道路構造物の点検・管理体系の最適化に関する調査検討

Study on rationalization, standardization and advancement of inspection system for highway bridges

（研究期間　平成 24～25 年度）

道路研究部　道路構造物管理研究室　室長　玉越　隆史
Road Department Bridge and Structures Division　Head　Takashi Tamakoshi
主任研究官　大城　温　研究官　石尾　真理
Senior Researcher Nodoka　Oshiro　Researcher　Mari Ishio
研究官　横井　芳輝　交流研究員　強瀬　義輝
Researcher　Yoshiteru Yokoi　Guest Research Engineer Yoshiteru Kowase

In order to assess the structural health of highway bridges including bridges managed by the local governments from the unified viewpoints effectively, NILIM conducted a study towards formulation of rational periodic inspection manual commonly used by the road administrators.

［研究目的及び経緯］

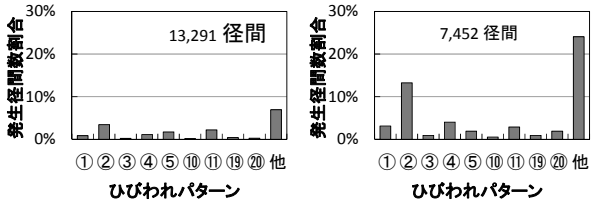
我が国の社会資本は、これまでに蓄積されてきたストックのうち高齢化したものの割合が急速に増加しつつある。そのため、限られた予算や人的資源の下で、これらの道路構造物の健全性を将来にわたり適切な水準に維持し、必要な道路ネットワークの機能を維持できる方策の確立が急務となっている。このためには、道路橋を含む様々な道路構造物の状態を確実に把握して重大事故を未然に防止するとともに、それらの情報に基づく将来予測を行うことで、対策の必要性や優先度の意志決定の最適化と予防保全の実現による構造物の維持管理にかかる負担の軽減が必要となる。道路橋については、橋梁定期点検要領（案）（平成 16 年 3 月）制定以降、5 年に一度の点検が実施され、同一要領による客観的なデータが蓄積されてきているため、これを分析することで損傷発生傾向やそれらの進行の傾向について把握することが可能となっている。一方で、トンネル及び土工構造物の点検では、構造物や斜面対策工等の単位で、補修や補強等の対策の必要性など、措置に関わる助言としての診断が記録されているものの、道路橋の「損傷程度の評価」のような各損傷の客観的な状態に関する記録はなされていない。経時的な損傷の遷移やそれに基づく将来予測、また、損傷発生傾向を把握し、得られた知見を設計基準の高度化や維持管理の合理化に反映していくためには、これらの構造物に関しても、道路橋と同様に客観的な状態を把握し、記録していく必要があると考えている。

これらを踏まえ、本研究では、これまで蓄積されてきた点検データを用いて道路構造物の損傷の特徴の把握と損傷進行の傾向について整理をした。道路橋については、橋梁定期点検要領（案）に基づく複数回の点検データが整備されてきているため、これを用いた。トンネル及び土工構造物については、トンネル定期点検及び道路防災総点検の結果から、客観的データ取得のための最小記録単位の考え方、損傷種類、損傷程度の評価や分類区分の考え方について整理するとともに、既存の点検結果を客観的データに変換し、損傷発生状況の特徴の整理を試みた。

［研究内容及び研究成果］

１．直轄道路橋の損傷進行等の特徴整理

全国の直轄道路橋（約 28,000 橋）で蓄積された定期点検のデータを用いて、主要な部材の主要な損傷を対象に損傷発生傾向及び劣化の進行の特徴を整理した。図-1 にコンクリート主桁の損傷発生傾向の分析の例を示す。ポステン PC 橋とプレテン PC 橋について、ひびわれパターンの発生比率を示している。ひびわれパターンは橋梁定期点検要領（案）において分類しているもので、特徴的なものを抜粋した。図-2 にひびわれパターンを示す。プレテン PC 桁に比べてポステン PC 桁の方がひびわれの発生は顕著であり、ひびわれの発生パターンの傾向も異なることが分かる。②のひびわれは PC 鋼材やシースに沿ったひびわれであり、これらの腐食に起因するものと考えられる。また、④のひびわれはその性向からプレストレスの導入量に関連していることも示唆される。このように、損傷の種類だけでなく、その性状についてもパターン化して記録を行い、構造特性や施工方法等による発生傾向を把握することで、ひびわれ発生原因の解明及びそれに基づく設計の合理化、予防保全策の確立のための基礎データとなる可能性がある。



