

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 24 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、土槽の中に作製したジオテキスタイル補強土壁模型に、土槽を傾斜させることで水平地震力を与え、地震の影響を受けた補強土壁が中規模地震動または大規模地震動を再度受けた補強土壁の限界状態および性能保持について確認にした。その結果、地震の影響を受けた補強土壁は、同程度の地震動レベルまでの作用を受けても、耐え得る性能まで有することを確認した。盛土材に粗粒土を用いた場合には、終局変位までの余力を有しているものと考えられる。一方、細粒土含有率を多く含む細粒土においては終局変位までの余力はほとんどなく、突如崩壊する挙動を示した。また、本実験で生じた変形モードにおいては、壁面の変状がパネルの傾斜に大きく影響しており、特に1段目のパネルの傾斜が全体における変状の大半を占めることを確認した。

「既設舗装の長寿命化手法に関する研究」において、路面性状の効率的取得技術に関して民間各社と共同研究を実施しているが、その一つとして、MMS (Mobile Mapping System) を用いた路面管理手法について検討を行っている。具体的には、路面を対象に高精度な三次元点群データを取得し、それを自動処理することにより省力化しながら路面の各種データを取得するものである。いわば、路面を線ではなく面として捉えた形としての舗装の評価手法のあり方を検討している。その結果、路面管理用に改良した MMS を用いて路面の三次元点群データを取得することにより、路面の高さ方向の変動を把握することが可能であることが分かった。

「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、覆工の材質劣化によって引き起こされることが多いき・はく落に対して、定量的に健全度を評価できると考えられる評価指標を抽出するとともに、実際のトンネルにおいて、変状の状況に関する観察・計測を行い、変状の進展に関するデータを収集し、はく落の観点から注目すべき変状現象区分を把握した。平成 24 年度は、前年度に提案した評価指標を用いて、新たに 2

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

トンネル 99 事例の変状を対象にした評価を行い、うき・はく落の変状に対するこれらの点検指標の適用性について検証した。その結果、通常の遠望目視による評価を行った場合は、近接目視時の評価点と大きく異なる結果となったが、遠望目視点検の改善案の一つとして、遠望目視の際に各変状の写真を撮影し、変状箇所を拡大写真を使用した再評価を行った結果、判定区分に応じた顕著な傾向は認められないが、変状の程度が最も悪い状態の 3A の判定区分の変状については評価点 3 程度以上と考えた場合、一部変状で下回るものの概略的な判定が可能となることが分かった。

「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、劣化損傷した橋梁部材を対象として調査・検査手法の検証を行った。腐食劣化を有する鋼トラス橋格点部を対象とした腐食量計測を実施し、腐食が進行しやすい箇所や腐食による減肉量について詳細な調査を実施した。また、塩害により劣化したポストテンション PC 桁を対象とした PC 鋼材の付着切れに着目した、載荷に伴う PC 鋼材の引き込み量を確認した。その結果、レーザー変位計を組み込んだ腐食形状計測装置を用いて鋼トラス橋格点部の腐食量計測を行い、解析モデルへ組み込むことの適用性を確認した。また、PC 鋼材の腐食や引き込み本数と曲げ耐力の相関を確認した。

(2) 構造物の健全度・安全性に関する診断・評価技術の確立

「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 の 劣 化 ・ 損 傷 が 堤 体 の 安 全 性 に 及 ぼ す 影 響 度 を 定 量 的 に 評 価 す る た め、ダ ム 堤 体 の 健 全 度 診 断 手 法 の 1 つ と し て、常 時 微 動 計 測 の 適 用 性 に 関 し て、貯 水 位 や 温 度 の 変 化 に よ る 影 響、堤 体 の 補 強 対 策 に よ る 影 響 を 検 討 し た。そ の 結 果、水 平 打 継 面 沿 い の ク ラ ッ ク に つ い て は、低 標 高 部 に 発 生 し た 連 続 し た ク ラ ッ ク ほ ど 常 時 微 動 計 測 で 検 出 し や す い 一 次 固 有 振 動 数 の 変 化 (減 少) が 大 き く、検 知 し や す い と 考 え ら れ る こ と、逆 に 高 標 高 部 の ク ラ ッ ク や 連 続 性 に 乏 し い ク ラ ッ ク は 相 対 的 に そ の 検 知 が 難 し い こ と が 分 か っ た。ま た、堤 体 表 面 か ら の 劣 化 の 影 響 が コ ン ク リ ー ト の 剛 性 の 低 下 と し て 表 れ る こ と を 想 定 し た 解 析 よ り、コ ン ク リ ー ト の 剛 性 が 低 下 す る 深 さ (劣 化 深 さ) が 大 き く な る ほ ど、ま た 弾 性 係 数 の 低 下 量 が 大 き い ほ ど 固 有 振 動 数 の 変 化 (減 少) が 大 き い こ と が 分 か っ た。一 方、実 ダ ム で の 常 時 微 動 計 測 で は、貯 水 位 や 温 度 に よ り 堤 体 の 固 有 振 動 数 が 変 化 す る 傾 向 が 明 瞭 に 捉 え ら れ た。な お、堤 体 補 修 を 行 っ た ダ ム で の 補 修 前 後 の 比 較 を 行 っ た が、限 ら れ た 計 測 か ら 補 修 に よ る 影 響 (効 果) を 評 価 す る の は 困 難 で あり、ダ ム の 振 動 特 性 を 常 時 微 動 計 測 か ら 評 価 す る に は 一 定 期 間、一 定 の 頻 度 ま た は 連 続 的 な 計 測 を 行 う こ と が 重 要 で あ る こ と が 分 か っ た。

