

13. 社会資本ストックをより長く使うための維持・管理技術の開発と体系化に関する研究

研究期間：平成 23 年度～27 年度

プロジェクトリーダー：橋梁構造研究グループ長 松浦 弘

研究担当グループ：技術推進本部（先端技術）、材料資源研究グループ（新材料、基礎材料）、地質・地盤研究グループ（施工技术）、水工研究グループ（水工構造物）、道路技術研究グループ（舗装、トンネル）、橋梁構造研究グループ、寒地保全技術研究グループ（耐寒材料）

1. 研究の必要性

高度経済成長にあわせて加速度的に整備を進めてきた社会資本のストックが、今後、一斉に更新時期を迎えるが、国・地方の財政の逼迫やそれに伴う管理体制の制約等から、従来型の維持管理手法では更新すら容易でないと懸念されている。なかでも、構造物・設備等の重大損傷は人命の安全に直接的に関わることから、安全の確保のため、持続可能で戦略的な維持管理の推進が求められている。

これまでの技術開発においては、各種構造物・設備における損傷・変状に対する精度の高い調査点検技術やその結果に基づく適切な診断技術、合理的な補修・補強技術等の個別要素技術が開発されるとともに、それぞれを有機的に結合し戦略的にマネジメントするシステムが開発されてきた。しかし、今後のストックの高齢化、財政的な制約、安全確保等を踏まえた場合、構造物・設備に求められる管理水準を社会的な重要度等に応じて合理的・体系的に差別化していくことが求められ、こうした管理水準に応じたストックマネジメントを支える要素技術及びそれらを組み合わせたマネジメント技術の開発が求められる。

2. 研究の範囲と達成目標

本プロジェクト研究では、各種構造物・設備について、社会的な重要度等に対応する管理水準に応じた合理的な維持管理の各種要素技術（調査・点検、診断・評価、補修・補強）及びマネジメント技術の開発を行うことを研究の範囲とし、以下の達成目標を設定した。

- (1) 管理水準に応じた構造物の調査・点検手法の確立
 - ・ 土工構造物の破壊モードや進行過程、変形と限界状態の関係性の明確化に基づく健全度評価手法の提案
 - ・ 路面性状の効率的取得技術の提案
 - ・ トンネルの重要度等に応じた管理水準設定に関する技術の開発とそれに基づく点検手法の提案
 - ・ 冗長性の低い橋梁（トラス・アーチ・PC 橋）の崩壊メカニズムを踏まえた調査手法の提案
- (2) 構造物の健全度・安全性に関する診断・評価技術の確立
 - ・ 土工構造物の変形の進行に合わせた安全性・とるべき対応策に関する診断・評価技術の提案
 - ・ ダムの各種劣化・損傷機構の類型化及び安全性に及ぼす影響度を踏まえた劣化・損傷評価手法の提案
 - ・ 既設舗装の構造的健全度評価方法の提案
 - ・ トンネルの安全状態を簡易に診断する手法の提案
 - ・ 橋全体の構造的冗長性を踏まえた橋梁（トラス・アーチ・PC 橋）の耐荷性能、安全性評価手法の提案
- (3) 構造物の多様な管理水準・構造条件・損傷状態に応じた効率的な補修・補強技術の確立
 - ・ 土工構造物の壁面・前面パネルの補修・補強技術
 - ・ コンクリート構造物補修工法の基本的な考え方及び材料・施工管理標準等の提案
 - ・ コンクリート補修材料の国際規格制定の場への成果の提示
 - ・ 幹線道路におけるライフサイクルを見据えた維持修繕手法の提案
 - ・ 生活道路における簡略的な維持修繕手法の提案
 - ・ 道路橋桁端部の腐食環境改善、安全性や施工性に配慮した補修方法の提示

13. 社会資本ストックをより長く使うための維持・管理技術の開発と体系化に関する研究

- (4) 構造物や機械設備における管理水準を考慮した社会的リスク評価技術と、これを活用したマネジメント技術の確立
- ・ 個別の土木機械設備の維持管理手法の提案
 - ・ 関係する複数土木機械設備のグルーピングによる維持管理手法の提案
 - ・ 土木機械設備の総合的維持管理計画の立案手法及びその実施体制モデル・運用技術の提案
 - ・ ダム管理技術者支援のための基本計測項目・箇所選定手法の提案
 - ・ 道路橋の損傷リスク及びリスク発生による影響評価手法の提案
 - ・ 橋梁管理システムへの組み入れを想定した道路橋リスク評価手法の提案

