

論文 ポリマーセメントモルタルを活用した既設鋼製柱の補修補強に関する研究

谷口 望^{*1}・林 偉偉^{*2}・佐竹 紳也^{*3}・久保 武明^{*4}

要旨：土木構造物における鋼製柱は、古くから用いられている構造であり、都市内で多く建設されてきた。これらの構造物は、耐震補強や腐食損傷対策が必要になるケースが近年見られるようになってきている。そこで、既設の鋼製柱に対する新しい補修補強方法として、ゴムラテックスモルタル（SBR 混入ポリマーセメントモルタル）を活用した複合構造化による対策法を提案する。本対策法の効果を確認する目的で鋼製柱を模擬した模型載荷試験を行い補強前後での剛性向上効果を確認した。併せて非線形性を考慮した有限要素解析と比較することで、試験の妥当性を検証するとともに、補強による耐荷性向上効果を確認した。

キーワード：ポリマーセメントモルタル、鋼製柱、腐食損傷、補修補強

1. はじめに

近年、土木構造物に対する補修補強が多く行われている。本対策は、耐震性向上、延命化対策（腐食・き裂）、環境対策（騒音振動低減）など様々な目的で使用されている。鋼構造で製作された構造物では、古くから供用されているものが多く、耐震性（耐荷性）が劣る場合や、維持管理上問題となっているものも多い。さらには、狭隘な状況に置かれ、形状が複雑な構造であることも多い。著者らは、このような既設鋼構造物に対して、コンクリート系の比較的新しい材料として、ゴムラテックスモルタル（SBR 混入ポリマーセメントモルタル：PCM）を用いた複合構造化による補修補強方法を提案してきた^{1), 2)}。提案する対策方法は、狭隘かつ複雑な形状の場合の鋼構造物にも対応できる補修補強手法であるとともに、供用中の構造物にも適用可能であることが最大の特徴となっている。本対策手法は、剛性向上手法や騒音振動低減手法として従来から試験的な検討が行われてきており、実構造物への適用³⁾もすでに行われている。これら従来からの検討では、疲労損傷への予防保全対策や、騒音振動低減を目的とした弾性範囲内の剛性向上であった。しかし、これらの検討の過程で、PCM と鋼材の付着力は、鋼材が降伏した状態においても良好な結果を示しており、耐荷性の向上に対しても十分な効果が期待できる結果となっていた²⁾。

一方、土木構造物の維持管理では、鋼材とコンクリートとの境界部における腐食損傷が問題となっている⁴⁾。この腐食損傷は、トラス橋の床版埋め込み部に発生した事例が有名であり、鋼製柱の基部においても発生することが知られている⁴⁾。本事象より、鋼材に対して安易に

コンクリート部材を設置することは避ける必要があると言えるが、ここに PCM を使用した本複合構造化手法を提案できると考えた。つまり、鋼材およびコンクリート双方に強力な付着力を発揮できる PCM を、その接触面に用いることにより、鋼構造物の複合構造化による長期耐久性の改善が可能であると考えられる。

本研究では、従来からの複合構造化手法を、鋼構造物の耐荷性向上にも適用することを提案し、これを実証することを目的としている。耐荷性を向上する必要がある構造物の代表例として鋼製柱に着目することとし、鋼製柱を想定した単柱模型の水平載荷試験を実施した。本載荷試験は、複合構造化前後で載荷試験を実施している。また、試験供試体の中には、鋼製柱基部に腐食損傷が発生したものを模擬した供試体を製作し、この腐食損傷に対する補修効果も確認することとした。

それぞれの試験結果は、材料非線形性を考慮した有限要素解析と比較し、試験の妥当性を検証するとともに、耐荷性向上効果の確認や、鋼材と PCM の付着モデルに関する検討を行った。

