

領域 8 : 大切な道路資産を科学的に保全する

道路橋管理におけるアセットマネジメント活用に関する調査検討

Study to utilize asset management for road bridges

(研究期間 平成 29 年度～31 年度)

道路構造物研究部 橋梁研究室
Road Structure Department
Bridge and Structures Division

主任研究官 宮原 史
Senior Researcher Fumi MIYAHARA
交流研究員 林 佑起
Guest Researcher Yuki HAYASHI

室長
Head
主任研究官
Senior Researcher
交流研究員
Guest Researcher

白戸 真大
Masahiro SHIRATO
桑原 正明
Masaaki KUWABARA
松村 裕樹
Yuki MATSUMURA

NILIM studies how to utilize inspection data to make bridge management more strategic and rational. Using periodic bridge inspection data, NILIM has modeled mean variant deterioration characteristics as a function of applied design specifications, materials types, structural element types, surrounding conditions and so on. NILIM also has shown that such deterioration characteristics will affect a huge variation in the life cycle costs (LCC) estimation. This study tries how to utilize the LCC estimation with a large uncertainty in actual road bridge management.

〔研究目的及び経緯〕

道路構造物の長寿命化や合理的な維持管理の実施にあたっては、点検データ等を活用し、メンテナンスサイクルを考慮した計画的な管理が期待されている。各道路管理者は、それぞれの点検データ等を活用し、計画を作成することが必要である。

国が管理する道路橋では、平成 16 年以降、定期点検において、従来の部材単位での診断に加え、さらに細かく分けた要素単位での客観的かつ詳細な状態記録を蓄積してきている。過年度までに、国総研では、国以外の道路管理者も参考にできるように、これらのデータに基づく道路橋の劣化特性を分析してきた。その結果、個々の構造物の劣化には大きなばらつきが存在すること、また、ある道路橋を仮定し、劣化のばらつきを考慮したモンテカルロシミュレーションを行い、ライフサイクルコスト（以下、LCC と呼ぶ）の試算を行ったところ、補修の時期や LCC の計算値は大きくばらつくことを明らかにした。LCC の算出は不確実性が大きく、その絶対値のみを指標として維持管理計画の有効性や維持管理結果の効果を測ることには、限界があると考えられ、道路管理者が LCC 算定にあたっての限界を考慮したうえで、適切な維持管理計画を策定できるようにしていく必要がある。

そこで、本研究では、管理する道路橋の数や特性、利用できる点検記録の質、量が異なっても、それらに応じた状態予測のばらつきも考慮するなど、維持管理体制に応じた LCC 算定にあたっての留意点や活用の仕方

を明らかにすることを目的としている。今年度は、長寿命化計画の効果としての道路橋の現状のパフォーマンス、維持管理の結果としてのアウトカムを表す指標の検討に先立って、道路のアセットマネジメントにおいて近年パフォーマンス評価やアウトカム評価が導入された米国において、計画策定等に用いられている指標を調査した。

〔研究内容及び成果〕

米国では、2012 年 7 月に施行された陸上交通授権法「MAP-21 (Moving Ahead for Progress in 21st Century Act)」において、各州は実施目標に対するパフォーマンス指標及びアウトカム指標と、そのターゲットと進捗を連邦政府に報告することが定められた。2013 年 6 月に連邦道路庁と AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) の共著で、計画策定や評価のための実務ガイドライン (AASHTO Transportation Asset Management Guide) が発刊された。そこでは、LCC は各州の内部で予防保全に予算を充当することの正当性を説明する指標としては重要であると位置づけられている。しかし、施策を行った結果としてのパフォーマンス指標又はアウトカム指標としての有効性を表す指標として用いられることが少ないとも指摘されている。その理由については明確に述べられていないことから、各州における指標の事例の調査を通じて、理由についても考察することにした。

(1) コロラド州の事例

コロラド州では、NBIS (National Bridge Inspection Standard) に基づく点検で「構造的欠陥」と分類される橋の床版面積の、管理橋の床版面積に対する比率を指標とし、推計した将来の指標値の推移を公表していた。なお、米国では連邦法において、NBIS に基づく点検で床版、上部構造、下部構造の別に 0 から 9 の 10 段階での状態評価 (0 が最も良く、9 が最も悪い) を NBI (National Bridge Inventory) に登録することが義務付けられている。すなわち、コロラド州において公表に用いられている指標は、NBI へ登録するために取得している最低限のデータのみを用いて追加的なデータ取得無しで算出可能な指標である。

公表されている試算の例を図 1 に示す。本事例では、将来の各年度の予算制約を、現時点の予算で一定の場合と、上位下位それぞれ 2 通りの計 5 通り設定し、補修が必要とされる橋の床版面積比率の経年変化を試算している。個別の橋ごとではなく、管理橋全体に対する比率として扱われていること、また、複数の予算制約条件で比較されていることが特徴である。

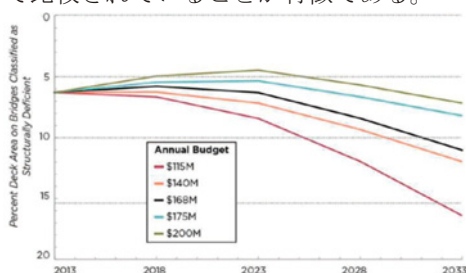


図 1 コロラド州の事例

(2) カリフォルニア州の事例

カリフォルニア州では、NBI に登録するために取得しているデータから算出可能な状態評価指標 SR (Sufficiency Rating) では州の維持や補修補強のパフォーマンス指標への要求を満足しないことから、州独自に定めた BHI (Bridge's Health Index) を指標として、推計した将来の指標値の推移を公表していた。BHI は、初期時点での橋の価値 (金額) に対する評価時点での橋の価値 (金額) の比率で定義されるものである。NBIS における状態評価指標は、橋ごとに、各部材種別に 1 つの値で代表されるものであるが、州は BHI 算出のため、NBI に登録する情報よりも細かい部材別に、かつ損傷程度ごとの面積比等も記録している。BHI では橋の価値は貨幣単位で表されるため、複数の橋で集計すればネットワークとしての BHI も算出可能とされている。

公表されている計画の例を図 2 に示す。本事例では将来の各年度の予算制約を 4 通り設定し、BHI の平均値の経年変化を試算している。この例においても、複数の橋をまとめた結果として公表しており、個々の橋

の維持管理の最適化までは扱っていない。また、予算額については、具体的な額ではなく、定性的な表示になっている。なお、州では、州内の地域間での予算配分を BHI に加えて地域の大きさや橋の混雑度合いなどを加味して決定する方法を開発中と示されていた。

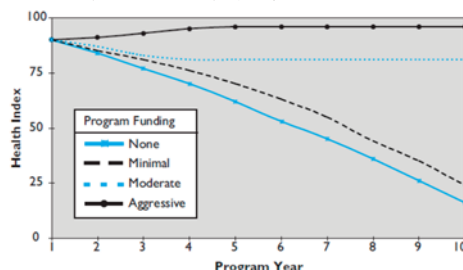


図 2 カリフォルニア州の事例

(3) アイダホ州の事例

アイダホ州では、NBIS に基づく点検で Good (0 点～9 点の 7 点以上) に該当する床版の面積比率を指標としていた。NBIS に基づく点検で取得するデータを活用する点はコロラド州と同様である。高速道路においては Good が 8 割以上を占めることなど目標水準を設定し、これに対する現状の達成度合いを公表していた。

(4) 考察

以下の点が米国における指標の特徴と考えられる。

- ・予想されるコスト削減額よりも橋の状態そのものが指標にされていること (カリフォルニア州の場合も、指標の算出では金額そのものをパラメータにしているが、算出された指標は橋の健全性を表すものとされている)
- ・コストや個別の橋の管理の最適化という観点では指標が示されておらず、管理橋全体としての傾向に着目されていること