3. 個別課題の構成

本プロジェクト研究では、上記の目標を達成するため、以下に示す研究課題を設定した。

- (1) 土木機械設備のストックマネジメントに関する研究（平成 23～27 年度）
- (2) 擁壁等の土工構造物の管理水準を考慮した維持管理手法の開発に関する研究（平成 23～27 年度）
- (3) コンクリート構造物の長寿命化に向けた補修対策技術の確立（平成 23～27 年度）
- (4) ダムの長寿命化のためのダム本体維持管理技術に関する研究（平成 23～25 年度）
- (5) 既設舗装の長寿命化手法に関する研究（平成 23～27 年度）
- (6) 道路トンネルの合理的な点検・診断手法に関する研究（平成 23～26 年度）
- (7) 落橋等の重大事故を防止するための調査・診断技術に関する研究（平成 23～27 年度）
- (8) 道路橋桁端部における腐食対策に関する研究（平成 23～27 年度）
- (9) 橋梁のリスク評価手法に関する研究（平成 23～27 年度）

4. 研究の成果

本プロジェクト研究の個別課題の成果は、以下の個別論文に示すとおりである。なお、「2. 研究の範囲と達成目標」に示した達成目標に関して、平成 25 年度に実施した研究と今後の課題について要約すると以下のとおりである。

(1) 管理水準に応じた構造物の調査・点検手法の確立

「擁壁等の土工構造物の管理水準を考慮した維持管理手法の開発に関する研究」においては、維持管理手法の構築を目的に実大補強土壁の計測を実施し、1) 長期計測 (TS 測量およびレベル測量) の結果、実大補強土壁の地震後の変形速度は、地震前と比べて小さいことから、変形速度は補強土壁が機能低下を生じているかどうかの判断材料となりうると考えられること、2) 6 枚程度の解析写真枚数の条件では、写真測量は精度良く壁面の変形量および変形モードを捉えることができ、走行速度は誤差に与える影響はほとんどないこと、3) MMS (Mobile Mapping System : 高精度 GPS 移動計測装置) 計測は壁面変形の絶対量は写真測量と比べて誤差が大きいが、変形モードが把握でき、走行速度は写真測量と同様、誤差要因としての感度は低いこと、4) GPR (Ground Penetrating Rader : 地中レーダ) 計測の結果、実大補強土壁の砕石下に生じた盛土の段差の位置や大きさを検出することができ、詳細調査により外形の変化を引き起こした要因を検出する手法となりうることを明らかにし、提案する維持管理手法の有効性を検証した。

「既設舗装の長寿命化手法に関する研究」において、1) 路面を対象に高精度な三次元点群データを取得し、コンターで路面高さを表すことにより路面の変状の面的な把握が可能となること、2) 膨大な延長を管理する上では、仮想平面に対する路面の凹凸体積が定量的な指標となりうること、3) 簡易測定車を用いた路面評価手法としては、振動加速度を RMS (二乗平均平方根) 処理することにより、路面の平たん性等を評価しうることを確認した。

「道路トンネルの合理的な点検・診断手法に関する研究」においては、管理水準に応じた構造物の調査・点検技術について、供用中のトンネルにおける既往の点検結果を比較・分析を行うことにより、供用年数・施工方法の違いによるトンネルの変状の実態、NATM を対象とした地山等級 (支保パターン) と発生している変状との関係について把握した。また、複数の点検員により同一の変状に対する遠望目視を実施し、点検結果のばらつきの程

度を確認するとともに、遠望目視の精度の向上について検討を行い、適切なメンテナンスサイクル実施のためには、個人差による評価のばらつきを解消する必要があることを示した。さらに、点検手法の変状の進展の状況に関するデータを継続的に収集し、はく落の観点から点検頻度を検討するうえでの基礎情報を把握した。

(2) 構造物の健全度・安全性に関する診断・評価技術の確立

「擁壁等の土工構造物の管理水準を考慮した維持管理手法の開発に関する研究」においては、実大模型実験を実施し、1) GPR 計測、電気比抵抗探査、サウンディング、ひずみ計測は、外形の変化を引き起こした要因を検出するうえで有効な手段の一つになりうること、2) GPR 計測、電気比抵抗探査、ひずみ測定の内いずれも、複数回の計測結果の相対値（初期値からの差分値、変化率など）から盛土内部の空洞の進展を把握することができたこと、3) サウンディングは、計測箇所毎の盛土内の状態（水分量や間隙の大きさ等）の違いが計測結果に影響するため、現象の解釈には注意が必要であることを明らかにし、提案する維持管理手法における STEP 2（詳細調査により外形の変化を引き起こした要因を検出する）は本実験で実施した各種計測方法により実行可能であることを確認した。

