

(42) 既設RC高架橋の柱移設に伴う 構造系変化の影響評価

斉藤 雅充¹・山下 健二²・猪股 貴憲³・池田 学³

¹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:saito.masamichi.96@rtri.or.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
(現 JR九州コンサルタンツ株式会社 (〒812-0013 福岡県福岡市博多区博多駅東1-1-14))

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)

鉄道駅の既設高架橋では、高架下空間の有効活用といった機能向上のニーズが高まっている。筆者らは、コンクリート充填鋼管 (CFT) 柱を活用し、既設の高架橋を利用しながら柱を取替え・移設して柱間隔を拡大する工法を提案し、新設CFT柱と既設RC梁の接合法などの要素技術を開発してきた。柱を移設した高架橋では、新設柱と既設柱といった、剛性が大きく異なる柱が混在した構造系となるが、このような構造系の地震時挙動や耐震性能は不明であった。本研究では、地震時を想定した3次元骨組解析を行い、剛性が大きく異なる柱を有する高架橋の地震時挙動および各部材の断面力を把握し、これらに影響する因子について考察した。さらに、2次元骨組解析などを用いて柱移設を簡易に設計する手法について検討した。

Key Words : *existing railway viaduct, relocation of column, concrete filled tubular column, change of structural system, seismic behavior*

1. はじめに

鉄道構造物の標準的な構造として 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。これまで、既設高架橋の劣化対策¹⁾、耐震対策²⁾などの取り組みがなされてきた。一方、近年では、駅内部の再開発など、高架下の空間を様々な施設として有効に活用するニーズが高まっている。しかし、柱の位置によっては、高架下空間の利用が制限されたり、設備の設置が不可能であったりする場合がある。これを解消するには、柱位置や間隔を変更するような改築³⁾が考えられるが、高架橋の柱を取り替えるには、従来工法では大掛かりな工事が必要となっていた。

これに対し筆者らは、コンクリート充填鋼管 (以下、CFT) 柱を用い、大規模な仮設物を必要としない柱の取替え・移設工法を開発、提案してきた⁴⁾。本工法は、様々な条件の柱の取替えや移設に対応可能であるが、既設の柱と柱の間に CFT 柱を設置し、既設柱を撤去することで柱間隔の拡大を図ることも可能である。これにより、高架柱による支障の解消や高架下空間の有効活用が可能になることが見込まれる。

柱間隔を拡大する柱移設工法を可能とするため、これまで新設 CFT 柱と既設梁の接合技術⁴⁾や梁補強⁵⁾、基礎の補強技術⁷⁻⁹⁾を開発してきた。また、2次元静的解析により、柱間隔が拡大される方向に対する柱移設構造系の耐震性能が十分にあることを示した⁵⁾。一方、これに直交する方向については、新設 CFT 柱を有する架構 (フレーム) と、既設 RC 柱を有する架構といった、剛性や耐力・変形性能の大きく異なる複数の架構を有する構造となり、従来の 2次元静的解析を基本とした設計・解析手法のみでは、地震時挙動を適切に把握することができないと考えられる。一方で、柱移設工法を適用するたびに 3次元動的解析などを実施するのは、実務上煩雑であり、3次元的な影響を考慮しながらより簡易な手法で設計できるのが望ましい。

本研究では、柱移設した構造系の、柱移設と直交する方向において、剛性が大きく異なる柱を有する高架橋の地震時挙動を把握することを目的に、3次元骨組解析を用いた時刻歴応答解析を行った。さらに、実務上の簡易性を考え、2次元骨組解析を用いた柱移設の設計手法の適用性を確認した。

2. 柱移設工法の概要とモデルケース

本検討で対象とする柱移設のモデルケースをもとに、これまで開発してきた柱移設工法について概略を示す。

図1(a)に、柱移設した高架橋の全体図を示す。柱の移設方法は様々な形態を取ることができるが、ここでは、柱移設のモデルケースとして、駅部に多く用いられる線路直角方向3径間、線路方向3径間を有する、4柱×4柱式の高架橋に対し、中央にCFT柱の列を新設し、既設の中間RC柱を切断撤去した状況を示している。なお、ここでは、柱移設後の構造の前後・左右対称性を考えて新設柱位置を中央部としている。

新設柱にRC柱を用いた従来の方法では、既設梁の大規模なはつり取りや仮支柱等が必要となり、施工が非常に難しい。そこで、提案技術では、新設柱にCFT柱を用い、図1(b)に示す柱・梁接合部および、必要に応じて図1(c)に示す基礎補強と組み合わせることにより、このような柱移設をより簡易に実施可能としている。

新設CFT柱が既設RC梁に取り付く柱・梁接合部においては、これまで、図1(b)に示す構造を提案してきた。高架橋の供用下での施工を可能にするため、梁に削孔して貫通鋼棒を設置し、U字型の鋼部材で取り囲み、既

