

(7) 複合構造を活用した既設 R C 高架橋の 梁のリニューアル工法に関する研究

谷口 望¹・斎藤 雅充²・上村 寿志³・北川 淳一⁴・桜井 淳⁵・依田 照彦⁶

¹正会員 前橋工科大学 社会環境工学科 准教授 (〒371-0816群馬県前橋市上佐鳥町460-1)
E-mail:n-tani@maebashi-it.ac.jp

²正会員 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 鋼複合構造 (〒185-8540東京都国分寺市光町2-8-38)
E-mail:msaito@rtri.or.jp

³正会員 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 鋼複合構造 (〒185-8540東京都国分寺市光町2-8-38)
E-mail:uemurahi@rtri.or.jp

⁴正会員 三菱重工鉄構エンジニアリング 橋梁事業本部 (〒730-8642広島県広島市中区江波沖町5-1)
E-mail:junichi_kitagawa@mbe.mhi.co.jp

⁵正会員 早稲田大学 創造理工学部 社会環境工学科 (当時) (〒169-8555東京都新宿区大久保3-4-1)
E-mail:jun.sakurai@asagi.waseda.jp

⁶フェロー会員 早稲田大学 創造理工学部 社会環境工学科 教授 (〒169-8555新宿区東京都大久保3-4-1)
E-mail:yoda1914@waseda.jp

近年、高度経済成長期に作られた膨大な土木構造物に対しての劣化補修対策や耐震補強が急務となっている。これらの鉄道や道路の構造物の多くは、非常に高い公共性を有しており、供用を妨げることなく早急に劣化補修対策や耐震補強を行う必要がある。また、現在の経済情勢では、構造物更新に大きな投資を行うことは困難な状況にあり、膨大な構造物に対していかに合理的かつ経済的に対策を実施するかが重要となっている。

そこで本研究では、土木構造物として一般的な R C 高架橋に対して、供用を妨げない効率的な劣化補修対策、耐震補強の方法のひとつとして、鋼部材による R C 梁の補強方法を提案し、施工試験により施工性の確認を行うとともに、曲げ載荷試験により補強した梁の性能を把握した。

Key Words : Hybrid structure, RC beam, Maintenance, Seismic reinforcement

1. はじめに

鉄道構造物の標準的な構造として R C ラーメン高架橋が建設されるようになってから数十年が経過している¹⁾。上記構造物においては、経年による劣化や損傷が生じているとともに、施工当時の基準で設計されていることから、現在の設計で必要とされる耐震性能を有していない場合もある。また近年では、鉄道駅施設の機能や利便性向上の観点から、既設鉄道高架下空間の有効活用が求められている。したがって、耐久性や耐震性の確保の観点から大規模な改修を必要とする事例が見受けられる。特に、都市部の高架橋改修工事では狭隘な場所での施工となることや、列車運行の無い時間帯での夜間短時間施工といった制約条件が多く、施工能率の高い工法が要求さ

れている。

このことから、既設鉄道 R C ラーメン高架橋については、安全性や耐久性といった鉄道構造物として要求される機能を保持しつつ、多様化する要求性能を合理的に実現できるリニューアル技術の開発が望まれている。

本研究では、前述の要求を満たしうる構造として、構造物を小断面化した場合においても高い耐力が期待できる複合構造を活用することを提案する。従来の研究では、既設 R C 柱の鋼板巻き補強²⁾、既設スラブの補強³⁾、既存基礎部への補強⁴⁾等はすでに提案されているものの、R C 高架橋の梁を対象とした研究はあまり行われていないのが現状である。

そこで本研究は、既設の鉄道 R C ラーメン高架橋 (写真-1) の梁を対象として複合構造物の活用による劣化補



写真-1 RC高架橋の例
(柱部は鋼板巻き補強されている)

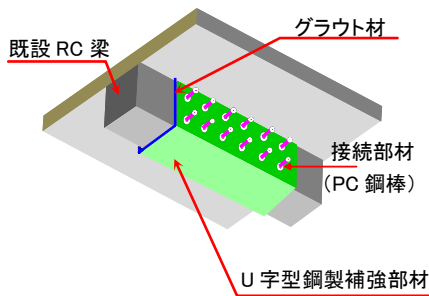


図-1 提案する梁補強構造

修や耐震性能向上のための基礎的研究を行う。梁部材のリニューアル技術により構成される構造形式を提案し、その提案構造の施工試験と載荷試験を実施することで、リノベーション技術の確立とその適用性の検討を行ったものである。

