

# 既設高架橋接合部に着目した CFT 柱によるリニューアル技術

齊藤 雅充\* 上村 寿志\*\* 池田 学\*  
杉本 一朗\*\*\* 谷口 望# 依田 照彦##

Performance Improvement Technology of Existing Railway Viaducts  
Using Concrete-Filled Tubular Columns

Masamichi SAITO Hisashi UEMURA Manabu IKEDA  
Ichiro SUGIMOTO Nozomu TANIGUCHI Teruhiko YODA

Existing railway RC viaducts have such problems as material deterioration and seismic performance. Furthermore, there is a large demand for utilization of the space under the viaducts. In this study, the authors proposed an improvement method of various performances such as durability, seismic performance and space utilization, by means of replacing multiple existing columns with a concrete-filled tubular (CFT) column. Through trial design using frame analysis, the applicability of the proposed method was discussed. By loading tests of the connection between the CFT column and the existing RC beam, the structural performance of the connection was obtained. Based on these results, it was clarified that the seismic performance of the viaduct can be improved simultaneously with widening the space under the viaduct.

キーワード：既設 RC 高架橋，柱移設，空間創造，コンクリート充填鋼管部材，柱 - 梁接合部

## 1. はじめに

鉄道構造物の標準的な構造として鉄筋コンクリート (RC) 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。これらの高架橋においては、材料劣化に対する補修や耐久性確保、柱の耐震性能の確保などの取組みがこれまでなされてきた。最近では、構造物の各部位を補修・補強することによる総合的な性能向上策<sup>1)</sup>や、大規模地震を想定したさらなる耐震補強<sup>2)</sup>などの取組みが行われているほか、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おり、駅改良に伴う空間確保のために高架柱を移設する事例<sup>3)</sup>なども見られ、既設高架橋を大規模に補修、補強、改造する技術に対するニーズが高まっている。この際、都市部の高架橋改修工事では、狭隘な場所での施工や、列車を通しながらの施工または列車運行の無い時間帯での夜間短時間施工が可能な工法の適用が重要である。

\* 構造物技術研究部 鋼・複合構造研究室

\*\* 構造物技術研究部 鋼・複合構造研究室  
(現 九州旅客鉄道株式会社)

\*\*\* 構造物技術研究部

# 構造物技術研究部 鋼・複合構造研究室  
(現 前橋工科大学)

## 早稲田大学 創造理工学部 社会環境工学科

鉄道総研では、図1に示すように、スラブの補修・補強や柱の補強<sup>4)</sup>、梁の補強<sup>5)</sup>といった要素技術を組合せて、高架橋全体における複数の性能を向上させる「大規模リニューアル技術」の開発を進めている。本研究は、これらの要素技術のひとつとして、駅部高架橋を想定し、柱の移設による高架下の空間創造および耐震補強に関する技術の開発を目的とする。

柱移設の際の新設柱には、コンクリート充填鋼管 (CFT) 柱を用いることを考えている。CFT 部材は、比較的小さな断面で大きな耐力を得られることから、部材の寸法を抑えたまま、複数の既設 RC 柱を1本の CFT 柱に置換えることによる高架下空間の創造や高架橋の耐震補強の効果が得られることが期待される。また、CFT 柱は施工性が高いことから、近接施工や狭隘箇所における施工にも有利である。一方、柱を移設した場合の構造

