

道路橋の合理的な補修補強設計に向けた取組み

山田慎太郎・中尾 勝・市川幸治・白戸真大

1. はじめに

平成29年の道路橋示方書の改定では、補修、補強の設計基準への拡張も視野に、信頼性も含めた性能に基づく設計基準への転換を図った。たとえば、想定する外力の状況の設定を設計で考慮する期間と関係づけたこと、部材等の挙動の信頼性を測るための限界状態の概念が導入されたことなどが挙げられる。既設道路橋の補修、補強設計においてもこれらの利点を最大限活用することで、現地の状況や現物の状態や要求性能をきめ細かく考慮して、より適確に性能を評価、確保できるようになることが期待される。

たとえば、新設橋梁の外力の評価や耐久性の評価において考慮する期間は100年であるのに対し、既設橋梁の補修にあたっては必ずしも同じだけの期間を考慮する必要がなければ、合理的な補修補強設計につながることが期待される。また、現在、部材等の限界状態を設定するときに、多くの部材では、弾性限界や最大強度点で代表させることが多いが、たとえば断面内のあらゆる点で弾性が確保されることにこだわらずに、断面の一部が塑性化しつつも部材全体で見れば変形が増加・累積しないような設計が出来るようになれば、合理的な補強につながると考えられる。

以下では、これらの課題解決に向けた国総研の最近の取り組みや研究成果を紹介する。

2. 補修、補強設計に用いる荷重係数の調整

2.1 研究の背景と方法

既設構造物では、補修、補強を行うとしても、将来の更新などが選択肢の一つとして想定される場合もあると考えられる。このようなとき、たとえば、個別に25年や50年のように適当な期間を設定し、補修設計に用いる荷重係数を調整することが期待される。しかし、任意の橋、条件で調整を行うための方法論の開発は検討を要する。

ここでは、その方法論そのものにはならないものの、複数荷重の同時載荷状況のモンテカルロシミュレーションを用いて、いくつかの橋に対して、参照期間を何段階か変化させ、荷重係数がどの程度変化しうるのか、試算を行った結果を紹介する。モンテカルロシミュレーションは、組合せ荷重による断面力の極値分布を作成し、各参照期間について、取り得る荷重係数の範囲を試算するものである。方法の詳細は、国総研資料1031号¹⁾や過去の土木技術資料の講座²⁾を参照されたい。

2.2 シミュレーション結果

まず、図-1に示すニールセンローゼ橋（橋長125m）に対するシミュレーション結果を示す。ここでは、断面力に占める温度変化、風、地震の影響が顕著である補剛桁の中間断面に着目する。参照期間を1年とし、モンテカルロシミュレーションで得た断面力極値分布の非超過確率95%値及びその前後の断面力極値のサンプルを複数取り出す。各断面力極値から、温度変化の影響など寄与している各荷重成分由来の断面力の内訳が分かる。それを、道路橋示方書の対応する設計荷重による断面力で除した値をここでは荷重係数と呼ぶ。

結果を表-1に示す。THは温度変化の影響、Wは風荷重、EQは地震の影響である。モンテカルロシミュレーションによることで得られる荷重係数は幅を有する。比較のために、平成29年の道路橋示方書に規定される荷重組合せと荷重係数（本報告では、基準における荷重係数と荷重組合せ係数の積としている）の例を抜き出して示した。Dは死荷重であり、基準では荷重係数として1.05が考慮される。道路橋示方書の荷重組合せや荷重係数は、100年程度を参照期間としていていると考えてよいが、ここでの結果では、期間を1年としてみても、考慮すべき荷重組合せも荷重係数もほぼ変わらない。これは、ある意味で当然であり、温度についても1年の周期で暑寒が変化し、季節風にしても台風にしても橋は毎年のように強風を受

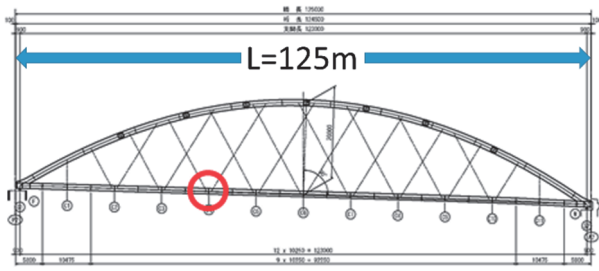


図-1 対象とする補剛桁断面（赤丸で示す）

表-1 評価期間1年の断面力最大値分布における非超過確率95%値周辺の荷重係数との比較

	組合せ	TH	W	EQ
算出結果	TH+W	0.09～ 0.61	1.33～ 1.35	—
道示	D+W	—	1.25	—
道示	D+TH+W	0.75	0.94	—
算出結果	TH+EQ	0.06～ 0.63	—	0.42～ 0.53
道示	D+EQ	—	—	1.0
道示	D+TH+EQ	0.5	—	0.5