なお、カリフォルニア州の BHI は算出にあたって補修補強コストの算出が必要であり、その金額は、算出上の仮定に大きく依存する。しかし、補修補強コスト同士の比率を取り無次元化することで、コストの算出方法にできるだけ依存しない指標となるように工夫しているものと考察される。

【今後の課題】

各道路管理者が管理する道路橋の数、構成、また、管理する道路の役割は異なる。また、活用できる点検データの質や量も異なる。今回得られた知見も踏まえて、道路管理者が点検データを活用した道路橋の維持管理計画の策定や、状態予測を行うにあたっての各種指標の活用方法の提案に向けて、活用場面を想定した指標や LCC のばらつきに関する試算を充実する必要がある。

【成果の活用】

道路管理者向けのアセットマネジメントに関するテキストなど計画策定に資する参考資料に反映予定。

道路橋の補修・補強設計法に関する調査検討

Study on Design Standards for Repair and Reinforcement Works of Highway Bridges

(研究期間 平成 28～31 年度)

道路構造物研究部 橋梁研究室

Road Structures Department

Bridge and Structures Division

主任研究官 猪狩 名人

Senior Researcher Meito Igari

主任研究官 宮原 史

Senior Researcher Fumi Miyahara

交流研究員 高山 文郷

Guest Research Engineer Fumisato Takayama

室長

Head

主任研究官

Senior Researcher

交流研究員

Guest Research Engineer

交流研究員

Guest Research Engineer

白戸 真大

Masahiro Shirato

前田 文雄

Fumio Maeta

中邨 亮太

Ryota Nakamura

横田 剛

Go Yokota

Numerical studies for concrete hollow slab bridges have been conducted to evaluate the potential of fatigue fracture in concrete. The numerical results have indicated that the durability of concrete above the hollow sector can be a fraction of concrete depth, used to void spacings, and void diameters, and the potential could increase with decrease in concrete depth above the void.

〔研究目的及び経緯〕

我が国の道路橋は高齢化の進展に伴い様々な劣化や損傷の事例が報告されており、既設の道路橋に対する補修・補強の必要性は今後も増加が見込まれる。一方、補修・補強設計は道路橋方書だけでなく、様々な技術図書を参考に行われており、既設構造物特有の事項を反映した設計基準や耐力力評価の標準的な考え方・留意点の充実が求められている。

鉄筋コンクリート中空床版橋では、ボイド上部の舗装の異常をはじめ、踏み抜きなどの損傷事例が報告されている。これらの要因の一つとして、コンクリート打設時のボイド型枠の変形や浮き上がりによって、ボイドのかぶり設計値を下回り、輪荷重によって損傷する可能性が挙げられるが、その損傷メカニズムは明らかとなっていない。損傷メカニズムが把握できれば、補修・補強設計に役立てることができるだけでなく、補修・補強の必要性や優先順位付けに役立てることができると思われる。

そこで、本年度は、鉄筋コンクリート中空床版橋の標準的な断面に対して有限要素解析（弾性 FEM 解析）を用いて輪荷重を載荷した際の応力分布を把握し、設計における応力状態の仮定との乖離がないか検証するとともに、ボイド周辺に生じるコンクリートの破壊形態や、損傷が進むメカニズムについての研究を行った。

〔研究内容及び研究成果〕

1. 弾性FEM解析による応力分布の把握

(1) 概要

本研究では、鉄筋コンクリート中空床版橋の損傷事例からボイド上面の変状（土砂化、疲労劣化等）に着目した。この変状はボイドの浮き上がりやボイド型枠耐力不足の影響、輪荷重の繰り返し載荷による疲労の影響等の様々な要因が考えられる。

ボイド上面に輪荷重が作用する場合、その力は上面からウェブに圧縮場として伝達されてアーチアクションあるいはストラットタイが形成され、この耐荷機構により鉄筋コンクリート中空床版橋の断面は高い抵抗力を有すると考えられる。このアーチアクションの形成にはボイドかぶり厚、ウェブ幅、ボイド径等が影響すると考えられ、これらをパラメータとした。

(2) 解析結果

表-1 に示す二次元弾性 FEM 解析で得られた主応力分布より、輪荷重載荷時の応力伝達機構は、設計上の仮定となるアーチアクションに似た傾向を示しており、各部でストラットタイによるトラスが形成される様子がわかる（図-1）。表-1 の上段に示す圧縮ストラットの形成に着目すると、ボイドのかぶり厚が薄い Case ①-4 では、図-1 に②で示す圧縮ストラットが他のケースに比べて明確に形成されており、同図 B および C で示す主引張応力が大きくなる傾向がある。これより、ボイドかぶりおよびウェブ厚が薄い断面等、圧縮に対する有効幅が狭くなる断面形状では、輪荷重載荷によ

り主版上面 (B) や隣接ボイド側面 (C) に、設計では仮定していない引張力による損傷が生じる可能性がある。また、輪荷重載荷直下においては、主版上面 (アーチクラウン部) およびボイド直上 (A) は、常に圧縮および引張領域となり、繰り返し荷重作用下において疲労損傷が生じる可能性があることが分かった。

表-1 二次元弾性FEM解析得られた主応力分布

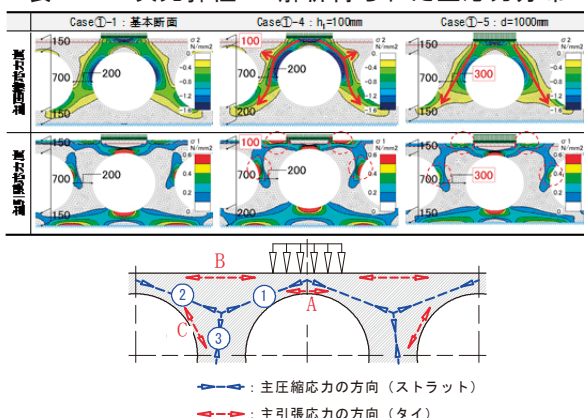


図-1 ボイド直上に輪荷重を載荷する場合の応力伝達機構

2. 累積損傷度による疲労劣化の評価

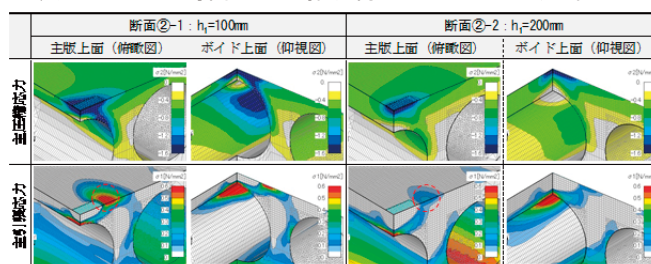
(1) 概要

1. を受け、疲労損傷が生じる可能性があると考えられる断面 (断面②-1: 圧縮に対する有効幅が狭い断面を代表してボイドかぶりの薄い断面) と、標準的な鉄筋コンクリート断面 (断面②-2) において、損傷メカニズムを把握するために、繰り返し載荷によるコンクリート疲労の影響を考慮した三次元弾性 FEM 解析を用いて検討した。

(2) 主応力分布

表-2 は、各断面について 1 回目の輪荷重載荷時の三次元弾性 FEM 解析により得られた主応力分布を示したもので、表-1 の二次元弾性 FEM 解析と同様にアーチアクションの形成が見てとれる。特に、表の下段に示す主引張応力分布に着目すると、主版上面の主引張応力度の値はかぶり厚が薄い断面②-1 の方が大きいことがわかった。