（a）プレテンPC桁　　（b）ポステンPC桁

図-1　PC橋の主桁のひびわれ発生の特徴

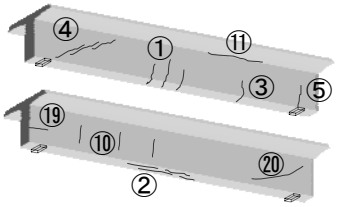
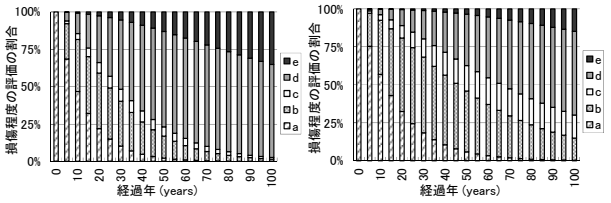


図-2　ひびわれパターン

図-3 は、鋼板桁橋の主桁の腐食について、劣化の進行の特徴の分析の結果を示す。2 回の点検データの損傷程度の評価の変化から得られる遷移確率を用い、損傷程度の評価の経年的な変化を推定したものである。なお、2 回の点検間に補修がされているデータは除外している。桁端部と中間部で良好な状態である「a」の割合には大きな差はないものの、より深刻な状態のものの割合は桁端部の方が早い段階から急増する結果となっており、腐食環境の違いが伺える。このように、劣化の進行は同じ部材であっても、その部位によって進行の速度や傾向は異なることから、構造物の単位ではなく、より詳細な単位で状態を把握し、蓄積することが損傷の進行傾向や将来の状態を予測する上で重要であることが分かった。

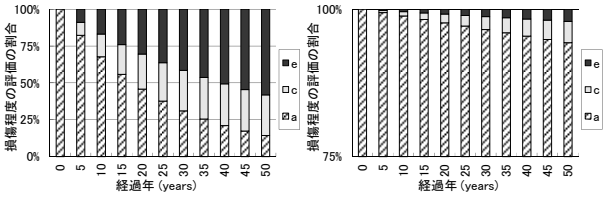


（a）端部　　（b）中間部

図-3　損傷程度の評価の経年的推移（鋼鈑桁腐食）

２．トンネル及び道路土工構造物の点検に係る整理

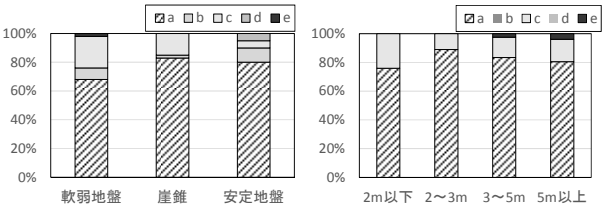
トンネルの定期点検結果を用いて、橋梁定期点検要領（案）と同様に点検で取得したデータを使って、将来の状態予測や統計的分析が可能となるようにスパン毎かつアーチ部や側壁部などの部位により記録の単位を区分した。計 30 トンネルについて、この区分ごとに、損傷展開図及び損傷写真から読み取れる損傷をその程度に応じて、客観的データである「損傷程度の評価」に置き換えて、損傷の特徴の整理を試みた。一例として、図-4 に NATM 工法で施工されたトンネルについて覆工の浮き・はく離・剥落に着目し、2 回の点検データから推定した損傷程度の推移を示す。トンネル側壁部に比べアーチ部の方が損傷の進行が早い結果となった。このように、トンネルにおいても部位によって進行の速度や傾向は異なる可能性が示唆された。