「ダム の長寿命化のためのダム本体維持管理技術に関する研究」においては、ダム本体等の劣化・損傷事象の類型化に関して、1) 劣化・損傷事象の報告例を既往の点検結果報告の調査により抽出・分類したこと、2) 各事象がダムの安全性に及ぼす影響について定性的に整理したこと、3) 各事象の発生傾向を、事象の種類、発生箇所（部位）、供用年数と進行度の関係などについて分析したこと、4) 各事象の発生原因や複数事象間の関係性に基づき、ダム堤体の劣化・損傷の発生・進行機構として想定すべきものを抽出したこと、5) 長期供用に伴い特にダムの安全性に影響を及ぼすものとして想定すべき劣化・損傷機構についてその類型を整理したうえで、類型化を提案した。また、ダム本体の劣化・損傷が堤体の安全性に及ぼす影響度の定量的評価方法に関して、1) ダム堤体内部も含む効率的な健全度診断技術の1つとして、常時微動などダム堤体の振動計測によりその振動特性の変化から劣化・損傷による影響を検出する手法について、実ダムでの計測と数値解析を通じてその適用性を検討したこと、2) その結果、貯水位や温度の変化による影響を適切に分離することで、ダムの健全度診断に適用できる可能性があること、3) 上記ダム本体等の劣化・損傷事象の類型化で抽出した劣化・損傷の類型のうち、ダム堤体の安全性に影響が大きいと考えられる水平打継面のひび割れを対象とした検討により、ダム堤体の安全性に及ぼす影響を定量的に評価する手法として、ダムの基本設計要件となっている転倒や滑動に対する安定性への影響を構造計算で用いられる安定計算法によって評価する方法、および大規模地震に対する耐震性能照査で適用されるひび割れ進展を考慮した非線形動的解析によってダムの貯水機能への影響を評価する方法を示したうえで、劣化・損傷評価方法を提案した。

「既設舗装の長寿命化手法に関する研究」においては、実大供試体の繰り返し載荷試験の結果より、路面に原則雨水が浸入しない場合はアスコン層の構造的健全度は一定程度低下するも、その後相当程度の繰り返し載荷回数まで安定しうることから、路面からの雨水の速やかな排除や側溝等の排水機能の維持の重要性を改めて示唆するものと考えられることを確認した。

「道路トンネルの合理的な点検・診断手法に関する研究」においては、構造物の健全度・安全性に関する診断・評価技術について、実大規模の覆工コンクリートの載荷試験を行い、音速変化率を把握することによりトンネルの安全状態を把握できる可能性があることを示した。

「落橋等の重大事故を防止するための調査・診断手法に関する研究」においては、トラス橋の撤去部材から切り出したトラス格点部 (P25u) 及び箱断面圧縮斜材 (D52u) について、腐食量計測、載荷試験及び弾塑性有限変位解析を行い、破壊性状及び残存耐荷力を把握するとともに残存耐荷力評価手法を検討した。その結果、ガセットの圧縮耐荷力に着目した評価式として、既往研究で考慮されている圧縮斜材端部の局部座屈に加えて、圧縮斜材端部の両側の2つのガセット自由辺部の影響を考慮した評価式を提案した。同評価式による算定値と既往の試験・解析値との比較を行い、両者の相関が高く、構造諸元の違いによる耐荷力の変化を概ね捉えていることを確認した。

また、撤去 PC 桁の耐荷力評価の研究として、過年度に実施した劣化損傷 PC 桁を用いた曲げおよびせん断載荷試験結果と外観調査および載荷試験後に実施した解体調査による物性値調査結果より損傷過程及び耐荷力の推

定を行い、非破壊検査の各検査項目や検査精度が耐荷力に与える影響について検討を行った。その結果、PC 鋼材及び鉄筋の破断・断面減少を考慮した耐荷力を試算した結果（Case7）、健全な状態と比較して終局モーメントで20%程度の耐荷力低下を確認した。また、腐食を受けた PC 鋼材の伸び残存率の低下の影響を反映させた結果、腐食程度によってはコンクリートの圧縮破壊に至る以前に PC 鋼材の破断が生じることを確認した。

