

道路構造物群の状態評価手法及び橋梁の将来状態予測手法 に関する調査検討

Study on evaluation method for road structure states and prediction method for future states of bridges
(研究期間 平成 21～23 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
	Senior Researcher	Masanori Okubo
研究官 北村 岳伸	交流研究員	藤田 知高
Researcher Takenobu Kitamura	Guest Research Engineer	Tomotaka Fujita

From the viewpoint of road networks consisting of bridges, pavements, tunnel, and earthworks, NILIM studied on the function required to road structures, method to represent impacts of the extent of damage to the structures on the existing function as common index applicable to all structure types, and methods to evaluate the networks. For bridges, prediction methods for estimates of deterioration taking reliability into account were conducted.

〔研究目的及び経緯〕

道路ネットワークは、橋梁、舗装、トンネル、土工等、様々な種類の構造物から成り立っている。一方、近年、新設構造物に対しては特定の機能における性能に着目した基準に基づく整備が進められつつあり、既設構造物に対しても機能の性能状態に着目して合理的に管理しようとする検討が進められている。道路構造物も将来的には、橋梁、舗装、トンネル、土工等の個々の機能のみならず、道路ネットワークの機能との関わりの中でその性能を評価して、全体として調和のとれた合理的な整備や管理を行うことが必要と考えられる。

こうした状況を踏まえ、道路ネットワークの観点から道路構造物群に求められる機能を整理し、構造物に発生している損傷程度が当該機能に与えている影響度合いを構造物の種類に拘わらず共通の指標で表す方法、及び得られた指標を用いてネットワークを評価する手法を検討した。

更に、橋梁に関しては、他の道路構造物に先行して、将来の機能状態の予測を視野に、損傷の劣化予測を高度化する手法について検討した。

〔研究内容〕

1. 橋梁の劣化予測の高度化

道路橋の予防保全の適切な実施時期を合理的に設定する際の一つの判断材料を得るため、直轄道路橋の定期点検で取得されてきたデータを基に、主な損傷に対して4手法により劣化予測を行うとともに、マルコフ遷移予測に推定の信頼性を考慮する手法をとりまとめ

た。

2. 道路構造物群及び道路ネットワークの評価手法

道路構造物の損傷に伴う性能状態を分かりやすい形で表現するため、構造物の種類を問わず共通の指標で評価する手法を開発した。更に、この指標を用いて道路ネットワークの状態を俯瞰する一つの方法として、行政目的達成の検討に必要な情報を抽出し、これらを指標と合わせてマップに表現する手法を検討した。

〔研究成果〕

1. 橋梁の劣化予測の高度化

橋梁の劣化予測手法には、寿命を設定する方法、理論的な劣化予測式による方法、点検結果等の実績を統計的に分析する方法及び遷移確率を用いる方法がある。現在国土交通省で運用されている方法(現行BMS)は、理論式を主として用いている。点検結果の統計分析においても、同一箇所での2回の点検結果の推移を回帰する方法、更にそれからマルコフ遷移確率を求めて予測する方法、各損傷程度に至る経過年数の平均値を回帰する方法がある。

これら予測手法の違いが予測結果にどの程度差を生じるかについて、鋼部材の防食機能の劣化及び腐食を例に、図-1に示す。4手法の差は大きく、ある意味予測の限界を示しており、各手法の信頼性を明確にして予測値を使用する必要性が示されたものと考えられる。なお、現行BMSは安全側になるよう、比較的早期に劣化する設定とされている。