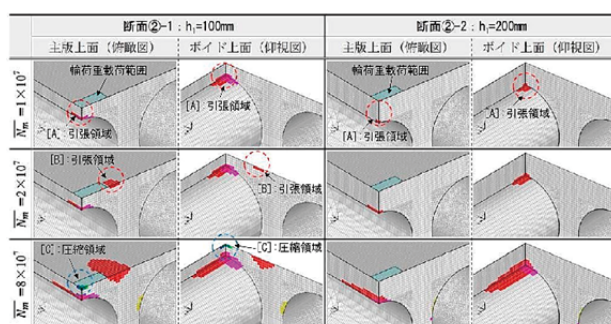
表-2 三次元弾性 FEM 解析得られた主応力分布



(3) 想定される破壊形態

表-3 は、ボイド上部の損傷要素の増加傾向を示したものであり、断面②-1 および②-2 ともにボイド上面 (表中[A]で示す引張領域) が最初に損傷し、走行回数の増加に伴ってその範囲が徐々に広がる傾向がわかる。また、かぶり厚の薄い断面②-1 では、②-2 に比べて早期に主版上面 (表中[B]で示す引張領域) に損傷が生じ、その後、繰り返し載荷回数 $\overline{N}_m = 8 \times 10^7$ 回において載荷直下の圧縮領域 (表中[C]) のコンクリート要素が破壊した。一方、かぶり厚が厚い断面②-2 では、 $\overline{N}_m = 8 \times 10^7$ 回においても主版上面の損傷は生じないことが分かった。

表-3 想定される破壊メカニズム



3. まとめ

鉄筋コンクリート中空床版橋のボイド上面の変状 (土砂化、疲労劣化等) に着目し、その損傷メカニズムを定性的に評価した。また、疲労性状はアーチアクションやストラット・タイの形成に関連するボイドかぶりやボイド間隔、ボイド径等のパラメータが影響する可能性を示すことができた。これらの結果は、構造物の設計図や非破壊検査などによりこれらのパラメータが既知であれば、補修・補強の優先順位付けにも役立てることができると考えられる。

【今後の課題】

今後、これらのパラメータや検証ケース数を増やしてデータを蓄積・整理すること、実験等による累積損傷度評価の精度向上により基礎データを増やすことが重要である。

【成果の活用】

既設橋の補修・補強に関する技術基準に反映する予定。

補修補強設計に係わる部分係数に関する調査検討

Study on partial factor design for existing bridges

(研究期間 平成 27-29 年度)

道路構造物研究部 橋梁研究室

Road Structures Department

Bridge and Structures Division

主任研究官 猪狩 名人

Senior Researcher Meito IGARI

研究官 河野 晴彦

Researcher Haruhiko KOUNO

交流研究員 高山 文郷

Guest Research Engineer Humisato TAKAYAMA

室長

Head

主任研究官

Senior Researcher

交流研究員

Guest Research Engineer Ryota NAKAMURA

交流研究員

Guest Research Engineer Go YOKOTA

白戸 真大

Masahiro SHIRATO

宮原 史

Fumi MIYAHARA

中邨 亮太

Ryota NAKAMURA

横田 剛

Go YOKOTA

The present study has been developing the partial factor design format for the structural assessment of existing road bridges. In the earlier year, the authors conducted the Monte Carlo simulation considering a stochastic loading model based on the B-C model and proposed a concept that the load factor and load combination factor should be divided. And the authors have proposed a practical method to modify load factor values based on behavior measurement data. This year, the authors conducted dynamic analysis on several bridges and tested the influence on the seismic performance assessment of existing road bridges.

〔研究目的及び経緯〕

国土技術政策総合研究所では、信頼性設計の考え方を基礎とし、国際的技術基準の標準書式でもある部分係数設計体系への転換を視野に道路橋示方書の改定に向けた必要な検討を進めてきた。既設橋の補修補強設計には、道路橋示方書が適用されており、部分係数設計法を適用することによって合理的な補修補強設計を行える可能性がある。例えば、新設橋の設計に用いる荷重係数をそのまま用いるのではなく、補修補強設計において想定する供用期間や架橋地点の交通特性に応じて荷重極値分布を評価し直すことで、架橋地点の特性を踏まえた部分係数を調整し、より合理的な設計を行える可能性がある。

そこで、平成 27 年度は、既設道路橋に用いる荷重係数を荷重単体の極値分布のバイアスと変動係数に依存する「荷重ばらつき係数」と荷重の載荷頻度に依存する「荷重組合せ係数」に分解することを提案した。

荷重ばらつき係数と荷重組み合わせ係数は B-C モデルの考え方にに基づく確率過程を考慮したモンテカルロシミュレーションにより算出したが、既設橋の架橋地点の特性を踏まえた合理的設計を行うためには、本来、現地計測の結果に基づいた係数の調整が必要となる。そこで、平成 28 年度は、実務において詳細なシミュレーションを実施せずとも、現地で荷重計測を十分に密に

行うことで荷重ばらつき係数を供用期間に応じて見直すことができるか検証した。

実橋の現地計測を模擬した荷重シミュレーションとモンテカルロシミュレーションにより算出した荷重ばらつき係数を比較すると、それぞれの値には相関があり、各荷重のあてはめを安全側に行い、べき乗則を用いれば、現地計測データに基づき、荷重ばらつき係数を供用期間に応じて見直せる目処を得ることができた。

国総研で実施した過年度の研究成果等が反映された H29 道路橋示方書では部分係数設計法が導入され、荷重ばらつき係数は、荷重係数と名称を変え死荷重の荷重係数は 1.05 と規定された。設計において、死荷重が 5%大きくなった状況と整合させようと思うと、例えば、解析モデルに与える質量:W を 5%重くする方法が考えられる。耐震設計では、解析モデルに与える質量が重くなると、対象とする系の固有周期が長くなり、系の周期域によるが、加速度応答スペクトルは増減する。さらに、動的解析では部材の変形能や履歴特性、減衰特性にも影響を及ぼすため応答値の評価は複雑となる。

そこで、平成 29 年度は、解析モデルに与える質量を 1.00W、1.05W とした動的解析を複数の橋梁に対して実施し、荷重係数値が既設橋の耐震性能評価に与える影響について検証した。

[研究内容及研究成果]

対象橋梁は地域別補正係数が1.00であるA地域の橋梁とし、固有周期や支承条件が偏らないように12橋を選定した。これらの橋梁を対象に質点重量を1.00Wと1.05Wとした動的解析モデルを作成し、地震応答値の比較を行った。応答値の整理はRC橋脚8基に対し地域別補正係数を3種類設定した24ケースと鋼製橋脚4基の計28ケースに対して行った。設計地震動は、道路橋示方書に規定されるレベル2地震動のタイプII地震の標準加速度波形の3波を用いた。

図1に固有値解析により算出した各ケースの固有周期の相関と基本固有周期における減衰定数5%の加速度応答スペクトルを整理した結果を示す。破線は最小2乗法により求めた回帰直線であり、固有周期は質点重量を1.05Wとした場合、概ね1.02倍になる傾向を示している。一方で加速度応答スペクトルは、入力地震動としている標準加速度波形の加速度応答スペクトルと標準加速度応答スペクトルの近似度合いが波形によって大小があるため値にばらつきが見られるが、固有周期が長くなった影響から、全体としては0.99倍と小さくなる傾向になった。

