

## 論文 嵌合接合部に弾性体を挿入したラーメン構造の変形挙動に関する研究

小林 薫\*1・杉崎 向秀\*2

**要旨**：列車走行時に高架橋柱の振動レベルを低減するため、柱・梁接合部に弾性体を有する構造の検討を行っている。本構造の高架橋には、所要の耐震性能も要求される。本研究は、弾性体を挿入した柱・梁接合部を実際の高架橋に適用した場合の耐震性能に着目して検討を行ったものである。構造解析モデルについては、既往の実験結果から検討を行い、実高架橋を対象とした地震応答解析結果から、通常の剛構造よりも本接合構造を用いた高架橋の方が柱の損傷レベルを低減できる可能性を示した。

**キーワード**：嵌合接合，非線形解析，振動低減構造，地震応答解析

## 1. はじめに

都市部では、高架下を店舗や事務所で用いている場合が多い。このような個所では、列車走行時に伴う高架下の騒音や振動をできるだけ低く抑え、高架下環境を良好な状態にすることが望まれている。

鉄道の高架構造物では、ビームスラブ形式のラーメン高架橋が多く用いられている。ラーメン高架橋は、柱・梁の接合が剛構造となっており、列車走行時の振動はスラブ・梁・柱を伝播することになる。このような振動の伝播が、高架下環境を悪化させる原因となっていた。

そこで、列車走行時の振動が、高架下へ伝播するのをできるだけ低減するため、柱・梁接合部に弾性体を挿入する接合構造<sup>1)</sup>を用いたラーメン高架橋について検討を行った。なお、本ラーメン高架橋には、列車走行時の振動レベル低減効果の確認が必要となる。これに関しては、列車走行時の構造物挙動をシミュレーションで解析から検討を行い、接合部の弾性体によって振動レベルが低減することを確認している。

本ラーメン高架橋には、振動レベルの低減とともに、所要の耐震性能も要求される。地震時の応答性状を把握するためには、適切な構造モデルの構築も必要となる。

本研究は、柱・梁接合部に弾性体を挿入したラーメン高架橋の地震時における基礎的な変形挙動の把握を目的としている。本構造の解析モデルに関しては、既往の実験結果<sup>1) 2)</sup>から検証を行い、このモデルを実構造物レベルまで拡張し、2種類の地震波による地震応答解析から地震時の変形挙動の検討を行った。

## 2. 弾性体を挿入した接合構造の概要

図-1に、柱・梁接合部に弾性体を挿入し、柱を嵌合した接合構造の概要を示す。本接合構造は、梁あるいはフーチングに柱を嵌合させるための箱抜きを施工しておき、その中に柱を所定の長さ嵌め込む嵌合構造となっている。柱上下端部には、列車走行時の振動レベルを低減するための弾性体を配置し、嵌合内での柱側面にも必要に応じて弾性体を配置する。柱側面の弾性体は、列車走行時の振動低減に直接寄与しないが、構造物の耐震性能を考えた場合、柱側面に弾性体を配置しバネ定数を任意に設定することによって、構造物の固有周期を調節することが可能になると考えられる。このことから、本接合構造を用いた高架橋は、地震時の応答制御に関しても可能性があり、本検討では柱側面に弾性体を考慮することを基本とした。

\*1 東日本旅客鉄道（株）研究開発センターフロンティアサービス研究所課 長 博(工) (正会員)

\*2 東日本旅客鉄道（株）研究開発センターフロンティアサービス研究所課 員 (正会員)

### 3. 構造解析モデルの検討概要

#### 3.1 接合部のモデル化の概要

図-2に、本接合部に用いた構造モデルの概要を示す。本モデルは、接合部に柱部材を嵌合し、その周辺に弾性体を表現するバネ要素を取り付けた。バネ要素は、柱軸方向の端部に鉛直バネと回転バネを、嵌合内部の柱側面には水平バネをそれぞれ配置した。