2. 提案構造

提案するRC梁の補強構造を図-1に示す。RCの梁は、一般に正曲げ・負曲げの両方が作用すること、また劣化補修としては大きな範囲に対応して補修を行う必要があることから考えて、U字型の鋼製部材をRC梁に取り付けることを考えた。また、U字型鋼製部材は既設のRC部材と合成させる必要があるが、梁はスラブを支えている構造のため、RC柱のように四方周囲を巻くことができず拘束効果も期待できないため、摩擦ではなく機械的なずれ止めを使用しなければ、鋼製部材の性能を発揮できない。U字型鋼製部材をRC梁に合成させる場合、下面側よりアンカーを取付け、これをずれ止めとすることが考えられる。しかし、既設のRC梁の下面付近は配力鉄筋が多く配置されており、この部分に必要な量のアンカーを設置する作業は、実際の施工上非常に困難であると

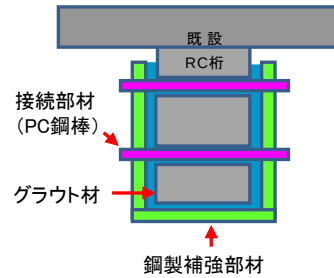


図-2 提案する梁補強構造の断面概要

言える。したがって、本研究では、図-1のように、ずれ止めとして機能する接続部材を、側面ウェブに設けることを考案した。既設RC梁のこの部分であれば、他の部位よりも配筋量も少なく、接続部材としてのアンカーを、既存の鉄筋を切断することなく、効率的に施工できるものと考えられる。

本提案構造の施工手順は次のように考えている。①既設RC梁の側面より接続部材の設置用に削孔する。②U字型鋼製部材を設置する（仮受を行う）。③接続部材を配置する。④グラウトを充填しRC梁と鋼製部材を合成させる（仮受撤去）。ここで、グラウト充填、強度発現は鉄道工事における夜間の間合い（終電から初電の間）で実施することになり、すなわち3時間程度で強度を発現できる早強のものを使用する必要がある。

3. 施工試験

提案構造を実現するためには、既設RC梁と鋼製補強部材との隙間にグラウト材が空隙無く確実に充填されることが必須条件であるため（図-2）、提案構造の実現が可能であることを確認するために、充填性の確認施工試験を行う。

グラウト材の充填状況を視認できるように、透明の塩化ビニール製の供試体（写真-2）を製作した。グラウト材を空隙無く確実に充填するためには、図-3に示すように片押しで充填する必要がある。充填施工試験は、グラウト材種および底面の隙間の大きさを変化させた全4ケースを行った（表-1）。グラウト材種については、流動性の異なる2種類を用いた。グラウト材Aは一般的に鋼橋の支承部などによく用いられている無収縮モルタル材である。グラウト材Bは、1mm程度の極小間隙の充填施工に使用されるものであり、前者よりも流動性が高いという特徴がある。両者グラウト材のコンシステンシー特性を表-2に示す。また、底面の隙間については、グラウト材の流速を変化させるため、10mmおよび20mmの2種類の隙間を設定した。



写真-2 グラウト充填確認試験用の供試体

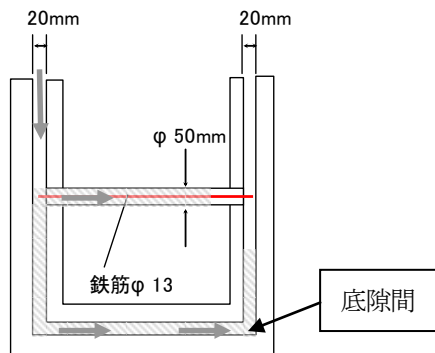


図-3 供試体断面とグラウト充填方向

表-1 試験ケース

	鉄筋径	底隙間	グラウト材種
Case-1	φ 13	20mm	グラウト材A
Case-2	φ 13	20mm	グラウト材B
Case-3	φ 13	10mm	グラウト材A
Case-4	φ 13	10mm	グラウト材B

