# 論文 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

小林 薫\*1・竹市 八重子\*2

**要旨**:列車走行時振動の高架下建物への伝播を低減するため,ラーメン高架橋の柱・梁接合 部に弾性体を挿入する柱接合構造について検討を行った。柱・梁接合部の一体化をやめて弾 性体を挿入することは,柱軸方向鉄筋の定着ができなくなるため,剛結構造より耐荷性能が 劣るおそれがあり,経済性を損ねる可能性がある。本研究は,柱・梁接合部に弾性体を挿入 していながら,剛結構造と同等の耐荷特性となるような嵌合接合構造について交番載荷実験 を行い,変形挙動に対する検討を行った。

キーワード:嵌合接合,交番載荷,振動低減

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 行に伴う高架下建物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。

列車走行の振動,騒音を低減させる方法とし ては、ラダーマクラギ<sup>1)</sup>を用いた低振動型の軌 道構造を用いる方法があるが,建設コストへの 影響を検討する必要がある。

一方,鉄道の構造物としては,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・梁が剛結となっており, 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建 物へ伝達することで,高架下建物内には比較的 高レベルの振動や騒音が発生し,建物内の環境 を悪化させている。

そこで,高架橋上での列車走行時振動の高架 下への伝播を低減するため,ラーメン高架橋の 柱・梁接合部に弾性体を挿入する柱接合構造に ついて検討を行った。柱・梁接合部の一体化を やめて弾性体を挿入することは,柱軸方向鉄筋 の定着ができなくなるため,剛結構造より耐荷 性能が劣るおそれがあり,経済性を損ねる可能 性がある。このため,柱・梁接合部に弾性体を 挿入していながら,剛結構造と同等の耐荷特性 となるような嵌合接合構造について検討を行っ た。

本研究は,列車走行時の高架下環境の改善を 意図し,ラーメン高架橋の柱・梁接合箇所に弾 性体を挿入した嵌合接合構造について,模型試 験体による交番載荷実験から本構造の変形挙動 について実験的な検討を行ったものである。

#### 2. 実験概要

#### (1)試験体概要

表-1(a),(b)に,試験体諸元を示す。 図-1に,嵌合接合構造試験体の一般形状を示 す。試験体 No-0 は,弾性体を有する嵌合接合 構造試験体との比較のための剛結構造の基本試 験体である。本試験体では,剛結構造と同等の 耐荷特性となる構造の開発を主眼としている。 このため,3体の試験体の配筋は全て同じで, No-3,5の嵌合接合構造試験体では,嵌合長を 変化させている。なお,嵌合接合部に挿入する 弾性体は,一般的な橋梁の支承用ゴムシューを 用いた。本構造における弾性体は,高架下の低 騒音化,低振動化から定まるバネ定数を有する ものを用いる必要がある。本研究が,このよう

\*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副課長 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 工修 (正会員)

# 表一1 試験体諸元表

(a)試験体種別

No	柱断面寸法			柱埋込部				ゴルロー原さ	ゴルロー国主	
	断面高 h(mm)	×	断面幅 b(mm)	埋込長(mm)(断面 高さDとの比率)	柱補強	弾性材種類	PC鋼棒	(側面)	(底面)	試験体タイプ
No-0	400	×	400	_	—	—	-	_	—	剛接合
No-3	400	×	400	420(1.05D)	鋼管	ゴムシュー	-	16mm3層	16mm3層	嵌合タイプ
No-5	400	×	400	530(1.33D)	鋼管	ゴムシュー		16mm3層	16mm3層	嵌合タイプ

(b)試験体の配筋

No	柱图	新面	寸法	軸方向鉄筋	内巻帯鉄筋(1D区間)	外巻帯鉄筋 (1D区間)	外巻帯鉄筋 (一般区間)	コンクリート強	
	, 断面高 h(mm)	×	断面幅 b(mm)	(径 × 本数, 降伏 強度(N/mm <sup>2</sup> ))	鉄筋径ーピッチ(mm), 降伏強度(N/mm <sup>2</sup> )	鉄筋径ー ピッチ(mm), 降伏強度 (N/mm <sup>2</sup> )	鉄筋径ーピッ チ(mm), 降伏 強度(N/mm <sup>2</sup> )	度 f <sup>°</sup> ck(N/mm <sup>2</sup> )	
No-0	400	×	400	D19×16(387.1)	RB7.1-30(1365)	D13-190 (388.7)	D13-110 (388.7)	25.4	
No-3	400	×	400	D19×16(392)	RB9.0-30(1365)	D13-200 (348)	D13-100 (348)	26.5	
No-5	400	×	400	D19×16(392)	RB9.0-30(1365)	D13-200 (348)	D13-100 (348)	29.8	