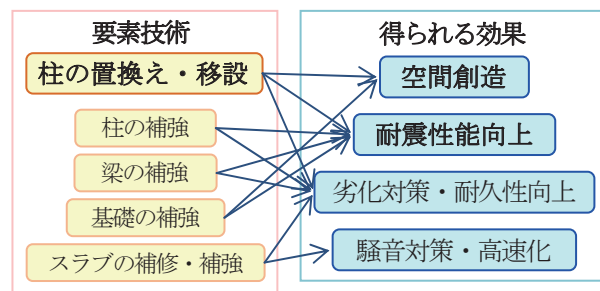


図1 大規模リニューアル技術の概念

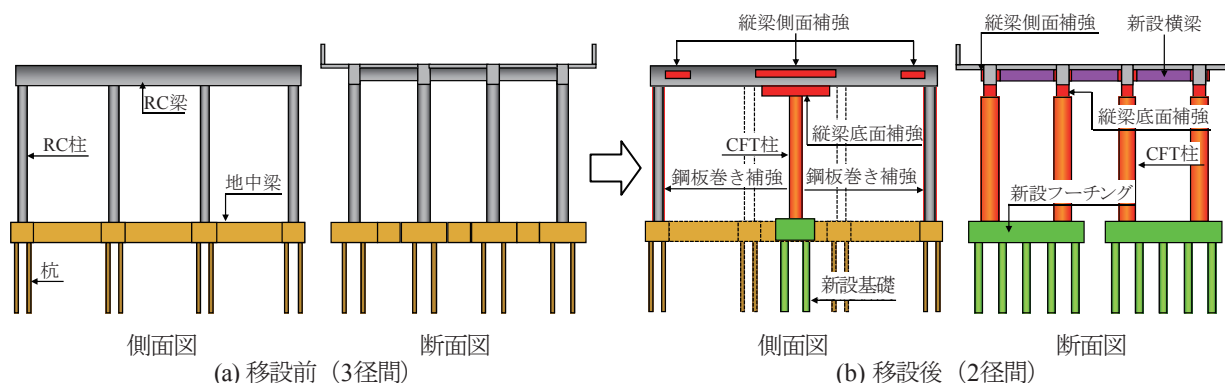


図2 高架柱の移設の例（全体図）

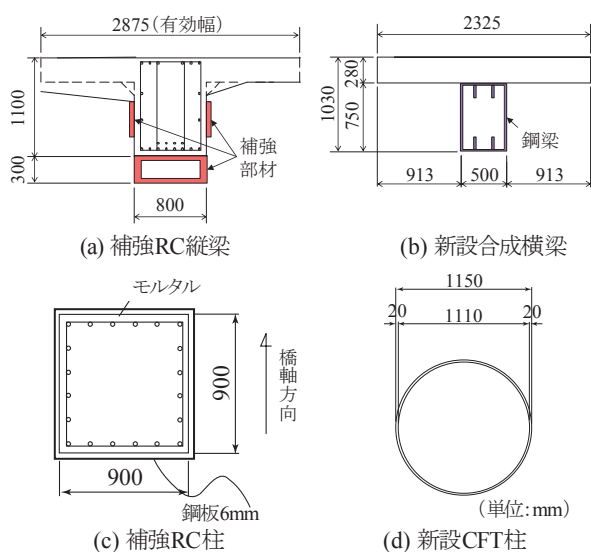


図3 試設計における各部材の仮定断面

系の性能や、既設部材との取合い部の構造および施工性に関しては不明な点が多い。

本手法を実構造に適用可能な形で提案するため、標準的な諸元を有する高架橋を対象に、試設計により柱移設した構造系の成立性を検討した。さらに、構造上および施工上の重要箇所となる新設 CFT 柱と既設 RC 梁の接合部（以下、柱 - 梁接合部）について、供用中でも施工可能な構造を提案した。この柱 - 梁接合部について、載荷試験により耐荷機構および耐力を明らかにし、接合部の耐力算定方法を提案した。さらに、柱 - 梁接合部の荷重 - 変位関係を反映した構造系の骨組解析により、提案構造の実構造への適用性を検討した。

## 2. リニューアル方法の検討

### 2.1 柱移設の全体概要

駅部の高架橋において空間創造のニーズが高いと考えられるため、標準的な駅部高架橋として、図2に示す4柱×4柱式の高架橋をモデルとし、中間柱を撤去して新設 CFT 柱を設置する方法を検討することとした。

