

道路政策の質の向上に資する技術研究開発

【研究状況報告書（2年目の研究対象）】

①研究代表者	氏名（ふりがな）		所属		役職
	大野 豊繁（おおのとよしげ）		一般社団法人 日本橋梁建設協会		近畿事務所付 担当部長
②研究 テーマ	名称	鋼橋の現位置改良工法の開発			
	政策 領域	[主領域] 領域8 道路資産の保全	公募 タイプ	タイプ I	
		[副領域]			
③研究経費（単位：万円）	平成28年度 (FS採択) 9 1 8 万円	平成29年度 (新規採択) 8 2 9 万円	平成30年度 1, 2 5 0 万円	総 合 計 2, 9 9 7 万円	
※H28 は精算額、H29 は受託額、 H30 は計画額を記入。端数切捨。					
④研究者氏名					
氏 名			所属・役職		
春日井 俊博			(一社) 日本橋梁建設協会・技術委員会副幹事長		
三宅 隆文			(一社) 日本橋梁建設協会・設計小委員長		
稲田 育朗			(一社) 日本橋梁建設協会・保全委員会委員		
⑤研究の目的・目標					
本研究は、損傷した鋼橋を現在の位置で供用しながら、維持管理がより容易な新構造へと改良する新しい工法を開発するものであり、その特徴は既設主構造から新設主構造へと耐荷機能を移行することである。工法の適用性、安全性と実用性を実験と解析で検証する。					
(平成30年度の目標)					
<ul style="list-style-type: none"> ・解析による耐荷力評価手法の提案と実験による検証の実施 ・限界状態設計法を用いた新しい設計手法の提案 ・実工事への適用手法の提案 					

⑥これまでの研究経過

(1) 本工法の例

損傷した跨線橋の改造例を図-1に示す。単純4主I桁の両外側に新設の箱桁を設置し、既設主桁の桁高を低く改造して、新設の箱桁と協働させる新しい構造として機能を向上させるものである。この他にも、既設損傷部材はそのまま継続利用し、損傷により不足した安全余裕を新設部材により補う構造とすることもできる。