設梁との間にグラウト材を注入する構造とした。また、U字型の鋼部材を延長することで、既設梁の補強とすることもできる^⑩。新設柱と既設梁との間で、曲げモーメントを伝達可能であることを載荷試験等によって確認した⁴⁹⁾。

3. 柱・梁接合部の改良と挙動の確認

(1) 構造検討

前述の柱・梁接合部について、線路直角方向の耐震性を考えると、新設柱の位置に新設横梁を設置し、直交方向に断面力を伝達しなければならない。そこで、これまで開発してきた構造を改良して図2に示す構造とした。新設梁は、高架下の天井高さに影響し、梁高を最小限に抑える必要があるため、鉄骨鉄筋コンクリート(SRC)部材とした。新設梁と柱との接合部は、鉄骨を用いた接合とするのを基本とし、断面下側においてはCFT柱に設けた外ダイアフラムと鉄骨下フランジを接合して力を伝達する。断面の上側においては、既設梁が存在し、これを取り囲むU字型断面の鋼製部材と新設梁の鉄骨を接合することとなるが、鉄骨のみでは円滑な力の伝達を期待できない。そこで、既設梁を貫通している鋼棒にて引

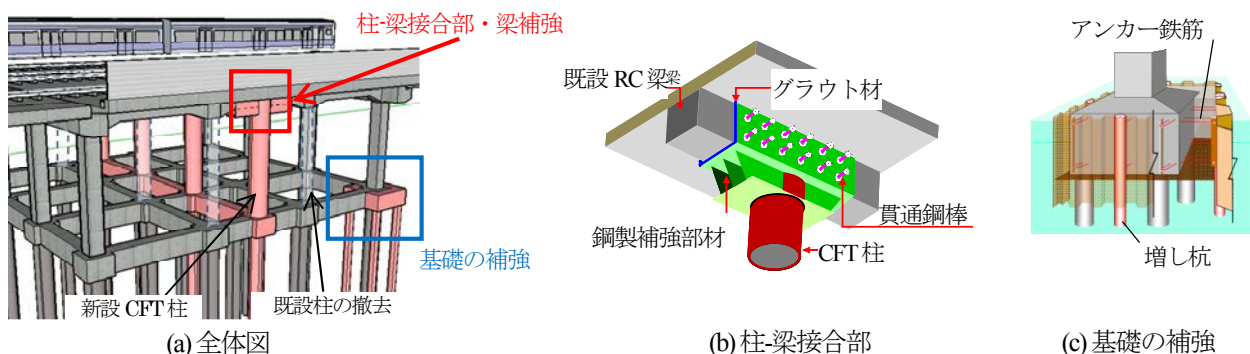


図1 高架橋の柱移設工法の概要

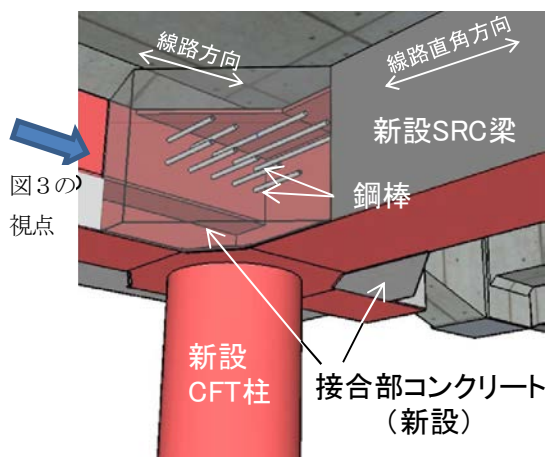


図2 柱・梁接合部の改良構造

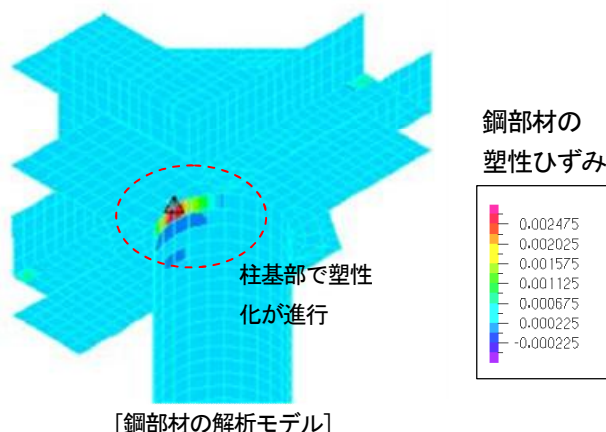


図3 柱・梁接合部の解析モデルと解析結果の例

張力を伝達しうる構造とした。鉄骨の周囲にはコンクリートを打設し、圧縮力の円滑な伝達を図った。このような構造とすることで、横梁の正曲げ、負曲げ両方向の曲げモーメントを伝達することが期待できる。