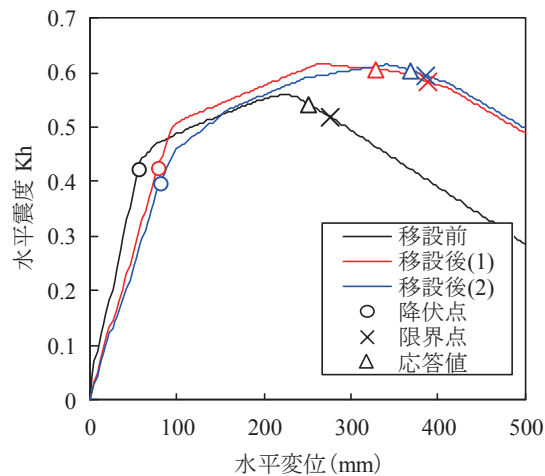


図4 荷重 - 変位関係（線路方向端部）

新設柱は、既設中間柱のあいだに、既設縦梁に取付く形で設置する。比較的小さな断面でも大きな耐力を有する CFT 柱を用いることで、全体系の耐震性能を低下させないまま柱本数を減少させられることが期待される。このとき、新設柱下部には新たな基礎も構築する。

柱の移設に伴い、支間の変化による常時や地震時の断面力の増加が見込まれるため、縦梁の曲げ耐力を向上する補強を施すこととする。

端部に残る既設 RC 柱には鋼板巻立て補強を行う。既設基礎については、柱移設後の構造系において必要となる場合、増し杭補強<sup>6)</sup>などの補強を施すこととするが、ここでは省略する。

### 2.2 骨組解析による構造成立性の検討

柱移設時の構造成立性を検討するため、柱移設前後の構造系における骨組解析を行った。対象構造は図2と同様の高架橋とし、上層梁および柱は図3のように補強および新設すると仮定した。解析は、線路方向または線路直角方向のプッシュオーバー解析を行い、非線形応答スペクトル法により地震時の応答値を算定した。柱新設部の柱 - 梁接合部については、本解析では剛体として仮定した。地震動には、L2 地震動スペクトル II (G4 地盤)<sup>7)</sup>

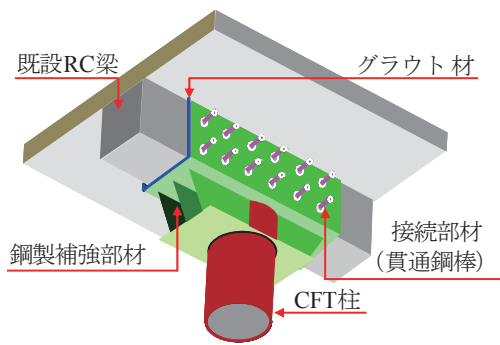


図5 柱-梁接合部の構造

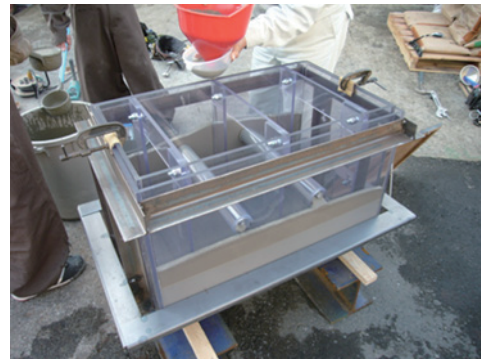


図6 充填施工試験の状況

を用いた。ここでは、線路方向の結果について示す。

プッシュオーバー解析より得られた高架橋の荷重-変位関係を図4に示す。図中の「降伏点」は、いずれかの柱が最初に降伏変位に至った時点である。「応答値」は、非線形スペクトル法より得られた最大応答変位である。「限界点」は、いずれかの柱が最初に損傷レベル3の限界値に達した時点である。なお、移設前では端部のRC柱が、移設後ではCFT柱が、それぞれ先行して限界値に達するという解析結果となった。「移設前」と「移設後(1)」では、各部材において応答変位が限界点以内となっているため、いずれにおいても損傷レベル3以内に抑えられることがわかった。なお、「移設後(2)」は、接合部の変形を考慮したモデルであり、詳しくは後述する。