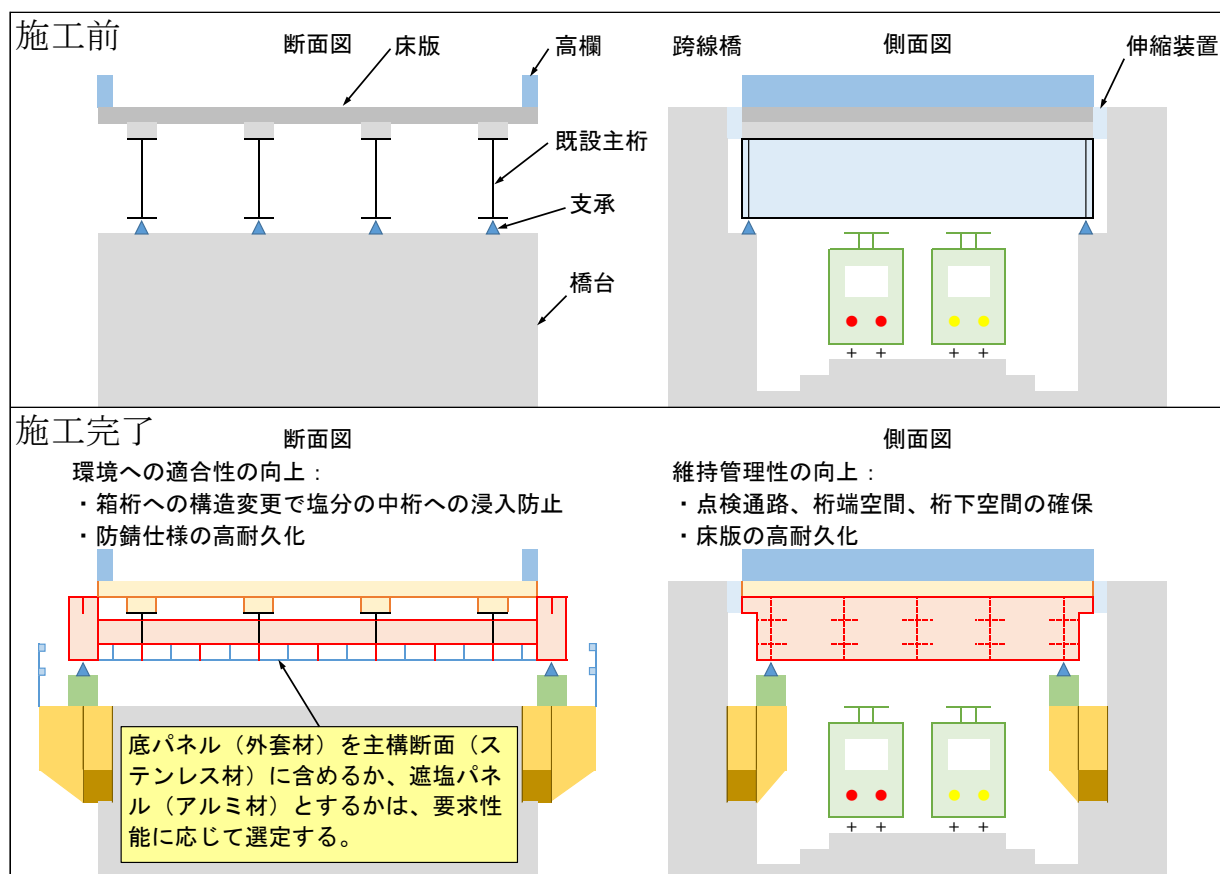


図-1 本工法による鋼橋改造の例

(2) 工法実現のポイント

以下の3つのポイントに着目し、研究を実施してきた。

A：安全かつ確実に施工ができるか？

B：耐荷機能を既設部材と新設部材とで協働させる構造が成立するか？

C：新旧部材の協働を制御できるか？

このうち、Aについては、平成28年度のFSで検討済み。Bについて、今年度実施中。Cについては、来年度の研究により実用化できる成果が得られる見込み。研究の詳細を次ページ以降に示す。

(3) 提案工法の適用対象

損傷した跨線橋の事例を写真に示す。本補強工法は、既存部材の性能を最大限活用することで、工事数量を抑えて現位置で安全に施工できる技術を提供するものであり、維持管理リスクも低減できる。このため時間的、空間的制約が極めて多く、維持管理リスクの抑制が特に求められる跨線橋でのニーズが高いと考えられる。なお、本工法で得られる効果は、大半の鋼橋に共通するニーズであり、その技術は広く道路資産の保全に活用できると考えられる。



写真-1 電化区間の跨線橋



写真-2 非電化区間の跨線橋



写真-3 支点部の損傷事例



写真-4 桁端部の損傷事例



写真-5 下フランジと継手部の損傷事例



写真-6 下フランジと補剛材の損傷事例

(4) 研究の着眼点と課題

着眼点その1：維持管理が容易な新構造

劣化損傷部材に対して、これまでの補修・補強は、補強部材によって当該部位が外観できなくなる方法が大半で、維持管理性が低下する場合もある。また、補修・補強後の再劣化や損傷の進展を確認するためには、点検性の確保が重要である。

(課題) 損傷部材を現状のまま使用しながら、直接外観点検できる補強方法の開発。

着眼点その2：信頼性の高い新設部材による安全性の確保

従来工法では、劣化や損傷した既存構造の耐荷性能が不明確となっている状態で、また、供用下での施工では補強による応力状態が複雑に変化するため、補強後の性能の不確実性が高くなることから、過剰な補強が必要となっている。

(課題) 不確実性の高い損傷部材を直接補修するのではなく、信頼性の高い新設部材で必要な安全性を確保できる構造の提案。

着眼点その3：既設部材の残存耐荷力の活用

既設部材と新設部材とが協働する構造により、信頼性が高い新設部材の耐荷機構で安全余裕を確保する一方で、不確実性のある既設部材の残存耐荷力を最大限活用する。

(課題) 既設部材の断面が一部降伏した後の新設部材への耐荷機能の移行を評価できる解析手法の開発。

(5) 検討手法

平成28年度 (FS) :