表-2 グラウト材のコンシステンシー

	コンシステンシーの範囲 (秒) (J14漏斗流下時間)
グラウト材A	6～10
グラウト材B	3～6

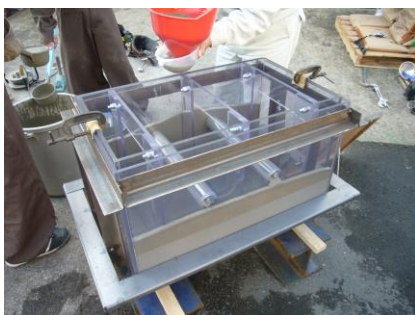


写真-3 グラウト充填確認試験の様子

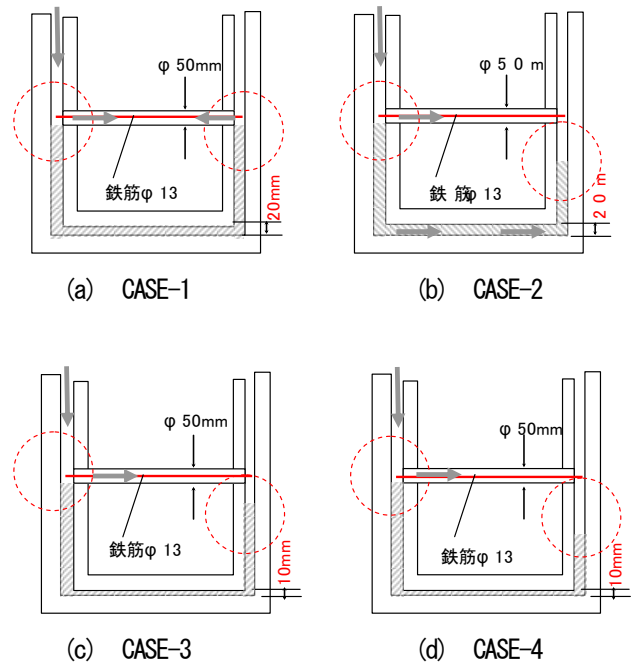


図-4 グラウト試験結果

施工試験結果、グラウトの充填性の概要を図-4に示す。Case-1では確実に高低差を作り出すことができ、開口部にも片押しで充填可能であり、内部に空気溜りはできなかった。Case-2では流動性が高いため左右に高低差が生じず、開口部に両側からグラウト材が流入して孔内に空気による空隙が生じ、確実な充填は困難であった。また、Case-3は底部の隙間が減少しグラウト材の流速が下がることでCase-1より大きな高低差を作り出すことができ、開口部にも片押しで充填可能であった。最後に、Case-4はCase-3同様にグラウト材の流速が下がり、Case-2よりも高低差ができ、開口部にも片押しで充填可能であった。ただし、グラウト材Bでは流動性が高すぎるため、グラウト材の漏れが発生したため、防止対策が問題となる可能性がある。以上の結果より、流動性の高いグラウト材Bを使用する必要はなく、一般的に用いられるグラウト材Aでも確実に充填できることを確認した。また、実構造物では表面の不陸もあり、隙間が10mm以下になることも考えられるため、確実な充填には20mmの隙間を設けることが適切であると考えられる。

4. 載荷試験概要

鋼板補強の効果を確認するために3点曲げによる載荷試験を実施した。既設RC梁の補強には、正曲げ領域と負曲げ領域の両ケースの補強が生じると考えられるため、図-5に示す2タイプの供試体を用意した。正曲げ補強は下側に鋼製補強部材のフランジが来るように、負曲げ補

