れは広い範囲で発生している実態にあり、今後舗装の老朽化が進行するにつれて増加する性質のひび割れであると考えられるため、要点であるといえる。

4. S 波速度構造に基づく舗装の劣化度評価手法

4. 1 高周波表面波探査による舗装 S 波速度構造把握

舗装の表面に打撃振動を与えると、舗装構成部材中を弾性波動が伝播する。伝播する弾性波動のうち、表層部を選択的に伝播する表面波を測定して舗装の物性構造を 2 次元断面として可視画像化する方法が表面波探査である。舗装構造調査に利用されてきている FWD も、同様に打撃時の弾性波振動を測定し、その測定データから静荷重負荷時のたわみ量を推定しているため、表面波探査

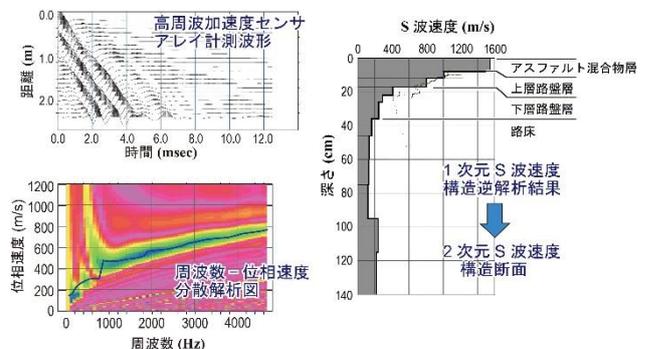


図 4-1 高周波表面波探査による舗装構造の解析手順 (参考文献 5)に加筆)

法の一つであるという点では類似した手法である。ただしFWDが測定する振動の周波数帯域が数100Hz程度以下であるのに対し、開発対象とする手法は数10Hz~数kHzの高周波数帯域の表面波を測定する。そこで本手法を高周波表面波探査と称している<sup>5)</sup>。舗装は最表層部にせん断剛性が最も大きいアスファルト混合物層（アスコン層）が存在し、通常は輪荷重を分散させるため下方ほどせん断剛性が小さくなるという特徴的な構造を有しているが、高周波表面波探査はこのような最表層の剛性の高い層が存在する一般的な舗装構造でも適用可能である。またアスコン層や上下層路盤を伝播する表面波は、数100Hz~数kHzの周波数帯域が卓越する。逆にこの周波数帯域の表面波を測定することで舗装の物性構造を推定する。

図4-1に高周波表面波探査記録からの舗装構造解析手順を例示する<sup>5)</sup>。同図左上が測定記録である。2.4mのアレイ区間に10cm間隔で加速度センサを並べ、舗装表面を小型ハンマーで打撃したときの振動を計測する。このアレイ内を3ms程度で伝播する優勢な表面波が捉えられている。この時間-距離領域の記録を、周波数-位相速度領域に変換することで表面波分散曲線（同図左下）が求められる。この分散曲線には、100Hzから5kHz程度の周波数帯域において、表面波の位相速度が周波数によって変化する現象、すなわち表面波分散が鮮明に捉えられている。この分散特性に着目し、逆解析によって1次元S波速度構造を求める（同図右）。この逆解析を測線に沿って逐次繰り返すことによって2次元のS波速度構造断面を構築する。この図には、厚さ8cm程度のアスコン層に対応した高速度層が再現されていること、下位にはS波速度が800m/sから300m/s程度の上下部路盤層が分布する。路床・地盤部のS波速度は200m/s程度であり、N値に換算すると6-8程度の柔らかい盛土材料・地盤が分布していると推定することができる。

#### 4.2 非接触型高周波表面波計測システムの開発

高周波数帯域の振動を測定できる加速度センサアレイを路面に稠密に展開し、舗装を伝播する高周波表面波を観測することによって舗装の物性構造を推定できることがわかった。しかし加速度センサを用いる場合、舗装路面へセンサを固着することが必須条件となり、路上での作業区間の設定と安全性確保のために通行規制を必要とするという欠点があった。そこで、非接触で移動が容易な表面波測定システムを試作し<sup>6,7)</sup>、その機能を検証する比較検証実験を実施した。

測定方法の概念図を図4-2に示す<sup>7)</sup>。舗装路の表面を

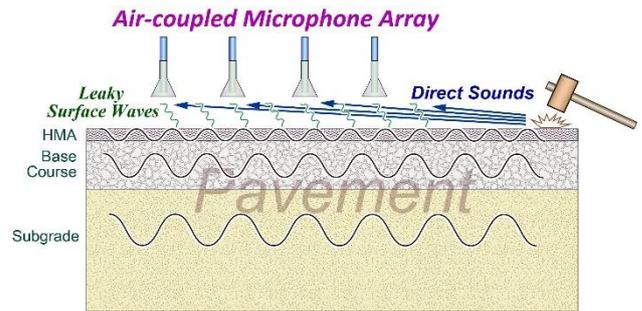


図4-2 非接触型高周波表面波計測の概念図<sup>2)</sup>

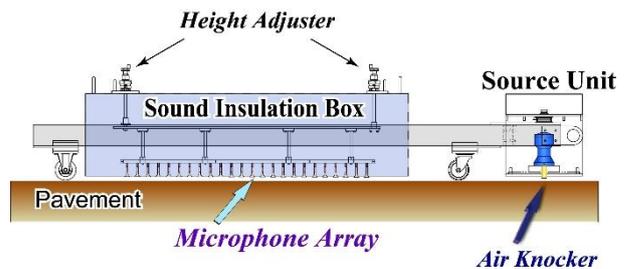


図4-3 非接触舗装路物性計測システムの構成図<sup>6)</sup>

ハンマー等で打撃すると、実体波とともに表面波が励起され、舗装表面を伝播する。この表面波によって舗装表面が振動すると、その一部が空気中に漏洩する。これは漏えい表面波と称される波動で、超音波工学分野では広く計測産業に利用されている。舗装伝播表面波は、舗装構造によって速度分散性を有しているため、漏洩表面波にもそれが反映される。そこでマイクロフォンを舗装表面と平行に多数並べるアレイ配置で漏洩表面波を計測するように工夫した。図4-3に試作した非接触型高周波表面波測定装置試作システムの構成を示す<sup>6)</sup>。本システムはホイール付きのフレームに懸架されており、路上を容易に牽引し、移動計測が可能である。非接触型のマイクロフォンアレイは遮音函体に収納されており、振源から直接空中を伝播する打撃音を極力低減させるよう設計されている。なお、移動時には遮音函体を上昇させ、測定時には下降させて路面と密着させる昇降装置が取り付けられている。測定地点における作業時間は、遮音函体の昇降、振源の操作およびデータ取得を含め、検証実験段階では5秒程度であった。

#### 4.3 非接触型高周波表面波計測システムの改良

非接触型高周波表面波計測システムは、微弱な漏洩表面波を信号として扱うことから、環境音響雑音の抑制が技術開発上の重要点となる。このため、遮音函体と吸音材およびその寸法や形状の検討試験を進め、平成29~30年度に改良を図った。チャンネル数を増大し実用性を高めた。一般に、遮音材が高密度で厚みがあるほど雑音低

減性が高まるが、高品質かつ高い効率で記録取得を可能とするには探査作業装置としての可搬性も重要となる。図4-4に良好と考えられる遮音函体とマイクロフォンの配置設計例を示す。試験遮音函体を用いて取得された記録例を図4-5に示す。図4-5の(b)は記録波形を位相速度と周波数の領域に変換し位相速度の分散曲線を示している。周波数4.5Hzまでの分散特性を取得できている。

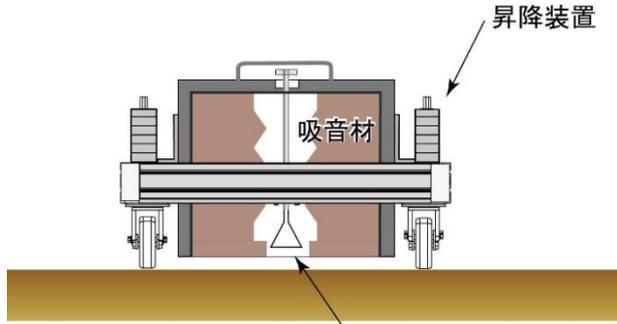


図4-4 遮音函体とマイクロフォンの配置例<sup>8)</sup>

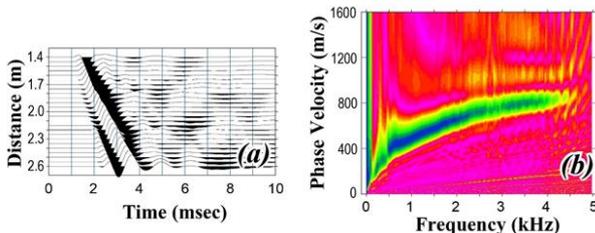


図4-5 非接触型高周波表面波計測の(a)取得記録と(b)分散曲線<sup>8)</sup>

#### 4.4 高周波表面波探査の実舗装路での適用検証

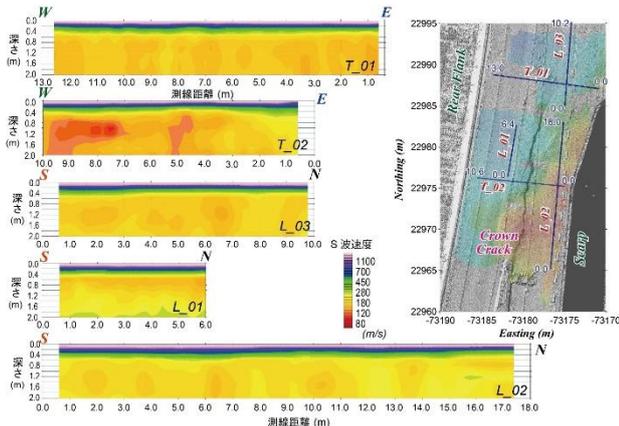


図4-6 測線配置(右図)および各測線のS波速度構造断面(左図)

熊本地震で120gal程度の強震動を受け、その後の豪雨によって高盛土の一部が崩壊した自動車専用道路において、残存部の舗装の内部物性を把握することを目的として高周波表面波探査を実施した。路面には滑落崖と平行

に長さ25m程度の東側落ちのクラックが発生していた。このクラックを挟むように5本の測線を設定し、2次元のS波速度構造を再構成した。

測線配置および各測線のS波速度構造断面を図4-6に示す。調査区間の舗装は、15cmのアスコン層と合計23cmの路盤層で構成され、その下位は客土材で盛り立てられていることがわかってきた。S波断面においても、表層にアスコン層および路盤層が高速度層として明瞭に捉えられている。層厚はほぼ一定であり、同時に実施した地中レーダ(GPR)探査の結果と整合的であった。またクラックを横断するT\_02測線断面には、交差部で路床部のS波速度が周囲より小さくなっており、クラックの下方進展を捉えていると推定できる。なお当該区間はこの路盤面での調査後に一部開削され、当該クラックがほぼ鉛直に1.3m下方まで進展していることが確認されている。また盛土崩壊とは反対側の路線下の路床層が、相対的に低いS波速度を呈していた。盛土施工時の不均一性の影響が示唆される。

#### 4.5 舗装路盤に適した表面波解析手法の検討

標準的な地盤のS波速度分布は、深部になるほど速くなる。一般的に行われている表面波の解析では、最下層に高速の工学的基盤層を仮定し、最下層を最高速度層として最下層速度よりも小さい範囲でノーマルモードの分散曲線を計算する。しかし、舗装道路のように、表層に高速度層が存在すると厚い低速度層が出現し、多数の高次モードが現れ、解析が複雑となる場合がある。最下層速度の設定により浅部の推定速度分布が大きく影響を受ける場合には、地表震源の振動が最下層に到達しているか注意が必要となる。地表起震による表面波のうち、震源位置から遠くない範囲の地震波動の高速度成分は、高速度層からのリーケージ(漏洩)モードとして解析し、最下層の速度条件に影響を受けない計算手法が適している。そこで、平成29年度に表層に高速度層が存在する条件におけるリーケージモードの解析を進めた(図4-7)。

リーケージモードは舗装等の高速度層が表層域に存在する際に、最下層の速度より高速の分散曲線として現れる。最下層のS波速度は195m/sで、これより速い位相速度はリーケージモードである。リーケージモードでは表面波の水平方向への伝播とともに振幅が減衰しており、濃淡で減衰を表している。現在普及している表面波の解析手法では、最下層よりも高速な層の解析は難しく、舗装構造の解析を安定して行うために、今後は、リーケージモードを用いたS波速度分布の解析手法の開発が課題となる。

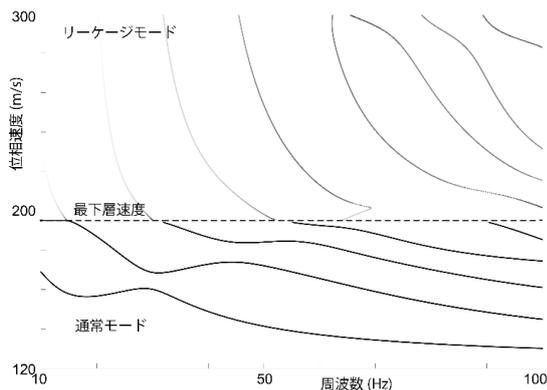


図 4-7 リークージモードの特性分析

#### 4. 6 表面波解析のための地盤構造特定手法

通常の表面波解析手法と異なり、表層が高速度の舗装道路においては、速度構造の深度の確定精度が低い点が問題となっている。そこで、地中レーダにより事前に深度構造を把握しておくことにより、解析精度の向上を図ることができる。図 4-8 に地中レーダを用いた舗装分類例を示す。一部の舗装と路盤の境界、および、路盤と路床の境界の連続分布を明瞭に特定することができる。地中レーダ断面には路盤内や路床下の境界も検知されており、境界の特定は掘削による検証情報を参照して決定している。舗装構造境界の深度分布が特定できることにより、表面波探索の未知パラメータが S 波速度だけとなり、推定精度の向上を図ることができる。掘削情報と地中レーダ断面により、数 cm の精度で舗装構造境界の分布がわかり、FWD や MWD の解析入力パラメータの適正化を図ることができ、補修施工時の参照情報として用いることもできる。

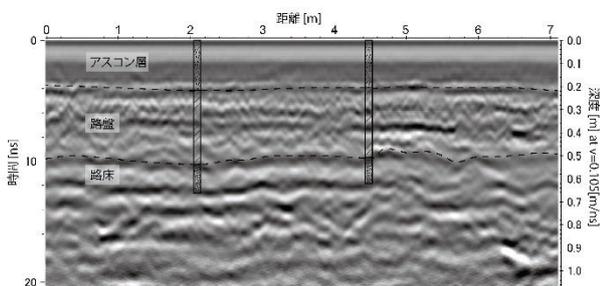


図 4-8 舗装構造の識別例

#### 4. 7 S 波速度を示標とした優先度の評価手順の検討

現位置で、舗装内部の物性構造を 2 次元あるいは 3 次元的に把握することが可能な原位置調査手法としては、地中レーダのほか、MWD を含めた振動計測手法が最も

有効であり、かつ技術的ハードルも低い。一方、舗装を伝播する振動のうち、S 波速度は地盤強度の調査にも広く用いられており、液状化等の危険がある地盤にも対応した速度を示すことが知られている<sup>3)</sup>。ただし現時点では S 波速度分布を利用した舗装の健全度示標は構築されていない。今後室内実験での比較データの取得、FWD、MWD 等の他の原位置調査データとの関係性の検討を進め、S 波速度を用いた舗装健全度示標の提案を行なう予定である。

#### 5. まとめ

平成 28 年度においては、重交通道路に該当する、関東地方整備局管内の直轄国道において、コア抜き調査結果をもとにした修繕工法の選定が、舗装の構造的健全度の概ね均一なレベルへの回復に寄与したことを明らかにした。点検要領に基づく舗装のメンテナンスサイクルにおいては、損傷の進行が早い道路等における早期劣化区間について、詳細調査の実施を通じた適切な措置が求められるが、本調査結果により詳細調査としてコア抜きによる舗装の内部損傷の把握の重要性を示唆するものとなった。

また、路面性状データの分析を通じ、舗装断面によってひび割れ損傷の形態は異なっており、アスコン層の薄い軽交通道路においては、ボトムアップひび割れや低温ひび割れ、凍上ひび割れが発生しやすいことが確認された。舗装のメンテナンスサイクルにおける適切な措置の選定にあたっては、損傷原因を究明・推定することが重要であり、軽交通道路特有のこれらの損傷形態の整理がメンテナンスサイクル上の適切な措置を選定する上で有効な情報となると考えている。

平成 29 年度においては、構造的健全度の回復を目的とする場合は、詳細調査を通じた適切な修繕工法の選定が効果的であることが分かったため、日本道路会議等の場を通じて発表し、路盤の健全性の保護を通じた舗装の長寿命化という舗装点検要領の考え方の普及をはかった。

平成 30 年度においては、舗装の損傷が路盤に至っている場合を想定し、詳細調査のうち開削調査をどのように実施すべきか検討した。実大走行実験の結果によると、路面にわだち掘れが進行しておりかつひび割れの進行が小さい場合は、路盤の圧縮に起因することがわかった。また、路面性状データの分析を通じ、舗装断面によってひび割れ損傷の形態は異なっており、アスコン層の薄い軽交通道路においては、ボトムアップひび割れや低温ひび割れ、凍上ひび割れが発生しやすいことが確認された。

舗装のメンテナンスサイクルにおける適切な措置の選定にあたっては、損傷原因を究明・推定することが重要であり、軽交通道路特有のこれらの損傷形態の整理、軽交通舗装区間における簡易な路面性状把握手法がメンテナンスサイクル上の適切な措置を選定する上で有効な情報となると考えている。

さらに、高周波数成分に着目した表面波探査によって、舗装内部の物性構造を詳細に把握できること、S波速度構造から舗装内部の不均質構造や変形範囲を推定することが可能であることを実証した。また、高周波の表面波を探査可能な実用性を有する装置を作製した。

令和元年度はひび割れの位置とFWDたわみ量の関係について解析にて分析した。これにより、ひび割れの程度や位置が、FWDたわみ量に及ぼす影響が把握できた。加えて、構造的損傷をもたらす現場条件の因果関係について、過去の主要な文献の記載事項を網羅するとともに、実道で新たに開削調査を実施した知見を統合し、体系的に整理した。さらに、高周波表面波探査の問題点を解消するために、地中レーダにより事前に舗装構造の深度分布を特定する手法の開発を進めた。地中レーダにより路盤厚や路床深度および境界分布の把握が行えることにより、S波速度の特定精度を向上することができる。

## 参考文献

- 1) 武藤聡、久保和幸、藪雅行：「舗装点検要領」の策定について、舗装、Vol.52、No.1、pp.11-15、2017.1
- 2) 国土交通省道路局：平成22年度全国道路・街路交通情勢調査 茨城県、65p.、2010
- 3) (公社) 日本道路協会：舗装性能評価法—必須および主要な性能指標編一、pp.15-22、2013.4
- 4) 渡邊一弘、増戸洋幸、篠塚政則、上島壯：短い測定間隔による修繕前後の構造評価結果、土木学会論文集 E1 (舗装工学)、Vol.72、No.3、pp.177-185、2016.12
- 5) 稲崎富士、青池邦夫、今村杉夫、林 宏一：高周波表面波分散特性を利用した舗装の物性構造調査、第50回地盤工学研究発表会講演概要集、pp.195-196、2015
- 6) Inazaki, T., Aoike, K., Kita, T., and Hayashi, K., (2014): High-frequency surface wave measurement for the pavement structural analysis, *Proceedings of the 27th Annual Symposium of the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems (SAGEEP 2014)*, 7p., 2014
- 7) 稲崎富士：2011年東北地方太平洋沖地震による河川堤防・表層地盤のS波速度構造の変化、高周波表面波分散特性を

利用した舗装の物性構造調査、日本地震学会2016年秋季大会予稿集、155p.、2016

- 8) 稲崎富士、木佐貫寛、今村杉夫、林 宏一：非接触舗装物性計測システムの開発（その4）：函体の遮音性の改良と実用化、第138回学術講演会講演論文集、物理探査学会、pp.13-16、2018

## 6.3 措置が必要な部位・箇所の優先度決定手法の構築

### 6.3.4 先端的維持管理技術による土木機械設備マネジメントに関する研究

担当チーム：技術推進本部（先端技術チーム）

研究担当者：新田恭士、吉田 潔、上野仁士

#### 【要旨】

土木施設に導入されている各種の土木機械設備は、河川・道路において非常に重要な役割を果たしているが、施設数の増大、老朽化の進行、限られた維持管理予算の相反する条件下で、より適切なライフサイクルマネジメントの導入が進められている。しかしながら近年、想定を超える天災による被災や、これまで重要とされていた部品や機器の故障により土木機械設備の機能喪失が見られることから、機能回復時間等を考慮した信頼性評価と機器や部品レベルでの重要度判断や保全方法の最適化を検討し、それらの総合的なマネジメント手法を確立する必要がある。本研究では、国民の生命、財産を守る上で不可欠な土木機械設備の確実な機能発揮を目指し、土木機械設備の効率的・効果的な維持管理に関する手法について提案するものである。令和元年度は、過年度まで検討を進めてきた、機械設備の故障時からの機能回復能力の定量化方法について、評価基準の見直しと、定量化結果の実際の設備維持管理への活用に向けての検討を主体に実施した。

キーワード：土木機械設備、維持管理、ストックマネジメント、リスク回避

#### 1. はじめに

土木研究所においては、これまで土木機械設備の効率的・効果的な維持管理の実現を目的として、信頼性評価手法及び関連する複数の施設における社会的な影響度と設備の健全度の総合評価手法、また「非」常用設備への状態監視技術に係る研究を実施し、効果的な更新や整備の計画立案に寄与してきたところである。

土木機械設備の信頼性評価において、故障等のリスクや故障時の機能回復の遅速も有力な要素となるが、これまでこれらを盛り込んだ評価手法が確立されていない。そのため、機器・部品の重要度判断や保全方法の選定にあたり現実と乖離した結果となることがあることから、これらを含めた総合的な信頼性評価手法の確立とマネジメントについて検討する必要がある。

今年度は、過年度まで検討を進めてきた、機械設備の故障時からの機能回復能力の定量化方法について、評価基準の見直しと、定量化結果の実際の設備維持管理への活用に向けての検討を主体に実施した。

#### 2. 研究実施内容

本研究では、土木機械設備についてより効果的・効率的な土木機械設備の設計及び維持管理に関する手法の提案に資する、以下の研究に取り組んでいる。

- ・故障リスク等を考慮した設備ストックマネジメント手法の検討

#### 3. 研究の基本方針

これまで土木機械設備の信頼性評価に関する研究において、故障等のリスクや故障時の機能回復の遅速を盛り込んだ評価手法の確立は行われていない。このため、機器・部品の重要度判断や保全方法の選定において、管理実態と乖離することがある。

したがって、故障等のリスクや機能回復の遅速を考慮した信頼性評価とマネジメント手法の確立と、各設備に最適な保全方法の選定手法の検討を行い、基準化に向けての技術資料を策定し提案する必要がある。

これらを実現するにあたって、以下の項目に着目し研究を進める。

- (1) 機械設備の運用、機能回復期間、整備体制等によるリスク回避の定量化方法検討
  - ・故障等のリスク、機能回復の遅速に関するデータ収集及び機能回復難易度、機能補完方性の検討
  - ・災害時に弱点となる設備構造の抽出及びFTA等の信頼性評価手法を活用した弱点克服の検討
  - ・設備構造における弱点を考慮した土木機械設備に最適な信頼性評価手法の提案に向けた課題整理
  - ・抽出された弱点となる機器部品の共有化の可能性、有効性検討及び技術的課題の抽出
  - ・信頼性評価手法を活用したリスク回避の定量化手法の検討
- (2) モデルケースによる定量的評価シミュレーションと設備管理実態の比較検討
  - ・信頼性評価手法を活用したリスク回避の定量化シミュレーション

- ・設備管理実態比較による課題の抽出と対応策検討
  - ・河川GISモデルを用いた浸水被害比較でのリスク回避度合いの評価
- (3) 故障リスク等による機能損失を考慮したストックマネジメント手法の検討
- ・整備・更新の優先度決定への取り込み検討
  - ・複数施設での適応性評価
  - ・手法としてとりまとめ

2項目は、管理者の実情により評価基準が異なることが考えられる。

- 「復旧までの所要時間」の評価点
- 「修繕費用ランク」の評価点

そこで設備管理者に対し、上記2点の項目について、適切と思う評価基準のアンケート調査を行った。調査対象は、国土交通省各地方整備局単位とした。

「復旧までの所要時間」に関する結果を表-2と図-1に、「修繕費用ランク」に関する結果を表-3と図-2に示す。

「復旧までの所要時間」については、図-1より、評

#### 4. 研究内容

##### 4.1 機能回復指標の評価基準の見直しに関する検討

表-1 FRDAの評価と配点、算出式

大項目	小項目	評価	4点	3点	2点	1点	合計点	機能回復指標算定のための点数配分の調整		
								元の合計点	機能回復指標算定点数	
機能回復難易度	復旧までの所要時間	4段階	7ヶ月以上	4~7ヶ月	3~4ヶ月	3ヶ月未満	A:左記3項目の合計 3~8点	7~8点	→	4点
	設備復旧者の違い	2段階			メーカ	点検業者		6点	→	3点
	設備復旧場所	2段階				工場		現場	5点	→
機能補完性	予備品・二重化によるもの	4段階	なし	対応可(重)	対応可(軽)	二重化可能	B:左記2項目の計 2~7点	6~7点	→	4点
	近隣他機場等による機能補完	3段階		不可能	能力不足だが可能	可能		4点	→	3点
修繕費用ランク		4段階	1000万円超	1000万円以下	100万円以下	30万円以下	C:1~4点	2~3点	→	1点
								4点	→	4点
								3点	→	3点
								2点	→	2点
故障検知難易度		4段階	分解が必要			目視で特定可能	D:1~4点	4点	→	4点
			分解しても特定困難	メーカが分解	点検業者で分解可能			3点	→	3点
								2点	→	2点
								1点	→	1点

機能回復指標を算定

機能回復指標は  $4 \times A \times B \times C \times D$  で算出

(注) 機能回復難易度Aは、「設備復旧者の違い」が操作員の場合は、他の点数に関わらず1点とする。

昨年度までの研究で、機械設備の故障など機能喪失時からの回復の遅速の定量的評価手法として、機能回復難易度評価手法 (Function Recovery Difficulty Analysis。以下「FRDA」と記載) を考案した。FMEA (Failure Mode and Effect Analysis。故障モード影響解析) を参考に、各評価項目と4段階の評価基準を設定し、その評価基準に基づき各項目を採点して大項目毎に合計、その後、大項目の点数を4段階に調整のうえ機能回復指標を算出するものである。FRDA の評価項目と評価基準例、機能回復指標算出式を表-1に示す。

この表に示す評価基準のうち、「復旧までの所要時間」「修繕費用ランク」は、これまでは研究途上であり、機能回復指標算出の有効性の確認のため、仮に設定したものである。実際に管理者が評価する場合は、実態に即した評価基準を設定する必要がある。その場合、下記の

評価基準の傾向が二分化されていることと、過年度まで設定していた評価基準が大きめ (甘い) であったことがわかる。

また、「修繕費用ランク」については、図-2より、大多数が似たような傾向を示し、過年度まで設定していた評価基準とおおむね近い傾向ではあるが、一地整のみ突出して金額が高くなっていることがわかる。

以上から、評価基準には地域差があると考えられる。したがって、統一的な基準の設定は意味をなさず、評価者が各自で評点を決定することが適切と考える。

なお、回答いただいた際にはこれらの評価について様々な意見をいただいた。未回答の管理者もあったが、その理由については回答をいただいた。

それらの意見と、それに対する見解について以下に記す。

表-2 「復旧までの所要時間」各管理者の回答

回答者	1点	2点	3点	4点
A	2週間未満	2週間以上	3ヶ月以上	6ヶ月以上
B	5日未満	5日以上	10日以上	1ヶ月以上
C	1日未満	1日以上	1週間以上	1ヶ月以上
D	1ヶ月未満	1ヶ月以上	3ヶ月以上	6ヶ月以上
E	1週間未満	1週間以上	1ヶ月以上	2ヶ月以上
F	3日未満	3日以上	7日以上	1ヶ月以上
G	1ヶ月未満	1ヶ月以上	3ヶ月以上	6ヶ月以上
H	3ヶ月未満	3ヶ月以上	4ヶ月以上	7ヶ月以上

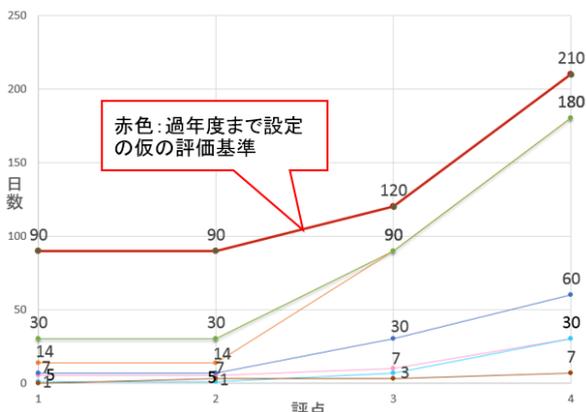


図-1 「復旧までの所要時間」各管理者の回答

表-3 「修繕費用ランク」各管理者の回答

回答者	1点	2点	3点	4点
A	50万円以下	100万円以下	1,000万円以下	1,000万円超
B	30万円以下	50万円以下	500万円以下	500万円超
C	250万円以下	1,000万円以下	5,000万円以下	5,000万円超
D	100万円以下	300万円以下	500万円以下	500万円超
E	100万円以下	500万円以下	1,000万円以下	1,000万円超
F	50万円以下	100万円以下	1,000万円以下	1,000万円超
G	30万円以下	100万円以下	1,000万円以下	1,000万円超

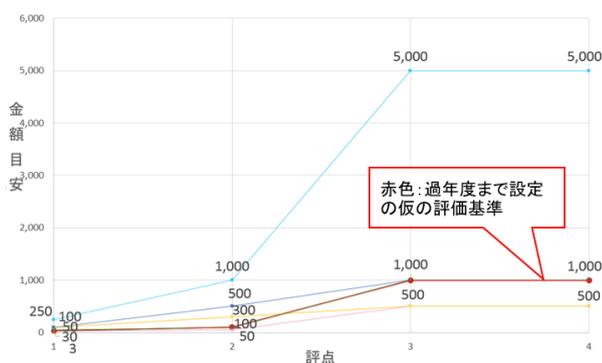


図-2 「修繕費用ランク」各管理者の回答

○復旧までの所要時間について

- ・ポンプ設備の出水期/非出水期等の運用時期を考慮する必要がある。

回答→故障時のポンプ運用時期を考慮する事は指摘の通り重要と考える。機器・部品が故障し施設の不稼働時が非出水期だった場合は、復旧までの所要時間は次出水期までの長期間許容可能と考える。本検討の場合、評価の項目で「機能補完性」で二重化や予備品、「故障検知難易度」を評価している事から、想定としては基本的には出水期、運用中に機器・部品の故障により施設が不稼働となった場合を想定している。

- ・部品レベルで様々な故障ケースに応じて個々に「概算費用」「復旧時間」等の情報確認を行う必要が生じ煩雑である為、定量的評価は煩雑で評価困難である。

回答→全部品を網羅しあらゆる故障ケースに応じて、個々に情報確認し評価を実施して行く事は確かに煩雑と認識している。だが、作成後の用途は広く機器部品の構成や評価は、改造等の仕様変更を伴う更新がない限りは大きな変更はないと考えられる。ただし、定期的には見直しは必要となる。また、故障ケースについては代表的な故障のみを選定、機器・部品を取り換える事を前提と考える等、今後の研究により簡易化を図りたいと考えている。

- ・設備や機器の経過年数により、復旧時間が異なるのではないかと。(古い程、部品の調達等に時間がかかる、修繕不可の可能性はある)

回答→ご指摘の通り、経過年により、部品供給の有無や故障の程度が変わる事から、復旧までの所要時間や修繕費用は異なると思う。

評価の際は、評価時の経過年数を考慮し実施する為、ある一定の期間毎の見直しの実施が必要となると考える。

- ・修繕内容の重要度を指標とすることが必要である。

回答→修繕内容自体は、「復旧までの所要時間」、「修繕費用ランク」を評価する際に想定しなければならないため、ご指摘の通り考慮すべき項目と考える。

本評価項目では更新、整備、補修等の修繕内容の差や重要度は「機能回復難易度」(復旧までの所要時間、設備復旧者の違い、設備復旧場所)と、「修繕費用ランク」で細分化し評価しており、修繕内容自体には、機能回復の困難と容易を評価する要因とならないと考える。

○修繕費用ランクについて

- ・故障した場合は金額に関係なく補修は実施する為、修繕費用ランクによる評価は必要ないのではないかと。

回答→本検討では、機能回復の難易度を評価するものである。運転に関係する故障の場合、実態としては金額に関係なく機能は回復させると思うが、機能回復に掛かる財源の確保の手間や難しさは間違いなく異なると思う。

る。本評価では、その手間や難しさを定量的に評価する項目として修繕費用ランクの評価を設定している。

・設備稼働に致命的な故障は金額の大小にかかわらず早急な対応が必要であり、想定される被害規模が指標の一つと考えられる。

回答→被害規模は重要で故障時の想定される被害規模により、機能回復難易度、修繕費用ランク、故障検知難易度等、各評価は異なる。ただし、被害規模の想定は評価者によって異なり、またその数値化は更に困難である。FRDA では各機器で故障内容・規模を想定しその故障に応じた評価を入れる事としており、各機器である程度一定としている。また、その内容と規模はその機器が起こす一般的な故障とし、その機器を修繕内容は取替が必要な規模を基本としている。