（a）アーチ部　　（b）側壁部

図-4　トンネル覆工（NATM 工法）のうき・はく離・はく落の損傷程度の経年変化

また、道路土工構造物についても、400 箇所程度（斜面・切土：200 箇所、盛土：200 箇所）の道路防災総点検結果を用いて、トンネルと同様に、記録単位、損傷種類、損傷程度などの点検で取得すべきデータ区分の試案を作成した。また、その区分毎に損傷図や損傷写真から読み取れる損傷をその程度に応じて、客観的データである「損傷程度の評価」に置き換えて、損傷の特徴の整理を試みた。一例として、図-5 に盛土の擁壁工のひびわれを対象に、基礎地盤種別及び擁壁高さの違いによる損傷発生傾向を整理した結果を示す。基礎地盤による違いでは、軟弱地盤上の盛土における擁壁でひびわれの発生は多くなっている。また、擁壁の高さについては、ひびわれの発生率に大きな違いは見られないものの、深刻な状態「e」のものは、擁壁高さが高いものの方が発生しやすい可能性があることが伺える。このように、土工構造物においても、構造物の損傷種類毎に客観的な状態の記録をすることで、劣化等の変状の把握を合理的に行い、経時的な損傷の特徴の把握により、予防保全や将来予測が行える可能性も出てくると考えられる。



（a）基礎地盤の違い　　（b）擁壁高さの違い

図-5　擁壁工（盛土）のひびわれの損傷特徴

［成果の発表］

国総研資料及び各種論文等で発表予定。

［成果の活用］

定期点検要領(案)の改定等に反映。

道路構造物群の管理状態評価に関する調査検討

Study on the evaluation of the service and structural safety levels for the asset of highway structures

（研究期間　平成 24～26 年度）

道路研究部　道路構造物管理研究室　室長　玉越　隆史

Road Department Bridge and Structures Division　Head　Takashi Tamakoshi

主任研究官　大城　温　研究官　石尾　真理

Senior Researcher　Nodoka Oshiro　Research　Mari Ishio

研究官　宮原　史　研究官　横井　芳輝

Research　Fumi Miyahara　Researcher　Yoshiteru Yokoi

交流研究員　強瀬　義輝　交流研究員　水口　知樹

Guest Research Engineer Yohiteru Kowase Guest Research Engineer Toshiki Mizuguchi

NILIM has been developing a strategic maintenance approach for maintaining and managing road structures considering two functions of the road networks, traffic service and structural safety, which are subjected to and their present and future performance assessments. Models to estimate deterioration processes of road structures using bridge inspection database to develop the strategic maintenance approach was examined.

［研究目的及び経緯］

道路構造物群全体の合理的な維持管理施策を検討するなどの目的に対して、これを支援するための方法として様々な種類や構造的特徴を有する道路構造物の状態を統一的な観点から定量的に相対比較できる手法を検討している。

平成 25 年度は、過去に研究室で提案した道路橋の機能状態に関する定量的な評価値を定期点検のデータのみから機械的に算出する指標（以下「道路橋の総合評価指標」という。）について、実際の点検における技術者による診断結果との対比を行って指標の問題点の抽出と機械的な評価による橋の機能状態の推定の限界について検討を行った。また、道路橋毎の構造的な冗長性の設計や維持管理の優先度付けなどに反映させるための定量的な評価方法の検討を行った。具体的には代表的な道路橋形式に対して、各部材と橋全体の性能の関連性に着目してフォールトツリーアナリシス（以下「FTA」という。）を適用したリスク構造の分析を行った。

［研究内容及び研究成果］

１.「道路橋の総合評価指標」の問題点と限界の整理

総合評価指標とは、橋梁点検において各部材の損傷程度を客観的に評価したデータのみから、供用性や安全性の観点から不可欠と考えられる3つの機能、「交通荷重を安全に支持できることの信頼性」を表す耐荷性、「地震等の災害時に想定していた所要の安全性等の性能（緊急車両の通過、速やかな復旧など）が発揮されることの信頼性」を表す災害抵抗性、「日常的な利用において安全・快適な車両走行が保証されることの確実性」を表す走行安全性を表す指標を、それぞれ部材の重要度を勘案して算出するものである。平成25年度は、総合評価指標（耐荷性）と対策区分判定結果を対比し、指標の問題点の抽出と機械的な評価による橋の機能状態の推定の限界について整理した。

