

積雪寒冷地における劣化損傷部位に着目したRC床版の耐久性評価に関する研究

研究予算：運営費交付金

研究期間：平 29～令 2

担当チーム：寒地構造チーム

研究担当者：西弘明、葛西聡、安中新太郎、
角間恒、中村拓郎、守田稷人、
内田侑甫

【要旨】

道路橋 RC 床版の部位や構造条件を考慮した耐久性評価手法の確立に向けて、積雪寒冷地において劣化損傷が顕在化している部位と劣化損傷機構を検討した。道内 140 橋における 221 箇所の舗装切削調査結果を分析した結果、土砂化が顕在化しやすい部位や構造条件を明らかにした。また、土砂化が生じた橋梁をモデル化した 3 次元弾性解析を実施し、床版上面の応力分布等から主桁近傍や斜橋の鈍角側で土砂化が生じる可能性を示した。さらに、床版形状、応力状態、滞水範囲等の土砂化が顕在化しやすい条件に着目した耐久性評価の考え方を整理した。
キーワード：道路橋 RC 床版、耐久性評価、土砂化、劣化損傷部位、有限要素解析

1. はじめに

道路橋の鉄筋コンクリート床版（以下、床版）では、大型車の輪荷重による疲労損傷に加えて、床版内部の水平ひび割れや床版上面の土砂化の発生が確認されるなど、近年、その劣化損傷形態も多様化してきている。特に、床版上面の土砂化については、供用環境や使用材料の違いによって地域毎に劣化機構が異なることも考えられるが、北海道から九州までの国内の広範囲で発生が確認されている。北海道においても、車両走行、凍結融解、塩分浸透、アルカリシリカ反応等の複合作用による床版の劣化損傷が確認され、抜け落ちに至った事例²⁾もある。

現行の床版の耐久性評価は、実橋での多岐にわたる劣化損傷部位・条件を包括するには至っておらず、床版の抜け落ちや補修補強後の再劣化が危惧される。本研究では、床版の部位や条件を考慮した耐久性評価手法の確立に向けて、積雪寒冷地における劣化損傷として床版上面の土砂化に着目し、土砂化が顕在化している部位とその劣化損傷機構に関する資料収集・分析や数値解析的検証をふまえ、土砂化が顕在化しやすい条件に着目した耐久性評価の考え方を整理した。

2. 劣化損傷が顕在化している部位・構造条件の抽出および影響度評価

2. 1 調査概要

2. 1. 1 対象橋梁

対象橋梁は、国土交通省北海道開発局が管理する鋼鈑桁を上部構造とする RC 床版形式の道路橋とし、道

路管理者が実施した平成 25～30 年度の橋梁診断業務および平成 21～30 年度の補修設計業務の報告書から舗装切削調査結果を抽出した。なお、調査対象は、本研究の範囲で収集できた報告書の範囲であり、平成 21 年度以降に行われた舗装切削調査の全数ではないことに留意されたい。本研究で調査対象とした橋梁の概要を表-1 に示す。各報告書から対象橋梁を抽出した結果、整理・分析の対象となる橋梁は 140 橋、舗装切削調査箇所数は 221 箇所となった。

2. 1. 2 調査項目

収集した各報告書より調査項目として抽出した橋

表-1 調査対象橋梁の概要

橋梁数	140 橋
舗装切削調査箇所数	221 箇所
供用年数*	9 年 ～ 65 年
橋長	8.5 m ～ 1412.7 m
床版支間	1.02 m ～ 4.80 m
床版厚	150 mm ～ 250 mm
舗装厚	30 mm ～ 100 mm

* 竣工年から舗装切削調査時までの年数

表-2 調査項目

種別	項目
橋梁諸元	竣工年、上部工形式、適用示方書、橋長、平面線形、斜角、縦断勾配、横断勾配、床版厚、床版支間、桁本数、車線数、防水工、舗装種類、舗装厚 他
供用環境	最高気温、最低気温、日照時間、大型車交通量、塩害地域区分、凍害危険度、凍結防止剤散布量、反応性骨材が含まれる可能性 他

梁諸元および供用環境の項目を表-2 にまとめる。凍害危険度³⁾および反応性骨材⁴⁾が含まれる可能性については、それぞれ図-1、図-2 を再描画して対象橋梁の緯度と経度から判別した。

舗装切削調査が行われた床版部位については、橋軸方向である縦断方向、橋軸直角方向である横断方向における調査位置を確認した。縦断方向は、端支点と中間支点位置の支点部と、それ以外の一般部に分類した。端支点部の範囲は床版打ち下ろし範囲(床版支間の1/2)とし、中間支点も支点から床版支間の1/2の範囲としている。また、横断方向については、桁との位置関係、路面位置、横断勾配位置を確認した。桁との位置関係は、図-3(a)に示すように、主桁近傍と桁間に分類した。路面位置は、図-3(b)に示すように、中央線、外側線付近、路肩、歩道に分類した。横断勾配位置は、勾配の上側、下側、その他(中間または歩道)に分類し、片勾配と拌み勾配の違いは考慮していない。

舗装および床版上面の状態については、原則として収集した報告書の記載を踏襲した。舗装の状態として、ひび割れ、浮き、ポットホール、白色析出物、補修痕の有無を確認した。床版上面の状態として、鉄筋露出、土砂化、剥離・スクレーピングの有無を確認した。本研究で調査対象とした舗装切削調査箇所と土砂化の有無を図-4に示す。本研究の範囲においては、調査対象の221箇所のうちで33.5%に相当する74箇所で床版上面に土砂化が確認されている。また、本研究で対象とした調査箇所は、札幌開発建設部、室蘭開発建設部、函館開発建設部の管轄橋梁が多かったものの、土砂化の発生は調査箇所全域に広く分布していた。

2. 2 調査結果

2. 2. 1 供用年数と土砂化の発生状況

供用年数と土砂化の発生傾向の関係を図-5に示す。建設後20年以上が経過した橋梁における土砂化の発生割合は、供用年数が20~29年で25%、30~39年で23%、40~49年で31%、50~59年で51%、60年以上で100%となっており、供用年数が増加するほど舗装切削調査箇所における土砂化の発生割合が増加する傾向を示した。特に、建設後50年以上が経過した橋梁では、舗装切削調査箇所の半数以上で土砂化が発生していた。

2. 2. 2 供用環境の違いによる土砂化の発生状況

昼間12時間の大型車交通量と土砂化の発生数の関係を図-6(a)に示す。大型車交通量が多いほど舗装切削調査の箇所数が多くなるような傾向は認められず、大型車交通量が少ない場所においても土砂化が確認さ