2. 複合構造化手法

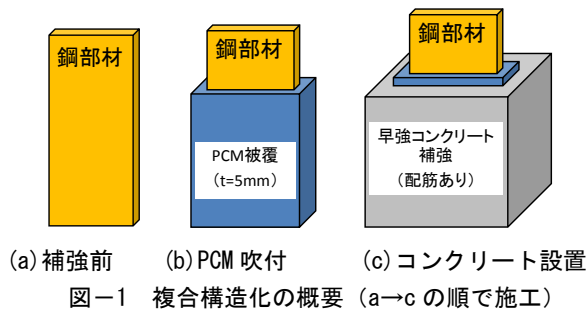
今回提案する鋼部材への補強方法は、コンクリートを使用する手法である。一般に、鋼材に通常のコンクリートを取り付けた場合、その界面の付着力は小さく、合成しない。そこで、本手法では、鋼材およびコンクリート材双方に強い付着力を有する PCM を活用する（図-1）。なお、PCM に発生する付着力は、主に鋼（コンクリート）と PCM の分子間力によって結合されているものと想定している。また、複合構造化の施工上の特徴としては、

*1 前橋工科大学 社会環境工学科 准教授 博士（工学）（正会員）

*2 早稲田大学 理工学術院 国際教育センター 准教授 博士（工学）

*3 太平洋マテリアル 開発研究所 混和材料グループ（正会員）

*4 トーニチコンサルタント 本社事業本部 鉄道本部



既設鋼部材に対して削孔や溶接などの改造を行っていないことである。

PCMは、モルタルにゴムラテックス混和剤を混入させたものであり、鋼材・コンクリート双方への付着性能は、一般に材令7日付着引張付着強度で1.0MPa程度（一般コンクリートの5倍程度）であり、耐塩化物性能、耐衝撃性能にも優れていることが実証されている⁵⁾。既存の適用事例としては、道路橋の鋼床版の疲労対策として、鋼床版の上に打設する構造などが提案されている。本複合構造化においては、この高い付着性能から、鋼部材の防食だけでなく、コンクリート部材との一体化を促進することも可能であると考えた。なお、PCMのヤング係数は、一般に 2.00×10^4 MPa程度である。PCM被覆厚は、施工性及び、耐塩化物性能から算定される通常のコンクリートの設計かぶりと同様な耐久性から5mm厚を目標として設置することとした。

早強コンクリートは、補強材として設けるものであり、コンクリート中にはひび割れ防止対策としての配筋を設けることとする。今回の試験においては、早強コンクリートを用いているが、供用下の施工条件で時間的な制約を受ける場合は、速硬コンクリート^{1),3)}を使用することも想定している。

3. 載荷試験

3.1 供試体および複合構造化概要

本研究では、鋼製柱を模擬した、H形鋼柱の水平載荷を行うものとした。使用するH形鋼はH-194×150×6×9 (SS400, 降伏応力309MPa)とし、せん断スパンは1220mm, 基部鋼板 (SS400, 降伏応力280MPa)は30mmとした (図-2)。鋼製柱では、設計上基部に大きなモーメントが生じることが知られており、また、基部に腐食欠損が生じ、耐荷力の低下が生じるケースがある。そこで、本試験では、柱基部に対して曲げ補強を行うことを想定した。供試体の種類は、H鋼基部を全周すみ肉溶接した供試体について強軸・弱軸両方向載荷用の2体を用意した。さらに、基部に腐食損傷が生じたことを想定し、強軸供試体におけるH鋼基部のフランジを3mmカットし、ウェブのみ溶接したものを製作した (図-2 (d))。

表-1 供試体の種類

供試体No.	供試体名称	載荷方向	柱基部固定方法
A	強軸	強軸方向	全周すみ肉溶接
B	弱軸	弱軸方向	全周すみ肉溶接
C	腐食	強軸方向	フランジをカットし、ウェブのみ両すみ肉溶接

表-2 PCMの配合

W/C(%)	P/C(%)	S/C	ゴムラテコーティングパウダー	ゴムラテ混和液
26.6	17.7	1.75	25kg	4.0kg

表-3 早強コンクリートの配合

W/C(%)	s/a(%)	単用量(kg/m ³)					
		水	早強セメント	細骨材	粗骨材	No.70	303A
50.0	46.4	182	364	781	932	364	328

表-4 PCMおよび早強コンクリートの圧縮強度 (MPa)