本構造の既往の実験<sup>1)2)</sup>では、弾性体として、市販の橋梁用ゴムシューを用いた。このため、弾性体の挙動を表現するバネ要素の特性については、ゴムシュー用テストピースによる圧縮試験結果から適用する履歴特性を決定することにした。図-3に、弾性体用ゴムシューの圧縮試験結果を、ハードニングを考慮したR-Oモデル<sup>3)</sup>による解析結果と併せて示す。解析結果は、ハードニング現象を概ね捉えていると思われるが、圧縮ひずみが0.08を超える変形領域で除荷時の剛性が実験結果と乖離し、履歴ループの面積で表される履歴吸収エネルギーは解析結果の方が小さく評価されている。この結果は、地震時の応答を考える上で安全側に働くと考え、バネ要素として適当であると判断した。なお、嵌合接合部の弾性体は一軸の圧縮状態でしか応力が作用しない。よって、鉛直、回転、水平の各バネ要素は、図-3に示した解析結果の応力ひずみ曲線に、弾性体の面積と厚さからR-Oモデルの復元力特性を定めた。

#### 3.2 柱試験体の試験結果に基づく検討

##### (1) 柱試験体交番载荷実験の概要<sup>1)</sup>

ここでは、既往の実験結果として参考文献1)に示すNo3試験体とNo5試験体を選定した。参考文献1)で示す試験体の一般形状を参考として図-4に示す。

交番载荷は、嵌合接合構造としたNo3試験体で、初期载荷時の载荷点水平変位が45mm程度(部材角で約1/20)、次に90mm(部材角で約1/10)、135mm(部材角で約1/6.7)、180mm(部材角で約1/5)、225mm(部材角で約1/4)……

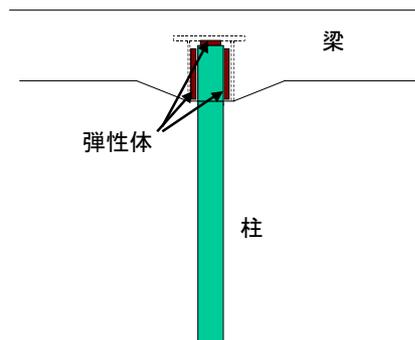


図-1 嵌合接合構造の概要  
(柱上端部での例)

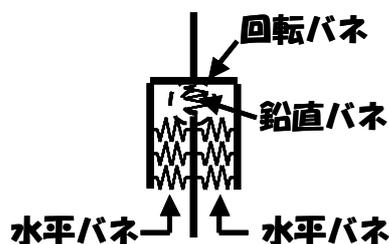


図-2 嵌合接合部の構造モデル概要

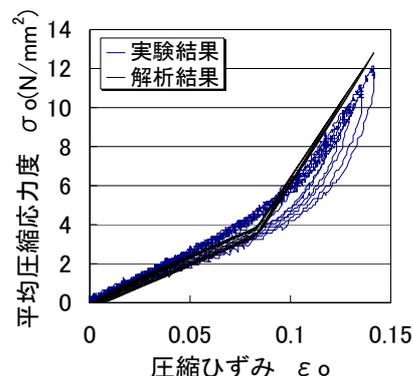


図-3 弾性体圧縮試験の解析結果

の変位ステップで载荷を行った。また、No5試験体は、载荷履歴の影響を確認することを目的に、水平変位を180mm(部材角で1/5)の正負交番载荷後、±135mm(部材角で1/6.7)、±90mm(部材角で1/10)とし、最初に大きな水平変位を与えてから、順次小さな水平変位にして交番载荷を行った。

##### (2) 解析結果の概要

図-5に、柱試験体の解析モデルを示す。解析は、部材の力学モデル<sup>4)</sup>を用いて検討を行うことにした。RC部材である柱部材の復元力特性は、曲げモーメント(M)と部材回転角(θ)

関係における既往の検証事例<sup>5)</sup>を参考に、骨格曲線として最大荷重以降の荷重低下を表現可能なテトラリアモデルとし、履歴特性は除荷時の剛性劣化を考慮したTakedaモデル<sup>6)</sup>を用いた。