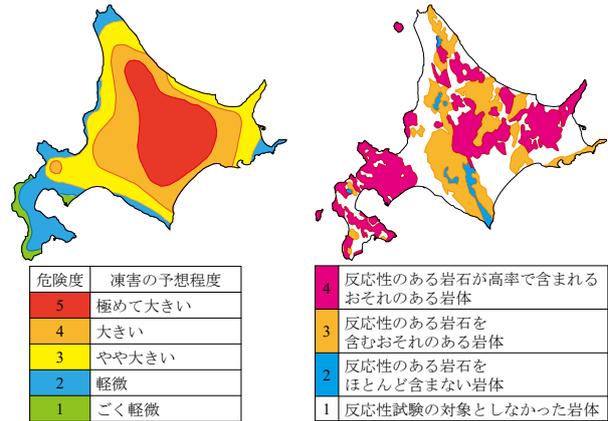


図-1 凍害危険度

図-2 岩体の分布

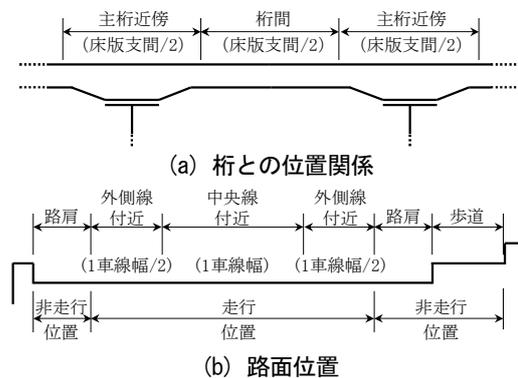


図-3 横断方向における舗装切削調査位置の分類

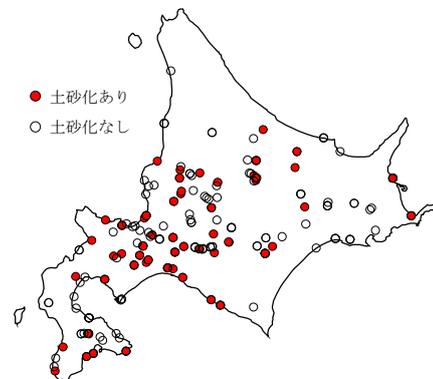


図-4 舗装切削調査箇所と土砂化の発生

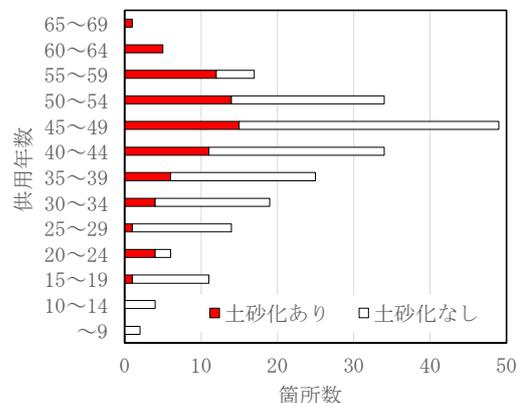


図-5 供用年数と土砂化の発生状況

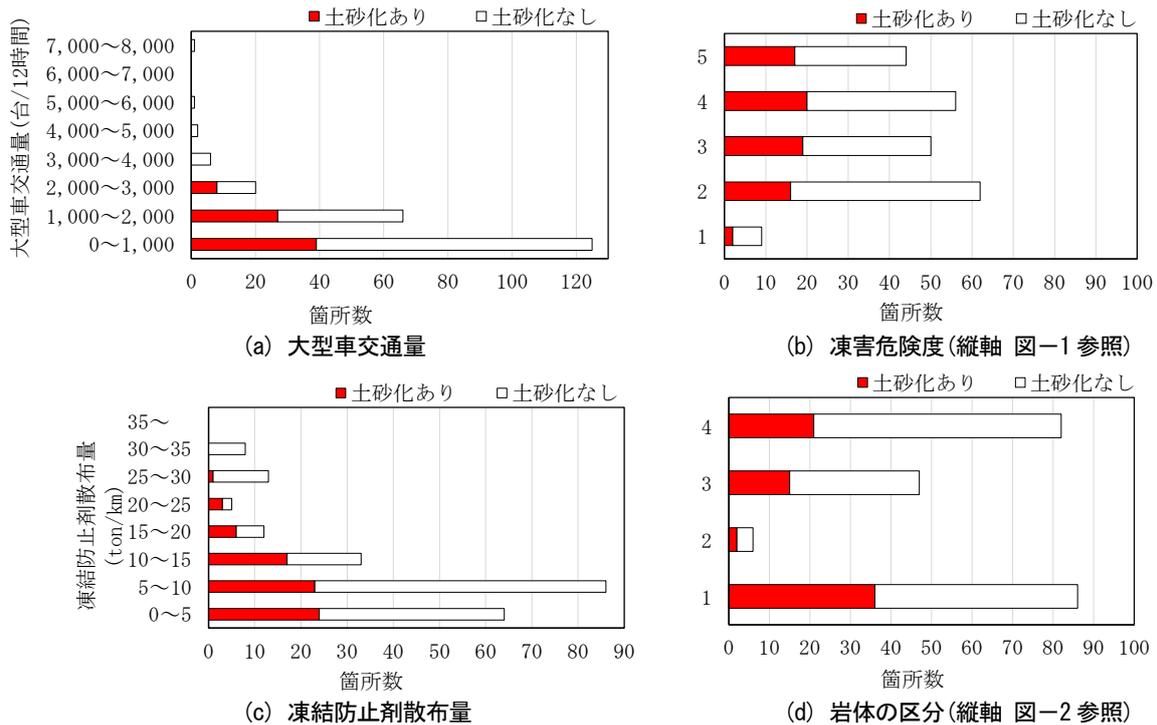


図-6 供用環境と土砂化の発生状況

れている。これは、北海道の床版における土砂化の発生には、重荷重交通による疲労以外の要因が大きく影響している可能性が高いことを示唆している。

凍害危険度別の土砂化の発生数を図-6(b)に示す。国土交通省北海道開発局が管理する全橋梁に対する凍害危険度別の割合は凍害危険度 2~5 の橋梁がそれぞれ 20~25%程度と言われており、本調査で対象とした調査箇所も概ね同様の分布となっていた。また、凍害危険度別の土砂化の発生割合は、凍害危険度 5、4、3、2 で、それぞれ 39%、36%、38%、26%となっており、凍害危険度が高くなることで土砂化の発生数や発生割合が極端に増加するような傾向は認められなかった。

凍結防止剤散布量と土砂化の発生数の関係を図-6(c)に示す。凍害危険度と同様に凍結防止剤の散布量が多い橋梁で土砂化が発生しやすくなるような傾向は認められなかった。これは、路面に散布した凍結防止剤の床版内への浸透については、舗装や防水層の状態に依存するところが大きく、凍結防止剤の散布量のみでは土砂化発生を押し量ることが難しいと考えられる。

アルカリシリカ反応性骨材分布に基づく岩体の区分別の土砂化の発生数を図-6(d)に示す。反応性の岩石を高率で含む岩体で 26%、反応性の岩石を含むおそれがある岩体では 32%、反応性試験の対象としなかった岩体では 42%となり、岩体の区分と土砂化の発生割合に明確な関係性は認められなかった。

2. 2. 3 調査部位の違いによる土砂化の発生状況

橋梁の平面線形別の土砂化の発生数を図-7(a)に示す。平面線形は、直橋、斜橋、曲線橋、斜角を有する曲線橋(図中の斜+曲)として分類している。直橋での土砂化の発生割合が 36%であることに對して斜角を有する斜橋では土砂化の発生割合が 39%であり、曲線橋の場合には斜角を有する場合で 28%となり、斜角がない場合の 23%に對して土砂化の発生割合がやや大きくなっている。また、斜角を有する橋梁の支点近傍での土砂化の発生割合を確認したところ、鋭角側と中間側では調査箇所の約 25%、鈍角側は 54%となっており、鈍角側で土砂化が発生しやすい傾向となっていた。