#### 4.2 機能回復指標の活用に関する検討

FRDA による機能回復能力の定量化は、下記に示すように様々な活用があると考える。

##### ① 維持管理計画への反映・活用

機械設備の維持管理計画は、国土交通省「河川ポンプ設備点検・整備・更新マニュアル（以下「マニュアル」と表記）に則り策定される。構成機器を予防保全とすること事後保全とするかは、信頼性評価により「致命的機器」「非致命的機器」として仕分けすることで行われマニュアルにも例示されているが、この仕分けでも維持管理予算を超過し計画策定に苦慮している実例がある。そのような場合に、さらに機能回復の遅速を評価に加えることで、さらなる仕分けが可能となると考える。

##### ② 設備新設時等の機器選定への活用

設備新設時の機器選定においては、評価要素の一つに「維持管理性」があるが、コストや設置スペースなどと異なり定性的評価となっている。これを定量化することにより、より具体的な評価が可能と考える。

##### ③ 予備品選定への活用

同じ構成部品でも、表-1 に示した評価項目のうち、予備品の有無により「復旧までの所要時間」「修繕費用ランク」が異なる。そこで、予備品が有る場合と無い場合双方の機能回復指標を算定し、その差の大小により、予備品保有の効果（＝早期復旧が可能）を定量的に示すことができると考える（差が大きいものほど予備品保有効果が高い）。

以上の各項目について検討した結果を以下に記す。

なお、検討に当たっては FRDA の評価シミュレーションを行ったが、評価基準はシミュレーション対象の地方整備局の回答を反映して行った。

#### 4.2.1 維持管理計画への反映・活用について

先述のさらなる仕分けの方法として、FMEA による故障等級と、FRDA による機能回復指標の組合せによる評価が考えられる。

組合せによる評価は、機器の故障や機能回復の遅速が設備の稼働への影響の大小により行うこととなる。そのため、それを判定するためにはそれぞれのしきい値の設定と、双方の指標の組合せ方法の検討が必要である。しきい値の考え方や組合せ方法は昨年度、複数案を考案している。今年度は、それらをより具体的に、実態に即した方法を整理することを主体に検討した。

昨年度考案した案を以下に示す。なお、用語は今年度の検討内容に合わせて次のように整理した。

①機能回復指標の評価を故障等級と同様「致命／非致命」としていたのを、機能回復が「困難／容易」と改めた。②故障等級と機能回復指標両方での評価も「致命／非致命」としていたが、予防保全とする場合の判定に表現を改めた。

案1：故障等級が「致命」、機能回復指標が「困難」の場合に予防保全とする案

案2：故障等級と機能回復指標のどちらか一方が「致命」または「困難」の場合に予防保全とする案

案3：機能回復指標と故障等級から算定される数値（組み合わせ評価値）としきい値で判定する案

案3-1：機能回復指標と故障等級の平均値で判定

案3-2：機能回復指標と故障等級の幾何平均値で判定（故障等級のしきい値ならびに組み合わせ評価値のしきい値は、それぞれ2または2.5の2パターンについて検討）

案4：全項目が致命／非致命、困難／容易で判定する案

案4-1：故障等級・機能回復指標・平均値・幾何平均値どれもが「致命」「困難」である場合に予防保全とする案

案4-2：故障等級・機能回復指標・平均値・幾何平均値どれもが「非致命」「容易」である場合以外に予防保全とする案

本検討では、維持管理計画上で、予防保全対象機器のさらなる仕分け（予防保全から事後保全への変更）を企図していることから、故障等級が致命でかつ機能回復指標が容易である事を条件とするため、案3を適用する。

故障等級並びに組合せ評価のしきい値、組合せ評価値の算出法の組合せにより、8つの検証パターンが生じる。その組合せとパターン名を表-4に示す。

また、案1についても「組合せ評価無し」として合わ

せて検証する。

故障等級で致命と判断されたものから事後保全へと仕分け可能なものについて、各パターン毎の数を表-5に、抽出された部品を表-6に示す。

この表から、「致命」と評価して予防保全すべき構成機器のうち、約半数が「回復容易」であり、「組合せ評価無し」ではこれらの機器が事後保全にできる可能性を示唆している。

組合せ評価では、組合せパターンにより仕分けできる構成機器数が変動する。故障等級のしきい値が2.5で組合せ評価のしきい値が2の場合(パターン3A,3G)は、算定法によらず仕分けできる機器はないとの結果となった。また、仕分け可能機器が多くなるのは、組合せパターンのしきい値が2の場合(パターン1A,1G,3A,3G)より2.5の場合(パターン2A,2G,4A,4G)の方が、その中で

表-4 検証組み合わせパターン

	FMEA 故障等級 しきい値	FRDA 故障回復難易度 しきい値	組み合わせ評価	
			算出法	しきい値
パターン1A	2	3	平均	2
パターン1G			幾何平均	
パターン2A			平均	2.5
パターン2G	幾何平均			
パターン3A	2.5		平均	2
パターン3G			幾何平均	
パターン4A		平均	2.5	
パターン4G		幾何平均		

表-5 各パターン毎の仕分け可能数

故障等級 しきい値	故障等級 致命数	組み合わせ 評価無し	組み合わせパターン			
			1A(上) 3A(下)	1G(上) 3G(下)	2A(上) 4A(下)	2G(上) 4G(下)
2	109	52 (47.71%)	2 (1.83%)	2 (1.83%)	19 (17.43%)	22 (20.18%)
2.5	84	40 (47.62%)	0 (0.00%)	0 (0.00%)	7 (8.33%)	10 (11.90%)

○内の%は、故障等級致命数に対する各評価の抽出割合を示す。

表-6 各パターン毎の仕分け可能構成機器

装置	機器区分	部品名	組み合わせ評価無し		組み合わせ評価パターン								
			故障等級 しきい値2	故障等級 しきい値2.5	1A	1G	2A	2G	3A	3G	4A	4G	
主原動機	機関本体関係	吸・排気弁	○	○									
主原動機	機関本体関係	ピストンリング	○	○									
主原動機	機関本体関係	オイルリング	○	○									
主原動機	機関本体関係	ピストンピン	○	○									
主原動機	機関本体関係	調速機	○	○									
主原動機	潤滑油系統	内部潤滑油ポンプ	○	○									
主原動機	潤滑油系統	初期プライミングポンプ	○	○			○	○					
主原動機	潤滑油系統	圧力調整弁	○	○									
主原動機	燃料系統	燃料噴射ポンプ	○	○									
主原動機	燃料系統	燃料噴射弁(燃料弁)	○	○									
主原動機	燃料系統	高圧管	○	○									
主原動機	燃料系統	タペット	○	○									
主原動機	燃料系統	燃料濾過器	○	○			○	○					
主原動機	空気始動系統	分配弁・塞止弁・操縦弁	○	○									
主原動機	空気始動系統	始動弁	○	○			○	○					
主原動機	空気始動系統	停止電磁弁	○	○			○	○					
主原動機	空気始動系統	減圧弁	○	○			○	○			○	○	
減速機	潤滑油系統	初期プライミングポンプ	○	○			○	○					
減速機	潤滑油系統	配管	○	○									
減速機	冷却水系統	配管	○	○									
逆流防止弁	逆流防止弁	弁軸	○	○									
系統機器	燃料系統	燃料移送ポンプ	○	○			○	○			○	○	
系統機器	燃料系統	配管	○	○			○	○			○	○	
系統機器	冷却水系統	潤滑水ポンプ	○	○			○	○			○	○	
系統機器	冷却水系統	井戸ポンプ	○	○			○	○			○	○	
系統機器	冷却水系統	電磁弁	○	○			○	○			○	○	
系統機器	冷却水系統	電動弁	○	○			○	○			○	○	
系統機器	冷却水系統	電動ボール弁	○	○			○	○			○	○	
系統機器	冷却水系統	逆止弁	○	○		○	○	○					
系統機器	冷却水系統	配管	○	○			○	○					○
系統機器	始動系統	空気圧縮機	○	○									
系統機器	始動系統	空気槽	○	○									
系統機器	始動系統	配管	○	○			○	○					
操作制御設備	機側操作盤(主ポンプ用)	変換器	○	○									
操作制御設備	入出力装置盤	変換器	○	○			○	○					
電源設備	直流電源盤(制御用直流電源設備)	蓄電池	○	○									
電源設備	無停電電源装置	保護回路	○	○									
電源設備	無停電電源装置	蓄電池	○	○									
発電設備	機関本体関係	シリンダヘッド	○	○									
発電設備	機関本体関係	ライナ	○	○									
発電設備	機関本体関係	吸・排気弁	○	○									
発電設備	機関本体関係	ピストンリング	○	○									
発電設備	機関本体関係	オイルリング	○	○			○	○					
発電設備	機関本体関係	ピストンピン	○	○									
発電設備	潤滑油系統	初期プライミングポンプ	○	○			○	○					
発電設備	燃料系統	燃料噴射ポンプ	○	○									
発電設備	燃料系統	燃料噴射弁(燃料弁)	○	○									
発電設備	燃料系統	高圧管	○	○				○					○
発電設備	燃料系統	タペット	○	○				○					
発電設備	冷却水系統	内部冷却水ポンプ	○	○									
発電設備	空気始動系統	停止電磁弁	○	○		○	○	○					
除塵設備	駆動装置	チェーン	○	○			○	○				○	○

も平均(パターン 2A, 4A) より幾何平均(パターン 2G, 4G) の方となる傾向にあることが確認された。

以上より、判定法によるが、FRDAにより、従来予防保全とされていた構成機器を事後保全とさらに仕分けすることができることが確認された。しかし、単純に「仕分け可能機器が多い＝最適な判定」ではなく、真に仕分け可能なものは個別に判断が必要であり、それにあつた判定法を選定する必要がある。この検討について、故障等級のしきい値 2 の場合(組合せ評価無しとパターン 1A, 1G, 2A, 2G) を例にして以下に記す。

表-6 より、しきい値 2 の場合の仕分け可能構成機器を抽出したものを表-7 に示す。

表-7 各パターン毎の仕分け可能構成機器  
(故障等級のしきい値 2)

装置	機器区分	部品名	組み合わせ評価パターン				
			無し	1A	1G	2A	2G
主原動機	潤滑油系統	初期プライミングポンプ	○			○	○
主原動機	燃料系統	燃料濾過器	○			○	○
主原動機	空気始動系統	始動弁	○			○	○
主原動機	空気始動系統	停止電磁弁	○			○	○
主原動機	空気始動系統	減圧弁	○			○	○
減速機	潤滑油系統	初期プライミングポンプ	○			○	○
系統機器	燃料系統	燃料移送ポンプ	○			○	○
系統機器	燃料系統	配管	○			○	○
系統機器	冷却水系統	潤滑水ポンプ	○			○	○
系統機器	冷却水系統	電磁弁	○			○	○
系統機器	冷却水系統	電動弁	○			○	○
系統機器	冷却水系統	電動ボール弁	○			○	○
系統機器	冷却水系統	逆止弁	○	○	○	○	○
系統機器	冷却水系統	配管	○			○	○
系統機器	始動系統	空気槽	○			○	○
操作制御設備	入出力装置盤	変換器	○			○	○
発電設備	機関本体関係	オイルリング	○			○	○
発電設備	潤滑油系統	初期プライミングポンプ	○			○	○
発電設備	燃料系統	高圧管	○			○	○
発電設備	燃料系統	タペット	○			○	○
発電設備	空気始動系統	停止電磁弁	○	○	○	○	○
除塵設備	駆動装置	チェーン	○			○	○

「事後保全可能」と仕分けされた機器について、系統機器-冷却水系統-逆止弁、発電設備-空気始動系統-停止電磁弁は、どのパターンでも組合せ評価の優先度が低評価となった。機能回復指標については点検業者による対応可能であり現場施工であること、修繕費用ランクが低いことで容易となっている機器であり、必ずしも予防保全でなくともよいのではないかと考えられる。

燃料配管、高圧管は、組み合わせ評価の中ではパターン 2G のみで事後保全可能との判定になっている。しかし、実際の故障情報では、特に高圧管のトラブルによる設備不稼働事例が多いため、事後保全とするには懸念が残る。

今回は 1 機場のみの判定シミュレーションであり、この結果だけで判定法を定めることは危険ではあるが、以上のような検討を合わせて行うことを前提に、仕分け可

能候補を抽出することは可能である。今後は、より多くのシミュレーションと前述のような評価を行い、仕分けの仕方について検討を進める必要がある。

#### 4.2.2 新設時等の機器選定への活用について

設備新設・更新時の形式選定への FRDA 活用であるが、FRDA は構成機器毎に機能回復指標を算定することに対し、新設更新時は装置毎に評価するため、算定された数値をどのように評価するかの検討が必要となる。

評価方法は複数考えられる。以下にそれを示す。

A 案：機能回復困難の部品数による比較

B 案：機能回復指標の平均値

C 案：機能回復困難数の割合

これらの適否について、排水機場ポンプ設備の駆動装置をディーゼル機関とするかガスタービン機関とするかの評価シミュレーションを通じて検討を行った。

表-8 に、各案での評価結果を示す。

表-8 各案の評価

案名	評価方法	ディーゼル機関	ガスタービン機関
A案	機能回復困難部品数	19	30
B案	機能回復指標の平均値	3.0	3.5
C案	機能回復困難部品割合	51%	94%
参考情報	構成機器数	37	32

3 案ともガスタービン機関の方が数値が高い＝機能回復が遅い、という評価結果となった。これは実際の運用実態とも合致しており、本件における FRDA の有効性を示している。

どの評価方法が適切であるかについては、数値での評価は 3 案とも同じ結果となったため、評価者の主観となるがこれを元に検討した。各評価の特徴や検討結果をまとめたものを表-9 に示す。

表-9 より、現時点では C 案が有力と考えるが、A 案についても利点があり、どちらがより評価として適切かは今後の検討により整理していきたい。

また、C 案とした場合の機器選定のシミュレーション結果は表-10 のとおりとなったので、FRDA 活用事例の参考としてこれを記す。

#### 4.2.3 予備品選定への活用について

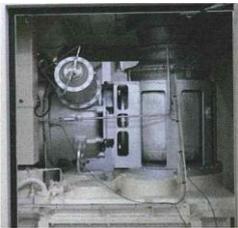
予備品選定への活用であるが、同じ構成機器でも、表-1 に示した評価項目のうち、予備品の有無により評点に変化が生じる。

そこで、予備品が有る場合と無い場合双方の機能回復

表-9 各案の評価

	A案	B案	C案
比較方法	機能回復困難な部品数の比較	機能回復指標の平均値の比較	機能回復困難部品の割合の比較
検討結果	設備の機能回復困難となる部品が多いことは、故障時の機能復旧のリスクがそれだけ高いということを示しているのわかりやすい。 しかし、「機能回復が容易」と評価された部品数が考慮されないで「機器総体としての機能回復の困難さ(容易さ)の評価」として、単純な個数の比較でよいかは検討の余地がある。	A案に比べ部品数の違いによる数値の影響は少ない。 しかし、回復容易となった機器と回復困難となった機器を混合して平均する事から、FRDAにより部品毎に評価した結果を、設備の代表値として評価することは適切ではないと考える。	設備の機器・部品のうち、何個の機器・部品が機能回復困難であるか算出する。機器・部品数の影響が少なく、違う設備でも比較可能であり同評価レベルとする事ができる。 設備に機能回復困難機器がどれぐらいの割合であるかにより、リスクを評価できる。
評価	△	×	○

表-10 FRDA 活用による新設機器選定例

	ディーゼルエンジン	ガスタービンエンジン
概要写真		
概要	シリンダ内で空気と燃料の混合気を圧縮→燃焼させ、その爆発による膨張力によりピストンを往復運動する。このピストンの往復運動を回転運動に変えて動力を取り出す。	軸流圧縮機(圧縮タービン)にて空気を圧縮し、ここに燃料を噴射、燃焼させ、燃焼ガスで出力タービンを駆動させることにより動力を取り出す。 横軸は駆動軸が横出しに、立軸は駆動軸が立出しになっている。
設置スペース	現行の通り	左案に比べ原動機の設置スペースが縮小可能だが、排気、排風ダクトが天井クレーンと干渉する可能性がある
維持管理性	休止中も含め定期的な保守運転、管理が必要である。 点検設備はほとんど現地で可能である。	休止中も含め定期的な保守運転、管理が必要である。 オーバーホール、またガスタービン本体の故障対応は工場に持ち込む必要がある。
機能回復難易度	<b>機能回復困難数の割合 51%</b> 故障した場合の機能回復が困難となる機器が半分程度を占める。 最大で10ヶ月程度掛かる場合がある。	<b>機能回復困難数の割合 94%</b> 故障した場合の機能回復が困難となる機器が大部分を占める。最大で24ヶ月程度掛かる場合がある。
治水用途での採用実績	採用実績は最も多い	左案には劣るが採用実績は比較的多い
総合評価	現行と同等の機器構成となるため、設置スペースの問題は無い。 信頼性についても、既設設備は設置後、約23年経過しており大きな支障も発生していないことから十分である。	排気・排風ダクトが大きく設置スペースが厳しい。 また、ガスタービン本体の整備は工場へ持ち込む必要があるため、維持管理の面でディーゼル機関や電動機と比べ劣る。
	○	△

指標を算定し、その差の大小により、予備品保有の効果（＝早期復旧が可能）を定量的に示すことができると考える（差が大きいものほど予備品保有効果が高い）。

そこで、K排水機場をモデルに、予備品の有無による機能回復指標の変化の比較分析を行った。

その結果の抜粋（差の大きいもの5つと差の小さいもの5つ）を表-11、12に示す。

この結果より、予備品の準備により、機能回復指標はどの機器も下がる事、予備品を準備による機能回復における効果は大きく定量的な評価でも現れる事がわかった。また、予備品によっては、効果が高い予備品と効果が低

い予備品があることが確認された。よって、機能困難となった機器について、予備品の準備は回復困難の改善に効果的である事、予備品選定への活用可能という事が改めて証明できた

なお、FRDAの活用は予備品選定の判断に有用であるが、実際に判断する際はFRDAだけでなく他の要素も含めて総合的に判断しなければならない。

例えば、本検討では実際に予備品準備可能かどうかについては、判断していない。予備品の準備の可否は、予備期間による劣化度や、予備品が使用可能かどうかの試験・判断、予備品が使用不可時の責任の取り合い等の問

題があることに留意する必要がある。

表-11 予備品の有無による機能回復指標の変化(大きいもの5つ抜粋)

設備名	機器区分	部品名	予備品想定	機能回復難易度				機能補完性				修繕費用 ランク	故障検知 難易度	機能回復 指標	予備品想定前 予備品想定後 の数値の差	
				復旧までの 所要時間	設備復旧者 の違い	設備復旧 場所	機能回復 難易度 合計	機能補完性 の ランク分け	機能補完性	近隣に所在する 他の排水機ポン プ設置等の障 害による 機能補完	機能補完性 合計					機能補完性 の ランク分け
主ポンプ	主軸及び軸受	封水ブッシュ	予備品想定前	3	2	2	7	4	4	2	6	4	4	4	4.00	2.14
			予備品想定後	1	2	1	4	1	3	2	2	1	3	4	1.86	
主ポンプ	主軸及び軸受	軸継手	予備品想定前	4	2	1	7	4	4	2	6	4	3	3	3.46	1.73
			予備品想定後	1	2	1	4	1	3	2	2	1	3	3	1.73	
減速機	潤滑油系統	油濾過器	予備品想定前	3	2	2	7	4	4	2	6	4	3	3	3.46	1.40
			予備品想定後	1	1	1	3	1	3	2	5	3	2	3	2.06	
減速機	潤滑油系統	初期プライミングポンプ	予備品想定前	3	2	2	7	4	4	2	6	4	3	3	3.46	1.40
			予備品想定後	1	1	1	3	1	3	2	5	3	2	3	2.06	
減速機	冷却水系統	潤滑油冷却器	予備品想定前	3	2	2	7	4	4	2	6	4	3	3	3.46	1.40
			予備品想定後	1	1	1	3	1	3	2	5	3	2	3	2.06	

表-12 予備品の有無による機能回復指標の変化(小さいもの5つ抜粋)

設備名	機器区分	部品名	予備品想定	機能回復難易度				機能補完性				修繕費用 ランク	故障検知 難易度	機能回復 指標	予備品想定前 予備品想定後 の数値の差	
				復旧までの 所要時間	設備復旧者 の違い	設備復旧 場所	機能回復 難易度 合計	機能補完性 の ランク分け	機能補完性	近隣に所在する 他の排水機ポン プ設置等の障 害による 機能補完	機能補完性 合計					機能補完性 の ランク分け
減速機	減速機本体	入力軸ラジアル軸受	予備品想定前	4	2	2	8	4	4	2	6	4	4	3	3.72	0.50
			予備品想定後	2	2	2	6	3	3	2	5	3	4	3	3.22	
減速機	減速機本体	出力軸ラスト軸受	予備品想定前	4	2	2	8	4	4	2	6	4	4	3	3.72	0.50
			予備品想定後	2	2	2	6	3	3	2	5	3	4	3	3.22	
減速機	減速機本体	軸受ナット	予備品想定前	3	2	2	7	4	4	2	6	4	4	3	3.72	0.50
			予備品想定後	2	2	2	6	3	3	2	5	3	4	3	3.22	
減速機	潤滑油系統	潤滑油ポンプ駆動用歯車	予備品想定前	3	2	2	7	4	4	2	6	4	3	3	3.46	0.46
			予備品想定後	2	2	2	6	3	3	2	5	3	3	3	3.00	
吐出弁	吐出弁	水密ゴム	予備品想定前	3	2	2	7	4	4	2	6	4	3	3	3.46	0.24
			予備品想定後	2	2	2	6	3	4	2	6	4	3	3	3.22	

### 4.3 故障情報の正確かつ効率的な収集手法の検討

先述の機能回復難易度の定量化手法の検討を含めた、過年度まで実施してきた信頼性評価に関する研究を進めるに当たり、設備管理者から故障情報等を収集したが、管理者ごと、あるいは年代ごとに情報の質にばらつきがあり、適正な評価に難があることがわかった。そこで、情報の質の向上と均質化、さらには必要な情報を容易かつ簡便に入手する方法の検討が必要となった。

今年度は、その初端として、故障情報の充実度と課題抽出を主に行った。

故障情報の充実度については、各地方整備局から国土交通省公共事業企画調整課に報告のあった故障情報のうち、平成 26～29 年度分をとりまとめた検索様式から、各項目の情報の有無(回答率)を調査した。その結果を図-3 に示す。

また、課題抽出については、設備管理者に「設備トラブル時に参考としたい過去情報は何か?」とヒアリングを行った。ヒアリングの結果、参考としたい過去情報は以下のものが挙げられた。

- ・修理費用
- ・故障を受けての改善策

しかし、これらの情報は、図-3 によると欠落しているケースが他の情報より多いことがわかる(図-3 の赤枠)。

その原因は、故障報告が速報性を求められるため初期にわかる情報は比較的充実するが、修理費用や改善策は事後しばらくしてから明確になるものであるため、報告が忘れられがちになること(場合によっては担当者の異動で経緯等が不明になること)が考えられる。

また、これまでの故障情報を精査すると、同じ故障状況であっても、報告者が異なる場合(地方整備局、事務所別。同じ事務所であっても異なる担当者の場合)、特に、故障原因、故障モードの記載に統一性がない事例等見られた。

今後は、これらをどう解消、統一していくかが課題となる。

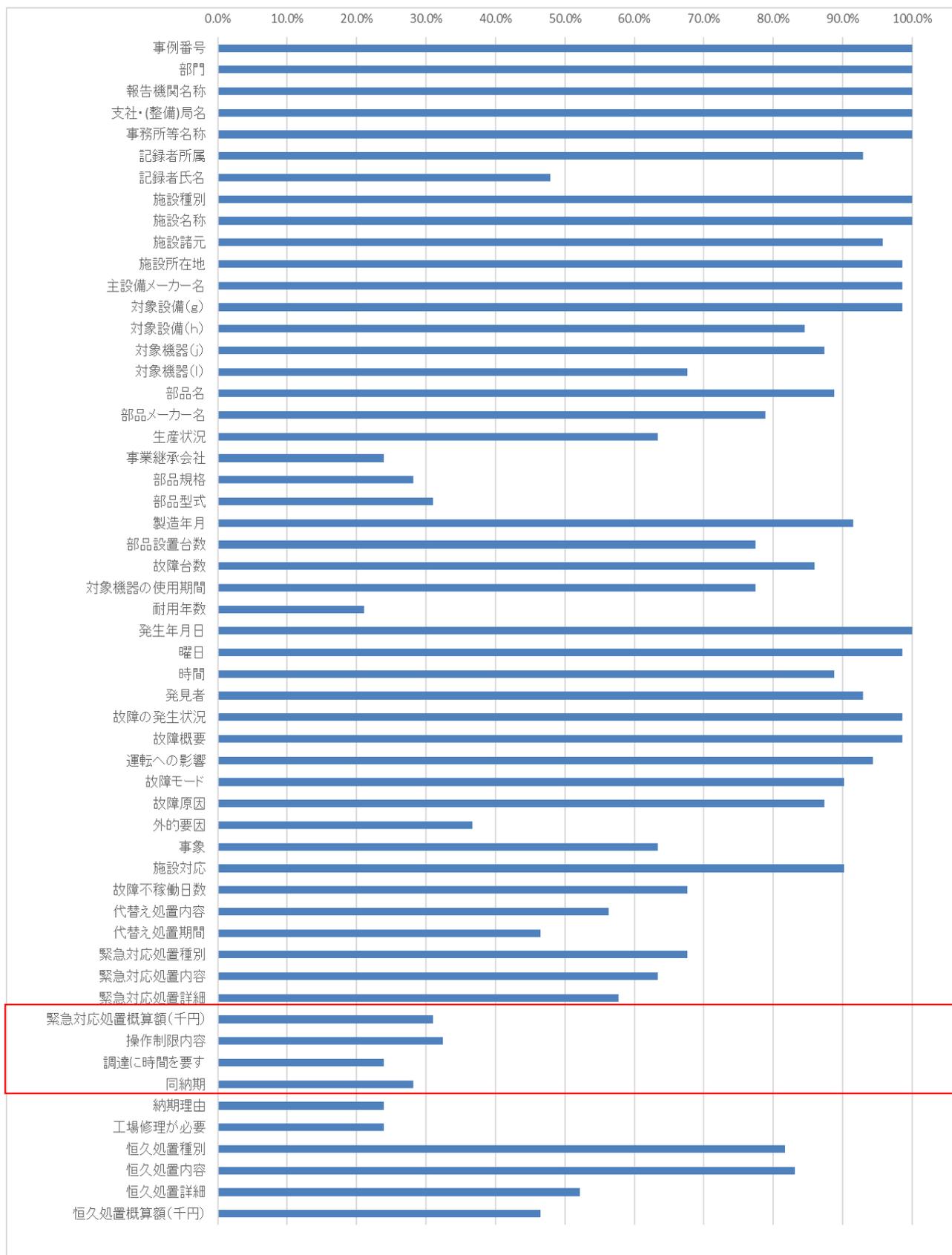


図-3 故障情報各項目の回答率

## 5. まとめ

FRDA に関しては、未整理の点が残されてはいるが、今年度の検討である程度と考える。そこで現時点でのまとめとして「機能回復指標算定マニュアル（素案）」を作成した。今後は、このマニュアルに対する管理者への意見照会や、より実地に即したシミュレーションを行うことによりブラッシュアップを行う予定である。

また、未整理の点として、FMEA による故障等級とのしきい値の扱いや、評価の棲み分けがある。これらの検討が今後の課題となる。

故障情報の効率的な収集に関しては、現在国土交通省では「機械設備維持管理システム」を運用しており、点検データのみならず故障データも登録することとなっている。これの活用が進めばある程度は解決すると思われるが、現状ではその活用は進んでいない。

今後は、機械設備維持管理システムの活用の進展と、故障情報を入力する際のルール作りに関する検討を進めたい。

## 6.4 既往事象・現場条件に対応した最適な維持修繕手法の構築、構造・材料の開発・評価

### 6.4.1 既設橋の合理的な性能評価手法および補修・補強方法に関する研究（1）

担当チーム：橋梁構造研究グループ

研究担当者：石田雅博、大島義信、山本将

#### 【要旨】

高度成長期に集中的に整備された橋梁が一齐に高齢化を迎える中、さまざまな再劣化要因による損傷事例が報告されており、その一環として既設 PC 橋の補修後における表面被覆工法の性能評価が求められている。今回、補修後の表面被覆工法の性能を時間経過に着目して確認するため、塩害対策として補修され 10 年程度経過したのちに撤去された既設 PC 橋を対象に、外観調査、塗膜調査（遮塩性等）、塩化物イオン量調査および中性化深さの調査を実施した。

キーワード：既設 PC 橋、塗装工法、遮塩性、塩化物イオンの拡散、塩害

#### 1. はじめに

既設橋の塩害対策工法のひとつとして表面保護工による補修が行われているが、補修後に塩害による再劣化が発生する事例が見受けられる。再劣化を抑制するには、塩害により再劣化した橋梁において、表面保護工の一定年数経過後の遮塩性や、コンクリート内の塩化物イオン量の経年変化など、再劣化要因を時間経過に着目して調査する必要がある。そこで、今回、塩害対策として補修され10年程度経過したのちに撤去された既設PC橋を対象に、補修後の表面保護工法のうち塗装工法<sup>1)</sup>の性能を確認するため、外観調査および塗装調査（遮塩性等）を実施した。本稿では、これらの調査結果について報告する。さらに、塗装調査実施箇所におけ

るコンクリート内の塩化物イオン量調査および中性化調査結果についても報告する。

#### 2. 対象橋梁の概要

対象橋梁（以下、本橋）は昭和50年に建設された鋼単純鉸桁橋（第1径間:A1～P1）とポストテンション方式PC単純T桁橋（第2～32径間:P1～A2）から構成される橋梁である。橋梁諸元を表-1、橋梁一般図を図-1、橋梁

表-1 橋梁諸元（第1径間を除く）

構造形式	単純PCポストテンT桁橋(6主桁)
架橋年	1975年(昭和50年)
橋長	991.6m
支間割	30.8m 他
全幅員	11.25m
架橋条件	海岸(日本海)[塩害対策区分:S]

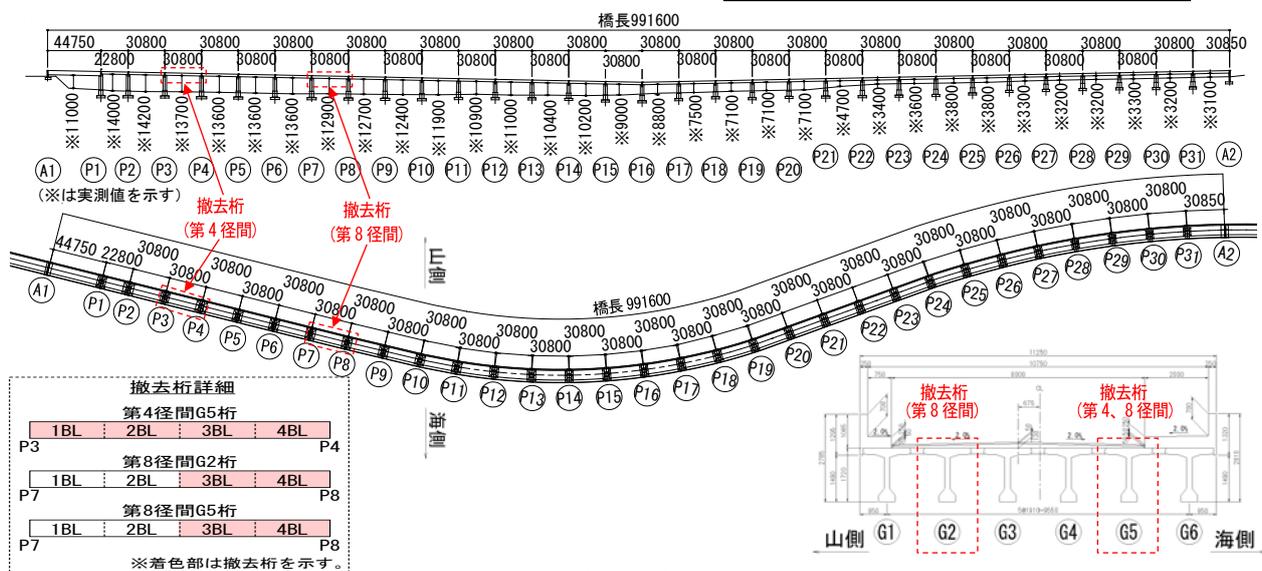


図-1 橋梁一般図



写真-1 橋梁外観 (写真は第6~8 径間)

外観を写真-1に示す。本橋は日本海沿岸に位置し、波浪の影響を受ける状況にあるため、厳しい塩害環境下におかれている。なお、本橋は平成29年3月に隣接して建設した新橋への交通切り替えが完了しており、平成29年度から開始された本橋撤去の際、塗装により補修された第4径間G5桁、第8径間G2桁1/2支間、G5桁1/2支間を管理者より受領した (以下、撤去桁) (写真-2)。撤去桁は運搬の制約上、1支間を4分割されている。

### 3. 塗装の調査

#### 3.1 調査の目的

塩害対策として塗装により補修された撤去桁について、部分的に塗装の割れやコンクリートの浮き等の損傷が確認された。損傷が生じた要因の一つとして塗装の性能低下が想定される。よって、塗装の状態や性能を確認することを目的として、撤去桁を対象に外観調査や塗装調査 (遮塩性等) を実施した。

なお、撤去桁に補修された塗装は、いずれも平成19年度に補修されたもので、補修後10年程度経過している。当時の補修記録等から確認した塗装仕様を表-2に示す。

表-2 塗装仕様 (H19 年度補修)

