

6. 道路橋・附属物等の長寿命化・耐災害性向上のための  
マネジメントとコスト縮減

# 道路橋等の性能評価方法の充実・高度化に関する調査検討

Study on the sophistication of performance evaluation method for bridges

(研究期間 令和2年度～令和6年度)

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

室長 白戸 真大  
Head SHIRATO Masahiro  
主任研究官 上田 晴気  
Senior Researcher UEDA Haruki  
交流研究員 五味 傑  
Guest Research Engineer GOMI Takashi

The reliability of bridges is usually evaluated for individual parts based on nominal stress levels while assuming each part behaves within the beam theory. However, recent bridge design and construction pursues to reduce the number of structural members and concrete-steel composite structure to reduce weights and such bridges are likely to behave in a complexed way. Accordingly, this study has sought a further measure to ascertain the structural reliability for such new structural types. The numerical simulation for a concrete-steel composite superstructure has shown that secondary stresses can develop noticeably due to not live loads but thermal effects and the need for additional rules to incorporate such secondary effects into the structural reliability evaluation for new types of bridges.

## 〔研究目的及び経緯〕

平成29年7月に道路橋示方書が改定され、従来の許容応力度設計体系に替えて部分係数設計体系が導入された。この改定により、形式や材料によらない橋の普遍的な要求性能がより具体的に規定され、新形式の橋梁や構造部材を具体的に照査しやすい環境が整った。これらの橋の設計では、形式・構造に合わせて、不利になりえる荷重の組み合わせ、載荷方法、応答の評価方法を個々に検討することが求められているが、多くの場合で従来構造の設計方法が踏襲されており、新形式の橋梁・構造部材に対して適当な設計がされていない可能性がある。よって、これらの橋の性能を適切に評価する方法を充実、高度化していく必要がある。

令和3年度は、新しい形式の一つとして比較的採用数が多い波形鋼板ウェブPC箱桁橋について、点検結果から損傷の特徴を整理し、性能評価方法の課題を示した。損傷事例を写真-1、写真-2に示す。上部構造の各部の安全性は、部材が軸線方向には梁理論にしたがって挙動すると仮定して評価されるが、損傷事例からは、桁の各部が複雑に挙動していることが疑われる。たとえば、隔壁の上部の4つの隅角部で損傷が生じていることから、上下床板、ウェブ、それらの接合部は橋軸方向にも橋軸直角方向にも軸線方向以外の挙動を

し、2次応力が生じている可能性が疑われる。そこで、今年度は、国が管理する波形鋼板ウェブPC箱桁橋のうち1橋をとりあげ数値解析を行い、様々な荷重を与えて橋の応答の特性を把握した。

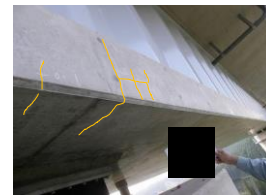


写真-2 鋼・コンクリート接合部の損傷事例

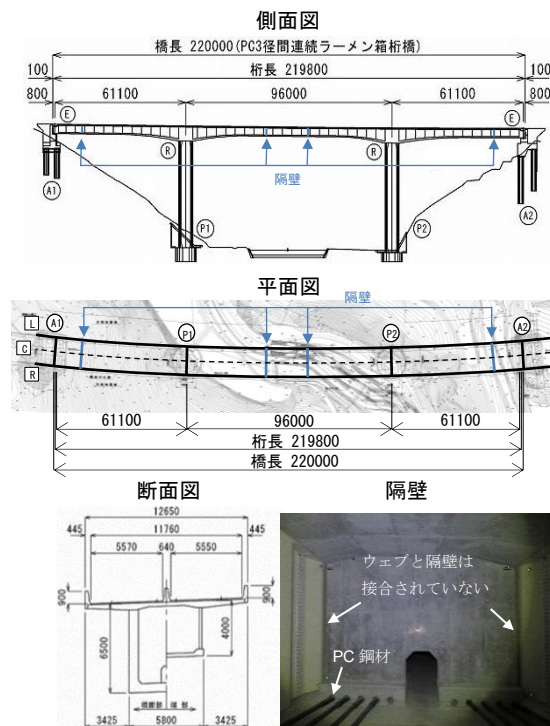


図-1 試算対象



上角部の圧壊 外ケーブル偏向部からのひび割れ  
写真-1 隔壁の損傷事例

[研究内容]

1. 試算の対象橋梁

試算対象橋梁を図-1に示す。3 径間連続の波形鋼板ウェブ PC ラーメン箱桁橋の曲線橋で、隔壁は支点部及び 40m 程度に一区間の間隔で設置されている。

本研究では、上部構造全体を断面変形が再現できるシェル要素またはソリッド要素でモデル化し、断面の上下左右にそれぞれ温度差を見込んだり、活荷重の偏載荷の影響を見込んだりすることで、断面のせん断変形、そり、ねじりの影響が大きくなるように載荷し、二次応力の発生状況を調べることにした。

2. 解析結果

通常的设计では、桁全体に一樣に温度変化が生じる時の影響を考慮している。そこで、上下床版と左右ウェブの温度分布を一樣に+15 度とした場合の桁の変形図を図-2に示す。桁は支間中央でそり上がる。支間中央付近の隔壁に生じる最大主応力(引張が正)分布図を図-3(a)に示す。隔壁と上床版の接合部に大きな応力が生じている。コンクリートにひび割れが生じる主応力の大きさは計算上では 3.0N/mm<sup>2</sup> 程度であり、接合部が損傷してもおかしくない応力が生じている。

次に、上述の一樣な温度分布に加えて活荷重を載荷する場合を考慮した。通常のコングリート箱桁的设计では考慮しないが、隔壁位置での上下床版の変位差が最大となるように活荷重を載荷した。活荷重の載荷位置図を図-4に示す。その時の下床版の変位を図-5に示す。活荷重の載荷により橋は下にたわむ。隔壁に生じる最大主応力分布を図-3(b)に示す。PC 鋼材の偏向部付近に最大主応力分布の偏りが見られる。しかし、かなり極端な分布の活荷重を載荷しても、発生する応力はひび割れが生じるほどの大きさではなく、隔壁上部の角部で応力集中する様子は見られなかった。

次に、通常的设计では考慮しない荷重の組み合わせについて検討した。実際の供用状態では日射の影響に

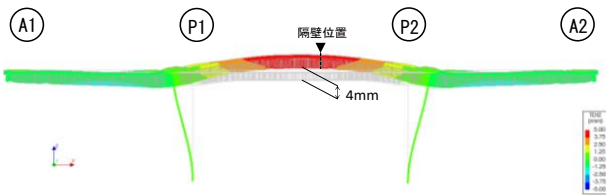


図-2 変形図 (一樣な温度分布を考慮、活荷重なし)

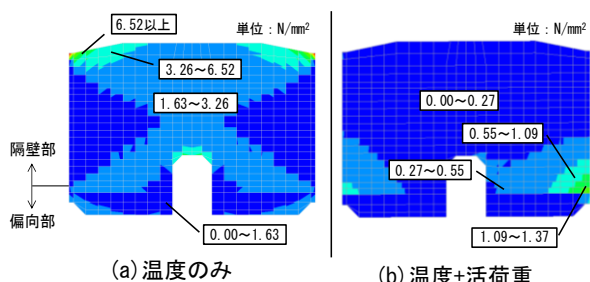


図-3 隔壁の主応力分布図 (一樣な温度分布を考慮)

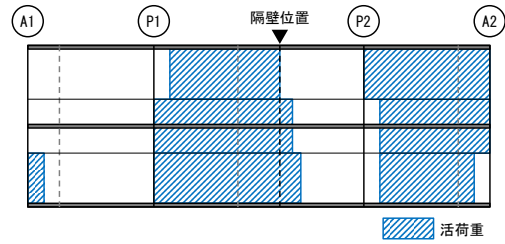


図-4 活荷重載荷位置図

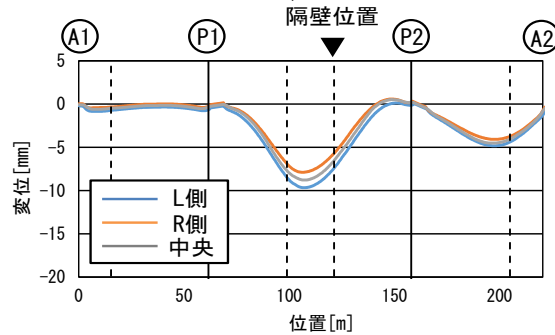


図-5 温度+活荷重作用時の下床版の変位

より上下左右の床版やウェブの温度に差があることから、断面内で非一樣の温度分布を考慮した。下床版と比較して、上床版で+5℃、左ウェブで+35℃、右ウェブで+5℃(左右ウェブの温度差は30℃)とした。この温度分布は、過去の実橋での計測結果を参考に設定したものである。支間中央近傍の隔壁の主応力分布を図-6に示す。ここで活荷重は載荷していない。隔壁の角部に何らかの損傷が生じてもおかしくない大きさの主応力が生じるという計算結果になり、写真-1に見られる隔壁上下の角部の損傷位置とも一致する。