(2) 3次元有限要素解析による構造成立性の確認

提案した柱・梁接合部は複雑な構造となっているため、接合部の内部において、想定した力の伝達状況となっているか、また接合部が十分な耐力を有しているか、確認する必要があった。このため、柱・梁接合部周辺をモデル化した3次元有限要素解析（FEM解析）を行い、提案した柱・梁接合部の構造成立性を確認した。解析には、汎用有限要素法プログラムADINAを用い、鋼部材をシェル、コンクリート部材をソリッド、鋼棒をトラス要素でモデル化した。既設梁と補強鋼板間は剥離が想定されることから接触要素を設けた。鋼材とコンクリートは材料非線形とし、新設梁に後述の骨組解析より求めた断面力を与えた。

解析結果の例として、新設梁に上側引張の曲げモーメントが作用したときの鋼部材の塑性ひずみを図3に示す。接合部と接するCFT柱が先行して降伏し、接合部内部が降伏していないことを確認した。また、貫通鋼棒や鉄骨に発生する応力が想定範囲内であることも併せて確認した。

4. 骨組解析による地震時挙動の把握

(1) 解析の概要

柱を移設した場合、高架橋の構造系が変化する。これに伴う構造系の成立性については、これまで、2.で示し

たモデルケースにおける線路方向に対して2次元骨組解析により検討を行ってきた⁵⁾。一方、線路直角方向に見ると、新設のCFT柱によって構成される架構と既設のRC柱によって構成される架構の2種類の架構を有する高架橋となっている。これら2種類の架構は剛性や耐力、変形性能が異なるため、通常の耐震設計に用いる2次元静的解析（プッシュ・オーバー解析）による応答値の算定では、各柱部材の応答変位や各架構が分担する水平荷重、梁に発生する断面力等を予測するのが難しい。

このため、本検討では、3次元骨組解析による時刻歴応答解析を行うことで、柱移設した構造系の地震時挙動を把握し、架構どうしの特性の違いによる3次元的な影響を把握することとした。

(2) 対象構造物と解析モデル

対象構造物は、2.において示した駅部で標準的な4柱×4柱式のビームスラブ式RCラーメン高架橋とした。高架橋の規模は、高度経済成長期に最も多く的高架橋が建設されており、その時期の標準的な支間である8m支間の1層ラーメンとした。

この高架橋に、中間柱を移設した場合の柱移設前後を想定して、図4に示す3次元骨組モデルを作成した。新設柱位置のラーメン構造を保つため、同位置には新設の横梁を設置している。また、ここでは線路方向の地中梁はモデル化を省略している。

さらに、3次元的な影響を把握するための比較対象として、各架構を平面モデルで再現した2次元骨組モデルを作成した（図4の「架構C1、C4、C-new」）。

図5に、部材のモデル化について示す。柱部材は、非線形の梁要素としてモデル化した。部材の非線形性に

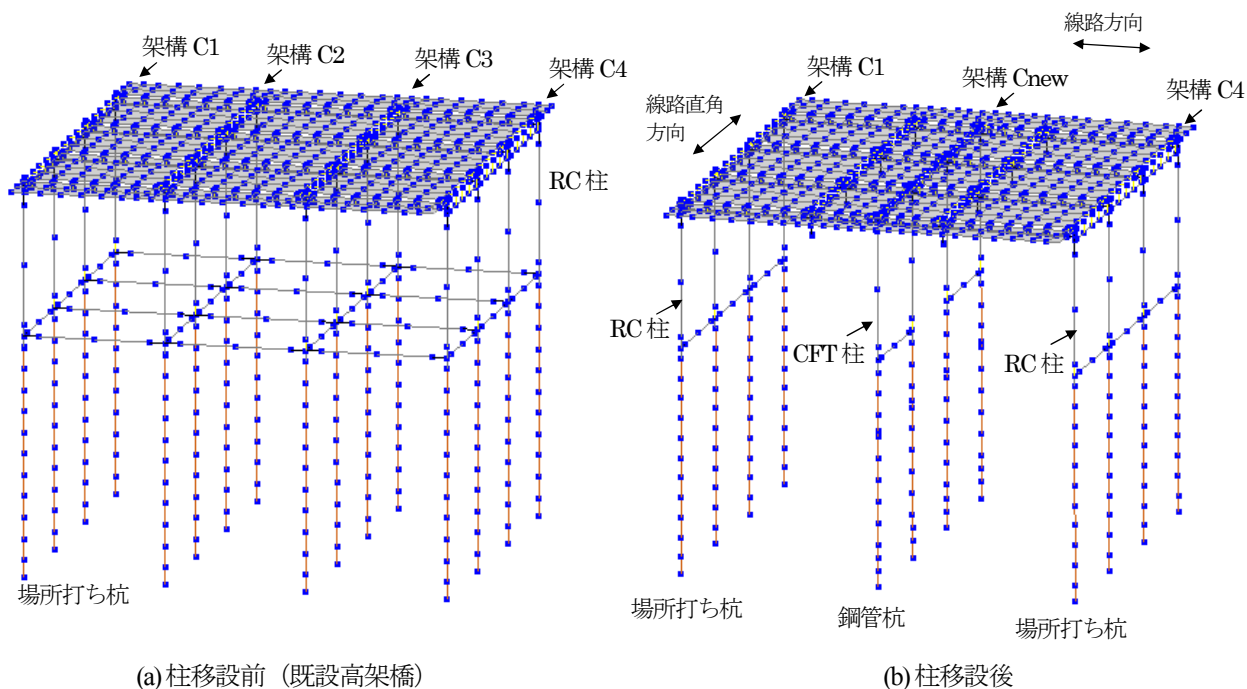
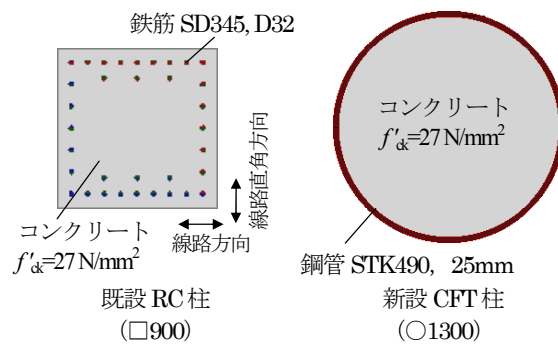
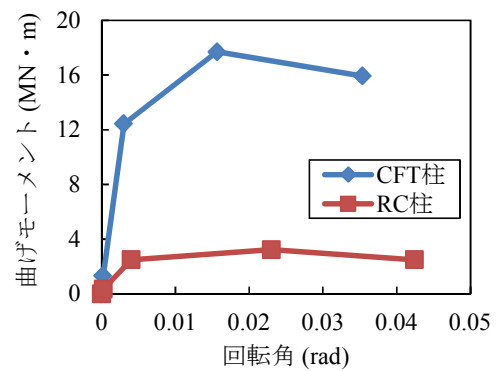


