

# 報告 軸方向力の大きいRC部材における鋼板巻き補強効果に関する実験

谷村 幸裕\*1・渡辺 忠朋\*2・佐藤 勉\*3

**要旨：**既設RC部材の耐震補強の主要な工法として鋼板巻き補強工法が多くのRC部材に適用されている。これは、これまで実施された比較的低軸力が作用した部材を対象とした実験結果をもとにしたものである。しかし、開削トンネルRC柱等のように高軸力が作用した部材の鋼板巻き補強効果については、必ずしも明らかになっていない。そこで、高い軸力が作用したRC部材の鋼板巻き補強効果に着目して載荷実験を行った。その結果、高軸力が作用する柱においても鋼板巻き補強することにより、変形性能が向上することが明らかになった。

**キーワード：**じん性、耐震補強、鋼板巻き補強

## 1. はじめに

開削トンネル中柱は、高架橋の柱に比べて軸方向力が大きい、軸方向鉄筋量が多い等の特徴があり、その結果、曲率じん性率が小さく、曲げを受けることにより引張鉄筋が降伏する以前に圧縮側のコンクリートが圧縮破壊する、いわゆる曲げ圧縮破壊の破壊形態となる部材が多く存在する。一方、1995年の兵庫県南部地震以来、既設構造物の耐震補強が進められているが、既設開削トンネル中柱の耐震補強工法として、既設高架橋の柱と同様に鋼板巻き立て工法を採用する場合に、高架橋の柱とは曲げ性状が異なるため、その補強効果が問題となる。

そこで、開削トンネル中柱の鋼板巻き補強効果を明らかにするため、開削トンネル中柱を模擬した試験体を製作し、載荷実験を行って補強効果の検討を行った。

## 2. 実験概要

### 2.1 試験体の概要

試験体の補強前の形状を図-1に、配筋図を図-2に示す。試験体は、実物の約1/2スケールとし、断面を300mm×900mmの長方形断面、柱高さを1800mmとしてRC柱を3体製作した。No.1は無補強のまま載荷試験を行いNo.2およびNo.3は図-3に示すように、柱全長を鋼板巻き補強してから載荷試験を行った。補強鋼板は厚さ4.5mmとし、コ形に曲げ加

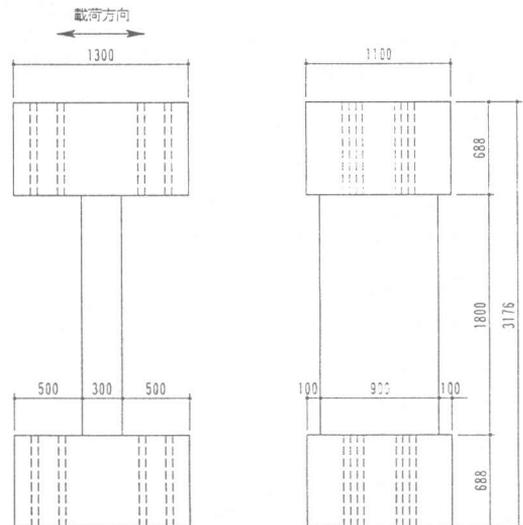


図-1 試験体の形状(補強前)

\*1 西日本旅客鉄道(株) 建設工事部、工修(正会員)

\*2 (財)鉄道総合技術研究所 構造物技術開発事業本部橋梁担当(正会員)

\*3 (財)鉄道総合技術研究所 構造物技術開発事業本部橋梁担当、工博(正会員)

工して短辺上で溶接して閉合した。柱と補強鋼板の間隔は15mmを確保し、無収縮モルタルを充填した。なお、鋼板の上下端はスタブに定着していない。No. 3ではさらに柱を貫通してφ17mmのP C鋼棒を2列に200mm間隔で取り付け、鋼板との隙間が無くなる程度にボルトで締め付けて固定した。各試験体の諸元を表-1に示す。

### 2.2 使用材料

セメントは普通ポルトランドセメント、鉄筋はSD295およびSD345を用いた。また、補強鋼材にはSS400、P C鋼棒は丸棒B種1号を用いた。コンクリートの配合を表-2に、圧縮強度を表-1に、鋼材の材料試験結果を表-3に示す。