種類	使用量 (kg/m <sup>3</sup> )	膜厚 (μm)
シリコン樹脂系上塗り	0.12	25
柔軟形エポキシ樹脂系中塗り3層目	0.35	160
柔軟形エポキシ樹脂系中塗り2層目	0.35	160
柔軟形エポキシ樹脂系中塗り1層目	0.35	160
エポキシ樹脂系パテ	0.50	-
エポキシ樹脂系プライマー	0.10	-

※ 赤枠部は塗装調査対象を示す。

#### 3.2 調査項目および調査方法

はじめに、塗装の状態を確認するため、外観調査を行い、塗装の割れやコンクリートの浮き等の損傷 (以下、損傷部) を確認した。次に、塗装の性能を確認するため、損傷部とその近傍の健全部、過年度にコンクリート内の塩化物イオン量調査が実施された箇所の近傍



写真-2 撤去桁

(以下、過年度調査部近傍) に対して、塗装の組成および遮塩性について塗装調査を実施した。

#### 3.2.1 外観調査

外観調査は、すべての撤去桁を対象に、目視、触診および打音により損傷部を確認した。

#### 3.2.2 塗装の組成調査

塗装の組成調査は、外観調査にて確認した損傷部とその近傍の健全部、過年度調査部近傍を対象とした。試験片はディスクサンダー等を用いて撤去桁からコンクリートとともに塗装を採取した (写真-3)。

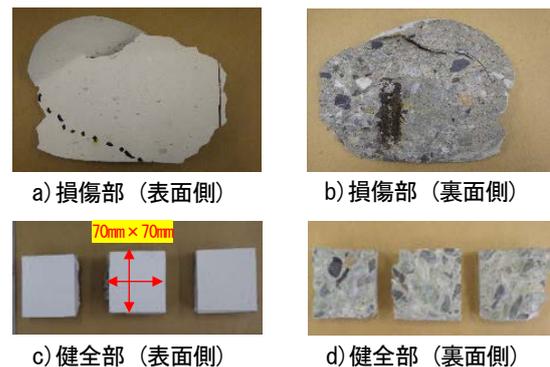


写真-3 試験片の一例

組成調査の試料は、遮塩性を担う中塗りおよび上塗りの塗装を対象に、試験片から10mm×10mmで採取し、試料数は調査箇所1箇所につき1試料とした。中塗り (1層目、2層目、3層目) および上塗りの各層を赤外発光分光法 (IR法)<sup>2)</sup>により赤外吸収スペクトルをそれぞれ測定し、標準塗装の赤外吸収スペクトルと相対比較することで、試験片の各層の組成を調査した。

#### 3.2.3 塗装の遮塩性調査

塗装の遮塩性調査は、組成調査と同じ調査箇所を対象に行う。遮塩性試験の試料は、遮塩性を担う中塗りおよび上塗りの塗装を対象に、試験片から強制的に剥離させて採取し、ピンホール等の欠陥が無いことを確認したうえで、カッターナイフを用いて約φ60mmに成形して作製した (写真-4)。試料数は調査箇所1箇所につき3試料とした。



a)、b) 試験片から塗装を採取 c) φ60mm に成形

写真-4 試料（遮塩性試験）の作製方法

作製した試料を、鋼道路橋防食便覧の遮塩性試験方法<sup>3)</sup>により塩化物イオン透過量Qを算出し、遮塩性を調査した(図-2)。なお、塩化物イオン透過量の算出は、遮

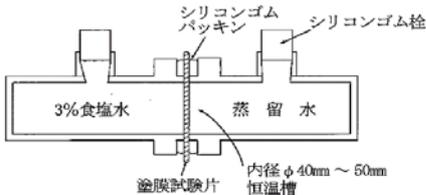


図-2 遮塩性試験方法<sup>3)</sup>

$$Q = V \times m \times 10^{-3} / (A \times t) \dots \dots \text{式(1)}$$

- ここに、Q：塩化物イオン透過量(mg/[cm<sup>2</sup>・日])
- V：蒸留水側の水量(g)＝実測値200g程度
- m：塩化物イオンの測定結果(ppm)
- A：拡散セルの透過面積(cm<sup>2</sup>)＝19.63(内径φ50mmを使用)
- t：試験時間(日)＝30

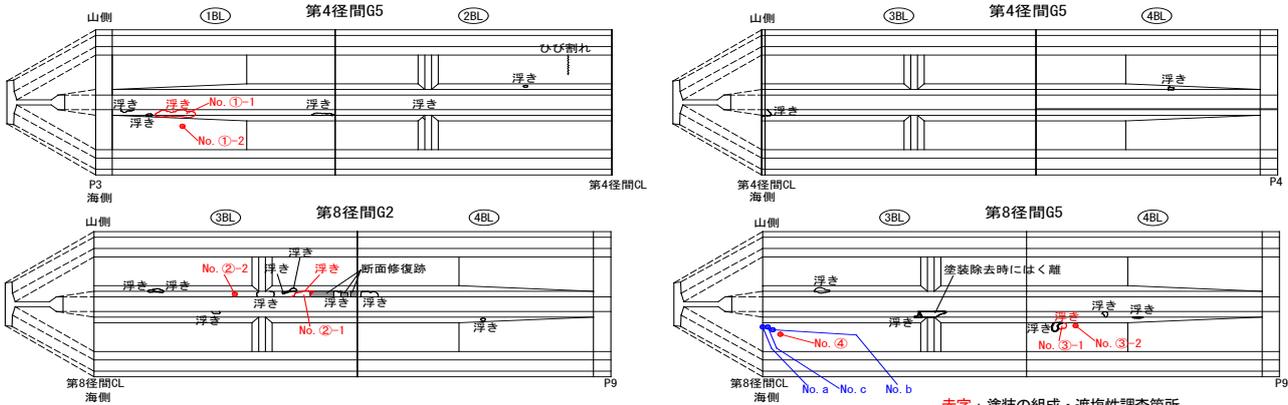


図-3 外観調査結果（展開図）

表-3 外観調査結果を踏まえた塗装の組成・遮塩性調査箇所を選定

No.	外観調査結果		<参考> 前回定期点検結果(H25)
	目視・触診	打音	
①-1	塗装の段差を確認	コンクリートの浮きを確認	損傷(コンクリートの浮き)を確認
②-1	塗装の段差を確認	コンクリートの浮きを確認	損傷は確認されず
③-1	塗装の割れを確認	コンクリートの浮きを確認	損傷(コンクリートの浮き)を確認

※ 表中の各No.の調査箇所は図-3に記載。

塩性試験方法により得られた塩化物イオンの測定結果をもとに、式(1)を用いて算出した。

### 3.3 調査結果

#### 3.3.1 外観調査

外観調査結果の展開図を図-3に示す。外観調査の結果、目視や触診により塗装の段差や割れ、打音によりコンクリートの浮きを確認した。コンクリートの浮きは鉄筋の腐食に起因するものであり、コンクリートと塗装界面の浮きは確認されなかった。外観調査結果のうち、塗装の組成・遮塩性調査を行う箇所として、試験片作製のため、ある程度大きい範囲の損傷部を選定した。選定箇所を表-3、選定箇所の損傷写真を写真-5に示す。

#### 3.3.2 塗装の組成調査

外観調査にて確認した損傷部3箇所およびその近傍の健全部3箇所、過年度調査部近傍1箇所の計7箇所を対象に各層の組成を調査した(表-4)。調査結果の抜粋として、No. ①-1中塗り3層目、No. ②-2中塗り3層目、No. ④中塗り3層目の3つの赤外吸収スペクトルの測定結果を図-4に示す。なお、赤外吸収スペクトルの測定結果は、横軸を波数(cm<sup>-1</sup>)、縦軸を透過率(%T)で示される。

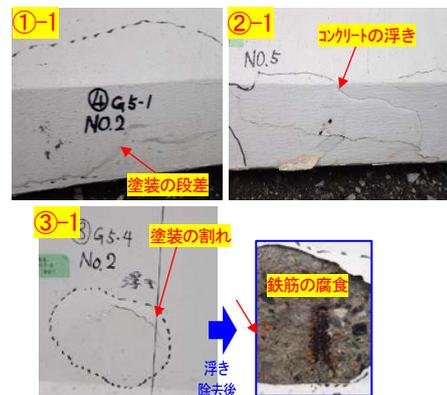


写真-5 外観調査で確認した損傷

図-4では波数2360cm<sup>-1</sup>付近の波形、波数1420cm<sup>-1</sup>付近の透過率が異なるなど、調査箇所により組成調査結果が異なることを確認した。

表-4 塗装の組成調査数一覧

No.	塗装の組成調査数			備考
	中塗り		上塗り	
	1層目	2層目		
①-1	調査箇所ごとに、 1試料あたり中塗り(1 ~3層目)、上塗りの 計4層をそれぞれ調査			損傷部
①-2				①-1の健全部
②-1				損傷部
②-2				②-1の健全部
③-1				損傷部
③-2				③-1の健全部
④				過年度調査部近傍

※ 表中の各No.の調査箇所は図-3に記載。

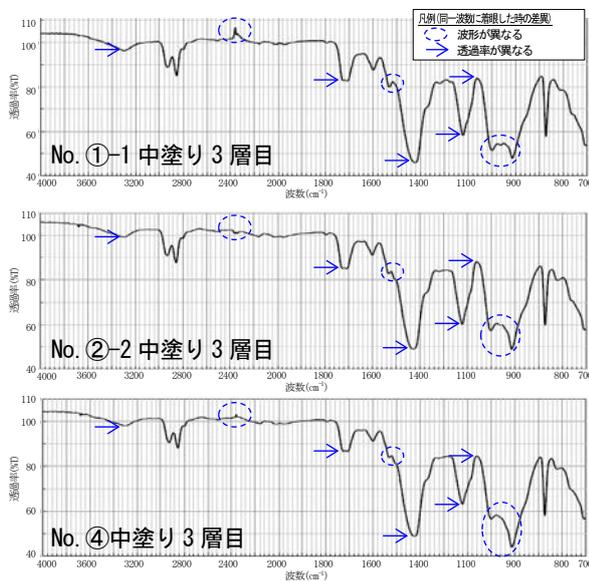


図-4 塗装の組成調査結果 (抜粋)

### 3.3.3 塗装の遮塩性調査

塗装の遮塩性調査結果を表-5に示す。塗装の組成調査を実施した7箇所すべての試料で、塩化物イオン透過量は、厳しい環境下で用いられる道路橋の塩害対策指

表-5 塗装の遮塩性調査結果

No.	塗装の遮塩性調査結果			備考
	試料数	m <sup>※2</sup> (ppm)	Q(mg/[cm <sup>2</sup> ・日])	
①-1	3	0.1以下	0.34×10 <sup>-3</sup> 以下	損傷部
①-2	3	0.1以下	0.34×10 <sup>-3</sup> 以下	①-1の健全部
②-1	3	0.1以下	0.34×10 <sup>-3</sup> 以下	損傷部
②-2	3	0.1以下	0.34×10 <sup>-3</sup> 以下	②-1の健全部
③-1	3	0.1以下	0.34×10 <sup>-3</sup> 以下	損傷部
③-2	3	0.1以下	0.34×10 <sup>-3</sup> 以下	③-1の健全部
④	3	0.1以下	0.34×10 <sup>-3</sup> 以下	過年度調査部近傍

※1 表中の各No.の調査箇所は図-3に記載。

※2 検出下限値が0.1ppmの測定機器を使用。

針(案)・同解説<sup>4)</sup>におけるC種(長期防錆型)での管理値1×10<sup>-3</sup>mg/[cm<sup>2</sup>・日]以下であり、遮塩性を有していることを確認した。

## 4. コンクリート内の塩化物イオン量調査

3章にて塗装が所定の遮塩性を有していることを確認したが、損傷部では鉄筋の腐食によりコンクリートの浮きが生じていた。そこで、塗装以外の損傷要因検証のため、損傷部ではないが、塗装の遮塩性を有している箇所(表-5のNo.④)で、コンクリートコアを採取し、電位差滴定法により塩化物イオン量を調査した(表-6のNo.c)。なお、No.④の近傍では過年度(平成19、24年度)にコンクリート内の塩化物イオン量調査が行われている(表-6のNo.aおよびNo.b)。今回実施した塩化物イオン量の調査結果と過年度調査結果をあわせてグラフに示したものを図-5に示す。

表-6 コンクリート内の塩化物イオン量(kg/m<sup>3</sup>)

No.	表面からの深さ(mm)				備考
	0~20	20~40	40~60	60~80	
a	8.92	1.14	0.28	0.26	H19(補修時)
b	8.67	3.18	0.25	0.25	H24(補修後調査時)
c	3.99	4.19	0.90	0.22	H31(今回調査時)

※ 表中の各No.の調査箇所は図-3に記載。

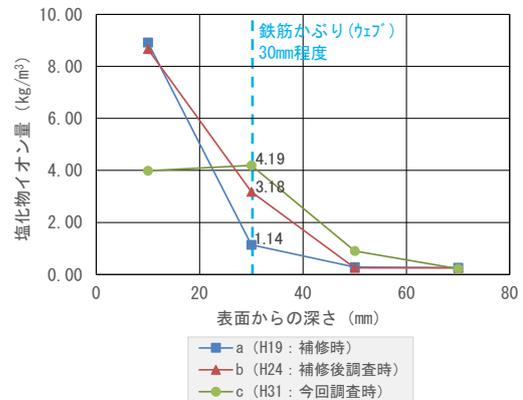


図-5 コンクリート中の塩化物イオン量分

調査の結果、補修時には表面の塩化物イオン量が最も高く、内部ほど低い傾向であったが、今回調査時には表面より内部の方が高くなる傾向が確認された。とくに、鉄筋位置(鉄筋かぶり:ウェブ30mm程度、フランジ45mm程度)付近の塩化物イオン量は補修5年後で3.18kg/m<sup>3</sup>、補修12年後の今回調査で4.19kg/m<sup>3</sup>に達していたことから、鉄筋の腐食は塗装後の表面付近における既存の塩化物イオンが内部に拡散したことが要因の一つと推察される。

## 5. 中性化深さの調査

図-5にて塩化物イオン量の経年変化を確認した箇所を対象に、同一コンクリートコアを用いてJIS A 1152により中性化深さを調査した。調査結果を表-7に示す。

表-7 コンクリート内の表面からの  
中性化深さ(mm)

No.	中性化深さ 計測線 <sup>※2</sup>					
	1	2	3	4	5	6
a	11.5	11.0	7.5	8.0	9.0	11.0
c	10.0	11.0	6.0	5.5	4.0	8.0

No.	中性化深さ 計測線 <sup>※2</sup>		平均	最大	備考
	7	8			
a	12.0	11.5	10.2	12.0	H19(補修時)
c	10.0	7.5	7.8	11.0	H31(今回調査時)

※1 表中の各 No. の調査箇所は図-3に記載。

※2 コンクリートコア側面における中性化深さ計測線は図-6参照。

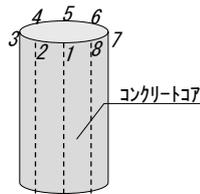


図-6 中性化深さ計測線

中性化は最大でも12mm程度であり、鉄筋かぶり程度には達していないことが確認された。このことは、損傷部ではない本調査箇所は、アルカリ性が確保されているため鉄筋が不動態被膜で保護され、鉄筋腐食が損傷発生レベルまでは顕在化していないことの一因であると推察される。なお、中性化が鉄筋腐食に及ぼす要因として、鉄筋表面の不動態被膜破壊<sup>5)</sup>があるが、コンクリート内の塩化物イオンも不動態被膜破壊の一因<sup>6)</sup>とされている。

## 6. まとめ

本研究を通じ、次の知見が得られた。

- (1) 補修後10年程度経過した塗装の性能について、塗装の組成調査結果は調査箇所により異なるものの、所定の遮塩性を有していることを確認した。
- (2) 塩化物イオン量の経年変化について、塗装による補修時には、表面の塩化物イオン量が最も高く、内部ほど低い傾向であったが、今回調査時には表面より内部の方が高くなる傾向が確認された。鉄

筋腐食の要因は、塗装後の表面付近における既存の塩化物イオンが内部に拡散したことが要因の一つと推察される。

- (3) 損傷部ではない調査箇所における中性化深さの調査では、アルカリ性が確保されていた。このことは、鉄筋が不動態被膜で保護され、鉄筋腐食が損傷発生レベルまでは顕在化していないことの一因であると推察される。

今後、鉄筋腐食に及ぼす要因特定のため、塗装により補修された再劣化箇所に着目した、塩化物イオン量・中性化の調査および既存データの整理・分析等が必要とされる。

## 謝辞

本研究は、土木研究所とプレストレスト・コンクリート建設業協会との共同研究の一環として行われた。また、調査を行うにあたり、材料メーカーをはじめ多くの方のご協力を頂いた。ご協力を頂いた関係各位に対し、ここに謝意を表する。

## 参考文献

- 1) 土木学会：コンクリートライブラリー119 表面保護工法 設計施工指針(案)、pp.10-13、2005.4
- 2) 日本防錆技術協会：防錆管理、Vol147、No.5、pp.22-26、2003.5
- 3) 日本道路協会：鋼道路橋防食便覧、pp.Ⅱ-196-Ⅱ-199、2014.3
- 4) 日本道路協会：道路橋の塩害対策指針(案)・同解説、pp.51-59、1984.2
- 5) 土木学会：2018年制定 コンクリート標準示方書【維持管理編】、pp.107、2018.10
- 6) 土木学会：2018年制定 コンクリート標準示方書【維持管理編】、pp.145、2018.10

## 6.4 既往事象・現場条件に対応した最適な維持修繕手法の構築、構造・材料の開発・評価

### 6.4.2 既設橋の合理的な性能評価手法および補修・補強方法に関する研究 (2)

担当チーム：材料資源研究グループ

研究担当者：西崎到、新田弘之、佐々木巖、櫻庭浩樹

#### 【要旨】

本研究では、既設コンクリート橋の長寿命化に向けて、コンクリート橋の代表的な補修工法の一つである表面保護工法の設計方法を高度化し、補修の効果や信頼性を向上させることを目的としている。平成 28 年の検討では、表面保護工法の塗布部位の違いによりコンクリート内部の含水状態が変化し、鉄筋腐食環境に影響を及ぼすことを明らかにした。補修においては水分をはじめとしたコンクリート内部の環境状態を制御することが重要になることから、平成 29 年度は実大断面を有する桁供試体を用いて、コンクリート内の水分分布とその経時変化を実際に把握するための検討を行った。平成 30 年度と令和元年度は、表面保護工法の塗布部位に関する腐食抑制効果の長期耐久性評価として、供試体暴露 5 年後までの鋼材腐食状況を調査し、塗布部位の影響や含浸材の効果調べることにより鉄筋腐食状態への影響を把握した。さらに、実大桁の水分状態の年間変動を観測した。

キーワード：既設コンクリート橋、補修、表面保護工法、塗布部位、鉄筋腐食

#### 1. はじめに

表面保護工法は、表面被覆材や表面含浸材をコンクリート構造物の表面に塗布して遮蔽層を形成することにより、劣化因子の浸入を抑制する工法である。表面保護工法は、劣化因子が浸入する可能性がある全ての面に施工することが望ましいとされている<sup>1)</sup>。しかし、塩分を含んだ水の移流が避けられない部位や、ASR や凍害等の劣化機構により乾燥状態を維持したい部位等では、遮蔽型の表面保護工法の適用が好ましくない場合もあると推察される。既設構造物の場合は、土中や他部材との近接干渉等により表面保護工法の適用が困難な場合もある。さらには、塗布される保護材料には様々なものがあるが、環境条件に応じた使い分けの考え方は確立されていない。

本研究では、表面保護工法の塗布部位の選定方法および塗布材料の使い分けの考え方を確立し、表面保護工法の設計を高度化させることで、表面保護工法の補修効果や信頼性を向上させることを目的としている。調査の視点として、まず鉄筋の腐食環境をとりあげているが、ASR や凍害などの対策にも応用が期待できる。

平成 30 年度と令和元年度は、水分をはじめとしたコンクリート内部の環境状態を踏まえた補修設計を可能にするために、表面保護材を塗り分けた供試体の暴露 5 年後までの鋼材腐食状況調査、実大断面の桁供試体によるコンクリート内の水分状態の経時変化の観測を行った。

#### 2. 塗布部位の異なるコンクリート供試体による試験

##### 2. 1 試験方法

##### 2. 1. 1 供試体

基材コンクリートの配合を表-1 に示す。初期の塩化物イオン量の影響を検討するために、全塩化物イオン量が  $0\text{kg/m}^3$ 、 $2.4\text{kg/m}^3$ 、 $6\text{kg/m}^3$  となるように、 $150\times 150\times 500\text{mm}$  でかぶり  $30\text{mm}$  の供試体を作製した。図-1 に供試体の概要図、表-2 に塗布部位を示す。供試体の名称は、例えば E3 のように、塗布材料と塗布部位の数で表した。塗布材料の記号は、基準無塗装を R、被覆材を E、含浸材(表-2 の記号 S, N, L) とし、材料記号の後に塗布部位の面数を表記した。なお、E3 と E4 の供試体は鉄筋軸方向の両側端面に表面被覆材を塗布し、その他の供試体は片側端面にのみ塗布した。表面被覆材料は表-3 に示す市販エポキシ樹脂系の塗装を、含浸材も市販の標準的な材料を規定の塗布量で用いた。

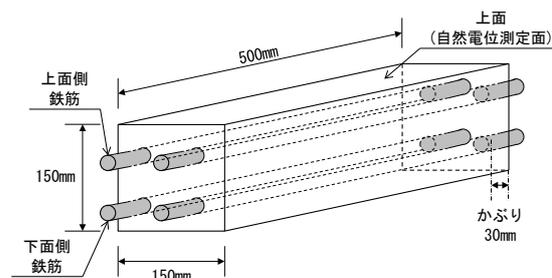


図-1 供試体の概要図

表-1 基材コンクリートの配合

W/C (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				
	水	セメント	細骨材	粗骨材	混和材
55	160	299	858	968	4.19

初期塩化物イオン量 0kg/m<sup>3</sup>、2.4kg/m<sup>3</sup>、セメント 普通ポルトランドセメント、最大粗骨材寸法 20mm、スランブ 8cm、空気量 4.5%

表-2 供試体の種類

名称	鉄筋軸方向の面における塗布面 表面被覆材		概要図
	表面被覆材	表面含浸材	
R	—	—	
E2	2面 両側面	—	
E3	3面 両側面 および底面	—	
S1E2	2面 両側面	底面にシラン系	
E1H2	両側面 (底面から 50mm) および底面	側面 (上端から 100mm) にシラン 系表面含浸材	
S3 or N3 or L3	—	両側面および底面 S: シラン系 N: 硝酸 Na 系 L: 硝酸 Li 系	

表-3 使用した表面被覆材料の仕様

構成材料の 名称	主成分	塗布量 (kg/m <sup>3</sup> )	目標膜厚 (μm)
プライマー	エポキシ樹脂	0.10	—
パテ	エポキシ樹脂	0.50	—
中塗り	エポキシ樹脂	0.20	110
上塗り	アクリルウレタン樹脂	0.12	30

### 2. 1. 2 促進劣化サイクル試験

促進劣化サイクル試験は、初期塩化物イオン量 0kg/m<sup>3</sup> の供試体を用いて実施した。試験には、環境温湿度の制御および塩水散布が可能な設備を用いた。試験条件は、3%NaCl 水溶液の散布を 0.5hr、40°C90%RH を 5.5hr、60°C 30%RH を 6hr と設定し、1 サイクルを 12hr とした。促進劣化サイクル試験は、鉄筋の腐食によるひび割れの発生状況を考慮し、440 サイクルで終了した。

測定項目は、全塩化物イオン量、鉄筋の自然電位および腐食減量とした。全塩化物イオン量の分析は JCI-SC4 (硬化コンクリート中に含まれる塩分の分析方法) に準

拠して行った。供試体の上面中央部から直径 26mm のコンクリートコアを乾式方法にて採取し、供試体の上面から板厚 2~3cm のスライス片に切断して測定試料とした。

鉄筋の自然電位は、照合電極に銀塩化銀電極を用いて、上面側、下面側 1 本ずつの計 2 本 (以下、上部鉄筋と下部鉄筋) を対象とし、供試体の上面から測定した。測定箇所は、供試体上面の鉄筋軸方向 (L=500mm) を約 83mm 間隔で等分した 5 点とした。自然電位の測定値は、照合電極の温度依存性を考慮して飽和硫酸銅 (CSE) 基準に換算し、ASTM の基準に従って腐食状態を判定した。鉄筋の腐食減量は、上部鉄筋と下部鉄筋の計 2 本を対象とし、JCI-SC1 に準じて行った。

### 2. 1. 3 屋外暴露試験

#### (1) つくばにおける試験

供試体内部の含水状態を確認することを目的として、飛来塩分の影響を受けない茨城県つくば市の屋外で暴露試験を行った。試験対象の供試体は、初期塩分量 0kg/m<sup>3</sup> の R、E3、E4 とした。

含水状態を確認するため、供試体の上面側および下面側の左右鉄筋間のコンクリート電気抵抗を測定した。測定には、ポテンショガバナスタットと FRA (周波数特性分析器) を用いた。測定は、交流インピーダンス法により、電圧 30mV、周波数 100kHz から 500MHz の交流波を印加して行い、得られた液抵抗成分を鉄筋間の電気抵抗 (以下、電気抵抗と称す) とした。屋外暴露は、暴露期間 161 日まで計 8 回電気抵抗を測定した。なお、屋外暴露開始直前まで、供試体は常温の室内に静置した。

#### (2) 沖縄大宜味における試験

飛来塩分の影響を受ける環境での供試体の腐食挙動を検討するために、沖縄県大宜味村の海岸に位置する暴露試験場で暴露試験を実施した。

大宜味での屋外暴露は初期塩分 2.4 および 6kg/m<sup>3</sup> の供試体を対象とし、暴露供試体の調査は原則として夏と冬の年 2 回、定期的に行っている。調査項目は、供試体の自然電位、電気抵抗、分極抵抗である。

自然電位の測定は促進劣化サイクル試験と同様に実施した。電気抵抗は、コンクリート中の水分状態の把握として、LCR メータを用いて、鋼材表面の腐食分極状態に影響されないよう周波数を 1kHz としてコンクリートのインピーダンスを測定した。

分極抵抗は、つくばでの電気抵抗の測定と同じ機器を用い、照合電極を銀塩化銀電極、対極を測定対象鉄筋以外のもう一方の上面側鉄筋と下面側鉄筋を短絡させて実施した。測定は交流インピーダンス法により行い、電圧

10mV、周波数 100kHz から 0.1mHz の交流波を印加した。測定された見かけの分極抵抗測定値から鉄筋の腐食電流密度を算出した。

## 2. 2 試験結果および考察

### 2. 2. 1 促進劣化サイクル試験

鉄筋の自然電位と腐食減量の測定結果を図-2 に示す。上面側鉄筋の自然電位に着目すると、一般的な腐食判定基準によれば、R は 90%以上腐食ありの判定領域、E2 と E3 は不確定の判定領域であった。下面側鉄筋は R と E2 は 90%以上腐食ありの判定領域、E3 は 90%以上腐食なしの判定領域であった。また、腐食減量を測定した結果も同様の傾向が示され、上面側、下面側ともに腐食減量の小さいものから E3<E2<R という順列となった。

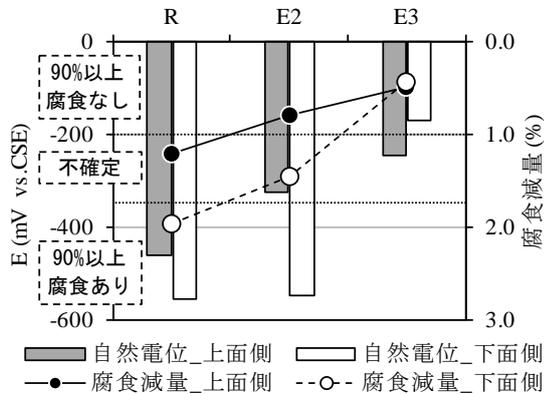


図-2 440 サイクル終了時の鉄筋自然電位

供試体の塩化物イオン量測定結果を図-3 に示す。図にはコンクリート標準示方書設計編 (2012 年) の普通ポルトランドセメントの腐食発生限界量算定式から求めた腐食発生限界量 (1.75kg/m<sup>3</sup>) も併せて示す。

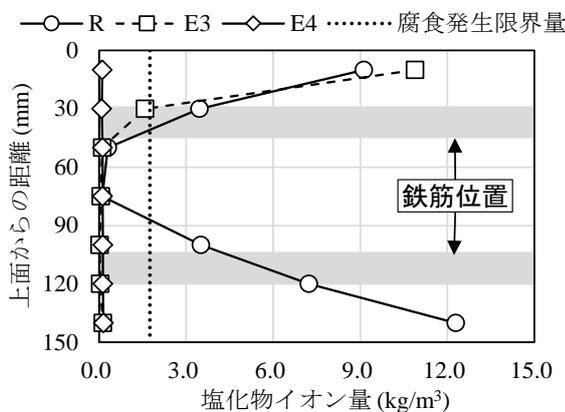


図-3 440 サイクル終了時の塩化物イオン量分布

E4 は 6 面全面が被覆されているため、全ての範囲では

ば 0kg/m<sup>3</sup>であった。一方、R は供試体上面から 40mm までの範囲、および 90mm から 150mm (下面から 60mm) までの範囲で腐食発生限界量を上回った。E3 は上面から 20mm までの範囲は腐食発生限界量を上回ったが、20~40mm の範囲で 1.6kg/m<sup>3</sup>となり、これ以外の範囲はほぼ 0kg/m<sup>3</sup>であった。さらに、E3 は R に比べて、上面付近 (0~20mm) の範囲では塩化物イオン量が多かったものの、上面側鉄筋位置に相当する 20~40mm の範囲では R よりも少なかった。これらの結果は、自然電位測定の腐食判定結果と一致している。

以上の結果から、表面被覆材による塗布部位の違いが内部への塩分進入挙動に影響を与え、鉄筋位置に応じて腐食抑制効果に差異を生じることが確認された。

### 2. 2. 2 屋外暴露試験

#### (1) 飛来塩分の影響を受けない環境 (つくば) での暴露

暴露に伴う鉄筋間の電気抵抗の変化を図-4 に示す。図中には平均湿度として測定日と測定日 5 日前までの日平均湿度の平均値、および日降水量を合わせて示す。屋外暴露による供試体内部の水分分布の変化を確認するため、暴露前に供試体を相対湿度 20~40%の室内で静置し、含水率が低い状態から暴露を開始した。

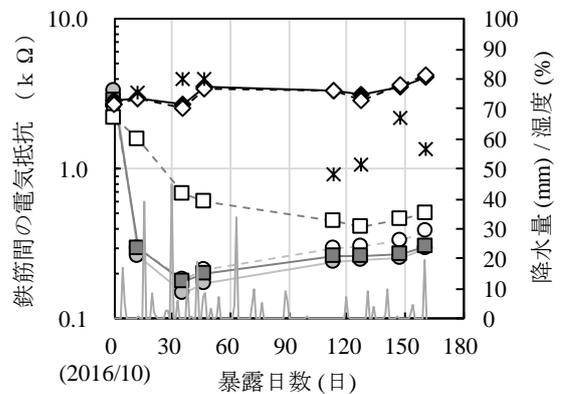
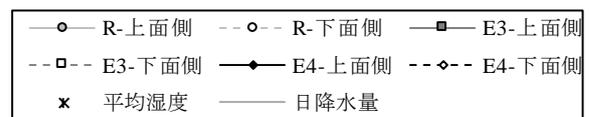


図-4 暴露に伴う鉄筋間の電気抵抗の変化

暴露開始直後から、R と E3 は、電気抵抗が低下した。一方、E4 はほぼ一定の値を示した。R と E3 の電気抵抗の低下は、暴露開始時の湿度や降水の影響によるものと推察される。E4 は露出部がないため水分の影響を受けにくく、他の供試体と比較して、電気抵抗は変化していない。R と E3 はコンクリートの露出部があるため、大気中の水分の影響を受けてコンクリート内部の含水量が増加して、

電気抵抗が小さくなっている。R の上面側、下面側、およびE3 の上面側は、およそ 14 日で電気抵抗の急激な低下が収束したが、E3 の下面側はおよそ 40 日まで収束せず、その後も緩やかに低下した。また、暴露からおおよそ 150 日後の電気抵抗を比較すると、上面側については R と E3 はほぼ同じ値を示したが、下面側では若干異なり、E3 の方が抵抗は大きかった。

以上より、下面側の電気抵抗および暴露に伴う変化が R と E3 で異なる結果であったため、塗膜で周囲を覆われている E3 の下面側鉄筋付近の内部環境は異なることが示唆された。

## (2) 飛来塩分環境下（沖縄大宜味）での暴露

### 1) 自然電位

鋼材の腐食環境としての自然電位の測定結果を図-5～9 に示す。まず表面被覆材の塗布範囲に着目すると、塩化物イオンが  $6\text{kg}/\text{m}^3$  入っている供試体群では、図-5 に示すように上面側の鉄筋は暴露直後から腐食状態にある。これは、被覆状態の影響をあまり受けない供試体形状で無被覆 R (図中●) に近い環境であるためと考えられる。下面側の鉄筋では、図-6 において一部のシラン系供試体では 3 年後までは腐食不確定であったが、4 年目以降はすべてが継続的に腐食状態にある。塩分が高濃度に浸透すると表面保護工では対策できないことが確認できる。

塩化物イオンが  $2.4\text{kg}/\text{m}^3$  については、被覆状態の影響をあまり受けない上面側の鉄筋では  $6\text{kg}/\text{m}^3$  に類似しているもの図-7 に示すように暴露後すぐに腐食不確定から腐食ありの状態が続いている。