③ 構造物の多様な管理水準・構造条件・損傷状態に応じた効率的な補修・補強技術の確立

「コンクリート構造物の長寿命化に向けた補修対策技術の確立」においては、構造物の要求性能に基づく各種補修工法の選定方法について整理するため、ISO 規格（ISO16311）に示される要求性能をベースに、補修全体に共通するコンクリートの劣化要因に対して、それぞれの要因の劣化レベル毎に実施される一般的な対策工法を取り纏めた。また、補修後に再劣化が生じている不具合事例を調査し、劣化状況、存置環境、工法選択理由、施工方法等から不具合原因を推測して改善策を取り纏めた不具合事例集の作成を行った。各種補修工法において、断面修復工法では、母材との付着強度は、断面修復材の材料物性のみではなく、打継面の凹凸や下地調整の方法によって大きく変化すること、長期的には供試体の端部から徐々に強度低下すること、塩分浸透性はベースとなるモルタルの拡散係数で評価できる可能性があること等を明らかにした。表面被覆工法では、これまでの調査試験から、材料選定に関する信頼性設計や早期再劣化等の不具合を抑制するための施工管理項目を把握した。今後、施工条件の相違による耐久性への影響について追跡調査を進める。さらに、施工環境として重要となる構造物周辺の温湿度の長期観測を続けており、定量的な施工管理項目の設定資料として活用してゆく。ひび割れ修復工法では、注入工法において、ひび割れ内部の低温の影響により注入が停止して未充填部が発生すること、注入によって塩分浸透量は低減することなどが明らかにした。

「既設舗装の長寿命化手法に関する研究」においては、シール材の品質規格（案）として、特殊な試験が必要であった従来の提案に代わり、汎用性のある試験方法による新たな品質規格（案）を提案した。

「道路橋桁端部における腐食対策に関する研究」においては、a) 桁端部の腐食環境を迅速に改善するための腐食環境改善方法の提示、b) 安全に配慮した PC 橋桁端部の調査、補修方法の提示、c) 施工性に優れた鋼橋桁端部の補修方法の提示を目的として、1) コンクリート道路橋桁端部の腐食環境改善に関する調査、2) ドリル削孔が PC 定着体付近の破壊に及ぼす影響に関する調査、3) 鋼道路橋桁端部の腐食断面欠損に対する当て板補強の試験施工を実施した。

その結果、1) コンクリート道路橋桁端部の腐食環境改善に関する調査に関して、対象橋の半数は非排水型の伸縮装置が使用されていたが、伸縮装置の形式に関係なく、ほとんどの橋で伸縮装置からと考えられる漏水が見られ、歩車道境界でゴムによる止水処理がなされていても、ゴムとコンクリートの剥離が生じたりゴムの割れが生じたりしている事例が見られること、止水ゴムの損傷は、経年劣化によるほか、堆雪による負荷や除雪時の水平方向の押し込み荷重による損傷もあると考えられ、早い段階でゴムの止水機能が失われる可能性があることを確認した。また、2) ドリル削孔が PC 定着体付近の破壊に及ぼす影響に関する調査に関して、載荷点直下に PC ダクトを想定した $\phi 70\text{mm}$ の貫通鉛直孔を設けたコンクリート供試体 3 体を製作し、側面に削孔する $\phi 14.5\text{mm}$ のドリル孔の深さを変えた 3 種類の供試体を作製したのち、静的載荷試験を行った結果、載荷に伴い外面に現れたコンクリートのひび割れは、1500~1800kN で見られ始めていたが、ひずみ計測結果等からコンクリート内部ではもっと低い荷重で、ひび割れが生じ始めていた可能性があることを確認した。3) 鋼道路橋桁端部の腐食断面欠損に対する当て板補強の試験施工に関して、平成 24 年度に桁端部における応急対策として桁端部が腐食している鋼道路橋（1970 年に架設された単純鋼合成鉄桁橋 7 径間×支間長 32.1m）で仮設用高力クランプを用いた当て板補強の試験施工及び荷重車による走行載荷試験を行った橋梁と対象として、平成 25 年度（施工から 9 箇月後）に同様の載荷試験を行った結果、断面欠損部の応力集中を著しく軽減する効果、及び鋼桁本体と一体として挙動する効果が持続していることを確認した。また、本橋桁端部の断面欠損部及び当て板補強を再現した鋼桁 1 体を製作し、水平交番載荷試験を行った結果、両断面欠損 R 部ともに、補強前では著しく大きいひずみが -45° の位置付近で生じていたが、当て板後は顕著にひずみが減少したことを確認した。