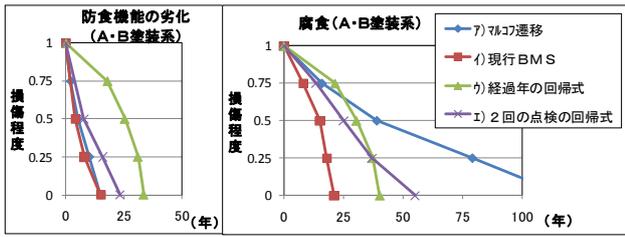
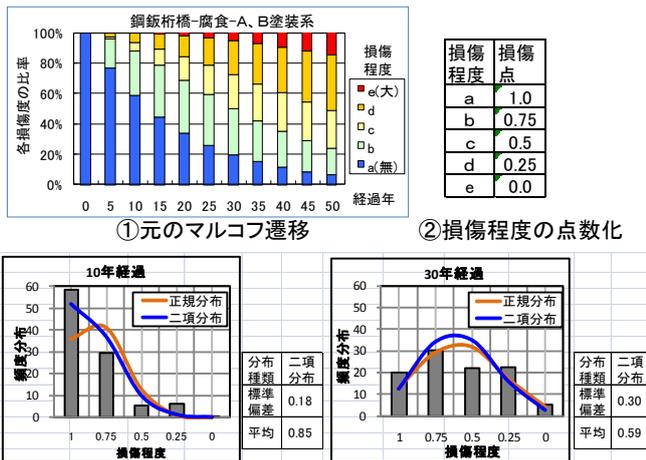
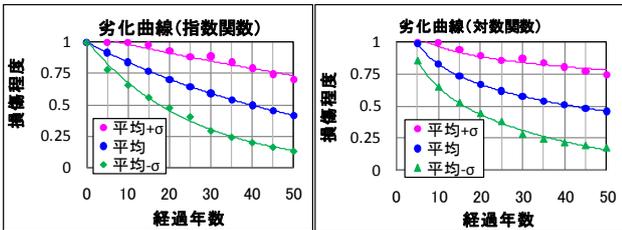


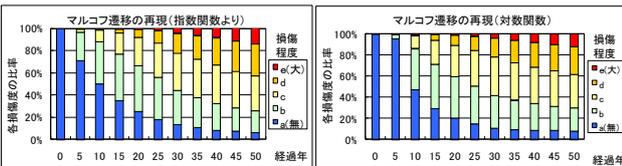
図-1 鋼桁橋の劣化予測



③ヒストグラムと検定結果



④信頼性を明示した劣化曲線



⑤逆算したマルコフ遷移

図-2 信頼性を取り込んだ劣化予測式の作成手法

劣化予測に信頼性の概念を取り込んで劣化予測結果を評価するための手法を、マルコフ遷移を例に図-2に示す。①が、元となるマルコフ遷移である。各損傷程度に②に示す数値を当てはめ、各経過年毎に損傷程度のヒストグラムを作成し、適用させる分布形状(二項分布又は正規分布)を検定により求める。③は、経過10年と30年の例である。求めた分布形状に従い標準偏差(σ)を求め、平均に加えてグラフに明示するとともに、平均、 $+1\sigma$ 、 -1σ それぞれの回帰式(指数関数又は対数関数)を求める(④)。この④が、信頼性を取り込んだ劣化予測式である。例えば、50年後の腐食の状態は、平均では0.5(=c)となり、 1σ のばらつきを考

慮すると $0.75(=b) \sim 0.2(=d)$ となることを示している。もともと、このように幅があるのは元のマルコフ遷移図を見れば明らかではあるものの、平均の回帰式を求めた段階でも予測が確定値と錯覚してしまうのを改めて警鐘したものである。つまり、予測結果を確定的に用いるのは危険で、これだけの幅を持った、この程度の信頼性しかないものであることを十分認識して用いなければならないことを数値的に示せたものと考えている。なお、地方公共団体等において、劣化予測式を独自に開発しており、これに信頼性を取り込む際の便宜のため、④の劣化予測式からマルコフ遷移を逆算したものが、⑤である。元のマルコフ遷移の再現性は、対数関数の経過5年でやや差が見られる以外概ね良好で、実用に耐えられるものと考えている。

今後は、部材単位の予測を橋梁単位に積み上げることに加えて、橋梁の性能状態(後述の指標)を予測し、保全シナリオの違いによるライフサイクルコスト算出などの資産価値予測に取り組んでいく予定である。

2. 道路構造物群及び道路ネットワークの評価手法

開発中の指標は、全ての道路構造物に該当し、かつ、供用性や安全性の観点から不可欠と考えられる3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」を表す走行安全性である。

構造物毎の指標をもとに、区間の指標を最低値とした性能状態を3色で表示し、道路ネットワークの機能の一つを表す車線数を線の太さで表現したネットワークの性能マップを図-3に示す。ネットワークの走行安全性に係る状態の可視化が図れ、整備水準・管理水準の評価ツールとして有効となるものと考えられる。