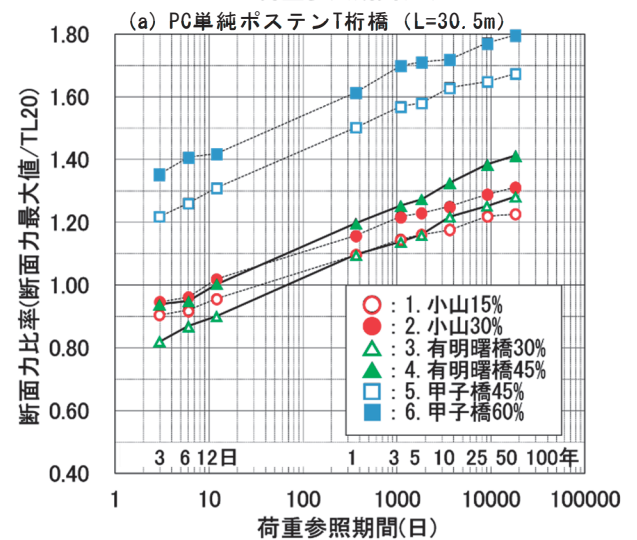
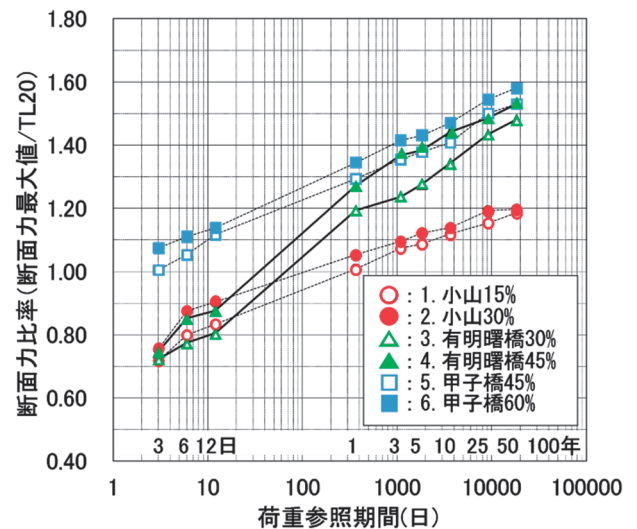
けることを想定せざるをえないと考えられる。死荷重の他に単独で地震の影響が顕著になる組み合わせであるD+EQについてみれば、算出結果のEQの荷重係数の値は、1.0よりは小さくなっている。ただし、地震の影響を無視できるわけではないことが分かる。

次に活荷重に着目した検討結果を示す。図-2(a)(b)に記載した2種類の単純桁橋の支間中央の断面力に着目する。この荷重シミュレーションでは、全国各地の活荷重実態を計測した結果³⁾から、交通流を模擬するために参照する車種（車両構成比、軸重比、総重量分布）の確率モデルを与える。本研究では、小山跨道橋、有明曙橋、甲子橋の計測結果から確率モデルを作成し、参照期間をパラメータとして、シミュレーションを行った。

結果を図-2に示す。横軸は、参照期間（日）であり、3日から50年に対応する。縦軸は、各参照期間断面力極値分布から非超過確率99%の断面力を抽出し、過去の道路橋示方書の設計活荷重であるL20荷重を載荷した時の断面力で除した比である。数日のような極端に期間が短い場合を除けば、値は1を超える結果が得られる。

また、参照期間に比例して値が大きくなっていく傾向が見られる中で、有明曙橋のデータに基づく場合は、期間の増加に対して比が急増する場合

が見られる。ここでの計算では、橋長が比較的短い(a)のケースで顕著に見られる。橋にとって自動車の載荷が厳しくなる状況として、大型車が複数台一度に橋面に現れるときと、稀に車重の重い大型車両が出現するときに考えられるが、後者の影響が出始めるときと考えられる。さらに橋長が長くなると同時載荷の影響の方が大きくなり、期間の増加に対して比例的に増加している。



(b) 鋼単純鋼床版箱桁橋 (L=75.0m)

