

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 年度～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 大久保 雅憲	主任研究官	大城 温
Senior Researcher Masanori Okubo	Senior Researcher Nodoka Oshiro	
研究官 石尾 真理	研究官	横井 芳輝
Researcher Mari Ishio	Researcher	Yoshiteru Yokoi

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。また、道路橋を含む様々な道路構造物の状態を統一的な基準で評価することで道路機能の確保・維持の観点から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維持にかかる負担の軽減が必要とされている。このためには、トンネル及び土工構造物についても道路橋と同様に、統計的な処理による状態の把握や将来状態の予測を行うためのデータを点検で取得する必要がある。

これらを踏まえ、本研究では、将来の劣化状態を評価する手法を確立するため、橋梁定期点検要領（案）（平成 16 年 3 月）制定以降、統一的な手法で客観的なデータが蓄積されている道路橋の点検結果を用いて、損傷発生傾向及びそれらの進行傾向を整理した。また、全国のトンネル及び土工構造物の点検結果を用いて、損傷発生状況の特徴を整理するとともに、点検における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した。

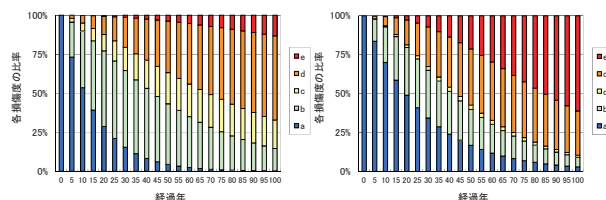
〔研究内容及び研究成果〕

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 22,000 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の劣化の特徴を整理した。図-1 は、鋼板桁橋の腐食の結果である。A・B 塗装系と比べ、C 塗装系は

経過年数に従って損傷程度が最も悪い「e」の増加が多い傾向にある。一方で、損傷なしの判定である「a」については C 塗装系の方が経過年数に従った減少量は少なく、A・B 塗装系に比べて、損傷程度は二極化する傾向となった。

点検データから作成した損傷程度の推移図から損傷の劣化傾向の基礎的な特徴を比較する場合の参考となる指標の検討を行った。指標の算出にあたっては、図-2 に示すように、損傷程度の a を「健全と見なせる状態」（低リスク状態）、e を「損傷が顕著であるなどによりリスクが高い状態」（高リスク状態）とし、それらが一定の割合に到達する年数を用いて、指標 A、B の 2 種類の指標を算出した。この指標は、損傷程度の推移図の形状により特徴を表すものであり、相互比較により劣化のパターンを図-3 に示すように、「二極化型」、「平均化型」、「早期劣化型」、「劣化加速型」の 4 つの特徴に分類されるものとした。鋼板桁の腐食の例を図-4 に示す。この指標からは、C 塗装系に比べ、A・B 塗装系の方が早期劣化型の損傷となった。