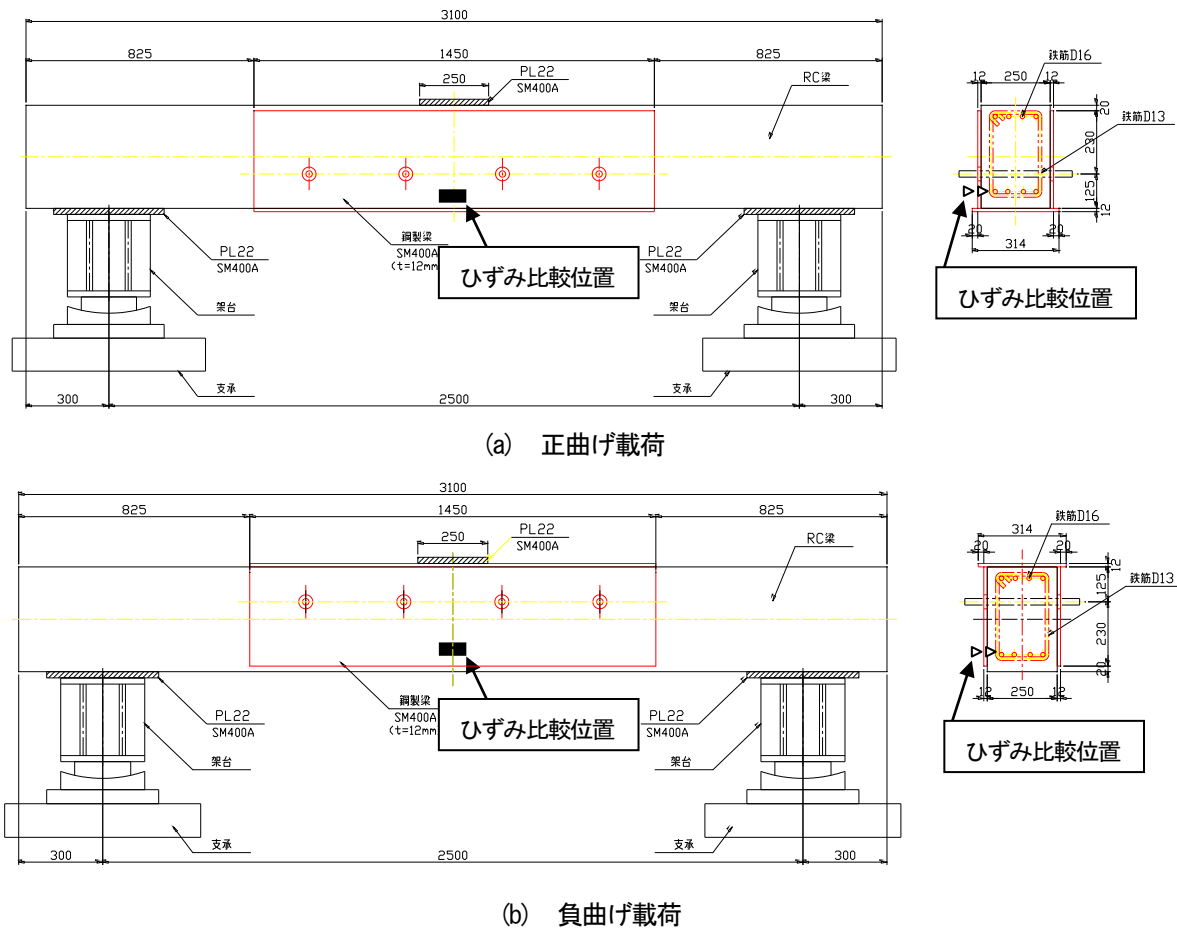


図-5 载荷試験供試体の概要 (単位 mm)

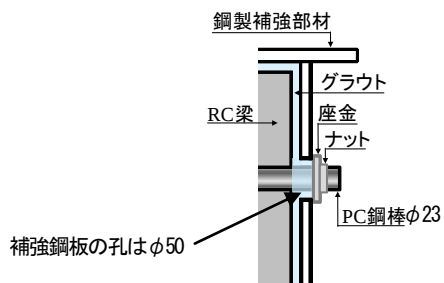


図-6 PC鋼棒接合部の概要

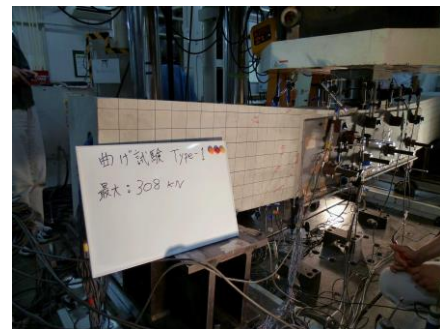


写真-5 载荷試験状況 (正曲げ)



写真-4 PC鋼棒接合部

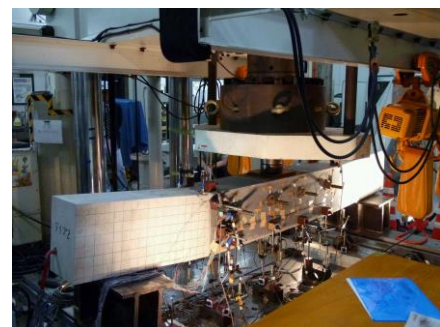


写真-6 载荷試験状況 (負曲げ)

表-3 試験結果と設計荷重の比較

	試験結果			設計計算(理論値)	
	ひび割れ発生荷重	鉄筋降伏荷重	最大荷重	RC梁設計終局荷重	鋼板を鉄筋換算した場合の設計終局荷重
	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)
正曲げ	82	220	308	130	547
負曲げ	100	380	519		542