表面被覆材の塗布範囲に着目し下面側鉄筋をみると、図-8 に示すように E3 (▲) 下面側鉄筋は 90%以上腐食なしから暴露 4 年後頃に腐食不確定の判定領域となり、R および E2 (■) では、数年間不確定ののち腐食ありに移行した。側面と底面が被覆されている E3 では、下面側鉄筋での含水状態が高く維持されるなど酸素が供給されにくい状況にあったと考えられ、ある程度腐食を抑制できる環境であったとみられる。それ以外の条件では、塩化物、水、酸素の供給が十分で、被覆による効果が得られなかったことがわかる。

含浸材の影響は、シラン系含浸材では図-8 の破線で示すように 90%以上腐食なしが数年続いたのちに不確定の判定領域となり、適用条件によっては乾燥状態の維持等による腐食抑制に寄与しうることがわかる。

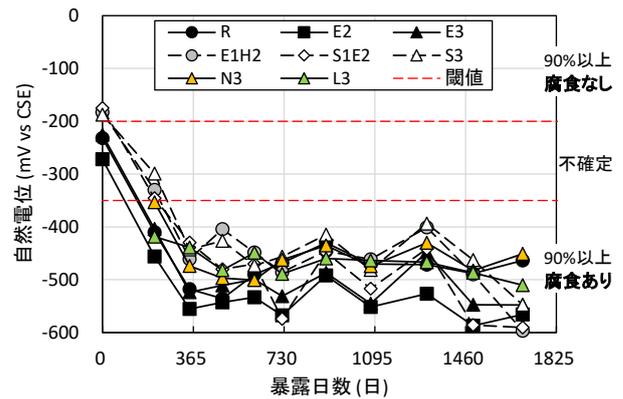


図-5 塩化物  $6\text{kg}/\text{m}^3$  上側鉄筋の自然電位変化

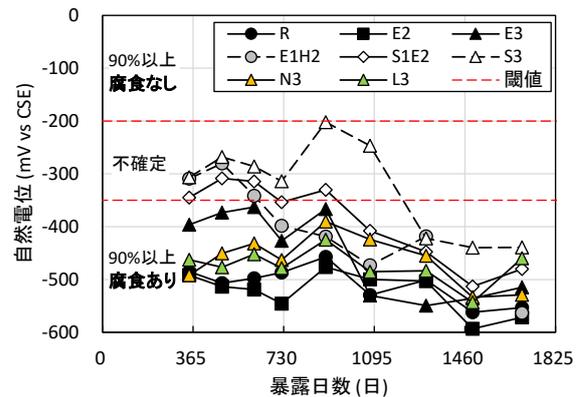


図-6 塩化物  $6\text{kg}/\text{m}^3$  下側鉄筋の自然電位変化

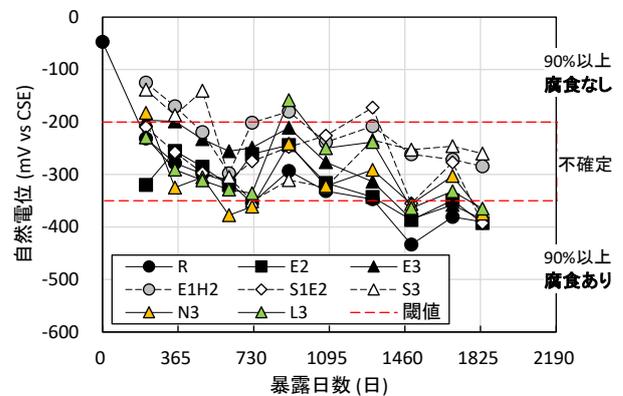


図-7 塩化物  $2.4\text{kg}/\text{m}^3$  上側鉄筋の自然電位変化

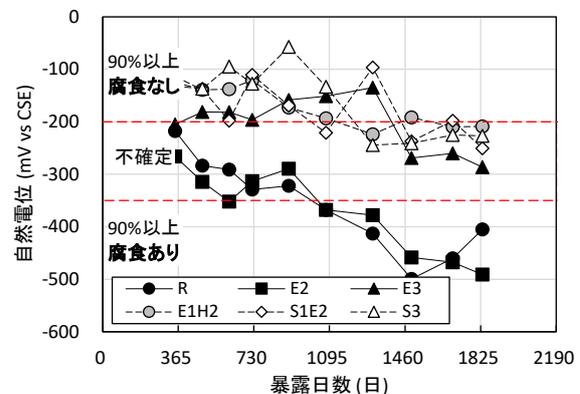


図-8 塩化物  $2.4\text{kg}/\text{m}^3$  下側鉄筋の自然電位変化

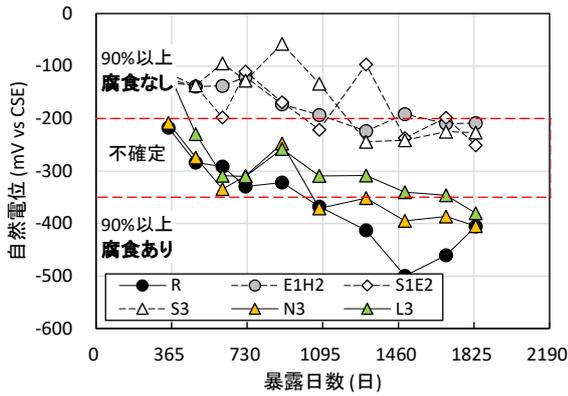


図-9 塩化物2.4kg/m<sup>3</sup>下側鉄筋の自然電位変化

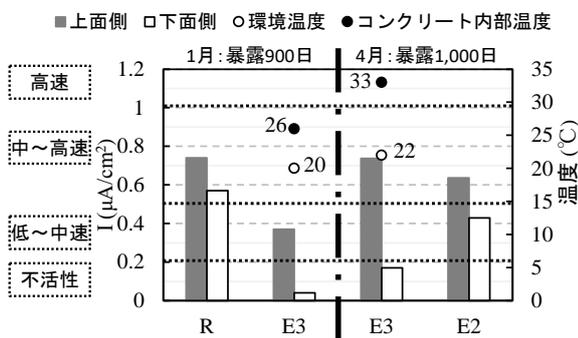


図-10 鉄筋の腐食電流密度の比較

けい酸塩系の表面含浸材は、図-9に示すように暴露開始後1年で腐食不確定になり、数年後には腐食ありに移行していることから、塩分存在下での対策に用いるのは困難であることが示唆される。

## 2) 腐食電流密度

鉄筋の腐食速度として、分極抵抗測定より算出した腐食電流密度の結果を図-10に示す。また、腐食電流密度から判定される一般的な腐食速度の基準を併せて示す。腐食電流密度の測定は、暴露2.5～3年時点での1月と4月に実施した。900日後に測定したRとE3の腐食電流密度を比較すると、上面側、下面側鉄筋ともにRの方が大きく、特に下面側で違いが顕著であった。次に1000日後に測定したE3とE2とを比較すると、上面側鉄筋はほぼ同じであったが、下面側鉄筋に違いが見られ、E2の方が大きかった。また、両測定日に共通して測定したE3の結果から、900日後に比べて、1000日後の方が腐食電流密度は大きいことが分かる。これは、図中に標記した環境温度とコンクリート内部温度（R供試体中央部の温度）から、測定時の温度が高いほど腐食速度は大きくなることも影響している。

これらを踏まえ被覆範囲の影響をみると、供試体の上

面が無処理であることもあり、下面側鉄筋にて腐食電流密度の差が顕著に表れており、腐食の小さいものから順に、 $E3 < R \approx E2$  と考えることができる。暴露数年後の腐食速度測定でみられたこの順列は、自然電位の測定結果とも一致しており、5年暴露後の自然電位の状態はその腐食速度の相違の結果として生じていることが今年度の調査結果から確かめられた。

表面含浸材の効果については、シラン系含浸材は、塗布範囲を底面および側面とした被覆材E3と同等以上の腐食抑制効果がみられている。一方、けい酸塩系の含浸材は、塩害に対する有効な腐食抑制効果が得られるとはいえない結果となっている。

## 3) コンクリート中の水分量（電気抵抗）

腐食抑制効果が異なる要因解明として、コンクリート中の水分量に着目し、暴露中の変化を調査した。含水率と関連性の高い鉄筋間の電気抵抗（交流インピーダンス）の変化を図-11に示す。コンクリート中の水分量は次章でも検討するが、本試験での挙動においては、温度、水分量、塩分量の変化を表すものと考えられる。ここで、塩分量は長期的に変化してゆくもの他因子に比べるとその変化割合は小さく、測定値の相対変化は主に温度と水分量の影響を受けていると考えられる。

まず初期塩分6kg/m<sup>3</sup>供試体をみると、測定時期や供試体の種類に関わらず測定結果に大きな変化はみられない。とくに上部鉄筋間では、塩分量が多く表面がコンクリート素地のままであるため水分の変化が比較的少ないものと推測される。一方、底面がシラン系含浸された供試体S1E2、S3（破線）の下部鉄筋では、暴露初期は未測定ではあるものの数年後までは比較的抵抗値が大きく、すなわち乾燥した状態を保持できていたことがうかがえる。これは、図-6の結果とも符合しており、高濃度塩分での腐食抑制挙動の要因を説明できる結果である。

初期塩分2.4kg/m<sup>3</sup>では測定結果の差異が明らかであり、シラン系含浸材の範囲近傍、E1H2、S1E2-上、S3（破線）での鉄筋間電気抵抗が大きいことがわかる。2.4kg/m<sup>3</sup>であれば暴露5年後でも内部が比較的乾燥状態に維持でき、これが前述の結果で鉄筋腐食を抑制できている要因であるとみられる。上面以外を被覆したE3の下部でも、無処理供試体R（●）に比べると高抵抗を示している。一方、側面のみを被覆したE2（■）とけい酸塩系含浸材N3（▲）、L3（△）は、いずれもRと大きく相違しない変化を示し、自然電位等の結果において塩害に対する有効な腐食抑制効果が得られなかった要因を示すものである。なお、冬季測定値が高くなるのは供試体温度によるもので、供試

体温度で補正可能と考えられる。

#### 4) 塩化物イオン量分布、中性化深さ、鉄筋腐食面積率

沖縄での屋外暴露5年後に解体調査を行い、供試体中央部での塩化物イオン量分布、中性化深さ、鉄筋腐食面積率を測定した結果を図-12に示す。

中性化深さは、上面は全て無処理素地面のため顕著な差はみられなかった。底面は、E3, E1H2 は被覆材が塗布

されており0mmであるが、けい酸塩系含浸塗布面では無処理と同程度かやや大きく、シラン系含浸材では明らかに中性化が進行していた。これは、乾燥状態が維持され二酸化炭素の拡散が多かったためであると考えられる。

塩化物イオン分布は、供試体中心部では初期混入量と概ね同程度の値を示し、E3, E1H2 の底面は被覆材が塗布されているため中性化しておらず、下側での塩化物イオン

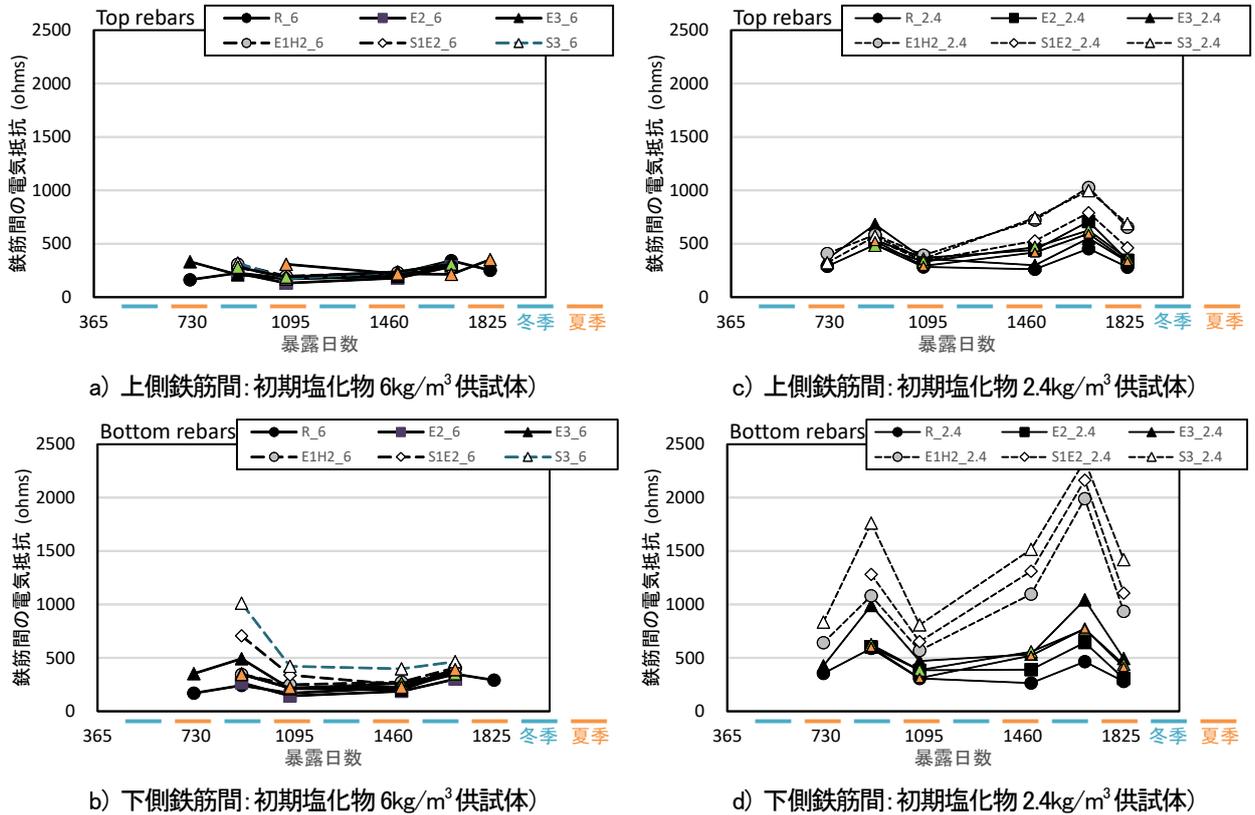


図-11 コンクリート中の水分量と関連付けられる鉄筋間の交流インピーダンスの変化 (暴露2~5年)

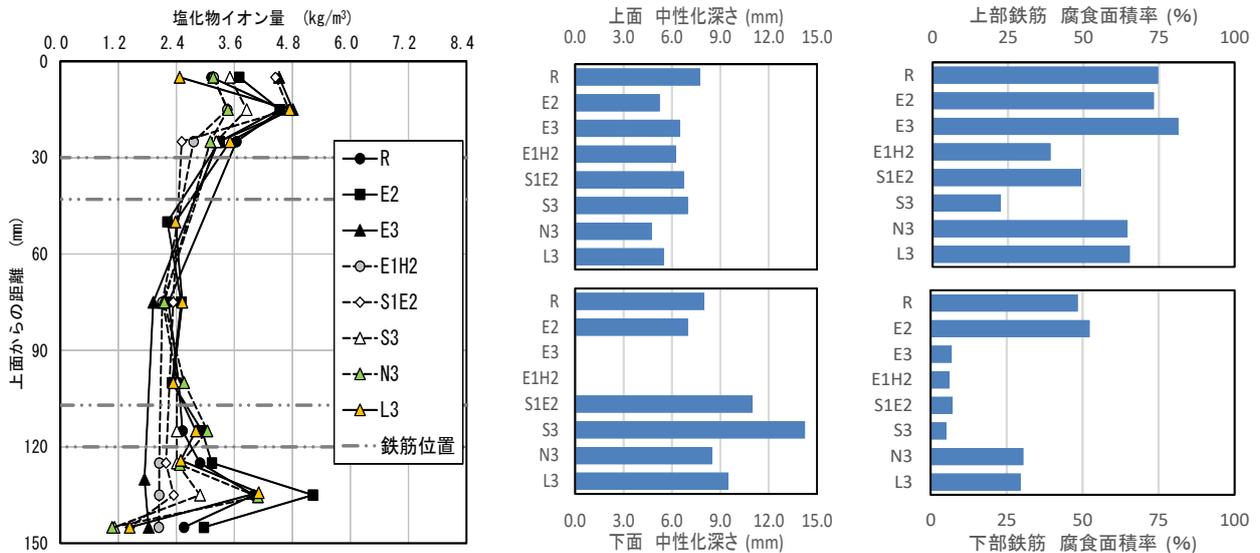


図-12 暴露5年後の初期塩化物 2.4kg/m<sup>3</sup> 供試体の塩化物イオン量分布、中性化深さ、鉄筋腐食面積率

ン量分布は一定である。供試体上面と被覆部以外の下面では中性化フロントへの塩分濃縮がみられ最表面よりも次層がやや高いことがわかる。上面での塩化物分布は、側面の処理材等に起因する差が少しあるものの、顕著な相違とはいえない。一方、底面側には明確な差があり、これは前述の結果と符合するものであった。

鉄筋腐食面積率は、図-7, 8, 9 に示した自然電位の測定結果とよく対応しており、側面と底面を全て被覆した場合と、側面や底面にシラン系含浸材を用いた場合に腐食抑制効果が得られ、塩化物が内部にあるとけい酸塩系含浸材による補修効果は限定的であることがわかった。

### 3. 実大断面を有する供試体による内部環境の評価

鉄筋コンクリート供試体を用いた促進劣化サイクル試験および屋外暴露試験より、塗布部位によりコンクリート内部の環境が異なり、鉄筋の腐食抑制効果に影響を及ぼすことが確認された。この効果を実大規模で部材としての形状の中での挙動を検証するため、JIS A 5373 道路橋用橋げたを模擬した供試体 (T 形断面) を製作し、屋外暴露試験を開始した。供試体の概要と暴露後約1年間の測定結果を示す。

#### 3. 1 水分評価方法の検討

供試体の設置状況を図-13 に、コンクリートの配合を表-4 に示す。供試体は合計4体製作し、茨城県つくば市の屋外暴露場に平成29年2月に設置した。



図-13 実大断面を有する供試体の設置状況

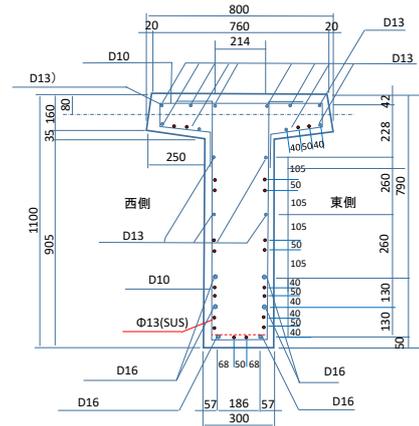
表-4 コンクリートの配合

W/C (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				
	水	セメント	細骨材	粗骨材	混和材
40.5	181	447	668	991	4.02

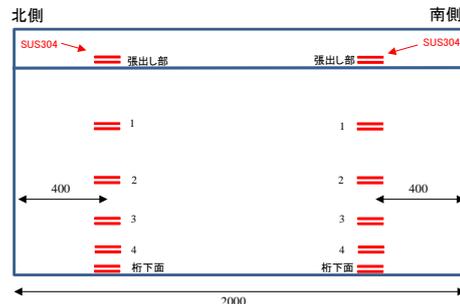
セメント：普通ポルトランドセメント、最大粗骨材寸法20mm、スランブ13cm、空気量3.7%

この桁供試体では、コンクリートの水分量により電気伝導性が変化することを利用して、電気抵抗を測定することにより含水状態の分布を把握する。供試体の両端部から400mmの位置に、直径13mm、長さ100mmのステンレス鋼材 (SUS304) を、2本1組で鉄筋等と電氣的に絶縁

して11箇所 (22本) ずつ、図-14のように各供試体の北側と南側にコンクリート打設時に埋設した。交流インピーダンス (電気抵抗) は、周波数を1kHzに設定したLCRメータを用いて測定した。また、電気抵抗の測定結果との比較のため、コンクリート表層の水分量の測定に一般に使用されている、高周波容量式水分計による測定も行った。この水分計は、コンクリート表面に電極を押し当て、表層数cmの領域における高周波容量 (キャパシタンス) から水分量を推定するものである。



(a) 断面図



(b) 側面図

図-14 ステンレス鋼材埋設位置 (寸法 : mm)

#### 3. 2 電気伝導性による水分量の評価

供試体の北側に配置したステンレス鋼材間の電気伝導率の測定結果の一例を図-15に示す。図より、張出部の電気伝導率が大きい傾向にあることがわかる。コンクリート中の水分が多いほど電気伝導率は大きくなると考えられることから、張出部は比較的高い含水状態にあるものとみられる。また、測定日によって、電気伝導率の分布が異なることが確認される。

ステンレス鋼材間の電気伝導率の経時変化を、気象庁つくば館野における降水量と併せて図-16に示す。図より、ある程度降水が続くと数日間は電気伝導率が高くなることが密な計測頻度の期間でみられ、これは供試体内

部の含水状態が高くなるためと推察される。電気伝導率の序列は、張出部>ウェブ>桁下面であり、測定期間内での傾向は変わらないことが確認された。

次に、高周波容量式水分計による水分量の経時変化を図-17に示す。測定期間では徐々に水分量が低下していく傾向にある。水分量の序列は、電気伝導率の測定結果のように明確ではない。測定対象深さも異なるため、電気伝導率のみで含水状態の分布や経時変化の傾向を把握することは困難と考えられる。温度をはじめとした他の影響因子により電気伝導率を補正して水分量の評価を行う必要があることがわかった。

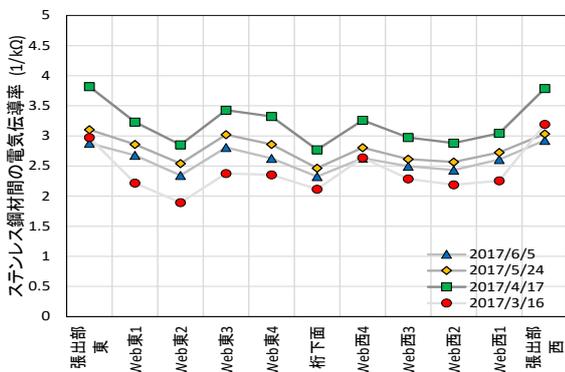


図-15 ステンレス鋼材間の電気伝導率の分布

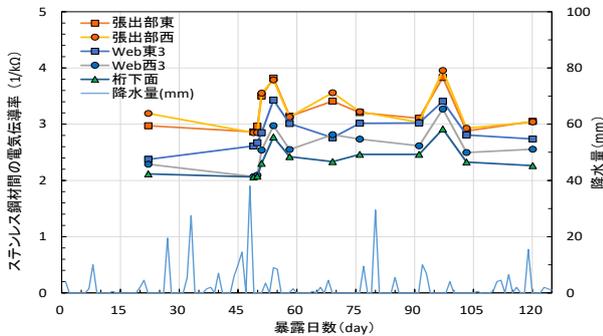


図-16 ステンレス鋼材間の電気伝導率と降水量

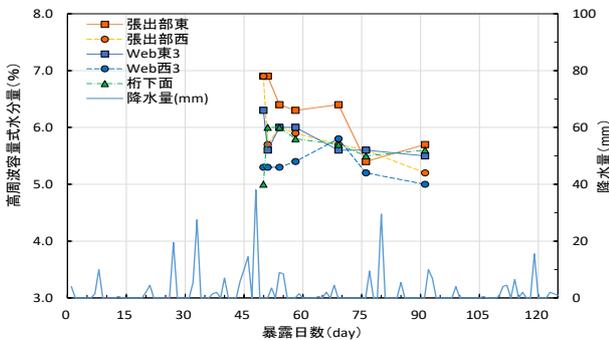


図-17 高周波容量式水分計による水分量と降水量

電気伝導率により水分量の動態観測を行うために、交流インピーダンスの測定値の自動観測に移行した。交流インピーダンスZ値は、細孔構造、塩分、温度、水分等の様々な要因により変化しており、測定される値は、 $Z = f(W, T, Cl, \text{etc.})$  のような関数で示される変化を示すと考えられる。このため、温度(内部分布)の測定を行って、その結果から温度影響を除去することを試みた。

実大桁のSUS電極センサ対の各位置を中心に熱電対を埋設して同時測定し、その結果からコンクリート桁内の温度分布を推定してZ値を補正することとした。図-18に約半年間の交流インピーダンスと温度の関係を示す。温度変化により電気抵抗率は大きく変化するものの一定の相関が見られ、電気抵抗率Z値は指数関数で近似される関係を呈し、乾燥時には高抵抗値の側に、湿潤飽水時に最低値をとって下側包絡線を形成すると考えられる。温度補正は、電解質がボルツマン分布に従うとした場合にアレニウス則により補正でき、絶対温度の逆数を指数関数で基準温度(今回は23℃)に換算した。個々の測定結果は近似線に沿って基準温度に補正され、これを電極位置とその経時変化として整理すれば、実大断面コンクリート桁内部の含水率分布とその経時変化を把握できることとなる。

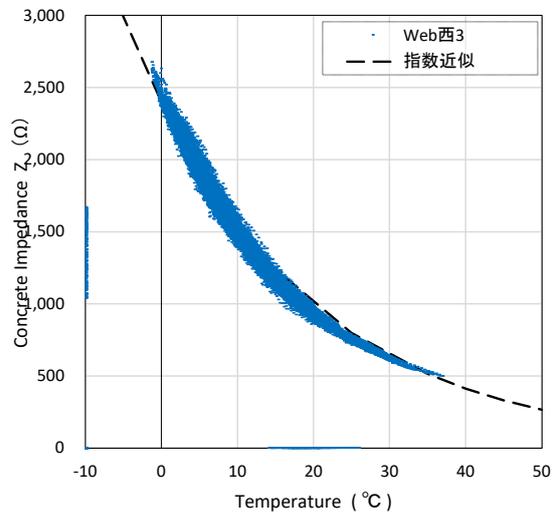


図-18 交流インピーダンスの温度依存性

### 3.3 水分量変化の観測結果

1kHzでの交流インピーダンスを多チャンネルで測定記録できるデータロガーを用いて、平成29年度後半から長期観測を開始した。床版防水と橋面舗装を施工した後の平成30年度からの1.5年間の観測結果として、基準温度を23℃として交流インピーダンス値を補正した変化

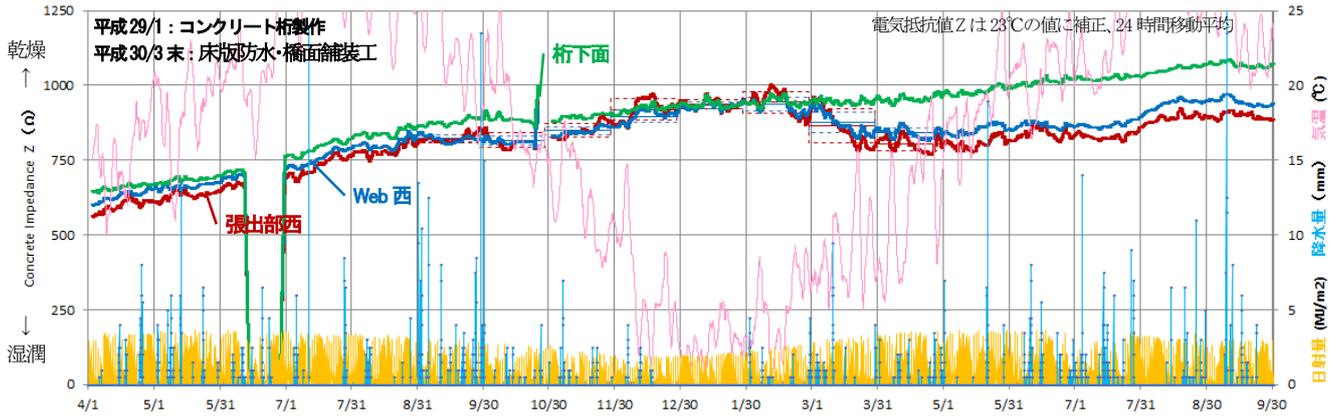


図-19 温度補正した電気抵抗率(含水状態)の観測結果 [平成30/4～令和1/9]

を図-19に示す。温度補正後のZ値が水分量変化を示すとすると、含水状態は同一箇所でも時間とともに変化している。平成30年度前半は継続的に電気抵抗が増加傾向を示しているが、これは天端の防水工を施したことにより、コンクリート桁が乾燥側に变化したことが考えられる。橋面防水・舗装後から0.5年あまり電気抵抗率は増加を続け、コンクリートが乾燥してゆく様子がわかる。その後は概ね同程度の値を示しつつも、降雨があるとそれから一定時間は湿潤傾向を示し、少雨期(たとえば12～2月)は高抵抗側に变化することがわかる。測定箇所間に着目すると、降雨が少なく乾燥が続くと同程度に収束するが、降雨が続くと桁部位による相違がやや拡大し、その序列は、張出部>Web>桁下面の順に含水状態が高い傾向を示すことがわかった。

#### 4. まとめ

本研究で得られた結果を以下にまとめる。

(1) 鉄筋コンクリート供試体を用いた促進劣化サイクル試験および屋外暴露試験の結果から、表面保護工の塗布部位が異なることによって、コンクリート内部の環境が変化し、鉄筋の腐食環境に影響を及ぼすことを確認した。鉄筋の腐食抑制効果は、上面から水分や塩分が浸入する本試験では、下面側の鉄筋から表面保護による腐食抑制効果がわかり、被覆範囲や含浸材の種類による影響を把握できた。

(2) 塩害環境にある沖縄で5年間の暴露試験を行い、鉄

筋電位、コンクリートの電気抵抗(水分量)、塩化物イオン分布を測定したところ、表面被覆や含浸材の種類と塗布範囲による水分状態の相違によるとみられる腐食抑制効果への影響が把握できた。

(3) 塗布部位および塗布材料の効果については、底面も封止する表面被覆を行った場合とシラン系含浸材を用いた場合において、腐食抑制効果が認められた。水分の出入りが無塗布に対して大きく変化しないその他の塗布条件では、塩分が浸透した状態での長期耐久性は期待できないことがわかった。

(4) 実大T形断面を有する桁供試体を用いた測定から、部位によって電気伝導性が異なり、張出部の含水状態が高いなどその序列は一定していることが確認された。測定を自動化し年間を通して観測した結果から、降雨の影響やその部位の特徴もわかった。今後、測定精度をさらに向上させ詳細な変化を把握するとともに、床版防水とその模擬破損、表面保護工の種類や塗布部位を変えた場合の影響等について観測を続けてゆくこととしている。

#### 参考文献

- 1) 土木学会: コンクリートライブラリー119 表面保護工法設計施工指針(案)、工種別マニュアル編、p.28,100,164、2005

## 6.4 既往事象・現場条件に対応した最適な維持修繕手法の構築、構造・材料の開発・評価

### 6.4.3 舗装マネジメントの効率化に関する研究

担当チーム：道路技術研究グループ（舗装）、  
寒地保全技術研究グループ（寒地道路保全）、地質・  
地盤研究グループ（特命）、材料資源研究グループ（先  
端材料・高度化）

研究担当者：藪雅行、木村孝司、齋藤清志、西崎到、  
新田弘之、稲崎富士、寺田剛、丸山記美雄、渡邊一弘、  
尾西恭亮、佐々木巖、大浦正樹、若林由弥

#### 【要旨】

本研究は、多様な交通条件、気象条件下で供用されている舗装を対象に、それら現場条件に応じた適切な維持修繕手法に関する検討を通じ、重交通道路及び軽交通道路の舗装の長寿命化・延命化手法を提案することを目的としている。平成 28 年度は、予防保全の観点から維持工法に着目し、維持工法が主たる工法である軽交通道路の破損特性と維持工法に用いられる材料の基礎物性について調査分析を行い、表面 1cm 程度の材料劣化が顕著で、表面からのひび割れに起因して破損が進展することを明らかにした。平成 29 年度は、軽交通道路に多い表面のアスファルト劣化から生じるトップダウン型ひび割れ、ボトムアップ型疲労ひび割れや低温ひび割れなどの損傷形態に対応した延命化補修工法として、表面処理工法ならびにじょく層併用薄層補修工法について現道調査による検討を行った。平成 30 年度は、予防保全が可能となる表面処理工法について試験舗装による検証を開始し、ひび割れ状態の変化などから適用条件の初期データを得た。じょく層併用薄層補修工法ではボトムアップ型疲労ひび割れや低温ひび割れなどのリフレクションクラック発生を抑制する効果が確認できた。令和元年度は、表面処理工法の適用目安を示すための試験舗装による評価を行った。その結果、下層状態が比較的健全であれば交通量に応じた工法選定により路面機能維持として適用できることがわかった。

キーワード：舗装、表面機能、路面破損、構造破損、材料劣化、実態調査

#### 1. はじめに

本研究では、多様な交通条件、気象条件下で供用されている舗装を対象に、それら現場条件に応じた適切な維持修繕手法に関する検討を通じ、舗装の長寿命化・延命化手法を提案することを目的としている。多様な管理レベル下にあることが多い軽交通道路の舗装については、その管理レベルに対応した路面の維持工法と材料が求められる。そのためには、損傷の実態、特に損傷要因を把握し対策を選定することが必要である。

平成 28 年度は、予防保全の観点から維持工法に着目し、維持工法が主たる工法である軽交通道路の破損特性の整理、舗装表面の材料劣化状況の評価、維持工法に用いられる材料の用途や基礎物性について調査分析を行った。なお本研究では、N5 交通以下の道路を軽交通道路としている。

平成 29 年度は、舗装表面のアスファルト劣化から生じるトップダウン型ひび割れの抑制につながる表面処理

工法について、平成 30 年度は、予防保全が可能となる表面処理工法について試験舗装による検証を開始した。また、軽交通道路に多いボトムアップ型疲労ひび割れや低温ひび割れなどの損傷形態に対応した延命化補修工法の一つとして、じょく層併用薄層補修工法について追跡調査による検討を行った。

令和元年度は、予防保全が可能となる表面処理工法の適用目安を示すため、損傷段階や交通/環境条件が異なる現道で試験舗装による評価を行った。

#### 2. 軽交通道路の管理と破損特性

##### 2.1 舗装の診断区分と措置

平成 28 年 10 月に策定された「舗装点検要領」（以下、「点検要領」という。）において、アスファルト舗装では表層の供用年数に対する使用目標年数を設定し、これを通じて表層の供用年数と損傷レベルに応じた適切な措置の実施により長寿命化をはかってゆくことになっている。