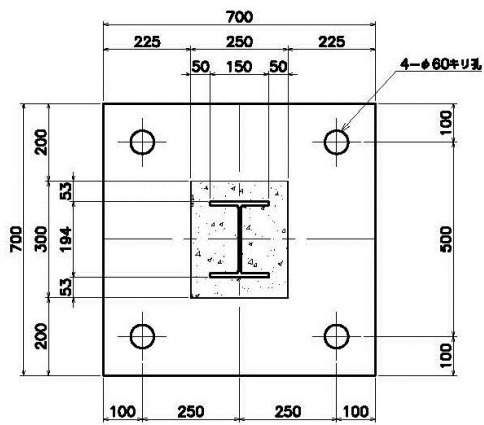
PCM		早強コンクリート	
7日	載荷日(14日)	7日	載荷日(11日)
40.1	42.2	36.2	39.3

腐食を想定した供試体は、実際に生じると考えられる腐食形状とは異なるが、基部の接合部が大きく欠損している事例として想定した。また、実際の柱ではここまでの損傷が生じた場合は別の手法での補修が行われるはずであるが、本研究では修復度合を把握する目的で本供試体を設定した。これら3種類の供試体を表-1にまとめる。

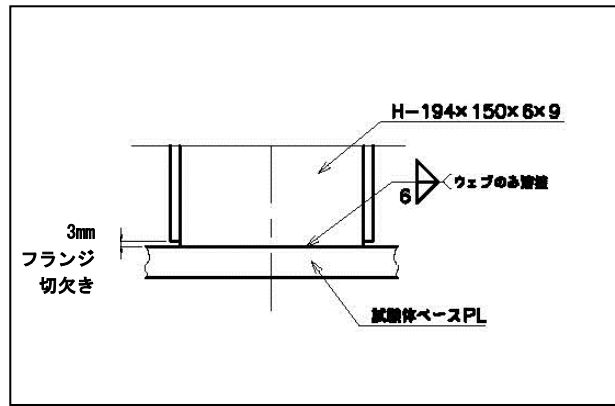
複合構造化の施工では、図-1に示す手順に準じるが、PCM吹付前には、さびを除去する目的でディスクグラインダーでのさび落としを行っている。複合構造化を行う範囲は、柱下端から300mmの区間とした。本施工の様子を写真-1に示す。また、使用したPCM, 早強コンクリートの材料諸元を、表-2~表-4に示す。なお、帯筋はD6鉄筋 (SD295)を用い、50mmピッチの4本をかぶり24~27mmとなるように配置した (写真-1)。

3.2 載荷試験

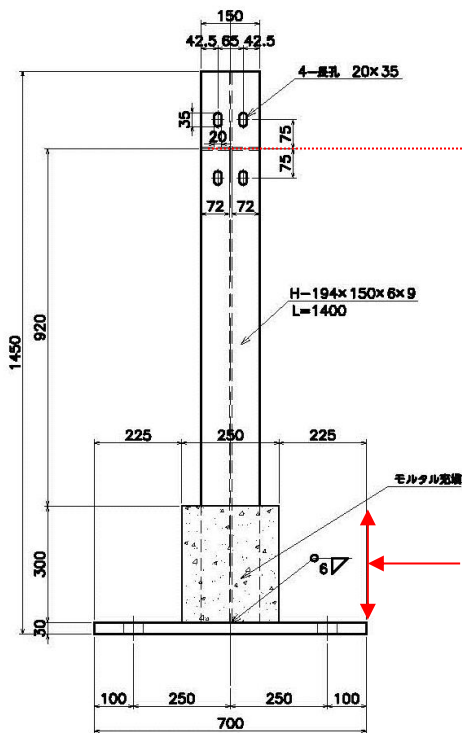
載荷にあたっては、複合構造化前後での剛性の変化を確認するため、複合構造化前についても弾性範囲内 (基部フランジのひずみが 960μ 以下)で複合構造化後と同様な載荷試験を実施している。また、載荷試験にあたっては、複合構造化前は正負で載荷するものとし、複合構造化後は、複合構造化前で行った同等な変位量で正負載荷した後、正側 (ジャッキ引側を正とする)に終局まで載荷を行った (写真-2)。ここでの終局は、荷重がこれ以上大幅に増加しない状況を判断している。供試体の計測では、載荷点の水平変位を変位計で計測したほか、柱下端から30mmのH鋼断面において、ひずみゲージを設置した。