「既設舗装の長寿命化手法に関する研究」においては、土圧計等各種計測機器を埋設した舗装の実大供試体を作製し繰り返し載荷実験を行った他、実道における既往の FWD たわみ量調査結果の逆解析による舗装各層の健全度調査を引き続き行った。その結果、実大供試体の繰り返し載荷試験の結果より、舗装体への繰り返し載荷を通じたアスコン層・路盤には疲労ダメージが蓄積され、その傾向は FWD たわみ量の逆解析から算出される弾性係数により把握可能であること、舗装体への繰り返し載荷を通じたアスコン層・路盤の疲労蓄積傾向は、路面への雨水の進入の有無等により差が生じることが分かった。また、実道における補修履歴・路面性状データの分析より、切削オーバーレイの繰り返し数が増加するに伴い補修後の供用性の推移が低下する傾向があることが分かった。

「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、トンネルの覆工に応力が発生しているかを簡易に判定し、致命的な損傷に至る可能性があるか否かを判断する手法の検討として、模型実験によるコンクリート内の複雑な応力状態下における音速変化率を測定した。その結果、複雑な応力状態下においても音速変化率が変化することが明らかとなった。

「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、平成 24 年度は前年度に引き続き、腐食劣化の生じた鋼トラス橋格点部を対象に載荷試験及び FEM 解析を行い、破壊性状及び残存耐力を把握するとともに、腐食した橋梁部材の耐荷力評価手法について検討した。また、塩害により劣化したポストテンション PC 桁を対象として、載荷試験により破壊性状や残存耐力について把握するとともに、せん断耐荷力評価手法や非破壊検査手法の適用性について検討した。その結果、鋼トラス橋格点部圧縮着目の載荷試験では 3 体とも斜材の局部座屈により最大耐力を迎えた。また、解析と同様に腐食減肉を平均残存板厚として考慮し、斜材の座屈に対する算定値を求めた結果、いずれの試験体においても試験結果と概ね一致した。次に、引張着目の載荷試験では、3 体とも斜材にき裂が発生し、いずれの試験体も、載荷開始後ある程度一定の勾配であるが、

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

その後勾配が変化し、この荷重は斜材のガセットと重ならない断面またはリベット孔位置の断面に対して腐食量計測から算出した平均断面積と降伏点から求めた算定値と概ね一致した。実施した試験では、荷重の増大に伴い、端部からき裂が発生・進展するような破壊挙動となり、最大荷重については、腐食量計測により求めた断面積と引張強さから求めた算定値よりも小さくなったが、き裂による断面欠損を考慮することで算定値と試験値は概ね一致したことが分かった。

撤去 PC 桁の荷重試験結果、桁切断前の本試験体において、残存プレストレスは各部位により異なり、外観の損傷度と残存プレストレスとの関係にある程度の相関が確認された。ワイヤソーにより切断した本試験体のプレストレス損失範囲は、切断面から 2m 程度であり、支間中央部におけるプレストレスの損失は確認されなかった。定着を切断した荷重試験の破壊形態は、脆性的な破壊に至らず、ある程度荷重を保持したまま変位が増加した。曲げひび割れ発生荷重までは、一部の PC 鋼材を除き、付着切れに起因する PC 鋼材の引き込みは確認されず、付着によりプレストレスが保持されていた。付着に着目した荷重試験における曲げひび割れ発生荷重およびせん断ひび割れ発生荷重は、切断前の荷重試験にて確認された曲げひび割れ発生荷重から推定したプレストレス減少率を鋼材腐食による断面減少率と仮定した場合の計算値と概ね一致したが、最大荷重は計算値の 8 割程度となった。付着に着目した荷重試験の最大荷重は、PC 鋼材の実断面減少率を用い、引き込みが確認された PC 鋼材の曲げ破壊耐力を 50%に低減することで再現できることが分かった。