<sup>※( )</sup>の寸法は No-5 試験体の場合

図-1 嵌合接合構造試験体の一般形状(単位:mm)

な構造の基礎的実験であることを考慮し,市販 の製品を用いることにした。

嵌合接合構造試験体の製作は,柱,フーチン グを別々に製作し,所定の養生後,柱をフーチ ングの嵌合用鋼管内に落とし込んだ。その際, 弾性体も同時に挿入した。柱外形寸法とフーチ ングの嵌合用鋼管内側の寸法とは,挿入用弾性 体厚さより若干大きめに設定した。このため, 柱・弾性体セット時に微少な隙間が生じる。こ の隙間は,あらかじめ薄鋼板と厚さ1mmのテ フロン板を数枚準備しておき,テフロン板を介 在させることで薄鋼板挿入時の摩擦を小さくし,

-302-

小ハンマーによる打撃を加えながら注意深く挿入した。なお、嵌合接合構造試験体は、軸方向 鉄筋内側にスパイラル状の内巻き帯鉄筋を挿入 した柱構造<sup>2)</sup>とした。実験時の試験体のコンク リート強度を**表-1(b)**中に示す。

#### (2) 実験概要

**写真-1**に, 交番載荷実験状況を示す。交番 載荷実験は, 反力床と試験体フーチングを貫通 した PC 鋼棒に所定の緊張力を与えて固定し, 軸力用鉛直ジャッキで所定の軸方向力(平均軸 方向圧縮応力度でσο=1.0N/mm<sup>2</sup>)を導入し, 試験体柱頭部付近を載荷点として静的に正負交 番載荷を行った。

剛結構造とした基本試験体 No-0 では,最初 に載荷点変位を 0.1~0.2mm ピッチで増加させ, 同時に軸方向鉄筋のひずみ計測値から,軸方向 鉄筋が降伏する時の載荷点の水平変位を測定し た。次の載荷ステップから,載荷点の水平変位 の増加量を 50mm 程度(部材角で 1/18)とし た交番載荷を行った。本試験体で,載荷ステッ プを大きくした理由は,本柱構造における大変 形領域の変形挙動の確認も目的としたため,交 番載荷で軸方向鉄筋が低サイクル疲労による破 断を避けるためである。

嵌合接合構造とした No-3 試験体では,載荷 点位置の水平変位に躯体の変形のほかに弾性体 の変形に伴う躯体の剛体変位も加わる。このた め,剛結構造の No-0 試験体と比べて,載荷す る水平変位が大きくなると想定された。このた め,軸方向鉄筋降伏時の水平変位を参考としな がらも,部材角で 1/20 となる 45mm を基準変 位に設定し,載荷用アクチュエータのストロー ク長を考慮して載荷ステップを決定した。以上 のことから,嵌合構造試験体 No-3 では,初期 載荷時が水平変位で 45mm(部材角で 1/20),

90mm(部材角で 1/10), 135mm(部材角で 1/6.7), 180mm(部材角で 1/5), 225mm(部材角で 1/4)・・・となる載荷ステップで交番載荷を 行った。

嵌合構造試験体 No-5 は, No-3 よりも柱躯体



写真-1 交番載荷実験状況

の嵌合長がながいことから、No-3 試験体の実験 結果から,柱の曲げモーメントの伝達が期待で きることがあらかじめ想定された。このため, No-5 試験体では載荷履歴の影響を確認するこ とを目的に,載荷条件を No-3 と変化させた。

No-5 試験体での載荷ステップは,載荷点の水 平変位を 180mm (部材角で 1/5)の正負交番載 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載荷 を行った。

なお,交番載荷前に,軸力用鉛直ジャッキの 鉛直荷重を大きくして,試験体の鉛直変位の測 定を行った。これは,嵌合接合部に挿入した弾 性体の鉛直バネ定数を測定することを目的に行 った。