(a) 上面図

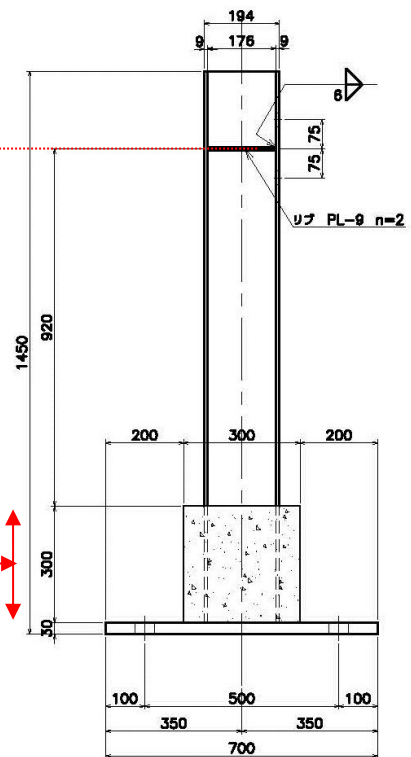


(d) 供試体 C (腐食) 基部詳細



(b) 強軸方向側面図

載荷位置



(c) 弱軸方向側面図

図-2 供試体概要 ((a)~(c)は供試体 A (強軸), 供試体サイズは供試体 B, C も共通) 単位 mm



(a) PCM 吹付施工状況



(b) PCM 硬化後・配筋設置

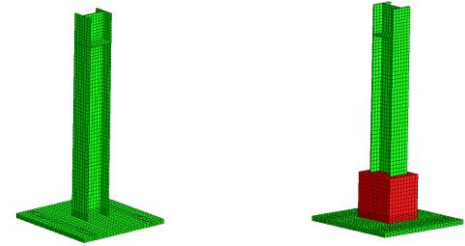


(c) 早強コンクリート打込・硬化後

写真-1 複合構造化施工状況 (各供試体共通)



写真-2 載荷試験状況 (各供試体共通)



(a) 複合構造化前 (b) 複合構造化後
図-3 FEM解析モデルの概要

4. 有限要素解析方法

本載荷試験を精密に再現するために、3次元有限要素解析(以降FEMとする)により解析を実施する。解析では、FEM汎用ソフトDIANA⁶⁾を用いるものとした。解析モデルは、鋼柱はシェル要素、コンクリート部材はソリッド要素、鉄筋はbar要素でモデル化した(図-3)。鋼材の構成側では、H鋼基部付近に、底板と同等な降伏強度280MPaを用いた鋼合成標準示方書モデル⁷⁾とした。ここでH鋼の降伏強度を使用しなかった理由としては、載荷試験ではより降伏強度の低い基部の降伏で決定すること、H鋼部の降伏挙動の再現においては、溶接の残留応力の影響を考慮するために、1割の降伏強度低減⁸⁾を行うことによりこの残留応力を表現することとした。

早強コンクリートの非線形構成側は、圧縮強度39.3MPa、引張強度2.24MPa、ヤング係数 2.80×10^4 MPaとしたコンクリート標準示方書モデル⁹⁾を使用している。本構造へのコンクリート標準示方書モデルの適用に関しては、従来の複合構造化に関する研究²⁾でも妥当性を確認している。なお、PCMは、界面要素モデルで表現するため、PCM自体のモデル化はコンクリートに含まれるものとして省略している。

鋼材表面と早強コンクリート表面の界面要素のモデル化では、鋼表面とPCMの付着強度試験結果より、せん断付着強度2.4MPaとするずれ構成則モデル(図-4)²⁾とした。引張に関しては、引張付着強度1.0MPaで剥離するモデルとしている。また、底板鋼材と固定面の境界条件は、固定PC鋼棒部を全固定とし、底板下面にはせん断付着強度0MPa、付着強度0MPaとする界面要素を設置した。なお、コンクリート中の配筋については、解析結果に大きな影響を及ぼさないが、完全弾塑性、降伏応力295MPaとしてモデル化した。

5. 載荷試験結果および解析結果

載荷試験結果および解析結果を図-5～図-7に示す。各図においては、試験結果を「試験」として実線で、FEMによる解析結果を「FEM」として点線で示している。また、複合構造化前・後を「前」・「後」として表示し、載