(a) A・B 塗装系 (b) C 塗装系
図-1 損傷程度の推移図（鋼板桁_腐食）

3. 特定の損傷の特徴整理

耐候性鋼材に防食機能の異常がみられる橋

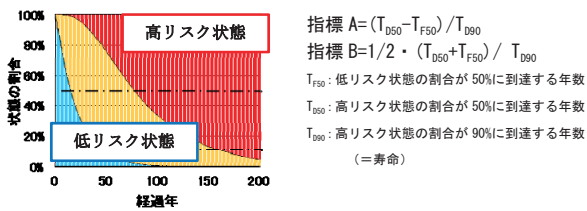


図-2 損傷程度の推移図を用いた指標の設定

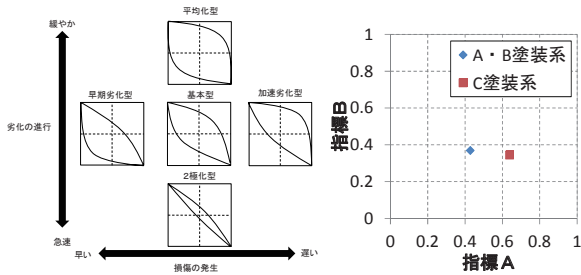


図-3 劣化特性パターン 図-4 鋼板桁腐食の例

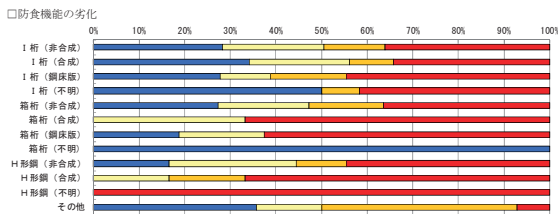


図-5 構造形式別の損傷程度区分の割合

梁のうち40橋を対象に損傷の特徴整理を行った。図-5に防食機能の劣化程度の判定結果を構造形式別の内訳として示す。概ね5割の橋梁に、損傷程度d以上の異常腐食の状態がみられる結果となった。

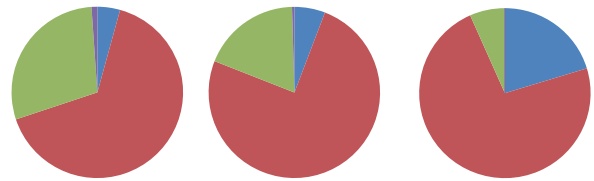
4. 総合評価指標の検証

道路橋の定期点検では、部材毎の損傷状態を程度に応じて区分することで評価が行われる。一方で、利用者や管理者にとっては道路の一部として橋の性能がどの程度健全なのかが重要である。そこで、当室では、過去に部材や部位毎に得られる点検データを基に橋全体としての機能や性能の状態を表現できる総合的な評価を表す指標を提案している（以下、「総合評価指標」という）。総合評価指標は、安全性、災害抵抗性、走行安全性の道路橋に求められる3つの性能の観点毎に算出するものである。

本研究では、点検により取得された客観的なデータである損傷程度から算出した総合評価指標により判定される補修の必要性和、技術者による補修の必要性の診断結果である対策区分の判定を比較し、総合評価指標の妥当性を確認した。なお、総合評価指標はその点数により「補修等の必要性が低い健全な状態」（60点以上）、「早期に補修する必要性が高いと考えられる状態」（30点以上60点未満）、「所要の性能を満足してい

ない可能性が高い状態」（30点未満）の3つの区分に分けた。また、対策区分の判定は、各橋梁の最悪値とした。図-6に耐荷性について、比較した結果を示す。指標の点数が低いほど、速やかな補修が必要と判断される「C」の判定の割合が多い。指標の点数が高いほど、「C」の判定の割合が少なく、損傷がない「A」の割合が多くなる傾向にあり、大局的には指標による補修の必要性の判定は技術者による補修の必要性和整合している結果となった。一方で、総合評価指標が60点以上であるものの、対策区分の判定が「C」のものもあり、評価結果の実務への反映方法には課題も残っている。

■ A: 損傷がないか、軽微で補修の必要なし ■ C: 速やかな補修等が必要
 ■ B: 状況に応じた補修が必要 ■ E1, E2: 緊急対策が必要



(a) 30点未満 (b) 30~60点 (c) 60点以上

図-6 総合評価指標（耐荷性）と対策区分の判定

5. トンネル及び道路土工構造物の点検に係る整理

77 トンネルの定期点検結果の損傷図及び損傷写真から、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。整理にあたっては、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区分をした。また、道路土工構造物についても、200箇所程度（斜面・切土：100箇所、盛土：100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。図-7に切土の要素分割の例を示す。今後は、過去の点検データ等に対して、試案を適用し、課題点の整理を行うとともに、それぞれの構造物の損傷の特徴整理を実施する予定である。

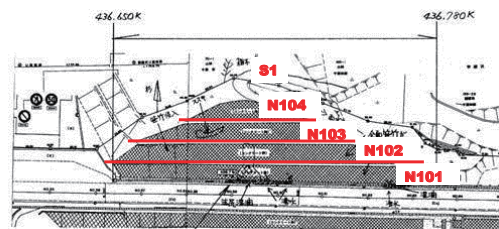


図-7 切土での要素分割の例

【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 prediction method for future states of bridges and evaluation method for road structure states
(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 大久保 雅憲	主任研究官	大城 温
Senior Researcher Masanori Okubo	Senior Researcher	Nodoka Oshiro
研究官 石尾 真理	研究官	横井 芳輝
Research Mari Ishio	Researcher	Yoshiteru Yokoi

More than 50% of Japan's 680,000 bridges will be aged over 50 years in 15 years and preventive maintenance is key to implement more strategic maintenance processes. NILIM has been seeking a strategic maintenance approach in which road structures are maintained and managed considering both the functions of the road networks they are subjected to and their present and future performance assessments. The present study has examined models to estimate deterioration processes of road structures using an bridge inspection database to develop the strategic maintenance approach.