総合評価指標（耐荷性）の健全度別に対策区分を集計した結果を図-1に示す。指標の健全度が低い（30点未満）ほど、対策区分Cの割合が高く、指標の健全度が高い程対策区分Cの割合が少なくなる。総合評価指標と対策区分判定の結果の傾向は、概ね一致していた。

危険側に乖離している要因としては、横桁等指標算出時の部材影響度が低い部材において、破断や亀裂などにより対策区分判定がC以上と判定されていた。また、総合評価指標算出時に対象としていない「うき」への対策がなされていることがあげられる。これら、部材損傷は、他の総合評価指標（災害抵抗性・走行安全性）で考慮されている（部材影響度を高く設定）場合もあることから、概ね適用性はあると考える。一方、安全側となる要因としては横締め「定着部の異常」に対して実際には対策されていないことが要因であった。

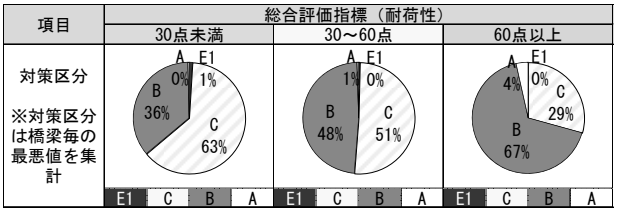


図-1 総合評価指標（耐荷性）と対策区分

２．FTAを適用した道路橋のリスク構造の分析

代表的な道路橋形式に対して、各部材と橋全体の性能の関連性に着目し、FTA を適用したリスク構造の分析を行った。

構築した FT 図の構造を図-2 に示す。頂上事象を「橋梁が致命的となる状態（対策区分 E1)」とし、部位・部材を階層とした中間事象を設定した。基本事象の確率 X_1 は、損傷の発生確率とし、確率は直轄定期点検データから２回の結果を抽出して、損傷種類、部材部位単位にマルコフ過程を前提にして状態遷移確率分布を求め、近似した劣化予測式を用いて経過年ごとのリスク発生確率を算出した。なお、データ数が少なく劣化予測式の信頼性が確保できない部材・損傷種類については（例えば、支間が異なる RC 床版など)、劣化予測式を作成するのに十分なデータとなる分類（例えば、全ての RC 床版）で発生確率予測式を設定した。基本事象を部材・損傷種類ごとの E1 発生確率とするため、劣化予測式等から定めた損傷程度 e に対し、対策区分 E1 となる割合を AND ゲートで結んだ FT 構造とした。

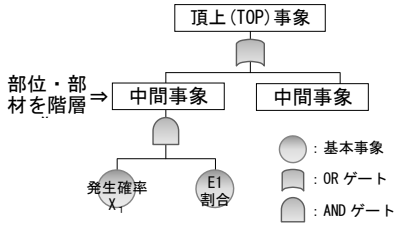
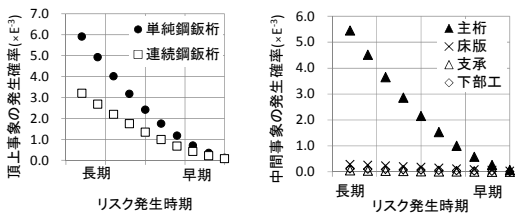


図-2　FT 図の構造

単純 4 主鈑桁(2 橋分)と 2 径間連続 4 主鋼鈑桁について頂上事象発生確率を比較した例を図-3(a)に示す。横軸の左側を長期、右側を早期(供用初期)に頂上事象が発生する確率として表している。早期の頂上事象の発生確率は同等であるが、経年により単純桁と連続桁に差が生じ、長期(100 年想定)で単純桁の発生確率が連続桁の約 2 倍程度となった。中間事象である部材の破壊確率（図-3(b))をみると、主桁の腐食による E1 発生確率が頂上事象の発生確率に大きく影響している。主桁の腐食発生確率と E1 発生割合は同じ値を用いているものの、腐食の進行が早い桁端部の数が単純鈑桁 4 箇所に対して連続鈑桁 3 箇所と少ないことから、頂上事象の発生確率が高くなっているためと考えられる。