以上より、移設後の高架橋においても、構造系が成立しうることを確認した。以降は、構造上および施工上の課題となる柱-梁接合部について検討する。

### 3. 施工性を考慮した柱-梁接合部の構造の提案

#### 3.1 柱-梁接合部の提案

新設CFT柱の設置箇所においては、既設RC梁と新設CFT柱を一体化し、柱と梁の間で円滑に断面力を伝達する必要がある。また、既設の上層梁においても、CFT柱の取付く位置付近が地震時に最も断面力が大きくなる箇所であるため、同時に補強する必要がある。

2章における検討では、図3(a)の縦梁の底面補強部位に直接CFT柱が取付くイメージであった。しかし、既設RC梁の下面は、軸方向鉄筋が密に配置されているため、下面からの削孔によるずれ止め設置は困難と考えられる。既設RC梁は必ずスラブを有しているため、鋼板巻立て補強のように部材を取り囲む方法も難しい。

以上の制約の中で既設RC梁と一体化を図るため、本研究では図5に示す柱-梁接合部の構造を提案した。図3(a)で示した底面補強および側面補強に用いる鋼板をひとつのU字型の鋼製補強部材とし、既設RC梁の側面より削孔して鋼棒を貫通させ、すき間にグラウト材を充填させることにより、既設RC梁と新設部材の一体化

を図る。この方法であれば、鉄筋が密な下面からの削孔を避けることができ、より施工性が高いと考えられる。

なお、地震時にはCFT柱の両端部で塑性化させ、柱-梁接合部では塑性化させないことを基本と考える。

#### 3.2 グラウト充填の施工性確認

柱-梁接合部を実際に施工するには、既設RC梁への孔あけ、鋼製補強部材の据え付け後に、グラウト材を充填する必要がある。接合部での円滑な断面力の伝達のためには、グラウト材がRC梁と鋼製補強部材の隙間およびRC梁内部の貫通孔に確実に充填される必要がある。ここでは、グラウト材の充填に着目し、施工試験を行った。試験体は、図6に示すように、RC梁と鋼製補強部材を塩化ビニルで模擬し、隙間からグラウト材を自然流下させることで行った。試験の詳細については、文献8)に示す。

グラウト材の流動性およびRC梁と鋼製補強部材の隙間をパラメータとした施工試験の結果、グラウト材には通常の流動性を有するものを用い、RC梁と鋼製補強部材の隙間は20mm程度とすることで、内部に未充填箇所を残さない施工が可能であることがわかった。

### 4. 柱-梁接合部の性能の把握

#### 4.1 载荷試験の概要

提案した柱-梁接合部の耐荷機構を確認し、耐力算定方法を提案するため、载荷試験を実施した。本報告では、橋軸方向の载荷試験について示す。橋軸直角方向の载荷試験については文献9)に示す。

試験体は、図7に示すように、RC梁にCFT柱が取付いた構造となっており、試験の制約上、実構造と上下逆転した形となっている。試験体の寸法は、実物の1/2～1/3程度にスケールダウンしたものとした。RC梁と鋼製部材は4本の貫通鋼棒および隙間に充填されたグラウト材によって接続されている。この部位における貫通鋼棒の接合方法について図8(a)に示す方法を考案した。図中①に示すように、鋼製補強部材からは、鋼材に取り付けた鋼製キャップを介して、貫通鋼棒に力が伝達され