【研究目的及び経緯】

道路橋の適切な維持管理水準を確保するための保全対策、道路構造物を群として捉えた維持管理施策に資するため、道路橋の将来の資産価値について信頼性を考慮して評価する手法や、道路構造物群の管理水準について統一した観点で定量的に評価する手法を検討している。

平成 24 年度は、土木計画学の分野で実測されたデータからの母集団推計や傾向分析に実績のある代表的な統計的手法を直轄道路橋の点検データに適用し、適用する手法の違いによる劣化予測結果の違いや適用性について検討した。また、産業分野で実績のあるリスクベースメンテナンス (RBM) の考え方を道路橋へ適用する場合の手法や考え方について検討するため、国内外の適用事例を調査し、適用の可能性について検討した。

【研究成果】

1. 道路橋の劣化予測

橋梁定期点検データのように、離散的に得られている状態データに対して、統計的手法を用いて状態の遷移特性を表現する場合、それらのデータ群が本来どのような特性を有していると仮定するのによっても取り得る手法が異なってくる。そこで、本研究では、道路橋の部材の劣化に対して、劣化特性の捉え方とそれに対応する既存の劣化予測モデルとの関係を整理した。その上で、それぞれの手法を直轄道路橋の点検データに適用し、予測結果を相互比較した。なお、劣化予測に用いたデータは、直轄8地方整備局管理の全橋梁(約 22千橋)の点検結果のうち、2回以上の点検データがあ

り、かつその間に補修が行われていないものを対象とした。なお、適用した劣化予測手法は、以下の5手法とした。

①マルコフ遷移モデル (集計)

経過年数により劣化特性が変わらずかつ点検データを離散的に扱えると仮定したモデル

②マルコフ遷移モデル (最尤推計)

経過年数により劣化特性は変わらないと仮定した上で点検データを連続的に扱うために指数ハザード関数による最尤推計法を用いたモデル

③分割マルコフ遷移モデル (集計)

経過年数により劣化特性が変わるものの、点検データを10年間隔で区分し、同じ区分の中では斉時性があると仮定したモデル

④ワイブル遷移モデル

経過年数により劣化特性が変わると仮定したモデル
指数ハザード関数に経年的な変化を与えた結果の一例(鋼板桁橋のA・B塗装系の腐食)を図-1に示す。適用する劣化予測手法により、劣化予測結果が異なり、経年的に劣化の進行特性が変わることを考慮した③、④の手法では、経過年数が若いうちは損傷進行が遅く、年数が経つにつれ劣化が加速する傾向がみられる結果となった。また、図-1⑤に、各予測結果から得られる損傷程度の期待値の回帰曲線を示す。①と③の手法では同様の結果が得られたものの、④では予測結果に大きく乖離が生じる結果となった。なお、他の損傷の種類についても同様に、採用する劣化予測モデルによって、将来の状態の予測結果は大きく異なる可能性があ

表-1 損傷の劣化特性の捉え方と劣化予測モデル

劣化予測モデル	時間的連続性 (観測時点以外での状態遷移)		経年依存	
	離散	連続	なし (斉時性)	あり (非斉時性)
			単調傾向	非単調傾向
マルコフ遷移モデル(集計)	○		○	
マルコフ遷移モデル(最尤推計)		○	○	
分割マルコフ遷移モデル(集計)	○		△注1	△注1
ワイブル遷移モデル		○		○