桁配置と土砂化の発生数の関係を図-7(b)に示す。舗装切削調査は主桁近傍で行われることが多く、土砂化の発生割合も桁間に比べて大きくなっている。主桁上で発生する負の曲げモーメントによる舗装および床版上面のひび割れ、あるいは、ジベルやスラブ止め等による主桁拘束により発生する初期の乾燥収縮ひび割れ等によって、床版内に水が浸入しやすい状態が形成されることが要因となっている可能性がある。

橋軸直角方向である横断方向の路面配置別の土砂化の発生数を図-7(c)に示す。舗装切削調査は、車両走行位置である外側線、中央線付近で多く行われており、土砂化の発生数も外側線付近が 45 箇所と最も多く、次いで多いのが中央線付近の 25 箇所となった。一

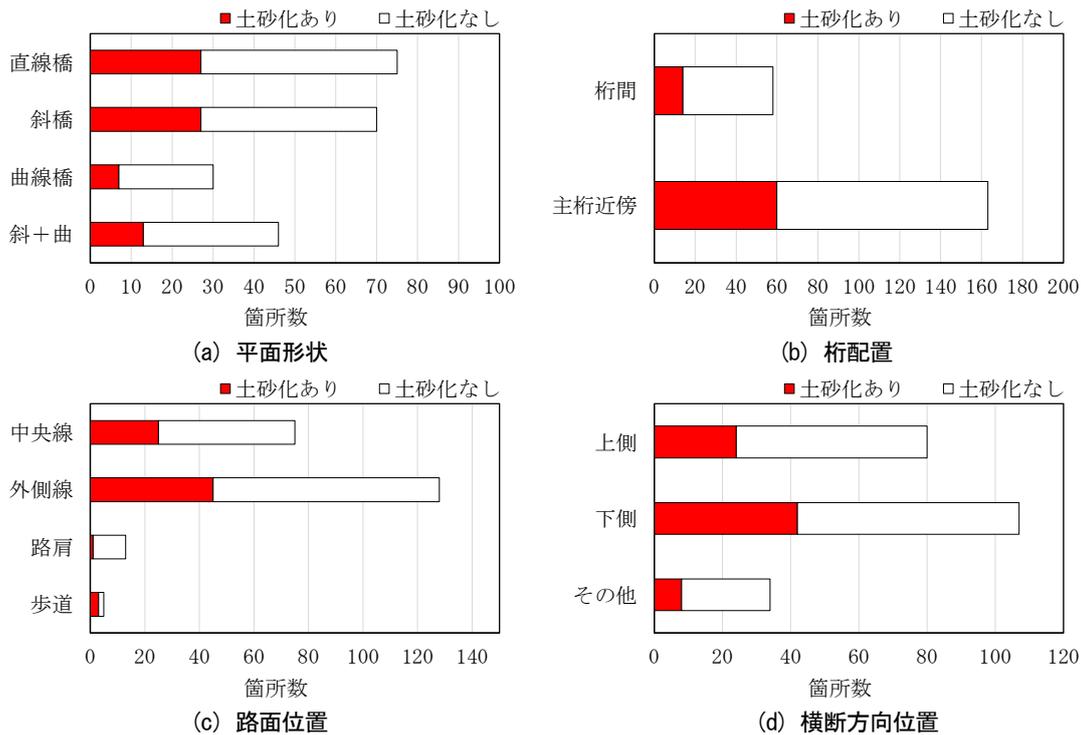


図-7 調査部位の違いによる土砂化の発生状況

方、輪荷重の繰返し作用による影響を受けない非走行位置である路肩や歩道においても土砂化・鉄筋露出が確認されている箇所もあった。

横断勾配位置と舗装、床版上面の状態の関係を図-7(d)に示す。雨水や融雪水の排出先となりうる横断勾配の下側において、舗装切削調査箇所数、舗装の変状数が多いことがわかる。

2. 2. 4 北海道内における土砂化の発生傾向

本研究における整理項目と土砂化の発生傾向を表-3にまとめる。なお、本稿にて割愛した縦断方向位置や防水工の有無、舗装や床版下面の変状と土砂化の関連性に関する調査結果については、参考文献5)~7)を参照されたい。建設後50年以上の橋梁では、舗装の変状と床版上面の土砂化の関連性が極めて高く、点検・調査時に舗装に変状が認められる場合には、その直下で床版の土砂化が発生していることを想定する必要があると考えられる。また、凍害危険度が低い地域、凍結防止剤散布量が比較的少ない地域、反応性のある岩石をほとんど含まない岩体に属する地域においても土砂化は確認されていた。本研究の範囲において、土砂化と劣化機構の関連性の特定は行っていないが、診断時には、北海道のほぼ全域で土砂化が発生する可能性を疑い、その劣化・損傷機構を適切に考慮する必要がある。一方、材料劣化が著しく進行したコンクリート構造物に対しては、環境作用に着目して劣化要因の調

表-3 各整理項目と土砂化の発生傾向

整理項目		土砂化の発生傾向
供用年数		建設後50年以上で半数以上
供用環境	凍害危険度	明確な関連性は認められない
	凍結防止剤	
	反応性骨材	
舗装切削位置	平面形状	斜角を有する場合に割合がやや大
	縦断方向	端支点・中間支点でも発生
	桁配置	主桁近傍で割合が大
	横断勾配	下側で割合が大
防水工		未施工の場合に割合が大

査および健全度の評価が行われる傾向にあるが、斜角や桁配置、横断勾配における位置も土砂化の発生割合に関与することが示唆された。これらは、舗装のうきやひび割れ、床版上面のひび割れといった材料劣化の要因となる水の浸入経路の発生しやすさとも関連することから、床版の点検・調査、健全度や性能評価においては、こうした構造的な条件にも着目することが重要になると考えられる。また、舗装に変状が認められない箇所であっても、床版上面に劣化損傷が発生している報告もあった。このような場合の土砂化の検知技術は今後の課題であり、点検・調査時には、こうしたケースが存在することについても留意する必要がある。

3. 部位固有の床版破壊メカニズムの解明と耐久性評価

3. 1 概要

床版上面の土砂化は、主として、ひび割れの発生箇所から水分が浸透し、その後の通行車両による荷重作用によって生じると考えられる。前述の土砂化の発生傾向調査において、環境作用による劣化要因のほかにも、斜角や桁配置、横断勾配における位置等の構造的な条件も土砂化の発生割合に関与することが示唆された。本章では、土砂化の要因となり得る床版上面のひび割れの発生要因として荷重作用や橋梁構造に着目し、床版の劣化損傷が生じやすい構造条件や部位として斜角や主桁近傍の応力状態等について 3 次元 FEM 解析による作用断面力の観点から検討を行う。

3. 2 解析モデルの概要

斜角がある鋼桁橋の上部工を有する 2 橋を対象に、土砂化の発生が報告された各橋の 1 径間について 3 次元の解析モデルを作成した。解析モデルにおける構成要素として、床版にはソリッド要素を、主桁と横桁にはシェル要素を、対傾構と横構にははり要素を用いた。床版と主桁は、床版に作用する応力および床版と主桁の合成作用を考慮できるようにバネ要素により結合している。解析対象橋梁の概要を表-4 にまとめる。