(a)頂上事象(単純橋と連続橋)　(b)中間事象(単純鈑桁)

図-3　事象発生確率の比較

単純鈑桁橋の主桁本数 2,4,6 本で比較した例を図-4(a)に示す。頂上事象の発生確率は 2 主桁が突出して高い結果となった。部材の破壊確率を比較すると(図-4(b))、2 主桁では図-3(b)の 4 主桁の場合と同様、主桁の基本事象の発生確率が大きく、その他の部材の影響は非常に小さかった。このことからも主桁本数が少ないことが影響していた。また、本検討では、破壊による部材間の影響を考慮しない簡易な FT 図の構造としたが、実橋においては複数の部材が連鎖的に影響を及ぼす複雑な挙動も想定される。

図-5 に示す FT 図に主桁のみ考慮した確率、床版のみ考慮した確率、主桁と床版を考慮した確率を比較した結果、部材ごとの中間事象の発生確率が 2 桁以上異なると、頂上事象発生確率に及ぼす影響が非常に小さくなるため、影響が明らかに小さいと判明している部材については省略し、簡易な FT モデルにより算出することができる可能性を示した。

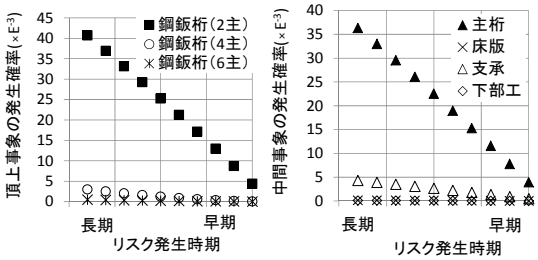
以上の試算結果から、FTA を適用したリスク構造として、点検データの母数が少なく構造条件別の基本事象の発生確率が得られていない場合、構造特性の違いを正確に反映した頂上事象の確率比較が困難な可能性があること、また、部材間の影響をリスク構造へ反映する方法が課題として残された。

［今後の課題］

リスク水準を構造物の一つの性能として定量的に評価できるための検討を引き続き進めていく予定である

［成果の活用］

点検基準等に反映する予定。



(a)頂上事象(主桁本数 2,4,6 本)　(b)中間事象(6 主桁橋)

図-4 事象発生確率の比較

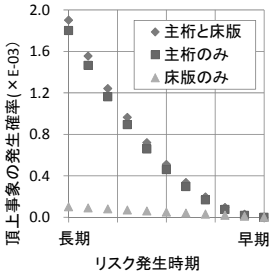


図-5 簡易モデルの検証（単純 4 主鈑桁橋）

既設道路橋の補修・補強設計基準に関する調査検討

Research to Develop Design Standards for Repair and Reinforcement Works of Existing Highway Bridges

（研究期間　平成 23～25 年度）

道路研究部　道路構造物管理研究室　室長　玉越　隆史
Road Department Bridge and Structures Division　Head　Takashi Tamakoshi
主任研究官　白戸　真大　主任研究官　窪田　光作
Senior Researcher　Masahiro Shirato　Senior Researcher　Kosaku Kubota
研究官　石尾　真理　研究官　宮原　史
Research　Mari Ishio　Researcher　Fumi Miyahara
研究官　横井　芳輝　交流研究員　強瀬　義輝
Researcher　Yoshiteru Yokoi　Guest Research Engineer Yohiteru Kowase
交流研究員　水口　知樹　交流研究員　狩野　武
Guest Research Engineer Toshiki Mizuguchi　Guest Research Engineer Takeshi Karino

In order to evaluate the existing bridge performance and to carry out rational bridge maintenance, NILIM conducted fatigue durability tests and some non-destructive test for reinforced concrete slabs with steel plate bonding.

