

論文 既設 RC 柱の鋼板巻き耐震補強工法の充填材に関する一考察

網嶋 和彦^{*1}・津吉 毅^{*2}・石橋 忠良^{*3}・馬場 正光^{*4}

要旨：既設の鉄道ラーメン高架橋の耐震補強を行なう際に、従来は地中部を掘削して補強を行なっていたが、掘削を不要とし、地表部から鋼板を圧入する工法を考案した。今回、この工法における既設 RC 柱と補強鋼板の隙間の充填材と充填方法をパラメータとし、静的交番載荷試験を行なった。その結果、四隅にモルタルを充填した場合と全周に砂を充填し漏れないようにした場合、従来の鋼板巻き補強工法で用いられる隙間全周モルタル注入と同程度の効果を得られることを見出した。

キーワード：地中部鋼板圧入工法，充填材料，じん性率，鋼板巻き補強工法

1. はじめに

平成 7 年の阪神大震災以降、当社では「既存の鉄道構造物に係る耐震補強の緊急措置について」¹⁾に基づき、RC ラーメン高架橋柱の耐震補強を進めてきた。既設 RC 柱の耐震補強工法に関しては、せん断・じん性補強を目的として鋼板巻き補強工法を一般的に用いてきたが、既設 RC 柱の基部は地中部に位置するため、この工法では RC 柱の基部の補強のために地中部を掘削する必要があった。

そこで、地上部から鋼板を圧入する工法（以下、地中部鋼板圧入工法）を考案した。地中部鋼板圧入工法は、地表面から鋼板を油圧ジャッキ等によって地中へ圧入することにより、地中部の既設 RC 柱を補強する工法である。鋼板は、高圧水を噴射させて地山を乱しながら圧入させる。この工法では、従来行なっていた地中部の補強のための既設 RC 柱周りの仮土留工及び掘削が不要となり、大幅な工期短縮とコストダウンが期待できる。

一方、従来の鋼板巻き補強工法では、既設 RC 柱と補強鋼板の隙間の充填方法として、隙間全周にモルタル注入を行なっている。しかしなが

ら、地中部鋼板圧入工法では、地中部の全周にモルタルを注入した状況を確認することが困難であるため、簡易な方法を検討することとし、充填材と充填方法をパラメータとした正負水平交番載荷試験を行なった。本稿は、その結果について考察と合わせてまとめたものである。

2. 実験概要

2.1 試験体

試験体の諸元を表-1 に示す。また、試験体の形状を図-1 に示す。試験体は既設高架柱を想定し正方形断面の縮小体とした。試験体は、耐震補強が必要な一般的な既設 RC 柱の鉄筋量を参考に、若干の帯鉄筋を配置した試験体 No.1²⁾と、確実にせん断先行破壊となるように帯鉄筋を配置していない試験体 No.2³⁾の 2 種類とし、それぞれ柱部の周囲にコの字型に曲げ加工した補強鋼板 (t=3.2mm) を巻いて接合部を溶接した。コンクリート面と補強鋼板の間隔は 15mm とした。

試験体の配筋は、既往の実験結果^{2), 3)}をもとに配筋を定めたもので、両者ともせん断先行破壊するものと推定される。なお、耐力比 $[(V_c + V_s)/V_{mu}]$ (ここに、 V_c : せん断補強鉄筋を用い

*1 東日本旅客鉄道(株) 建設工事部 構造技術センター (正会員)

*2 東日本旅客鉄道(株) 建設工事部 構造技術センター 博士 (工学) (正会員)

*3 東日本旅客鉄道(株) 建設工事部 構造技術センター所長 工学博士 (正会員)

*4 東日本旅客鉄道(株) 東京支社 東京土木技術センター (正会員)

表-1 試験体諸元

No.	柱断面 寸法 b×h (mm)	有効 高さ d (mm)	せん断 スパン a (mm)	せん断 スパン比 a/d	軸方向 鉄筋比 p (%)	帯鉄筋 配置 (mm)	鋼板厚 t (mm)	充填材	耐力比 (V_y/V_{mu})	
									補強前	補強後
1	400×400	360	1150	3.19	p=2.87	D6 ctc200	3.2	標準砂 (水締め)	0.69	2.85
2	400×400	360	1150	3.19	p=2.87	/	3.2	モルタル (四隅のみ)	0.67	2.60