軽交通道路等の多くは、損傷の進行が緩やかな道路等に分類（C,D）され、表層を使い続ける目標期間の設定は各道路管理者に求められていないが、道路特性を踏まえて管理基準を設定し、点検と診断を行って、適切な措置を講ずることとされている<sup>1)</sup>。

舗装の点検と診断においては、管理基準に照らした劣化の程度に応じた診断区分が、Ⅰ健全、Ⅱ表面機能保持段階、Ⅲ修繕段階に区分されている。これを受けて、舗装点検必携では使用目標年数と診断区分の対応を図 2-1 のように整理している<sup>2)</sup>。

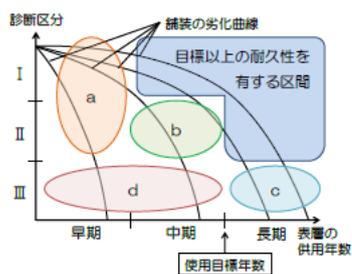


図 2-1 使用目標年数と診断区分のイメージ<sup>2)</sup>

舗装構造が比較的単純で舗装厚が薄い軽交通道路では、図中の措置の区分 c と d では表層を更新する機会が多く、必要に応じ路盤改良の要否を検討することとなる。このため適確な点検と診断が必要となるものの、措置としての修繕工事には技術的な課題は多くない。

一方、区分 a と b では、表面処理やクラックシールといった維持工法が主体になる。しかしながら、維持材料工法の選定方法や判断基準が体系的に定まっているとは言えず、表層がどの程度延命されるのかもあまり明らかになっていない。点検要領に基づくメンテナンスサイクルを運用していく上で、今後はより一層、措置としての路面の維持工法の効果的な使用の重要性が増してくると考えられる。

## 2.2 表面の損傷形態と劣化要因

表層機能の保全による舗装の長寿命化・延命化は、表層の機能である快適な路面の保持と路盤の保護の持続によって達成される。これを阻む要因は、舗装表面の材料劣化と、ひび割れ等の不連続箇所からの水の浸透に大別される。ポットホールや段差などの即応せざるを得ない損傷や、放置しうる損傷もあるものの、破損進行が問題となる損傷として、ひび割れへの対応は重要である。

舗装のひび割れには、通過車両の繰返し载荷で舗装下面から発生し上に伸びるボトムアップ型疲労ひび割れ（以下、ボトムアップひび割れ）、舗装表面から下層に伸びるトップダウン型疲労ひび割れ（以下、トップダウン

ひび割れ）、凍上ひび割れ、温度応力ひび割れがある。

ボトムアップひび割れは、重ね梁としての舗装版の曲げ疲労破壊であり、舗装の構造設計の基本となる損傷形態である。路面に現れたひび割れは版を貫通しており、下層に水が浸透し剥離を生じるほか支持層である路盤の損傷を促進することとなる。

トップダウンひび割れは、表面の変形抵抗性が乏しい場合にタイヤ近傍の引張ひずみで生じるといわれており、特に劣化によるアスファルトの硬化が指摘されている。路面は日射を直接受けるため、紫外線や温度上昇で酸化劣化が進みやすい。表面の微細ひび割れや剥離による疲労性状の低下も過年度の研究課題で確認されている<sup>3)</sup>。

軽交通道路における損傷の進行要因として、水の浸入と表面付近の材料劣化が二つの大きな形態であり、その状況把握と抑制のための維持工法が重要となる。

## 3. 舗装表面の材料劣化の調査

表層機能保持において表面付近の材料劣化を正確に把握することが必要であるため、試験舗装工区の材料を用いて深さ方向のアスファルト劣化を調べた。

### 3.1 国道 50 号下館試験舗装

国道 50 号下館 BP ではカーボンブラックによるアスファルト舗装の耐久性評価を行っており<sup>4)</sup>、この採取表層材を用いて、舗装表面からの深さ方向に細かくスライスしてアスファルト劣化を調べた。当該舗装は平成 26 年 3 月に新設工事として施工され、本年度に供用 3 年後の試験を行った。使用材料は表 3-1 に示すとおりである。なお、舗装厚などの面から試験未実施の箇所があるほか、歩道工区の 1 年後は 20mm スライスで試験した。

表 3-1 試験舗装工区（下館）の表層材料

工区	混合物の種類	As 量	空隙率	アスファルトの種類
車道	密粒度アスファルト混合物(13)[75]	5.4%	—	ポリマー改質Ⅱ型
歩道	開粒度アスファルト混合物(13)[50]	4.5%	12%以上	ストレートアスファルト60～80

図 3-1 と図 3-2 に試験結果を示す。車道部の改質密粒混合物では、表層深部では新設当初の針入度および軟化点を示しているのに対し、表面に近づくほど劣化度が大きくなり、表面 1cm だけをみると針入度は 20 未満で軟化点もかなり高く、アスファルトの劣化が著しいことがわかる。歩道部は 0 年（練落とし材）のアスファルト試験が未実施であるが、使用アスファルト級から針入度 50 強程度であるとみられ、開粒度であり劣化は車道よりも

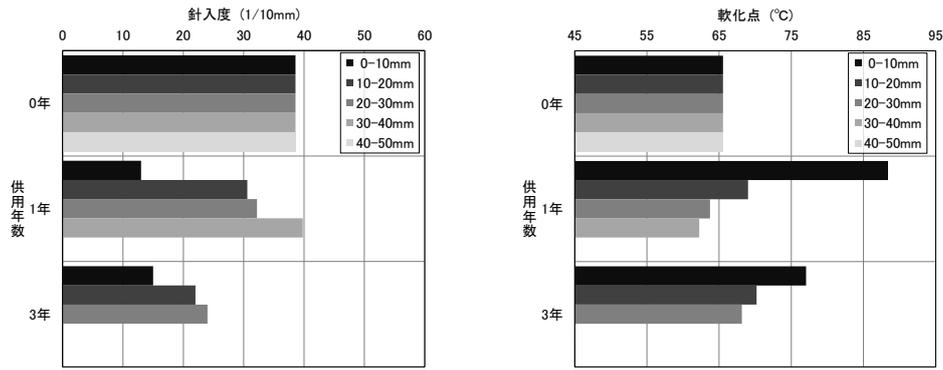


図 3-1 表面深さ方向の劣化状況(車道密粒)

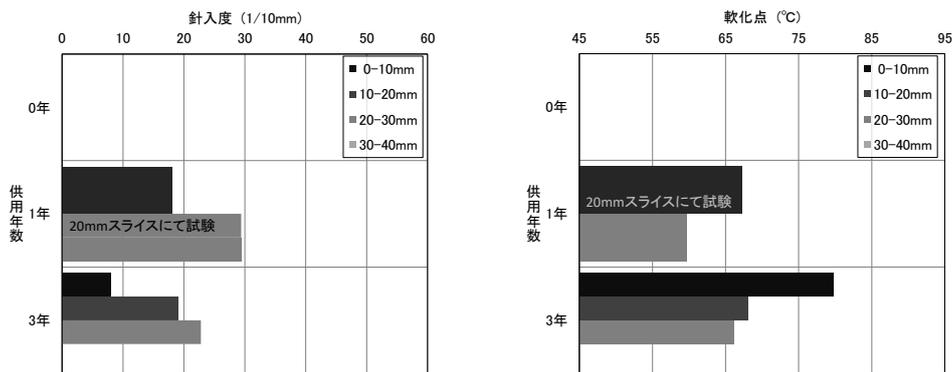


図 3-2 表面深さ方向の劣化状況(歩道開粒)

さらに早いとみられる。アスファルトの劣化は供用年数とともに進行するが、表面付近ではその進行は急激なことがこれらの結果からわかる。その理由としては、紫外線および酸化による劣化が挙げられる。表面部の締固め状態にもよるか深部では酸素に触れる機会も相対的に少ないため、材料劣化の条件は表面付近で顕著に厳しい。

これまでの研究では表層 5cm を一体として材料評価することがほとんどであったが、今回、深さ方向に細かく分割して経年変化を調べたところ、表面付近の劣化条件が特に厳しいことがわかった。これは、耐候性に優れた表面処理材料等で路面を保護すれば、舗装の耐久性を大幅に向上でき得ることを示唆する。

表 3-2 試験舗装工区(青梅)の表層材料

工区	混合物の種類	再生骨材 (%)	新材 (%)	新アスファルトの種類	再生用添加剤量(%)
①	再生密粒度アスファルト混合物(13)[75]	60	40	ストレートアスファルト 40~60	旧アスファルトに対し 8.0
④	新規密粒度アスファルト混合物(13)[75]	—	100	ストレートアスファルト 40~60	—

### 3. 2 東京都青梅試験舗装

土木研究所では、東京都土木技術支援・人材育成センターおよび(一社)日本アスファルト合材協会の三者で高針入度のアスファルトの舗装への適用性を検証するための共同研究として青梅市内の東京都道での試験舗装を平成 26 年 4 月に施工した<sup>5)</sup>。今回、供用 2.5 年後および暴露 1 年後の再取材のアスファルト劣化度評価試験を前項と同様に行った。ここでは使用材料のうち表 3-2 に示す、通常の新規アスファルト混合物および再生アスファルト混合物の試験結果を述べる。

図 3-3 と図 3-4 に試験結果を示す。劣化傾向は定性的には前項と同様であるが、再生混合物と新規混合物ではその進行速度が異なり、再生混合物の方が劣化は早いことがわかる。特に再生混合物の表面 1cm だけをみると針入度は 10 未満で軟化点も異常に高く、アスファルトの劣化が著しい。表面付近ではその進行が急激であることはこの結果からも裏付けられる。

当該試験舗装では、同じアスファルト混合物を用いた供試体を、東京都土木技術支援・人材育成センター(江東区)の屋上で暴露している。約 1 年間後に回収した供試体の結果を図中に示しているが深さ方向に材料を一括して試験しており、再生と新規ともに、0 年や 2.5 年供用後の深部と同程度の値を示した。表面近傍では劣化が



設定が必要となっている。

アスファルト系舗装の補修材料として、国内で使用されている材料製品の公表資料を市場調査により網羅的に整理し、表4-1の例示のように集約した。今後、材料製品の技術資料等から、対策効果と謳い文句を整理し、比較評価のための性能表示や適用条件を示すための表示項目の標準化などを検討する予定としている。

## 5. 軽交通道路における舗装の長寿命化・延命化技術・手法の構築

### 5.1 背景

損傷要因に応じた維持修繕工法の適用方法を明らかにすることで、軽交通道路の舗装の長寿命化と維持管理技術を向上させることを目指している。軽交通道路における維持修繕工法の延命効果データを取得し、その適用手法を提案する。

これまでの調査におけるひび割れ発生形態を含めた路面損傷調査から、トップダウン型ひび割れとボトムアップ型ひび割れの、二つの形態に分けられることがわかっている。前者は、舗装構造的には必要な断面を有している。表面の材料劣化が進行することによりトップダウン型ひび割れを生じ、それが進展することにより舗装全体の破壊に進行する。後者は、アスファルト混合物層厚が薄いことによる表層版の曲げ破壊や低温ひび割れが生じ、そのひび割れが表面まで貫通した時点で舗装全体の破壊に到る。そこで、その形態に着目し、表面処理工法およびじょく層併用薄層補修工法の延命効果データを調査している。

### 5.2 表面処理工法の調査

舗装表面のアスファルト劣化が進行するとトップダウン型ひび割れを生じ、それが水の浸透を促して全層破壊に到る。軽交通道路では、重荷重が繰り返し作用する構造破壊や疲労損傷が卓越するよりは、材料劣化によるこの損傷が多く、表面機能の維持が求められる。表面処理工法は、表面のアスファルト劣化を抑制することによるひび割れ発生の防止効果とともに、表層の水密性向上による路盤をはじめとした下層の損傷抑制をはかることができる工法である。クラックシール等の事後保全型の対策工法と異なり、予防保全が可能となる表面処理工法についてその適用の目安を示すため、損傷段階や交通/環境条件ごとの有効性を把握するための試験舗装を進めている。



図5-1 ひび割れ形態の異なる破損(つくば市内試験舗装区)

#### (1) 試験施工のための調査

つくば市内の舗装を調査し、同程度の路面損傷状態が続く複数の区間を抽出した。これらの区間からコア抜きして調べたところ、図5-1に示すように、交通量や表層の供用年数の相違により損傷形態が異なり、トップダウンおよびボトムアップなどの形態の異なるひび割れが生じている箇所を選定できた。表層のアスファルトの劣化度を、表面部分と内部に分けて抽出回収して調べたところ、図5-2に示すように表面部分のアスファルトの劣化が顕著であることも確認できた。これらの区間について、さまざまな表面処理工法の試験舗装を施工して、損傷段階や交通/環境条件ごとの適用性を検証するための試験舗装を施工した。

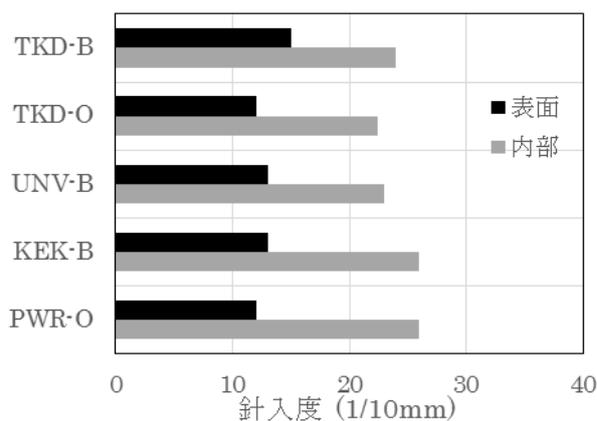


図5-2 表面処理工法試験舗装区間の針入度

#### (2) 表面処理工法の試験施工

適用可能な交通条件の把握とともに、延命効果の検証を比較的短期間に行うために、生活道路から重交通路線

までを対象とした。既設舗装の損傷に関する適用範囲の調査として、ひび割れ状態や下層の健全性が異なる路線を含むよう試験箇所を選定を行った。試験箇所の概要を表5-1に、表面処理工法とその使用材料を表5-2に示す。各工法の延長を10mとし、薄層表面処理工法は全箇所（試験箇所①と②では、クラックシールとの併用工区も設定）で工区を設け、その他シール処理は交通量の多くない箇所で施工した。

表面処理の施工期間は、最高気温は40℃近くまで、路面温度は65℃程度まで達した日々が続いた。過酷な条件下ではあったが、各工法ともに施工性は問題なく、良好な仕上がりが得られたものの、一般にアスファルト乳剤は極寒や酷暑期の養生制約があることから、施工条件に関する耐久性等の検証も必要であることがわかった。

表5-1 試験施工箇所と既設舗装の状態

箇所記号	交通量	下層状態(推定)	たわみ DO( $\mu\text{m}$ )	表層供用期間	ひび割れ率(箇所平均%)	路面テクスチャきめ深さ(mm)
①	重	損傷大	505	<5年	2.2% (ボトムアップ)	0.46 mm
②	重	損傷中	491		7.5% (ボトムアップ)	0.88 (粗い)
③	重	損傷中	395	15年<	14.2	0.54
④	中	健全	542	<5年	0.2	0.35 (良い)
⑤	軽	健全	210	10-15年	0.1	0.58
⑥	軽	損傷小(セメント安定処理)	421	15年<	2.8 (トップダウン)	0.72 (粗い)

表5-2 試験舗装に用いた表面処理工法

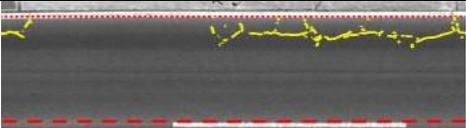
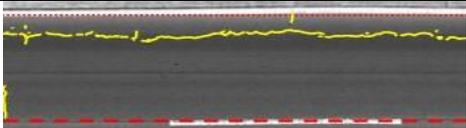
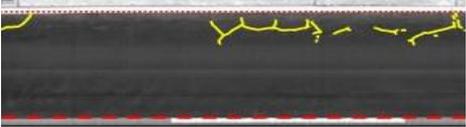
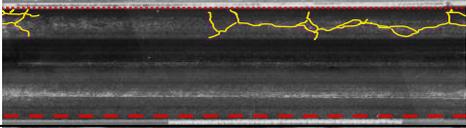
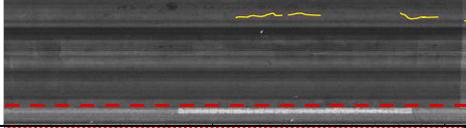
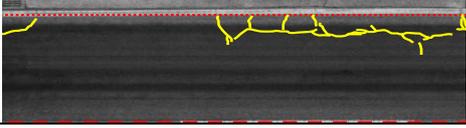
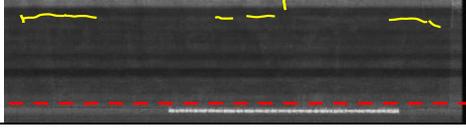
工法名	主な結合材料	骨材	塗布量 $\text{kg}/\text{m}^2$
フォグシール	改質 As 乳剤 (PKM-T)	—	0.6~1.0
フォグシール	ポリマー改質 As 乳剤	—	0.4~0.8
チップシール	改質 As 乳剤	碎石 7号	7.4
チップシール	改質 As 乳剤	単粒碎石 5-8mm	10.3~10.8
薄層表面処理 A	改質アスファルト	細骨材	1.8~2.3
薄層表面処理 B	弾力性 As 乳剤	珪砂	0.6~0.9
薄層表面処理 C	As 乳剤およびセメント	細骨材	1.9~2.6

## (3) 試験施工の調査結果

表層アスファルトの劣化防止の効果は長期供用後の評価を待つ必要がある。ここでは、水の浸入抑制としてのひび割れ状況の調査結果<sup>9)</sup>を示す。交通量が多く既設路面のひび割れが進んでいる試験箇所③での調査結果の例を表5-3に示す。フォグシールでは施工5日後には表層の既存ひび割れに沿った変状が生じ、薄層表面処理でもひび割れは顕在化しつつある。このひび割れ率を図示したのが図5-3(a)である。無処理比較工区の施工前、フォグシールとともに、1.3年後には経過年数に応じ少しずつではあるがひび割れの進行がうかがえる。薄層表面処理でもひび割れは拡大しているものの、施工前に比べると表面ひび割れの範囲は抑制(13→6%)できている。

交通量が少ない試験箇所⑥、図5-3(b)では重交通区間とはやや異なり、フォグシールでは1年程度でひび割れが生じたが、チップシールと薄層表面処理では1.3年後でも1%以下に維持できている。下層状態が比較的健全

表5-3 表面処理工法施工前後と1.3年供用後までのひび割れ状況の変化の例

試験箇所③ (R408 土研前)	フォグシール(PKM-T)		薄層表面処理 A	
	ひび割れ率(%)	ひび割れ線図	ひび割れ率(%)	ひび割れ線図
施工前	12.5		13.4	
施工5日後	10.5		0.0	
0.5年供用後	11.0		3.3	
1.3年供用後	13.3		5.9	

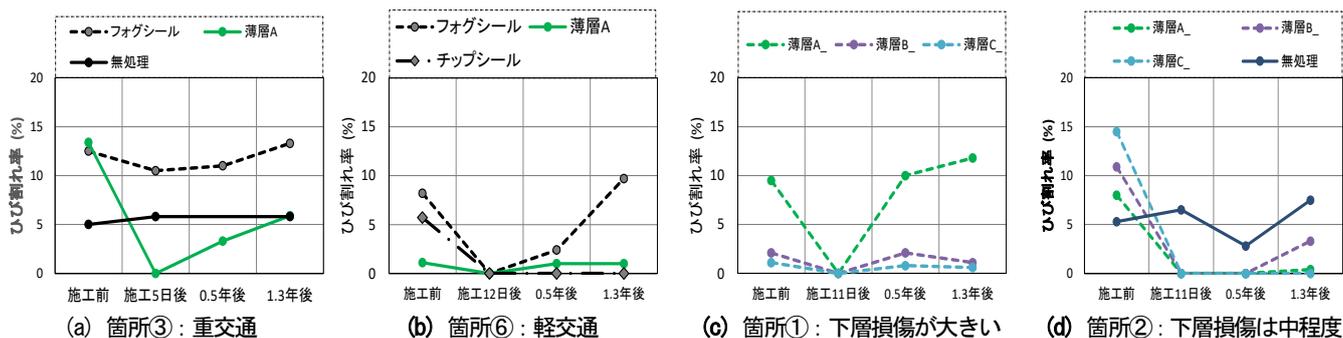


図5-3 表面処理工法施工前後と1.3年供用後までのひび割れ状況の変化の例

で交通量が多くなければ適用性があることが示唆される。図5-3(c), (d)は重交通区間でクラックシールと薄層表面処理を併用した場合の結果であるが、両者でひび割れ再発が大きく異なることがわかる。その理由としては下層の損傷状態により表層の歪状態が異なることが考えられる。なお、路面上にひび割れが見られていても、塗布材料がひび割れ内部に浸透することによる遮水効果も期待できることから、実際の遮水性を面的に把握し下層の保護効果を評価してゆく必要がある。

(4) 構内における表面処理工法の評価

前述の現道試験施工において、遮水効果の検証のためには面的な遮水性を評価する必要があることがわかった。また、表面処理工法による材料劣化の抑制が期待できるが、損傷段階に応じた適用時期を示すためには、定量的な試験結果が必要となる。そこで、透水透気性の評価および材料劣化抑制の検証として、新規アスファルトを用いて、締固め度や意図的に微細ひび割れを形成させた試験工区を令和元年度に舗装走行実験場内に施工した。

図5-4は降雨後の路面の状態を撮影したものである。微細ひび割れや締固め状況に応じて表面の含水状態の差異が見られ、下層への浸透水の状況を定量的に評価検証する予定としている。また、新規アスファルト舗装の材料経年劣化を追跡調査する。



図5-4 舗装走行実験場内の試験工区

5.3 じょく層併用薄層補修工法の調査

アスファルト混合物層厚の薄い軽交通路線区間には、ボトムアップ型疲労ひび割れや低温ひび割れが発生しやすいことがわかっている。そのため、軽交通路線区間ではこれらの損傷形態に対応した延命化補修工法を検討することが大切である。ボトムアップ型疲労ひび割れや低温ひび割れ箇所を補修する工法の一つとして、じょく層併用薄層補修工法について検討を行った。

じょく層併用薄層補修工法の供用後12年間の追跡調査結果を整理した。じょく層併用薄層補修工法とは、図5-5に示すように、既設路面にじょく層（上のアスファルト混合物に応力を伝えないようにする層）を1cm程度の厚さで敷設し、さらにその上に変形追随性を高めるために、柔軟性の高い軟質改質アスファルトを使用した混合物層を3cm程度舗設するもので、リフレクションや低温クラックの抑制効果が期待できるものである。調査箇所では混合物層に空隙10~15%の開粒度アスコン(3cm)を舗設している。

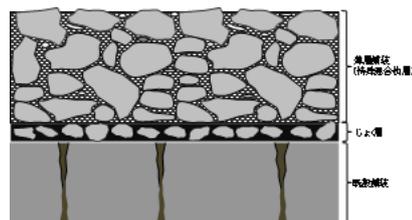


図5-5 じょく層併用薄層補修工法断面図

じょく層併用薄層補修工法を施す前の既設舗装の状態としては、低温クラックが10mに一本の割合で入っており、ひび割れ率は約12%であった。比較工区として、標準的な補修工法である合成繊維シートとオーバーレイを併用した区間を設けて比較している。じょく層併用薄層補修工法と標準工法の区間の、既設舗装のひび割れ率はほぼ同程度であり、平等な条件で補修効果の比較ができると考えられる。なお、調査対象箇所は北海道の道北

内陸部に位置しており、近傍のアメダス観測点における1980～2000年の凍結指数の平均値は約900であり、全道の平均値(585°C・日)よりもかなり高い数値を示す、非常に厳しい寒さに晒される箇所であると言える。

施工後12年間のひび割れ率追跡調査結果を図5-6に示す。標準的な薄層舗装区間は、10%を越えるひび割れ率となっているのに比べて、じょく層併用薄層補修工法のひび割れ率は2%程度であり、リフレクションクラック発生を抑制する効果が確認できる。

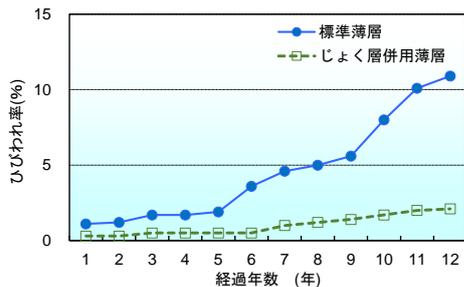


図5-6 じょく層併用薄層補修工法区間のひび割れ状況

## 6. まとめ

アスファルト混合物層が薄い軽交通道路では、表層機能の保全を目的とした維持工法が主たる措置である。損傷レベルの大きい診断区分Ⅲの多くは舗装打換えや表層更新となるものの、管理方針によっては維持工事により延命をはからざるをえない場合もある。

研究の初年度である平成28年度は、アスファルト舗装の破損特性の整理、舗装表面の材料劣化状況の評価、維持工法に用いられる材料の用途や基礎物性について調査分析を行った。その結果、表面近傍の材料劣化が顕著であることがわかり、既往研究課題の水浸疲労の知見とあわせて、表面劣化やひび割れの処置が延命化に直結することを確認した。表面機能確保のための表面処理工法の適用の目安を示すための、試験舗装を含めた試験調査を進めてゆくことにした。

平成29年度は、予防保全としても可能な措置であり、その適用の目安を示す必要がある表面処理工法について、つくば市内の現道舗装での適用性評価のための試験舗装に着手した。また、軽交通道路に多いボトムアップ型疲労ひび割れや低温ひび割れ区間における延命化工法の一

つとして、じょく層併用薄層補修工法について追跡調査による検討を行った結果、じょく層併用薄層補修工法はボトムアップ型疲労ひび割れや低温ひび割れなどのリフレクションクラック発生を抑制する効果が確認できた。

平成30年度は、予防保全あるいは劣化初期における延命化の観点から維持工法に着目し、破損のメカニズムを踏まえて、いづどこに適用すべきであるか、試験舗装による検証を開始した。ひび割れ状態の変化などから適用性条件の初期データを得た。今後、材料の性能指標、延命のコスト効果など、維持修繕シナリオを想定しつつ調査を進めてゆく予定である。

令和元年度は、予防保全が可能となる表面処理工法の適用目安を示すため、損傷段階や交通/環境条件が異なる複数の現道における試験舗装による検証を行った。1.3年目までの追跡調査からは、下層状態が比較的健全であれば交通量に応じた工法選定により路面機能の維持が可能であることが示唆された。

なお、現道における調査はそれぞれ道路管理者の協力を得て、また試験舗装には共同研究において実施しているものもある。道路管理者ほかの多大なるご協力のもと実施しているものであり、ここに記して関係各位に謝意を表す。

## 参考文献

- 1) 武藤聡、久保和幸、藪雅行：「舗装点検要領」の策定について、舗装、Vol.52、No.1、pp.11-15、2017.1
- 2) 日本道路協会：舗装点検必携 平成29年版、p.50、2017.1
- 3) 渡邊一弘、藪雅行：舗装の表面処理工法による延命効果、土木技術資料、Vol.58、No.8、pp.16-17、2016.8
- 4) 佐々木巖、新田弘之、西崎到：歩道用開粒度アスファルト混合物へのカーボンブラックの適用性、土木学会第70回年次学術講演会、Vol.70、No.V-268、pp.535-536、2015.9
- 5) 峰岸順一、西岡佑介：再生アスファルト混合物への高針入度アスファルトの適用性検討、土木技術資料、Vol.59、No.3、pp.44-47、2017.2
- 6) 佐々木巖、永原篤：表面処理工法の適用性評価のための試験舗装と初期性状、日本道路会議論文集 DVD、2019.11

## 6.4 既往事象・現場条件に対応した最適な維持修繕手法の構築、材料の開発・評価

### 6.4.4 先端的維持管理技術による管理用施設マネジメントに関する研究

担当チーム：技術推進本部（先端技術チーム）  
 寒地技術推進室（寒地機械技術チーム）  
 研究担当者：新田恭士、吉田潔、上野仁士  
 片野浩司、牧野正敏、中島淳一、  
 平地一典

#### 【要旨】

土木施設に導入されている各種の土木機械設備は、河川・道路において非常に重要な役割を果たしているが、施設数の増大、老朽化の進行、限られた維持管理予算の相反する条件下で、より適切なライフサイクルマネジメントの導入が進められている。しかしながら近年、想定を超える天災による被災や、これまで重要とされていたなかった部品の故障により土木機械設備の機能喪失が見られることから、施設の健全性評価や早期機能回復のために点検診断・維持管理の容易な設備構造も検討する必要がある。本研究では、国民の生命、財産を守る上で不可欠な土木機械設備の確実な機能発揮を目指し、土木機械設備の効率的・効果的な設計に関する手法について提案するものである。令和元年度は、当チームがこれまで実施してきた河川ポンプ設備を中心とした土木機械設備のストックマネジメントに関する研究結果を基に、点検診断が容易な設備構造を検討するため設備構造及び点検技術の実態調査と、既往研究等により設備診断に有効と考えられる点検診断手法が現在の設備構造で適用可能か等の実証試験を、前年度に引き続き実施した。

キーワード：土木機械設備、維持管理、ストックマネジメント

#### 1. はじめに

土木研究所においては、これまで土木機械設備の効率的・効果的な維持管理の実現を目的として、信頼性評価手法及び関連する複数の施設における社会的な影響度と設備の健全度の総合評価手法、また「非」常用設備への状態監視技術に係る研究を実施し、効果的な更新や整備の計画立案に寄与してきたところである。

土木機械設備の状態監視技術に関する研究成果は国土交通省の「河川用ポンプ設備状態監視ガイドライン（案）」にその知見が反映されているが、設備構造が障害となり十分に適用できない事例がある。このため設備構造と状態監視技術を含めた点検手法、整備方法との融和を図る必要がある。

今年度は、点検診断が容易な設備構造を検討するため設備構造及び点検技術の実態調査を実施した。

#### 2. 研究実施内容

本研究では、土木機械設備についてより効果的・効率的な土木機械設備の設計及び維持管理に関する手法の提案に資する、以下の研究に取り組んでいる。

- ・点検診断の容易な設備構造の設計・改良手法の構築

#### 3. 研究の基本方針

土木機械設備の状態監視技術については、これまで研究を進めており、国土交通省のガイドラインに知見が反映されるなど一定の成果を上げている。しかしながら、既存設備においては、設備構造が障害となり点検診断技術が十分に適用できない事例がある。

このため、設備構造と状態監視技術を含めた点検手法、整備方法との融和を図り、点検診断、維持管理の容易な設備構造を検討し、設計の考え方や既存設備の改良を盛り込んだ基準化へ向けての技術資料を策定し提案する必要がある。

これらを実現するにあたって、以下の項目に着目し研究を進める。

- (1) 設備構造等実態及び活用すべき点検技術の調査
  - ・設備構造及び点検技術の実態調査
  - ・点検診断技術と設備構造の適合性検討、評価
- (2) 点検・診断しやすい設備構造の検討
  - ・河川ポンプ設備における設備構造の具体化検討
  - ・既設ポンプ設備による検証
  - ・点検診断しやすい設備構造の評価・整理
- (3) 既存設備の改良手法に関する検討
  - ・既存設備への改良手法検討
- (4) 点検診断の容易な設備構造の設計・改良手法の構築

・手法としてとりまとめ

#### 4. 研究内容

##### 4.1 点検しやすい構造の実証実験（ディーゼル原動機）

排水機場ポンプ設備の構成機器で、故障頻度が高いものに原動機があげられる。そのため、故障予兆の発見にはより精度の高い点検診断技術と、点検診断しやすい設備構造の検討が求められている。

ディーゼル原動機の故障事例を構成機器別に見ると、過給器の故障が多い。また、過給器以外では、エンジン内部の腐食や摩耗に起因する故障も見られる。

これらは修理に費用、時間がかかることから、点検診断技術に関する現場ニーズは高いといえる。

船用機関の過給器では、エンジン内部で発生する油堆積物の掃気室への影響やタービン翼等への不完全燃焼発生物の付着が故障原因としてあげられており、これら付着物の発生状況や目視確認ができれば故障を未然に防止できるものとする。

一般の工場プラントその他の機械設備では、工業内視鏡を用いた点検診断が行われている例がある。土木機械設備においても、排水機場ポンプ設備の主ポンプ内部の摩耗状況の確認やガスタービンエンジンの内部状況の調査に用いられている。ディーゼル機関にもこれを適用できれば、より高度な点検診断が可能になると思われるが、民間での船用機関等では実績があるが排水機場ポンプ設備では事例がない。そこで、既存の設備が内視鏡を投入可能で診断に活用できる画像が取得可能な構造であるかの実証試験を、過給器については昨年度に引き続き、シリンダ内（エンジン内部）については今年度着手し行うこととした。

これらは実際の排水機場のディーゼル機関を用いて実施した。対象機器の諸元と試験対象部位を表-1 に示す。

また、過給器の構造概要を図-1 に示す。

表-1 試験対象機関諸元

		B排水機場		S排水機場	
		1号原動機	2号原動機	1号原動機	2号原動機
諸元	型式	直列6気筒	直列6気筒	直列6気筒	直列6気筒
	出力	272kW	268kW	73kW	73kW
	定格回転数	1000rpm	1800rpm	900rpm	900rpm
内視鏡投入試験対象部位	過給器	○	○	-	-
	シリンダ内	○	-	○	○
試験時の機関の状態		更新のため撤去中	供用中	整備中	整備中