図-2 荷重参照期間と断面力比率の関係

すなわち、道路橋については、やはり、定期的な点検や重量車両の適切な管理によって供用の安全性を担保することが必要であること、また、極端に短い期間を想定するのでなければ、補修補強設計では、活荷重についても、道路橋示方書の荷重組合せや荷重係数を用いて設計することで過不足のないことが示唆された。

3. 材料の塑性化を許容する桁の設計法

道路橋示方書では、鋼部材、コンクリート部材の限界状態に対応する部材耐力を算出するための耐荷力式は、材料の降伏強度や引張・圧縮強度を用いている。そして、変動作用が支配的な状況（絶えず大きさが変動する作用で、供用期間中の最大値を考慮する状況）では、現在、最大耐力に対して十分余裕を有することだけでなく、材料が塑性化しない範囲を超えないように部材や接合の挙動を制御している。

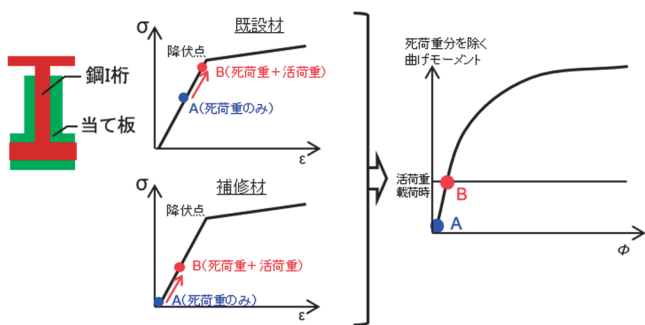


図-3 部材断面の一部の塑性化を許容した設計への期待

図-3は鋼桁を例とした、補修後の桁の耐荷性能の概念図である。既設の桁では既に応力が生じている。そのままで当て板、外ケーブルなどの補修材を追加すれば、外力の増加に対して初期応力がある既設材は先に降伏に達する。しかし、補修材では強度に余裕が残る。部材断面の塑性化を許容しない、許容応力度法では、既設材に塑性化させないように当て板量を決定することになるが、一方で、当て板には大きな余裕が残ってしまう。そこで、部材や橋としての性能が確保されることを前提としながらも、断面の一部が塑性化することでも許容できれば、補修材の実力を十分に発揮させた合理的な設計が可能になる。

しかし、活荷重や温度のように日単位で最大値が生じるような状況に対して部材の塑性化を許容する設計をするためには、繰り返しの材料の塑性化に対しても部材としての残留変形の累積が急増しないことに対応する限界状態点を設定する方法が必要である。すなわち、最大耐力に達するまで残留変位の累積を急増させない構造の詳細など、降伏耐力と最大耐力の間の荷重変位関係を制御する方法論を模索する必要がある。

補修補強を考えたときには、既設橋の材料とは異なる材料を組み合わせることで補修補強することが多い。そして最終的には、耐震補強まで含めて、道路橋示方書における部材等の限界状態²に対応する耐荷力式やじん性率の評価方法を統一的に見直すこと、そして、合理化することが視野に入る。現在、国総研では、まずは鋼桁を対象に、産学への委託研究や共同研究も通じつつ、降伏耐力と終局耐力の間の挙動の制御と信頼性を考慮した部材耐荷力式の検討を進めている。これらの一部については本号⁴⁾で紹介されているので、興味のある方は参照されたい。

4. 部材や変状の種類毎の補修補強法

4.1 基本的な工法のマニュアル類整備の必要性

適切な補修補強が行われるには、前述までの設計原則に係わる部分の基準の整備だけでなく、具体的な部材種別や変状を対象にした調査、設計、施工の方法に関するマニュアル類を適宜整備することも有用である。比較的広く用いられている当て板や炭素繊維シートによる補修や補強などに関する調査、設計、施工の標準的な方法や留意点については、土木研究所、各道路管理者、学協会でも検討が進められており、国総研では、日本道路協会等の活動を通じて関係機関との連携のもと、マニュアル化に向けた作業を進めている。また、全国で見れば複数の事例があり、今後も発生が予想される一方、各管理者で見れば事例が少ない補修補強についても、参考にできる技術資料を順次まとめていくことが、円滑な補修補強の実施のために重要である。これらについては、必要に応じて国総研でも土木研究所や産学との共同研究を行うことでノウハウの結集を進めている。

4.2 腐食の程度が当て板の摩擦力に与える影響

その共同研究の一例として国総研が行った実験結果を紹介する。鋼桁の補修補強工法のひとつである当て板工法は、摩擦接合によって既設部材と当て板部材を一体化し作用力を協同で分担させる。しかし、腐食によって既設部材表面に凹凸があるとそこに補修材を当てても片あたりが生じ、期待できる摩擦力が低下すると考えられる。その度合についての知見は少なく、実務では、安全側となるように凹凸部での摩擦力を期待せずに諸元を決めることが大半であり、当て板の範囲が大きく