(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、各補修工法における要求性能等に関する基本的な共通事項の整理を行うため、品質管理基準や試験法等の現状を調査し、検討項目の整理を行うとともに現地調査等による不具合事例や施工環境条件等の整理を行った。また、再劣化抑制のための室内試験、長期耐久性に与える影響を確認するための暴露試験や現地観測を開始した。平成 24 年度は、断面修復材が実際に施工されるコンクリート構造物の環境（温度）条件を把握することを目的にコンクリートブロックの暴露試験を開始した。また、断面修復材の強度、耐久性および付着性能に関する実験を行い、要求性能の設定方法や品質試験方法を策定するための基礎データを得た。また、表面被覆工法の施工管理の信頼性向上調査として、前年度に引き続き室内試験による不具合発生事由の検証実験を行った。さらに、施工条件を変化させた試験体の暴露 1 年後の追跡調査を行った。あわせて、重要な施工環境因子である構造物周辺の温湿度評価を、測定箇所を追加して観測中である。ひび割れ注入工法において、要求性能等の整理と不具合発生要因を検証するための現地充填率調査を行うとともに、注入充填率が凍害劣化に及ぼす影響について室内検証実験を行った。さらに、注入後の耐久性等を検証するため、異なる環境条件で注入充填率を変化させた供試体の暴露試験を開始した。ひび割れの状態に応じた工法・材料選定が十分に成されていない事例もあることや注入材の種類によって注入不足状況が異なること、また、注入不足が凍害による再劣化に大きく影響することなどが分かった。

「既設舗装の長寿命化手法に関する研究」においては、幹線道路のライフサイクルを見据えた維持修繕手法の提案に向け、実道における路面性状データの分析を通じ、補修工法等がその後の供用性の与える影響について確認した。その結果、地方整備局の補修履歴・路面性状データの分析より、切削 OL の繰り返し数が増加するに伴い、補修後の供用性の推移が低下する傾向があることが分かった。

「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、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、安全に配慮した PC 橋桁端部の調査、補修方法の提示、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、平成 24 年度は、コンクリート道路橋に用いる簡易排水装置の試作と実橋での試験施工、PC 定着体付近におけるドリル削孔が周囲の応力状態と破壊性状に及ぼす影響に関する荷重試験、及び鋼道路橋桁端部の腐食断面欠損に対する当て板補強の実橋での試験施工を実施した。簡易排水装置の設置に伴い、今後、継続的に同様の調査を行い、漏水の有無、塩化物量の変化を調査する予定である。PC 定着体付近におけるドリル削孔の影響に関して、ドリル孔先端(奥)における応力集中が、ひび割れ発生に影響したことが考えられる。また、ひび割れ発生は、荷重-変位に若干の影響を及ぼしていると考えられる。有効プレストレスへの影響を含めて、さらに測定データの分析を進める予定である。また、鋼道路橋桁端部の当て板補強に関して、当て板施工後の断面欠損部のひずみは施工前に比べ走行荷重試験、24 時間応力頻度測定ともに大幅に減少する結果となり、比較的

ボルト本数が少なく仮設用の高力クランプを併用した当て板固定であっても、活荷重に対する補強効果が見られた。

(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、前年度に引き続いて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を CommonMP で作成し、排水機場のポンプによる排水機能が喪失した場合の越水による被害を、作成したモデルとはん濫モデル (NILIM) を接続することによりシミュレーションを実施し、CommonMP-GIS でその結果を確認する手法について検討した。その結果、実際の出水現象に近い水位・流量をシミュレーションすることが可能となり、また、ネットワーク内の各排水機場の相互補完機能の確認や社会的に与える被害の算定が可能になった。これにより、各々の機械設備の社会的影響度を評価する手法の構築に一定の目処をつけることができた。しかし、機械設備の社会的影響度の評価精度を高めるためには、本研究で構築したモデル及びソフトウェアによるシミュレーション精度の向上が求められ、そのためには、最新の河道断面形状や出水時の流量データなどの河川管理データの整備及びモデル・ソフトウェアの改良が必要であることが分かった。

「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、供用開始後長期間経過したダムにおいても計測を継続すべき箇所を選定の考え方について、過年度に整理した「長期供用ダムにおいても計測を継続すべき箇所等の選定の考え方 (案)」について、実ダムへの適用を想定したケーススタディーを行い、適用性の検証を行った。その結果、「考え方 (案)」を実ダムに適用することで、長期的に継続して計測を実施すべき箇所を基本的には適切に抽出できることがわかった。ただし、「考え方 (案)」に明記されていないいくつかの事項は、追記等の必要性があることが分かった。

「橋梁のリスク評価手法に関する研究」においては、平成 24 年度は、損傷発生頻度が高い部材 (以下、「高リスク部材」) について、8 つの地方整備局が管理する約 21,000 橋の道路橋の定期点検データのマクロ分析を行い、高リスク部材の抽出を行うとともに、橋全体系に生じた事態が社会に及ぼす影響評価として、橋梁の損傷により通行止めとなった箇所の社会的損失の算出を行った。その結果、鈹桁の疲労亀裂や RC 床版の疲労、塩害による劣化等に関して、特定の年代に施工されたものが高リスク部材に該当することが分かった。また、橋全体系に生じた事態が社会に及ぼす影響評価に関して、社会的損失は交通量、迂回距離の影響が大きいことが分かる。特に迂回路が極端に少ない中山間地域では、迂回距離が大きくなること、長期にわたる規制が続くことで、社会的損失が非常に大きくなることが分かった。

**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