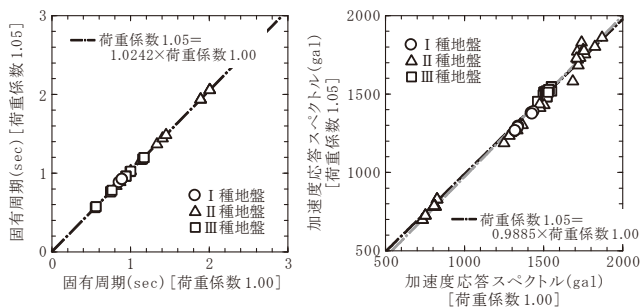


図1 固有周期と加速度応答スペクトル

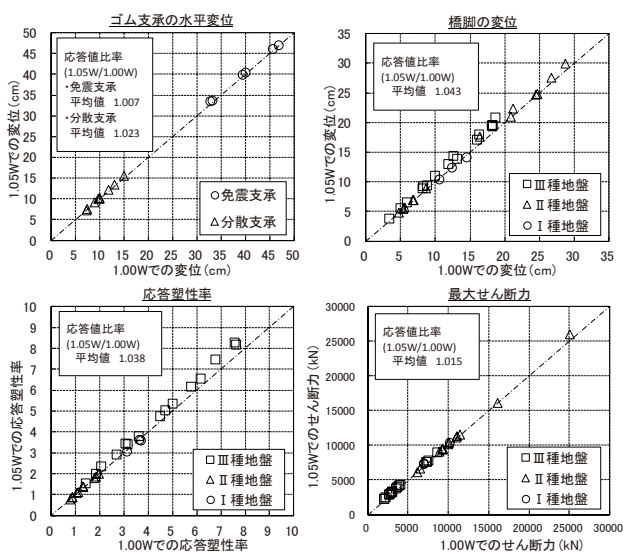


図2 支承・橋脚の応答値

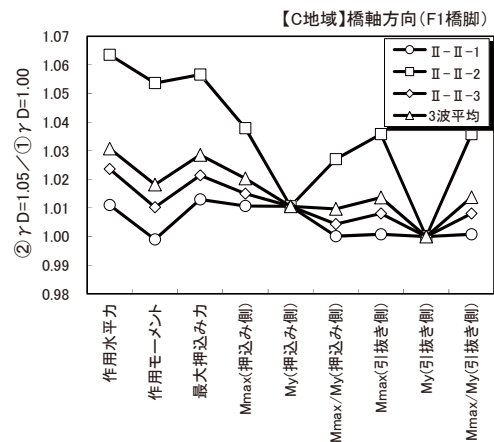


図3 杭基礎の応答値

図2に支承と橋脚の寸法決定に与える影響が大きいと考えられる主な照査項目の応答値と応答値の比率(1.05W/1.00W)の平均値を示す。対象橋梁は、一般的な構造形式を網羅するため、支承形式や基礎構造など複数の条件をパラメータとして選定しているため、応答値には必ずとばらつきが見られるが、質点重量を1.05Wとした場合、支承と橋脚の応答値は概ね1~4%程度増加する傾向となった。

さらに、検討ケースの中から、橋脚が弾性応答となったRC橋脚1基を対象に、橋脚基部における動的解析の応答値を用いて杭基礎についての試算を行った。図3に最も応答値比率のばらつきが大きかったC地域での結果を示す。加速度波形ごとのばらつきは見られるが、3波平均の値だと応答値比率は1.00~1.03となり平均すると1%程度増加する傾向となった。

本研究で収集した橋梁の設計結果においては、主な照査項目での制限値に対する応答値の安全余裕は概ね5~10%程度確保されており、一般的な断面諸元の橋梁であれば、応答値の増加は断面諸元を変えずとも耐力の余裕の中で十分吸収される可能性が高い。以上から、既設橋の耐震性能評価にH29道路橋示方書を適用した場合も、構造条件により応答値にばらつきはあるものの影響は小さく、従来設計から直ちに部材断面の変更が必要となるようなことはないということが把握できた。

[今後の課題]

既設橋の補修補強設計のための、応力再配分を考慮し易い耐荷性能照査式や、対策が実施された部材に適用する新たな抵抗係数の設定方法について検討する必要がある。

[成果の活用]

補修補強設計の技術資料作成の基礎資料として活用する予定である。

道路構造物の健全性把握に関する調査検討

Study on the structural condition measurement and evaluation methodologies of road structures
(研究期間 平成 27～29 年度)

道路構造物研究部 橋梁研究室
Road Structures Department
Bridges and Structure Division

主任研究官 宮原 史
Senior Researcher Fumi MIYAHARA
交流研究員 中邨 亮太
Guest Research Engineer Ryota NAKAMURA

構造・基礎研究室
Foundation, Tunnel and Substructure Division
主任研究官 藤山 一夫
Senior Researcher Kazuo FUJIYAMA
研究官 木村 崇
Researcher Takashi KIMURA

室長
Head
主任研究官
Senior Researcher
研究官
Researcher
交流研究員
Guest Research Engineer

白戸 真大
Masahiro SHIRATO
桑原 正明
Masaaki KUWABARA
河野 晴彦
Haruhiko KOUNO
林 佑起
Yuki HAYASHI

室長
Head
主任研究官
Senior Researcher
研究官
Researcher
間渕 利明
Toshiaki MABUCH
森本 和寛
Kazuhiro MORIMOTO
上原 勇気
Yuki UEHARA

This study examines inspection data to identify the characteristics of deterioration process and forward them to design specifications and inspection standards as needed. For bridges, three cycles of data set for regular inspections are now available with a frequency of five years and this year the change in deterioration characteristic has been examined with different data acquisition frequencies, taking advantage of the three cycles of data set. Also the data analysis of sheds and culverts has characterized the difference in distribution depending on structural types and surrounding environment.

[研究目的及び経緯]

国が管理する道路橋等の道路構造物の定期点検では構造物の状態を表す損傷程度の評価等が記録される。

本研究では、定期点検要領、道路橋示方書、道路土工技術基準及び関連する設計・施工便覧等の改定に向けて、定期点検で確認された損傷データの分析等を行い、定期点検における健全性の診断、補修補強の合理化等のための知見の抽出を行う。平成 29 年度は、国が管理する橋梁で平成 16 年～28 年度に蓄積された 3 巡分の点検データを活用して劣化の特徴を分析する方法について検討した。また、シェッド、大型カルバートの平成 26～28 年度定期点検結果から、構造形式や設置環境などの条件毎の変状傾向や特性等の分析を行った。

[研究内容及び研究成果]

1. サンプルングする点検データの違いによる影響

H29 年度は、典型的な損傷種類である鋼桁の腐食と床板のひびわれについて、3 巡分のデータがあることを活かし、 i 回目→ $i+1$ 回目および、 $i+1$ 回目→ $i+2$ 回目の

5 年間隔で遷移確率行列を算出した場合と、 i 回目→ $i+2$ 回目の 10 年間隔で算出した場合で、そこに現れる劣化の特徴を調べた。遷移確率行列を算出したのち、それを用いて平均的な経年の状態の変化を試算した結果を図 1 に示す。5 年間遷移確率行列と 10 年間遷移確率行列で状態変化を予測した結果は、鋼桁の腐食では、前者の方がわずかに劣化進展が速い傾向が見られたが、

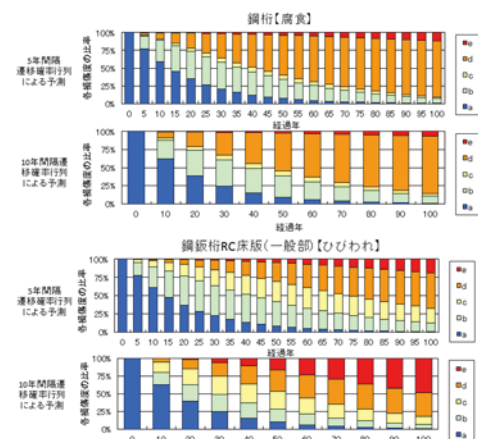


図 1 5 年および 10 年間隔遷移確率行列による予測

大差は見えなかった。しかし、RC 床版のひびわれは、後者の方が劣化進展が速く、5 年間隔遷移確率行列で予測した結果との差が顕著であった。この結果から考察すると、仮に 10 年間隔で点検を行った場合には、5 年間隔で行うよりも、状態変化が大きくなる割合が大きくなると考えられる。このような分析を様々な部位や損傷種類について重ねることで、点検を詳細に行うべき損傷種類や部位を考察できる可能性を見いだした。