3. 2. 1 H橋の概要

H 橋は、昭和 41 年に架設された単純合成鋼桁で、平成 25 年に床版の抜け落ちが二度発生している。その後の調査で床版コンクリートのヤング係数の低下や床版内部の水平ひび割れが確認され、路肩部ではほぼ全長にわたって土砂化が確認されている。また、床版下面には補強鋼板が接着されているが、著しい漏水もあり、全面に腐食が生じていた。抜け落ち箇所は、輪荷重載荷位置であるとともに、滞水により土砂化が進行し、さらに凍害によってコンクリートが脆弱化したと推察されている。

H 橋のモデル化に際しては、竣工当時の設計計算書が無かったことから、現況一般図や補修設計業務の設計報告書等を参考にした。載荷荷重は、道路橋示方書・同解説 I 共通編の T 荷重を載荷することとし、車両進行方向に位置を変化させる影響線載荷として、橋軸方向には図-8 に示す 7 箇所とした。なお、橋軸直角方向の載荷位置は、床版抜け落ちの生じた車線とし、桁間（床版支間）の中央としている。

3. 2. 2 O橋の概要

O 橋は、昭和 40 年に供用開始された単純合成鋼桁であり、平成 22 年の定期点検の結果において、床版に

表-4 調査対象橋梁の概要

	H橋	O橋
竣工年	昭和 41 年	昭和 40 年
示方書	鋼道路橋設計示方書 (昭和 39 年)	鋼道路橋設計示方書 (昭和 39 年)
構造形式	単純合成鋼桁	単純合成鋼桁
活荷重	TL-20	TL-20
支間長	27.1m	16.05m
車道幅員	7.0m	7.0m
斜角	60° 00' 00"	68° 03' 00"
横断勾配	2.0% (拌み勾配)	4.0% (片勾配)
縦断勾配	0.10%	2.0%
補強	鋼板接着 t=4.5mm	なし

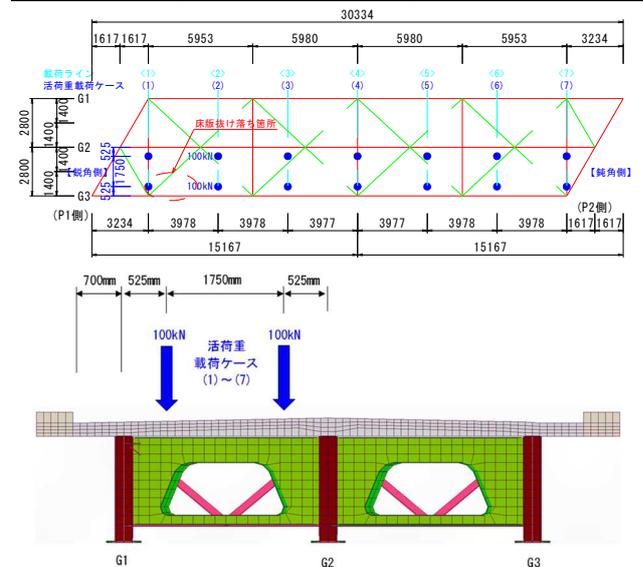


図-8 H橋のモデルの荷重載荷位置

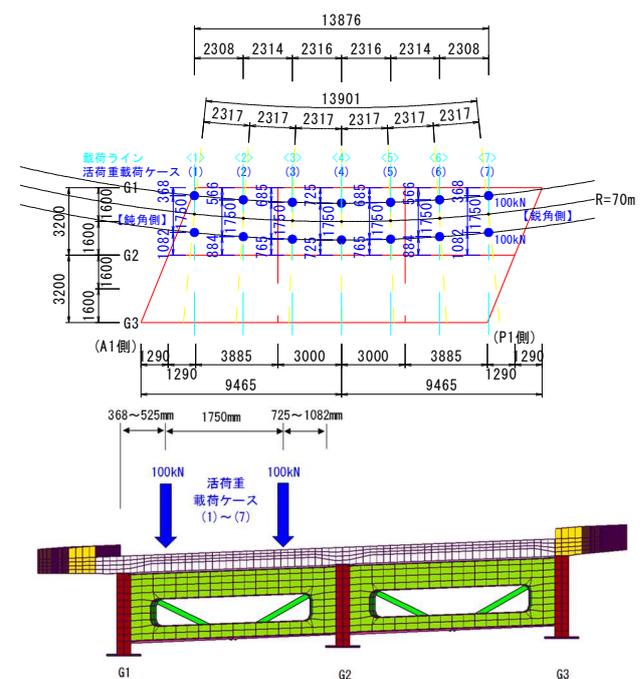
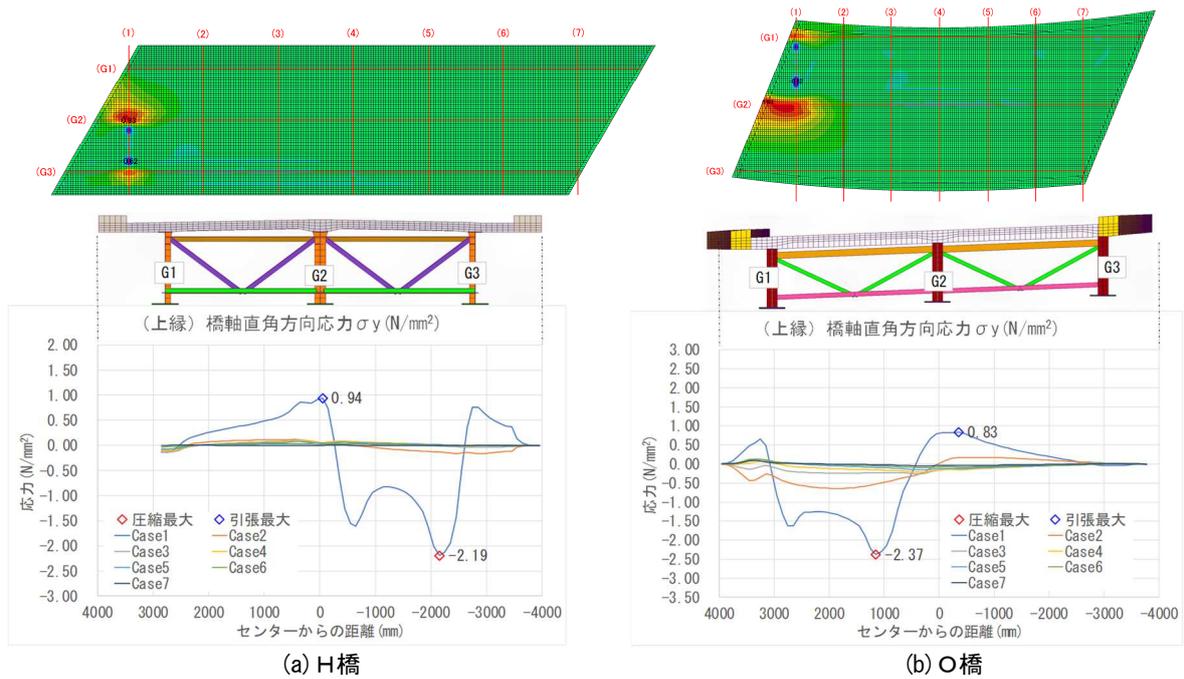