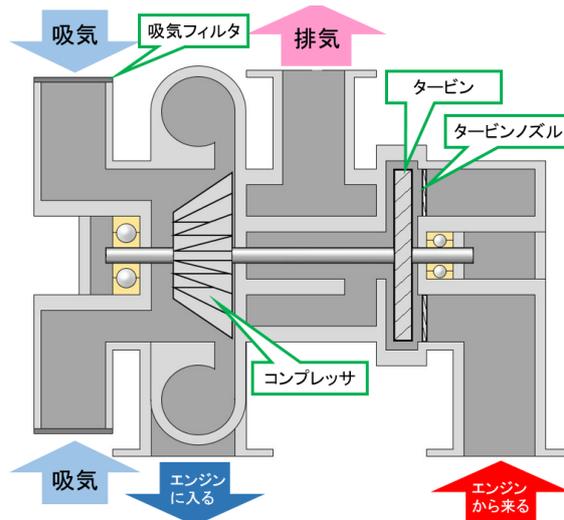


図-1 過給器構造概要

##### 4.1.1 内視鏡投入試験（過給器）

###### 1) 方法

過給器内部への内視鏡投入についてであるが、排気側（タービン側）は、昨年度得られた知見に基づき、排気管のなるべく過給器に近い側にある貫通孔（排気温度計取付用ボルト）からの投入を基本に実施した。吸気側（コンプレッサ側）はハウジングを外して投入した。

また、昨年度は土研職員が内視鏡投入を行ったが、昨年度の報告で「内視鏡による過給器診断の有効性については、現時点では判断できない。別途メーカと意見交換する等を行い、有効性について検証する」としていることから、メーカに内視鏡投入を依頼し、その後結果に関してヒアリングを行うこととした。内視鏡投入状況を写真-1、2に示す。



写真-1 内視鏡投入状況（1号原動機）



写真-2 内視鏡投入状況 (2号原動機)

2) 結果

過給器への内視鏡投入状況と診断結果を表-2 に示す。また、撮影画像を写真-3、4 に示す。

表-2 内視鏡投入試験結果

		1号原動機	2号原動機
診断箇所	吸気側	問題なく投入できた	問題なく投入できた
	タービン車室 (センターケース)	排気入口側から投入。問題なく投入できた	空冷式のため、内視鏡投入ができない構造となっている
	排気側	排気入口側から投入。機軸に曲がる形状のため、タービノズルの観察はできなかった	排気出口側から投入。見える範囲が限られており、観察できなかった箇所がある
診断結果 (メーカーの見解)	吸気側	コンプレッサは汚れが少なくきれい。翼に異物吸い込みによると思われる打痕があったが問題となる状態ではなく健全。	コンプレッサは汚れが少なくきれい。損傷等は無い。
	タービン車室 (センターケース)	室内、タービンともに湿りカーボンが付着し汚れが多い。過電等は無い。	(投入できなかったため無し)
	排気側	タービノズルについては上述の通り観察不可。ケース内は湿りカーボンが少量に付着	タービン翼に損傷等は無い。カーボンも乾燥しており良好な燃焼状態と推定。



写真-3 過給器内撮影写真 (1号原動機 排気側タービン)



写真-4 過給器内撮影写真 (2号原動機 排気側タービン)

また、本試験に前後して、内視鏡投入を行ったメーカーにヒアリングを行った。その結果を以下に示す。

メリット

- ・ 分解点検に比べ、点検日数、コスト的に有利 (分解点検は機場の停止が伴う)。

デメリット

- ・ 奥や背面など死角が生じるので、確実な状態把握に関しては分解点検に劣る。また見え方も目視に劣る。

その他意見

- ・ 内視鏡診断は過給器診断のための一要素であり、必ずしもそれだけで診断できるものではない。運転状況や出入り口の排気温度、機関停止から過給器停止までの時間などから総合的に診断すべきである。過給器停止までの時間については、過給器の機種によっては、写真-5 に示す軸端部のプラグを開放することで回転しているか否かを目視確認できる。

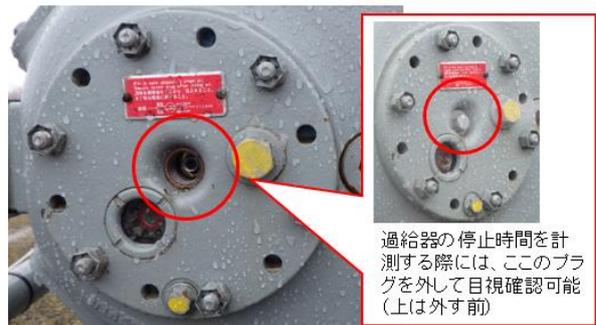


写真-5 過給器軸端部プラグ

3) 考察

内視鏡診断については、試験結果から、有効性は高いと判断できる。

内視鏡投入口について、過給器本体に加工をすることで死角箇所等の解消は可能と思われるが、過給器のトラブルを誘発しかねないこと、上記「その他意見」にもあるように、内視鏡は過給器診断の一要素であることの2点から、得策ではないと考える。

しかし、可能な範囲で死角解消ならびに投入のしやすさを目的に、排気管の過給器に近い位置に投入口を設けることは有効である。これについては昨年度の報告でも言及した点であるが、過給器はメーカーや形式により構造が異なるので、それに適した箇所を検討する必要がある。

また、先述の「その他意見」で挙げられたもののうち、

過給器停止までの時間計測は、昨年度計測は試みたものの、有意な手法は見いだせなかったが、今回のヒアリングで有益な情報を得ることができた。

4) まとめ

過給器の内視鏡による点検診断に関するまとめとして、昨年度得られた知見と合わせて以下に記す。

過給器の内視鏡診断を導入する場合、排気管のなるべく過給器に近い側に、投入口（貫通ボルト等）をもうけることを検討する。その際は、下記の点に留意する。

- ・ 貫通ボルトが脱着しやすいこと
- ・ 内視鏡の取り回しがしやすい位置であること

また、内視鏡診断は過給器診断の一要素であることを鑑み、今後は、他の点検手法を含めた過給器の体系的な点検診断手法の検討も必要と考える。

4.1.2 内視鏡投入試験（シリンダ内）

1) 方法

シリンダ内部への内視鏡投入についてであるが、本来内視鏡を投入できる構造とはなっていない。S 排水機場では、整備中ということもあり、あらかじめ整備業者に、各気筒のシリンダヘッド上に取り付けられている始動弁（エンジン始動のため、ピストンを動かすための圧縮空気をシリンダ内に送り込む部品）を外してもらい、そこから投入することとした。

B 排水機場では、始動弁の脱着の難易度の調査を兼ねて、土研職員が始動弁の脱着を行った。

なお、内視鏡投入は、S 排水機場、B 排水機場ともに土研職員が行った。

また、本来の点検診断目的であれば、全シリンダに内視鏡を投入することとなるが、今回は投入のしやすさと診断の可否の検証が目的のため、対象シリンダを絞り込んで実施した。以上をまとめたものを表-3 に、各対象のディーゼル機関を写真-6、7に示す。

また、それぞれの内視鏡投入箇所を写真-7 に、B 排水機場で脱着した始動弁を写真-8 に示す。

なお、S 排水機場 1 号原動機は、この試験の直後に分解整備することになっており、内視鏡診断と実際の設備内部とを比較することで、内視鏡診断の有効性を確認することとしている。

表-3 内視鏡投入箇所と撮影対象シリンダ

対象機関	B排水機場	S排水機場	
	1号原動機	1号原動機	2号原動機
投入箇所	始動弁を外して投入 (土研職員が実施)	始動弁を外して投入 (整備業者が実施)	始動弁を外して投入 (整備業者が実施)
撮影対象	6番シリンダ	1番、3番、6番シリンダ	1番、3番、6番シリンダ



写真-6 B排水機場 1号原動機



写真-7 S排水機場 1号原動機(2号機も同型)



写真-8 内視鏡投入箇所 (左: B排水機場 右: S排水機場)



写真-9 始動弁 (左は外す前のシリンダヘッド)

2) 結果

内視鏡によるシリンダ内の画像ならびに診断結果を、表-4~6 に示す。

表-4 S 排水機場 1号原動機 診断結果

撮影部位	内視鏡撮影画像	所見
1番シリンダ		<ul style="list-style-type: none"> <li>●ピストン上面にカーボンが付着(左写真。こすれた痕があるがこれは内視鏡ファイバの接触によるもの)。</li> <li>●シリンダブロックとライナの境目に摩耗痕と思われる形跡あり(右写真赤丸)。</li> <li>●ピストンが上死点近くのため、ブロックとライナの境目が隠れるなど、シリンダライナの観察が困難であった。</li> </ul>
3番シリンダ		<ul style="list-style-type: none"> <li>●ピストン全景を確認することができた(左写真)。これはピストンが下死点近くに位置しているためである。</li> <li>●ピストン近くに寄ることで、カーボンの堆積が確認できた(右写真)</li> </ul>
		<ul style="list-style-type: none"> <li>●シリンダライナに摩耗傷を確認できた(左写真)。</li> <li>●周方向に段差が発生している(右写真)。</li> </ul>
6番シリンダ		<ul style="list-style-type: none"> <li>●ピストン上面にカーボンが付着(写真)。</li> <li>●その他の異常は認められない。</li> <li>●1番シリンダと同様、ピストンが上死点近くのため、シリンダライナの観察が困難であった。</li> </ul>
その他		<ul style="list-style-type: none"> <li>●空気管(エンジン始動時にピストンを動かす空気をエンジン内に送り込むためのもの)内も観察可能であった。</li> <li>●特に異常は認められない。</li> </ul>

表-5 S 排水機場 2号原動機 診断結果

撮影部位	内視鏡撮影画像	所見
1番シリンダ		<ul style="list-style-type: none"> <li>●ピストン上面にカーボンが付着。</li> <li>●シリンダブロックとライナの境目に摩耗痕と思われる形跡あり(右写真赤丸)。</li> <li>●ピストンが上死点よりは下がってはいるが高い位置のため、シリンダライナの観察が困難シリンダライナの観察が困難であった。</li> </ul>
3番シリンダ		<ul style="list-style-type: none"> <li>●ピストン上面にカーボンが付着(右写真)。</li> <li>●シリンダブロックとライナの境目に腐食と思われる痕跡あり(左写真赤丸)</li> <li>●1号機と比べると、ピストン→シリンダ間のクリアランスが大きいように見える。</li> <li>●ピストンが上死点よりは下がってはいるが高い位置のため、シリンダライナの観察が困難シリンダライナの観察が困難であった。</li> </ul>
6番シリンダ		<ul style="list-style-type: none"> <li>●ピストン上面にカーボンが付着。</li> <li>●ライナに強い摺動痕が見られる。また、変色(以上左写真)や、よく見ると孔食と思われる穴(橙色枠を右に拡大)が開いている。</li> <li>●ピストンが上死点よりは下がってはいるが高い位置のため、シリンダライナの観察が困難であった。</li> </ul>
その他		<ul style="list-style-type: none"> <li>●空気管(エンジン始動時にピストンを動かす空気をエンジン内に送り込むためのもの)内も観察可能であった。</li> <li>●特に異常は認められない。</li> </ul>

表-6 B 排水機場 1号原動機 診断結果

撮影部位	内視鏡撮影画像	所見
6番シリンダ		<ul style="list-style-type: none"> <li>●ピストン上面にカーボンが付着(写真)。</li> <li>●シリンダライナは、主にホーニング痕の筋が見られるが、一部に深い傷が見られる(光の加減でそう見えるだけかもしれない)。</li> <li>●その他の異常は認められない。</li> <li>●ピストンが下死点近くのため、ピストン全景、シリンダライナの観察が容易であった。</li> </ul>

また、S 排水機場での、診断内容と、分解しての内部確認結果との比較を表-7に示す。

表-7 診断結果と実際の内部状態の比較

診断内容	正否	設備内部実態
ピストン上面にカーボンが付着・堆積	O	<p>診断結果の通り、ピストン上面にカーボンが付着・堆積していた。 (下写真左は分解直後の状態、右は清掃後(カーボン除去後)の状態)</p>
シリンダブロックとライナの境目に摩耗痕と思われる形跡あり	x	<p>カーボンの堆積を摩耗痕と誤認した。 (下写真左は内視鏡での撮影、右は分解時の直接目視時の写真)</p>
シリンダブロックとライナの境目に腐食と思われる痕跡あり	x	<p>カーボンの堆積を腐食の痕跡と誤認した。 (下写真左は内視鏡での撮影、右は分解時の直接目視時の写真)</p>
シリンダライナに摩耗傷・摺動痕・孔食を確認	x	<p>ホーニング加工の痕の一部が、光の加減で摺動痕に見えた</p>

また、B 排水機場での、始動弁の脱着時間は、10分程度であった。

3) 考察

内視鏡によるシリンダ内の観察はおおむね良好に行える。特にカーボンの付着・堆積は、エンジントラブルの原因の一つであり、これを把握できたことは内視鏡診断の有効性を示すことができたと考える。

なお、カーボンの付着は、低負荷運転が原因であることが多い。また、シリンダライナのホーニング加工痕が残っていることは運転時間が少なく摩耗が軽微であることを示しており、エンジンの状態を把握する点においても有効である。

摩耗痕、腐食痕については誤認があった。これについては、診断者はこれまでシリンダ内の診断は未経験であるので技量不足によると考える。摩耗・腐食の把握については、撮影結果を基にメーカーと意見交換等を行うことで今後確認したい。また、誤認防止のため、診断者の技量向上が必要と考える(逆に言えば、技量が未熟でもカーボン付着・堆積は把握できる、と言える)。

一部のシリンダは、ピストンが上死点に近く、ピストン全容やスリーブとシリンダブロックの境目の観察ができなかった。ピストンが上死点付近に来ている場合は、ターニングして下死点付近まで下ろすなどの操作が必要

である（6気筒エンジンの場合、クランク軸の120°毎に2気筒ずつ配置されるので、点検対象の気筒を下死点に下げたとして、残り5気筒のうち1気筒は下死点にあるが、残り4気筒は上死点近くにあるので、最低2度のターニングが必要となる）。

内視鏡投入口についてだが、エンジンの構造上、専用の投入口を設けることは難しい。始動弁などシリンダ内に通じている部品の脱着が必要になる。部品脱着の時間はそれほどかからないが、脱着する際には新品ガスケットへの交換を要すること、正常な始動系配管を脱着するのでいじり壊しによる故障を招く可能性があることなど注意が必要である。

#### 4) まとめ

内視鏡によるエンジン内の診断に関して、有効性を示すことができた。しかし、より正確な診断を行うためには、診断者の技量向上が必要である。

また、内視鏡投入の際には、投入口部の部品脱着によるいじり壊しに留意するなど注意点がいくつかある。エンジンの構造を変えることは難しいので、内視鏡診断の普及に向けては、その注意点を取りまとめ周知する必要がある。

### 4.2 積雪寒冷地における凍結対策について

過年度までに机上で検討した水抜き対策を施した3種類のバルブを製作（写真-10～12）し、簡易な配管を架設し凍結試験を実施した。

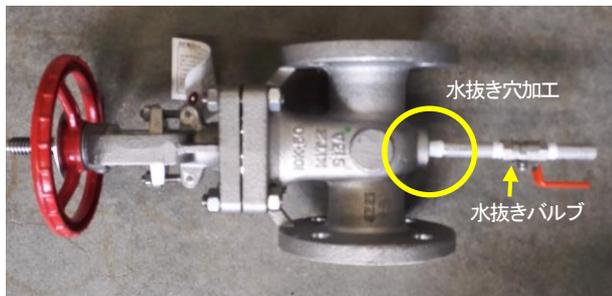


写真-10 水抜き加工済仕切り弁

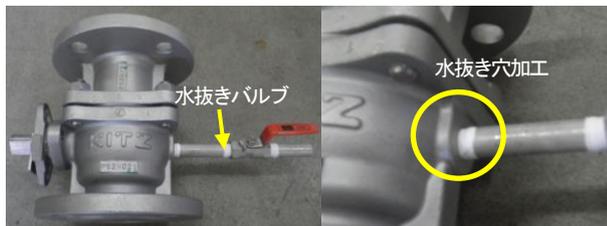


写真-11 水抜き加工済ボール弁



写真-12 水抜き加工済逆止弁

#### 1) 方法

水抜き加工を施したバルブの強度を確認するため、屋外にて凍結試験を実施した（写真-13）。



写真-13 凍結試験による凍結試験

各バルブに簡易なL字配管を架設し、バルブ内に水を充満させ、3日間程度凍結試験を実施した。最低気温は、-10°C程度であり、配管内及びバルブ内を完全に凍結させることが出来た。

#### 2) 結果

凍結試験後、内部の水を融解させ、外観を確認したところ凍結に伴う、ひびや割れなどの破損はなかった。また、バルブ内に注水したところ漏れもなく良好な状態が確認でき、水抜き穴加工に伴う、強度の低下は確認できず問題なく使用できることがわかった。

今回の試験で使用したバルブは未使用であったため、良好な結果が得られたが、今後、老朽化したバルブにおいても同様の試験を実施する予定である。

### 5. まとめ

各種機械設備の点検・診断しやすい設備構造について、故障頻度の高いディーゼル機関過給器、積雪寒冷地特有の凍結による設備故障対策については、今後も引き続き調査を行うとともに、可能なものについては模型や実機による効果検証などを行い、効果的な設計・改良手法の構築に向けた検討を進める。

## 6.4 既往事象・現場条件に対応した最適な維持修繕手法の構築、構造・材料の開発・評価

### 6.4.5 先端的維持管理技術による管理用施設（接合部）マネジメントに関する研究（1）

担当チーム：材料資源研究グループ（先端材料・高度化）

研究担当者：新田弘之、富山禎仁

#### 【要旨】

コンクリート内部におけるあと施工アンカーの長期的な挙動については、十分に解明されておらず、信頼性の高い耐久性評価手法などの知見が得られていないのが現状である。そこで本研究では、道路トンネル内の附属物の設置等に用いられるあと施工アンカーを主な対象として、各種の環境条件があと施工アンカーの耐力や破壊モードに与える影響を解明し、その評価手法を構築することを目的として検討している。令和元年度は過年度に引き続き、コンクリートのアルカリ成分によるアンカー接着剤への影響を把握するため、水酸化カリウム水溶液への浸せきによるアンカー接着剤の経時変化を評価した。また、湿潤なコンクリート内部でアンカーに持続荷重が作用する場合の挙動や、アンカー接着剤の高温時の挙動について検討した。

キーワード：接着系あと施工アンカー、アルカリ、持続荷重、接着強さ、押抜試験、引抜試験、クリープ試験

#### 1. はじめに

あと施工アンカーは比較的容易に定着が可能なおとから、土木構造物においても、橋梁の耐震補強や河川構造物等の既設構造物の補強、附属物の取り付けなどの用途で、既に数多く使われていると共に、今後も需要が見込まれる。しかし、コンクリート内部におけるこれらの長期的な挙動については、十分に解明されておらず、信頼性の高い耐久性評価手法などの知見が得られていないのが現状である。このため、土木用途におけるあと施工アンカーの適切な設計・施工・維持管理は確立しておらず、基準類も存在していない状況にある。

そこで本研究では、道路トンネル内の附属物の設置等に用いられるあと施工アンカーを主な対象として、各種の環境条件が耐力や破壊モードに与える影響を解明し、その評価手法を構築することを目的としている。

平成28年度から平成30年度までは、接着系アンカーの品質規格の一つである ACI355.4-11 を参考に、アンカーを施工したコンクリート円柱をスライスして作製した供試体を用い、コンクリートのアルカリ成分による接着剤樹脂の劣化挙動について検討した。湿潤環境において持続荷重を受ける際の接着系アンカーの長期挙動を把握するため、水中でのクリープ試験を行った。

令和元年度は過年度に引き続き、接着系アンカーの耐アルカリ性を評価するために、アンカー全長を用いた試験評価方法を考案し、その特性について検討した。また、湿潤環境下での接着系アンカーのクリープ挙動について

データを充実させるとともに、アンカー接着剤の高温時の挙動について検討した。

接着系アンカーは現在ジェットファン固定には使用されていないが、構造用として多用される分野もあり、あと施工アンカー全体の信頼性向上のためには、その長期挙動の把握は重要である。

#### 2. アルカリの影響に関する実験

##### 2.1 概要

コンクリート内部の高アルカリ環境下における接着系あと施工アンカーの長期的な挙動については十分に解明されておらず、さらなるデータの充実が必要である。このため、接着系アンカーの試験方法の一つである ACI 355.4-11<sup>1)</sup>を参考に、アンカー接着剤のアルカリによる劣化機構や劣化の評価方法について検討している<sup>2)、3)</sup>。当該規格で規定されている接着系アンカーの耐アルカリ性評価方法では、アンカーを打設したコンクリート円柱を所定の厚さにスライスした試験片を用いる。水酸化カリウム (KOH) 水溶液浸せき前後の試験片の押抜試験を実施し、得られたアンカー接着剤とコンクリートとの接着強さを劣化の指標とするものである。

一方で、スライス試験片を用いる試験方法では、接着剤の充填不良によるものと思われるデータのばらつきが大きいことが課題となっている。そこで、よりばらつきが少なく、実際の使用条件に近い試験方法として、アンカー全長を用いた引抜試験の適用性について検証した。

## 2.2 実験方法

### 2.2.1 実験材料

接着系アンカーは、製品の形態や施工方法、接着剤樹脂の種類等が異なるさまざまな製品が市販されている<sup>4)</sup>。これらの中から、ガラス製カプセルに接着剤（主剤、硬化剤）と骨材とが封入された「カプセル方式」の製品を4種類、「注入方式（カートリッジ型）」の製品1種類を用いた。カプセル方式の製品は、カプセルをドリルで削孔した孔に挿入した後、回転・打撃を与えて施工する「回転・打撃型」3種類（不飽和ポリエステル樹脂、ビニルエステル樹脂、ビニルウレタン樹脂）と、ハンマー等でボルトを打込むことでガラスカプセルを破碎し施工する「打込み型」1種類（不飽和ポリエステル樹脂）である。実験に用いた接着系アンカーの製品規格を表2-1に示す。試験片の母材となるコンクリート（φ154 ×150 mm）は、硬質塩化ビニル管を型枠にして打設した。水セメント比は70%、材齢28日目の圧縮強度は約23 MPaである（表2-2）。母材コンクリートへのアルカリ添加による劣化促進効果について検証するため、一部の実験ケースでは、pH 13.2～13.5程度に調製したKOH水溶液を練混ぜ水として用い母材コンクリートを作製した。

材齢約15週の母材コンクリート上面中央に、製造メーカーが指定する径、長さの孔をハンマードリルで設けてアンカーのカプセルを挿入し、製品A、B、Cについては先端を斜め45°にカットした全ねじボルト（M12）を挿入しながらカプセルに回転・打撃を与え、製品D、Eにつ

いては先端が平らな全ねじボルト（M12）にハンマーで打撃を与えながら挿入し、施工した。

### 2.2.2 実験方法

#### （1）ACI 355.4-11によるアルカリ浸せき試験

アンカーの接着剤が完全に硬化した後、コンクリート円柱を水平方向に型枠ごとスライスし、製品A～Dについてはこれを試験片とした浸せき試験を行った。試験片はコンクリート円柱の上面近傍を避け、1体につき3枚ずつ採取した。試験片の厚さについてACI 355.4-11では13/16±1/8インチ（27～33.3 mm）と規定しているが、本研究ではやや薄い25 mmで試験した。アンカー打設後のコンクリート断面と、試験片採取方法の概略を図2-1に示す。

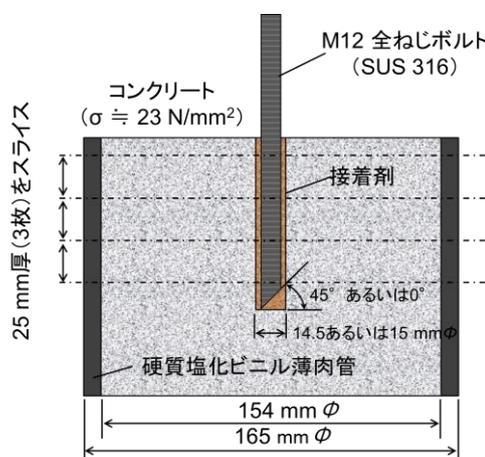


図2-1 接着系アンカー打設後のコンクリート断面と試験片採取方法の概略

表2-1 アルカリ浸せき試験に用いた接着系あと施工アンカーの寸法と強度（製造メーカーの技術資料より）

製品種別	アンカーのタイプ	接着剤樹脂 <sup>※1</sup>	外径 (mm)	長さ (mm)	アンカー筋	ドリル径 (mm)	削孔長 (mm)	最大引張荷重 (kN)	付着強さ <sup>※2</sup> (MPa)
A	カプセル方式 回転・打撃型	UP	13	100	M12 <sup>※3</sup>	14.5	100	57.4	17.3
B	カプセル方式 回転・打撃型	VE	12.7	100	M12 <sup>※3</sup>	14.5	100	73.1	22.0
C	カプセル方式 回転・打撃型	VU	13.1	127	M12 <sup>※3</sup>	14	110	54.2	14.7
D	カプセル方式 打込み型	UP	13	102	M12 <sup>※4</sup>	15	110	52.7	12.7
E	注入方式 カートリッジ型	EP	—	—	M12 <sup>※4</sup>	14.5	100	—	—

※1: UP/不飽和ポリエステル樹脂、VE/ビニルエステル樹脂、VU/ビニルウレタン樹脂 ※2: 有効付着長（削孔長-カット部長）により算出

※3: SUS304 全ねじボルト 先端斜め45°カット ※4: SUS304 全ねじボルト 先端斜めカットなし

表2-2 母材コンクリートの配合

水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単用量 (kg/m <sup>3</sup> )				混和剤A	混和剤B
		水	セメント	細骨材	粗骨材		
70	47	163	23.3	87.4	1001	セメント×0.25%	セメント×0.003%

作製した試験片は、プラスチック製水槽に満たした KOH 水溶液中に浸せきした。浸せき開始時の母材コンクリートの材齢はおよそ 20 週である。KOH 水溶液の濃度は約 1 mol/L で pH 13.2~13.5 程度となるように調製し、液温は恒温恒湿室内で 20°C あるいは 40°C 一定で保持した。試験片は、互いに 30 mm 程度の間隔を保つよう、水槽中に立てて静置した。浸せき試験時の試験片設置状況を図 2-2 に示す。



図 2-2 浸せき試験時の試験片設置状況

所定の時間が経過した時点で試験片を取り出し、軽く水洗した後、押抜試験を実施した。押抜試験は、試験片取り出し後から 1 時間以内実施した。ACI 355.4-11 の規定に準拠し、20°C、湿度 60%RH の空气中に暴露した試験片についても同様に評価した。スライス試験片の数量は、一水準あたり 10 枚とした。浸せき試験を行ったケースを表 2-3 に示す。

表 2-3 浸せき試験を行ったケース

製品種別	KOH 水溶液 (pH 13.2~13.5) 浸せき		20°C、60%RH
	40°C	20°C	大気中
A	○/◎	○	○
B	○	—	—
C	○	—	—
D	○	—	—

○：母材コンクリートへのアルカリ添加なし／◎：母材コンクリートへのアルカリ添加あり

押抜試験の概略図を図 2-3 に示す。押抜試験は、厚さ 25 mm の鋼製反力板で試験片の底面全面を支持し、直径 8 mm の治具により、試験片上面よりボルト中心に荷重を加えることにより行った。反力板の開孔部の直径は 16 mm とした。押抜試験には万能試験機を用い、試験速度は 1 mm/min. で行った。破壊に至るまでの最大荷重から、式 (1) により接着強さを求めた。

$$\tau_{dur,i} = \frac{N_{u,i}}{\pi d_a h_{sl}} \quad (1)$$

ここに  $\tau_{dur,i}$ ：接着強さ (MPa)、 $N_{u,i}$ ：最大荷重 (N)、 $d_a$ ：アンカー径 (mm)、 $h_{sl}$ ：試験片厚さ (mm)

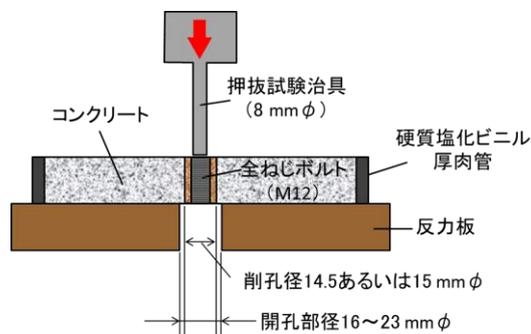


図 2-3 スライス試験片による押抜試験の概略図

## (2) 円柱供試体を用いたアルカリ浸せき試験

これまでの検討において、スライス試験片を用いる試験方法では、接着剤の充填不良によるものと思われるデータのばらつきが大きいことが課題となっている。接着剤の充填不良がばらつきの一因であるならば、アンカーと母材コンクリートとの接着面積を十分大きくすることにより、その影響を低減できるものと考えられる。そこで、製品 A、B、C および E を打設した円柱供試体をスライスせずに試験に供することとし、引抜試験による接着系アンカーの挙動を調べた。引抜試験は図 2-4 に示す通り、万能試験機の治具に供試体を反力板を介してボルト・ナットで固定して行った。試験速度は押抜試験と同様、1 mm/min. とした。

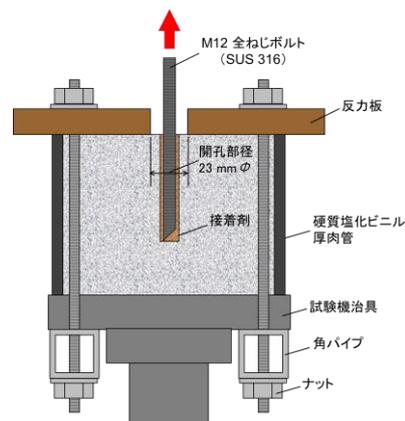


図 2-4 円柱供試体を用いた引抜試験の概略図

### 2.2.3 赤外線分光分析

赤外線分光分析は、有機化合物の中の炭素同士や、炭素-酸素、炭素-水素などの化学結合の様々な振動による光の吸収が、赤外線域に現れることを利用した化学分析手法である。試料の赤外線（波長 800~4000  $\text{cm}^{-1}$  程度）吸収スペクトルから、樹脂の種類や劣化の有無に関する情報が得られる<sup>5)</sup>。そこで、押抜試験後の接着剤の表面近傍（接着剤表面から深さ数 10  $\mu\text{m}$  程度までの範囲）から採取した少量の微粉状のサンプルについて赤外線分光分析を行い、薬液浸せき前後における接着剤の化学構造の変化について調べた。

接着剤から得られる微粉状のサンプルには樹脂分と骨材分とが混合しているため、光学顕微鏡で観察しながら、樹脂分と思われる粒子のみを選別し、これをコンプレッションセルで加圧圧縮することで赤外顕微鏡を用いた透過スペクトルの測定を行った。

## 2.3 実験結果と考察

### 2.3.1 アルカリによるアンカー接着剤の劣化挙動

接着剤（樹脂）の種類や施工方法の異なる 4 種の接着系あと施工アンカーについて、40°C の KOH 水溶液に浸せきした時の、接着強さの経時変化を図 2-5 に示す。これらの結果は、押抜試験によって得られたものである。

いずれの実験ケースにおいても、母材コンクリートには肉眼で確認できるひび割れは生じなかった。浸せきの

有無にかかわらずデータのばらつきは大きく、変動係数は製品 A、B、C、D の順にそれぞれ 23%、18%、37%、13% となった。いずれの製品においても、浸せきによる破壊モードの変化に明確な傾向は認められなかった。接着強さの平均値に着目すると、4000 時間浸せき後には、製品 B を除きいずれもわずかながら低下が見られた。また、母材コンクリートにあらかじめアルカリを添加したケースでは、浸せきにより接着強さがわずかに増加した。

そこで、浸せき前と 4000 時間浸せき後の平均値について、有意水準 5% で F 検定および t 検定を行ったところ、製品 A（アルカリ添加なし）は有意差あり、製品 B、C、D および製品 A（アルカリ添加あり）については有意差は無いとの結果が得られた。

KOH 水溶液浸せきによるアンカー接着剤の劣化の有無を調べるため、押抜試験後の接着剤破断面表面近傍の樹脂について、赤外顕微鏡による化学構造分析を行った。その結果、製品 A（アルカリ添加なし）を除くいずれも、アルカリ浸せきの前後で明確な赤外吸収スペクトルの変化は認められなかった（図 2-6）。以上の結果を踏まえると、製品 B、C、D については、実験を行った範囲内ではアルカリによる劣化は生じていないものと推察される。