強は上側にフランジが来るように載荷することで再現した。なお、本実験では鋼製補強部材とRC梁との合成挙動を確認することを目的の一つとしているため、接続部材であるPC鋼棒が鋼製補強部材やRC梁に先行して破壊しないように設計し、さらに鋼製補強部材とRC梁との間の付着も期待することとした。

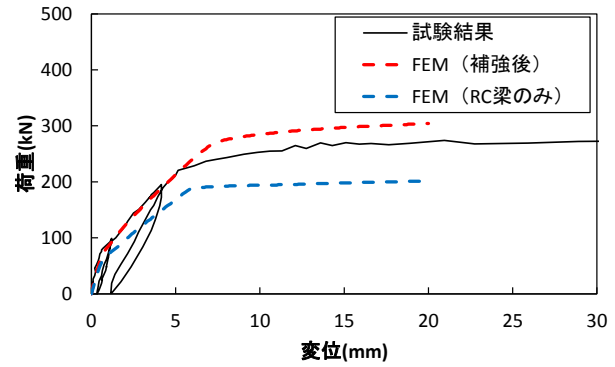
鋼製補強部材とRC梁の接合部は、RC梁を貫通するPC鋼棒(φ23)を鋼製補強部材の孔(φ50)に貫通させ、PC鋼棒端部にねじ切りを行い、ナット、座金で止める構造とした(図-6、写真-4)。このとき、PC鋼棒にはプレストレスをしないようにしている。この構造は、鋼製補強部材とPC鋼棒が、グラウト材を介して応力が伝達される、いわゆる孔あき鋼板ジベルのような挙動となることを想定したものである。なお、鋼製補強部材とPC鋼棒を直接固定させることも考えられるが、この場合はPC鋼棒に大きな応力集中が発生し、設計よりもかなり低い荷重でPC鋼棒の破断を生じ、急激な耐力低下が発生することが事前の試験⁵⁾により確認されているため、孔あき鋼板ジベルに似た本構造を提案することとした。

載荷試験の状況を写真-5、写真-6に示す。また、供試体の設計荷重を表-3に示す。本表では、補強前のRC梁のみで算出した終局荷重値のほかに、補強鋼板を鉄筋換算して算出した終局荷重値も示している。

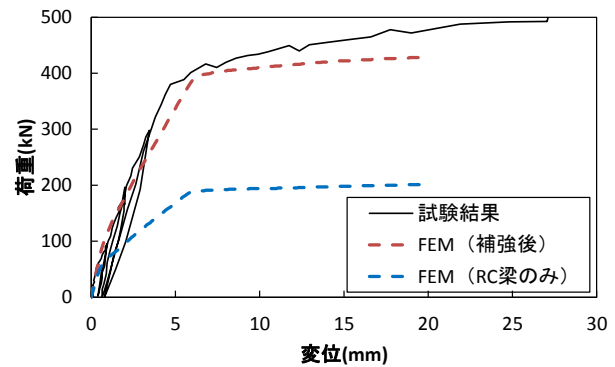
5. 載荷試験結果

載荷試験結果のうち、ひび割れ発生荷重、RC梁の鉄筋降伏荷重、最大荷重を表-3に示す。正曲げ、負曲げ供試体ともに、鉄筋降伏荷重、最大荷重は、RC梁のみの場合の設計終局を上回っているが、最大荷重については鋼製補強部材を鉄筋換算した場合の設計終局荷重よりも小さな値となっている。この最大荷重と鉄筋換算した場合の設計終局荷重の差は正曲げ供試体の方が大きくなっている。これは、試験の最大荷重時には、補強部材の合成効果が失われていた結果と考えられ、この合成効果の低下は、正曲げ供試体の方が早期に生じていると考えられる。