図4 3次元骨組解析モデル



(b) 断面諸元



(c) 部材モデル（骨格曲線）

図5 柱の断面諸元と部材モデル

表1 骨組解析の解析ケース

ケース	構造系	着目方向	解析モデル	解析種別
1	柱移設前 (既設 高架橋)	線路直角	3次元	動的
2				静的
3		線路方向	3次元	動的
4				静的
5	柱移設後	線路直角	3次元	動的
6			3次元	静的
7		線路方向	2次元	静的
8			3次元	動的
9			3次元	静的

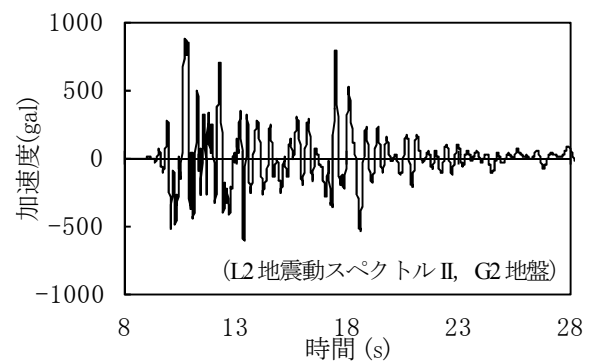


図6 解析に用いた地震動

については、RC柱は「コンクリート標準¹⁰⁾」に、CFT柱は「耐震標準¹¹⁾」に則って算定した。なお、CFT柱の断面は、後述の時刻歴応答解析で照査を満たす断面としている。上層梁、地中梁、杭については、全断面剛性の線形梁要素とした。床版は全断面剛性のシェル要素とした。柱、梁および床版の接合箇所は、剛体要素により相互に接続した。新設CFT柱と既設RC梁の接合部についても、梁に発生する断面力に対して安全側の検討となるよう、剛体要素を用いた。線路方向の地中梁は、地震時に損傷することが予期されるため、モデル化を省略することとした。床版上には、バラスト、軌道、ホーム、列車などの上戴荷重を質点として与えた。

柱、梁のねじりに対しては、部材のねじり剛性の全体挙動への影響が小さいこと、さらに部材にねじりひび割れや曲げ降伏等が発生した時にねじり剛性が低下してそれ以上のねじりモーメントが発生しにくいことを考え、ねじりに対して線形とし、弾性ねじり剛性を与えた。

(3) 解析方法

解析は、柱移設した構造の挙動を詳細に把握するための3次元骨組モデルを用いた時刻歴応答解析（以下、動的解析）、これと動的な影響を比較するための3次元骨組モデルを用いたプッシュ・オーバー解析（以下、静的解析）、各架構の特性の影響を調べるための2次元骨組モデルを用いた静的解析を行った。解析ケースを

表1に示す。

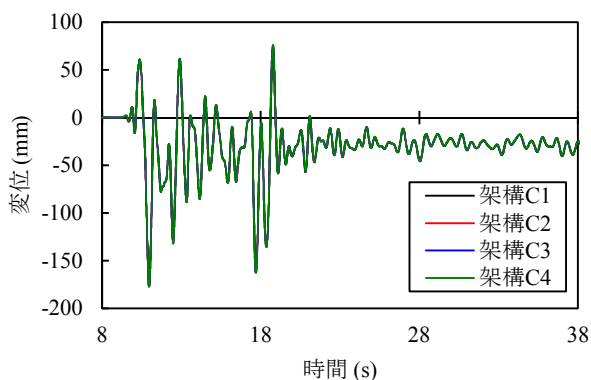
解析に用いたツールとして、3次元骨組解析と2次元骨組の両方を扱うことができ、静的解析と動的解析の両者を行える「鉄道構造物等の3次元耐震性能照査プログラムDARS」を用いて、モデルの構築および解析を行った。