［研究目的及び経緯］

既設道路橋では経年により様々な劣化や損傷の事例が報告されてきている。一方、変状を生じている道路橋の残存耐荷力を適切に評価できる手法は確立しておらず、例えば鋼板接着工法によって補強された床版が抜け落ちるという重大な損傷が報告され、上下面が舗装と補強鋼板に覆われて内部コンクリートが直接目視できない上、劣化過程において検知すべき事象が明確になっていないことが課題となっている。

平成 25 年度は、補強した RC 床版における点検方法と検知すべき事象の抽出を目的として、直轄国道における点検結果を分析するとともに、補強した既設橋の RC 床版に対して輪荷重走行試験機による疲労試験を実施した。また、各種の非破壊検査手法を適用して床版内部の破壊の発生や進行に対する検出特性について検証を行い、鋼板接着補強された RC 床版への適用上の課題を整理した。

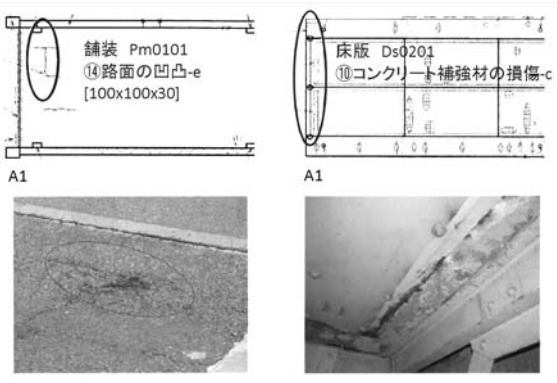
［研究内容及び研究成果］

１．直轄国道の点検結果の分析

国土交通省直轄国道の定期点検データ22,815橋から、床版に損傷が生じている橋梁を抽出し、橋年齢、橋種、橋長、補修補強工法、架橋環境（塩害地域、交通量等）などの各種条件に着目し、関連性のある変状（舗装、排水枡、伸縮装置の異常等）と床版の損傷形態（遊離石灰等）との関係を損傷図より整理した。一般に、RC 床版の損傷と床版以外の部材の損傷との関係が明確ではないことや、補強済み床版においては腐食以外の損傷を記録している事例が少ないものの、図-1に示すように、舗装と床版下面の異常が生じている位置が同じである事例がみられた。すなわち、舗装にひび割れが生じており、さらに床版下面に異常（鋼板接床版のうき等）が生じている場合には、内部の床版コンクリートの損傷が疑える可能性がある。これらが、補強床版の検知すべき事象である可能性と、橋梁点検における正確な記録の必要性を示した。

２．補強した既設橋RC床版の疲労試験

供試体は、1972(昭和 47)年より供用されていた実橋から切り出した RC 床版(長さ 4.5m,支間 2m,版厚 170mm)を加工した。疲労試験前に載荷試験を実施したところ、過年度実施した疲労試験により走行回数 20



(a)橋面　(b)床版下面

図-1　床版下面の損傷と関連性が疑われる損傷

89万回でも破壊しなかった既設床版と比較して2.5万回（重交通路線における1年間の交通量に相当）で破壊した貫通ひび割れが生じている既設床版と同等のたわみ量であった。この供試体に鋼板による補強を施工し、載荷荷重157kN（一定）で疲労試験を行った。

本研究においては、鋼板接着補強床版の損傷過程として、まず鋼板と床版コンクリートが剥離すると仮定し、剥離した状態からの疲労試験となるように、コンクリート面にワックスを塗布した上で樹脂接着を行い、アンカーボルトのみの固定とした。また、ひび割れにも樹脂が入らないようシールしている。

走行回数と床版中央たわみの関係を図-2 に示す。走行開始後 1 万回でほぼ鋼板は剥離(約 86%)し、11.5 万回時点で端部のアンカーボルトが破断した。その後もたわみはゆるやかに増加し続けて、25 万回で急激にたわみが増加し、破壊に至った。

試験後切断した結果を図-3,4 に示す。ひび割れは床版コンクリート内部に配置している上側の鉄筋に沿って水平に進行していた。また、写真-1 にみられるように水平ひび割れにより断面が小さくなることにより割れ、中には土砂化の兆候が見られる箇所もあった。重大な損傷が生じた実橋床版にも同様の損傷がみられた。