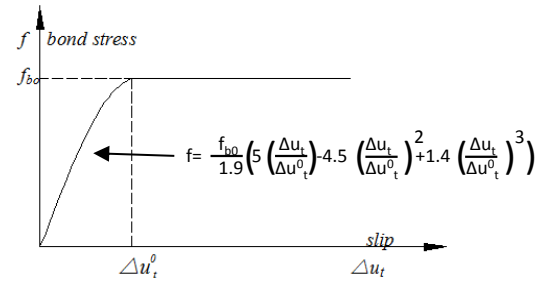


図-4 界面要素モデルの概要 (せん断) ²⁾

荷点の水平変位を「D1」とした。なお、図-5～図-7では、荷重-変位関係が途中で途切れているが、終局後、試験機ストローク限界で載荷を終了したため、その範囲までは示さないこととしたが、十分な範囲まで載荷しても試験場急激な耐力低下は生じない結果となっている。

図-5は、A体(強軸)に関する図である。図-5では、複合構造化により、初期剛性が増加していることがわかる。しかし、試験結果と解析結果の剛性比較では、試験結果は解析結果よりも低い値となっている。これは、供試体の固定条件が、試験と解析で多少異なっている可能性がある。また、終局時まででは、複合構造化により剛性と同時に最大耐力も増加していることがわかり、鋼材降伏後も複合構造化の効果は消滅しないことが示されている。試験結果と解析結果の比較では、最大耐力については解析結果の方が大きくなっている。この差の理由としては、鋼とPCM、およびPCMとコンクリートの付着界面モデル化手法に原因がある可能性がある。

図-6は、B体(弱軸)に関する図である。初期剛性では、B体においても複合構造化により剛性が向上していることがわかる。また、試験結果と解析結果との比較では、A体の結果と異なり、両者がよく一致していることがわかる。本試験では、A体、B体の両載荷試験は同等な境界条件で行われており、A体、B体の試験結果で差が生じる原因は不明である。鋼材降伏後の終局時まででは、B体においても最大耐力は複合構造化により増加していることが示されている。試験結果と解析結果と比較では、A体と同様、解析結果が最大耐力をやや大きく算出する傾向となった。この原因についても鋼と

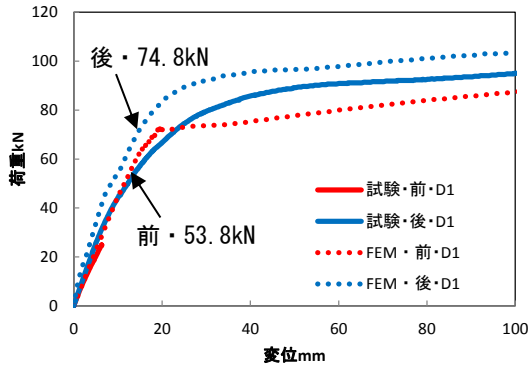


図-5 A体の試験結果および解析結果

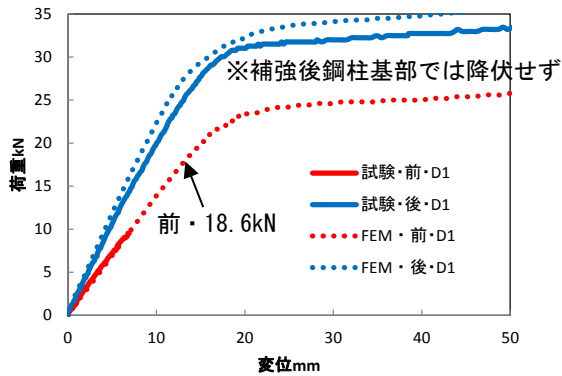
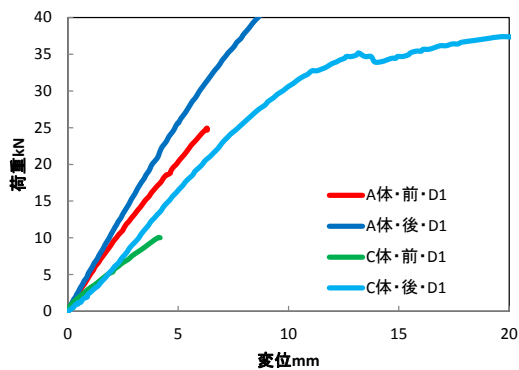
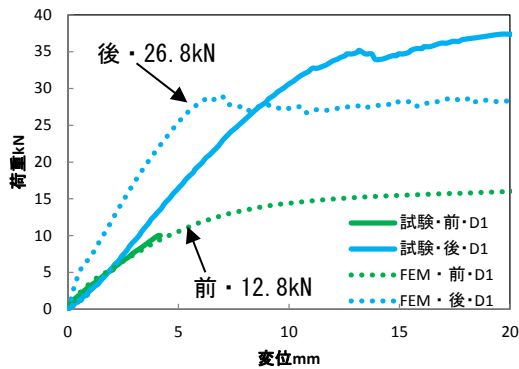