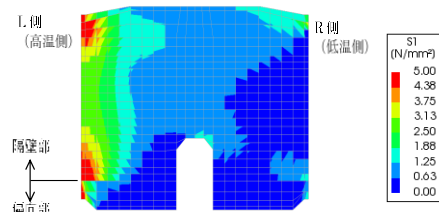


図-6 隔壁の最大主応力度分布  
(床版・ウェブで温度差を考慮、活荷重なし)

[研究成果]

以上の解析結果から、今後の技術開発の動向を考えると、橋の設計では、主桁断面としての曲げモーメントやせん断力に厳しくなるような活荷重の載荷を行うだけでなく、各部に生じる2次応力を的確に把握し、それが無視できるような構造となるように設計することが必要であり、たとえば断面の上下左右の温度差の影響と温度変化の影響を組み合わせることが必要となる可能性が認められた。

[成果の活用]

本研究で得られた成果は、道路橋示方書等、技術基準改定のための基礎資料として活用する予定である。

# 高強度材料の活用による橋梁構造の合理化に関する調査検討

Research and study on rationalization of bridge structure by utilizing high strength materials

(研究期間 令和元年度～令和4年度)

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

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

白戸 真大  
SHIRATO Masahiro  
佐々田 敬久  
SASADA Yukihisa  
佐藤 悠樹  
SATO Yuki

The use of high-strength materials is expected to make bridge structures lighter and more rational. However, such materials sometimes are less ductile. In addition, as bridge structural members become thinner, they are subjected to higher variation in stress. Accordingly, more attention should be paid to preventing fatigue. This year, we conducted a cyclic bending loading test for a specimen of beam-column connection for typical frame-type bridge columns, where a higher yield-stress steel was used. A special structural detail to relax stress concentration on the corner was tested to reduce the potential of fatigue crack. As a result, the tested structural detail worked well to reduce the stress concentration at the corner.

## 〔研究目的及び経緯〕

高強度材料を活用することで構造の合理化が期待できる。しかし、降伏強度が高くなるほど、降伏比（上降伏点／引張り強さ）が高くなり塑性化後の強度の増加が見込めなかったり、伸び性能が小さくなる場合もある。また、一般的な鋼材と同様に、使用される部位や活荷重の変動により、疲労の発生が懸念される。そのため高強度材料を構造体に適用する場合には、適用箇所荷重状態を考慮した実験的な検討が欠かせない。本研究は、高強度材料を活用し、部材等の設計の合理化を図るための基礎的な試験結果等を得ること、また、適用にあたっての検証試験法を提案することを目的としている。

鋼製橋脚については、兵庫県南部地震での被害を踏まえ、道路橋示方書（以下、道示）において塑性域での耐力および変形能に着目した設計法が導入された。しかしながら SM570、SBHS400、SBHS500 を使用した鋼製橋脚については、水平耐力や塑性変形能に関する研究は少ない。また、JIS における鋼材の規定では降伏点や引張強さの規格保証値は定められているものの、降伏比に関する規定が無い。降伏比が高い（1に近い）ことから、これを部材として使ったときの耐荷力の算出や塑性変形能の評価に注意が必要である。例えば、道示では、これら鋼材を使用した鋼製橋脚に塑性化を期待した設計をする場合には、十分に注意する必要があるとされている。そこで本年度は、SBHS500 を使用した鋼製橋脚を対象に、正負交番載荷実験を実施し、塑性域

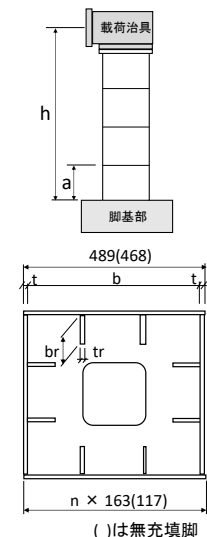
での耐力、変形能について検討を行った。

## 〔研究内容〕

今年度対象とした鋼製橋脚は、コンクリートを充填した鋼製橋脚（以下、充填脚）、コンクリート充填しない鋼製橋脚（以下、無充填脚）の2体である。各供試体の幅厚比パラメータ RR、RF、細長比パラメータ  $\lambda$  の値（いずれも材料試験値を使って計算）を表-1 に示す。載荷は、鋼断面のみの降伏軸力（材料値）の10%の一定軸力を作用させた状態で、降伏水平変位を基準とした正負交番載荷実験を行った。載荷状況を写真-1 に示す。今回使用した、2つの供試体の SBHS500 の応力-ひずみ関係の一例を図-1 に示す。明確な降伏点、降伏欄が現れているとともに、降伏比は、0.85 となっている。

表-1 試験体諸元

試験体		充填脚	無充填脚
鋼種		SBHS500	SBHS500
鋼材の特性値 (材料試験値)	$\sigma_y$ (N/mm <sup>2</sup> )	562.2	563.9
載荷点高さ	h (mm)	2700	2920
外径寸法	-	489	468
板厚	t	6	6
横リブ間隔	a	477	456
縦リブ寸法	br	41	46
	tr	6	6
補剛材の全幅	b	477	456
パネル	n	3	4
	幅厚比パラメータ	RR	0.739
	RF	0.717	0.527
細長比パラメータ	$\lambda$	0.462	0.523





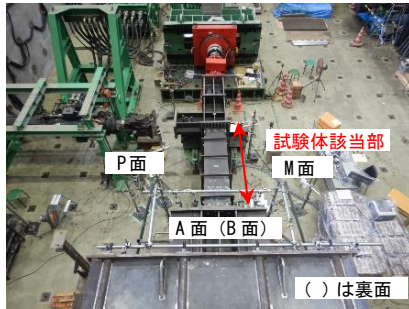


写真-1 試験体載荷状況

これは、既往のSBHS500の降伏比に関する調査結果<sup>1)</sup>の下限値に近く、SM570の公称板厚区分Iの降伏比の平均値0.905よりも小さい値であった。また、道示に耐震設計法の適用範囲であるSM490の公称板厚区分Iの降伏比の平均値は0.745であり、それと比べると大きい値であった。

【研究成果】

図-2に充填脚、図-3に無充填脚の正負交番載荷実験結果を示す。図-2の充填脚は、+5 $\delta_y$ の载荷の途中で、橋脚基部のフランジが破断し、水平荷重が急減に低下したため、実験を終了した。図-3の無充填脚は、+4 $\delta_y$ のループで最大水平荷重が観察され、最終的にフランジおよび腹板に座屈変形が生じ、荷重が低下したため実験を終了した。このように破壊形態が変わった。写真-2に試験終了時の試験体状況を示す。

SM490材を用いた既往の研究<sup>2)</sup>で、今回の無充填脚と同程度の幅厚比パラメータ(RR=0.53, RF=0.49)、細長比パラメータ( $\lambda=0.51$ )を有する無充填脚に、降伏軸力の11%を作用させた正負交番載荷実験を実施したものがあ。今回のSBHS500(降伏比0.85)の無充填脚の実験結果とSM490材(降伏比0.76)の無充填脚の実験結果を比較したものを図-4に示す。図-4は、正負交番載荷試験の水平荷重-水平変位関係から得られる包絡線を降伏水平荷重、降伏水平変位で無次元化している。結果的には、今回の実験ケースでは、高強度材料と一般的な鋼材の降伏比の差が1割程度であれば耐力、塑性変形能とも違いがでず、高強度材料の適用性の拡大が図れる可能性が見いだされた。今後は、これまでの実験結果をベースに、鋼材の降伏後の特性が鋼製橋脚の挙動に与える影響について数値解析等も行い、精査していきたい。

【成果の活用】

得られた成果は、道路橋示方書の改定等に反映する予定である。

【参考文献】

1) 令和3年度土木学会全国大会第76回年次学術講演会, V-143, 北山ら, 各種SBHSの機械的性質に関する整理と考察

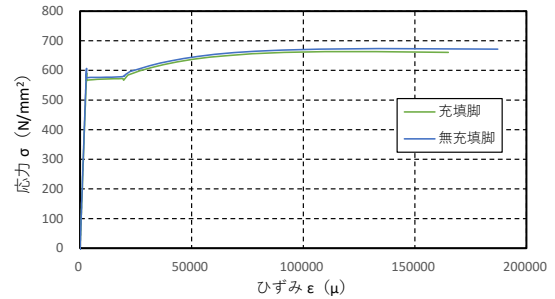


図-1 応力-ひずみ関係 (材料試験)