３．変状の検知（各種非破壊検査の結果）

非破壊検査では、内部ひび割れや土砂化の発生や進行に着目し、検出特性の検証を目的として超音波試験（コンクリート中の伝搬速度を計測）と衝撃荷重載荷試験（重錘落下によるたわみ計測）を行った。また、試験終了後に床版上面のたたき点検とレーダー探査を行い、切断結果と比較した。

超音波試験は、図-3 に示す床版中央を跨ぐ 3 測線で計測した。図-5 に示す試験結果では、特に①②断面付近で走行回数 19 万回頃から急激にコンクリートの伝搬速度が低下した。断面①の損傷図(図-4)に示す内部ひび割れをとらえられる可能性を示した。衝撃荷重載荷試験による床版中央部の測定結果（図-6）は、床版下面のたわみ（図-2）と絶対値は異なるものの同様の傾向を示した。いずれの検査手法も、実橋ではあらかじめ健全とみなせるパネルとの相対比較となることが課題となる。

たたき点検と切断後の内部コンクリートの状態とを比較した結果を図-7 に示す。深さが 100㎜ 程度の位置までの内部コンクリートの異状が概ね検知可能であった。電磁波レーダー結果では図-8 に示すように上面からの厚さごとに変状範囲をとらえることができる可能性がある。いずれの検査もひび割れの存在する位置や方向、土砂化か否かなどの情報は得られないことが課題となる。

［今後の課題］

既設道路橋における、補修・補強部材の点検・検査手法の確立と、信頼性を確保した合理的検査手法の検討を進めていく。

［成果の活用］

点検基準等に反映する予定。

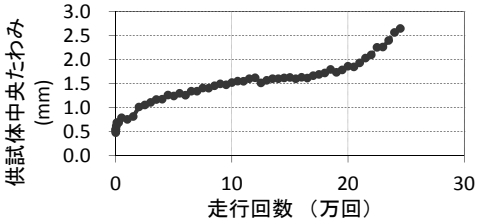


図-2 たわみの推移

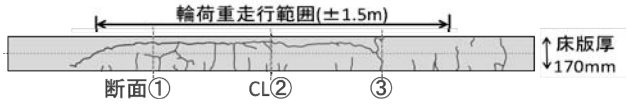


図-3　損傷図(橋軸方向)

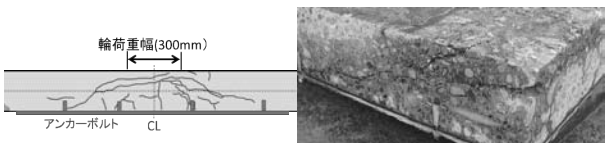


図-4 損傷図(橋軸直角方向①断面）写真-1 内部損傷

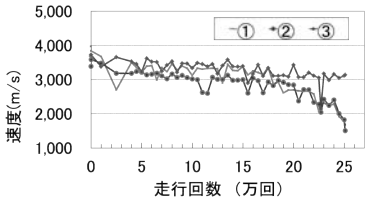


図-5　超音波試験結果

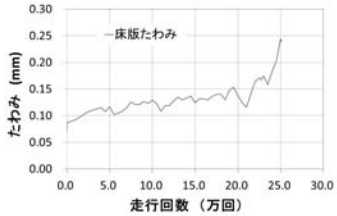


図-6　衝撃載荷試験結果

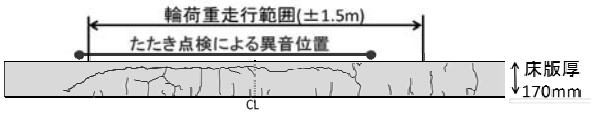
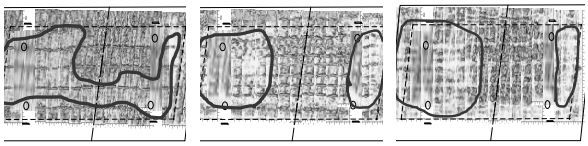


図-7 たたき点検異音位置とひび割れ位置との関係



(a)上面～上側鉄筋下　(b)鉄筋間　(c)下側鉄筋上～鋼板

図-8 電磁波レーダー結果(平面図・上面より計測)