一方、製品 A（アルカリ添加なし）については KOH 水溶液浸せき前後において、化学構造の変化を示す赤外吸収スペクトルの変化が認められた。

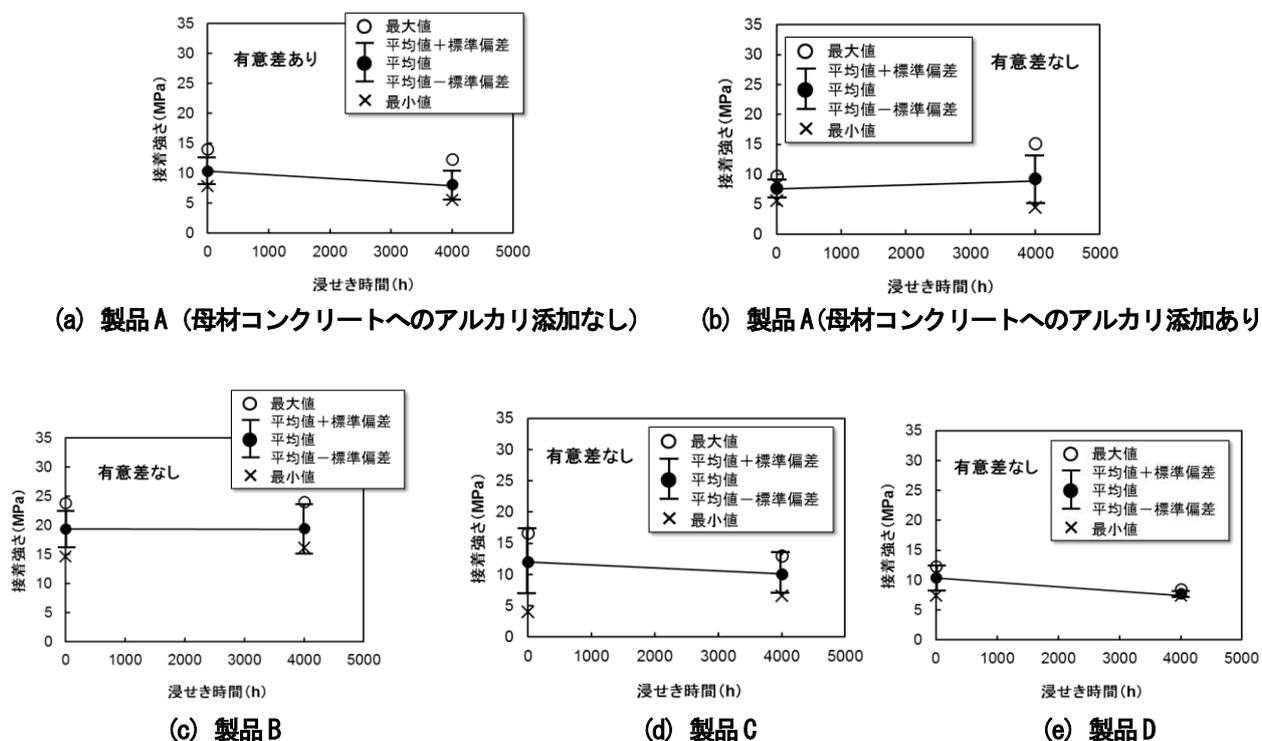


図 2-5 接着系あと施工アンカーの接着強さの経時変化（40°C、pH13.2 水酸化カリウム水溶液浸せき）

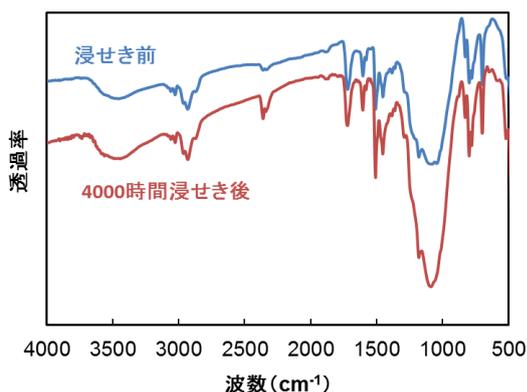


図 2-6 アルカリ浸せき前後におけるアンカー接着剤の赤外吸収スペクトルの一例 (製品 B)

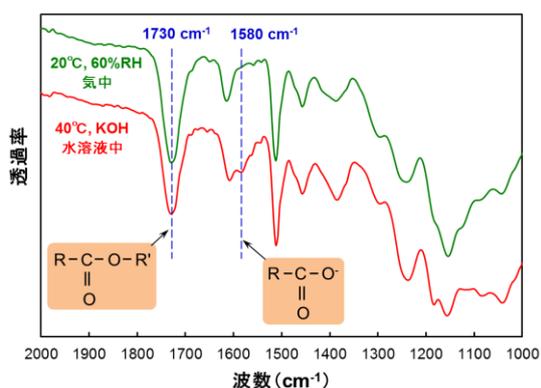


図 2-7 接着剤表面の典型的な赤外吸収スペクトル (2000 時間経過後)

図 2-7 は 20°C、60%RH の気中または 40°C の KOH 水溶液中で 2000 時間経過後の、接着剤表面の赤外吸収スペクトルを示している。いずれのスペクトルにおいても 1730  $\text{cm}^{-1}$  付近に、エステル結合の強い吸収ピークが認められる。これは、不飽和ポリエステル樹脂のスペクトルの特徴の一つである。40°C に浸せきした接着剤のスペクトルでは、1730  $\text{cm}^{-1}$  付近の吸収がやや弱まり、1580  $\text{cm}^{-1}$  付近に新たな吸収ピークの出現の兆候が認められた。既往の研究などから、不飽和ポリエステル樹脂に含まれるエステル結合がアルカリ存在下で加水分解しカルボン酸塩を生じた場合に、同様の赤外吸収スペクトルの変化を示すことが明らかとなっている<sup>6), 7)</sup>。すなわち、図 2-7 で示したスペクトルの変化から、40°C の KOH 水溶液に浸せきしたことにより、接着剤表面近傍の樹脂が加水分解を生じていることが示唆された。

そこで、さらに長時間浸せきした場合の挙動を把握するために、製品 A について浸せきを継続することとした。図 2-8 はアルカリ浸せきを 8000 時間まで継続したときの、製品 A の接着強さの経時変化を示している。浸せき 8000

時間後においても、接着強さの低下は認められなかった。

既往の知見<sup>6), 7)</sup>などから、加水分解が進行するほど 1580  $\text{cm}^{-1}$  付近のピークは強くなり、逆に 1730  $\text{cm}^{-1}$  付近の吸収は弱まるものと考えられるため、これらの 2 つの吸収ピークの比を指標として利用し、製品 A について浸せきによる加水分解の程度を評価することにした。方法は以下のとおりである<sup>8)</sup>。

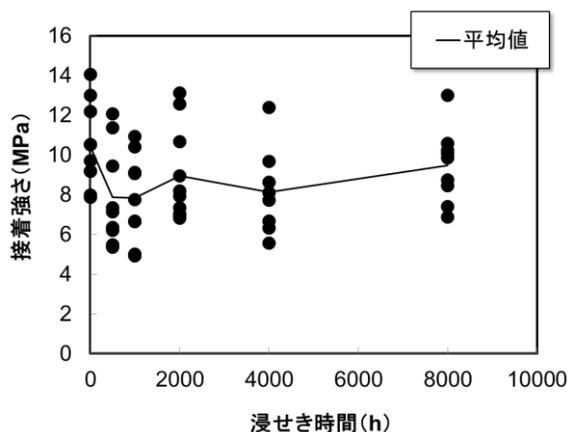


図 2-8 製品 A における接着強さの経時変化 (40°C、pH13.2 水酸化カリウム水溶液浸せき)

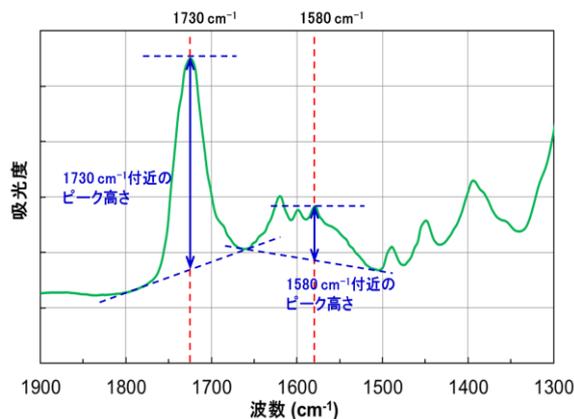
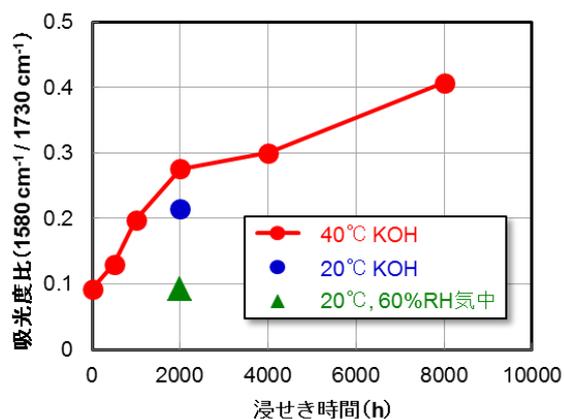


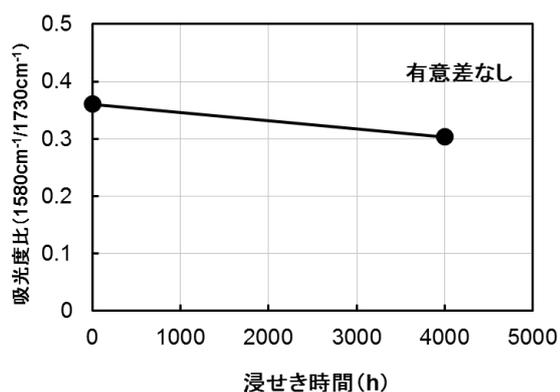
図 2-9 赤外吸収スペクトルにおけるピーク高さの求め方

- スペクトルを吸光度に換算して解析する。
- 1580  $\text{cm}^{-1}$  付近および 1730  $\text{cm}^{-1}$  付近の吸収ピークそれぞれについて、ベースラインからピークトップまでの高さを求める。ベースラインは各吸収ピークの高波数側/低波数側の 2 点のピーク立ち上がり部を結ぶ直線とする (図 2-9)。なお、1580  $\text{cm}^{-1}$  付近に明確な吸収ピークを持たない試料については、1580  $\text{cm}^{-1}$  における吸光度とベースラインとの差をピーク高さとする。

c) 上記で求められる  $1580\text{ cm}^{-1}$  付近/ $1730\text{ cm}^{-1}$  付近の吸収ピーク高さの比が当該スペクトルの加水分解度合いの指標となる。(  $1580\text{ cm}^{-1}/1730\text{ cm}^{-1}$  比が大きいほど加水分解が進んでいることとなる。)



(a) 母材コンクリートへのアルカリ添加なし



(b) 母材コンクリートへのアルカリ添加あり

図 2-10 赤外吸収スペクトルにおける吸光度比の経時変化 ( $1580\text{ cm}^{-1}$  付近 /  $1730\text{ cm}^{-1}$  付近)

赤外吸収スペクトルの解析結果を図 2-10 に示す。それぞれのデータは、押抜試験後における接着剤表面の任意の 3 か所から試料を採取してスペクトル測定を行い、解析して得られた結果の平均値を示している。母材コンクリートへのアルカリ添加が無いケースにおいて、 $40^{\circ}\text{C}$  の KOH 水溶液に浸せきした場合の吸光度比 ( $1580\text{ cm}^{-1}$  付近 /  $1730\text{ cm}^{-1}$ ) の経時変化に着目すると、浸せき時間の増加に伴い、吸光度比も増加していることがわかる (図 2-10 (a))。すなわち、浸せき時間の増加に伴って、樹脂の加水分解の程度が進行する傾向にあることが明らかとなった。また、2000 時間経過時点の吸光度比について比較すると、 $20^{\circ}\text{C}$  浸せきよりも  $40^{\circ}\text{C}$  浸せきの方が大きいことから、環境液の温度が高い方がより促進的に加水分解が進

行しているものと考えられる。 $20^{\circ}\text{C}$ 、 $60\%RH$  気中に暴露した試験片については、2000 時間後においても初期とほぼ同程度の吸光度であることから、加水分解は生じていないものと推察される。 $40^{\circ}\text{C}$  の KOH 水溶液では 8000 時間後においても吸光度比は上昇傾向にあると考えられる。

一方で、母材コンクリートにアルカリを添加したケースでは、浸せき前の時点で 0.35 程度の吸光度比を示した (図 2-10 (b))。これは、アルカリ添加の無いケースで、 $40^{\circ}\text{C}$  の KOH 水溶液に 4000 時間浸せきした時点の吸光度比と同程度である。しかし、浸せきにより吸光度比は増加することなく、4000 時間後においても初期とほぼ同じ値となった。4000 時間までの浸せき試験の結果から、母材コンクリートへのアルカリ添加は、浸せきによるアンカー接着剤の劣化を促進させる効果は確認できなかった。今後引き続き浸せきを継続し、さらに長期のデータを取得していきたいと考えている。

### 2.3.2 アンカー接着強さの評価方法

押抜試験によるアンカー接着強さの評価では、浸せきの有無にかかわらずデータのばらつきが大きく、変動係数は製品 A、B、C、D の順にそれぞれ 23%、18%、37%、13% となった。最大押抜荷重が低かったサンプルの多くで、接着剤の充填不良による空隙が観察された (図 2-11 (a))。このことから、施工時に接着剤の充填が不十分な箇所があると、そこを起点に局部的な破壊が生じ、これが接着強さの低下や試験結果のばらつきの要因につながるものと推察される。接着剤の充填不良がばらつきの一因であるならば、アンカーと母材コンクリートとの接着面積を十分大きくすることにより、その影響を低減できるものと考えられる。そこで、アンカーを打設した円柱供試体をスライスせずに、アンカー全長を用いた引抜試験を実施し、接着特性を評価した。

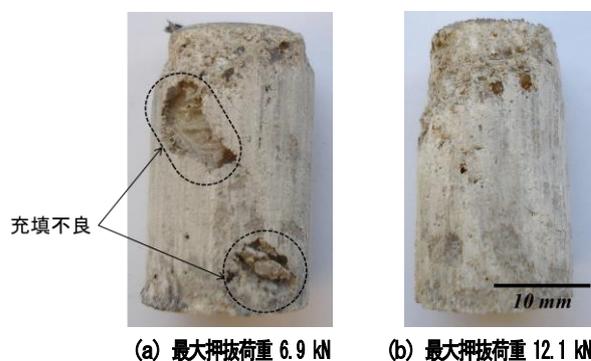
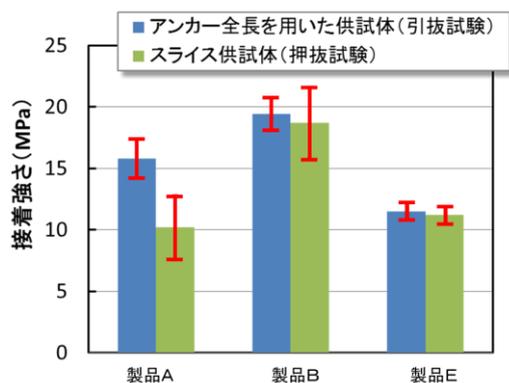


図 2-11 押抜試験後のアンカー外観の比較

引抜試験により得られた各製品の接着強さを図 2-12 に示す。この図には比較のため、既往の押抜試験による接着強さも併せて示している。引抜試験によるアンカー接着強さの平均値は、製品 A は 15.8 MPa、製品 B は 19.4 MPa、製品 C は 11.5 MPa となり、いずれも押抜試験結果より高い値を示した。特に製品 A では押抜試験による接着強さのおよそ 1.5 倍となり、カタログ値 (表 2-1) に近い値が得られた。押抜試験における変動係数は 23% (製品 A)、18% (製品 B)、6.4% (製品 E) であったのに対し、引抜試験ではそれぞれ 10%、7%、6.1% となり、特にカプセル方式の製品でばらつきが大幅に低減されることが明らかとなった。この結果から、よりばらつきの少なく、実際の使用条件に近い試験方法として、アンカー全長を用いた引抜試験を応用する手法が提案できると考えられる。



I ばらつき(標準偏差)の範囲

図 2-12 試験方法による接着強さの比較

引抜試験に用いる反力板 (図 2-4) の開孔部径を変えて引抜試験を行ったところ、開孔部径が 16、17、20 mm ではボルトの破断により、23 mm ではアンカーの付着切れにより試験が終了した。本研究で用いた M12 ボルト (SUS304) の公称引張破断荷重は約 49.7 kN であり、アンカーの最大引張荷重 52.7~73.1 kN よりも小さい。開孔部径が 20 mm 以下の場合にはアンカーに対する反力板の拘束力が大きく、アンカーが付着切れを起こすことなく、ボルトの降伏・破断に至るものと考えられる。その一方で、開孔部径を 23 mm より大きくすると、コンクリート母材のコーン状破壊が生じ、アンカーの接着強さを適正に評価することができない。そのため、本研究における反力板の開孔部径は 23 mm が妥当であると判断した。

製品 A、B、C および E を打設した円柱供試体をスライスせずに 40°C の KOH 水溶液に浸せきし、所定の時間経過

後、アンカー全長を用いた引抜試験を行い、アンカー接着強さの経時変化を求めた。KOH 水溶液は、スライス試験片の浸せき試験と同様、pH 13.2~13.5 となるように制御した。浸せき 4000 時間までの結果を図 2-13 に示す。各水準とも 3 体の試験体について試験を行い、その平均値を示した。

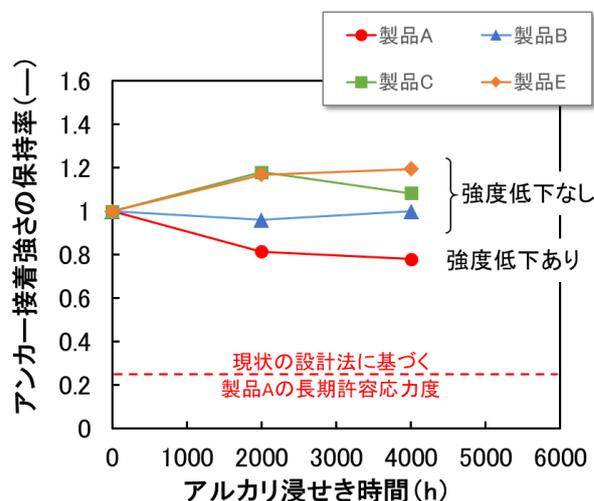


図 2-13 円柱供試体を用いたアルカリ浸せき試験におけるアンカー接着強さの経時変化

40°C の KOH 水溶液に浸せきした結果、製品 B は浸せき前と同等、製品 C、E は浸せき前よりも大きい値で推移した一方で、製品 A のみ浸せき初期より徐々に接着強さが低下した。製品 A の接着強さは 2000 時間までに浸せき前の約 80% まで低下し、その後の変化は緩やかとなった。この変化の傾向は、スライス試験片を用いた浸せき試験結果 (図 2-8) と同様である。

現在、接着系あと施工アンカーは、日本建築学会「各種合成構造設計指針・同解説<sup>9)</sup>」等で示される算定式を用いて許容応力度が算定され、これを超えない荷重条件での使用が前提となっている。この算定式によると、製品 A の長期許容応力度は、浸せき前に求めた接着強さのおよそ 25% となり、4000 時間までの KOH 浸せきで生じた強度低下に比べて大幅に低く設定されていることがわかった。

円柱供試体の浸せき試験において、アンカーの部位による劣化程度の差異を把握するため、引抜試験後のアンカー接着剤の上部、中部、下部の 3 か所の表面近傍より少量の微粉状試料を採取し (図 2-14)、赤外分光分析を行った。製品 A の採取試料より得られた赤外吸収スペクトルにおいて、図 2-9 と同様の手法で 1580 cm<sup>-1</sup>/1730 cm<sup>-1</sup> の吸光度比を求めた結果を図 2-15 に示す。



図 2-14 引抜試験後のアンカーにおける試料採取箇所

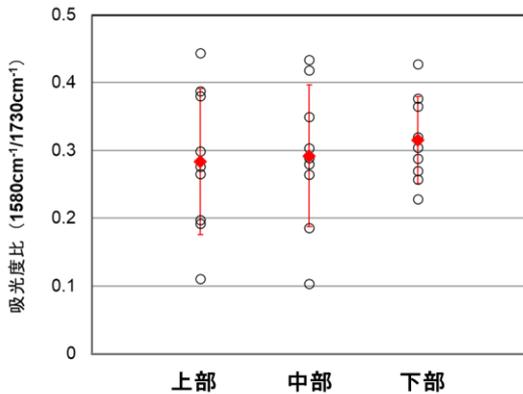


図 2-15 アンカーの部位による吸光度比の違い  
(1580 cm<sup>-1</sup>付近 / 1730 cm<sup>-1</sup>付近)

図 2-15 は、同一の試料内において分析する領域を変え、10 回ずつ分析した結果について示している。上部、中部、下部いずれにおいても吸光度比、すなわち加水分解程度に幅があることがわかった。10 回の結果を平均すると、いずれの箇所においても吸光度比は約 0.3 となり、図 2-10 で得られた 4000 時間浸せき後の吸光度比とほぼ同等となった。部位による劣化程度の差異は明確ではなかった。

今後は引き続き、円柱供試体を用いた浸せき試験における長期の挙動についてデータを充実させ、アルカリ環境下での寿命予測手法について検討するとともに、耐アルカリ性の試験評価方法、性能基準値について検討を進める予定である。

### 3. 湿潤環境下での持続荷重の影響に関する実験

#### 3.1 概要

接着系あと施工アンカーに持続的な荷重が長時間作用する場合の耐力は、最大耐力に比べて明らかに低下することが知られている<sup>10)</sup>。しかし、これらのデータは十分に蓄積されておらず、適切な設計が行えないのが現状である。特に、母材であるコンクリートに発生したひび割れなどに起因し、コンクリート/アンカーの接着面に水が滞留するような場合、持続荷重と水分との複合的な作用により接着系アンカーの耐久性が低下することが懸念されるが、その挙動については明らかにされていない。

表 3-1 クリープ試験に用いた接着系あと施工アンカーの寸法と強度（製造メーカーの技術資料より）

アンカーのタイプ	接着剤樹脂	外径 (mm)	長さ (mm)	アンカー筋	ドリル径 (mm)	削孔長 (mm)	最大引張荷重 (kN)	付着強さ* (MPa)	長期許容引張荷重 (kN)
カプセル方式 回転・打撃型	不飽和 ポリエステル	13	100	M12	14.5	100	57.4	17.3	11.7

※ 有効付着長（削孔長-カット部長）により算出

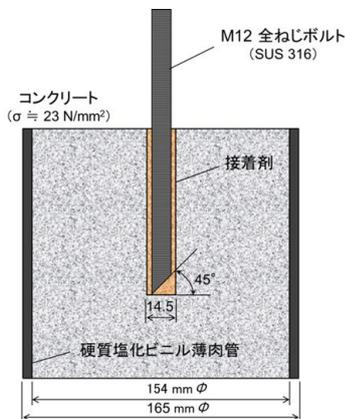


図 3-1 供試体の概略図

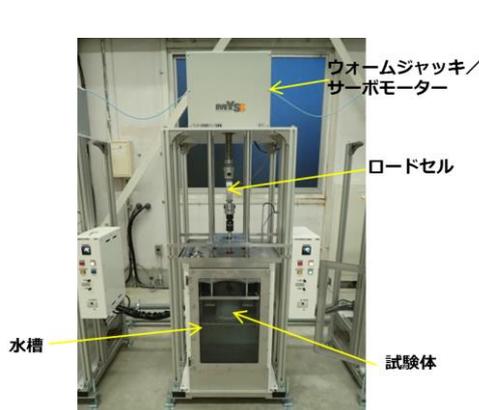


図 3-2 クリープ試験機の概観

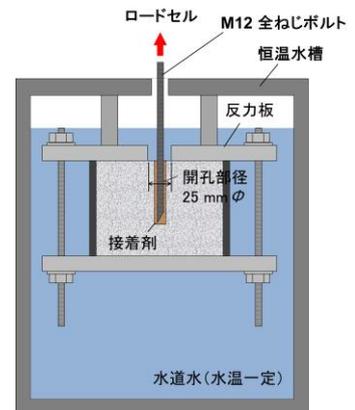


図 3-3 浸せきクリープ試験の模式図

そこで、接着系あと施工アンカーを施工したコンクリート供試体を水中に浸せきし、この状態でアンカーに持続荷重を負荷するクリープ試験を行い、湿潤環境下における接着系アンカーのクリープ挙動について検討した

### 3.2 実験方法

#### 3.2.1 実験材料

市販されている不飽和ポリエステル樹脂系のアンカー種類を選び、試験に供した(表3-1)。製品はガラス製のカプセルに接着剤(主剤、硬化剤)と骨材が封入されたタイプであり、これをドリル孔に挿入し回転・打撃を与えて施工する。試験片の母材となるコンクリートは、「2.2.1 実験材料」と同じものを用いた。このコンクリート円柱に、上記の接着系アンカーをメーカーの指定する方法(削孔径14.5mm、削孔長100mm)で打設し、これを供試体とした(図3-1)。

#### 3.2.2 実験装置

クリープ試験機は、ロードセルによる荷重検出とサーボモータ駆動による張力ロッドの制御とを組み合わせたものである(図3-2)。最大荷重は50kN、ウォームジャッキのストロークは100mmとなっている。この試験機には恒温水槽が備わっており、常温~70°Cの範囲で、供試体を一定水温の水中に浸せきしつつ、引張クリープ試験を行うことができる(図3-3)。

#### 3.2.3 実験方法

予備試験において万能試験機を用いアンカーの最大引張荷重を求めたところ、49.7kNであった。そこでクリープ試験においては、最大引張荷重の80%(39.8kN)、70%(34.8kN)、60%(29.8kN)の3水準の引張荷重を持続的にアンカーに負荷し、この時のアンカーの変位を測定した。試験機の張力ロッドの変位をアンカーの変位とみなし、これを自動記録した。試験は、供試体を無負荷で所定の水温の水中に1週間浸せきした後に開始した。クリープ試験開始時には、およそ60秒で目標の荷重に達するよう徐々に載荷し、供試体への衝撃を回避した。浸せき水は層内で十分に攪拌されており、水温は25°C~65°Cの範囲で設定した値に保たれている。比較として、供試体を室温(20~35°C程度、温度制御なし)大気中に設置した状態でのクリープ試験も行った。

### 3.3 実験結果と考察

接着系アンカーのクリープ試験の途中経過として、アンカーの変位の経時変化を図3-4に示す。負荷する荷重の増大に伴いアンカーのクリープ変形は速くなり、最大荷重の63%を負荷した試験水準では、試験開始から数分のうちに引抜破壊(付着切れ)に至り、試験が終了した。

最大荷重の63%のケースでは、供試体により破壊までの時間に若干の差異があったものの、水中と大気中とで明確な違いは認められなかった。

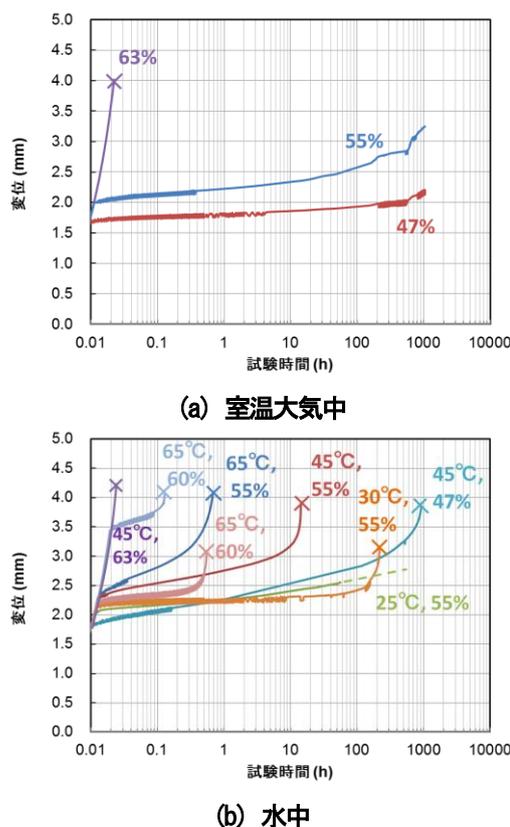


図3-4 持続荷重下でのアンカー変位の経時変化

水中に浸せきし、最大引張荷重の55%を負荷したケースを比較すると、水温の上昇に伴いクリープ変形が早くなり、65°Cでは試験開始から1時間程度、45°Cでは15時間程度、30°Cでは110時間程度で破壊に至った。一方で、25°Cのケースでは1000時間以降もクリープ変形の様子は緩やかであり、破断には至らなかった。

大気中で最大引張荷重の55%を負荷した結果と、同程度の温度(25°C)で水中で荷重を負荷した結果とを比較すると、載荷の初期に生じた変位は水中が大気中よりも大きく、また変位の経時変化は水中の方がやや早い結果となった。

AASHTO TP 84-11 (2017)では、接着系あと施工アンカーのクリープ破断寿命を予測する方法として、3段階の負荷荷重レベル(100%、80~70%、70~60%)と破断時間との関係から得られる近似直線を外挿することにより、より低い荷重を負荷したときの破断時間求める手順が示されている。この方法に基づき、これまでに得られた水中でのクリープ試験結果を整理したグラフを図3-5に示す。

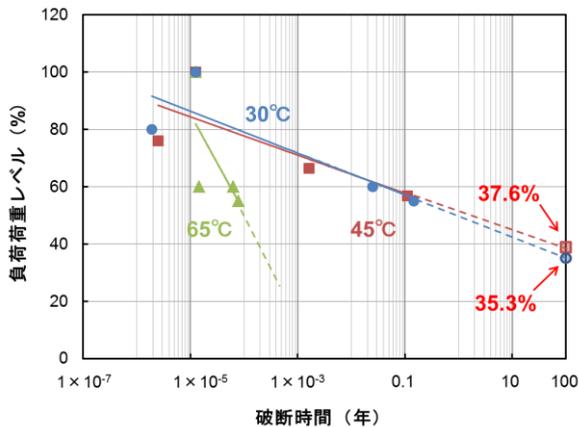


図3-5 線形外挿によるクリープ破断寿命の予測(水中)

30°Cおよび45°Cの近似直線には大きな差異は無く、破断時間100年を想定した時の許容負荷荷重レベルはそれぞれ35.3%、37.6%となった。メーカーの技術資料によると、試験に用いたアンカーの長期許容引張荷重は、接着系あと施工アンカーの算定式<sup>9,11)</sup>を用いて算定されており、最大引張荷重のおよそ20% (11.7 kN) に設定されている。すなわち、一般的な温度条件であれば湿潤環境であっても、100年間でクリープ破断は生じない荷重レベルに設定されていることがわかった。一方、水温65°Cの高温になると、低い負荷荷重でも寿命が極端に短くなることが示され、使用荷重だけでなく、使用温度の許容値についても適切に設定する必要があることを把握した。

#### 4. 熱(高温)の影響に関する実験

##### 4.1 概要

接着系あと施工アンカーの火災時および火災後の特性については、主に建築分野において、鉄筋コンクリート耐震補強や非構造部材、付属設備吊り下げ用途の定着を想定した付着性能の検証等の事例が報告されている<sup>12)</sup>。

一方で、あと施工アンカーを道路トンネルの附属物の定着へ適用する場合、想定される火災の規模や特性は一般的な建築物とは大きく異なることが予想されるが、このような火災を想定したあと施工アンカーの耐火性能に関する検討事例は少ない。そこで、これらの検討を行う際の試験条件を設定するための予備実験として、熱重量示差熱分析(TG/DTA)によりアンカー接着剤の熱的变化を把握するとともに、高温履歴を受けたアンカー接着剤の力学特性について評価した。

##### 4.2 実験

###### 4.2.1 アンカー接着剤の熱による物性変化の把握

火災によりアンカー接着剤が高温に曝された時の物性

変化に関する基礎的な情報を得るため、熱重量示差熱分析(TG/DTA)を行った。TG/DTAは熱重量分析(thermal gravimetric analysis, TG)と示差熱分析(differential thermal analysis, DTA)とを同時に行うものである。TGは、試料の温度を一定のプログラムに従って変化させながら、その試料の質量を温度の関数として測定する方法である。また、DTAは試料と基準物質の温度を一定のプログラムに従って変化させながら、その試料と基準物質との温度差を温度の関数として測定する方法である。温度変化に伴って試料が転移や反応を起こした場合、基準物質との温度差が変化するため、これを検出する。TGおよびDTAを組み合わせることで、温度変化によって生じる試料の様々な熱挙動(表4-1)を把握することができる。

表4-1 試料の熱挙動とTG/DTA曲線<sup>13)</sup>

熱挙動	TG	DTA	熱挙動	TG	DTA
熱分解			昇華・蒸発		
燃焼			転移・融解		
酸化			結晶化		
還元			ガラス転移		

接着系あと施工アンカー製品のうち、有機系として「現場調合方式」の製品2種類(いずれもエポキシ樹脂)、無機系として「カートリッジ方式」の製品1種類(セメント系)について分析した。有機系については接着剤樹脂を170×170×2 mmの平板状に成形し、ここから試料を採取して分析に供した。一方、無機系についてはモルタル試験用の金型を用い、40×40×160 mmの供試体を作製し、ここから分析試料を採取した。

TG/DTA分析の分析条件はJIS K 7120:1987「プラスチックの熱重量測定方法」およびJIS K 7121:1987「プラスチックの転移温度測定方法」を参考に、昇温速度20°C/min、窒素ガス流量40 mL/minとした。

###### 4.2.2 高温履歴を受けたアンカー接着剤の力学試験

トンネル構造が火災による高熱を受けた場合の挙動については、RABT-ZTV曲線などトンネル火災を想定した温度-時間曲線を用いて評価されることが多い。RABT-ZTV曲線は「ドイツにおける道路トンネル設備と運用に関する指針」により定められており、発火から5分で1200°Cに達し、その状態が30~60分持続した後、鎮火していく

状況を模擬したものである。一方で、コンクリート内部の温度は、火炎に曝される表面から深さ方向に徐々に低下し、深さ 100 mm 程度では 200~300℃にとどまるとの報告<sup>12)</sup>もある。あと施工アンカーはコンクリートに埋設した状態で用いられることから、この実験においては常温~350℃の範囲における接着剤の挙動について評価することとした。

本実験における温度-時間曲線の例を図 4-1 に示す。供試体の加熱はマッフル炉を用いて行った。炉内に供試体を静置した後、室温から設定した最高温度まで約 10 分で急速に昇温させ、そのまま 60 分間保持した。その後、約 120 分間かけて室温まで徐々に冷却し、供試体が完全に常温となってから力学試験に供した。有機系については、170×170×2 mm に成形した平板から 40×25×2 mm の試験片を切り出し、これを加熱・試験に供した。また、無機系については 40×40×160 mm の供試体を用いた。試験時における材齢は、試験片または供試体の作製から 10 日後とした。有機系については JIS K 7171:プラスチック曲げ特性の求め方に準拠した曲げ試験を行い、曲げ強さによって評価した。また、無機系については JIS R 5201:セメントの物理試験方法に基づき、曲げ強さ、圧縮強さによって評価した。