図-6 B体の試験結果および解析結果



(a) A体 (強軸), C体 (腐食) の荷重-変位図



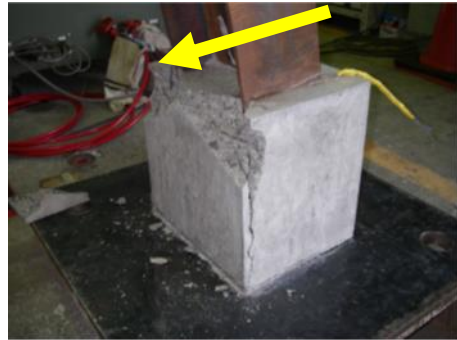
(b) C体 (腐食) の荷重-変位図

図-7 C体の試験結果および解析結果

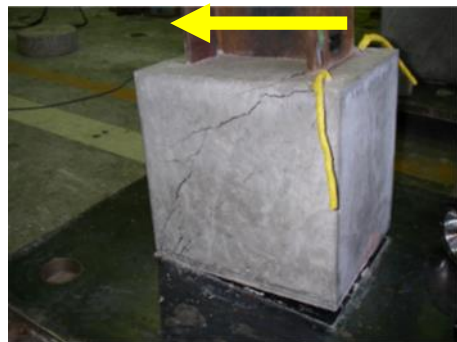
(値は解析で鋼柱基部に降伏が発生した荷重を示す)



(a) A体 (強軸)



(b) B体 (弱軸)



(c) C体 (腐食)

写真-3 終局時の複合構造化部 (矢印は載荷方向)

PCM, および PCM とコンクリートの付着界面モデル化手法に原因がある可能性がある。

図-7 は, C 体 (腐食) に関する図である。C 体は腐食欠損がない状態とすると, A 体 (強軸) と同等な断面となるため, A 体との試験結果の比較を図-7(a)に示す。C 体の複合構造化前後では, 剛性が向上していることがわかるものの, 複合構造化後の剛性は, A 体の複合構造化前よりも低い剛性となっている。C 体の複合構造化後の荷重-変位曲線は, 0~5kN 付近で複合構造化前と同等な値となっているが, 5kN を越えた付近から剛性が増加し, その剛性は A 体の複合構造化前の値とほぼ一致している。図-7(b)は C 体の試験結果と解析結果の比較である。本結果を見ると, 複合構造化後の試験結果と解析結果の差は, 原点付近から 5kN 付近までで大きくなっている。この差異の原因は明確ではないものの, C 体におい

ては基部フランジ切欠部に 3mm の隙間が設けられているが、この部分の PCM 充填が十分でなく、十分な付着性能を発揮しなかった可能性がある。なお、解析モデルでは、この部分についても PCM が充填され、付着モデルも他の部位と同等としている。一方、最大耐荷力については、試験結果の方が大きくなる結果となっており、A 体の結果とは逆の傾向を示している。

写真-3 は、各供試体の終局時の複合構造化部分の写真である。A 体は底板部付近の変形・傾きが大きくなっており、柱部の付着切れはほとんど生じていない。B 体では、A 体とは大きく傾向は異なっており、底板部の変形は少ないものの、複合構造化したコンクリート上部での破壊が大きくなっている。また、本供試体の終局時の載荷状況は、写真-2 に示されているが、この写真と合わせても、補強コンクリートのない H 鋼断面部に変形と降伏が集中していることがわかる。C 体の写真では、A 体と同様な破壊形態となっていることがわかる。