載荷終了時までの桁中央における荷重-変位の関係を

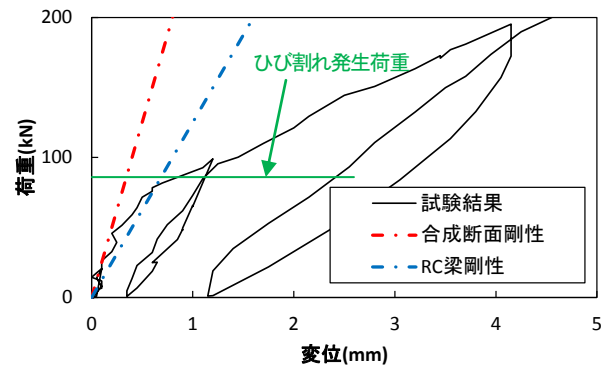


(a) 正曲げ供試体

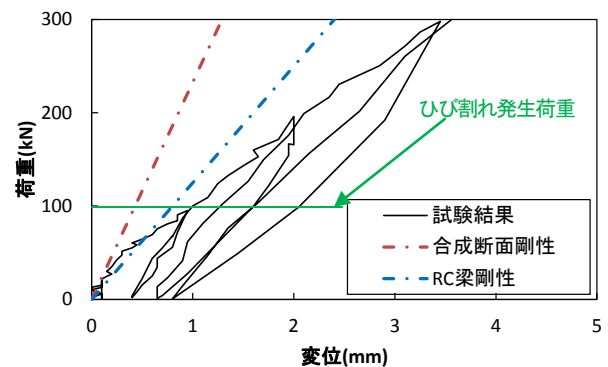


(b) 負曲げ供試体

図-7 スパン中央の荷重-変位関係 (全体)

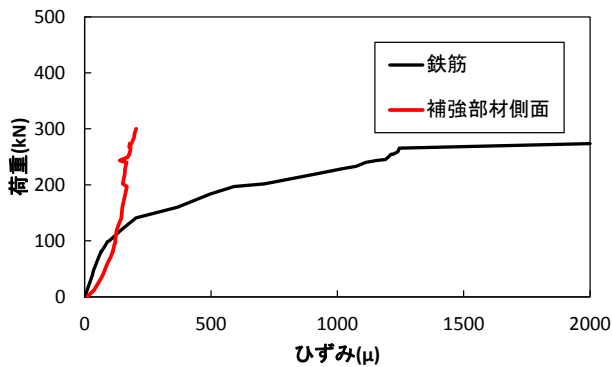


(a) 正曲げ供試体

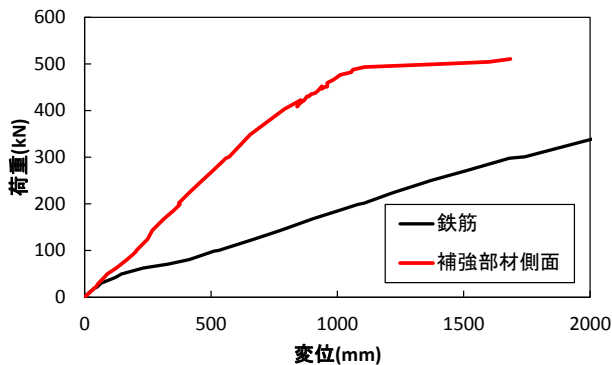


(b) 負曲げ供試体

図-8 スパン中央の荷重-変位関係 (初期剛性部分)



(a) RC梁の鉄筋と外縁鋼板のひずみの比較（正曲げ）



(b) RC梁の鉄筋と外縁鋼板のひずみの比較（負曲げ）

図-9 スパン中央の荷重－ひずみ関係



写真-7 正曲げ供試体終局時の鋼板内部状況



写真-8 負曲げ供試体終局時の鋼板内部状況

図-7に示す．図-7からは，ひびわれ発生時，鉄筋降伏時にそれぞれ荷重－変位曲線の剛性が低下していることがわかり，鉄筋降伏後はほぼ荷重は増加しない結果となっている．

供試体の初期剛性の確認を行うため，図-7の初期剛性部分のみを表示し，設計理論剛性と比較したものを図-8に示す．設計理論剛性は，RC梁のみで算出したものと補強鋼板を完全剛性として算出したものの2種類を示しており，いずれもコンクリートのひび割れは考慮していない．本結果から，正曲げ・負曲げ供試体ともに，ごく初期のうちは合成断面と挙動していると想定できるものの，ひび割れが確認される時点では，すでに合成効果が一部失われている結果となっていることがわかる．

次に，RC梁中の鉄筋と，その外縁の補強部材鋼板のひずみの比較を図-9に示す．ひずみゲージの取り付け位置は，図-5のひずみ比較位置となっている．本図では，仮に鋼製補強部材が合成として挙動する場合は，同じひずみの値を示すと考えられる．図-9(a)では，100kN程度までは補強部材のひずみの方が，RC中の鉄筋のひずみよりも大きな値を示しているが，100kNより大きな荷重では，鉄筋のひずみは大きく増加しているものの補強部材のひずみは，あまり増加しない結果となっており，供試体の終局時でも補強部材は降伏しない結果となっている．したがって，この結果からも100kNよりも低い荷重の時点で，合成効果は低下していることがわかる．しかし，100kN以上でも，この補強部材のひずみは減少していないため，ある程度の効果は保たれ，完全にはRC梁と分離していないことがわかる．図-9(b)では，30kNまでは鉄筋と補強部材のひずみは一致しているものの，30kN以上では両者のひずみに差が生じている．しかし，正曲げの供試体（図-9(a)）とは異なり，30kN以上でも鋼製補強部材もひずみは増加していることがわかる．

