

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¹⁾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構造の基本試験体である。本試験体では、剛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ユーを用いた。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)

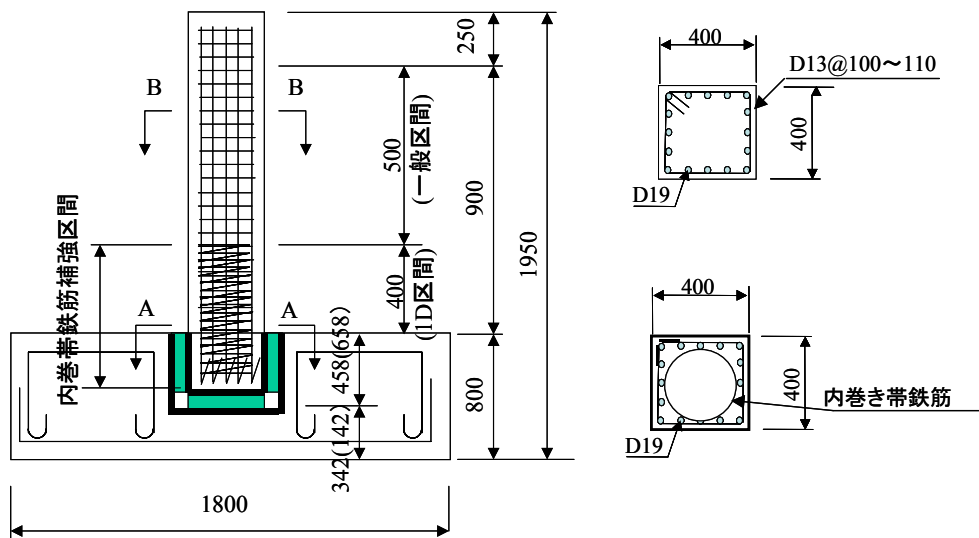
表－１ 試験体諸元表

(a) 試験体種別

No	柱断面寸法			柱埋込部		弾性材種類	PC鋼棒	ゴムシュー厚さ (側面)	ゴムシュー厚さ (底面)	試験体タイプ
	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					
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	柱断面寸法			軸方向鉄筋 (径×本数, 降伏 強度(N/mm ²))	内巻帯鉄筋(1D区間) 鉄筋径-ピッチ(mm), 降伏強度(N/mm ²)	外巻帯鉄筋 (1D区間) 鉄筋径- ピッチ(mm), 降伏強度 (N/mm ²)	外巻帯鉄筋 (一般区間) 鉄筋径-ピッ チ(mm), 降伏 強度(N/mm ²)	コンクリート強 度 f _{ck} (N/mm ²)
	断面高 h(mm)	×	断面幅 b(mm)					
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



※ () 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、

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²⁾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 $\sigma_0=1.0\text{N/mm}^2$ ）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、 $\pm 135\text{mm}$ （部材角で1/6.7）、 $\pm 90\text{mm}$ （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。

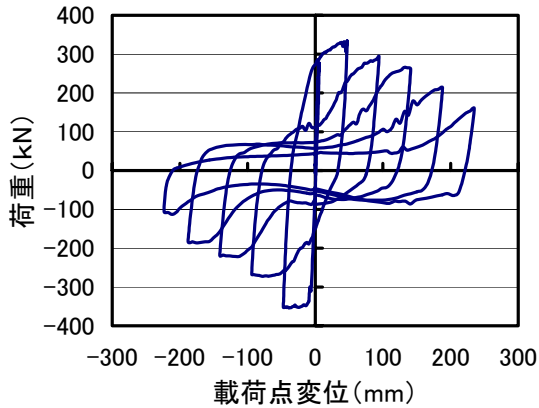


図-2 No-0 試験体の荷重-変位曲線

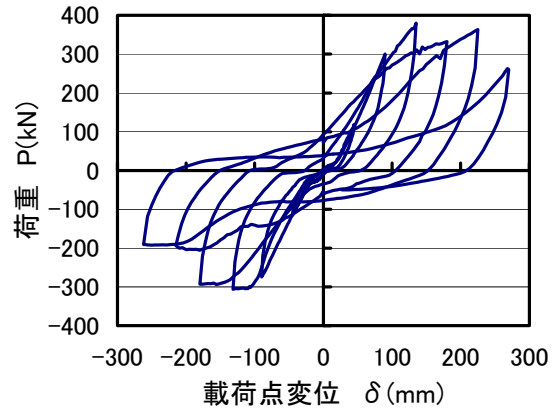


図-3 No-3 試験体の荷重-変位曲線

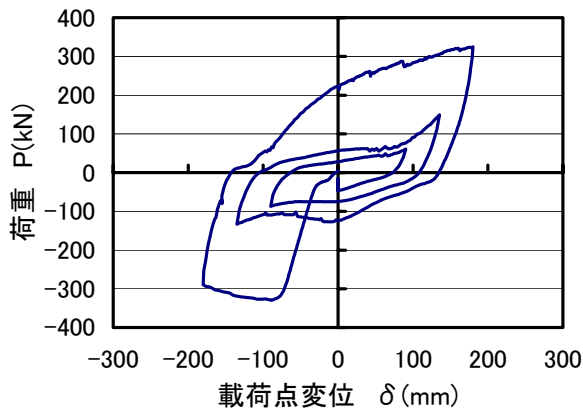


図-4 No-5 試験体の荷重-変位曲線

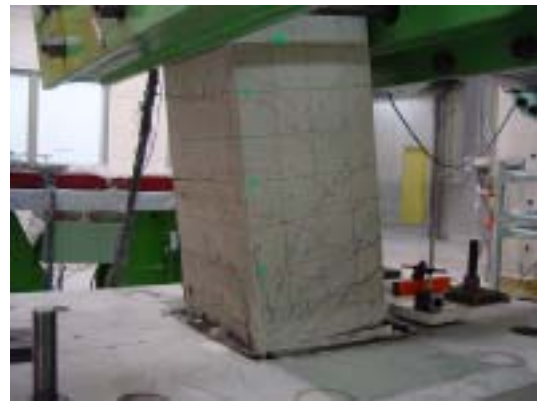


写真-2 No-3 試験体水平変位 135mm 時 (部材角 1/6.7) の損傷状態



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

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 $\pm 45\text{mm}$ (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 $\pm 90\text{mm}$ (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