- ・改良構造を設計し、施工が安全に実施できることを確認した。
- ・新旧部材が協働する構造の耐荷機構をFEM解析により再現できることを確認し、工法の実現可能性を示した。

平成29年度 (本採択) :

- ・材料の弾塑性特性と有限変位の考慮が可能なFEM解析により、提案する構造の特性を詳細に明らかにした。
- ・実験により、用いたFEM解析手法が十分な精度を持ち、実用的であることを確認した。

平成30年度 (採否未定) :

- ・FEM解析と実験により、新旧部材の剛性比の違い、床版と鋼桁との合成程度の違いが、構造全体の耐荷機構に与える影響を明らかにする。
- ・研究のまとめとして、要求性能の水準の設定と部材の安全性照査方法の具体について実工事への適用を提案する。

(6) 新しい補強構造の提案

本工法の特徴である既設部材と新設部材とが協働して作用に抵抗する新しい補強構造の設計法では、既設部材の一部で塑性化を許容しても、新設部材と協働することで構造全体の安全性が確保される構造の実現が期待できる。この新たな設計法の確立のためには、部材ごとの安全性の照査に加えて既設部材と新設部材とが協働する合成構造の安全性の照査が必要となる。部材ごとの照査では、既設部材と新設部材のそれぞれの応答値の算定とその前提となる各部材の限界状態の定義および部材ごとの部分係数の設定が必要となる。既設部材と新設部材とが協働して作用に抵抗する合成構造については、望ましい耐荷特性を想定し、これが再現されるのに必要な構造詳細の設定が必要となる。平成28年度のFSでは、単純支持の4主桁桁を検討対象として新設主桁（箱桁）を追加した改良構造について、従来の許容応力度設計法に比べて、提案する新しい設計法によると経済的とできる可能性を確認した。図-2に示すように、従来工法で決定した断面の改良構造（点b,c）は既設橋（点a）の耐荷力を大きく上回り、断面の一部が降伏する荷重を既設橋と同程度となるように設計すると新設主桁の断面積は50%に低減（改良断面50%、点d,e）できる可能性がある。改良構造は、既設部材が降伏した後でも橋梁全体として耐荷機能が保持されることがわかった。