図-9 O橋のモデルの荷重載荷位置



(a) H橋
 (b) O橋
 図-10 床版上面の応力分布図（荷重ケース1の例）

関しては床版ひびわれ、漏水・遊離石灰、剥離・鉄筋露出について対策区分Cと判定されている。その後の平成23年の補修設計業務において、舗装切削調査の結果、床版上面に脆弱部が存在することが確認されている。なお、損傷原因は、舗装内滞水や凍害、経年により現況に至ったと推察されている。

O橋のモデル化に際しては、既設図面、補修設計図面等を参考にした。載荷荷重は、道路橋示方書・同解説I共通編のT荷重を載荷することし、車両進行方向に位置を変化させる影響線載荷として、橋軸方向には図-9に示す7箇所とした。橋軸直角方向の載荷位置は、H23の詳細調査において床版下面にひびわれやうき、漏水・遊離石灰等の損傷が顕著な平面曲線の内側車線とし、支間中央の載荷ケース4で桁間(床版支間)の中央に載荷した。他の載荷ケースは、2軸の中央を平面曲線(R=70m)に沿って載荷するものとし、2軸の荷重載荷位置は主桁直角方向に配置した。

3.3 劣化損傷が発生しやすい構造条件の検討

3.3.1 主桁近傍の負曲げ

床版上面の応力分布図として荷重ケース1の例を図-10に示す。輪荷重の走行によって床版コンクリートの上面には引張応力が生じていることがわかる。特に、主桁上では、床版支間に載荷された輪荷重により負曲げ状態となり、主桁近傍で床版上縁の引張応力が最大となっている。この傾向は、H橋とO橋のいずれの解析モデルにおいても同様であった。このように、主桁

近傍では他の部位と比較して床版上面の引張応力が大きくなることから、土砂化の要因となり得るひび割れが発生する可能性が高くなると考えられる。

3.3.2 斜角

H橋の床版上面の最大主応力コンター図を図-11に示す。H橋の鈍角側に載荷した荷重ケース7では、鈍角側の桁端部付近の床版上面に他の荷重ケースと比較して引張応力が大きく生じる傾向が見られる。一方で、鋭角側に近い荷重ケース1では鋭角側の外桁よりも中桁上の引張応力が大きく生じている。これは、外桁(G3)よりも中桁(G2)の支点が輪荷重載荷位置に近いと考えられる。また、輪荷重載荷位置を、更に桁端に近づけた場合は、床版上に載荷される輪荷重が片輪のみとなり、鋭角側の床版上面に発生する引張応力は鈍角側(荷重ケース7)と比較して小さくなる。H橋の鈍角側では、桁端部付近の床版上縁で引張応力が大きくなる傾向が認められ、土砂化の要因となり得るひび割れの発生する可能性が高いと考えられる。

O橋の床版上面の最大主応力コンター図を図-12に示す。O橋の桁端部では、H橋のような鈍角側で床版上面の引張応力が大きくなる傾向は認められず、中桁上で引張応力が大きくなっている。これは、O橋と比較して床版支間が広いことから、横断方向の中間支点となる中桁上の負曲げが大きくなったためと考えられる。また、支間中央に載荷した荷重ケース4では、中桁上よりも外桁上(G1)の引張応力が大きい。これは、