#### 3. 実験結果

### 3.1 荷重変位関係

剛結構造試験体 No-0 の載荷点における荷重-変位曲線を図-2に, No-3,5 嵌合構造試験体の 荷重-変位曲線を図-3,4に,それぞれ示す。 嵌合接合構造試験体では,嵌合接合部に挿入さ れている弾性体の変形の影響で,剛結構造試験 体に比べて初期剛性が大幅に低下した。

軸方向鉄筋が最初に降伏する載荷点の水平変 位は、剛結構造とした No-0 試験体で 5mm 程 度であるのに対し、嵌合接合構造の No-3 試験 体では 85mm であった。



図-2 No-0 試験体の荷重-変位曲線



図-3 No-3 試験体の荷重-変位曲線



図-4 No-5 試験体の荷重-変位曲線

# 3.2 損傷状況

嵌合接合構造試験体の損傷状況について述べ る。No-3 試験体では,弾性体として嵌合接合部 で柱底面,柱側面ともに 16mm 3 層(総厚さ 52mm)のゴムシューを用いている。載荷点の 水平変位を±45mm(部材角 1/20)とした交番載 荷時では,軸方向鉄筋は降伏しておらず,柱の 損傷状況もフーチング上面位置から 200mm 付 近に発生する曲げひび割れ程度で,ほとんど無 損傷の状態であった。

軸方向鉄筋の降伏は,載荷点変位が85mmで 生じた。水平変位が±90mm(部材角1/10)では, 載荷面の曲げひび割れが増加,進展し,載荷側 面では曲げひび割れから斜めひび割れへと進展 した。部材角1/10となる水平変位の交番載荷で もかぶりコンクリートの剥離や剥落などは発生



写真-2 No-3 試験体水平変位 135mm 時 (部材角 1/6.7)の損傷状態



写真-3 No-3 試験体水平変位 180mm 時(部 材角 1/5)の損傷状態

せず,比較的軽微な損傷状況であった。柱躯体 の損傷の発生が顕著になるのは,載荷点の水平 変位が±135mm(部材角 1/6.7)の交番載荷で, 柱躯体の圧縮となる載荷面側でコンクリートの 圧壊によるかぶりコンクリートの剥離(写真-

降伏荷重P.(kN) 最大荷重Pmax(kN) 記号 実験値 計算值 比率 実験値 計算值 比率 Pyc (Pye/Pyc) Pmaxe Pve Pmaxc (Pmaxe/Pmaxc) No-0 301.0 257.7 1.17 384.0 322.4 1.19 No-3 257.7 0.98 343.0 327.3 1.05 261.7 No-5 265.3 264.6 1.00 329.4 332.2 0.99

表-2 降伏荷重・最大荷重の実験値

2)が観察されるようになった。

載荷点の水平変位が±180mm(部材角 1/5)の 交番載荷では,軸方向鉄筋のはらみ出しによっ て,かぶりコンクリートがフーチング上面から 約1D(D:断面高さ)程度の範囲で剥落した(**写 真-3**)。

なお, 嵌合接合部に挿入した弾性体は, 載荷 方向の柱面の圧縮を受ける部分では大きくつぶ れ, 反対の面では柱と弾性体に隙間が生じてい た。載荷方向と直角となる柱面の弾性体は, 応 力的な影響を受けていないので, 変形はほとん ど観察されなかった。

### 3.3 降伏荷重·最大荷重

実験から得られた降伏荷重(P<sub>y</sub>)および最大 荷重(P<sub>max</sub>)を**表-2**の実験値の欄に示す。

実験値の降伏荷重は,試験体の水平変位が水 平荷重載荷位置で降伏変位となるときの載荷荷 重である。最大荷重の計算は,鉄道構造物等設 計標準・コンクリート構造物<sup>3)</sup>からコンクリー トの終局ひずみを 0.0035 として求めた。これ らの計算に用いた材料強度は,**表-1(b)**に 示した材料試験の実強度を用いた。

表-2の結果から,剛結合とした No-0 試験 体と弾性体を挿入した嵌合接合試験体(No-3, No-5)の降伏荷重,最大荷重を比較すると,嵌 合接合構造試験体は剛結構造試験体よりも降伏 荷重,最大荷重が若干小さくなっている。しか しながら,計算結果とは比較的よい対応を示し ており,今回の試験体程度の諸元(嵌合長を1 D程度,弾性体の厚さ16mm3層)では,剛接 合構造と同様な計算で降伏荷重,最大荷重の推 定は可能と思われる。