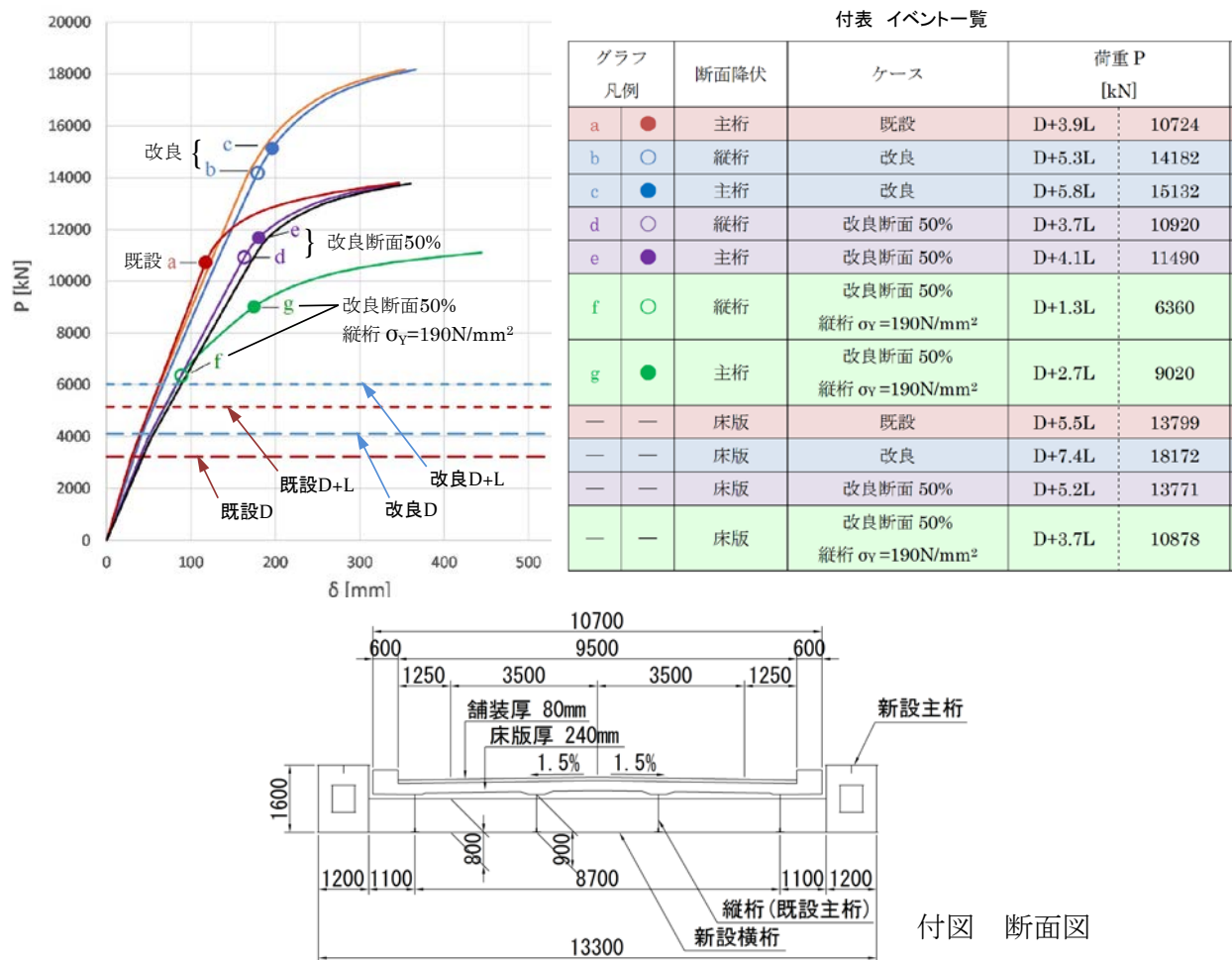


図-2 荷重と支間中央変位（平成28年度成果の解析例）

(7) 新しい設計法の位置づけ

本研究で提案する設計法は、従来の許容応力度設計法による補修・補強工法とは異なり、改定された道路橋示方書に示される限界状態設計法の応用事例とできる可能性がある。

(8) 補強工法の概要

提案する補強工法の適用対象としては、損傷を含む橋梁の補強のように機能回復を目的とする場合と、活荷重の増加に対する補強のように機能向上を目的とする場合が考えられる。本研究では、下記のような基本事項と得られる効果を考えている。

(基本事項)

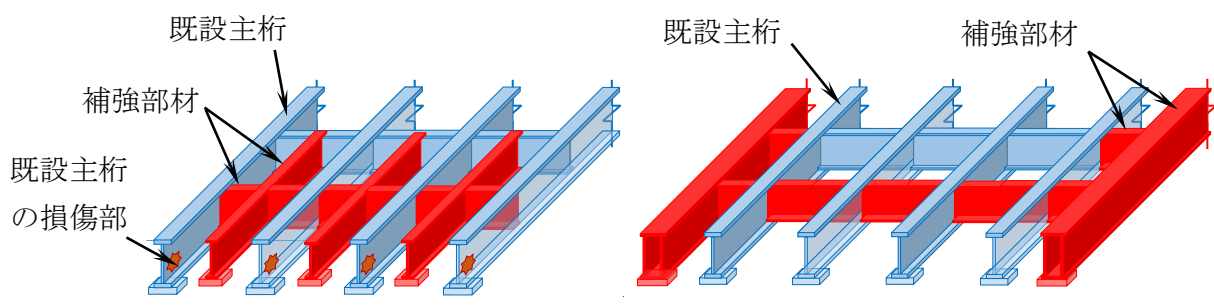
- ・耐荷力不足の既存主部材、または劣化等による耐荷力低下を生じた既存主部材は現状の死荷重を負担させたまま継続利用する。
- ・補強部材は、自重以外の作用に対しては無応力状態から既設主部材と協働させ、構造全体として限界強度の向上を図る。