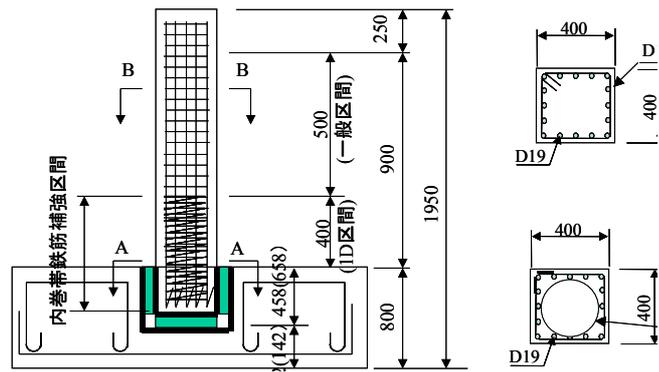
解析は、実験時における除荷開始点の変位量を一致させた変位増分解析とした。また、解析結果の妥当性を検証するために、履歴吸収エネルギーについても検討を行った。

No 3 試験体における試験結果の荷重変位関係の検討結果を図-6 (a) (b)に示す。図-6 (a)は初期荷重段階状態を、図-6 (b)は実験終了までの結果をそれぞれ示したものであるが、初期荷重時の挙動も比較的良好に対応しており、概ね妥当な結果と思われる。

図-7 (a) (b)は、荷重変位の履歴ループの面積として求められる履歴吸収エネルギーと荷重点水平変位との関係を示したものである。

図-7 (a)では、荷重点水平変位が 180mm(部材角 1/5)程度まで実験結果と比較的精度よい対応を示しているが、荷重点水平変位が 180mmを超えると解析結果の方が大きな値を示すようになった。この理由は、試験体に軸方向鉄筋のはらみ出しやかぶりコンクリートの剥落などの損傷が顕著となり、履歴ループ形状がはっきりとした逆S字型を示すようになるが、解析モデルでは荷重途中から逆S字型へ履歴特性が変化することに対応していないためである。また、図-7 (b)は、履歴吸収エネルギーの累積値と荷重点水平変位の関係を示したものである。解析結果は、荷重点変位が 210mm(部材角 1/4.3)を超えると実験結果との整合性が若干悪くなった。

No 5 試験体における試験結果の荷重変位関係の検討結果を図-8に示す。No5 試験体の解析結果は、荷重初期時の剛性は実験値と一致しているが、ひび割れ発生以降の解析結果で剛性が小さく、履歴ループの面積も小さく評価された



※ ( ) の寸法は No-5 試験体の場合

図-4 嵌合接合構造試験体の一般形状 (単位: mm)

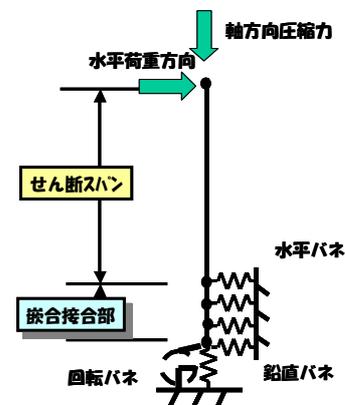


図-5 柱試験体の解析モデル

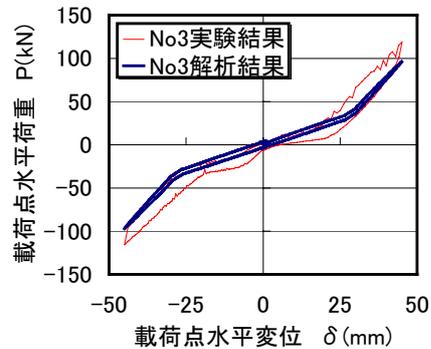


図-6 (a) No.3 試験体解析結果 (荷重初期)

結果となった。

### 3.3 フレーム構造試験体の試験結果<sup>2)</sup>に基づく検討

#### (1) フレーム試験体交番荷重実験の概要<sup>2)</sup>

ここでは、既往の実験結果として参考文献2)に示す R-No1 試験体を選定した。参考文献2)で示す試験体の一般形状を参考として図-9に

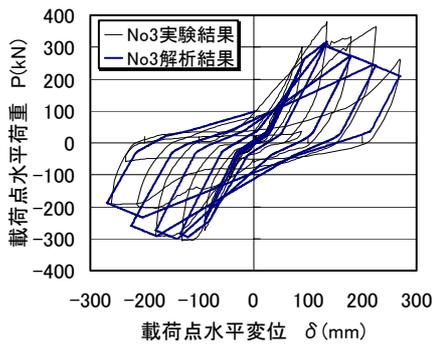
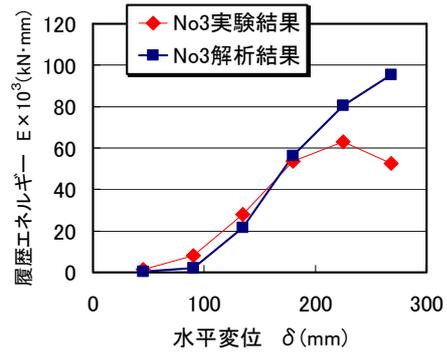