特集：構造物技術

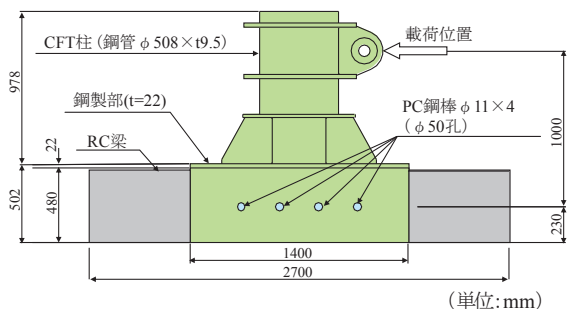


図7 柱-梁接合部の荷重試験体

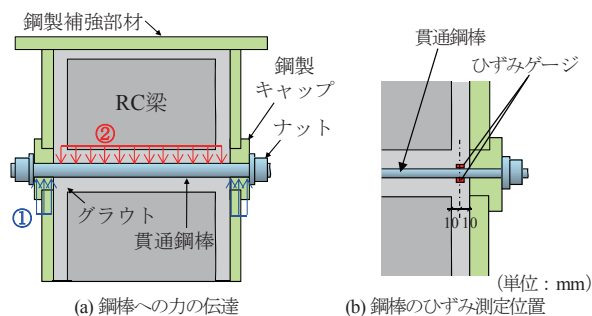


図8 鋼棒の接続方法

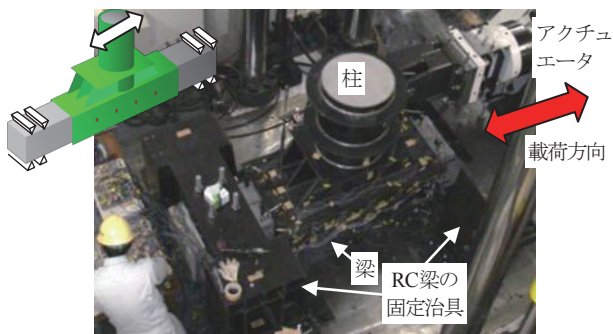


図9 柱-梁接合部の荷重状況

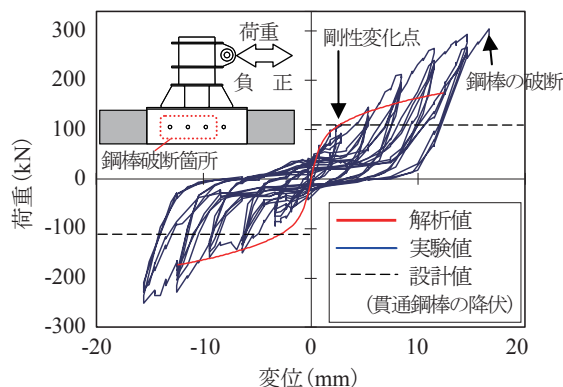


図10 荷重-変位関係

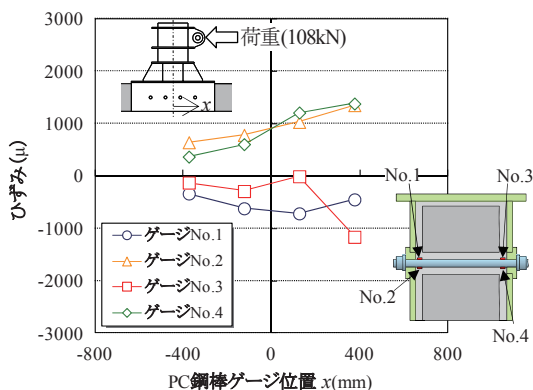


図11 各鋼棒上下面のひずみ

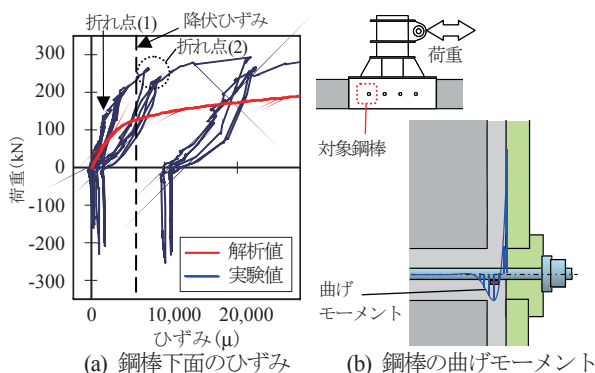


図12 荷重-鋼棒ひずみ関係

る。図中②に示すように、RC梁からは、グラウト材を介して、貫通鋼棒に力が伝達される。鋼棒には、曲げが発生すると考え、鋼棒の上下面でひずみを測定した。なお、貫通鋼棒には高強度のPC鋼棒を用いているが、鋼棒にプレストレスは導入していない。

荷重状況を図9に示す。荷重は、アクチュエーターにより変位制御で行い、PC鋼棒の降伏により剛性変化する変位を $\delta_y$ として、 $0.5\delta_y$ 、 $1\delta_y$ 、 $2\delta_y$ …と変位振幅を漸増させ、各変位において3回ずつ繰返し正負交番荷重を行った。