注1)同じ分割区間内の経年依存性は無視される。

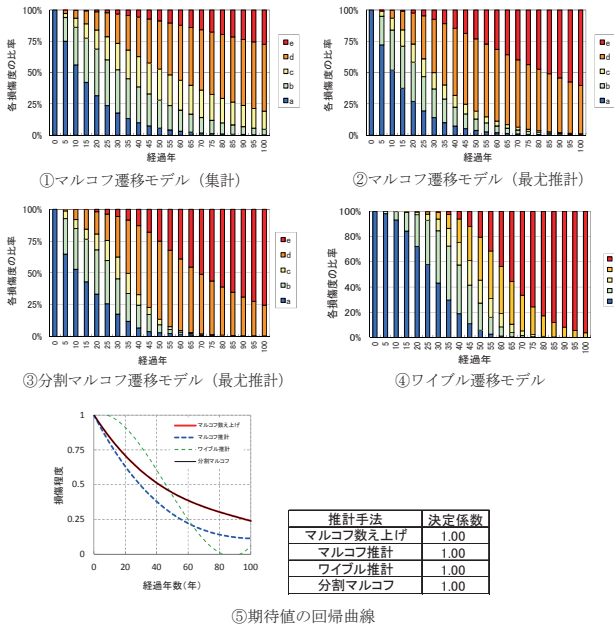


図-1 劣化予測結果(鋼板桁_腐食_A・B塗装系)

表-2 道路橋のリスク評価の適用性

解析目的	リスク評価手法	道路橋リスクへの適用性
リスク評価項目抽出手法	FMEA(Failure Mode and Effects Analysis)	○
	HAZOP(Hazard and Operability Studies)	▲
	SWIFT(Structured What IF Technique)	○
	Delphi 法	○
ハザード特定手法	フォールトツリー解析(FTA, Fault Tree Analysis)	○
	イベントツリー解析(ETA, Event Tree Analysis)	○
	GO手法/GO-FLOW手法	▲
リスク算定手法	リスクマトリックス	○
	確率論的リスク評価(PRA, Probabilistic Risk Assessment)	○
	R-Map	▲

○:適用性が高い ▲:適用性が低い

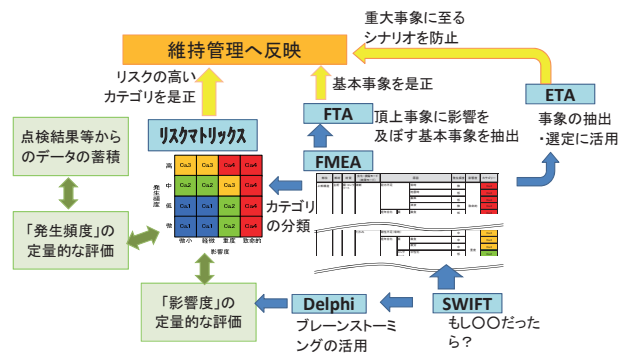


図-2 FMEAワークシートによる整理例

ることを示した。

2. 道路橋への損傷影響度評価の適用性に関する検討

道路構造物の維持管理に損傷影響度評価の観点を導入するにあたって、他の社会資本や機械設備の分野におけるリスク評価の事例を収集し、その手法や考え方を整理して道路橋への適用性を検討した。

表-2に示す、リスク評価項目抽出手法(4事例)、ハザード特定手法(3事例)、リスク算定手法(3事例)について、リスク評価手法の特性を踏まえ適用性の検討を行った。その結果、適用性が高い手法を図-2に示すように組み合わせることで、道路橋の構造的な性能では決めることのできない事象を抽出できる可能性を示した。

例えば、FMEA、FTA及びETA等を活用して、一部の部材の損傷と道路構造物の状態との因果関係を整理し、リスクの評価軸である「影響度」のカテゴリを分類する。リスクマトリックスの評価軸である「発生頻度」と定量的な「影響度」について、現時点では定量的評価は困難であるが、国土交通省直轄国道定期点検データの活用、構造リダンダンシーの解析手法の研究を進めることによって定量的な値を設定できる可能性があることがわかった。

[今後の課題]

- 道路橋の劣化予測手法については、損傷ごとにその傾向を把握することができた。今後は実態との整合性に関する確認を行っていくとともに、将来の資産価値の算出条件等を整理する。
- 道路構造物群(橋梁・舗装・トンネル・土工・道路附属物)を対象として、リスクマトリックスの評価軸である「発生頻度」と「影響度」の定量的な値の算定手法について検討していく。また、国総研が提案している道路橋定期点検データを活用した総合評価指標¹⁾について検証を進めていくとともに、損傷影響度評価との組合せた指標を道路構造物の維持管理へ活用する方法についても検討していく。