図-6 (b) No3 試験体解析結果



(a) 履歴吸収エネルギー

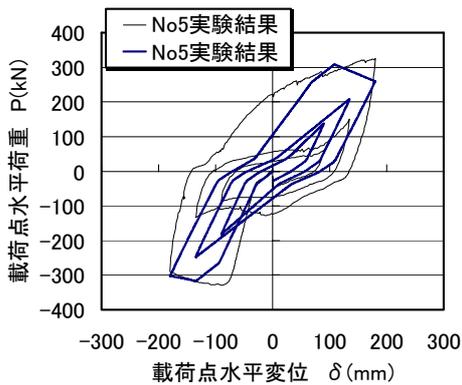
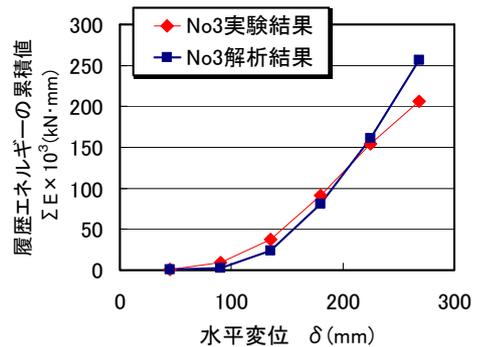


図-8 No5 試験体解析結果



(b) 履歴吸収エネルギーの累積値

図-7 No3 試験体の検討結果

示す。試験体は、柱を2本配置し、柱間に梁を渡した1層フレーム構造で、柱と梁、柱とフーチングの接合箇所には、弾性体を挿入した嵌合接合構造としている。

交番荷重実験時の荷重ステップは、柱の軸方向鉄筋が降伏する変位を $1\delta_y$ とし、それを基準変位として、 $1\delta_y$ の整数倍の水平変位を順次漸増させ、水平変位170mm(柱部材角で $1/7.3$ )まで交番荷重を行ったものである。

## (2) 解析結果の概要

図-10に、フレーム構造試験体の解析モデルを示す。解析は、柱試験体と同様な方法で行った。

R-No1 試験体での解析結果を図-11に示す。荷重変位関係に関しては、実験結果と解析結果は比較的良好な対応を示した。R-No1 試験体に

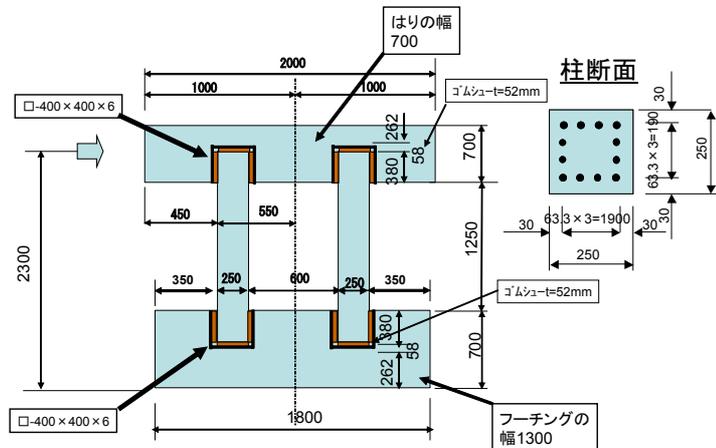


図-9 ラーメン試験体一般形状

における履歴吸収エネルギーの検討結果を図-12(a)(b)に示す。荷重時の各水平変位に対応した履歴吸収エネルギー、履歴吸収エネルギーの累積値ともに、実験結果と比較的精度良く対応した。