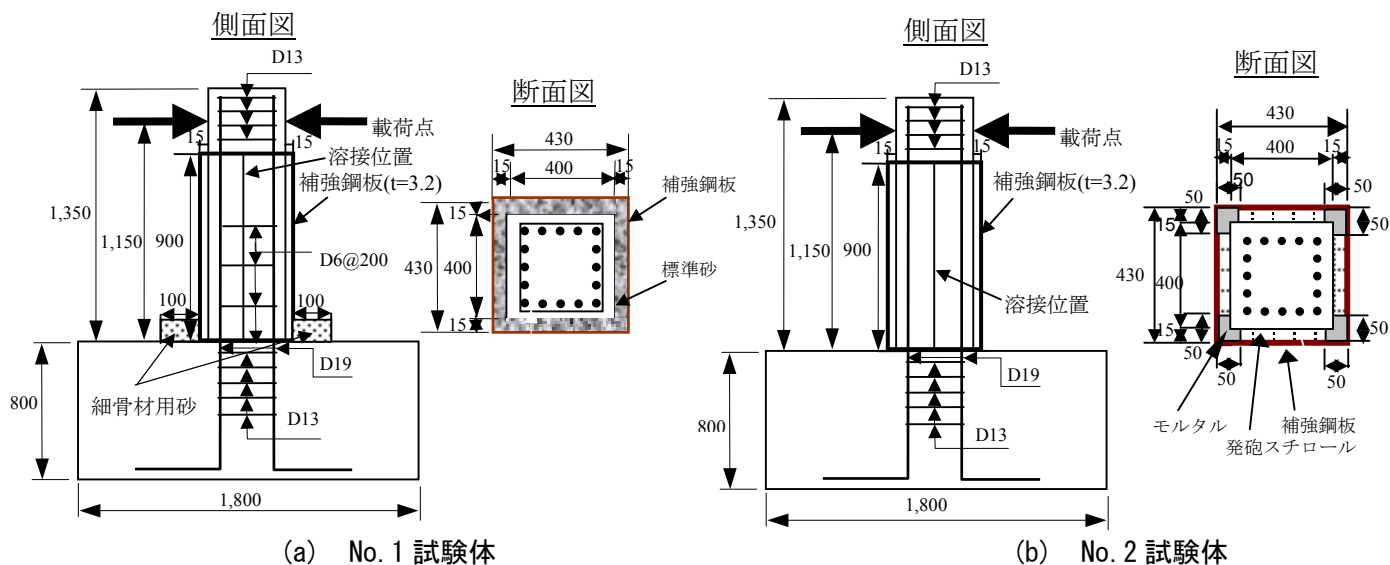


図-1 試験体形状 (単位 : mm)

表-2 コンクリートの配合

セメント の種類	粗骨材の 最大寸法 (mm)	スランプ (cm)	水セメント比 W/C(%)	細骨材率 s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				
					水 W	セメント C	細骨材 s	粗骨材 G	混和剤 A
N	20	25	50	43.4	175	350	770	1000	AE 減水剤

表-3 コンクリートの圧縮強度と鉄筋の降伏強度

No.	コンクリートの 圧縮強度 f'_{ck} (N/mm ²)	鉄筋の降伏強度 f_{syk} (N/mm ²)	
		軸方向鉄筋 SD345 D19	帯鉄筋 SD345 D6
1	25.8	412.1	376.0
2	38.7	359.7	/

表-4 補強鋼板の降伏強度

No.	降伏強度 f_{syk} (N/mm ²)
1	295.2
2	268.8

※ 一般構造用圧延鋼材 SS400 (t=3.2mm)

表-5 充填材料の諸元

No.	充填材
1	標準砂 JIS R 5201
2	モルタル (四隅コーナー部のみ) 圧縮強度 $f'_{ck} = 34.9$ (N/mm ²)

ない棒部材のせん断耐力、 V_s ：せん断補強鉄筋が受け持つせん断耐力、 V_{mu} ：部材が曲げ耐力 M_u に達するときの部材のせん断耐力) は実材料強度で計算した。また、 M_u は鉄道設計標準⁴⁾により、 V_c は a/d の効果を考慮した二羽ら ($a/d \geq 2.5$) の式⁵⁾により、側方鉄筋を考慮して算出⁶⁾した。また、補強鋼板が受け持つせん断耐力は、帯鉄筋換算 (V_s) により算出した。