2. 橋梁における補修補強後の再劣化

塩害を受けた PC 桁について、補修・補強後に再劣化が生じた事例が報告されている。そこで、PC ポステン T 桁について、定期点検 i 回目 $\rightarrow i+1$ 回目で損傷程度が回復した要素のグループとそれ以外の要素のグループに分け、それぞれのグループで $i+1$ 回目 $\rightarrow i+2$ 回目の遷移確率行列を作成した。前者のグループは、5 年の間に状態が回復しているため、5 年の間に何らかの補修補強がされたと見なせる。図 2 に、得られた遷移確率行列から推定した、それぞれのグループの状態分布の経年変化を試算した結果を示す。補修補強がされたと見なせるグループは、損傷程度の分布は a 又は e に偏っており 2 極化した分布となる。すなわち、補修補強が効果を上げている場合とそうでない場合に明らかに分かれていると見ることができ、補修補強の設計施工に課題を有していると考えられる。このように、3 巡の定期点検結果を詳細に分析することで、補修補強設計基準の確立に参考になる知見が得られる可能性があることが分かった。

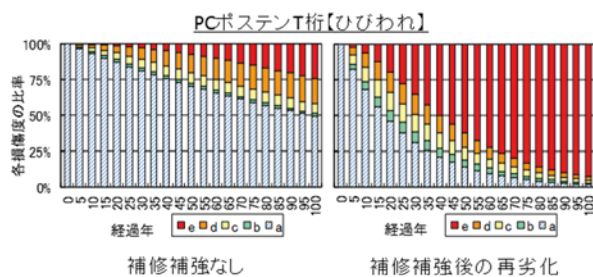


図 2 補修補強が行われた部材の再劣化

3. シェッド及び大型カルバートの定期点検結果分析

平成 26～28 年度の直轄国道を対象とした定期点検結果より変状及び健全性に関する分析を実施した。

シェッドの健全性の診断結果は I（健全）が約 1 割、II（予防保全段階）が約 4 割、III（早期措置段階）が 5 割で、IV（緊急措置段階）は無かった。これを構造形式別で整理すると、鋼製シェッドが約 7 割の施設で III となっており、RC 製（約 3 割）、PC 製（約 4 割）に対して高い結果となっている。

鋼製シェッドの谷側構造（柱・受台・基礎）において、設置環境（融雪剤散布の有無）と部材の変状程度（防食

機能の劣化）及び発生位置の傾向を図 3 に示す。融雪剤散布無しではほとんど変状が見られないのに対し、有りではその程度に係わらず損傷の発生数が多く、また上部より下部に多く発生している。これより鋼製シェッドにおいては融雪剤散布の有無が構造物の健全性に大きく影響を与えていることが分かった。

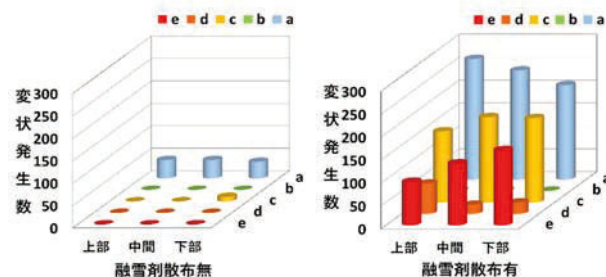


図 3 融雪剤散布の有無と防食機能の劣化（鋼製シェッド谷側構造）

大型カルバートの健全性の診断結果は、I が約 4 割、II が約 5 割、III が約 1 割で、IV は無かった。

構造形式と建設後の経過年数毎の健全性の割合について図 4 に示す。場所打ちカルバート、プレキャストカルバートともに経過年数と健全性の割合について相関関係は見られなかった。また、場所打ちカルバートでは建設後 20 年以上、プレキャストカルバートについては 10 年以上経過した施設においても、健全性 I の施設が存在することが分かった。

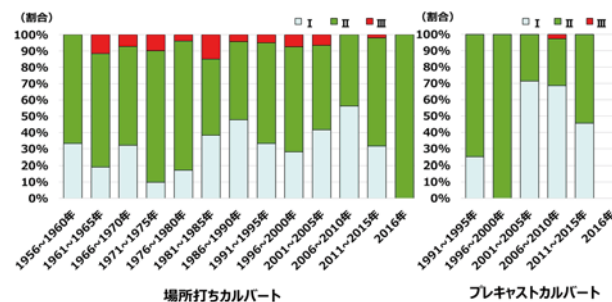


図 4 構造形式と建設後の経過年数毎の健全性（大型カルバート）

4. まとめ

点検データを統計的に集計することによって得られる結果は物理化学的な原理を再現するものではないが、損傷の種類や損傷発生部位毎の劣化の特性の現在状態あるいは将来状態を知る手段として有効である。

【成果の活用】

本研究で得られた成果は、定期点検要領や各種基準改訂のための基礎資料として活用予定である。

既設道路構造物基礎の耐荷性向上に関する調査

Research on improving loading capacity of foundation of existing road structures

(研究期間 平成 29～31 年度)

道路構造物研究部 構造・基礎研究室
Road Structures Department
Foundation, Tunnel and Substructures Division

室長
Head
主任研究官
Senior Researcher
研究官
Researcher

間渕 利明
Toshiaki MABUCHI
西田 秀明
Hideaki NISHIDA
木村 崇
Takashi KIMURA

The purpose of this research is to clarify the structural conditions to construct a robustness road network for huge disasters. In FY2017, it was analyzed that road bridges suffering from by the floods from the point of view of bridge structure, ground condition, the river characteristic.

〔研究目的及び経緯〕

災害に強い強靱な道路ネットワークを実現するためには、大規模地震や大雨による洪水等に対して道路機能への影響を最小限に留められるようにすることが求められる。この状態を早期にかつ合理的に実現するために、既設道路構造物基礎（橋梁等）の耐荷性向上対策を実施すべき構造条件の提示を目的とする。

本年度は、洪水による被災について、道路構造物の特性及び河川特性双方の観点から、近年の被災事例分析を行い、洗掘の影響を受けやすい構造・地盤条件・河川特性の関係性を整理した。

〔研究内容及び成果〕

（1）分析対象とした被災データ

洪水により被災した道路橋及び河川沿いにある道路構造物(主に擁壁)について、被災時の状況や構造諸元等のデータを収集した。このデータは、基本的に平成 23 年から 28 年までに洪水で被災した道路災害査定構造物を対象とした。ただし、全災害査定対象構造物のデータは収集できていない。本報告では橋梁（285 橋）の分析結果を中心に示す。

建設年次や橋長、径間数、下部構造の形状や基礎など構造諸元に関する情報、被災内容に関する情報に加えて、既往の研究等を踏まえて、洪水による被災要因を検討するうえで関連性のある項目を抽出した。このようにして抽出した橋梁の構造特性と、河川特性に関する項目を表-1 に示す。

構造特性に関する項目のうち、分担阻害率とは隣接する橋脚との中間位置までの長さ（＝支間長）と橋脚幅との長さの比であり、殆どデータが得られなかった河積阻害率を代替したものである。水際線との距離は橋台前面の構造を「橋台前面に高水敷無し」「橋台前面