### 2.3 荷重方法

荷重試験装置の概要を図-4に示す。試験体の下スタブを反力床に、上スタブをL型フレームに固定し、軸力荷重用のアクチュエータでL型フレームを水平に保持し、かつ左右のアクチュエータの荷重の和が所定の軸力になるように制御しながら、水平力荷重用のアクチュエータにより荷重した。軸力は、コンクリートと無収縮モルタルで負担すると考え、軸力比（コンクリー

表-1 試験体の諸元

試験体	No. 1	No. 2	No. 3
柱断面 B×H (mm)	900×300mm		
柱全長 (mm)	1800mm		
せん断スパン比	3.6		
軸方向鉄筋	D22-22本		
引張鉄筋比	1.55%		
帯鉄筋	D10-3組 ctc100mm		
帯鉄筋比	0.48%		
軸力 (kN)	2617	3303	3900
軸力比	0.5		
補強鋼板厚さ (mm)	なし	4.5mm	
貫通ボルト径 (mm)	なし	φ17	
コンクリート圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	19.7	21.6	25.4

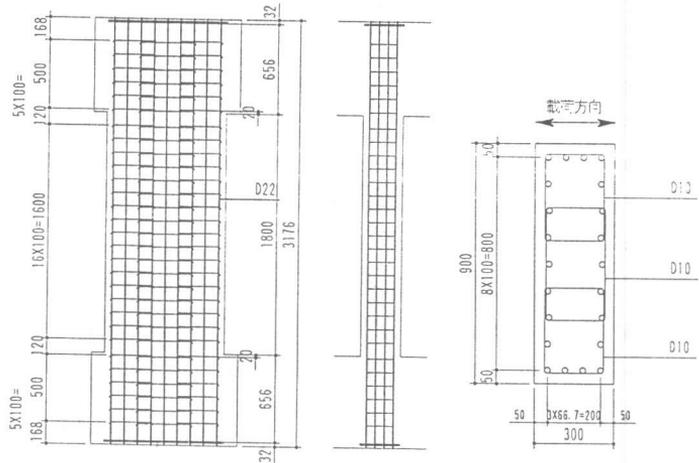


図-2 試験体の配筋図

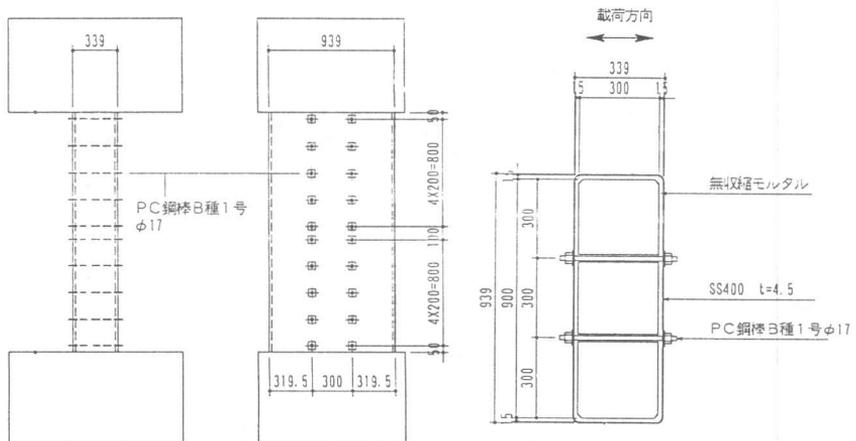


図-3 試験体鋼板巻き補強図

トの圧縮強度に対する軸方向圧縮応力度の比)が圧縮0.5となるように載荷した。

加力サイクルは、 $\pm 1\delta_y$ 、 $\pm 2\delta_y$ 、 $\pm 3\delta_y$ とし、各 $\delta_y$ ごとに3サイクル行うことを基本とした。ここで、降伏点変位 $\delta_y$ は、正負両方向でそれぞれの柱の引張側軸方向鉄筋が降伏したときの変形量とした。なお、No.3試験体の加力サイクルは、 $\pm 1\delta_y$ 、 $\pm 2\delta_y$ 、 $\pm 3\delta_y$ 、 $\pm 4\delta_y$ 、 $\pm 5\delta_y$ 、 $\pm 6\delta_y$ 、 $\pm 8\delta_y$ 、 $\pm 10\delta_y$ 、 $\pm 12\delta_y$ とした。