地震動は、鉄道構造物の設計に標準的に用いる時刻歴波形として、図6に示すI2地震動スペクトルII（G2地盤）¹¹⁾を用いた。線路方向に地震波を与えた場合と線路直角方向に地震波を与えた場合において解析を行った。静的解析においては、非線形スペクトル法¹¹⁾によって、同一地震動時における応答変位を算定した。

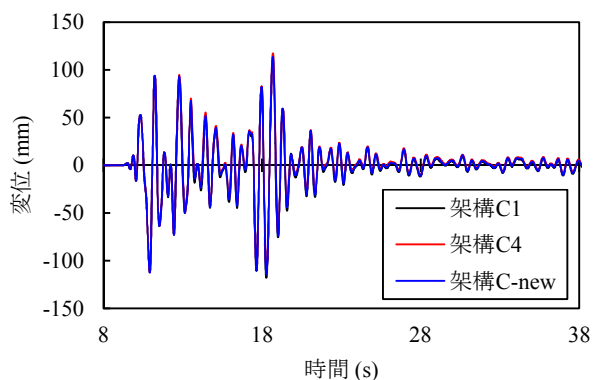
5. 柱移設した構造系の地震時挙動

(1) 線路直角方向の変形挙動

線路直角方向における時刻歴応答解析結果として、図7に、高架橋天端の変位波形を示す。移設前後のいずれにおいても、それぞれの架構で同様な変位波形を示し、隣接する架構どうしの相対変位は最大で8mmに満たない程度であった。これより、対象の高架橋は、梁および床版といった上部工がほぼ剛体のような挙動を示していることがわかる。各架構の柱は、上記の上部工の動きに柱が追随する形で応答していると考えられる。