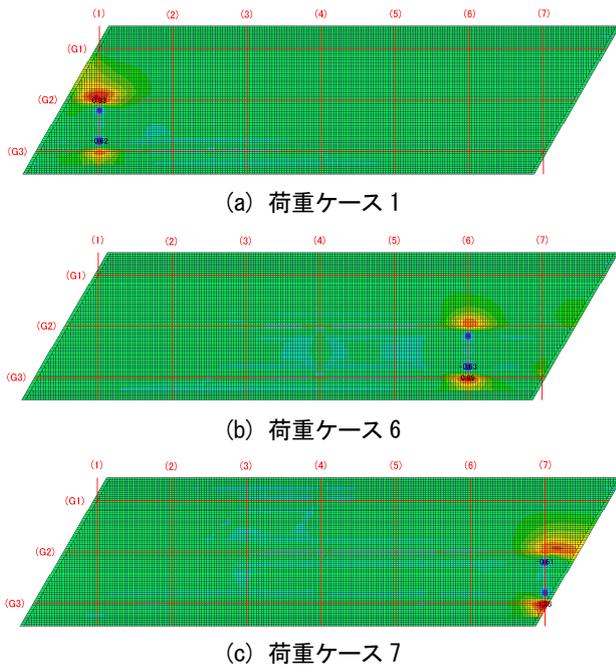


図-11 H橋の床版上面の最大主応力コンター図

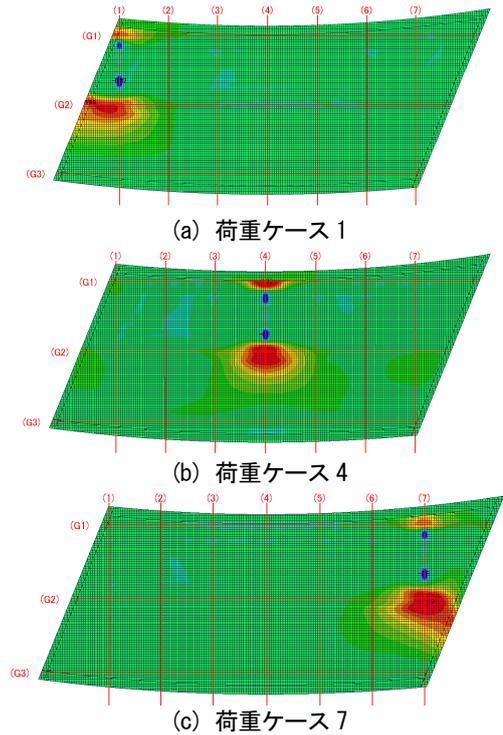


図-12 O橋の床版上面の最大主応力コンター図

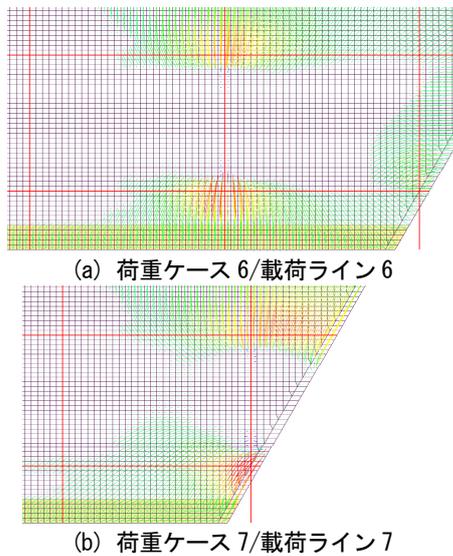


図-13 H橋の床版上面の主応力ベクトル図

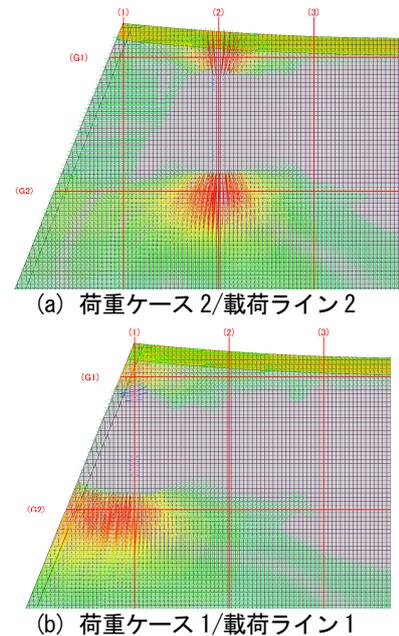


図-14 O橋の床版上面の主応力ベクトル図

平面曲線により地覆の縁端部が主桁に近接したためと考えられる。

3. 4. 3 斜橋床版の斜め配筋の影響

H橋およびO橋の床版上面の主応力ベクトル図を図-13、図-14に示す。斜橋の床版上面の主応力方向は、桁端部では斜角方向に向いているが、桁端部（支点）から離れた位置では支持桁に直交する方向（橋軸直角

方向）となる。この傾向は、H橋とO橋のいずれの解析モデルにおいても同様であった。また、斜角が70～90度の床版では、一般的に斜角に沿って主鉄筋が配置されているため、桁端部（支点）から離れた個所では主鉄筋と主応力方向にずれがあり、これによって床版上面のひび割れ性状が変化することも考えられる。

4. 劣化損傷部位を考慮した RC 床版の耐久性評価の考え方の整理

4. 1 土砂化に関して必要と想定される試験項目

床版の劣化損傷部位は多岐にわたっており、現行の簡略化された床版設計や定期点検における床版下面のひび割れ状況確認のみで耐久性を評価することは困難である。本章では、前述の土砂化の発生傾向に関する資料調査や数値解析的検証をふまえ、床版の部位や条件を考慮した耐久性評価手法の確立に向けた試験項目等について整理を試みた。床版劣化状況の整理の中で構造条件からの土砂化発生状況を考慮し、実施可能と想定される試験内容を表-5 にまとめる。なお、耐久性評価のための試験方法は、輪荷重走行試験機を用いることを基本としているが、静載荷試験や FEM 等による代替評価の可能性についても表中に付記している。試験項目案の概要を下記に示す。

①の土砂化を再現する試験でその発生条件を絞り込むための基礎情報を取得する方法としては、実物大床版供試体を製作し、供試体上面からの浸透水の深さを把握したうえで荷重を繰返し載荷して載荷面直下のコンクリート内部の間隙水圧を計測することが考えられる。載荷面直下で土砂化が再現された場合には切断してその深さを把握する。例えば、この時のコンクリー

ト強度と載荷面の圧力を整理したものと土砂化に至った回数が図化できれば、実橋での要因を設定することで土砂化予測も可能になると考えられる。

また、②も同様に土砂化予測に関係するものであり、既往の研究成果を整理して必要に応じて試験を実施する。既往研究成果としては松井が実施した土砂化再現試験の結果⁸⁾や、ASR 床版の土砂化再現結果⁹⁾等も参考になると考えている。なお、③については、実環境下で供用された床版の構造性能を直接確認する方法であり、今後も継続したデータの蓄積が求められる。

④、⑤、⑥の試験内容は供試体形状や配筋ならびに支持架台をそれぞれの条件に合わせて製作して試験等を実施するもので、個別の条件による耐久性の評価項目となる。

また、各評価項目について、汎用性、将来予測、現象把握、頻度との対応を表-6 に示す。汎用性は試験結果が橋梁形式などの条件を問わず広く適用できるかを、将来予測は交通量などから将来的に土砂化が発生する可能性のある橋梁を抽出するような検討に繋げることが可能かを考慮している。現象把握は、実橋で生じている劣化現象を再現することによって同様の条件における維持管理に効果的かどうかを、頻度は橋梁全体における発生数の大小の観点から検討している。

表-5 土砂化の発生状況と試験内容の整理

整理項目		土砂化発生状況	試験内容	実施可能な試験等		
				輪荷重	静載荷	FEM
経過年数		・竣工後 50 年以上が経過した橋梁において増加	① 土砂化を再現する試験でその発生条件（確率）を絞り込むための基礎情報を取得 ② 水張り環境下での既往試験結果で土砂化-載荷回数曲線を整理 ③ 切り出し床版による輪荷重走行試験での疲労耐久性評価	○	○	
構造条件	平面線形	・斜角を有する橋梁で発生割合がやや多い	④ 斜め方向配筋供試体による載荷試験等での状態把握	○	○	○
	支点近傍	・斜橋では鈍角側の支点近傍に多く発生	⑤ 伸縮装置も含め支点近傍を再現した供試体、支持架台による載荷試験等での状態把握	○	○	○
	横断方向の位置	・桁配置は主桁近傍で多く発生 ・路面配置は中央線付近または車道外側線付近で多く発生	⑥ 主桁近傍を意識した支持架台による載荷試験等での状態把握	○	○	○
	横断勾配	・横断勾配に対する高さの位置関係は上側よりも下側の方が多く発生	水の浸透しやすさの問題であり構造試験の対象ではない	-	-	-

表一6 試験内容と汎用性・将来予測・現象把握・頻度との対応

試験内容	汎用性	将来予測	現象把握	頻度
①土砂化発生条件把握基礎試験	◎	◎	◎	—
②土砂化-載荷回数曲線の整理	◎	◎	○	—
④斜め方向配筋供試体による載荷試験	○	○	◎	○
⑤支点近傍再現供試体による載荷試験	○	○	◎	◎
⑥主桁近傍再現供試体による載荷試験	○	○	◎	◎

凡例：◎評価項目に対し効果的 ○やや効果的

4.2 構造条件を考慮した試験方法（案）

本節では、前述の試験項目案のうち、①土砂化発生条件把握基礎試験、⑤支点近傍再現供試体による載荷試験に関する試験方法案の検討結果を概説する。

4.2.1 土砂化発生条件把握試験

床版内部の土砂化が生じる際の条件として、内部の間隙水圧を計測することで劣化に至る輪荷重の面圧と載荷回数の関係が把握できると考えられることから、文献10を参考に、図-15の間隙水圧の確認試験を検討した。ゴムパッドには荷重載荷面中心に孔を設定し、その中心部に間隙水圧計を固定する。試験では、繰返し載荷開始後に一定の載荷回数毎に静載荷を行って間隙水圧を計測し、面圧との関係を整理する。なお、本試験はこれまでに実績のある手法ではないため、セメントペーストの破壊につながるコンクリート中の間隙水圧が取得できるかどうかの事前確認が必要となる。このため、まずはRCはりによる試験を実施し、床版形状の供試体を用いた試験の予備試験とする。