## 4. 実高架橋を想定した地震時挙動の検討概要

### (1) 解析対象高架橋の構造概要

ここでは、本接合構造を実高架橋に適用した

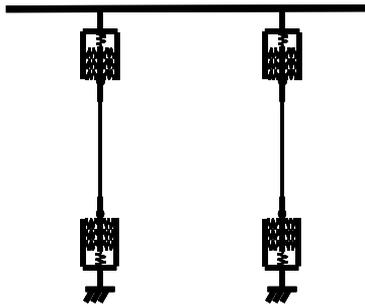
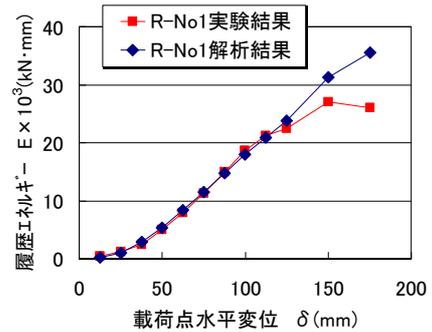


図-10 フレーム試験体の解析モデル



(a) 履歴吸収エネルギー

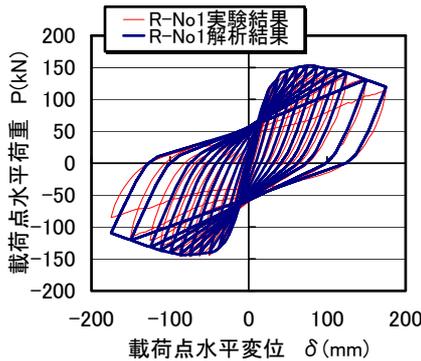
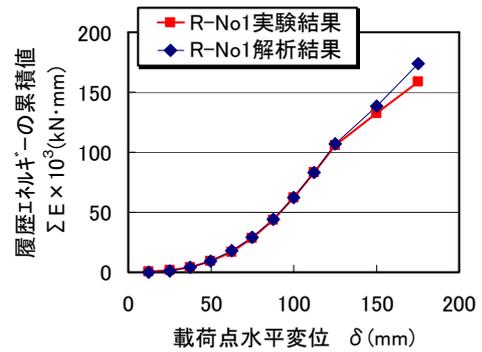


図-11 R-No1 試験体解析結果



(b) 履歴吸収エネルギーの累積値

図-12 R-No1 試験体の検討結果

場合の地震時挙動について検討を行う。

図-13に、解析対象とした高架橋の一般形状を示す。解析対象高架橋は、起点側、終点側ともにゲ

ルバー桁による接続形式とした。柱間隔は10mを標準とし、線路方向7径間とし、フーチング上端からスラブ上端までの高さが約8.0m程度である。柱断面については、800mm×800mmで、軸方向鉄筋量はD32が24本配置を基本構造とした。本検討では、橋軸方向を解析対象とした。また、柱部材の履歴特性は、基本構造から定まるM-θ関係と、後述するG3地震波の解析時には柱の曲げ耐力を25%大きくして検討を行った。柱の曲げ耐力を25%大きくした理由は、当初基本構造の配筋で解析を行ったところ剛構造で柱の部材角が大きく、耐震性能<sup>7)</sup>を満足しなかったため、柱の曲げ耐力を25%大き