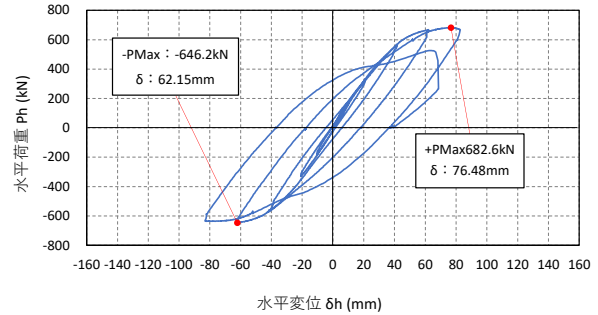


図-2 水平荷重-水平変位関係 (充填脚)

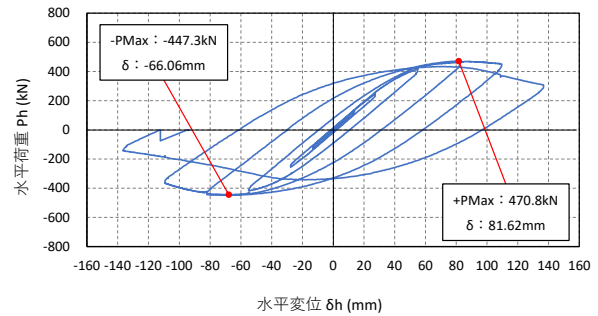


図-3 水平荷重-水平変位関係 (無充填脚)



写真-2 試験後試験体状況 (M面)

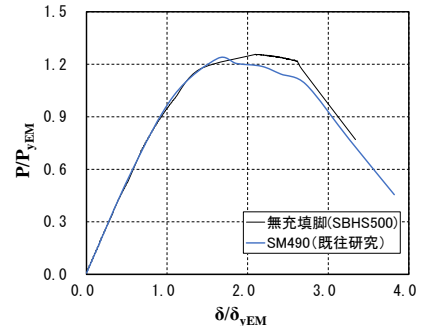


図-4 水平荷重-水平変位関係の既往研究との比較

2) 土木学会論文集A Vol.66 No.3, 576-595, 2010.9, 岡田ら, 高圧縮軸力が作用する矩形断面鋼部材の耐震性能評価に関する研究

# 既設道路橋の管理手法の高度化に関する調査検討

## Research on strategic management for existing bridges

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

室 長  
Head  
主任研究官  
Senior Researcher  
研 究 官  
Researcher

(研究期間 令和4年度)  
白戸 真大  
SHIRATO Masahiro  
岡田 太賀雄  
OKADA Takao  
石尾 真理  
ISHIO Mari

Fatigue is one of the major factors to cause damage to bridges. It should be effective to keep an eye on truck traffic characteristics on the highway network such that bridge management plan can involve possible future truck traffic trends with the change of deterioration rate. Accordingly, the present study has conducted to measure the vehicle weight and axle load distribution for passing vehicles on different road bridges. The result has indicated an increasing tendency of truck traffic with a weight range of approximately 40 tons and around. It has also shown the importance of further observations on the truck traffic trends.

### [研究目的及び経緯]

物流は社会経済活動を支える不可欠なものである。国土交通省では、物流の効率化や国際競争力の強化に取り組んでおり、近年、たとえば、特殊車両通行許可が必要とする条件として特例8車種のトレーラ車両総重量を28tfから36tf（総重量44tf）に緩和する措置を行ったり、国土交通大臣指定の重要物流道路では、国際海上コンテナ車の特車許可を不要としたりするなどの対応を行ったところである。

一方で、大型車両の通行の増加は、道路構造物の疲労耐久性に影響を与えることが懸念される。特に道路橋は、これまでも疲労損傷事例が報告されており、構

造の特性と路線ごとの大型車の交通特性の変化も考慮し、疲労損傷が発生する前に床版や桁の疲労耐久性を向上させるための補強等を順次進めていくことも既設道路橋の維持管理に効果的であると考えている。

そこで、本研究では、路線ごとに戦略的な予防保全を検討する方法の提案に向けて、Bridge Weigh-In-Motion（車両重量計測システム、以下、「BWIM」という。）

（国総研資料第188号）を用い、交通特性が異なると考えられる複数の路線で、車両重量を計測し、交通特性の変化と疲労耐久性へ及ぼす影響を分析した。

### [研究内容]

2021, 2022年度に、いずれも重要物流道路に位置している直轄国道5地点で、通行する車両重量の計測を行った（以下、「R4計測」という。）。この5地点では、2004年度にも計測を行っている（国総研資料第295号。以下、「H16計測」という。）。そこで、平日3日間（72時間）の計測結果どうしを比較し、車両重量の分布特性の変化を調べる。

なお、以下では、3tf以上の車両を対象に分析する。BWIMは、橋梁部材の応答から車両毎の重量を計算により求めるものあり、応答が小さすぎるとノイズと車両の応答の区別が困難となるためである。

### [結果と考察]

#### (1) 計測結果

図-1に、R4計測とH16計測における車両重量分布の比較結果を示す。2tfごとの重量帯別に台数を整理したものである。図中Nが計測された車両総台数である。C地点では、R4計測はH16計測と比較して車両総台数が増加しているが、その他の地点ではいずれも減少していた。また、重量帯別の台数で見ると、A, B, D地点では、14tf以下の重量帯で台数の減少が顕著である。逆にC, E地点では、14tfまでの重量帯で台数が大幅に増加している。E地点では、さらに特徴的な点として、

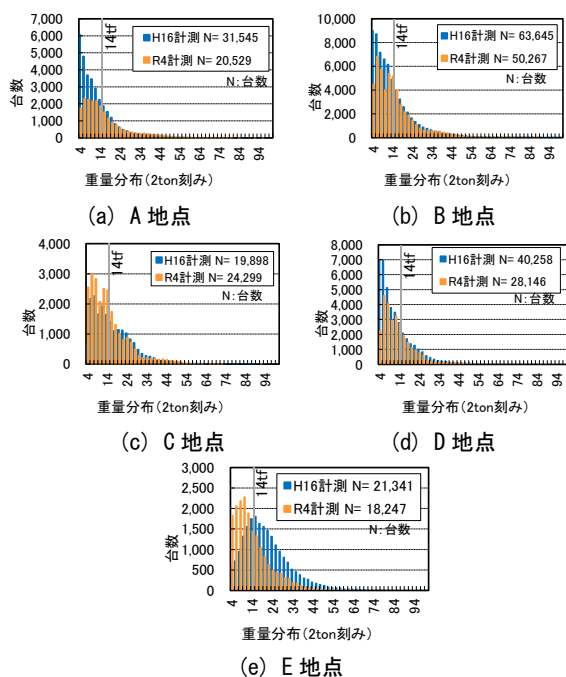


図-1 車両重量分布の比較(3tf以上)

※本報告は令和3年度補正予算の標記の研究課題を令和4年度に継続して得た結果をまとめたものである。

14tfを超える重量帯で台数が大幅に減少していることが挙げられる。「持続可能な物流の実現に向けた検討会（第1回）」(国土交通省)によると、国内貨物輸送量自体が2020年度は大幅に減少していること、新型コロナウイルス感染の拡大に伴い工業生産が大きく低下しており、2022年5月時点でもコロナ以前の水準には戻っていないという報告がされている。

R4計測とH16計測の結果を単純には比較できないことに留意が必要であるが、これを踏まえると、大まかにみれば、AからD地点では、交通特性は従前と大差がないと考えられる。一方で、E地点は何らかの理由により交通特性が大幅に変化した可能性がある。

一般に、特別な許可を得ることなく道路を通行できる車両の重量の制限値である20tfであることから、20tf以上の重量を有する車両について、A,B,C,D地点の車重分布を再整理した。結果を図-2に示す。図-2は、A,B,C,D地点の計測結果を合算した分布である。図中のNは、図中の車両の総台数を示す。R4計測(図-2(b))とH16計測(図-2(a))を比較すると、20tfから36tfまでの重量帯では台数が減少しているが、逆に40tf付近では台数の増加が目立ち、上に凸の分布を形成している傾向がみられる。結果として、20t以上の車両の総台数Nは約8割に減少しているが、36tfから48tfの重量帯だけでみれば台数は1割増加している。なお、これらの傾向は、A,B,C,Dの地点別でも、割合は異なるものの同様の傾向であった。