(得られる効果)

- ・既存主部材の劣化部などを当て板などで覆わないため、点検性が確保できる。
- ・被補強部材の断面に補強部材を追加しないことで、補強部材は不確実性の高い被補強部材の特性に影響されず、独自の特性で挙動できる。
- ・被補強部材と補強部材は連結部材で一体化されるため、被補強部材の信頼性と補強部材の信頼性を独立で設定して合成できる可能性があり、部分係数のメリットが活用できる。

(補強部材の追加例)

図-3に補強部材の追加例を示す。(a)は、既設主桁の桁端部が損傷している場合で、損傷箇所は現状のままとし、既設主桁の健全部から補強部材の支点部へと経路する荷重支持構造を追加する場合の例である。(b)は、既設主桁の両外側に補強部材を追加する場合で、橋梁全体の耐荷力を増加させ機能向上を図る場合の例である。



(a) 損傷部材のバイパス材を追加した例

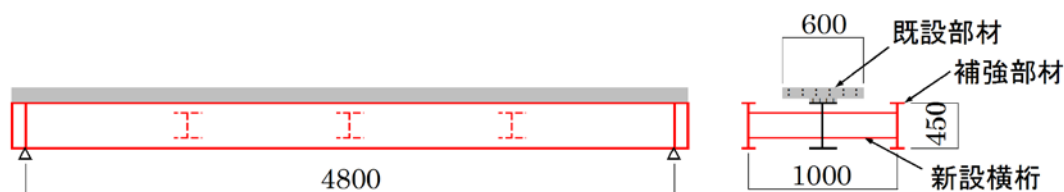
(b) 既設主桁の両外側に補強の主桁を追加した例

図-3 補強部材の追加例

(9) 改良構造の耐荷力評価結果

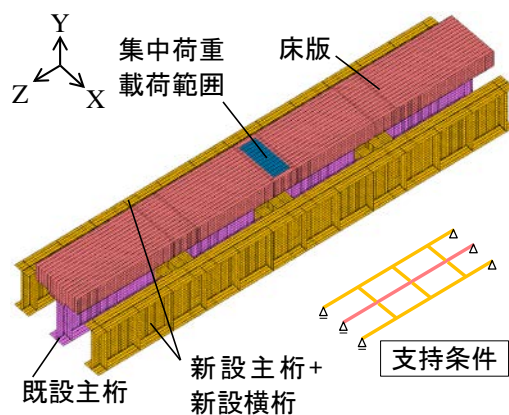
図-4に示す実験供試体について、FEM解析を行い、実験により解析手法の妥当性を検証する。なお、載荷実験は1月に実施予定であり、実験結果は評価会当日に提示する。実験供試体は既設部材がRC床版付きの単純合成 I 桁で、補強部材として鋼 I 桁 2 本を新設横桁で既設部材に結合したものである。平成 29 年度は、試験体 3 体の載荷実験を行う。試験体種別の改良前は既設部材単独のもの、改良後は既設部材に補強部材を結合したものである。

既設部材が降伏した後は、新設の補強部材の荷重分担割合が増加して、構造全体の耐荷性能が保持されることを確認する。



付表 部材寸法 (mm)と強度 (N/mm²)

断面寸法 (mm)	既設部材	補強部材	横桁	材質	降伏強度
床版幅×高さ	600×160	—	—	$\sigma_{ck} = 30 \text{ N/mm}^2$	$0.85 \sigma_{ck} = 25.5$
ハンチ高さ	30	—	—	—	—
上フランジ幅×厚さ	200×12	200×12	200×12	SM490Y	355
ウェブ高さ×厚さ	426×9	426×9	216×9	SM490Y	355
下フランジ幅×厚さ	200×12	200×12	200×12	SM490Y	355