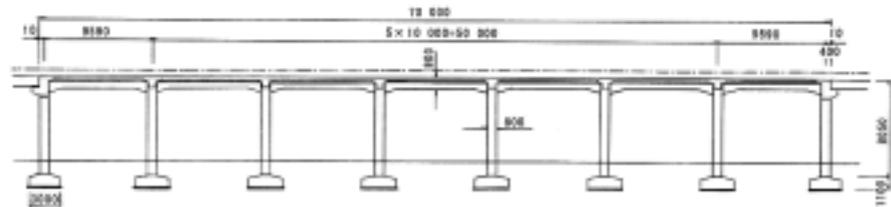


図-13 解析対象高架橋の一般形状

くし耐震性能を満足するようにしたためである。

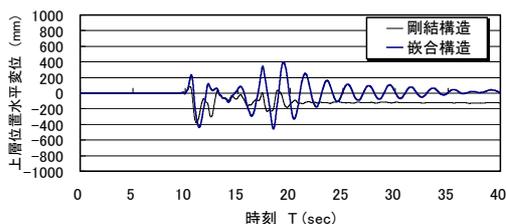
### (2) 解析に用いた地震波の概要

解析に用いた地震波は、参考文献7)に規定されているG1地盤、および、G3地盤に適合した地震波とした。

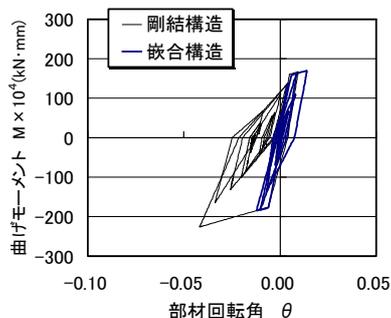
### (3) 解析結果の概要

解析は、柱・梁接合部を通常の剛構造とした場合と本研究目的である嵌合接合構造とした場合のそれぞれの高架橋を対象に実施した。図-14(a)(b)にG1地盤波、図-15(a)(b)にG3地盤波による解析結果をそれぞれ示す。

上層位置の水平方向の応答変位量については、嵌合接合構造とした高架橋の方が大きくなる傾向を示すが、柱部材の部材角(θ)の応答値は嵌

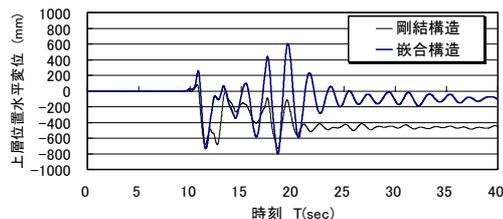


(a) 上層位置応答変位波形

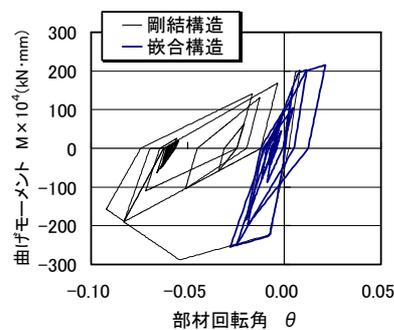


(b) 柱 M- $\theta$  の履歴応答

図-14 G1地盤波での解析結果



(a) 上層位置応答変位波形



(b) 柱 M- $\theta$  の履歴応答

図-15 G3地盤波での解析結果

合接合構造の方が小さくなる傾向となった。上層位置の水平変位が大きくなるのは、嵌合接合部に配置した水平方向の弾性体の影響であるが、この弾性体によって、柱部材回転角の応答値を小さくする効果もあると考えられる。以上のことから、本接合構造を用いることで、剛結構造のラーメン高架橋よりも柱部材の損傷レベル低減への可能が示唆される。

## 5. まとめ

本検討結果を以下にまとめる。

- (1) 柱・梁接合部に弾性体を挿入した接合構造を有するラーメン高架橋の変形挙動は、嵌合接合部に鉛直、回転、水平の各バネ要素を考慮した構造解析モデルで比較的精度良く表現可能である。
- (2) 本嵌合接合構造を用いたラーメン高架橋は、剛結構造よりも上層位置の応答変位は大きくなる傾向を示すものの、柱部材の応答回転角は小さくなる傾向を示した。これより、剛結構造の高架橋よりも地震時の柱部材の損傷レベル低減への可能が示唆される。

## 参考文献

- 1) 小林薫, 竹市八重子: 嵌合接合に弾性体を

挿入した柱構造の変形挙動に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集 Vol. 27, No2, pp301-306, 2005.7

- 2) 小林薫, 杉崎向秀: 柱・梁嵌合弾性接合ラーメン構造の交番載荷実験, 土木学会第60回年次学術講演会, pp917-918, 2005.9
- 3) Jennings, P. C.: Periodic Response of a General Yielding Structure, Proc. ASEC, E M2, pp. 131-163. 1964
- 4) 土木学会: コンクリート標準示方書耐震性能照査編, pp27, 2002.12
- 5) 鉄道総合技術研究所: 鉄道総研報告(特集: 耐震(3)-橋梁の耐震設計-, 第13巻第4号, 1999.4
- 6) Takeda, T., Sozen, M. A. and Nilsen, N. N.: Reinforced Concrete Response to Simulated Earthquakes, Proceeding of ASCE, Structure Division, pp. 2557-2573. 1970
- 7) (財)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, pp68, 1999.10