載荷終了後，補強部材と取り除いた後のRC梁の状況を，写真-7，写真-8に示す．本写真より，RC梁には，曲げの影響とみられるひび割れが見られる．このひび割れは鋼製補強部材の端部に多く発生している．また，PC鋼棒周辺のグラウトが粉体化している状況がわかる．なお，PC鋼棒には大きな変形は見られていない．

6. 有限要素法による解析との比較

本供試体の挙動を再現するため，3次元の有限要素解析（FEM）を行った．解析では，有限要素法の汎用ソフトDIANA®を用いて実験供試体と同等のモデルを作成し，非線形解析を行った．モデル化にあたっては，RC梁内部鉄筋をバー要素，鋼板をシェル要素，コンクリート

表-4 解析に用いた材料定数

	降伏強度 kN/mm ²	引張強度 kN/mm ²	圧縮強度 kN/mm ²	ヤング率 kN/mm ²	ポアソン比	非線形
コンクリート (グラウト)	-	2.3	31.7	23.2	0.224	引張軟化曲線
鉄筋	381	548	-	185	0.3	バイリニア
鋼板	251	413	-	199	0.3	バイリニア
PC鋼棒	1151	1264	-	180	0.3	バイリニア

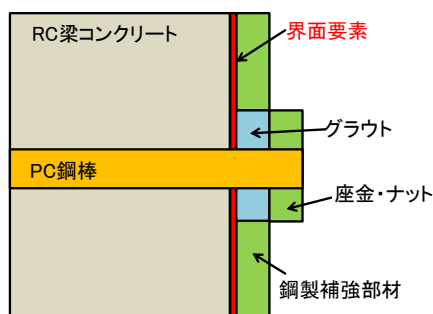
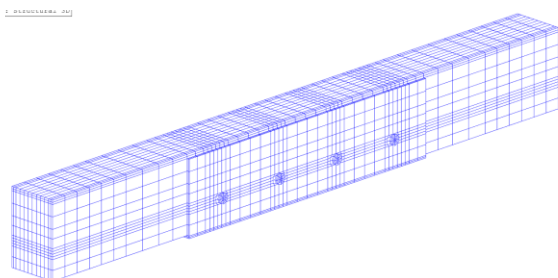
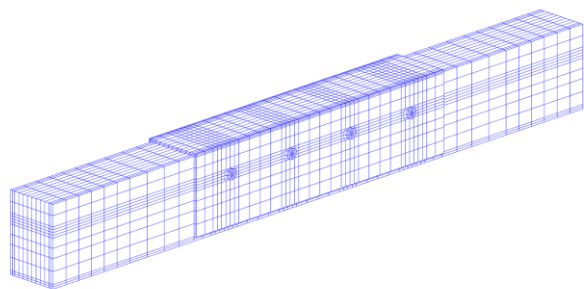


図-10 接合部のモデル化概要



(a) 正曲げ供試体のメッシュ図



(b) 負曲げ供試体のメッシュ図

図-11 有限要素解析におけるメッシュ図の概要

梁とPC鋼棒、接合部グラウト・座金・ナットをソリッド要素を用いてモデル化し、コンクリート梁と鋼板の付着を界面要素で近似した。なお、コンクリートの要素には、ひび割れを再現する非線形の構成則を設定している。また、接合部のモデル化にあたっては、図-10に示す通りとした。ここで座金とナットは、簡略化のため、一体のものとしてモデル化している。解析に用いた材料定数を表-4に、解析のメッシュ分割図を図-11に示す。本計算では、グラウトの材料定数はコンクリートと同じもの

として計算を行っている。また、本解析では、補強後の正曲げ・負曲げ供試体に加えて、補強前のRC梁のみの状態についても解析を実施した。

解析結果のうち、桁中央の荷重－変位関係を図-7に示す。図-7(a)では、鉄筋の降伏するまでの範囲では、試験結果とFEMの結果はよく一致している。鉄筋の降伏した以降は、FEMの結果の方がやや高い荷重を示しているものの、ほぼ試験結果と解析結果は同等な傾向を示している。また、FEMの結果うち、補強前のRC梁のみをモデル化した結果は、補強後の結果の2/3程度の最大荷重となっており、鋼製補強部材が最大荷重時にも十分機能していることがわかる。