4.2 荷重試験結果

4.2.1 荷重-変位関係と損傷状況

荷重試験結果として、荷重点における荷重-変位関係を図10に示す。変位3mmの時点で、荷重-変位関係の傾きに変化があったため、ここを $\delta_y$ とした。 $2\delta_y$ 荷重時には引張側のグラウト材のはがれ、および圧縮側グラウト材が潰れて押し出されていることを確認した。 $6\delta_y$ 載

荷時に、図10中に示す3本のPC鋼棒接続部の計6か所が同時に破断し、荷重を終了した。なお、図10の解析値(赤線)については後述する。

降伏荷重以降は、ただちに耐力が失われることなく、より大きな荷重および変位を示して破断に至った。このため、想定を超える断面力に対してもただちにこの部位の破壊には至らないと考えられる。

4.2.2 貫通鋼棒のひずみ

各鋼棒の位置と鋼棒ひずみの関係を図11に示す。鋼棒の上下面で正負のひずみが生じており、鋼棒が曲げを受けていることが確認できる。また、図中右側端部の鋼棒ほどひずみが大きくなっている。これは、鋼製補強部材の左側端部付近が回転中心となって、回転中心から遠い鋼棒ほど大きな力を負担していることによる。

接合部の端部に位置する鋼棒下面のひずみ履歴を図12(a)に示す。 $1\delta_y \sim 2\delta_y$ の付近で折れ点(1)が見られ、

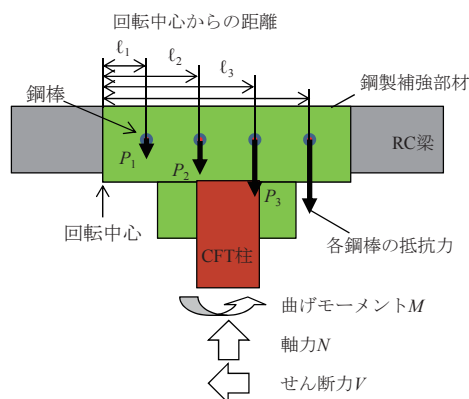


図13 接合部の設計の考え方

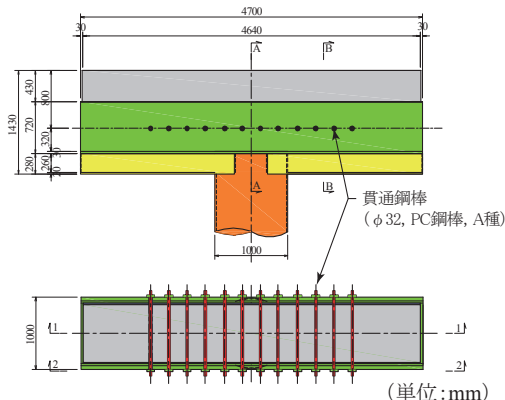


図15 実構造における柱-梁接合部の構造

さらに、降伏ひずみ到達後に折れ点(2)が見られ、その後のひずみの増加が顕著となった。図12(b)に示すように、鋼棒端部のキャップ取付け位置では、ひずみ測定位置の5~6倍程度の曲げモーメントが発生することが事前の計算より予測された。ひずみ測定結果より類推すると、前述の折れ点(1)付近で、鋼棒端部が降伏ひずみに達していると考えられる。その後、測定位置近傍でも降伏ひずみに達し、折れ点(2)となったと考えられる。なお、鋼棒以外のひずみは非常に小さいものとなっている。以上より、接合部の剛性低下は、鋼棒の降伏によって発生していると考えられる。

#### 4.3 接合部の耐力算定方法の検討

図13に示すように、鋼製補強部材の端部を回転中心として、各鋼棒の抵抗力による偶力によって、接合部に働く曲げモーメントに抵抗すると考えられる。この偶力により鋼棒が降伏するときの曲げモーメントを柱-梁接合部の降伏耐力とし、式(1)により算定することを提案した。

$$M_u = \sum_{i=1}^n P_i \ell_i \quad (1)$$

ここで、

$P_i$ : 曲げモーメントに対する各鋼棒の抵抗力  
( $i = 1, 2, \dots, n$ )