表-1 洪水による被災要因分析のために抽出した項目

橋梁の構造要因	水文・河川の水利的要因
護床工の有無	降水量（降雨状況）
根入れ深さ	流域面積
橋脚幅	河道形状
分担阻害率	地形・地質構造
水際線からの距離	みお筋・砂州
建設年次	河川幅
計画高水位	河床勾配
桁下高	粗度係数・河床材料
橋台背面の構造	対象河川近傍の河道改修履歴
過去の被災履歴	河道計画
	過去の被災履歴
	被災した際の状況（流量）

表-2 セグメント区分

項目	セグメントⅡ	セグメントⅠ	セグメントⅡ 2-1 2-2	セグメントⅢ
地形区分	山間地	扇状地	谷底平野	デルタ
河床材料の代表粒形	さまざま	2cm 以上	3cm～1cm	1cm～0.3mm
勾配の目安	さまざま	1/60～1/400	1/400～1/5,000	1/5,000～水平
蛇行程度	さまざま	曲がりが少ない	蛇行が激しいが、川幅水深比が大きいところでは、8 字蛇行または島の発生	蛇行が大きいものもあるが小さいものもある

出典）山本晃一（2004.12）『沖積河川』、p6、技報堂出版

に高水敷有り」「護岸あり」の 3 パターンで分類した。護床工の有無は図面及び被災状況写真より判別した。

河川特性に関する項目のうち、河床勾配は表-2 のセグメント区分により行った。河床勾配の設定にあたっては、収集資料中に数値やセグメント区分が示されている場合はその情報を、示されていない場合は国土地理院の標高データを用い、渡河地点から河床勾配の変曲点までの勾配とした。河道形状は、航空写真や収集リストに記載されている平面図から「湾曲河道」「直線

河道「蛇行河川」の3つに区分した。被災時の水位は、被災写真及び現地調査票より「越水した超過洪水」、「越水しなかった洪水」「異常な天然現象（警戒水位以上または1/2 河岸高以上として記載されている洪水を対象）」の3つに区分した。

(2) 被災特性の傾向分析

① 構造特性からの傾向整理

平成23年から28年に洪水で被災した道路橋について、収集事例のうち建設年次が明らかである橋梁を対象に、建設年次別に、橋台の被災内訳を図-1に、橋脚の被災内訳を図-2に示す。ここで、河川管理施設構造令(以下、構造令)では、河積阻害や洗掘への対応として橋の基準径間長や基礎の根入れ深さなどが規定されている。例えば、橋が確保すべき基準径間長 L は、昭和51年の制定時に $L=20+0.005Q$ (Q :計画高水流量)とされ(ただし、 Q が $2000\text{m}^3/\text{s}$ 以下では緩和規定あり)、平成9年にはその上限が50mとされている。そこで、構造令の変遷時期に着目し、この3つの時期で建設年次を区分して整理した。橋台については、i) 建設年次によらず橋台背面流出による被災が占める割合が多いこと、ii) 構造令制定前後で比べると橋台本体の損傷や流出による被災割合の減少が傾斜・沈下や背面土着流出に比べて大きいこと、iii) どの被災要因に対しても単径間の橋の被災が全体の約半数を占めており規模の小さな橋で被災が多いことが分かる。橋脚については、構造令制定前後で流出の割合は大きく低下している。以上から、構造令制定により下部構造の流出に至るような被災は少なくなっているが、これに比べると沈下・傾斜や橋台背面土砂流出を伴う被災の低下割合は小さいといえる。

② 河川特性からの傾向整理

構造物の被災情報が得られているデータと河川特性のうち、セグメント区分、河道形状(直線河道・湾曲河道・蛇行河川)、降雨強度を基に集計を行った。橋台の損傷とセグメント区分の集計結果を図-3に示す。基礎形式が明らかな58橋をみると、被災はセグメントMと1で生じていること、基礎形式では直接基礎の割合が高い(セグメント1でも約7割が直接基礎)という特徴があることが確認できる。

また、被災箇所と越水の有無及びセグメント区分の関係を表-3に示す。越水がない場合は、下部構造のみ並びに下部構造と上部構造の両方に被災が生じている橋梁数に差はない。一方で、越水がある場合は、下部構造のみだけでなく上部構造も被災しているのが大半であること、また、セグメント1での被災が特に多いことに特徴があることが分かる。

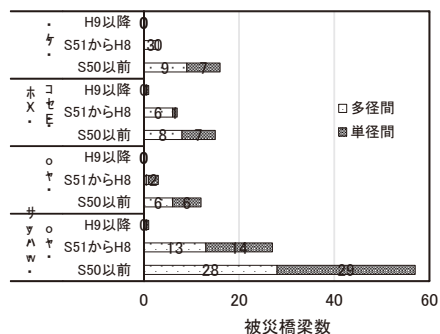


図-1 H23～H28に洪水で被災した橋台の被災内訳（建設年次別）

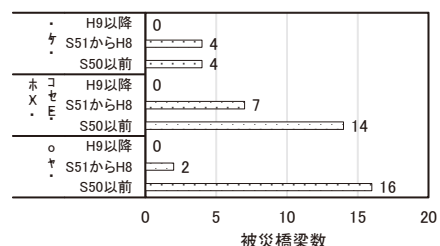


図-2 H23～H28に洪水で被災した橋脚の被災内訳（建設年次別）

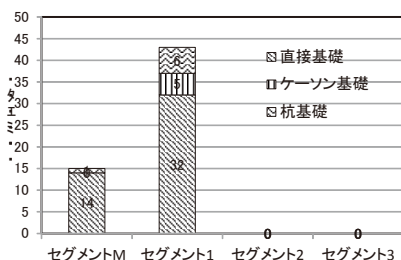


図-3 基礎形式（橋台）とセグメント区分の関係

表-3 被災箇所と水位、セグメント区分の関係

被災箇所	水位	セグメント区分			
		M	1	2	3
上部工のみ	越水	0	0	0	0
	非越水	0	0	0	0
下部工のみ	越水	1	1	0	0
	非越水	3	6	0	0
上部工 ＋下部工	越水	6	19	1	0
	非越水	3	6	0	0

(3) まとめ

道路橋において道路機能に影響を与えるる洗掘の影響を受けやすい条件としては、i) 直接基礎であること、ii) 建設年次が構造令制定前であること、iii) 河積が小さいこと(河道断面が小さく、越水する可能性が高い)、山地から扇状地に位置していることなどが、構造・地盤条件・河川特性の特徴を巨視的に分析した結果より明らかとなった。

【成果の活用】

より信頼性の高い道路網を構築するための施策、通達や施工要領等に反映させる予定。

舗装の長期性能に関する調査検討

Study on long-term pavement performance

(研究期間 平成29年度～31年度)

道路構造物研究部 道路基盤研究室
Road Structures Department,
Pavement and Earthworks Division

室長
Head
主任研究官
Senior Researcher
研究官
Researcher

久保 和幸
Kazuyuki Kubo
谷口 聡
Satoshi Taniguchi
船越 義臣
Yoshiomi Funakoshi

This study aims to investigate cause of early deterioration pavement to reduce long-term costs by prolonging the life span of pavement. This fiscal year, nondestructive surveys and cutting investigations were conducted in the early deterioration pavement section of the national highway managed by the MLIT. As a result, the possibility that water was supplied from not only the cracking but also the patching and the construction joint to the pavement was shown in the Infrared thermography. In addition, it was found that the detachment of the asphalt concrete layer was occurred at 2 out of 3 sections and in the cutting investigations. Therefore, the detachment of the asphalt concrete layer is considered to be one of the causes of early deterioration.