① RC 梁による事前確認試験

土砂化に進展する水圧作用を把握するために、載荷位置のコンクリート上縁付近の間隙水圧の計測可否をはり供試体で確認することを目的としている。試験方法（案）を図-16に示す。供試体断面は幅×高さが150×200mm、支持間隔1000mmで内部補強鉄筋は13mmである。載荷は、供試体中央で載荷面に設置するゴムパッド内に孔を設定し、その内部に間隙水圧計を固定する。なお、上縁付近の水圧計測を確実なものとするために、間隙水圧計を表面に設置するものに加えて、5mm、10mm埋設する供試体でも試験を実施して結果を比較することが望ましい。また、供試体の製作上の注意点として、コンクリート打込み後は、密封養生して脱型後は水中養生とする。その後、ひずみゲージ貼り付け時は気中表面乾燥状態とするが、その後の間隙水圧計の設置と試験実施は水中で実施できる方法を別

途検討する必要がある。

試験では、曲げに伴うコンクリート上縁の圧縮応力と載荷板から伝達される面圧との関係が間隙水圧に及ぼす影響を観察し、間隙水圧の大きさがコンクリート中のセメントペースト破壊に繋がるかを検証する。荷

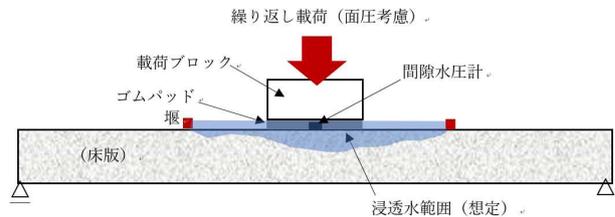
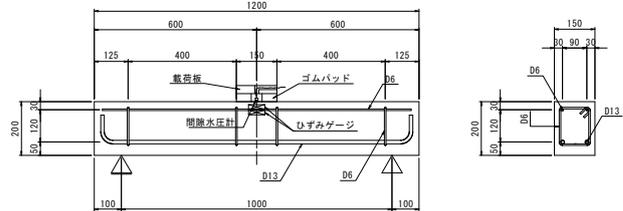
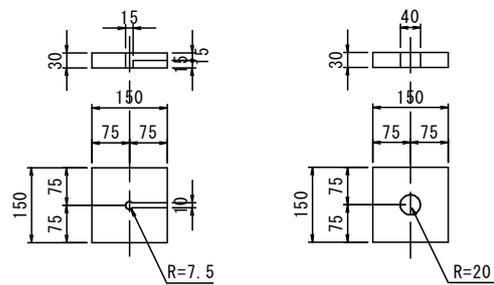


図-15 間隙水圧検証の概念図

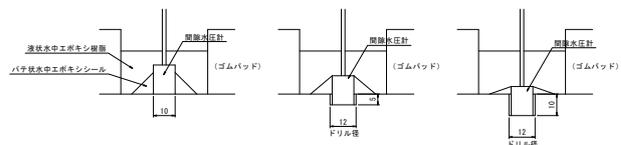


(a) 供試体形状

載荷板 (SS400) ゴムパッド (CR-硬度60)



(b) 載荷板とゴムパッド



(c) 間隙水圧計の設置パラメータ

単位：mm

図-16 間隙水圧確認試験（案）

重は、タイヤ接地圧を考慮して 6.5kg/cm^2 に載荷板の接地面積を考慮し 1.5tonf ($=15\text{kN}$) を上限として数回の繰り返し載荷を実施する。

② 床版供試体での間隙水圧確認試験

RC はりによる予備試験で得られた結果を反映し、実物大床版供試体で載荷位置の上縁コンクリートに発生する間隙水圧を計測する。供試体形状は過去の実験で実績を有する形状や配筋とし、コンクリート強度は試験時に既設床版の設定強度程度となっていることが望ましい。間隙水圧計の設置方法は RC はり試験の結果を踏まえて決定するものとし、載荷板、水張りの範囲等も RC はりの試験結果を反映させる。

載荷荷重は、タイヤ接地圧を考慮して 6.5kgf/cm^2 に載荷板の接地面積（軸方向×直角方向= $20\times 50\text{cm}$ ）を考慮して 6.5tonf ($=64\text{kN}$) を基本とし、繰り返し載荷によるひび割れが安定した時点で試験を終了して載荷位置を中心に切断して供試体上縁部コンクリートの状態を観察するものとする。なお、使用する支持架台は輪荷重走行試験で使用しているものの流用で可能であると考えられる。

4. 2. 2 支点近傍再現供試体による載荷試験

支点近傍再現試験では、剛性の高い伸縮目地部を設定することで実橋を再現する必要がある。実橋の伸縮装置は舗装表面の高さで設置されており、厳密には舗装の施工によって再現することが望ましい。しかしながら、輪荷重走行試験で採用される荷重では舗装本体に先行して損傷が生じる可能性があるため、その設置は好ましくない。よって、床版の目地部分の剛性を確保したうえで自由縁に横桁を設置することで実橋を再現するものとし、目地部の角補強として山形鋼を設置し、頭付きスタッドと鉄筋溶接で固定するとしている。

供試体形状を図-17に、固定方法を図-18に示す。供試体種類は水張り環境の有無で2体を想定しているが、初期載荷を乾燥状態で実施し、その後に水張り環境に移行することでその違いを確認することも可能であると考えている。計測項目は荷重と変位の他に外観状況、特に土砂化発生の有無となる。載荷荷重は、コンクリート強度の影響はあるが、同形状の供試体でこれまでに土砂化の実験で実績を有する荷重として 160kN 程度を目安とする。

4. 2. 3 斜め方向配筋供試体による載荷試験

斜め方向配筋供試体試験では、橋梁設計で斜め配筋とする最小となる斜角 70 度を採用し、角度に平行に鉄筋を配置するものとする。供試体形状を図-19に示す。供試体の平面形状は、斜角に合わせて走行端側短