[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]

道路構

造物群の管理状態の評価手段の一つとして行政等での活用を働きかけていく予定。

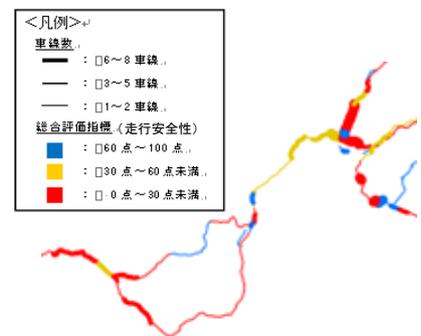


図-3 ネットワークの性能マップ (イメージ)

道路橋定期点検の合理化・標準化に関する調査検討

Study on rationalization and standardization of periodic inspection for highway bridges

(研究期間 平成 21 年度～23 年度)

道路研究部 道路構造物管理研究室
Road Department, Bridge and Structures Division

室長 玉越 隆史
Head Takashi Tamakoshi
主任研究官 大久保 雅憲
Senior Researcher Masanori Okubo
交流研究員 藤田 知高
Guest Research Engineer Tomotaka Fujita

研究官 北村 岳伸
Researcher Takenobu Kitamura

In order to grasp states of all highway bridges including ones managed by local government, NILIM conducted a study towards formulation of rational periodic inspection manual. Data analysis of periodic inspection enables us to grasp feature of generation status of damage and rate of progress depending on structure types, bridge formulation environments.

〔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今後急速に増加するという課題に直面することから、これからは、施設の状態を定期的に点検・診断し、異常が認められる際には致命的欠陥が発現する前に速やかに対策を講じ、ライフサイクルコストの縮減を図る「予防保全」の考えに立った戦略的な維持管理・更新を実施していく(平成 21 年 3 月 31 日閣議決定)とされている。このためには、データに基づく科学的な維持管理に移行する必要がある、更には、管理者の別を超えて全国に形成された道路ネットワークとしての機能を維持、向上させていくことが重要になると考えられる。

これらを踏まえ、本研究では、効率的に地方公共団体が管理するものを含む全国の道路橋の状態を統一的な観点で把握するため、各道路管理者間に共通して適用される合理的な定期点検要領の策定に向けた検討を実施した。

〔研究内容〕

直轄道路橋における定期点検は、橋梁定期点検要領(案)(平成 16 年 3 月、国道・防災課)に基づき、供用後 2 年以内の初回点検、その後は 5 年間隔で実施しており、現在までにほとんどの橋梁について統一的な手法で把握された点検データが蓄積されている。一方、地方公共団体においては、定期点検の必要性を認識しつつも予算や人員の制約から点検が行われていないケースも多い。

本研究では、将来の維持管理の合理化・高度化に資するよう、また、地方公共団体の点検導入に資するよう、直轄道路橋の近接目視で網羅的に取得されてきた

膨大な点検データに対して、構造形式、部位、架橋環境などの条件毎に損傷の発生状況や進行速度などに着目した傾向や特徴の分析を実施するとともに、一部の地方公共団体管理道路橋の損傷の特徴を把握し、直轄道路橋と比較した。

〔研究成果〕

1. 初回点検結果

初回点検結果の分析例として、PC ポステンT桁橋主桁に発生している主な損傷の発生割合(径間単位で集計)を、全点検結果とあわせて図-1 に示す。剥離・鉄筋露出、漏水・遊離石灰では全点検結果での損傷割合が初回点検結果のそれを大きく上回っており経年による劣化進行が明確に現れているのに対して、ひびわれの発生割合は初回点検結果と全点検結果がほぼ同程度であり、全点検結果では損傷程度の悪化傾向が見られる。これは、初期ひびわれを抑制するができれば将来のひびわれ発生が抑えられ、予防保全に有効に寄与する可能性があることを示唆していると考えられる。