#### 2.4 測定項目

測定項目は、鉄筋、鋼板およびPC鋼棒のひずみ、水平および鉛直方向の変位について行った。

表-2 コンクリートの配合

設計基準強度	18N/mm <sup>2</sup>
セメント	普通ポルトランドセメント
粗骨材の最大寸法	10mm
スランプ	15±2.5cm
空気量	4.5±1.5%

表-3 鋼材の材料試験結果

鋼材種別	D10	D22	t4.5	φ17
降伏点強度 (N/mm <sup>2</sup> )	353	395	226	1050
引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	500	602	325	1162
弾性係数 (×10 <sup>5</sup> N/mm <sup>2</sup> )	1.86	1.90	1.88	1.99

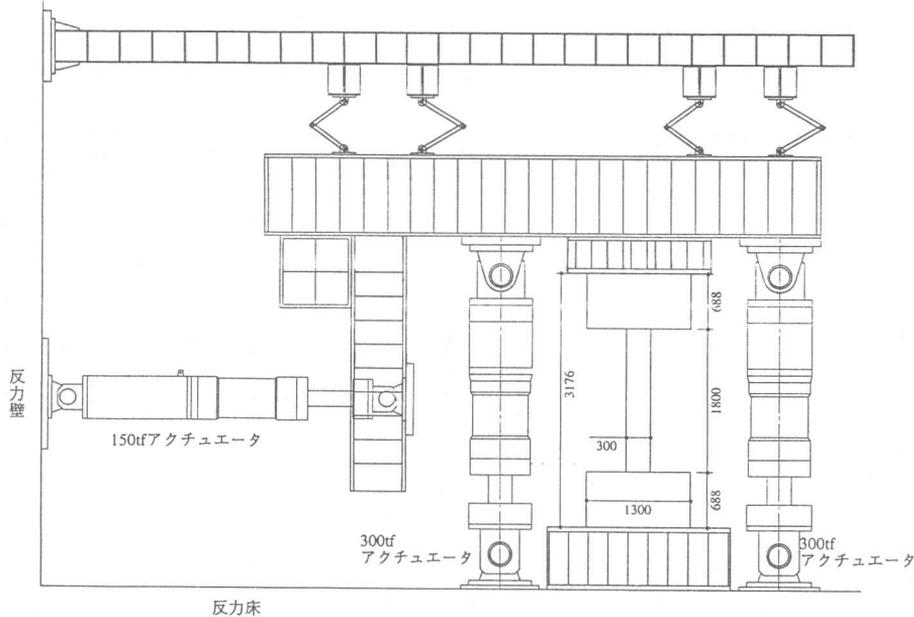


図-4 載荷装置

### 3. 実験結果

#### 3.1 破壊性状

それぞれの試験体の、実験終了後におけるひび割れ状況または補強鋼板の変形状況を図-5～7に示す。

無補強のNo.1は、まず、柱上下端部に水平方向に曲げひび割れが発生し、荷重増加に伴い圧縮側の軸方向鉄筋が降伏し、続いて引張側の軸方向鉄筋が降伏ひずみに達した。 $1\delta_y$ の繰返し載荷により、柱の軸方向鉄筋に沿った縦方向のひび割れと、柱の上下端部に斜めひび割れが発生した。斜め方向のひび割れは、顕著に発達することはなかったが、縦方向のひび割れが発達して、急激に荷重が低下した。さらに $+2\delta_y$ まで載荷したが、水平荷重は $+1\delta_y$ よりも低下し、繰返し