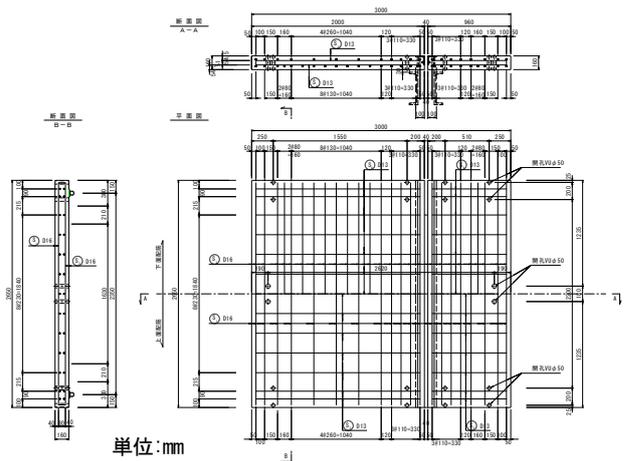


図-17 支点近傍再現供試体形状（案）

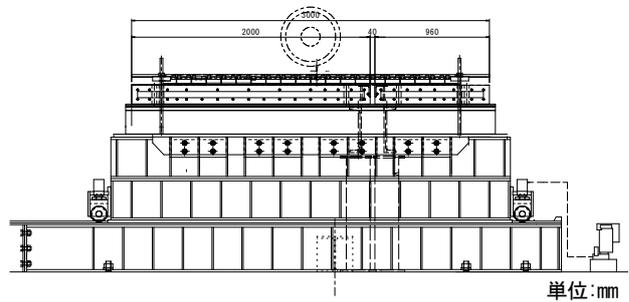


図-18 試験支持架台（案）

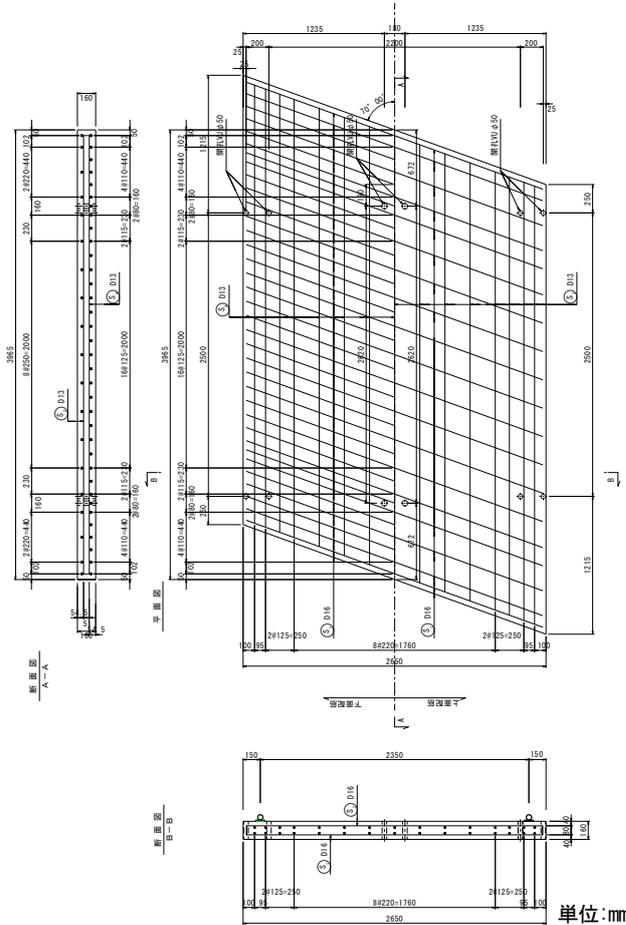


図-19 斜め方向配筋供試体形状（案）

辺で拡幅する形状としている。これは、斜め鉄筋の定着条件を中央と端部で同等とするためであり、支持架台は従来の供試体（走行方向に対して 90 度配筋）と同条件を想定している。また、供試体種類は水張り環境の有無で 2 体を想定しているが、初期載荷を乾燥状態で実施し、その後に水張り環境に移行することでその違いを確認することも可能であると考えている。計測項目は荷重と変位の他に外観状況、特に土砂化発生の有無となる。また、斜め配筋であるため、過去に実施された 90 度配筋の供試体のひび割れ発生状況の対比が重要となる。載荷荷重は、過去に実施された 90 度配筋の供試体でこれまでに土砂化の実験で実績を有する荷重として 160kN 程度を目安とする。

5. まとめ

床版の部位や条件を考慮した耐久性評価手法の確立に向けて、積雪寒冷地における劣化損傷として床版上面の土砂化に着目し、土砂化が顕在化している部位とその劣化損傷機構に関する資料収集・分析や数値解析の検証、土砂化が顕在化しやすい条件に着目した耐久性評価の考え方について検討した。

本研究で得られた知見を以下にまとめる。

- 1) 道内 140 橋における 221 箇所の舗装切削調査結果を分析した結果、土砂化が顕在化しやすい部位や構造条件を明らかにした。
- 2) 土砂化が生じた橋梁をモデル化した 3 次元弾性解析を実施し、床版上面の応力分布等から主桁近傍や斜橋の鈍角側で土砂化が生じる可能性を示した。
- 3) 床版形状、応力状態、滞水範囲等の土砂化が顕在化しやすい条件に着目した耐久性評価の考え方を整理し、各項目に対する試験方法案を示した。

今後は、土砂化に関する点検調査結果を継続的に収集してデータベースを更新するとともに、統計評価等を活用した対策選定に係る性能評価技術への展開を予定している。また、耐久性評価に関する試験項目案については、その妥当性や適用性等を検証することで一般的な性能評価技術への展開を図るために引き続き検討を継続する必要がある。

謝辞

本調査の実施にあたり、国土交通省北海道開発局には多大なるご協力を賜りました。ここに付記し、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 土木研究所ほか：道路橋コンクリート床版の土砂化対策に関する調査研究、土木研究所資料、第 4398 号、2020.
- 2) 澤松俊寿、岡田慎哉、山崎達哉：一般国道 275 号志寸川橋の床版陥没について－防水層を含めた床版の劣化損傷状況の調査－、第 56 回（平成 24 年度）北海道開発技術研究発表会、2013.
- 3) 長谷川寿夫：コンクリートの凍害危険度算出と水セメント比限界値の提案、セメント技術年報 XXIX、pp.248-253、1975.
- 4) 建設省：建設省総合技術開発プロジェクト コンクリートの耐久性向上技術の開発報告書〈第二編〉、pp.277-278、1988.
- 5) 中村拓郎、角間恒、守田稷人、葛西聡、西弘明：北海道における道路橋 RC 床版の土砂化に関する傾向調査、寒地土木研究所月報、第 797 号、pp.2-10、2019.9
- 6) 中村拓郎、守田稷人、葛西聡：北海道における床版上面の土砂化と舗装および床版下面の変状の関係、令和 2 年度土木学会全国大会第 75 回年次学術講演会、CS8-24、2020.9
- 7) 中村拓郎、内田侑甫、安中新太郎：北海道の道路橋 RC 床版の土砂化と舗装の変状の関係、第 11 回道路橋床版シンポジウム論文報告集、pp.167-172、2020.10
- 8) 松井繁之：移動荷重を受ける道路橋 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集、Vol.9, No.2, pp.627-632, 1987.7
- 9) 横山広、中村拓郎、榊谷浩、久保善司：道路橋床版の土砂化対策としての断面修復に関する実験的研究、第 11 回道路橋床版シンポジウム論文報告集、pp.225-230、2020.10
- 10) 大下栄吉、田辺忠顕：コンクリートに発生する間隙水圧の実測とその影響に関する実験的研究、土木学会論文集 No.514/V-27、pp.75-84、1995.5.

A STUDY ON EVALUATION METHOD FOR DURABILITY OF RC DECK SLABS IN COLD REGION WITH CONSIDERATION OF DETERIORATION POINTS

Research Period : FY2017-2020

Research Team : Cold-Region Construction Engineering
Research Group (Structures)

Authors : NISHI Hiroaki, KASAI Satoshi, YASUNAKA Shintaro,
KAKUMA Ko, NAKAMURA Takuro, MORITA Kakuto,
UCHIDA Yusuke

Abstract: This research aims to reconsider evaluation methods for durability of RC deck slabs that takes into account the deterioration points. This paper summarizes the relationship between the slab disintegration and the specifications and service environment of 140 bridges that pavements of upper surfaces were cut for the visual investigation of the RC decks. The stress distribution on the upper surface of the decks from 3D-FEA showed that the slab disintegration may occur near the main girder or on the obtuse angle side of skew bridges. Finally, this study proposed some test methods to evaluate the durability of RC decks based on the results of literature researches and numerical analyses.

Key words: RC deck slabs, durability evaluation method, slab disintegration, deterioration points, finite Element Method