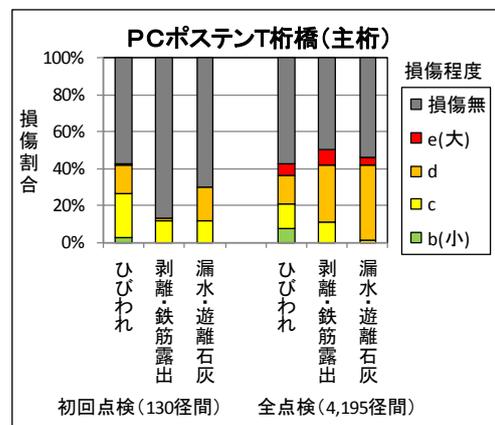


図-1 初回点検及び全点検での損傷状況

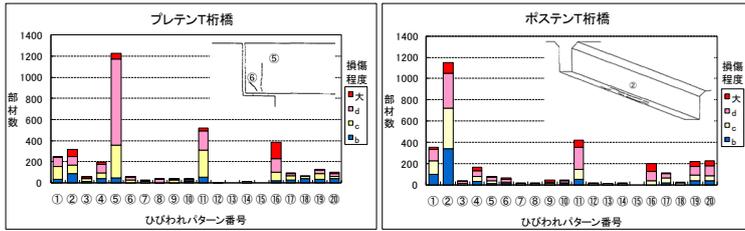


図-2 ひびわれパターン別損傷発生部材数

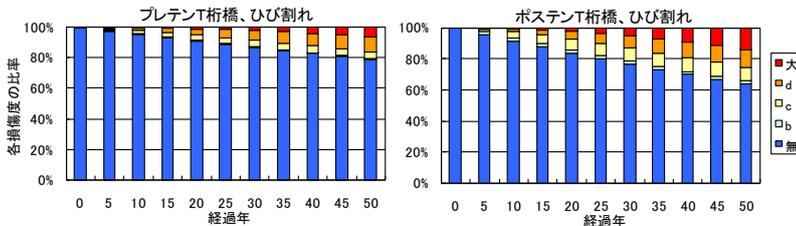


図-4 ひびわれ発生のマルコフ遷移

2. 損傷発生・進行の特徴

構造形式別の損傷の特徴についての分析結果を、ポステンT桁橋とプレテンT桁橋を例に示す。図-2は、ひびわれパターン別の損傷発生部材数の比較である。プレテン桁においてはパターン⑤（支承上の桁下面・側面に鉛直なひびわれ）が、ポステン桁においてはパターン②（主桁の支間中央下面の橋軸方向ひびわれ）が突出して多く、構造形式による明らかな差が見られた。図-3は、外桁と中桁のひびわれ発生状況の相関である。ひびわれは、プレテン桁では全主桁に発生するものは少なく、外桁のみ又は中桁のみに発生し、外桁が中桁に比べて損傷程度が重い傾向が、ポステン桁では、全主桁にひびわれが発生するものもある程度数があることがうかがえる。図-4は、同一橋梁の同一箇所でも5年以内に実施された点検結果（径間を細分化した要素単位で集計）の推移を基に、ひびわれ発生のマルコフ遷移を算出したものである。工場で製作されるプレテン桁は、現地で製作されるポステン桁に比べて損傷の進行が遅い傾向が見られる。なお、ひびわれパターン別のマルコフ遷移の算出も試みたものの、条件の細分化に伴い有効データ数が減少するため、不可能であった。

以上のような構造形式別、部位別等の損傷発生、損傷進行の特徴を整理し、点検時の着目箇所等としてとりまとめることにより、損傷見逃しの危険性を減少させるなど点検の質の向上が図れるものと考えている。なお、これらから点検頻度の見直しに繋がるまでの特徴は認められなかった。

3. 目視点検の限界

橋梁からコンクリート片が落下し、第三者に被害を与える危険性のある部位に対しては、コンクリートのうきを目視点検で把握することに限界があることから、原則、2～3年毎に打音検査が行われている。プレテ