し荷重によってさらに水平荷重が低下したため、荷重を終了した。

鋼板巻き補強したNo. 2は、 $+1\delta_y$ から柱下端部の鋼板にはらみ出しが見られるようになり、 $+3\delta_y$ からは柱上端部にも鋼板にはらみが見られるようになった。試験終了時には、柱上端部における鋼板のはらみ出し量が約100mm程度になった。水平荷重は、 $4\delta_y$ で降伏点荷重 $P_y$ を下回り、 $5\delta_y$ 、 $6\delta_y$ で水平荷重が一層低下したため荷重を終了した。実験終了後鋼板に亀裂は見られなかった。

鋼板巻き補強し貫通ボルトを用いたNo. 3は、 $+2\delta_y$ から柱下端部の鋼板にはらみが見られるようになり、

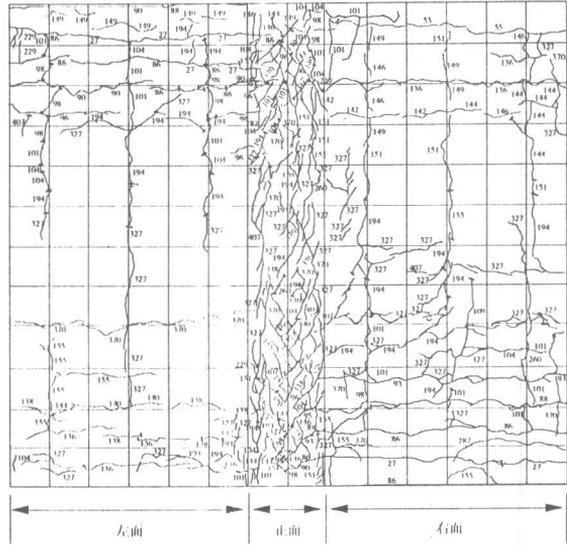


図-5 実験終了時のひび割れ状況 (No. 1)

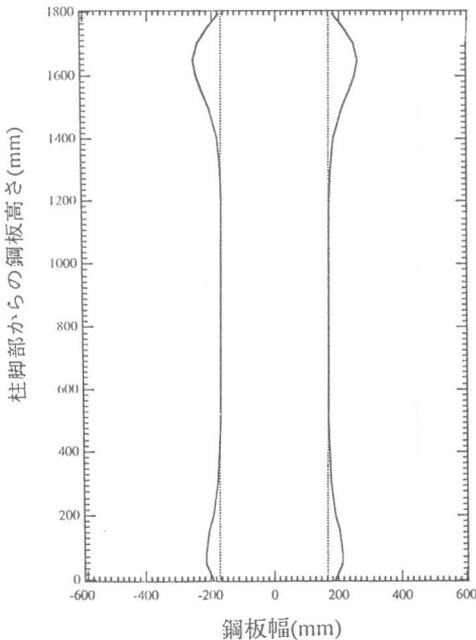


図-6 鋼板変形状態 (No. 2)

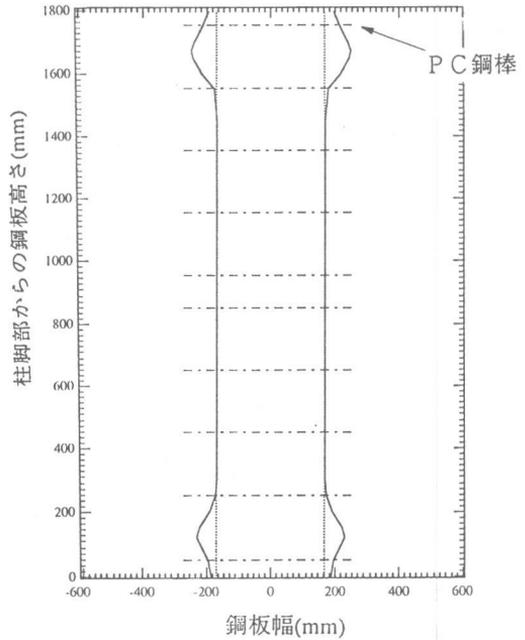


図-7 鋼板変形状態 (No. 3)

$+4\delta_y$ からは柱上端部にも鋼板にはらみが見られるようになった。試験終了時には、柱上端部における鋼板のはらみ出し量が約80mm程度になった。水平荷重は、 $12\delta_y$ で降伏点荷重 $P_y$ を下回り、 $-12\delta_y$ の荷重途中で軸方向鉄筋が破断し、水平荷重が一層低下したため荷重を終了した。実験終了後、鋼板に亀裂は見られなかった。P C 鋼棒のひずみは、最上段が最も大きい値を示したが、最大でも2000 $\mu$ 程度であり、弾性範囲を超えることはなかった。