・最外縁の鋼棒の場合、式(2)により算定する。

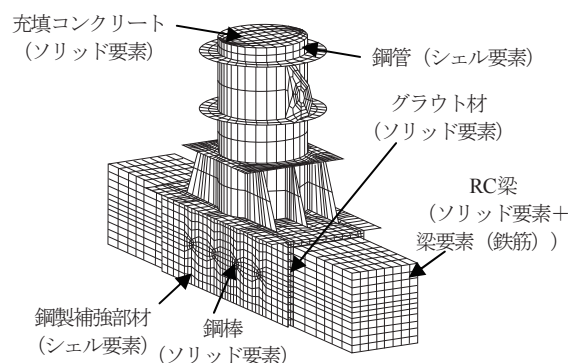


図14 有限要素モデル

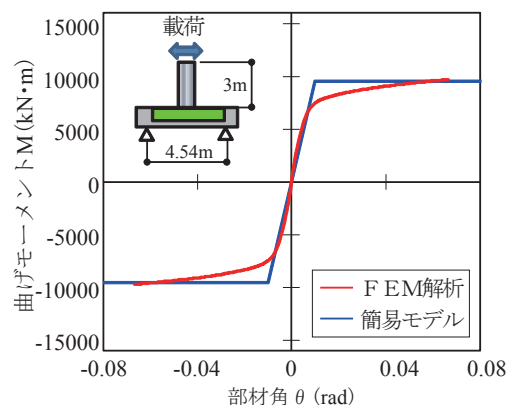


図16 柱-梁接合部の非線形モデル

$$P_n = \sqrt{P_y^2 - P_N^2} - P_N \quad (2)$$

$P_y$ : 鋼棒の降伏時の抵抗力  
(本試験体の場合、37.5kN)

$P_N$ : 軸力  $N$  により鋼棒に働く力

$P_V$ : せん断力  $V$  により鋼棒に働く力

・最外縁以外の鋼棒の場合、式(3)により算定する。

$$P_i = P_n \cdot \ell_i / \ell_n \quad (3)$$

$\ell_i$ : 各鋼棒の回転中心からの距離

この方法によって算定した接合部の耐力算定結果を、図10の破線に示す。算定された耐力は、接合部の剛性低下する荷重を安全側に評価することができ、接合部の設計に十分適用可能であると考えられる。

#### 5. 実構造への適用性の検討

提案した柱-梁接合部が実構造に適用可能であるか確認するため、実構造における柱-梁接合部の応答特性を反映した骨組解析により、全体系の地震時挙動を確認した。ここでは、線路方向の検討について示す。

##### 5.1 有限要素解析による試験結果の再現性の確認

柱-梁接合部の耐力および変形性能を評価しうる解析モデルの構築を目的として、有限要素解析(FEM解析)を行い、4章で示した荷重試験結果と比較した。解析モ

## 特集：構造物技術

デルを図 14 に示す。解析は、有限要素法の汎用ソフト DIANA を用いて、各材料の材料非線形性および鋼製補強部材とグラウト材の接触を考慮して行った。

解析結果を、図 10 および図 12 (a) に、赤線として示す。解析結果は、 $3\delta_y$  程度までは、実験における荷重 - 変位関係をおおむね再現しているといえる。鋼棒のひずみは、実験結果より大きい値となっているが、これは着目点と降伏開始箇所とのずれによるものと推察される。

### 5.2 実物大の柱 - 梁接合部の応答特性の算定

非線形 FEM 解析を用いて、2.2 節の試設計より得られた断面力より、図 15 に示す諸元の柱 - 梁接合部を用いることし、この構造の FEM 解析により、荷重 - 変位関係を算定した。その結果、図 16 の赤線に示すような荷重 - 変位関係が得られた。

### 5.3 骨組解析による挙動把握

2.2 節に用いた構造系の骨組モデルにおいて、柱 - 梁接合部に、5.2 節の FEM 解析より図 16 の青線に示す曲げモーメント - 回転角関係を設定した回転ばね要素を追加して、地震時のプッシュオーバー解析を行った。