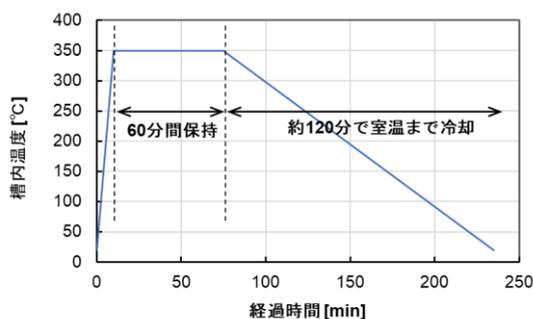


図 4-1 本実験における温度-時間曲線の例  
(設定最高温度 350℃)

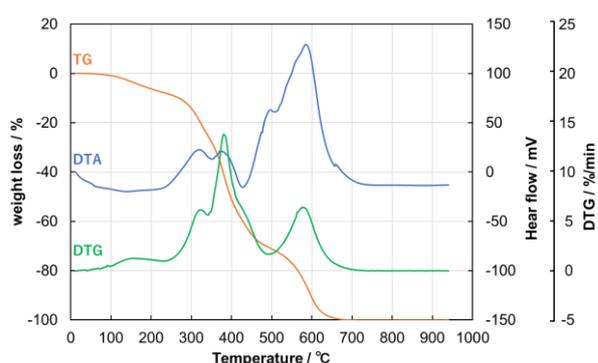
#### 4.3 実験結果と考察

##### 4.3.1 アンカー接着剤の熱による物性変化

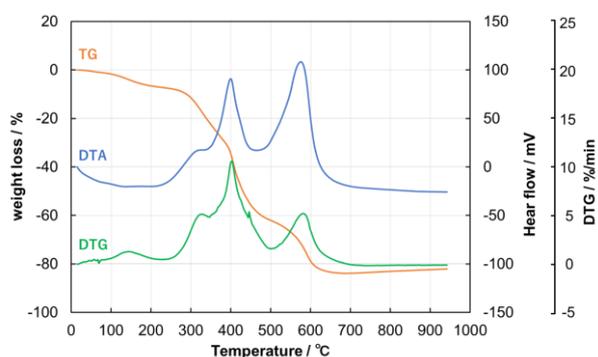
各種接着系アンカーのTG/DTA分析の結果を図 4-2 に示す。有機系のアンカー接着剤では、いずれの製品とも 100℃付近から水分の蒸発と見られる質量減少が始まり、250℃付近で吸熱を伴う質量減少、250~500℃付近、500~650℃付近で大きな発熱を伴う質量減少が生じた。エポキシ樹脂 A では 700℃までに全量が焼失した一方で、エポキシ樹脂 B では約 20%の残留が認められた (図 4-2 (a) (b))。250℃付近より生じた質量減少は、有機成分の

熱分解および燃焼に起因する変化であると考えられる。エポキシ樹脂 B では燃焼反応後も成分が残存したが、これは製品に含まれている顔料等の無機成分によるものと思われる。

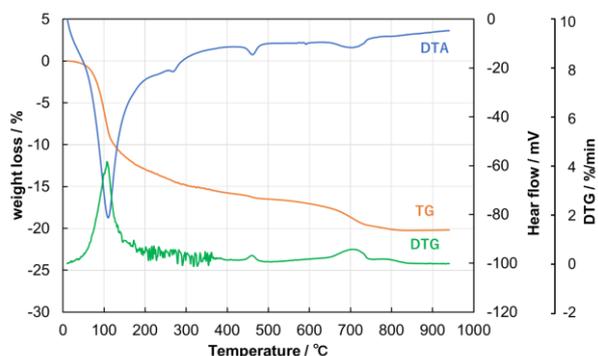
一方、無機系アンカー接着剤は、100℃付近で水分の蒸発によるものと考えられる大きな吸熱反応と質量の減少が認められた (図 4-2 (c))。その後、試料を昇温させると 300℃、500℃、700℃付近で CaCO<sub>3</sub> の脱炭酸や Ca(OH)<sub>2</sub> の脱水などによるものと思われる小さな吸熱反応が生じたが、その際の質量減少は小さく、常温から 1000℃までの昇温で減少したトータルの質量は、加熱初期に生じたおよそ 20%程度のみであった。



(a) 有機系 (エポキシ樹脂 A)



(b) 有機系 (エポキシ樹脂 B)



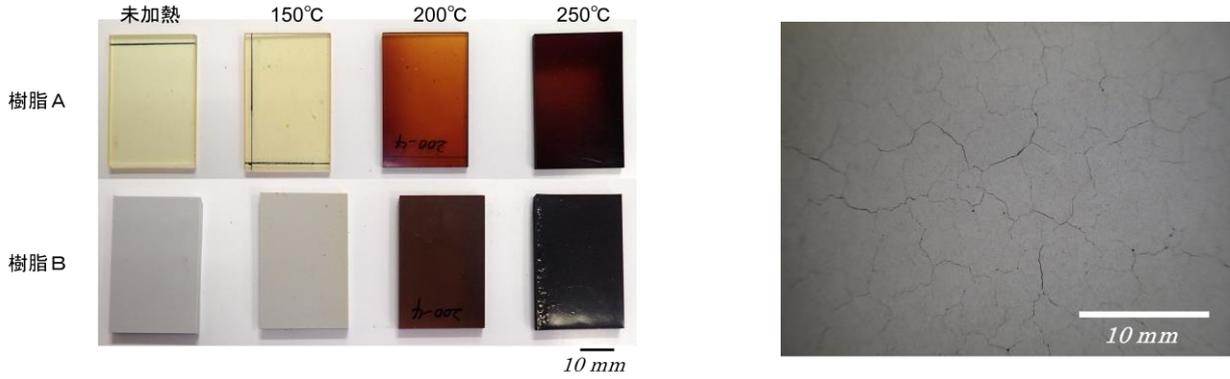
(c) 無機系

図 4-2 アンカー接着剤の TG/DTA 曲線

4.3.2 高温履歴を受けたアンカー接着剤の力学特性

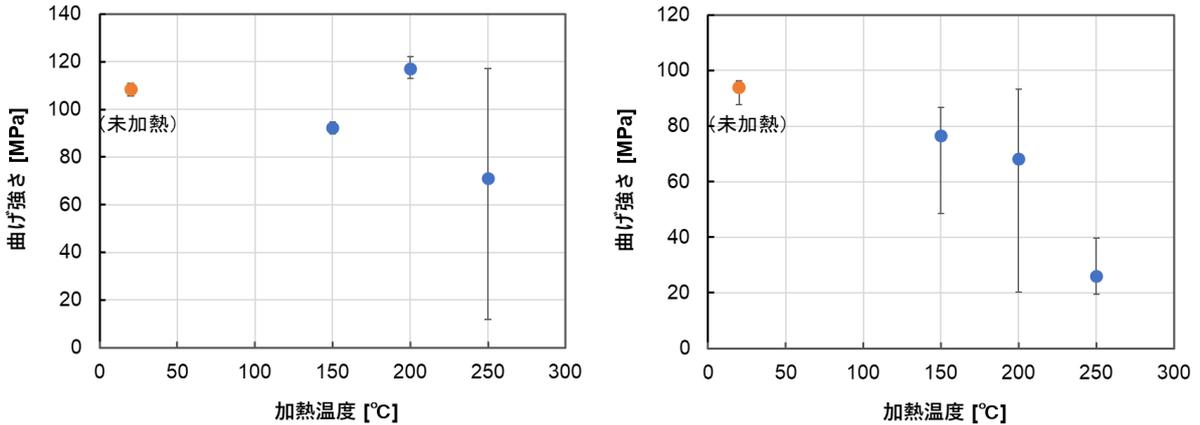
高温履歴後のアンカー接着剤の外観を図4-3に示す。有機系アンカーではエポキシ樹脂A、エポキシ樹脂Bともに、最高温度が高くなるにつれ、黒く変色した。250°Cまで加熱した場合、いずれの樹脂も、試験片表面の一部が変形した(図4-3(a))。なお、後ほど行った曲げ試験

後の破面観察の結果、加熱による変色層は試験片の表面のみに形成されていることがわかった。無機系アンカーでは加熱後の供試体表面に無数のひび割れが生じた。ひび割れは最高温度が高くなるにつれ、密になった。最高温度を1000°Cまで上昇させた際には、およそ600~700°Cで供試体が爆裂粉砕した。



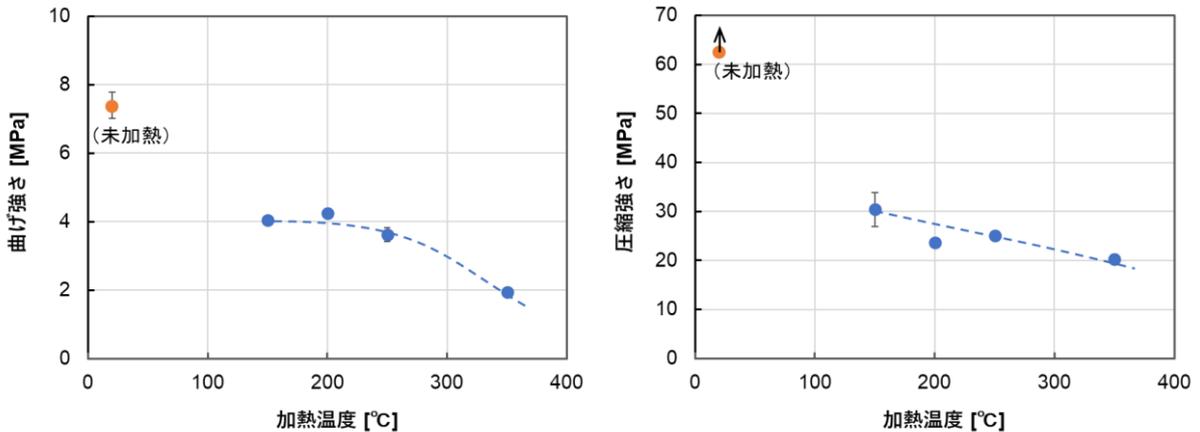
(a)有機系アンカー (b)無機系アンカー (250°C加熱後)

図4-3 高温履歴後のアンカー接着剤の外観



(a) エポキシ樹脂A (b) エポキシ樹脂B

図4-4 高温履歴後の有機系アンカー接着剤の曲げ強さ



(a) 曲げ強さ (b) 圧縮強さ

図4-5 高温履歴後の無機系アンカー接着剤の曲げ強さおよび圧縮強さ

高温履歴後の有機系アンカー接着剤の曲げ強さを図4-4に示す。それぞれの水準で、5回の試験を行った。エポキシ樹脂Aにおいては、200°Cまでの加熱で強度低下は無く、250°Cで一部の試験片の曲げ強さが未加熱の場合の10%程度まで低下した。一方、エポキシ樹脂Bでは150°Cにおいても曲げ強さの低下が認められ、250°Cでは全ての試験片で未加熱の40%を下回った。エポキシ樹脂Aとエポキシ樹脂Bとでは常温～300°C程度までのTG/DTA曲線に大きな差異は無かった(図4-2)一方で、高温履歴後の曲げ特性に差が生じたのは、接着剤に含まれる顔料等の無機系の副資材の影響によるものと推察されるが、詳細は不明である。

高温履歴後の無機系アンカー接着剤の曲げ強さおよび圧縮強さを図4-5に示す。無機系接着剤は有機系とは挙動が異なり、150°C程度の加熱でも、未加熱の場合の50%程度まで強度が低下することがわかった。TG/DTAの結果や加熱後の供試体外観を踏まえると、初期の急速な加熱によって接着剤に含まれる水分が急激に蒸発し、その蒸気圧によって接着剤内部に無数のひび割れが生じ、これによって大幅強度低下がもたらされものと推察される。

一般に、有機系材料は無機系材料よりも耐熱性が劣るとされているが、今回の実験結果では、200°C程度までの温度条件では、無機系接着剤の方が劣る結果となった。今後はこれらの結果を踏まえて適切な試験条件を設定し、高温時および高温履歴を受けたときのアンカー着剤/コンクリートの接着強さについて評価する予定である。

## 5. まとめ

本研究では、道路トンネル内の附属物の設置等に用いられるあと施工アンカーを主な対象として、各種の環境条件があつた施工アンカーの耐力や破壊モードに与える影響を解明し、その評価手法を構築することを目的として検討している。令和元年度は過年度に引き続き、接着系アンカーの耐アルカリ性を評価するために、アンカー全長を用いた試験評価方法を考案し、その特性について検討した。また、湿潤環境下での接着系アンカーのクリープ挙動についてデータを充実させるとともに、アンカー接着剤の高温時の挙動について検討した。

水酸化カリウム水溶液中での浸せき試験では、実験に供した一部の製品で、強度低下を伴うアンカー接着剤の化学的劣化が認められた。また、劣化の指標として、赤外吸収スペクトルの吸光度比を利用できる可能性が示された。母材コンクリートへのアルカリ添加は、浸せきによるアンカー接着剤の劣化を促進させる効果は確認でき

なかった。一方、アルカリによるアンカー接着剤の接着強さの変化を評価する方法として、アンカー全長を用いた引抜試験は従来法よりもばらつきが少なく、実際の使用条件に近い試験方法として利用できる可能性を確認することができた。

湿潤環境下でのクリープ試験では、より多くの荷重・水温条件下でのデータを蓄積しつつある。これまでに得られた結果から、高温、短時間の実験結果にもとづき低温、長時間の寿命予測ができる可能性が示された。この実験については、今後、アンカーの材種も変えてデータを充実させ、信頼性の高い寿命予測に繋げていきたいと考えている。

有機系アンカー接着剤のTG/DTA分析では、有機成分の熱分解および燃焼に起因すると思われる質量減少が、250°C付近から生じた。また、700°C付近までの加熱により、有機成分のすべてが消失することがわかった。一方、無機系アンカー接着剤は、100°C付近で水分の蒸発によるものと考えられる大きな吸熱反応と質量減少が生じた。常温から1000°Cまでの昇温で減少したトータルの質量は、加熱初期に生じたおよそ20%程度のみであった。

高温履歴を受けたアンカー接着剤の力学特性への影響を評価した結果、200°C程度までの加熱条件では、有機系接着剤の強度低下は認められなかった一方で、無機系接着剤の強度が加熱前の50%程度まで低下することがわかった。今後はこれらの結果を踏まえて適切な試験条件を設定し、高温時および高温履歴を受けたときのアンカー着剤/コンクリートの接着強さについて評価する予定である。

## 参考文献

- 1) ACI 355.4-11: Qualification of Post-Installed Adhesive Anchors in Concrete and Commentary, 2011
- 2) 富山禎仁、西崎 到: 接着系あと施工アンカーの耐アルカリ性評価方法に関する検討、土木学会論文集 A1、Vol. 72、No. 5、pp. 46-55、2016
- 3) 富山禎仁、西崎 到: 接着系あと施工アンカーの耐アルカリ性評価方法に関する検討、複合・合成構造の活用に関するシンポジウム講演集、第11回、pp. 296-303、2015
- 4) 日本建築あと施工アンカー協会: あと施工アンカー技術資料 第7版、66 p.、2009
- 5) 泉 美治、小川政彌、加藤俊二、塩川二朗、芝 哲夫: 機器分析のてびき 第2版、pp. 1-23、化学同人、1996

- 6) Chin, J. W., Aouadi, K., Haight, M. R., Hughes, W. L. and Nguyen, T.: Effects of water, salt solution and simulated concrete pore solution on the properties of composite matrix resins used in civil engineering applications, *Polymer Composites*, Vol. 22, Issue 2, pp. 282-298, 2001
- 7) 富山禎仁、久保内昌敏、仙北谷英貴、津田 健: 高分子系材料の腐食検知をめざした赤外線透過ファイバセンサの特性評価、*強化プラスチック*、Vol. 49、No. 6、pp. 258-264、2003
- 8) トンネル天井板の落下事故に関する調査・検討委員会: トンネル天井板の落下事故に関する調査・検討委員会報告書、pp. 29-30、2013
- 9) 日本建築学会編: 各種合成構造設計指針・同解説、343 p.、2010
- 10) 国尾 武、M. L. Williams: 粘弾性体の力学的挙動、*日本機械学会誌*、Vol. 68、No. 552、pp. 83-92、1965
- 11) 国土交通省: あと施工アンカー・連続繊維補強設計・施工指針、62 p.、2006
- 12) 河村圭亮、福浦尚之、鈴木三馨、服部佳文: 火災加熱を受けるコンクリートの変形挙動解析、*大成建設技術センター報*、No. 44、pp. 1-7、2011
- 13) 津越 敬寿: 分析機器の正しい使い方: 熱分析、*ぶんせき*、No. 516、pp. 568-574、2017

## 6.4 既往事象・現場条件に対応した最適な維持修繕手法の構築、構造・材料の開発・評価

### 6.4.6 先端的維持管理技術による管理用施設（接合部）マネジメントに関する研究（2）

担当チーム：材料資源研究グループ（汎用材料）

研究担当者：古賀裕久、中村英佑、加藤祐哉

#### 【要旨】

本研究は、道路トンネルのジェットファンの取付け等に使用される金属系あと施工アンカーを主な対象とし、設計、施工、維持管理の合理的な方法の確立を目的に平成 28 年度より検討を行っている。これまでに、アンカーの引張耐力を適切に評価するための試験条件、近接した複数のアンカーを一体とした状態（群配置）の耐荷性能、形状や機構が異なるアンカーの耐荷性能、母材コンクリートのひび割れが耐荷性能に与える影響等について検討した。令和元年度の検討では、持続的な荷重がアンカーの引張耐力に及ぼす影響や、アンカーに吊金具を取り付けた際に生じる軸力の経時変化等について検討を行った。この結果、ジェットファンの荷重が持続的に作用したとしてもアンカーの引張耐力には影響が生じないと見込まれることや、吊金具等を取り付けるときに締付けトルクを管理しても個々のアンカーに導入される初期軸力には大きなばらつきが生じること、この軸力は経時的に低下することなどを明らかにした。

キーワード：あと施工アンカー、持続荷重、ナット締付け、締付けトルク、初期軸力

#### 1. はじめに

道路トンネルにおいてジェットファンを取り付ける際は、一般的に金属系あと施工アンカー（以下、アンカーという）が用いられる。安全に供用していくためには、設計時のアンカーの耐荷力の評価方法や適切な施工方法、信頼性の高い点検方法等を確立しておく必要がある。そこで本研究では、アンカーの設計、施工、維持管理の標準的な方法や留意点をとりまとめることを目的に検討を行っている。

平成 28 年度から平成 30 年までは、アンカーの引張耐力を適切に評価するための試験条件の検討、実際のジェットファン取付け時を想定した、近接した複数のアンカーを一体とした状態（群配置）における実際の耐荷性能と設計式の妥当性の確認、アンカーボルト径が同じでも形状や機構が異なるアンカーの耐荷性能の違いの把握、過大な削孔径などの施工不良や、アンカー周囲の母材コンクリートに生じたひび割れが耐荷性能に及ぼす影響の検討などを行った。

令和元年度では、アンカーにはジェットファンの荷重が持続的に作用することを考慮し、これがアンカーの引張耐力に及ぼす影響を検討した。また、アンカーに吊金具等をナットで取り付ける際に生じる初期軸力について、これが失われるとナットの弛み等が生じ、

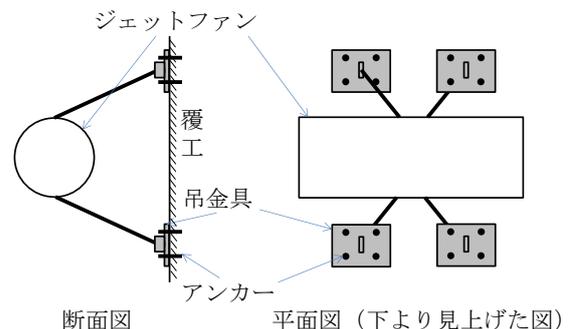


図-1 ジェットファン取付け状況の例

吊金具の取付けに用いられている複数のアンカー間の荷重分担に偏りが生じるなどの悪影響が生じるおそれがあることから、軸力の経時変化等について検討を行った。

## 2. 持続荷重がアンカーの耐力に与える影響

### 2.1 検討の目的

アンカーには、常にジェットファンや吊金具等の静荷重が作用している状況であり、この荷重がアンカーの耐力に与える影響について確認するために検討を行った。

なお、設計においては、静荷重の 15 倍以上の耐力

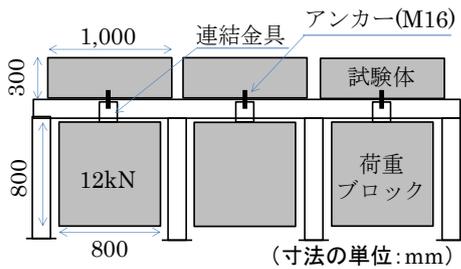


図-2 持続載荷用試験体

を確保することが望ましいとされており、また、図-1に示すように複数のアンカーが用いられることから、個々のアンカーに持続的に作用する荷重の大きさは、アンカーの設計耐力と比較すると小さい。さらに、設計に用いられる耐力式はコーン破壊時のコンクリートの破壊面などについて安全側の仮定がされており、個々のアンカーの実際の耐力は、設計耐力に対して余裕がある場合も多い。このため、持続的な荷重の影響は生じにくいものと想定されたが、安全性を確認するためにも検証のための実験を行った。

## 2.2 実験方法

本研究では期間も限られることから、実際のジェットファン取付け状態でアンカー1本が負担するよりも大きな静荷重を持続的に加え、その後載荷試験を行った。

具体的には、「普通 24・8・20N」のレディーミクストコンクリートを用い、寸法 1,000×1,000×300mm のコンクリート試験体を3体製作し、材齢 28 日以降に M16 スリーブ打込み式アンカーを固着した。これを、図-2に示すように室内に設置し、質量が約 12kN の荷重コンクリートブロックを吊り下げ、持続載荷を開始した。持続載荷中は、アンカーの変位も記録した。約 1 年後に除荷し、持続載荷を受けたアンカーの引張耐力を測定するとともに、試験体の反対側に新たにアンカーを固着して持続載荷を受けていない条件での引張耐力も測定した。

## 2.3 実験結果

図-3に持続載荷期間中のアンカーの変位を示す。用いた M16 アンカーの埋込み長さは 60mm であるが、アンカーに 12kN の荷重を載荷すると 0.6mm 程度の変位が生じた。また、持続載荷終了時点で、0.9～1.2mm 程度まで変位が増加した（増加量は 0.3～0.6 mm 程度）。変位が増加するのは、次章で示すように持続的に荷重が作用することで、固着部にすべり等が生じたためと考えられるが、変位が大きく増加したの

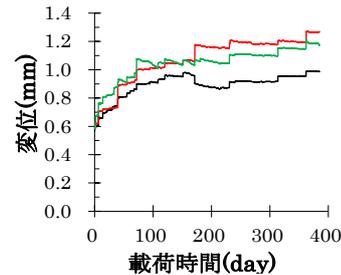


図-3 持続載荷期間中のアンカー変位

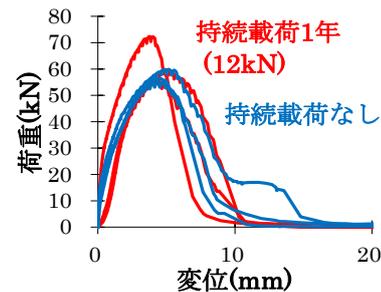


図-4 持続載荷後の引張試験結果

は初めの 100 日程度であり、その後の増加は緩やかであった。

図-4に持続載荷後の引張試験結果を、持続載荷を受けていない場合の引張試験結果と合わせて示す。持続載荷の有無にかかわらず、いずれのアンカーでもコーン状破壊が生じた。引張耐力（最大荷重）は持続載荷がない場合で平均 57kN であり、約 1 年間の持続載荷（12kN）を受けた場合は平均 63kN であった。両者の違いは有意ではないと考えられる。

この実験の結果から、アンカーの実際の引張耐力の 2 割程度の荷重で 1 年間持続載荷を行った履歴があっても、引張試験における破壊形態や耐力には影響がないことが確認された。ジェットファンの取り付けに用いられているアンカーにおいては、持続的に作用している荷重はこれよりもかなり小さく、影響はないものと考えられる。

## 3. 軸力の経時変化に関する検討

### 3.1 検討の目的

ジェットファンの取付けの際は、写真-1に示すようにコンクリートに固着されたアンカーに吊金具をナットで締め付け固定するが、締め付け力大きいとアンカーが破損する恐れがあるため、締め付けトルクをトルクレンチで測定するなどの方法で、締め付け力が管理されている。このときアンカーボルトには初期軸力が導

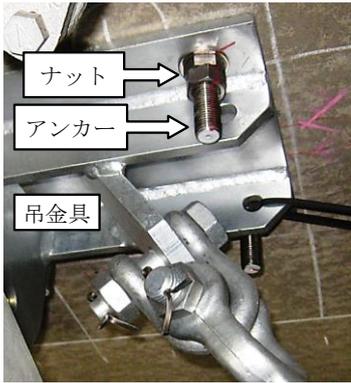


写真-1 吊金具をアンカーに固定している状況



写真-2 ゲージ埋込みアンカー (M16)

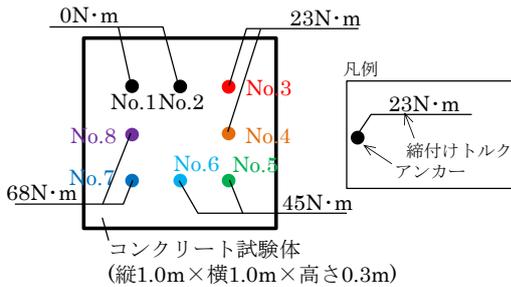


図-5 アンカー8本を固着した試験体 (平面図)

入されるが、何らかの理由で軸力が0となるとナットが座面から離れ、吊り金具を固定している複数のアンカーの間で荷重が適切に分配されないなどの不具合が生じる可能性がある。

このように、締め付けによる初期軸力は適切なものである必要があるが、トルクレンチによる締め付けトルクの管理で導入される初期軸力にはばらつきが大きいことも指摘されている<sup>2)</sup>。また、軸力の経時変化についても知見が十分でないことから、これらを把握するために検討を行った。

### 3.2 実験方法

軸力測定のためにひずみゲージを埋込んだM16アンカー (写真-2) を準備し、前章の検討で用いたものと同じコンクリート試験体に互いに干渉しないような十分な間隔 (25cm) で8本固着させた (図-5)。次に、トルクレンチを用いてNo.1, 2は0N・m、No.3, 4は23N・m、No.5, 6は45N・m、No.7, 8は68N・mと

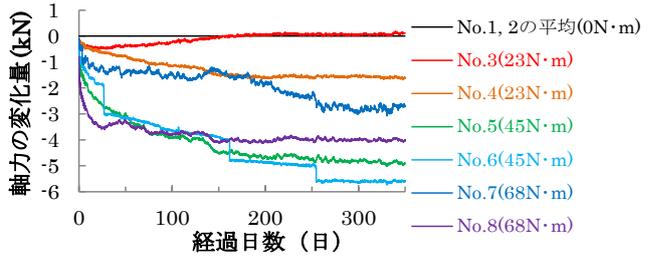
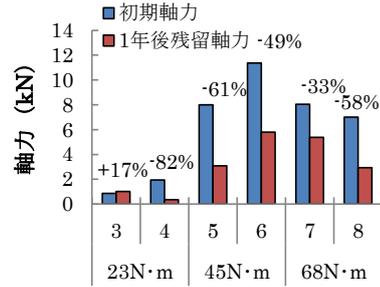


図-6 軸力の経時変化量 (No.1, 2の平均値を基準とした場合の変化量)



アンカーNo., 締め付けトルク  
数値: 初期軸力に対する  
残留軸力の低下割合

図-7 初期と1年後残留軸力

異なる締め付けトルクでナットを締め付けた。なお、68N・mがこの製造者が指定する標準的な締め付けトルクである。その後、室内に1年間静置し、軸力の変化を記録した。

### 3.3 実験結果

#### 3.3.1 軸力の経時変化

軸力の変化量を図-6に示す。軸力を作用させたNo.3～8のアンカーは、締め付け後、軸力が低下しているが、特に初期に大きく低下し、その後の変化は緩やかとなる傾向を示した。また、No.6は軸力の急な低下が3回記録されており、静置期間中に固着部ですべりが生じた可能性が考えられる。なお、急な低下の生じた時間に震度3以上の地震は観測されておらず、地震によるものではないと考えられる。

図-7にアンカーの締め付け時の初期軸力と1年後残留軸力の比較結果を示す。当初の締め付けトルクの大きさは、No.3, 4 < No.5, 6 < No.7, 8の順であるが、初期軸力は同じ条件でも大きな違いがあり、また、締め付けトルクと初期軸力の大きさは必ずしも比例していないことがわかった。

初期軸力の大きさと1年後の低下量を図-8に示す。初期軸力が大きいほど軸力の低下量が大きい傾向を示し、1年後の残留軸力は、No.3を除き初期軸力から

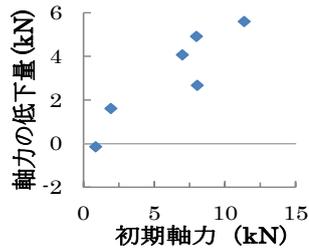


図-8 初期軸力と1年後の低下量の関係

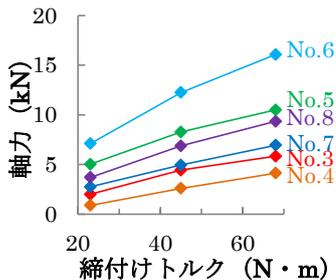


図-9 締付けトルクと軸力（平均値）の関係

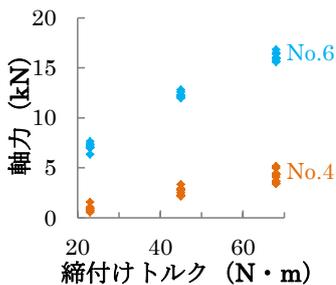


図-10 締付けトルクと複数回測定した軸力の関係の例

33～82%低下した値となった。

軸力の経時的な低下は、固着部の状態や軸力の大きさ、日々の温度変化等によるアンカーやコンクリートの微小な寸法変化の繰返しなどが影響した可能性が考えられるが、その検証は今後の課題である。また、No.3の残留軸力が初期軸力を上回った理由は明確ではない。

### 3.3.2 再締付けによる軸力の確認

図-7より、締付けトルクと初期軸力の関係が明確でなかったことから、再度アンカーに締付け力を導入し、締付けトルク 23N・m、45N・m、68N・m における軸力の測定を複数回繰返し行った。図-9に締付けトルクと軸力（平均値）の関係を、図-10に締付けトルクと10回測定した軸力の関係の例（No.4、6）を示す。

図-9より、軸力の最も小さな No.4 と最も大きな No.6 では約4倍の差が生じており、同じ締付けトルクで作業を行っても、個々のアンカーによって導入され

る軸力は大きく異なりうるということがわかった。

一方、図-10より、同一のアンカーにおいては、ナットの締付けと弛めを繰り返しても、同じ締付けトルクで導入された軸力のばらつきは比較的小さかった。図-10に示さなかった他のアンカーについても同様であった。

これらのことから、同一条件で締付けを行っても、個々のアンカーによって軸力が大きく異なりうるということがわかった。同じように施工していても、固着部の削孔状態や粗骨材の分布などの母材コンクリートの状態、ナット座面の摩擦等が完全に同一ではないことが影響していると考えられる。

## 4. まとめ

本研究では、道路トンネルのジェットファンの取付け等に用いられる金属系あと施工アンカーを対象として、設計、施工、維持管理の標準的な方法や留意点をまとめることを目的としている。令和元年度の検討では、アンカーに荷重が持続的に作用した際の引張耐力に及ぼす影響を明らかにするために、実際の現場よりも厳しい条件で1年間の持続載荷試験を行った。また、アンカーに吊金具等をナットで取り付けた際の軸力の経時変化等について検討を行った。得られた知見を以下にまとめる。

- 1) 12kN（用いたアンカーの引張耐力（コーン状破壊）の2割）の荷重を1年間載荷した後のアンカーの引張耐力は持続載荷を受けていない場合とほとんど変わらず、破壊形状にも変化はなかった。今回の試験条件は実際の現場条件よりも厳しい条件であり、実際のジェットファン取付けに用いられるアンカーにおいて持続的に作用している荷重はより小さいため、アンカーの耐力への影響はないと考えられる。
- 2) ナット締付けによって導入された軸力は、経時的に低下することが分かった。固着部のすべりや温度変化等に伴う微小な寸法変化の繰返しなどが要因として考えられる。
- 3) ナット締付けによって導入される初期軸力は、同じ締付けトルクで締め付けた場合でも、大きく異なりうるということが分かった。削孔状態や粗骨材の位置、座面の摩擦等が完全に同一でないことが要因として考えられる。

今回、トルクレンチで締付けトルクを管理していた

としても、個々のアンカーに導入される軸力のばらつきが大きいこと、これが経時的に低下することが確認された。供用中の弛み防止の観点から、軸力の低下の要因の明確化や維持管理における留意点、対応案などを提示するための検討を引き続き行う予定である。

また、これまでに得られた知見を活用して、道路トンネルのジェットファンの取付け等に用いられる金属系アンカーの設計、施工、維持管理の標準的な方法や留意点をまとめるとともに、あと施工アンカーの選定するための性能評価手法を検討する予定である。

#### 参考文献

- 1) 社団法人日本道路協会：道路トンネル技術基準（換気編）・同解説、平成20年改訂版、p.136、2008
- 2) 一般社団法人日本建築あと施工アンカー協会：あと施工アンカー点検・診断要領（案）－取付物固定用－、p.付録7-3、2019