なってしまうこともある。そこで、共同研究では、撤去した実際の鋼橋から切り出した腐食鋼材と新材を摩擦接合した試験片を製作し、標準すべり試験⁵⁾を行って、すべり係数を調べた(図-4)。

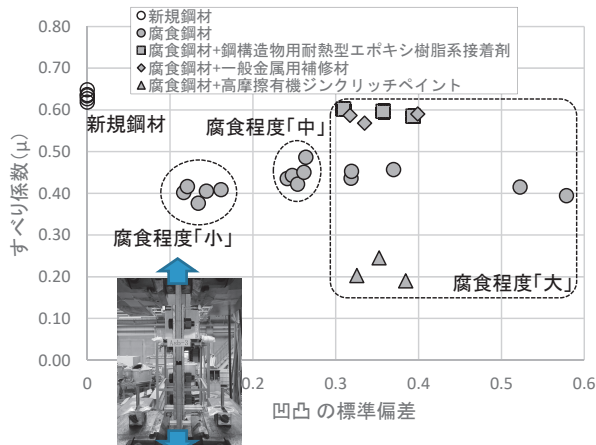


図-4 鋼材の凹凸の標準偏差とすべり係数

実施工において腐食程度が大きいときには、ケレン後の母材の防せいや不陸修正の目的で、母材と当て板との間に塗装したり、充填材を塗布することがある。そこで、腐食程度が大きい部分を用いて、塗装や充填材を施した試験片も製作した。また、比較のため、腐食鋼材を用いず、既設材も当て板も新材のみの試験体も製作した。

図-4に鋼材の凹凸の標準偏差とすべり係数の関係を示す。試験片を製作するにあたって、3Dスキャナーを用いて腐食鋼材表面の形状計測を行い、試験片ごとに凹凸の標準偏差を調べ、腐食程度を3段階で分類した。また、図中では新規鋼材の凹凸の標準偏差は0として表示している。新規鋼材で当て板をしたときに比べて、腐食鋼材のときは、すべり係数が低下し、また、ばらつきも大きくなる傾向が見られる。腐食程度「大」の試験結果と

腐食程度「大」に充填材を塗布した試験結果から、腐食面の処理がすべり係数に影響を与えていることが分かる。接着剤を用いた場合は比較的大きいすべり係数が得られている。ただし、接着強度を摩擦特性を表す、すべり係数として整理することの是非には議論があること、また、供用環境下を想定した接着剤の耐久性の評価も定まっていないため、本試験結果の設計上の扱いについては今後更なる検討が必要である。

5. おわりに

以上のように、信頼性や性能に基づき道路構造物の効率的な維持管理を実現するために、国総研では、補修補強に関わる技術基準や参考にできる技術図書を体系化することに取り組んでいる。一方、性能を達成するための具体の手段の充実も不可欠であり、むしろ現場レベルでは期待が高いところであろう。漸次的にでも成果を得て普及につながれるよう、関係機関と連携して鋭意取り組んで参りたい。

参考文献

- 1) 国土技術政策総合研究所：道路橋の設計状況設定法に関する研究、国総研資料第1031号、2018
- 2) 白戸真大、玉越隆史：土木技術講座、道路橋示方書における部分係数法と信頼性設計 第1回、土木技術資料、第60巻、第4号、pp.48～51、2018
- 3) 国土技術政策総合研究所：道路橋の設計自動車荷重に関する試験調査報告書—全国活荷重実態調査—、国総研資料第295号、2006
- 4) 宮下剛、小野潔：塑性化を考慮した鋼桁設計法の開発、土木技術資料、第62巻、第10号、pp.40～43、2020
- 5) 土木学会、高力ボルト摩擦接合継手の設計・施工・維持管理指針(案)、2006

山田 慎太郎



国土交通省国土技術政策
総合研究所道路構造物研
究部橋梁研究室 研究官
YAMADA Shintaro

中尾 勝



国土交通省国土技術政策
総合研究所道路構造物研
究部橋梁研究室 主任研
究官
NAKAO Masaru

市川 幸治



国土交通省国土技術政策
総合研究所道路構造物研
究部橋梁研究室 主任研
究官
ICHIKAWA Kouji

白戸 真大



国土交通省国土技術政策
総合研究所道路構造物研
究部橋梁研究室長、博士
(工学)
Dr. SHIRATO Masahiro