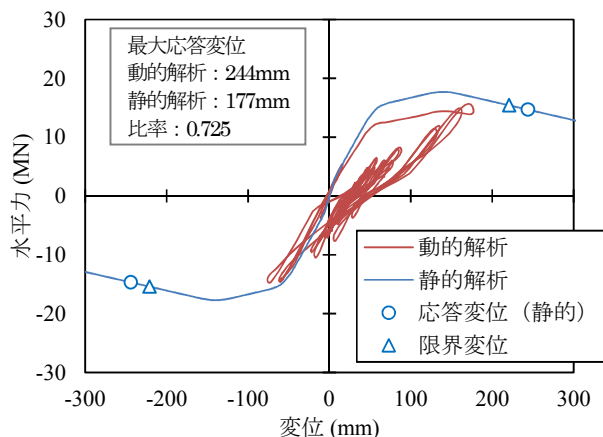


(a) 柱移設前（既設高架橋）

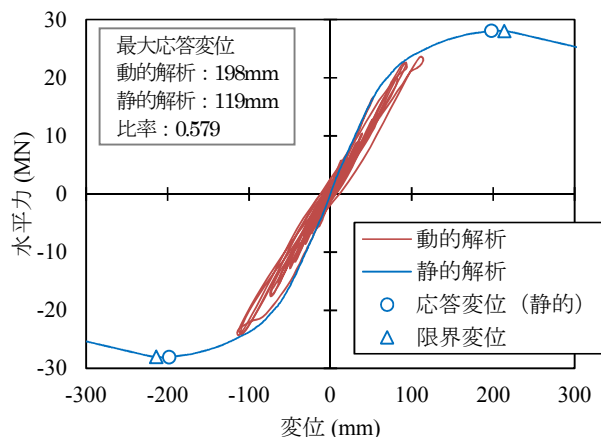


(b) 柱移設後

図7 高架橋天端変位の時刻歴波形（線路直角方向）

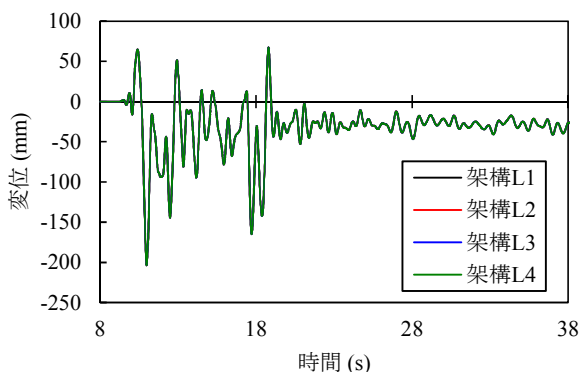


(a) 柱移設前（既設高架橋）

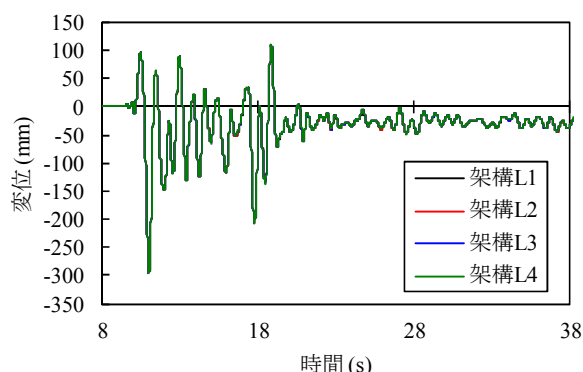


(b) 柱移設後

図8 高架橋天端変位と水平力の関係（線路直角方向）

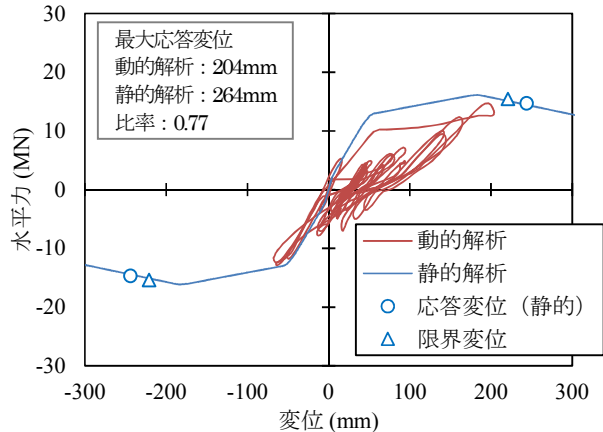


(a) 柱移設前（既設高架橋）

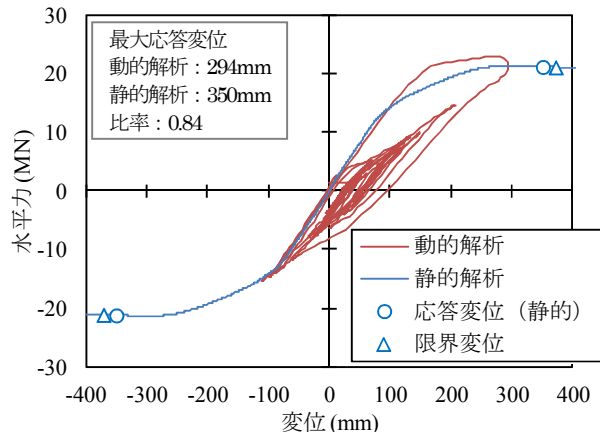


(b) 柱移設後

図9 高架橋天端変位の時刻歴波形（線路方向）



(a) 柱移設前（既設高架橋）



(b) 柱移設後

図10 高架橋天端変位と水平力の関係（線路方向）

高架橋天端変位と水平力の関係を図8に示す。ここの水平力とは、すべての柱の基部に働くせん断力の合計値として算出したものである。比較として、3次元静的解析の結果および非線形スペクトル法による応答変位も併せて示す。動的解析の結果は、静的解析の荷重-変位関係に沿って推移していることがわかる。さらに動的解析による最大変位は、非線形スペクトル法で予想した変位量の6割に満たない値となった。柱移設前の高架橋の同様な解析では、動的解析と静的解析の変位量の比は7割を超えるものとなるため、柱移設後はそれを大きく下回るものとなる。これは、高架橋を構成する各架構の持つ剛性が大きく異なり、それぞれの周期が一致しないために起こる現象と考えられる。

(2) 線路方向の変形挙動

線路方向の解析結果を図9, 10に示す。最大変位量は、柱の移設により増加するが、これは、柱本数の減少と、地中梁の省略によるものである。なお、C方向と比べて、静的解析による応答変位と動的解析による応答変位が近い値を示している。これは、線路方向においては、高架橋を構成する架構がそれぞれ同程度の剛性を有して

いるためであると考えられる。

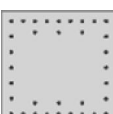
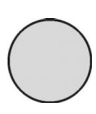
(3) 新設柱の必要断面

新設柱にCFT柱を用いる効果を確認するため、RC柱に置換した場合を比較対象として、上記と同様の解析で照査を満足しうる断面を設定し、比較を行った。その結果、新設柱には表2に示す断面が必要となる。既設の中間柱2本分の占有面積と比較すると、従来のRC柱では占有面積が増加するが、CFT柱を用いることで占有面積も減じることができ、耐震性能を向上するとともに、高架下空間をより有効に活用できると考えられる。

(4) 梁に発生する断面力

新たに設置したCFT柱周辺における既設の縦梁に発生する断面力に着目する。なお、線路直角方向に加振された場合の、縦梁に発生する断面力については、曲げモーメント、せん断力ともに、梁の耐力に対して小さなものとなっているため、ここでは記載を省略する。線路方向に加振された場合の、3次元静的解析と3次元動的解析から得られた鉛直方向曲げによる曲げモーメントを図11に示す。縦梁においては、動的解析が静的解析と比べて最大1.7倍程度、大きな曲げモーメントとなっている。これは、動的な影響として、ひとつの架構の有する柱同士の振動する位相の違いが梁の断面力として現れるためであると考えられる。