BWIMでは、車両ごとの軸重および車軸間の距離も計測できる。そこで、車軸間の距離に基づいて車種を21車種に分類した。図-2(a)(b)の棒グラフにおいてそれぞれ異なる色で示すように、少なくとも5軸セミトレーラの台数が増加していることが分かった。5軸セミトレーラは、図-3に示すように、特に2軸トラクタが3軸トレーラを牽引するものであり、国際海上コンテナの輸送に使われることが多い。5年に1度を実施される「全国輸出入コンテナ貨物流動調査(2018(H30)年)」によると、輸出入コンテナの貨物量は、調査開始から継続的に増加しており、2003(H15)年から輸出は21%、輸入は41%増加している。R4計測の結果も、これを反映して、コンテナ輸送に用いる総重量40tf付近の車両数も増加していることも考えられる。また、この傾向が続けば、40tf付近の車両数は今後も増加し続ける可能性がある。

(2) 疲労耐久性への影響 (車重損傷度分布の比較)

H16計測と交通特性が大幅に変化したE地点を除く、おおむね同じ交通特性のままであると考えられるA,B,C,D地点のR4計測及びH16計測の結果を用いて、車両損傷度分布を算出した。ここでいう車重損傷度とは、各車両の重量の区分帯について、各区分帯の重量の中央値を3乗し、それに当該区分帯の車両数を乗じた値である。実際の橋の各部の応力振幅が重量に比例するという仮定をおいたものであり、必ずしも個々の橋の疲労損傷の発生実態を正確に反映するものではないが、疲労環境は車両重量と载荷の繰り返し回数の関数でモデル化することができ、

一般に、鋼部材の疲労は、応力範囲の3乗に、また、繰り返し回数の1乗に比例すると言われていることを反映した指標である。

図-4に車両重量分布と車重損傷度分布を示す。車重損傷度分布の面積が累積損傷度であり、面積が大きいほど疲労の環境の厳しいことを意味する。R4計測は、H16計測に比べて累積損傷度が約16%減少している。この理由は主として、20tfから36tfの重量帯、及び、50tf以上の重量帯の車両台数が減っていることが理由である。一方で、36tfから48tfの重量帯では車重損傷度が増加し、橋に与える疲労耐久性に与える影響度が増している。

国内輸送量が回復し、多くの重量帯で車両の通行台数がH16計測並みになった場合には、従前に比べて道路橋の疲労環境は厳しくなることが予想される。

【研究成果】

R4計測とH16計測の活荷重実態と比較すると、直轄国道では、通行する車種の構成や車両重量分布に変化がみられ、橋の疲労環境が悪化する可能性も見られた。また、今後も広範囲に計測を行い、活荷重実態を把握することの必要性も確認された。

【成果の活用】

得られた大型車の交通特性のデータは、道路構造物のマネジメントの高度化に向けた基礎資料として活用する予定である。

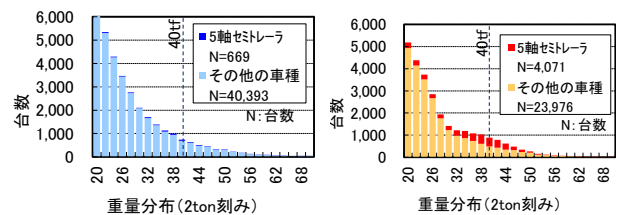


図-2 車両重量分布(20tf以上)(A,B,C,D地点の合計)



図-3 5軸セミトレーラの例(特殊車両ハンドブック2022より)

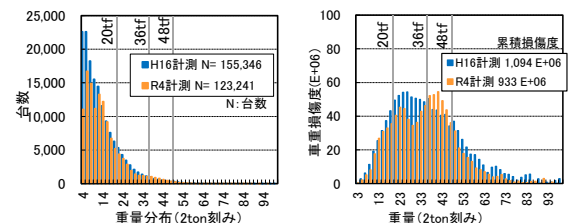


図-4 疲労耐久性への影響(A,B,C,D地点の合計)

# 道路橋の維持管理計画の継続的改善に関する調査検討

## Study on the continuous improvement methodology for road bridge management plans

(研究期間 令和2年度～令和4年度)

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

室 長 白戸 真大  
Head SHIRATO Masahiro  
主任研究官 岡田 太賀雄  
Senior Researcher OKADA Takao  
研 究 官 石尾 真理  
Researcher ISHIO Mari

Truck traffic is one of the major factors to affect bridge durability. However, few studies have conducted to estimate the influence of the difference and future change in truck traffic characteristics on the long-term maintenance cost for existing bridges. Accordingly, the present study has tackled to characterize the relationship between truck traffic and bridge maintenance costs. The estimation results have indicated that truck traffic characteristics should play a major parameter in the estimation of the future maintenance cost and it is important to keep tracking the truck traffic characteristics in different points of road networks.

### [研究目的及び経緯]

道路は物流を担う基本的なインフラであり、長期にわたる機能不全に道路が陥らないように適切な維持管理及び適切な改良を行っていくことが求められる。道路橋ではこれまでも大型車の通行による疲労損傷事例が報告されており、大型車の交通特性の変化が道路橋の疲労耐久性に影響を与える可能性が高い。そこで、本研究では、交通データの取得とそれを維持管理計画の見直しに適切反映することを継続的に行うことの有用性を検討するため、交通特性の異なる交通モデルや橋の疲労劣化特性を仮定して、モデル橋の経年の維持修繕費を試算する。そして、大型車の通行の特性の違いが橋の維持修繕費に与える影響を考察する。

### [研究内容]

試算で用いた仮定を以下に示す。

#### 1. 計算対象橋梁と試算期間

車両の走行に伴う、鋼桁、鋼床版、RC床版の疲労対策を維持修繕費の試算対象とする。試算は仮定の橋梁で行う。試算に用いる橋梁の形式、床板材料、適用基準、架設年、諸元を表-1に示す。橋梁形式は、鉄筋コンクリート(RC)床版を有する単径間の鋼単純桁橋及び鋼床版を有する鋼単純箱桁橋である。鋼橋に比較的多い支間長と幅員(2車線相当)を仮定し、基本的には1972(S47)年の道路橋示方書を満足するように断面諸元を仮定した。ただし、RC床版については、鉄筋量が少ない傾向を有する、1964(S39)道路橋示方書を満足するように断面諸元を設定したケースも設定した。試算期間は、表-2に示すように、1980年を起点に、現在から約50年後である2079年までとした。なお、本試算では、簡単のため、1980年以前の応力履歴は考

表-1 試算対象橋梁

橋梁 No	上部工形式	床版材料	設計基準	構造諸元	
				橋長(m)	幅員(m)
1	鋼単純桁	RC	1964(S39)	40	10 (2車線相当)
2			1972(S47)		
3	鋼単純箱桁	鋼	1972(S47)		

表-2 交通流モデル

交通流モデル	大型車混入率(%)	期間		
		A 1980～1987	B 1988～2004	C 2005～2079
①	50	1987(S62)	1987年と2004年の計測値	ケース0: 期間Bの変化率を保つ
②	20			ケース1: 3軸車及び5軸車の台数の変化率を高める。

慮しない。

#### 2. 交通流

表-2に交通流モデルの概要を示す。過去の研究にて、大型車混入率が異なると、重量が大きい車両に占める車種の比率が異なることが分かっている。そこで、大型車混入率の違いをパラメータとし、過去の車両重量計測結果から交通モデルを仮定する。大型車の混入が多い路線での計測結果に基づくモデルを①、直轄国道の平均的な大型車混入率である大型車混入率20%に近い路線での計測結果に基づくモデルを②と呼ぶ。いずれの交通流モデルも1987(S62)年と2004(H16)年の2度にわたって同一地点で車両重量計測が実施されている。

車両重量分布は表-2に示すように、毎年変化するようにした。表-2でいう期間A(1987年以前)は1987年の計測結果を毎年当てはめる。期間B(1988年から2004年)では、2回の計測分布の間を時間方向に線形補間する。期間C(2005年以降)も期間Bにおける重量分布の毎年の変化率を保ったまま外挿する(ケース0と呼



ぶ)。ただし、海上コンテナの輸送に用いられることが多い3軸車、5軸車の台数の増加率が大きいケースも仮定することにした(ケース1)。3軸車と5軸者についてのみ毎年の変化率を調整し、2020年時点で、ケース0に対してケース1の台数が2倍になるようにした。また、軸重分布も同様に毎年設定しなおす。交通流モデル①②の1987年、2004年、2020年、2052年の大型車(11t以上)の車両総重量分布を図-2に示す。