〔研究目的及び経緯〕

平成28年10月、舗装の点検に関する基本的な事項を記した『舗装点検要領』が策定され、これに伴い、舗装の維持管理においては舗装の更新年数を意識した維持管理を行うとともに、長寿命化による長期的なコスト削減を図ることが求められている。しかし、アスファルト舗装においては、早期に劣化する区間（以下、「早期劣化区間」）が存在し、維持管理上の課題となっている。

平成29年度は、早期劣化原因の究明と破損メカニズムを解明するため、関東地方整備局管内の直轄国道の早期劣化区間において、非破壊調査ならび開削調査を実施した。

〔研究内容及び研究成果〕

1. 調査区間の概要

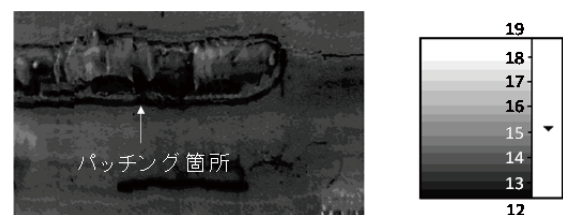
今回の調査対象は関東地方整備局管内の国道1路線で、下記に示す最新補修年から最新路面性状調査年までの経年数により、早期劣化区間と考えられる区間を抽出した（表1）。

表1 開削調査位置の概要

工区	工区Ⅰ	工区Ⅱ	工区Ⅲ
表層材料	ポーラス	密粒	密粒
最新補修年	H19	H20	H15
最新路面性状調査年	H26	H26	H26
経年数	7年	6年	11年
ひび割れ率	55.4%	33.8%	36.9%

2. 赤外線サーモグラフィによる非破壊調査

開削調査に先立ち表1の各調査対象箇所100mの区間において、デジタル方式の専用調査車を使用して赤外線サーモグラフィ調査を実施した。なお、舗装内部の損傷箇所を際立たせるために、模擬的に水を浸入させた。調査結果を図1に示す。図1の温度の低い黒い部分に多くの水が溜まっていると推定される。これらは、ひび割れ部のみならず、パッチング箇所や施工継ぎ目部にも存在していることから、パッチング箇所や施工継ぎ目部からも水が舗装体内に供給されている可能性が示唆された。



a) パッチング箇所の滞水



b) 施工目地部の滞水

図1 赤外線サーモグラフィ調査結果

3. 開削調査

開削調査は平成30年1月中旬から2月上旬にかけて実施した。表1の各調査箇所において、幅3m、長さ2mの矩形を50cm×50cmに分割し、カット時の水分の影響を受けないようにドライカタを用いて開削した。既設アスファルト混合物（以下、「アスコン」）は、既設路盤面を乱さないように吊り上げ方式で撤去した。以下に各開削調査箇所の調査状況を示す。

工区Ⅰは3箇所の内、最も路面損傷が大きい箇所であり、亀甲状ひび割れの発生が顕著で、パッチングによる補修を実施している。工区Ⅰの開削後の写真を写真1に示す。アスコン層内の滞水、基層以下での層間はく離、並びにひび割れの貫通が確認された。また、吊上げ時に基層とアスファルト安定処理（以下、「アス安」）層が分離し、アス安層が残留した箇所が多く見られた。さらに、上層路盤の軟弱化も確認された。

工区Ⅱは3箇所の内、2番目に路面損傷が大きい箇所であり、亀甲状ひび割れの発生が著しく、路面も沈下している。工区Ⅱの開削後の写真を写真2に示す。アスコン層内の滞水及び基層以下での層間はく離が確認されたが、ひび割れの貫通には至らなかった。

工区Ⅲは3箇所の内、最も路面損傷が小さい箇所であり、OWP（外側車輪通過位置）に線状ひび割れ、IWP（内側車輪通過位置）に亀甲状ひび割れが発生している。工区Ⅲの開削後の写真を写真3に示す。アスコン層内の滞水が確認されたが、基層以下での層間はく離、ひび割れの貫通には至らなかった。

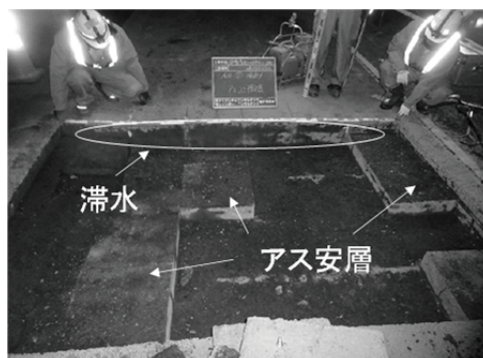
これらの工区の観察結果より、舗装上面から浸透した水により基層が上面側からはく離し、舗装の支持力の低下に伴い、続いてアス安層及び路盤の破損が進行したものと推察される。

4. まとめ

赤外線サーモグラフィによる調査では水はひび割れ部のみならず、パッチング箇所や施工継ぎ目部から舗装体内に供給されている可能性が示唆された。また、開削調査では、調査箇所3箇所のうち2箇所でアスコン層内の層間はく離が確認されたことから、層間はく離が早期劣化の原因の一つであり、直轄国道におけるアスファルト舗装の早期劣化のメカニズムの一例が把握することができたものと考えられる。しかし、今回は1路線のみの結果であり、今後は他の路線でも検証を行い、早期劣化メカニズムの解明を進める予定である。

〔成果の活用〕

研究成果については、早期劣化箇所に関する対応を視野に入れ、舗装点検要領等の改定に反映させる予定。



a) アス安層の残留状況



b) 貫通ひび割れにより崩壊した吊上げアスコン塊

写真1 工区Ⅰの開削調査結果

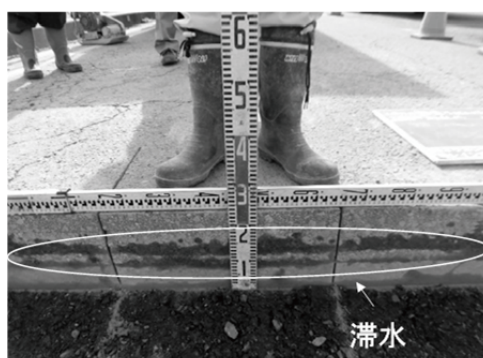


写真2 工区Ⅱの開削調査結果



写真3 工区Ⅲの開削調査結果

地震災害復旧対策技術に関する研究

Research on The Recovery Technique of the Bridge damaged by Earthquake

(研究期間 平成 29～33 年度)

社会資本マネジメント研究センター
熊本地震復旧対策研究室
Research Center for Infrastructure
Management,
Kumamoto Earthquake Recovery
Division

室長
Head
主任研究官
Senior Researcher
研究官
Researcher
交流研究員
Guest Research Engineer

星隈 順一
Jun-ichi HOSHIKUMA
澤田 守
Mamoru SAWADA
中川 量太
Ryota NAKAGAWA
鈴木 慎也
Shinya SUZUKI

The 2016 Kumamoto earthquake affected the bridge due to not only the ground motion effect but the ground displacement effect. Bridge monitoring will be an option to improve the reliability of repair design in terms of the risk mitigation of the effect uncertain matters such as the estimation of the performance of the damaged element. Also resilient structure system is required for bridges so as to perform prompt recovery of function. This research program conducted ICT monitoring for the bridge damaged by the earthquake and clarified the effectiveness of repair for bridge hollow column. Furthermore, the damage-controlled design approach was proposed for bridges subjected to the ground deformation effect.