# 実験結果に対する検討

### 4.1 鉛直バネ定数

列車走行時の振動を低減するためには,接合 部の弾性体に適切な鉛直バネ定数を有する必要 がある。鉛直バネ定数に関しては,列車走行性 を阻害しない範囲で,振動低減効果が最大とな るように定める必要がる。この検討に関しては, 別途列車走行解析を実施しながら最適値の検討 を行うことにしている。

実構造物への適用を考えた場合,特殊な弾性 体を使用するとなると高架橋の建設コストへの 影響が懸念される。本試験体では,弾性体とし て橋梁の支承として一般的な市販のゴムシュー を使用している。使用した弾性体の鉛直バネ定 数を調べる目的で,交番載荷前に,鉛直荷重を 順次大きくし,そのときの鉛直変位を測定した。 その結果を図-5に示す。

本試験体に用いた弾性体では,弾性体の応力 度が大きくなるにつれハードニングをするよう な特性が得られた。弾性体の応力度( $\sigma$  v)が 2.0N/mm<sup>2</sup>時の割線鉛直バネ定数は No-3 試験 体で 94.5kN/mm, No-5 試験体で 111.9~ 100.1kN/mm であった。なお,載荷条件は, No-3 試験体で $\sigma$  v=2.0N/mm<sup>2</sup> まで1回載荷, No-5 試験体で $\sigma$  v=4.0N/mm<sup>2</sup> までを2回載荷 した。

# 4.2 エネルギー吸収性能に対する検討

ここでは, 剛結構造試験体 No-0 と嵌合接合試 験体 No-3 について, エネルギー吸収性能につい て検討を行った。図-6は,履歴吸収エネルギ ーと水平変位との関係を示したものである。な お,履歴吸収エネルギーは,荷重変位の履歴ル ープの面積として求めたものである。履歴吸収 エネルギーは,剛結構造の場合,載荷初期段階 から除々に大きくなり,水平変位が180mm 時で ピーク値となり,235mm 時で減少するようにな った。

一方、弾性体を挿入した嵌合接合構造試験体 No-3 では、水平変位が 135mm 時で No-0 試験体 の 50mm の交番載荷とほぼ同等の履歴吸収エネ ルギーとなった。水平変位が 225mm 時では剛結 構造試験体の最大履歴吸収エネルギーと同程度 の値となった。図-7は、履歴吸収エネルギー の累積値を水平変位の関係で示したものである。 剛結構造試験体 No-0 では,水平変位と履歴吸収 エネルギーの累積値が直線的に増加する傾向を 示した。嵌合接合構造試験体 No-3 は,水平変位 と履歴吸収エネルギーの累積値が放物線的に増 加する傾向を示した。剛結構造試験体 No-0 と嵌 合接合構造の試験体 No-3 を比較すると,実験終 了までの載荷における履歴吸収エネルギーの累 積値で、剛接合構造試験体の方が20%程度大き くなった。

### 5. まとめ

ラーメン高架橋の柱・梁接合部に弾性体 を挿入する柱・梁接合構造について検討を 行った。本研究結果を以下にまとめる。

(1)本研究で対象とした嵌合接合構造試験 体程度の諸元(嵌合長を1D 程度,弾性体 の厚さ 16mm3 層)では,剛結構造と同様 な計算で降伏荷重,最大荷重の推定は可能 と思われる。

(2) 本試験体に用いた弾性体(橋梁用ゴム シュー)では,弾性体の応力度が大きくな るにつれハードニングする特性が得られた。





(3) 嵌合構造試験体の履歴吸収エネルギー の最大値は,剛結構造試験体とほぼ同程度, 累積値については実験終了までの載荷で剛 結構造試験体の方が20%程度大きくなった。

参考文献

- 涌井 ー: ラダーマクラギの開発と線路構 造物のシステムチェンジ, コンクリート工 学, Vol. 36, No. 5, pp. 8~16, 1998.5
- 小林薫,菅野貴浩,木野淳一:軸方向鉄筋の内側にせん断補強鉄筋を配置した RC 柱の交番載荷実験,コンクリート工学年次論文集,Vol.24, No.2, pp.1135-1140, 2002.7
- 3)国土交通省鉄道局監修,鉄道総合技術研究 所編:鉄道構造物設計標準・同解説 コン クリート構造物,丸善,2004.4