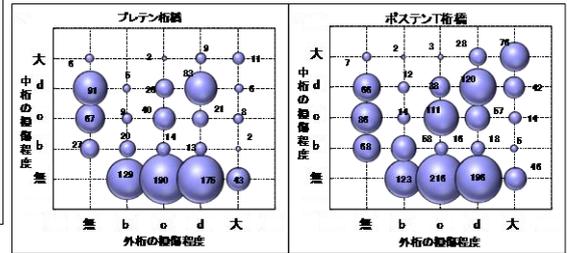


図-3 部位別ひびわれ発生状況

表-1 コンクリートのうきに対する打音検査と目視点検の相関

うきの有無		打音検査結果			
		プレテンT桁		ポステンT桁	
		無	有	無	有
定期点検結果	無	33,676	1,710	7,920	820
	有	243	1,159	142	442

ンT桁及びポステンT桁について、この打音検査結果と目視点検である定期点検結果との相関を、表-1に示す。両検査の時期は一致していないものもあることから一概には決めつけられないものの、定期点検ではうき無と判定された要素のうち5～10%は打音検査でうき有となっており、目視点検の限界が証明される結果であった。このような目視点検の限界に対しては、特別な点検方法と頻度を別途定めた特定点検を実施していくことが重要であり、これはその一証左である。

4. 地方公共団体管理道路橋の損傷の特徴

地方公共団体が管理する道路橋の主な損傷の発生状況について、同地域にある直轄事務所管理の道路橋と比較して図-5に示す。地公体では鋼橋の亀裂が発生していないこと以外、直轄道路橋との大きな差異は見られない。亀裂発生は大型車交通量の影響が考えられるものの、これ以外は管理者による損傷の違いは顕著でないと想定しており、引き続きデータ数を充実させ、根拠資料を作成していく予定である。

[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)の改訂等に反映。

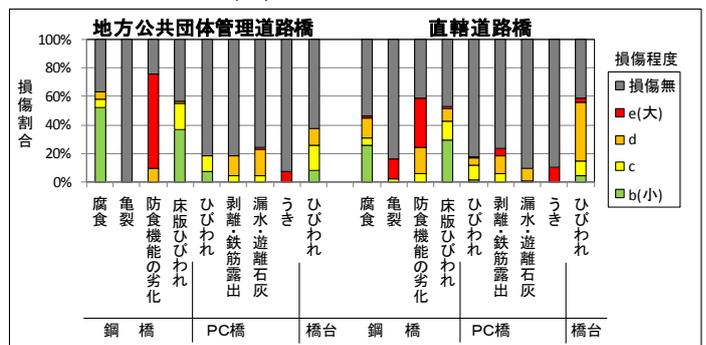


図-5 地公体管理道路橋と直轄道路橋の損傷状況

損傷部材の現有性能及び既設道路橋の性能評価手法 に関する調査検討

Study on existing performance of damaged bridge members and
performance evaluation method for existing highway bridges

(研究期間 平成 21 年度～平成 23 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 関谷 光昭
Senior Researcher Mitsuaki Sekiya
交流研究員 小沼 恵太郎
Guest Research Engineer Keitaro Konuma
交流研究員 藤田 知高
Guest Research Engineer Tomotaka Fujita

室長 玉越 隆史
Head Takashi Tamakoshi
主任研究官 池田 秀継
Senior Researcher Hidetsugu Ikeda
交流研究員 加藤 浩一
Guest Research Engineer Kouichi Kato

In order to evaluate the existing bridge performance and to carry out rational bridge maintenance, NILIM studied on effects of difference of numerical models of damage to bridge members on the results. Also, fatigue durability tests for reinforced concrete slabs in different extents of deterioration damage were conducted in order to grasp differences of the fatigue durability with or without penetrating cracks.

[研究目的及び経緯]

複雑な構造体である道路橋では、新設時には主要部材のみを解析モデルに取り込み設計されるものの、既設橋梁においては省略された部材も応力を分担するなど設計上の仮定と実構造の挙動が基本的に一致していない。そのような中、経年によって様々な変状が生じた既設橋に対して新設時の設計手法をそのまま適用すると、実際には荷重分担している部材の効果が無視されるなどの不合理が生じると同時に、変状による部材性能の低下が適切に考慮されず安全が担保されない恐れもある。そのため、現有性能を正当に評価し、合理的な維持管理を実現するためには、新設時とは異なり、実構造系の耐力機構と損傷等の変状による影響を適正に評価できる耐力評価手法を確立する必要がある。