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 $\pm 135\text{mm}$ (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-

表一 2 降伏荷重・最大荷重の実験値

記号	降伏荷重 P_y (kN)			最大荷重 P_{max} (kN)		
	実験値 P_{ye}	計算値 P_{yc}	比率 (P_{ye}/P_{yc})	実験値 P_{maxe}	計算値 P_{maxc}	比率 (P_{maxe}/P_{maxc})
No-0	301.0	257.7	1.17	384.0	322.4	1.19
No-3	257.7	261.7	0.98	343.0	327.3	1.05
No-5	265.3	264.6	1.00	329.4	332.2	0.99

2)が観察されるようになった。

載荷点の水平変位が $\pm 180\text{mm}$ (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)。

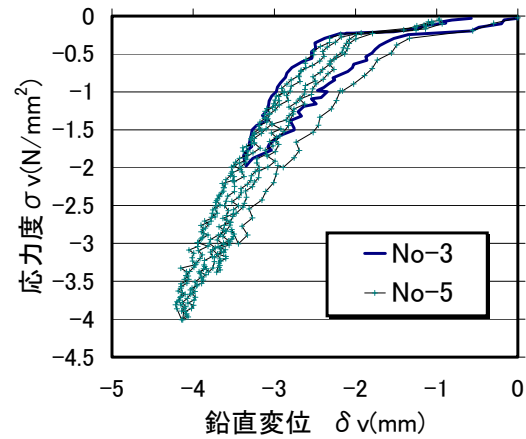
なお、嵌合接合部に挿入した弾性体は、載荷方向の柱面の圧縮を受ける部分では大きくつぶれ、反対の面では柱と弾性体に隙間が生じていた。載荷方向と直角となる柱面の弾性体は、応力的な影響を受けていないので、変形はほとんど観察されなかった。

3. 3 降伏荷重・最大荷重

実験から得られた降伏荷重(P_y)および最大荷重(P_{max})を表一2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³⁾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、表一1(b)に示した材料試験の実強度を用いた。

表一2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合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1D程度、弾性体の厚さ16mm3層)では、剛結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。



図一5 鉛直バネ定数の測定結果

4. 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ある。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。その結果を図一5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(σv)が 2.0N/mm^2 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 $111.9 \sim 100.1\text{kN/mm}$ であった。なお、載荷条件は、No-3試験体で $\sigma v=2.0\text{N/mm}^2$ まで1回載荷、No-5試験体で $\sigma v=4.0\text{N/mm}^2$ 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、剛構造の場合、载荷初期段階から徐々に大きくなり、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 の交番载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、実験終了までの载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。

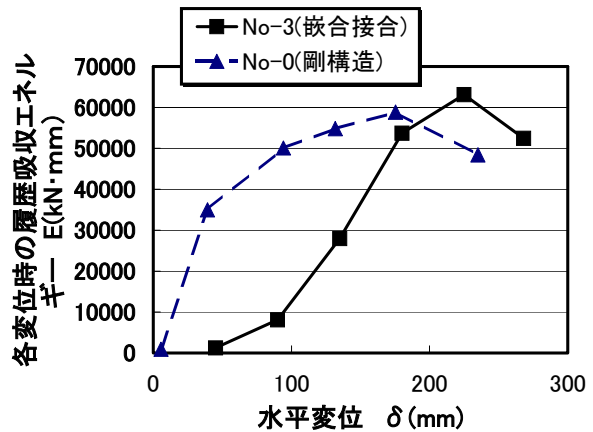


図-6 履歴吸収エネルギーの検討結果

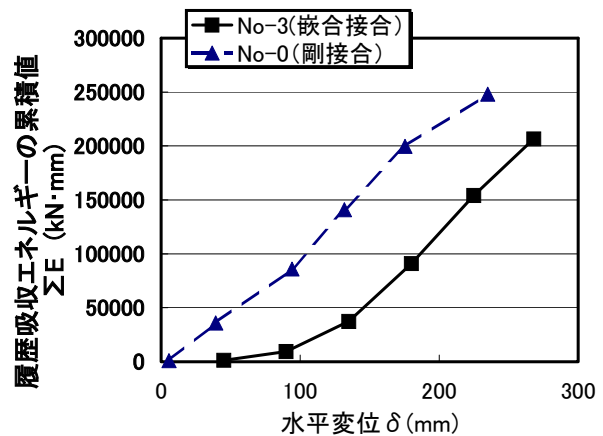


図-7 履歴吸収エネルギーの累積値の検討結果

(3)嵌合構造試験体の履歴吸収エネルギーの最大値は、剛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载荷で剛構造試験体の方が 20%程度大きくなった。

参考文献

- 1) 涌井 一：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
- 2) 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 柱の交番载荷実験，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