6. まとめ

本研究では、鋼製柱に対して、溶接や削孔を行うことなく、PCM を用いた複合構造化による補強方法を提案した。本検討より以下の結論を得た。

- (1) 本複合構造化は、初期剛性向上と最大耐荷力向上に対して効果があることが試験的に示された。したがって、本補強方法は、鋼製柱の補修補強方法として有益であると考えられる。
- (2) 鋼製柱基部に生じる腐食欠損を想定した供試体において、本補強方法を適用することにより、剛性回復と最大耐荷力の回復が可能である。しかし、本試験の補強事例では、腐食欠損前の状態までには回復しなかったため、補強設計手法を明確にしたうえで再度検討する必要がある。
- (3) 載荷試験結果より、補強効果は補強前の部材剛性と補強コンクリートの剛性の比率により、破壊部位が変化する。複合構造化補強の内部で終局が生じる場合、底板部に破壊挙動が集中する。
- (4) PCM を用いた複合構造化の効果は、付着強度を設定した界面要素を用いた FEM 解析である程度再現可能であり、補強設計手法への活用が期待される。しかし、耐荷力算定や腐食欠損部位のある場合の解析では、試験結果と差異が出る部分もあり、さらなる検討が必要である。
- (5) 本複合構造化における PCM の効果は、最大耐荷力よりも初期剛性に対して大きいことがわかった。本結果は、近年課題となっている鋼材とコンクリートの境界部に生じる腐食欠損に対して有益であると

考えられ、補強による耐久性向上にも効果がある。本試験では、鋼製柱に本来作用する軸力を省略している。軸力のない本試験の解析結果からは、この局部座屈は生じない結果となった。今回提案した複合構造化は、局部座屈の発生を抑制する効果も大きいと考えられ、つまり、このような場合には、本複合構造化はさらなる大きな耐荷力向上効果を生む可能性があると言え、この点に関しても検討が必要であると考えられる。

謝辞

本研究は、日本鉄鋼連盟、鋼構造研究・教育助成事業・研究分野指定助成(代表:谷口望)により実施しました。また本研究試験にあたり、日鉄住金環境(株)担当者の多大な協力を得ました。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 谷口望, 半坂征則, 小出宜央, 大垣賀津雄, 大久保藤和, 佐伯俊之: 施工性を考慮した鋼鉄道橋の複合構造化に関する研究, 構造工学論文集, Vol. 57A, pp. 1052-1059, 2011.4
- 2) Weiwei Lin, Teruhiko Yoda, Nozomu Taniguchi, Shinya Satake, Hideyuki Kasano: Preventive Maintenance on Welded Connection Joints in Aged Steel Railway Bridges, Journal of Constructional Steel Research, Vol. 92, pp.46- 54, 2014.1
- 3) 谷口望, 大久保藤和, 佐竹 紳也, 杉野雄亮, 松浦史朗, 半坂征則: 既設鋼橋の複合構造化によるリニューアル工法の施工と実証試験, 土木学会論文集・A1・複合構造特集号 p.II_40-II_52, 2014.5
- 4) 複合構造委員会, 防水・排水技術研究小委員会: 複合構造物を対象とした防水・排水技術の現状, 複合構造レポート 07, 土木学会, 2013.7
- 5) 浜中昭徳, 長塩靖祐, 中島裕: 速硬性混和材および軽量骨材を用いたコンクリートの基礎性状, 土木学会平成 22 年度全国大会, 土木学会, V-710, pp. 1419-1420, 2010.9
- 6) IP 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
- 7) 鋼構造委員会, 鋼・合成構造標準示方書小委員会: 2007 年制定 鋼・合成構造標準示方書 総則編・構造計画編・設計編, 土木学会, 2007.3
- 8) 国土交通省監修, 鉄道総合技術研究所編: 鉄道構造物等設計標準・同解説, 鋼・合成構造物, 丸善, 2009.9
- 9) コンクリート委員会, コンクリート標準示方書改訂小委員会: 2012 年制定 コンクリート標準示方書 [設計編], 土木学会, 2013.3