### 3. 試算上の対策判定と対策費

参考文献に示す既往の研究1)から3)では、大型車の通行頻度の高い路線にある橋を対象に、実橋における大型車通行台数と鋼桁、鋼床版、RC床版の疲労損傷の有無の関係について整理されている。たとえば、鋼桁では大型車の通行台数が累計139百万台程度、鋼床版では累計が33百万台程度に達すると疲労損傷が発生する傾向がみられている。

しかし、一口に大型車といっても、様々な重量の車があり、それぞれに疲労損傷度に与える影響が異なる。鋼材の疲労損傷度は応力振幅の3乗と乗荷回数、RC床版の疲労損傷度は応力振幅の12乗と乗荷回数に比例するといわれている。また、過去の交通流計測結果からは、大型車の通行頻度が高い路線ほど重量分布の上位5%の重量は大きくなるなど、重量の大きな車両が通行する傾向もわかっている。そこで、車両重量分布の違いに応じた疲労特性を仮定するために、試算に用いる車両重量分布を反映した損傷度Dを定義し、損傷度Dに比例するように試算に用いる各年の大型車の通行台数Nを補正して累計通行台数を算出する。

交通流モデル①は、参考文献1)及び2)で分析された橋の交通特性に近いと仮定する。そして、交通流モデル①の1987年の重量分布に対応する疲労損傷度D<sub>0</sub>と、試算で考慮する各年の重量分布に対応する疲労損傷度D<sub>k</sub>を下記のように定義する。

$$D_0 = \sum W_{0i}^n N_{0i}, \quad D_k = \sum W_{ki}^n N_{ki}$$

ここに、部材の応力振幅は車両重量に、乗荷回数は通行台数に比例すると仮定しており、W<sub>i</sub>は階級iの車両重量、N<sub>i</sub>は階級iの車両重量に対応する通行台数であり、nは鋼桁および鋼床版の試算に用いるときは3となる。そして、試算で考慮する各年の大型車の総通行台数N<sub>k</sub>を下記のとおり補正し、大型車通行量の累計に用いる。

$$N_k' = N_k \times D_1 / D_0$$

なお、RC床版についても、軸重・軸数の頻度分布を用い、文献3)を参考にn=12を仮定し、鋼桁や鋼床版の場合と同様に軸数を補正した。

対策費は、表-3のとおり仮定した。実際の橋では、損傷分布も対策工法の選定や費用も足場条件等により変化するので、この対策費も一つの仮説であり、金額の絶対値の扱いには注意を要する。

### [結果と考察]

計算上の維持修繕費の変化を図-3に示す。図中の①②(赤線、青線)は交通流モデル①②を表す。計算上、混入率が高い交通モデル①(赤線)では、鋼桁、鋼床版、RC床版とも疲労に対する対策が必要になる一方で、混入率が低い交通モデル②(青線)では鋼床版では対策が必要なまで損傷度は累積しなかった。図中の(0)(1)(破線と実線)は、3軸及び5軸車の台数の変化率の違いを表す。3軸車、5軸車の台数を増加させたケース(1)(実線)の方が、ケース(0)(破線)と比較して、損傷度が累積し、対策が必要になるまでに早く至る傾向がわかる。以上のように、試算上は、過去及び将来の交通特性が橋の修繕費の見通しに影響を与える傾向が現れた。

### [研究成果]

本研究の試算は様々な仮定と限られた条件で計算した結果ではあるものの、交通特性の違いや変化によって疲労耐久性や維持修繕の見通しに無視できない変化が生じることが分かった。交通特性の違いが我が国の橋の維持修繕に与える影響を把握するために、今後も継続的に複数個所の交通特性の変化について計測、分析を行っていく必要性が確認された。

### [成果の活用]

道路構造物のマネジメントの高度化に向けた基礎資料として活用する予定である。

### [参考文献]

- 1) 戦-54 古い年代の鋼部材の材料・強度特性から見た状態評価技術に関する研究, 土木研究所, 2008-2010.
- 2) 鋼部材の耐久性向上策に関する共同研究, 国総研資料第471号, 2008.
- 3) 道路橋の計画的管理に関する調査研究—橋梁マネジメントシステム(BMS)—, 国総研資料第523号, 2009.

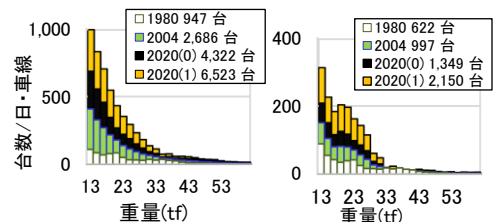


図-1(a) 交通モデル① 図-1(b) 交通流モデル②

表-3 修繕費用

部材	想定する補修方法	費用(億円/橋)
鋼桁	あて板	1.68
鋼床版	あて板	0.43
RC床版	打替え	2.80

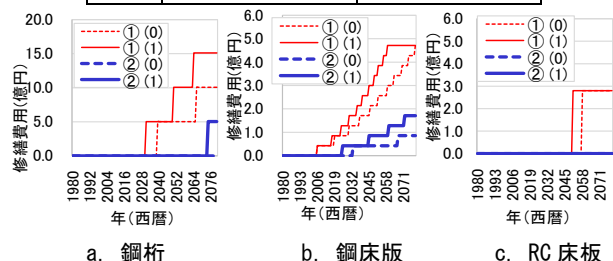


図-2 修繕費用の累積の傾向

# 道路橋の点検の省力化・高度化に関する調査検討

Development of bridge evaluation protocols to increase reliability and decrease labor intensity in inspection

(研究期間 令和2年度～令和5年度)

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

室 長 白戸 真大  
Head SHIRATO Masahiro  
主任研究官 岡田 太賀雄  
Senior Researcher OKADA Takao  
主任研究官 上田 晴気  
Senior Researcher UEDA Haruki  
研 究 官 塚原 宏樹  
Researcher TSUKAHARA Hiroki

It is of importance for bridge inspection to improve the reliability of diagnosis and to reduce work burden and traffic restrictions on site. Thus, this study has been developing a methodology and criteria to evaluate the reliability and relevancy of applying different bridge inspection methods depending on the structural and site characteristics of each bridge. This year, the proposed risk-based methodology has been tested in the inspection of a cable-stayed bridge. The result has shown that the proposed risk-based methodology has a good potential to account for the relevancy level of choosing bridge inspection methods.

## [研究目的及び経緯]

道路構造物の定期点検が法定化され 10 年が経とうとしている。現在、これまでの定期点検の実施実績から、質の向上と作業負担の軽減という両課題の解決が求められている。解決のためには、定期点検の目的を踏まえた診断に必要な情報が明らかになれば、橋梁ごと、また、同じ橋の中でも部材ごとに適当な点検方法を取ることが考えられる。しかし、現在は、点検方法の選択が診断に必要な十分な情報を与えること、または、不足の可能性が高いことを確認するための理論的な枠組みがなく、適当な方法の選択であることを説明するための手順や内容が明らかでない。そこで、本研究では、診断に必要な情報の充足性という観点で、統一的な体系で、かつ、客観性をもって点検方法の選択や組合せの信頼度を説明できる方法論の検討を行っている。今年度は、提案する方法を斜張橋の定期点検に適用することで方法の適用性と有用性について評価した。

## [研究内容と研究成果]

### 1. 提案する方法

診断に用いる情報の質の向上と作業負担の軽減を両立させるためには、部位ごとに部材等の異常を見逃したり過小評価したりしたときに、橋に与える影響の大きさを考慮して、点検方法を選んだり組み合わせたりすることが考えられる。そこで、表-1 に示す維持管理リスクマトリクスを考案した。なお、部材名等は試行対象橋梁の結果について示したもので後述する。ここでいうリスクとは、部材等の異常を見逃したり、過小評価したりする可能性の大小と、異常を見逃し・過

表-1 維持管理リスクマトリクス

変状の種類		部位の重要度			
		破壊が橋の致命的な状態をもたらす可能性がある部位	劣化が進むと修繕が大規模になる可能性がある部位	通行者・第三者の事故懸念がある部位	その他
見逃し易さ	急激な進行の可能性				
	有り				
高い	有り				
	なし		ケーブルの腐食 主塔鉄筋コンクリート橋脚の塩害		
低い	有り	鋼製主塔の亀裂	主桁の亀裂 鋼床板の亀裂	鋼床板の亀裂	
	なし	鋼製主塔の腐食	主桁の腐食 鋼床板の腐食	主塔防食機能の劣化	主桁防食機能の劣化