そこで、当研究室では、平成 21 年度に新設時の設計で用いられる平面格子解析モデルにより、損傷した部材の変状による有効断面、床版と桁間の損傷状態、横桁等の荷重分配効果の程度及び幅員を変化させた解析モデルを構築し、耐力への影響を検討した。その結果、平面格子解析モデルでは、局部座屈等の部材損傷の影響を耐力性能に反映できない課題が抽出された。そのため、今年度は、局部的な損傷等に対しても正確に照査を行える要素単位での構造解析モデルを作成し、耐力の試算を行い、モデル化の相違が結果に及ぼす影響について検討を行った。

また、実際に供用され、劣化損傷した鉄筋コンクリート床版部材を用いた供試体による疲労耐久性試験を行い、劣化損傷程度の評価手法の確立のための検討を行った。

[研究内容及び研究成果]

(1) 損傷を考慮できる構造解析モデルの検討及び耐力力の試算

既設道路橋の施工実績が多く、耐力力への影響が懸念される代表的な損傷が発生している橋梁形式を検討対象として、耐力力上のクリティカルとなる部材及び部材接合部の応答を簡便かつ精度良く再現できる構造解析モデルを、2次元モデルと3次元モデルの2つのモデル化手法によってモデル化した。対象とした橋梁形式及び損傷形態を表-1に、作成モデル及び損傷のモデル化の一例をそれぞれ表-2～5に示す。

表-1 対象とした橋梁形式及び損傷形態

鋼橋	鉸桁橋 箱桁橋 トラス橋	鋼部材の板厚減少、鋼部材のき裂、 コンクリート床版のひびわれ、鋼部材の塑性変形
P C	中空床版橋 T桁橋 箱桁橋	コンクリートのひびわれ、内部鋼材の断面減少、 プレストレス緊張材の一部の破断、 プレストレスカの異常

作成した構造解析モデルを用いて、耐力力の観点で最も不利となるよう設定した載荷状態に対し、鋼橋(鉸桁橋)の腐食に伴う鋼部材の板厚減少及びPC橋(T桁橋)のプレストレスカの異常に対する試算結果をそれ

ぞれ図-1,2 に示す。

表-2 作成モデル
(鋼橋：鉄桁橋)

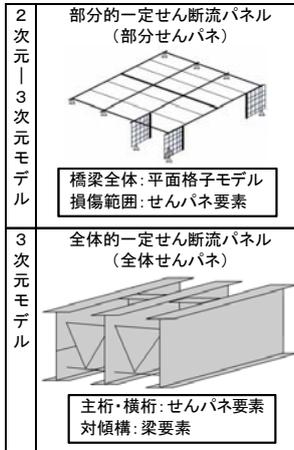


表-4 損傷のモデル化
(鋼橋：鉄桁橋)

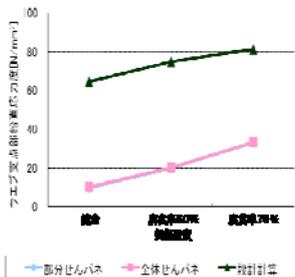
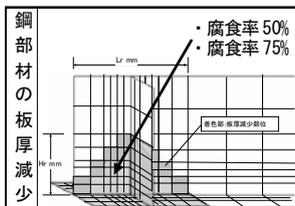


図-1 試算結果
(鋼橋：鉄桁橋)
(鋼部材の板厚減少)

鋼橋の試算結果 (図-1) より、簡便な2次元-3次元の組合せモデル (部分せんパンネ) と詳細な3次元モデル (全体せんパンネ) による試算結果は同等で、値は異なるものの損傷程度に応じた応答は設計計算と同様の傾向であった。一方、PC橋の試算結果 (図-2) では、損傷程度に応じて2つのモデル及び設計計算の乖離が大きくなる傾向がみられた。これらの結果より、橋梁形式、損傷形態及び損傷程度によっては、簡便なモデル化により精度良く耐荷力評価が可能と考えられるものの、全てのケースにおいて簡便なモデル化により評価可能とは言い難い課題が抽出された。