表2 新設柱断面の比較

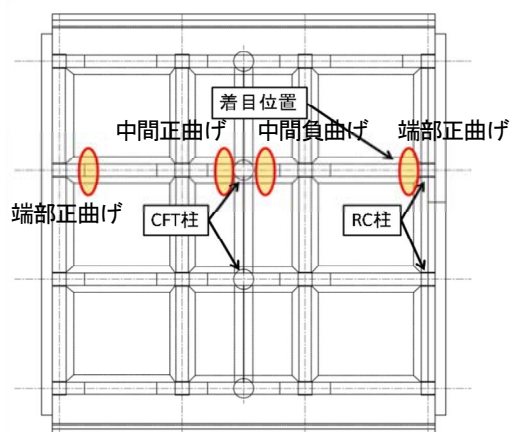
項目	従来技術	提案技術
新設柱の構造	RC	CFT
断面寸法 (既設柱は □0.9m)	□1.75m 	○1.3m 
断面積	3.1m ²	1.3m ²
中間柱による 占有面積 (既設柱 2本分と比較)	90%増	20%減

6. 簡易的な解析手法の適用性

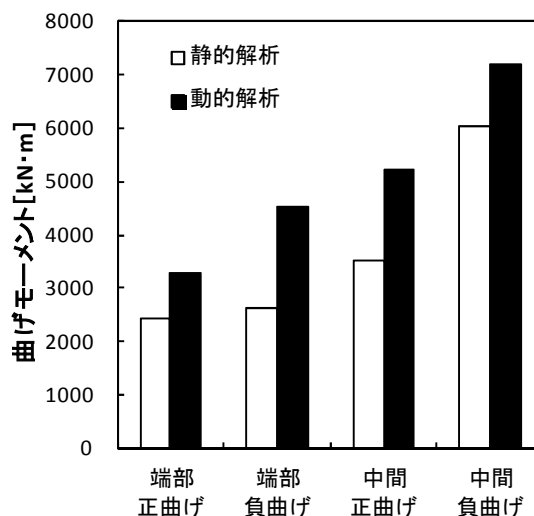
(1) 概要

前章で示されたように、線路直角方向においては、高架橋の架構ごとに振動特性が異なるため、本来であれば地震時の照査には3次元動的解析を行うことが基本であるが、設計業務が煩雑となるのを避けるため、ここでは2次元静的解析を用いて簡易に照査を実施する方法

→ 荷重方向または最大変位方向



(a) 着目位置 (下から見た図)



(b) 解析結果 (曲げモーメント)

図11 縦梁に作用する曲げモーメント

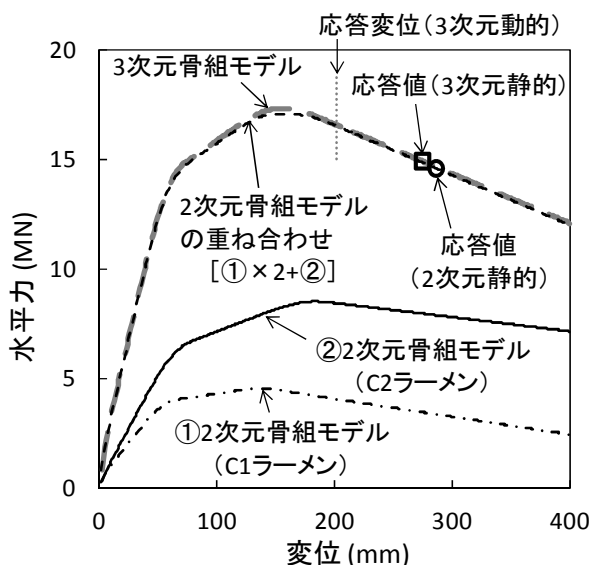


図 12 水平力-変位関係と応答変位

について検討した。

(2) 応答変位の算定

図 12 に、3 次元静的解析および 2 次元静的解析より得られた水平力と変位の関係を示す。2 次元静的解析から地震時の応答を推定する方法として、骨組モデルのふたつの架構の荷重-変位関係から、各変位時の水平力を重ねあわせた結果をグラフに併せて示している。なお、各架構の水平力は、架構を構成する柱に発生するせん断力の和により求めた。

2 次元静的解析から各架構 (C1・C2 ラーメン) の水平力を重ねあわせた結果と 3 次元静的解析の結果はほぼ同じ荷重-変位関係および応答変位を示す。さらに、動的解析による応答変位は静的解析結果を大きく下回る。

以上より、本モデルケースのように、移設した構造が対称構造となるなどの配慮を行った場合には、柱移設した構造系においても、荷重変位関係に対する 3 次元的な影響は小さく、簡易な算定方法として各架構の 2 次元骨組解析結果を重ね合わせることで、柱の照査が簡易に行えると考えられる。