〔研究目的及び経緯〕

H28 熊本地震では、地震動の揺れとともに地盤変位の影響も伴って、橋梁等の構造物に被害が生じた。このような被害を受けた橋の復旧においては、地盤変位等の不確実性の高いリスクが橋に及ぼす影響を軽減する観点や、損傷した橋の状態評価とその復旧設計への見立てに含まれている不確実性に配慮する観点からモニタリング等の技術を活用して復旧の信頼性の向上等を図る必要がある。また、速やかな復旧が行えるようにする観点から、道路構造物の地震被災リスクを低減できる構造形式にするとともに、早期復旧を合理的・効果的に行うための調査・診断技術や対策技術が必要となっている。

〔研究内容〕

本稿では、本研究テーマで取り組む課題のうち、ICT技術等によるモニタリングを活用した補修効果の確認と、熊本地震での橋の被災状況を踏まえ、支承に着目して橋に生じる破壊形態を制御する設計の考え方について報告する。

(1) ICT モニタリングを用いた補修効果の確認

1) 対象橋梁の被害と復旧対策

本研究で対象とした橋は阿蘇長陽大橋であり、昭和55年道示を適用して設計され、平成5年に架設されたPC4 径間連続ラーメン箱桁橋である。熊本地震では斜



図 1 阿蘇長陽大橋 P3 橋脚の貫通ひび割れ

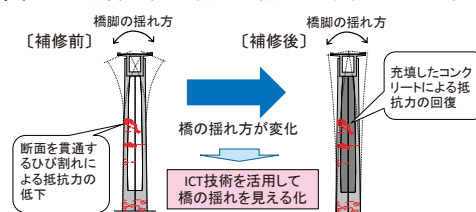


図 2 P3 橋脚の補修効果を確認する原理

面変位に伴い A1 橋台が約 2m 沈下するとともに中空断面橋脚では断面を貫通するひび割れが生じるなど、多くの損傷が生じた（図 1）。橋脚の中間高さに生じた断面を貫通するひび割れは、既往の知見からせん断耐力の低下が懸念された。そこで P3 橋脚の復旧では、補修の施工性や他の部位への影響度合い等を総合的に検討した上で、中空部に流動性の高いコンクリートを充填し、充填したコンクリートでせん断抵抗機能を回復させる方法を選択した。

2) モニタリングによる補修効果の確認

貫通ひび割れが生じた P3 橋脚にコンクリートを充

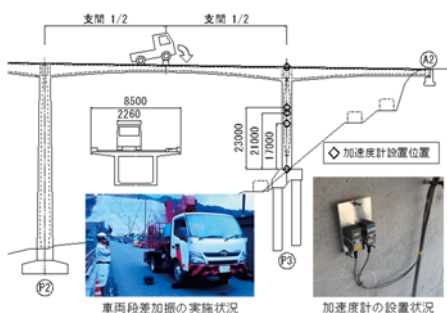


図 3 加速度計設置位置と載荷位置

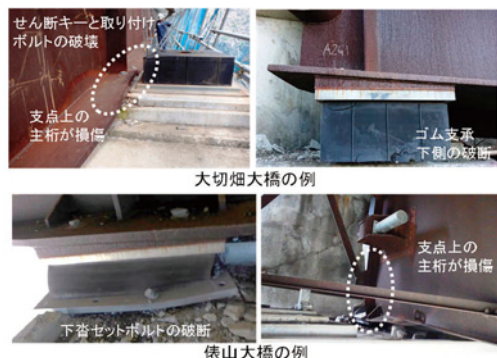


図 5 熊本地震による橋梁支承部の損傷例

填することにより図 2 に示すように橋脚の振動モードに変化が生じる。そこで、補修効果を確認するためのモニタリングでは、橋脚の振動モードの変化に着目した。そして、微少な揺れでも正確に測定できる加速度計を図 3 のように橋脚に設置し、補修の前後それぞれで橋の振動を計測した。図 4 は、計測結果の一例として、段差から車両を落下させて橋に振動を与えた時の P3 橋脚に生じる水平変位の高さ方向分布を、コンクリートを充填する前後で比較して示したものである。横軸は、橋脚に生じた水平変位の値を補修前の状態における振動試験で得られた橋面位置での最大水平変位の値で無次元化した値である。コンクリートの充填前は橋脚中間高さ位置を基点としたような振動モードとなり、それより下の断面では振動による水平変形がほとんど生じていない。一方、コンクリートを充填した後は、橋脚基部を基点とした振動モードに移行しており、貫通ひび割れが生じた断面での水平変位の急増も見られない。すなわち、充填したコンクリートがせん断力を負担していると評価することができ、補修効果を確認することができた。

(2) 地盤変状が橋に及ぼす影響の最小化に向けた検討

1) 熊本地震での橋梁支承部の被害分析

熊本地震では、地盤変状により上部構造、下部構造ともに大きく動き、上下部構造間に大きな相対変位が生じた。このため、上下部構造間に設置されている支

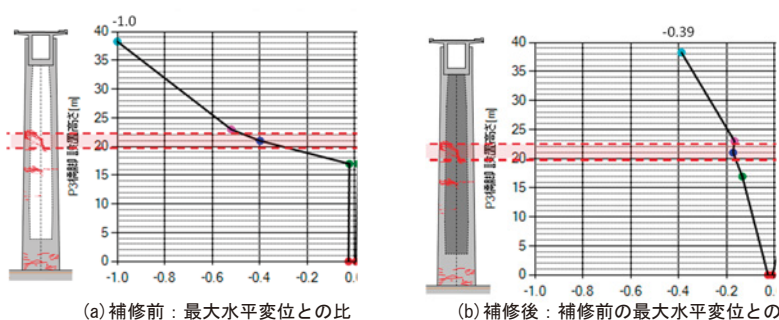


図 4 コンクリートの充填による橋脚の振動モードの変化
(作図協力：モニタリングシステム技術研究組合 RAIMS)

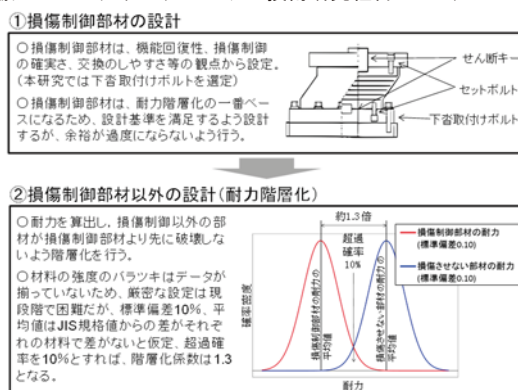


図 6 損傷制御型支承の考え方 (案)

承部や支点部近傍の主桁に損傷が生じた。損傷の特徴としては、図 5 に示すように、損傷している箇所が様々であることが挙げられる。

2) 損傷制御型支承の考え方の整理

支承部は各種の部材で構成され、それぞれ、橋の設計基準に従って設計されるが、基準を満たすように設計した上で、橋の機能回復性に及ぼす影響が最小化されるよう、最終的に破壊する部位を制御するための支承の設計法の検討を行った。損傷制御型支承の設計の考え方の案を図 6 に示す。最終的に破壊させる部材(損傷制御部材)は、段差を小さくする等の機能回復性とともに、損傷制御の確実さ、交換のしやすさ等の観点から設定する。本研究では、それらの観点から損傷制御部材を下弦セットボルトに設定した。そして、下弦セットボルトと他部材の間に有意な耐力の差(耐力階層化)を設けた設計を行うことで、破壊を制御する考え方である。

【成果の活用】

本研究で得られた知見は、地盤変位の影響を最小化する構造計画の観点から参考となる技術資料として取りまとめ提示していく。また、モニタリングのデータは、今後の維持管理段階での活用方法と合わせて、管理者へ提供していくとともに、地震災害復旧工事における考え方や手法を技術資料として取りまとめ提示していく。