表-4 実験結果

	実験値 (kN)		計算値 (kN)			$\frac{P_y}{P_{yc}}$	$\delta_y$ (mm)	$\delta_u$ (mm)	$\mu$	$\frac{A}{A_1}$
	$P_y$	$P_{max}$	$P_{Myc}$	$P_{Muc}$	$P_{Vyc}$					
No. 1	596	596	502	462	697	1.19	26.9	26.9	1.0	1.0
No. 2	690	757	571	513	—	1.21	19.5	72.1	3.7	5.6
No. 3	831	973	615	551	—	1.35	19.6	205.3	10.5	21.9

### 3.2 降伏点荷重および最大荷重

降伏点荷重および最大荷重の実験値と計算値を表-4に示す。 $P_y$ は引張側の軸方向鉄筋が降伏したときの水平荷重（以下、降伏点荷重という）、 $P_{max}$ は水平荷重の最大値の、それぞれ正負両方向における実験値の平均を示す。また、 $P_{Myc}$ は降伏点荷重の計算値を、 $P_{Muc}$ は圧縮側のコンクリートが終局ひずみに達するとき、 $P_{Vyc}$ はせん断耐力に達するときの水平荷重の計算値[1]を示す。ここで、鋼板巻き補強した供試体の計算値は、圧縮側の無収縮モルタル及び鋼板を有効として求めた。

いずれの場合も、計算上曲げ圧縮破壊先行の破壊モードとなるが最大荷重の実験値は、曲げ圧縮破壊時の水平荷重の計算値 $P_{Muc}$ を大きく上回った。降伏点荷重の実験値は計算値に比べてNo. 1およびNo. 2は約20%大きくなり、No. 3は約35%大きくなった。No. 2とNo. 3は貫通ボルトの有無のみの違いであるが、貫通ボルトを用いることにより、降伏点荷重が大きく増加している。

最大荷重は、無補強のNo. 1に比べて鋼板巻き補強したNo. 2およびNo. 3は大きな値となった。また、貫通ボルトを用いたNo. 3はNo. 2に比べ最大荷重が約30%増加した。

### 3.3 荷重-変位関係

各試験体の荷重-変位履歴曲線を図-8～10に示す。鋼板巻き補強したNo. 2は無補強のNo. 1に比べて大きく変形性能が向上し、貫通ボルトを用いたNo. 3はさらに大きく変形性能が向上していることがわかる。

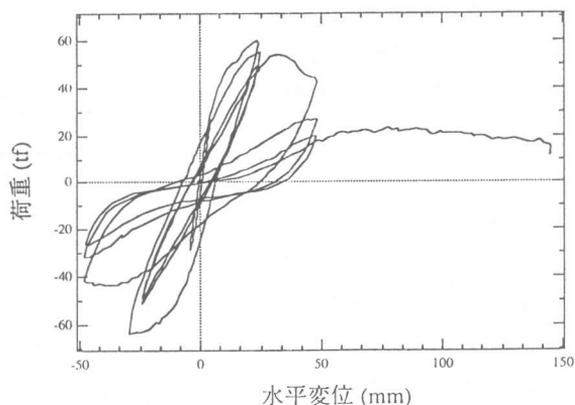


図-8 荷重-変位履歴曲線 (No. 1)

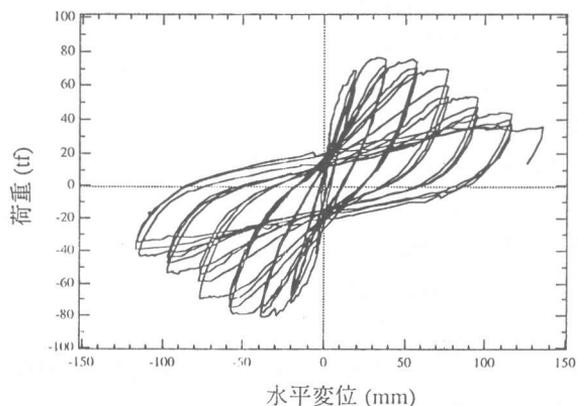


図-9 荷重-変位履歴曲線 (No. 2)