3 次元動的解析より得られた高架橋天端の最大変位量も図 12 に併せて示しているが、前章で示したように、静的解析は動的解析結果より安全側の変位を示す。

以上のことから、少なくとも本モデルケースにおいては、2 次元静的解析を組み合わせた応答変位算定結果は、3 次元動的解析の応答変位を安全側に見積もることができる。

7. まとめ

本研究では、CFT 柱を用いて高架柱を移設した場合を想定した既設 RC 高架橋の 3 次元骨組解析により、地

震時の挙動を把握し、特性の異なる架構を有することの 3 次元的な影響を把握した。さらに、柱移設に対して 2 次元静的解析を用いた簡易な設計方法に就いて検討した。本研究で得られた知見を以下に示す。

- ・ 剛性や耐力の異なる架構を有するラーメン高架橋の時刻歴応答解析では、架構どうしの周期の違いにより、高架橋全体の変形量が、静的解析を用いた非線形スペクトル法による応答変位と比べて大きく低減する傾向にある。一方、柱どうしの周期の違いにより、既設梁に働く断面力は静的解析と比べて増加する。
- ・ 中央径間の既設柱間に CFT 柱を新設し、近傍の柱を撤去する形の柱移設を実施した構造は、新設柱の剛性および耐力を高め、その周囲の梁を補強することによって、高架橋全体の変形量を低減することができる。
- ・ 構造の対称性に配慮して柱位置を定めた今回対象の柱移設方法では、各架構の 2 次元静的解析 (プッシュ・オーバー解析) の結果を組み合わせることで、高架橋の応答変位を安全側に算定することが可能である。

本研究は、2.において示したモデルケースの解析を通して、異種の柱を有する高架橋の地震時応答を確認したものである。今後は、他の柱移設方法等についても知見を深めて行きたいと考えている。

参考文献

- 1) 朝倉俊弘, 佐藤勉: 鉄道コンクリート構造物の変状と補修・補強方法, コンクリート工学, Vol.31, No.7, pp.48-54, 1993.7
- 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, 岡司英明: 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) 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 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
- 5) 齊藤雅充, 上村寿志, 池田学, 杉本一朗, 上村寿志, 谷口望, 依田照彦: 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, 鉄道総研報告, Vol.28, No.8, pp.11-16, 2014.8
- 6) 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, 複合・合成構造物の活用に関するシンポジウム, Vol.10, pp.7-1~8, 2013.11
- 7) 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
- 8) 飯塚貴洋, 松浦光佑, 西岡英俊, 谷口望: 鋼矢板を

- 用いたフーチングと鋼管杭接合部の杭頭せん断力作用時の載荷実験, 土木学会第 68 回年次学術講演会, V-184, 2013.9.
- 9) 松浦光佑, 西岡英俊, 斉藤雅充: シートパイルを用いた増し杭と既設フーチングの一体化工法, 日本鉄道施設協会誌, Vol.53, No.2, 2015.4
- 10) 鉄道総合技術研究所 編: 鉄道構造物等設計標準・同解説 (コンクリート構造), 丸善, 2004.4
- 11) 鉄道総合技術研究所 編: 鉄道構造物等設計標準・同解説 (耐震設計), 丸善, 2012.9
- 12) 田所敏弥, 谷村幸裕, 中田裕喜: ねじりと曲げを受けるラーメン高架橋柱の変形性能と地震被害, 土木学会論文集 E2, Vol.68, No.3, pp.166-177, 2012.

INFLUENCE OF STRUCTURAL CHANGE BY RELOCATION OF COLUMNS ON SEISMIC PERFORMANCE OF EXISTING RC VIADUCTS

Masamichi SAITO, Kenji YAMASHITA,
Takanori INOMATA and Manabu IKEDA

There are high demands on existing railway reinforced-concrete (RC) viaducts to improve not only seismic performance and durability but also utilization of space under the viaducts. Authors have proposed a method of column relocation in which new concrete-filled steel tubular (CFT) columns are installed and existing RC columns are removed. However, the structural system of the viaduct can be changed by the column relocation and has columns with largely different stiffness.

The purpose of this study is to observe the seismic behavior of the column-relocated viaducts, focusing on the effect of having frames with different stiffness, load capacity and deformation capacity. Authors carried out a series of dynamic response analyses and static push-over analyses with 3-dimensional frame model and 2-dimensional frame models. As a result, it was found that the viaduct with different frames shows a small reaction displacement in 3-dimensional dynamic analysis comparing with the result of non-linear spectrum method using static push-over analysis results. This is because of the cancellation of the displacement components in each frame that have different vibration properties. For this reason, it is possible to calculate the response displacement of the column-relocated viaducts in safe side. On the other hand, the section forces, i.e. bending moment and shear force, increases in dynamic state. Based on these results, authors proposed a simple calculation method using 2-dimensional static push-over analyses for the design of column relocation.