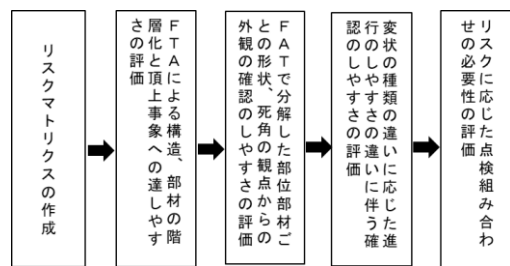


図-1 リスクマトリクス作成の一般的な手順

小評価したときに道路管理に与える影響の大小の組み合わせからなる。マトリクスのグラデーションがリスクの大小であり、赤は特にリスクが高く、橙、黄色、緑とリスクが低くなっていく。

リスクマトリクスを作成する手順（フロー）を図-1 に示す。まず、表-1 の横軸に関連して、Fault tree analysis を行うなどにより、ある部材がある損傷により機能が不全になったときに橋の落橋等に与える影響の大きさを評価する。Fault tree analysis を例とした理由は、評価に客観性を与えるためであり、主観的な評価を極力排除するためである。頂上事象を橋の落橋や耐荷力不足等による機能喪失とし、橋の構造を主な

部位・部材に分解し、部位・部材レベルでの損傷の生起が、落橋や機能喪失に発展するメカニズムを階層的に表現する。

加えて、分解した部位・部材ごとに、修繕のしやすさ、コンクリート片や腐食片の剥落による第三者被害をもたらす可能性の有無を評価する。

次に、表-1の変状の種類のカテゴリーについて、分解された部位・部材ごとに、異常を見逃し・過小評価する可能性を2つの観点から評価する。1つ目の観点は、部材の形状や構造、外観の変状の種類によって変わる。例えば、見えない部位・変状や、部材の形状が複雑で死角が多い部位では、外観に生じるはずの変状を見逃す可能性が高くなる。2つ目の観点は、変状の種類の違いや原因、メカニズムである。亀裂などはいったん発生すると突発的に進行する可能性があるため、腐食とは進行の度合いが異なる評価とする必要がある。

最後に、リスクマトリクスを作成結果に基づいて、点検方法を選択する。リスクが高いほど信頼性が高い点検結果を選択するとしたときに、ここでは、リスクが高いときには、複数の方法を組み合わせるという方法を考えた。

## 2. 試行結果

提案する方法を検証するためには、単純な形式ではなく複雑な構造であること、置かれる環境が厳しいこと、作業負担が大きな橋梁を対象に行うことが効果的である。そこで、写真-1に示す海上部を跨ぐ橋長680mの鋼3径間連続斜張橋を対象に試行した。主塔は鋼製、主塔橋脚は鉄筋コンクリート製、桁断面は鋼箱桁であり、海上部のため、腐食、風環境も厳しく、かつ、橋長の長い橋である。非破壊検査の適用による診断に用いる情報の質の向上や点検支援機器の適用による点検作業量の軽減の余地が高いと思われる。

本橋の主な部位・部材と想定される各変状の種類に対して、図-1のフローに従って、維持管理リスクを区分し、表-1を作成した。例えば、ケーブルについては、図-2に示すようにFault Treeを整理できる。本橋では上部構造を複数本のケーブルで支持しており、一本のケーブルが突発的に破断したとしても残りのケーブルが健全である場合は、急激な落橋等に至る可能性は低いことがわかる。一方で、腐食等が進行した場合、複数のケーブルで交換が生じるなど大掛かりな修繕が必要になる可能性が残る。

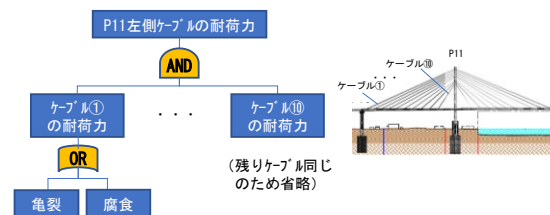
そして、表-2のように、リスクマトリクスを作成結果に基づき点検方法の信頼性と診断に必要な情報の充足性の観点で、経済性にこだわらずできるだけ非破壊検査や点検支援技術を活用するように部材毎に点検方法を選定した。たとえば主桁の亀裂を考えたときに、溶接線が多い桁内面や桁端部の外面や排水周りについては見逃しやすく、桁外面についてはそれよりは見逃しにくいとすれば、内面側の近接目視に対して外面側

は画像情報というように方法に違いを持たせられる。

従来の点検方法と表-2の方法で、費用の比較を机上で検討した結果を表-3に示す。質の向上と作業量の軽減の両面から資機材の費用は増加するものの、ケーブル、主塔、主桁それぞれの点検のための通行規制にかかる期間が大幅に短縮でき、交通規制費が大幅に縮減できる可能性があるという結果になった。



写真-1 試行対象斜張橋全景



AND：つながれた事象がいくつか複数同時に発生すると上位事象の発生につながる  
OR：つながれた事象のいずれか一つでも発生すると上位事象の発生につながる

図-2 試行対象橋梁のFault Tree Analysisの例

表-2 各部材の点検方法

部材		点検方法
主桁	内面	近接目視
	外面	UAVを用いた画像取得
鋼製主塔	内面	近接目視
	外面	壁面移動ロボットを用いた画像取得 橋面に設置した遠望カメラによる画像取得
ケーブル	一般部	ケーブル登攀ロボットを用いた画像取得
	定着部	近接目視

表-3 従来方法と提案方法でのコスト比較

		基本ケース		試行ケース	
ケーブル 主塔 外側	点検費	ローブ点検 橋梁点検率	0.35	画像取得	0.46
	規制費	全面通行止め	0.65	車線規制	0.05
合計			1.00		0.51

## 3. 成果

維持管理リスクに応じて部材毎の点検方法に求める信頼性を差別化し、点検方法を選定する方法を検討、実橋で試行した。リスクマトリクス、Fault Tree、リスクに応じた点検方法の組み合わせという3項目をルール化することで、質の向上と作業負担の軽減が両立できる点検計画を策定できる可能性を見出した。今後、事例の充実と、Fault Treeの作成方法などの一般化が課題として挙げられる。

### 【成果の活用】

本研究で得られた成果は、定期点検の省力化・高度化のための点検計画策定にあたっての参考情報として活用される。

# 損傷を受けた部材の耐荷性能評価への 部分係数法の適用に関する調査検討

Study on the application of partial factor format to evaluating  
the load bearing performance of damaged members

(研究期間 令和3年度～令和6年度)

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

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

白戸 真大  
SHIRATO Masahiro  
岡田 太賀雄  
OKADA Takao  
黒川 修吾  
KUROKAWA Shugo

The aim of this study is to advance and rationalize the bridge performance evaluation methods for the repair and retrofit design of existing road bridges. Especially, the present performance evaluation process in design codes should be adjusted in consideration of unique features of individual existing structures, such as damage to structural elements, ductility and post-buckling behavior, load-path redundancies, etc. The retrofit of pile foundations is usually conducted by adding new piles that have different structural details or are driven by a different piling method. Accordingly, a new method has been proposed to evaluate the load bearing performance of a grouped pile comprising of an existing pile group and newly added piles of different type.

## 〔研究目的及び経緯〕

本研究は、既設橋の性能評価法を高度化・合理化するための知見を得ることを目的としている。既設橋の場合、損傷の有無や現在とは異なる材料や構造細目が適用されたりするなど既設橋特有の条件があり、必ずしも現在の技術基準で示されている耐荷力式や制限値がそのまま適用できるとは限らない。たとえば、既設基礎についても耐震性の評価や耐震補強が必要な場合もあるが、技術基準に定めのある制限値は現在の構造細目を満足することが前提条件であることに対して、制限値に既設構造の特性を反映する方法として標準的な考え方は確立されていない。そこで本研究では、既設の杭基礎の耐震性の評価や耐震補強設計を標準化するための課題を整理し、標準化の可能性を検討した。

## 〔研究内容〕

### 1. 新設橋の照査方法を適用するにあたっての課題

現在の標準的な杭基礎の耐震性の照査法と既設杭に適用するにあたっての課題の例を示す。

#### (1) 水平力（せん断力）に対する群杭の耐力の照査

杭体のせん断強度は、杭体に生じている軸力に応じて変化し、引抜き側の杭ではせん断強度は小さく、押し込み側の杭では大きくなる。計算上、引抜き側の杭が破壊している結果が考えられる一方で、これまで杭体がせん断破壊した被災事例は多くない。そこで、引抜き側の杭が分担するせん断力に対して現在のせん断強度式で得られるせん断強度と比較すると、実態に合わ