解析結果を図 4 の青線「移設後 (2)」に示す。接合部の変形を考慮せず剛体とした場合の「移設後 (1)」と比べて、応答変位が若干大きくなる程度となった。接合部に働く断面力は降伏耐力以内となり、他の部材の損傷レベルにも変化はなかった。

以上より、提案した柱 - 梁接合部は、実構造に対しても十分な適用性を有しており、今回対象とした構造では、柱 - 梁接合部を剛体とみなしても差し支えない程度の構造とすることが可能であることを確認した。

## 6. おわりに

本研究では、既設 RC 高架橋の柱を移設し、CFT 柱に置換えるリニューアル技術を提案し、主として柱 - 梁接合部に着目した検討を行った。

本研究で得られた結論を以下に示す。

- (1) 2次元骨組モデルの簡易解析を用いた試設計により、CFT 柱を用いて高架柱を移設した場合においても、構造系として成立可能であることを示した。
- (2) 高架橋の供用下でも施工可能な構造として、グラウト材および貫通鋼棒を用いた新設 CFT 柱 - 既設 RC 梁接合部の構造を提案し、グラウト充填の施工試験により、モルタルの自然流下による充填が可能であることを確認した。
- (3) 提案した柱 - 梁接合部の載荷実験により、接合部の耐荷機構を明らかにし、貫通鋼棒の降伏に着目した耐力算定法により、接合部の耐力を評価可能である

ことを示した。

- (4) 非線形有限要素解析により、実構造に適用した場合の柱 - 梁接合部の荷重 - 変位関係を算定した。これを反映した骨組解析より、提案した柱 - 梁接合部が実構造に対しても十分な適用性を有していることを確認した。

今後、3次元骨組解析により、柱の移設が梁の断面力に及ぼす影響等を評価し、より大きな断面の CFT 柱を用いて耐震性能を向上させる方法等について検討していく予定である。

## 謝 辞

本研究における実験および解析においてご協力いただいた早稲田大学依田研究室の学生の皆様に感謝の意を表します。

## 文 献

- 1) 関雅樹：東海道新幹線橋梁の大規模改修による予防保全、橋梁と基礎、Vol.48, No.4, pp.13-18, 2014.4
- 2) 小林将志, 高崎秀明, 工藤伸司, 今井勉, 鈴木延彰：JR 東日本における首都直下地震対策、橋梁と基礎、Vol.47, No.8, pp.99-101, 2013.8
- 3) 川人麻紀夫, 久保智彦, 大郷貴之, 関司英明：東北貨物線浦和駅乗降場使用開始に伴う既設高架橋の改良、コンクリート工学、Vol.51, No.11, pp.905-910, 2013.11
- 4) 鉄道総合技術研究所：既存鉄道コンクリート高架橋柱の耐震補強設計指針、研友社、2013.12
- 5) 田所敏弥, 谷村幸裕, 轟俊太朗, 前田友章, 前田欣昌：アーチ型鋼材を用いたラーメン高架橋梁の補強工法の開発、鉄道総研報告、Vol.25, No.2, pp.17-22, 2011
- 6) 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、V-276, 2012.9
- 7) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説（耐震構造）、丸善、1999.10
- 8) 上村寿志, 斉藤雅充, 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 RC 高架橋のリニューアルに関する基礎的研究、構造工学論文集、Vol.59A, pp.908-918, 2013.3
- 9) 上村寿志, 斉藤雅充, 北川淳一, 谷口望, 依田照彦：CFT 柱を用いた既設 RC 高架柱の交換技術における柱 - 梁接合部の実験的検討、第 68 回土木学会年次学術講演会、2013.9
- 10) 谷口望, 斉藤雅充, 上村寿志, 北川淳一, 桜井淳, 依田照彦：複合構造物を活用した既設 RC 高架橋の梁のリニューアル工法に関する研究、第 10 回複合・合成構造の活用に関するシンポジウム、pp.7.1-7.8, 2013.11