(4) 構造物や機械設備における管理水準を考慮した社会的リスク評価技術と、これを活用したマネジメント技術の確立

「土木機械設備のストックマネジメントに関する研究」においては、土木機械設備が故障した場合の社会的影響度を評価するために前年度までに作成した、関連する複数の土木機械設備を有するネットワーク型河川地域のモデルについて、シミュレーション計算の結果、流量が大きく振動する場合や、水位が実績と大きく離れるなど不安定な現象が発生する可能性があるため、これを低減するようモデルの改良を行った。また、複雑となっている要素モデルの接続に関して、モデルの構築や変更が容易になるよう検討した。その結果、1次元河道不定流モデルに関し数値計算方法の変更による改良を行い、昨年度までのモデルで生じていた流量・水位の計算結果の変動は概ね解消された。また、この改良により、既往3洪水に関する実績の水位流量観測値とシミュレーション結果の整合性も改善された。

あわせて、本モデルを活用して他河川においても河川GISモデルを構築・利用できるように、モデルを構築するための「実務者向けマニュアル」及びモデルを利用するための「利用者向けマニュアル」を作成した。

「ダムの高寿命化のためのダム本体維持管理技術に関する研究」においては、長期供用ダムでは安全管理のための計測計器の劣化・故障により一部箇所での計測を中止している例がある現状を踏まえ、挙動が安定したダムでも、長期的に安全管理上計測を継続すべき箇所の考え方について実ダムでのケーススタディー結果も踏まえて示した。

「橋梁のリスク評価手法に関する研究」においては、洗掘による橋梁の損傷のリスクを、実際の損傷事例及び橋梁点検結果から調査し、1)洗掘による損傷の事例分析から、局所洗掘の事例が多く確認されたが、集中豪雨等による洪水発生時は、局所洗掘の他に収縮洗掘による損傷リスクが高いこと、2)局所洗掘は、河川内構造物の周りの縮流等を起因とする洗掘であり、流水深・流速・河床材料・構造物形式・洪水流と構造物との迎角等で変化すること、3)通常時は局所洗掘が要因となるが、水衝部付近に構造物がある箇所と、上流部で低水時に流路に橋台や橋脚が近接している箇所で洗掘のリスクが高いこと、4)収縮洗掘は、元の地形や取付盛土等で河道が狭窄され、洪水流の極端な収縮によって洗掘されることから、架橋地点のみでなく、周辺の地形等、地域的な要因が関係していること、5)点検による判定結果に加えて、個別点検調書や架橋条件を考慮し、洗掘リスクを評価する必要があることを明らかにした。

RESEARCH ON DEVELOPMENT AND ORGANIZATION OF MAINTENANCE TECHNOLOGY IN ORDER TO UTILIZE INFRASTRUCTURES FOR LONG DURATION

Research Period : FY2011-2015

Project Leader : Director of Bridge and Structural Engineering Research Group
MATSUURA Hiroshi

Research Group : Construction Technology Research Department (Advanced Technology)
Materials and Resources Research Group (Advanced Materials, Concrete and Metallic Materials)
Geology and Geotechnical Engineering Research Group (Construction Technology)
Hydraulic Engineering Research Group (Dam and Appurtenant Structures)
Road Technology Research Group (Pavement, Tunnel)
Bridge and Structural Engineering Research Group
Cold-Region Maintenance Engineering Research Group (Material)

Abstract : In the past development, independent elemental technologies of maintenance for damages and deteriorations of structures and facilities, such as high-precision survey and inspection, diagnosis based on them, and rational repair and reinforcement, were developed along with the development of strategic management systems that combine them in the organized manner. However, considering the aging stocks, financial restriction, securement of safety, and so forth, rational and organized differentiation of maintenance levels for structures and facilities depending on their social importance is required. And development of independent elemental technologies to support stocks based on their maintenance levels and management technologies which combine them is required. In order to achieve this, following research projects were conducted.

- 1) Research on the systematic technique of utilizing the existing machine plants effectively and attaining extension of life-span
- 2) Development of maintenance for earth structure with consideration for the control level
- 3) Establishment of repair technologies to prolong the service life of concrete structures
- 4) Maintenance technology for extension of lifespan of dams
- 5) A study on method for extension of life cycle about existing pavement
- 6) Research on methodology of rational inspection and diagnosis for road tunnel
- 7) Research on technology of survey and diagnosis in order to prevent catastrophic accident of bridges
- 8) Research on retrofitting for corroded girders around expansion joints
- 9) Research on the risk assessment of bridges

Key words : structures, facilities, maintenance, maintenance level