ない照査結果が得られることもある。このため、現在の設計実務では、同じ杭種・諸元の杭により構成されていることを前提に、初期死荷重反力に相当する杭頭反力を仮定して杭体毎のせん断強度を算出し、その総和を群杭としての強度とし、杭基礎に作用する水平力を上回ることを照査している。しかし、既設杭基礎の補強では、異なる杭種・諸元の杭を混在させることになるため、杭毎の水平力の分担割合やせん断強度が異なる。そこで、異なる杭が組み合わせられたときの水平力に対する照査法を明らかにしておく必要がある。

#### (2) 転倒モーメントに対する群杭の変形能の照査

杭基礎の変形能は群杭としての降伏点を基準とした塑性率で定義することが現在の標準的な考え方である。後述するような載荷実験結果から各杭の損傷過程と群杭としての荷重変位曲線を関係づけた結果に基づいて、現行の構造細目を満足した、同じ杭種・諸元の杭からなる杭基礎に対して限界状態と対応する塑性率の制限値が定められている。しかし、既設杭基礎の補強では、異なる杭種・諸元の杭を混在させることになるため、そのような場合にも適用できる照査法を明らかにする必要がある。

### 2. 提案する方法

新設橋の照査方法の根拠の一つとされた載荷実験について、既設橋の耐震補強設計の観点で改めて見直すことで、従来とは異なる群杭基礎の限界状態の評価方法を取り入れることを考えた。通常、杭基礎が水平力



と転倒モーメントを受けるときには、引抜き側の杭とフーチングの結合部では、全ての結合鉄筋が引張を受け、降伏後も伸び出しながら抵抗し続ける。せん断力に対しても鉄筋が分担できる範囲で抵抗する。一方、押し込み側の杭では、せん断力又は圧縮力と曲げモーメントの組み合わせに対して杭体が抵抗できるうちは安定した挙動を示すが、杭にせん断破壊や曲げ圧縮破壊が生じると杭基礎全体が不安定になることが想定される。そこで、各杭の荷重分担を適切に反映した応答解析を行ったうえで、押し込み側の杭が発生断面力に抵抗できるか否かを照査することで、杭基礎の安全性を評価できると考えた。

表-1に、既設杭基礎に増杭を行う場合の照査法として、今回提案する照査法（提案法という）、「既設道路橋基礎の補強に関する参考資料（日本道路協会、平成12年）」に示されている照査法（従来法という）、及び、道路橋示方書に示されている新設基礎の照査法（新設という）の比較を示す。従来法では、既設杭、増杭いずれかの杭のうち1本（1列）以上が降伏しないことを照査しているが、群杭基礎が複数の杭からなることから考えれば安全側の評価となると考えられる。一方、提案法では、既設杭、増杭ともに杭体の塑性化（全塑性）を考慮できることから、調査や復旧の負担が増えても橋の供用という観点で十分な安全性を与える点では、補強量を減じられる可能性がある。

表-1 基礎杭の性能評価方法の比較

比較項目	既設		新設
	提案法	従来法	
地盤抵抗のモデル化	鉛直地盤抵抗 ⇒ 杭頭パネ（非線形） 水平地盤抵抗 ⇒ 分布パネ（非線形）		
杭体のモデル化	N-M-φモデル （軸力の変動に応じて変化するM-φ関係）	M-φモデル （軸力の変動に応じたM-φ関係の変化は考慮しない）	
杭基礎の降伏	杭基礎全体の荷重変位曲線の変曲点の一つとして定義される降伏点		
転倒モーメントに対する杭体照査	押し込み側の最外縁の杭の状態を杭基礎の状態を代表させて、発生軸力下で、発生曲げモーメント < 終局曲げモーメントを満足させる。	発生曲げモーメント < 降伏曲げモーメントを満足する杭が既設杭、増杭のうち1本（1列）以上あることを確認する。	杭基礎の降伏点を基準として、応答塑性率 < 塑性率の制限値を満足させる。 （基礎に塑性化を考慮する場合）
水平力（せん断力）に対する杭体照査	既設杭、増杭それぞれの押し込み側の最外縁の杭の状態を杭基礎の状態を代表させて、発生軸力下で、発生せん断力 < せん断耐力を満足させる。	既設杭、増杭それぞれで、発生せん断力の合計 < せん断耐力の合計を満足させる （死荷重反力に対応する軸力を考慮して算出する）	基礎底面の水平力 < 各杭のせん断耐力の和を満足させる。 （死荷重反力に対応する軸力を考慮して算出する）

3. 組杭実験の数値解析による検証

表-1に示した提案法で、図-1に示すPHC杭からなる2×3列の組杭模型実験の結果と比較した。既設杭基礎に増杭を組み合わせた杭基礎を模擬した実験ではないが、提案法において、既設杭と増杭のそれぞれの押し込み側の最外縁の杭に着目することの妥当性の検証は、一種類の杭からなる組基礎を模した実験からも可能であると考えた。実験結果と提案法による解析結果（表-2）の比較を図-2に示す。ここで、Yは杭体降伏（杭内部の鋼材の降伏）、Uはかぶりコンクリートの圧壊を示

す。計算上の水平力は実験値に比べて小さめの評価となっている。基礎全体の荷重変位関係における全杭が降伏するまでの挙動や降伏する杭の順序、押し込み側の杭のコンクリートの圧壊に至るまでの損傷の進展は、実験と解析ではほぼ一致する。実験では、押し込み杭のコンクリートが圧壊することで顕著な荷重の低下が始まり、その時の変位は24mmである。また、解析では、押し込み杭でコンクリートの圧壊が生じるのは14mmであり、計算上、水平力は最大となる。また、実験では、最終的に押し込み側の杭がせん断破壊したが、計算でも、各杭の発生せん断力と軸力を用いて（発生せん断力）/（せん断耐力）を算出した結果、押し込み側の杭が1.0に最も近い（厳しい）結果となっていた。以上から、押し込み側の最外縁の杭で杭基礎の限界状態を代表させるという提案法によっても、杭基礎が抵抗できる限界の水平力や変位を安全側に評価できる可能性がある。

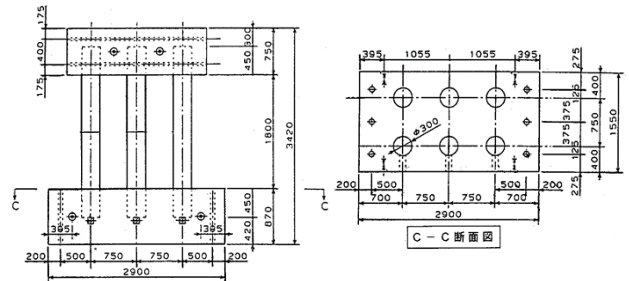


図-1 組杭模型

表-2 解析結果

ステップ	水平変位 (m)	水平力 (kN)	イベント(※)			
			引抜き側杭3	中央杭2	押し込み側杭1	備考
15	0.0042	330.7				
27	0.0084	444.0	Y下部			
32	0.0102	479.3		Y下部		全杭降伏
38	0.0125	505.6	U下部			
42	0.0140	515.3		U下部		
56	0.0195	529.8		U下部		

※ Y: 杭体降伏, U: 杭体終局

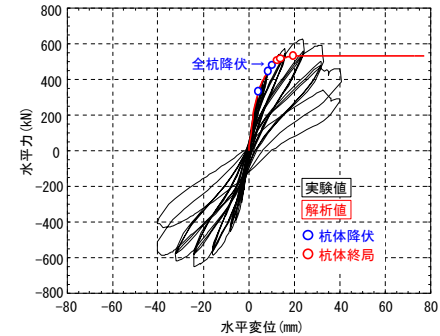


図-2 実験結果と解析値の比較（荷重変位関係）

【研究成果】

杭基礎の損傷過程を工学的に解釈し、既設杭に対して、異なる杭種・諸元の増杭を行う場合も考慮できる杭基礎の照査方法を提案し、検証した。今後、さらなる検証を行うことで既設杭基礎に増杭を行う場合の標準的な照査法の提案に結ぶことが期待できる。

【成果の活用】

本研究で得られた成果は道路橋示方書等、技術基準改定のための基礎資料として活用する予定である。

# 道路構造物の補修・補強に関する基本工法の充実に向けた試験調査

Development of the guidance on techniques of repair and reinforcement for road structures

(研究期間 令和3年度～令和6年度)

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

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

白戸 真大  
SHIRATO Masahiro  
佐々田 敬久  
SASADA Yukihisa  
佐藤 悠樹  
SATO Yuki

Several techniques are available to maintain or add strength and deformation capacities to existing structures, such as steel plate fastening, concrete jacketing, FRP bonding etc. However, repair design methods are not as well established as design specifications for new bridges. This study aims at providing the information on design methods and know-hows for major repair and strengthening methods in the limit state design format. This year a method of steel plate fastening to connect horizontal stiffeners to vertical ones was tested to improve plastic strength and deformation capacity of existing steel beams. The test result showed that the proposed steel plate fastening worked as expected.