#### 4. 補強効果の検討

各試験体の降伏点変位  $\delta_y$ 、終局変位  $\delta_u$  およびじん性率  $\mu$  を表-4 に示す。

ここで、降伏点変位  $\delta_y$  とは、軸方向鉄筋が引張降伏するときの変位を、終局変位  $\delta_u$  とは、荷重-変位曲線の包絡線上の降伏点荷重を下回らない最大変位を、じん性率は終局変位と降伏点変位の比を表す。なお、表-4 の値は、正負の平均で評価したものである。

各試験体のエネルギー吸収能力の比較として、次式により求めた荷重-変位関係包絡線の面積  $A$  の、No.1 試験体に対する比率  $A/A_1$  を表-4 および図-11 に示す。

$$A = 1/2 \cdot \delta_y \cdot P_y + 1/2 \cdot (\delta_u - \delta_y) \cdot (P_y + P_u) \quad (1)$$

無補強のNo.1 に比べて、鋼板巻き補強したNo.2 及びNo.3 のエネルギー吸収能力は大きく向上していることがわかる。また、貫通ボルトを用いたNo.3 は、鋼板巻き補強のみのNo.2 に比べて、補強効果が著しく増加した。

#### 5. 結論

開削トンネル中柱をモデル化した試験体を用いた載荷実験結果から、本実験の範囲内で明らかになったことを要約して以下に示す。

(1) 高軸力が作用し曲げ圧縮破壊先行となる柱においても、鋼板巻き補強することにより、変形性能は大きく改善される。また、柱を貫通してPC鋼棒を配置しボルトで固定することにより、柱の変形性能はさらに大きく向上する。

(2) 鋼板巻き補強した柱に、貫通ボルトを用いると、降伏点荷重および最大荷重が増加する。

(3) 本実験で用いた補強方法を、エネルギー吸収能力で比較すると、無補強時に比べて、鋼板巻き補強した場合5.6倍、鋼板巻き補強して貫通ボルトを用いた場合21.9倍になった。

[参考文献]

[1] 鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説 コンクリート構造物、丸善、1992

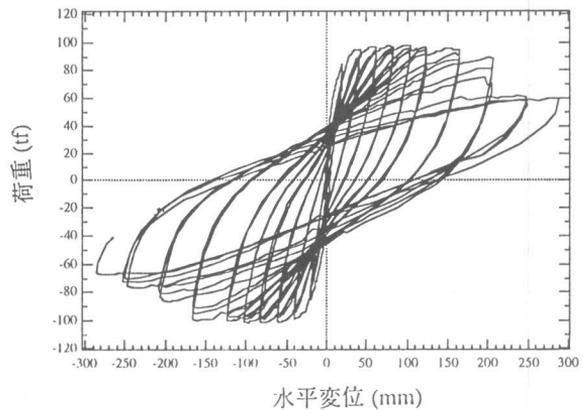


図-10 荷重-変位履歴曲線 (No.3)

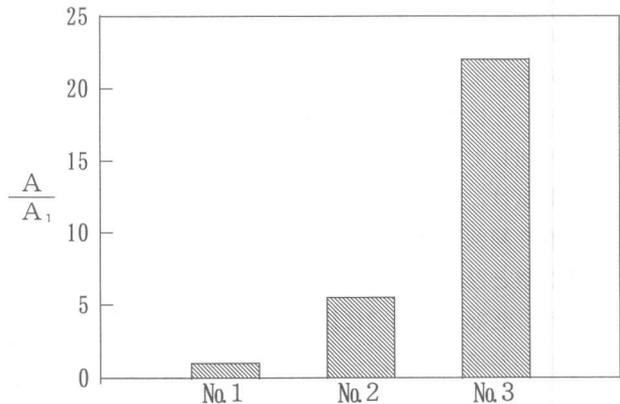


図-11 エネルギー吸収能力の比較