[参考文献]

- 1) 国土技術政策総合研究所資料第488号 平成19年度道路構造物に関する基本データ集、平成20年12月

[成果の発表]

国総研資料及び各種論文で発表予定。

[成果の活用]

省内委員会等における参考資料とする。

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 Works and Reinforcement 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
Road Department Bridge and Structures Division
主任研究官 白戸 真大
Senior Researcher Masahiro Shirato
研究官 石尾 真理
Researcher Mari Ishio
部外研究員 吉川 卓
Guest Research Engineer Taku Yoshikawa

室長 玉越 隆史
Head Takashi Tamakoshi
主任研究官 窪田 光作
Senior Researcher Kosaku Kubota
研究官 横井 芳輝
Researcher Yoshiteru Yokoi
部外研究員 氏本 敦
Guest Research Engineer Atsushi Ujimoto

In order to apply the FEM model to the new design of the highway bridges, the condition of models and the relations with the result is under consideration. In this term, girder bridges and prestressed concrete box-girder bridges are conducted trial calculations use several way by FEM and compared the result and the standard value.

[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おり、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いない。例えば、新設橋設計時の基準や手法をそのまま適用すると、部材間の荷重分担割合が実態と乖離したり、損傷部材の存在の影響が適切に考慮されないなど、必ずしも合理的な対応とならないことが課題となっている。

平成 24 年度は、既設橋の RC 床版を、鋼板接着により補強された場合、どのようなメカニズムで破壊するのかという課題に対して、撤去部材を用いた輪荷重走行試験機による疲労試験を行った。また、RC 床版の疲労をはじめ、鋼桁の腐食・疲労、PC 鋼材の破断を対象として解析手法を検討し、損傷などの変状のある既設道路橋の保有する耐荷力性能を評価する手法の適用性について検証した。さらに、鋼橋の塗装面が火災による熱影響によってどのように変化するのかを鋼材の残存耐荷力との関係で整理するために様々な条件下での塗膜加熱実験を実施した。

[研究内容及び研究成果]

1. 既設RC床版の輪荷重走行試験

実際に長期間供用されていた RC 床版を用いて、輪荷重走行試験 (写真-1) を実施した。実験供試体は、同一橋から同等のひび割れの程度 (幅、間隔) である、供試体 No. 1 (鋼板なし)、18, 28 (鋼板あり) とした。このうち、供試体 No. 18, 28 には試験前に鋼板接着補強を施している。ただし、No. 28 がアンカー以外に全面接着材で付着しているのに対して、No. 18 は鋼板接着が剥

がれた後を想定し、供試体 No. 18 の床版下面に剥離剤を塗布した (写真-2) 後に鋼板補強を施した。

供試体 No. 1 と No. 28 は鋼板接着補強の有無を、供試体 No. 18 と No. 28 は鋼板接着補強における床版と鋼板の付着効果をそれぞれ比較したものである。実験結果のうち、走行回数と床版下面の変位の関係を図-1 に示す。供試体 No. 1 は、一部に貫通ひび割れがありかつ鋼板補強していないため、輪荷重の少ない走行回数で破壊に至ったのに対し、No. 18, 28 は変位が小さく、走行回数 52 万回においても破壊には至らなかった。すなわち、鋼板接着補強の効果が大きいことがわかった。また、供試体 No. 28 よりも No. 18 のたわみが大きく比較的早く破壊に至ると予測されるため、鋼板がアンカー以外に全面で付着している No. 28 の方が耐久性が高いことがわかった。



写真-1 輪荷重走行試験 写真-2 床版への剥離剤塗布

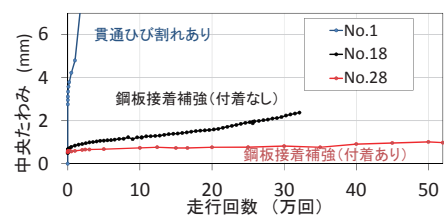


図-1 試験結果 (床版中央たわみ)