## 〔研究目的及び経緯〕

我が国が管理する道路橋は全国で約70万橋あり、そのうち、鋼橋は38%を占めている。それらが損傷する原因の多くは腐食による劣化が大半を占める。

強度が不足する既設鋼桁に対しては、腐食したフランジや腹板にあて板をし、あて板設置後に発生する応力に対して、必要な強度を確保するのが一般的である。あて板補強は、既設部材とあて板部材を摩擦接合によって一体化し、作用力を協同で分担させるものであるが、腐食等によって凹凸が生じている既設部材では期待される摩擦力が発揮できず、あて板への応力分担が機能しないことが懸念される。

そこで、従来の腐食部にあて板を設置する方法にかわり、健全部にあて板設置することで、追加したあて板に荷重を分担させ、損傷部に作用する応力を軽減させることで、桁の破壊強度をコントロールする方法を考えた。また、腹板の剛性が上がることで面外変形を抑制されれば、元々の断面の中での塑性域の広がりが大きくなることが期待でき、耐荷力の向上を図ることができると考えられる。

本年度は、この方法の効果を把握し、基準化を行うための基本的な知見を得るために、大型試験体による載荷試験を行った。

## 〔研究内容〕

試験体概要図を図-1に示す。構造諸元が同じで、同様の腐食を模擬した加工（以下、腐食模擬加工）を施した試験体を2体製作して、それぞれに異なるあて板補

強を行った。当て板の設置は、供用期間中では、交通規制の制約や無載荷状態を再現するためのベント設置などが困難な場合が多いことから、死活荷重が載荷された状態で行うのが一般的である。しかし、まずはあて板の荷重分担の確実性について基礎的な知見を得るため、あえて無載荷状態であて板した供試体を用いる。

試験体のあて板設置状況を写真-1に示す。腐食模擬加工部は機械切削により、下フランジを9mm、腹板を3mm切削している。ケース1は腐食模擬加工部と健全部との段差部に調整プレートを設置し、健全部と連続するようにあて板を配置して高力ボルト（S10T）により接合した。ケース2は、腐食模擬加工部より上方の健全な腹板に、T型のあて板が腹板と十字となるよう

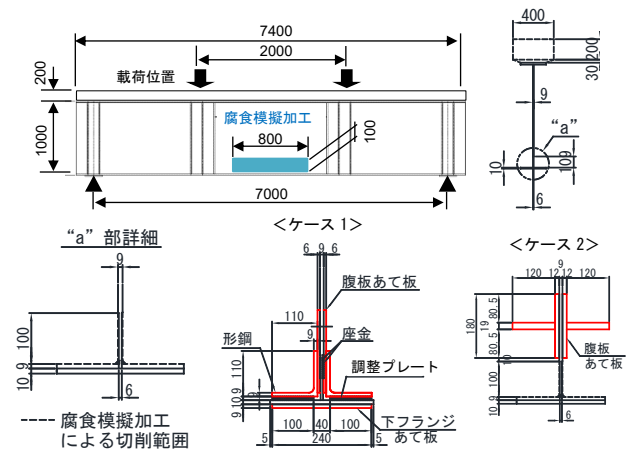


図-1 試験体概要図

に配置し、高力ボルト(S10T)により接合した。あて板の材質は両ケースともに母材と同様の SM400 材とした。母材とあて板の接触面は、すべり係数のばらつきが大きいとされる 2 種ケレンとした。

荷重は、2 点荷重 2 点支持の曲げ荷重である。供用期間中の大型車交通の影響で桁が瞬間的に降伏を繰り返す状態を想定し、腐食模擬加工部の下フランジが降伏に達した際の桁中央の鉛直変位 ( $\delta_y$ ) を基準に、繰り返す漸増荷重を与えた。

〔研究成果〕

図-2 に荷重-鉛直変位の関係を示す。荷重は母材の降伏荷重 ( $P_y$ ) で無次元化した。両ケースともに  $P_y$  までは可逆性を有しながら荷重が増加した。また、最大荷重 ( $P_{max}$ ) を  $P_y$  で除した  $P_{max}/P_y$  がどちらも 1 を超え、ケース 1 で  $P_{max}/P_y$  が 1.8 程度、ケース 2 で  $P_{max}/P_y$  が 2.3 程度となり、ケース 2 の方が降伏から破壊に至るまでの安全余裕があることが確認できる。両ケースともに最終的に  $6.0 \delta_y$  程度に到達した時点で試験は終了した。

図-3 に荷重時のひずみ分布を示す。両ケースとも支間中央断面の値を示している。ひずみは母材の降伏ひずみ ( $\epsilon_y$ ) で無次元化した。なお、あて板設置部はあて板表面のひずみである。両ケースとも  $0.5 \sim 0.8 \delta_y$  まではひずみ分布の勾配がほぼ一定であることから、母材とあて板は協働できていることがわかる。一方で、 $1.0 \delta_y$  を超えるとあて板部分のひずみに変化が見られない。これは、あて板と母材にずれが生じ、荷重が伝達されなくなったためと推測される。

図-4 に荷重除荷時における面外残留変位の関係を示す。ケース 1 の面外残留変位は  $1.2 \delta_y$  で  $0.2 \text{mm}$  程度となり、 $1.5 \delta_y$  で  $0.3 \text{mm}$  程度となった。一方で腹板にあて板を設置することで面外変形は抑制され、ケース 2

の面外残留変位は  $1.2 \delta_y$  では  $0.1 \text{mm}$  程度で推移し、 $1.5 \delta_y$  で  $0.2 \text{mm}$  程度となった。

以上から、健全な腹板にあて板を設置することで、あて板と母材は協働すること、腹板の局部座屈変形が抑えられることで、より曲げに対する耐力を向上させられることが確認できた。

〔成果の活用〕

得られた成果は、道路橋示方書の改定等に反映する予定である。

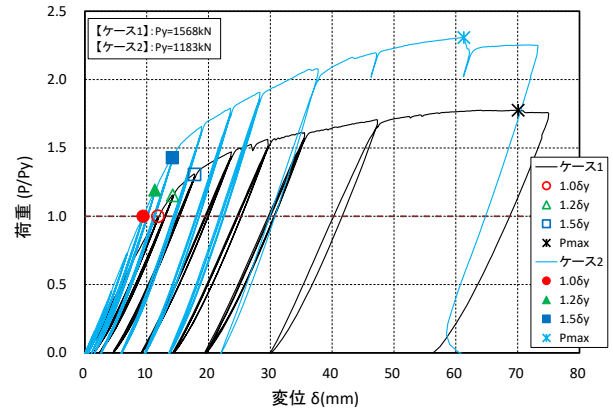


図-2 荷重-変位曲線

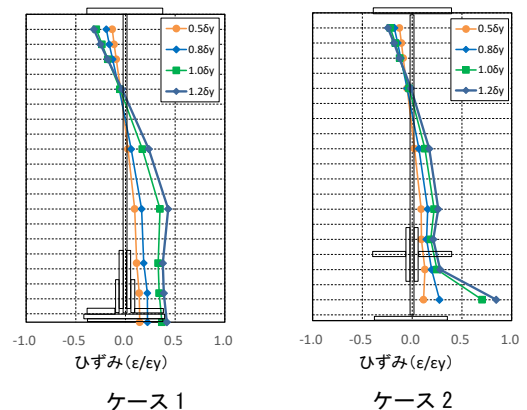


図-3 荷重時ひずみ分布

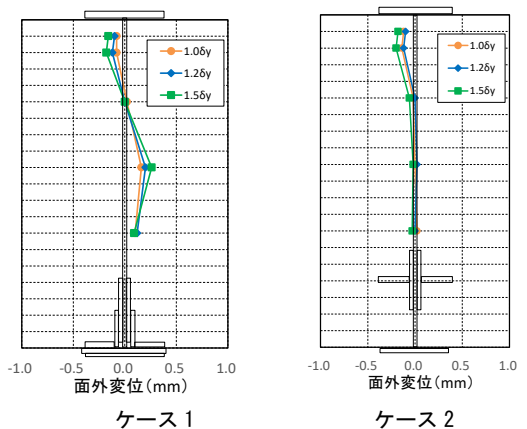


図-4 荷重除荷時における腹板の面外残留変位