今後、橋梁形式の規模及び詳細なモデル化範囲を変化させて、損傷形態及び損傷程度ごとに耐荷力の試算を行い、モデル化レベルと評価レベルの関係を整理し、

表-3 作成モデル
(PC橋：T桁橋)

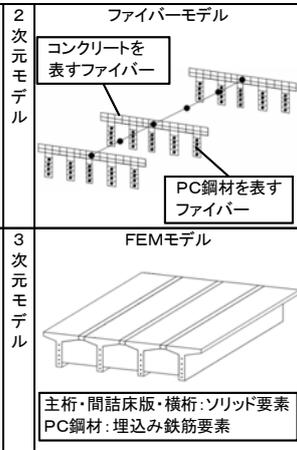


表-5 損傷のモデル化
(PC橋：T桁橋)

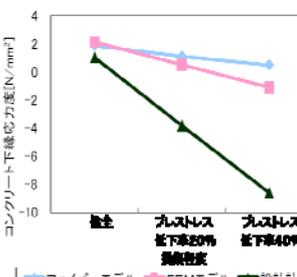
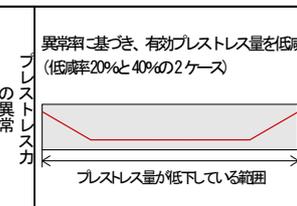


図-2 試算結果
(PC橋：T桁橋)
(プレストレス力の異常)

損傷の影響を反映できる普遍的な解析モデル化手法を検討し、簡便かつ精度良く安全側に耐荷力評価が行える手法をとりまとめる。

(2) 劣化損傷した床版の疲労耐久性試験

既設橋から切り出した劣化損傷程度の異なる鉄筋コンクリート床版部材 (以下「劣化損傷床版」という。) 2枚を使用して、劣化損傷程度の評価、輪荷重走行試験及び疲労解析を実施し、劣化損傷程度が疲労耐久性に及ぼす影響について比較整理した。

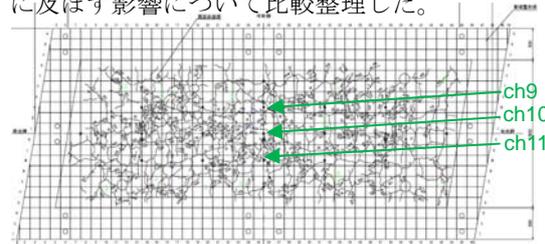


図-3 輪荷重走行試験結果 (No. 25) 20万回走行後

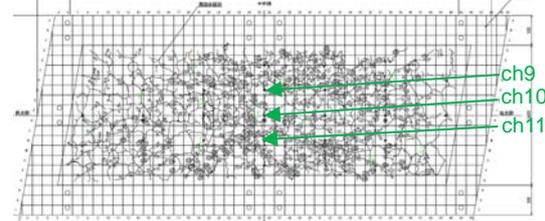


図-4 輪荷重走行試験結果 (No. 1) 2万回走行後

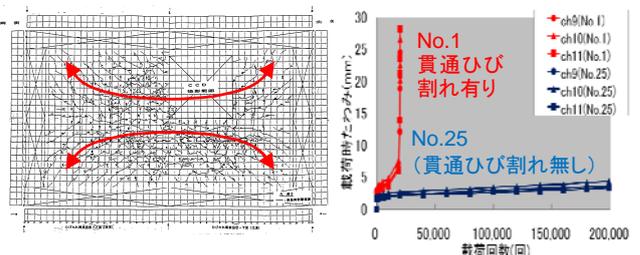


図-5 既往の輪荷重走行試験結果

図-6 載荷回数とたわみ変位

既往の新規製作した試験体では、放射状にひび割れが進展する (図-5) のに対し、劣化損傷床版においては、全面的にひび割れが細密化する (図-3,4) といった異なる傾向が示された。また、劣化損傷床版において、外観上同程度と思われるひび割れパターンでも、貫通ひび割れの有無により疲労耐久性が異なる可能性が示された (図-6)。

[成果の発表]

各種論文等で発表する予定。

[成果の活用]

今後、部材の損傷を反映した橋梁の耐荷性能評価手法を確立し、現有性能を最大限に活用した合理的な維持管理の実現に反映する予定。