2. 解析的疲労耐久性評価手法の検討

国総研では、床版に繰返し载荷される移動荷重によってコンクリート要素に累積される弾性ひずみエネルギーが、ある破壊基準に達した場合、弾性係数の低減させることによって、床版のひび割れ等損傷状況を表す逐次弾性FEM解析手法¹⁾を提案している。本手法を既設橋の状態評価への適用性を検証するため、上記1.の実験ケースを試算し、床版たわみの推移傾向を比較した。供試体 No. 18 の鋼板の剥離状態は、解析モデルにおいて薄い剥離層を設け、あらかじめ剛性を低下させることで表現している。

図-2 に、解析による床版たわみの推移傾向を示す。損傷の進展に伴い中央たわみの絶対値は異なるものの、供試体ごとの中央たわみの大小関係や剛性低下していく要素領域の進行程度等については、この解析手法により概ね実験結果と一致することがわかった。

3. 火災により被災した鋼道路橋の受熱温度推定

鋼道路橋が火災による熱影響を受けた場合、補修の要否を迅速に判断するためには、受熱程度に応じて異なる鋼部材の力学的特性の変化を推定することが不可欠である。塗膜損傷状態から被災橋梁の受熱程度が推定できる可能性があることから、平成 23 年度に塗装鋼板に対する加熱試験を実施し、橋梁の被災度判定のための参考資料を作成した²⁾。

平成 24 年度は、平成 23 年度に実施した試験体のうち、2 種類の塗装仕様試験体を 1 年程度屋外暴露し、加熱試験を実施した。加熱による塗膜の損傷状況は、塗膜の乾燥状態や紫外線等による経年劣化の状況によって違いが生じる可能性が考えられるためである。

試験は、過年度の試験と出来る限り同一となる加熱条件で実施し、試験終了後の表面状態について比較し、色調補正した写真データを蓄積した。

加熱試験結果を表-1 に示す。1 箇月暴露した供試体と 1 年暴露した供試体では、加熱温度ごとの各塗膜層の変色・はがれの有無については同様の結果が得られた。しかしながら、A-1 系 400℃において変色の色調や状態が異なっていた。また、1 年暴露した供試体塗膜厚は、加熱前後ともに薄く、加熱後は付着力の低下もみられた。

[今後の課題]

・既設RC床版の破壊メカニズムの解明

鋼板接着により補強された床版を、どう管理していけばよいかという課題に対して、既設橋のRC床版を用いた輪荷重走行試験を実施し、破壊のメカニズムを解明していくための検討を進めて行く。

・解析的耐力力・耐久性評価手法の検討

床版の疲労、鋼桁の腐食・疲労、PC鋼材の破断等

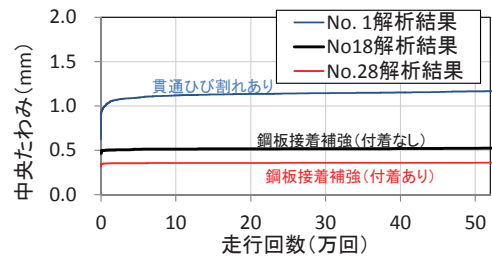


図-2 既設RC床版の解析結果（床版中央たわみ）

表-1 塗膜外観性状の違い

加熱温度 (°C)	A-1 塗装系 (電気炉加熱試験・上面)		C-5 塗装系 (電気炉加熱試験・上面)	
	1ヶ月暴露	1年暴露	1ヶ月暴露	1年暴露
加熱前				
200				
300				
400				
500				
600				
700				

に対する耐力力及び耐久性の評価手法を構築し、供用中の橋梁に適用できるように検討していく必要がある。

・火災により被災した鋼道路橋の受熱温度推定

今後、異なる既設橋の塗装種類や劣化状況等の条件で加熱試験を実施し、データを取得していく。

[成果の活用]

基準等に反映させる予定。

加熱試験の方法及び撮影する画像データは、国総研HPに公開していく。

[参考文献]

- 1) 国総研資料共同研究報告書第 472 号, 道路橋床版の疲労耐久性評価に関する研究
- 2) 国総研資料第 710 号, 鋼道路橋の受熱温度推定に関する調査