付図 FEM解析モデル

付表 試験体数 (全体計画)

構造の種別	試験体合計数	平成29年度分	平成30年度分
改良前	1	1(1)	0
改良後	5	2(1)	3

()内は自己充分分の内訳

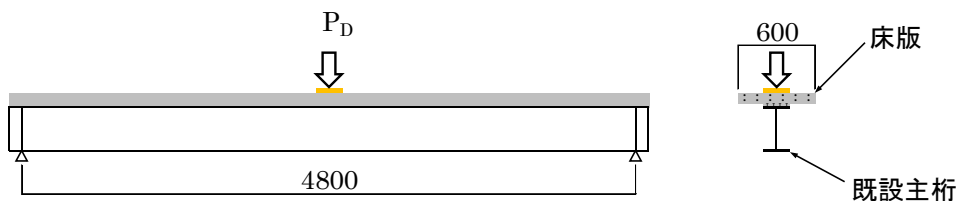
図-4 検討対象とした実験供試体の寸法とFEM解析モデル

解析と実験のケース一覧を表-1に示す。CASE0は改良前の既設部材のみの耐荷力を確認するものである。CASE1～CASE3は既設部材に補強部材を結合した改良後のものであり、補強部材を結合する時の既設部材の応力状態が異なるものである。CASE1は既設部材に集中荷重を載荷する前に補強部材を結合したものの。CASE2は既設部材に200kNの集中荷重を載荷して、死荷重応力程度（SM490Y材の降伏応力 355N/mm^2 の1.7分の1の半分：約 105N/mm^2 ）を発生させた状態で補強部材を接合し、終局状態まで集中荷重を漸増させるものである。CASE3は既設部材に500kNの集中荷重を載荷して、降伏応力の7割程度の応力を発生させた状態で補強部材を接合し、終局状態まで集中荷重を漸増させるものである。載荷要領の例（CASE2）を図-5に示す。

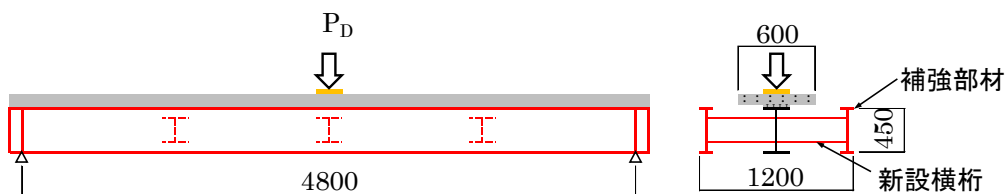
表-1 解析と実験のケース一覧（平成29年度分）

解析と実験のケース名	構造の種類	補強部材接合時の既設部材の載荷荷重	試験体数	解析ケース数
CASE0	改良前	-	1	1
CASE1	改良後	0 kN	0	1
CASE2	〃	200 kN	1	1
CASE3	〃	500 kN	1	1