図-7(b)では、ひび割れ発生後から鉄筋降伏までの間で、試験結果の方がFEMの結果よりも高い剛性を示している。また、最大荷重についても、試験結果の方がFEMの結果よりも高い値となっており、正曲げの試験結果とは異なる傾向を示している。FEMの結果うち、補強前のRC梁のみをモデル化した結果は、補強後の結果の1/2程度の最大荷重となっており、鋼製補強部材が最大荷重時にも十分機能していることがわかるとともに、FEMの結果においても負曲げ試験結果の方が正曲げ試験結果よりも最大荷重が大きくなることがわかる。

今回のFEMの結果は、荷重－変位関係についてはほぼ再現できることがわかったが、接合部の詳細なモデル化には、今後も改良の余地があると言える。

7. まとめ

本検討では、既設のRC高架橋の梁に着目し、既設RC梁に対して十分に施工可能な、鋼製補強部材とアンカー鉄筋を使用した補修・補強方法を提案した。検討結果より以下の結論を得た。

- (1) 提案した補修・補強方法は、グラウトの種類と鋼製補強部材と既設RC梁との離隔を適切に設定することにより、空隙を生じることなく施工できることを施工試験により確認した。
- (2) 鋼製補強部材を取り付けたRC梁の載荷試験の結果、最大荷重は大きく増加する結果となった。しかし、この最大荷重は、鋼製補強部材を鉄筋として換算して算出したRC梁の終局荷重よりは小さな値となっており、終局時までを想定しただれ止めとしてのアンカー鉄筋（PC鋼棒）の配置量にはさらに検討が必要である。
- (3) 載荷試験の結果、鋼製補強部材とRC梁は初期の荷重のうちに完全合成を保てなくなる傾向となってお

り、完全合成を保つという点では、アンカー鉄筋（P C 鋼棒）の配置量は不足しているといえる。しかしながら、劣化補修や耐震補強の観点からすると、初期剛性の向上効果よりも最大耐荷力の向上効果の方が有効であると考えられるため、既設のR C 梁の補修・補強としては十分に効果のある工法であることが示された。

- (4) 本補強工法による最大荷重の増大効果は、汎用ソフトを用いた詳細な有限要素法による解析により再現することが可能であるが、接合部のモデル化にあたっては、検討の余地が残されている。

参考文献

- 1) 吉野伸一：ラーメン高架橋の設計, 鉄道土木, Vol.28, pp.51-56, 1986.10.
- 2) 吉田幸司, 長縄卓夫, 丹間泰郎, 鍛冶秀樹, 長澤保紀：耐震補強を行った実物R C ラーメン高架橋の載荷実験（その1）～実高架橋の交番載荷実験による耐震補強性能評価, 土木学会第 55 回年次学術講演会, 2000.9.
- 3) 白井貴之, 岡本大, 黒岩俊之, 笠倉亮太：超高強度繊維補強コンクリートを用いたスラブの補強工法の検討, 土木学会第 67 回年次学術講演会, 2012.9.
- 4) 飯塚貴洋, 横山知昭, 西岡英俊, 谷口望：鋼矢板を用いたフーチングと鋼管杭の合理的な接合方法の検討, 土木学会第 67 回年次学術講演会, 2012.9.
- 5) 上村寿志, 齊藤雅充, 谷口望, 北川淳一, 西村昌宏, 依田照彦, 桜井淳：複合構造物を活用した既設鉄道R C 高架橋のリニューアル手法に関する基礎的研究, 構造工学論文集, Vol.159A, 土木学会, 2013.4.
- 6) JIP テクノサイエンス：DIANA9 ユーザーマニュアル日本語参考資料, 2005.9.

STUDY ON THE RENEWAL METHOD OF EXISTING R C BEAMS WITH THE HELP OF HYBRID STRUCTURES

Nozomu TANIGUCHI, Masamichi SAITO, Hisashi UEMURA, Junichi KITAGAWA, Jun SAKURAI and Teruhiko YODA

Some of existing railway RC viaducts has insufficient seismic performance, and the spaces under them are limited. In this study, loading tests of the connection between the additional steel jacket and the existing beam were carried out in order to clarify the seismic performance and workability. As a result, it was clarified that the connection has enough seismic performance under the condition that the mortar is appropriately filled between the steel jacket and the existing beam. Appropriate mortar liquidity and filling space were also confirmed in the tests.