ステップ1 死荷重相当の集中荷重($P_D=200\text{kN}$)を載荷



ステップ2 既設主桁に補強部材を結合



ステップ3 死荷重相当に加えて集中荷重を漸増載荷

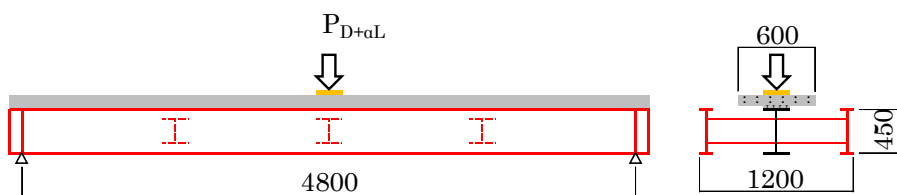
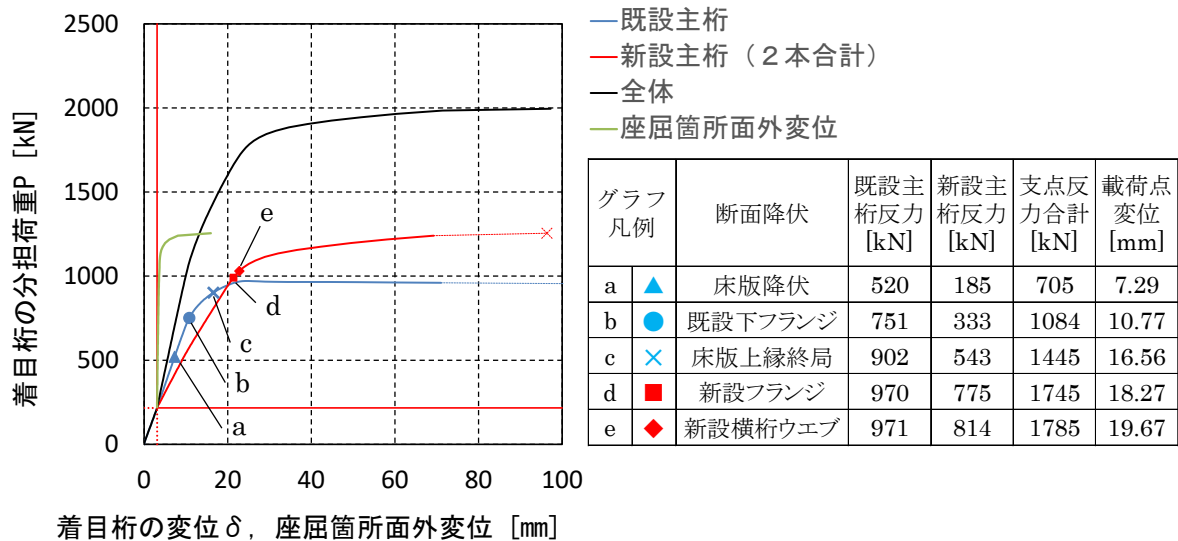


図-5 載荷要領（CASE2の例）

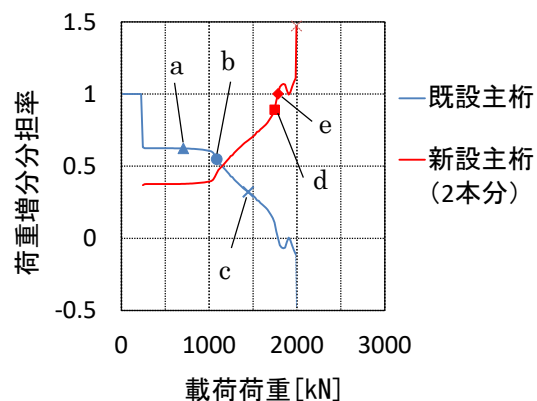
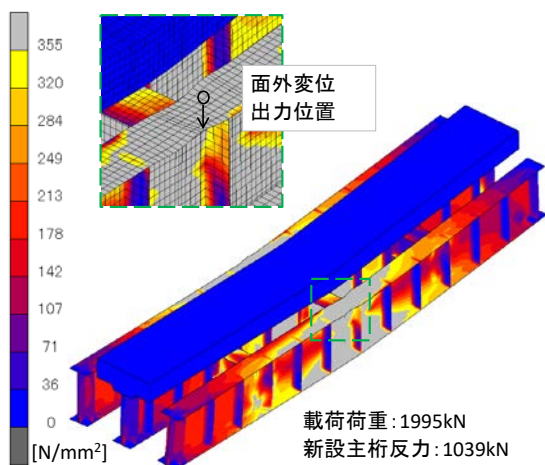
解析結果としてCASE2の例を図-6に示す。図-6(a)は、既設主桁と新設主桁のそれぞれの支点反力とそれぞれの支間中央変位を示したものである。既設主桁が死荷重状態（荷重200kN）で新設主桁を結合して、その後は集中荷重を漸増载荷した場合の反力と変位の関係である。既設主桁の下フランジが降伏する支点反力は751kNであり、その時の新設主桁の支点反力は333kNである。許容応力度設計法では、断面降伏に対する安全率を1.7とすると、既設主桁の許容力は $751/1.7=442\text{kN}$ となる。提案する工法では、既設主桁の断面降伏に対する安全率を1.0と仮定すると、断面の一部が降伏するが、弾性範囲にある新設主桁が荷重増分を負担できることから構造全体として不安定とはならず、耐荷機能が保持された状態となる。既設主桁の断面降伏直前（仮に既設主桁の降伏に対する安全率を1.05と仮定する）までを構造全体の安全性が確保される限界状態と定義すると、提案工法での耐荷力は $751/1.05=715\text{kN}$ となる。このときの新設主桁の反力は307kNであり、新設主桁の降伏時の支点反力が775kNであることから、新設主桁の降伏に対する安全率は $775/307=2.5$ となる。従来の許容応力度設計法に比べて提案する工法では、補強部材である新設主桁の断面を経済的とできる可能性がある。部分係数の具体は、今後の研究での検討が必要であるが、既設主桁と新設主桁および構造全体の安全率はそれぞれ個別に設定が可能で、新設主桁の断面性能を適切に設定することで、要求性能の水準を満足することができる。

図-6(b)は、新設主桁の上フランジで局部座屈が発生し、面外変形が増大する状態のミーゼス応力と変形形状を示したものである。

図-6(c)は、載荷荷重と荷重増分分担率の関係を示したもので、漸増集中荷重の荷重増分（各ステップ20kN）に対する、既設主桁の支点反力増分と新設主桁の支点反力増分のそれぞれの割合を表している。既設主桁が降伏するまでは荷重増分分担率はそれぞれ、既設主桁が約0.62、新設主桁が約0.38である。既設主桁が降伏した後は、新設主桁の荷重増分分担率が上昇し支点反力合計が約1145kNで荷重増分分担率は既設主桁と新設主桁のどちらも約0.5となる。その後は、増分荷重のほとんどを新設主桁が受け持つことになる。提案工法では、一例として既設主桁の降伏直前を安全性に対する限界状態と定義しているが、既設主桁が降伏した後も新設主桁が増分荷重を分担できることで、構造全体の安全性は保たれていると考えられる。



(a) 分担荷重と支間中央変位



(c) 荷重増分分担率

(b) ミーゼス応力、変形図1倍（局部座屈発生時）

図-6 FEM解析結果（CASE2の例）

(10) 研究計画、実施方法、体制の妥当性について

提案する工法では、改定された道路橋示方書に示される限界状態設計法の適用を成果目標のひとつとしている。解析的検討で目標とする成果は得られており、実験検討による検証がなされ、実験で得られた知見を反映した解析手法の構築がなされれば、今後の設計法の技術の発展に大きな貢献ができるものと自己評価している。研究計画は成果目標に対して適切になされており、得られた成果も妥当なものであることから、研究の実施方法、実施体制とも現状で問題ないと考える。

⑦研究成果の発表状況

平成29年度の成果をまとめて土木学会へ発表の予定。

⑧研究成果の活用方策

補修・補強工事において、新しい道路橋示方書に示された限界状態設計法（部分係数設計法）の適用事例とできる可能性が高いと自己評価している。具体の工事において、提案工法が審査、採用される機会が得られることが重要で、詳細設計付きの工事で提案することを考えている。施工事例ができれば、（一社）日本橋梁建設協会の技術資料の発行や講習会の開催を企画して、道路管理者などの工事発注者および施工業者への周知を図り、一般化していく。

⑨特記事項

1. 成果のインパクトについて

得られた知見は、新しい限界状態設計法（部分係数設計法）の具体の議論を提起できる可能性がある。

2. 研究の見通し、進捗について

設計法の提案とFEM解析に重点を置いて研究を実施したため、実験検討が予定よりも若干遅れている。平成30年度を最終年度として、継続して研究を行えば、実用的な成果を広く発表できるものと考えている。