2.2 使用材料

試験体に使用したコンクリートの配合を表-2に示す。コンクリートは、普通ポルトランドセメントを使用し粗骨材最大寸法 20mm、水セメント比 50%とし、設計基準強度は 27N/mm^2 とした。このコンクリートの試験時の圧縮強度と試験に使用した鉄筋の降伏強度を表-3に示す。また、補強鋼板の降伏強度を表-4に示す。

充填材料の諸元は表-5に示すとおりである。試験体 No.1 には、水締めをした標準砂 (JIS R 5201) を充填し、基部の周りには細骨材用砂を敷き詰めて水平荷重載荷時に補強鋼板の下端にできる隙間から充填した標準砂がこぼれることのないようにした。これは、実際には地中部に充填した砂が漏れ出さないことを想定したものである。試験体 No.2 には、四隅コーナー部のみモルタルを充填し、それ以外には強度に影響を与えないよう発泡スチロールを型枠代わりに配置した。

2.3 載荷方法

図-2に載荷状況について示す。試験時の軸方向応力度は、実高架柱に作用する軸応力度と同等程度の 0.98N/mm^2 を試験体の柱頭部に鉛直油圧ジャッキで与え、正負交番水平荷重をアクチュエータにより柱下端から 1,150mm の位置に載荷した。軸力用鉛直ジャッキは、試験体が水平方向に変位しても常に一定の軸力が作用されるように、柱頭部の載荷装置を回転変位可能とし、ジャッキは水平方向のスライド装置を配置してフレームに取り付けた。

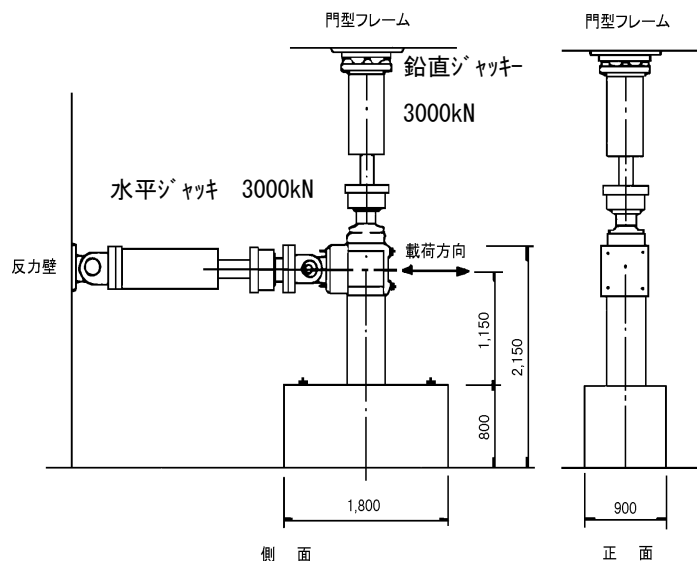


図-2 載荷状況 (寸法単位 : mm)

載荷パターンは、引張縁の軸方向鉄筋のひずみが鉄筋引張試験の結果から定まる降伏ひずみに達するまでは荷重制御により 1 サイクルの載荷、それ以降は載荷点変位が降伏時変位の整数倍となるように変位制御で 1 サイクルの載荷とした。ここで、引張縁の軸方向鉄筋が降伏する時点での変位を降伏変位 δ_y 、その時の荷重を降伏荷重 P_y とする。また、終局変位 δ_u は、実験から得られる荷重変位曲線において、試験体の水平荷重の値が降伏荷重 P_y を下回らない最大変位とし、正側載荷と負側載荷の平均とする。

3. 試験結果

3.1 荷重-変位の関係と損傷状況

各試験体の載荷点における荷重と水平変位の関係を図-3に示す。試験体 No.1 は、曲げ降伏後の耐力増加は $2\delta_y$ 以降ほとんど無く、 $6\sim 8\delta_y$ から徐々に耐力低下が見られた。それと同時に、圧縮側基部の補強鋼板がはらみ始めるのを確認した。最終的に試験は $16\delta_y$ まで行なったが、補強鋼板ははらみ以外に目立った変状や損傷は見られなかった。試験終了後、砂の充填状況を確認したところ、試験前とほぼ同量の砂が充填されたまま残存しており、水平荷重載荷時の柱部の傾斜に伴う充填砂のこぼれ出しはほとんど無いことを確認した (写真-1)。なお、終局後に載

荷点近傍でかぶりコンクリートの剥離等が見られたが、これは、終局変位後の変形で発生したものである。

試験体 No.2 は、曲げ降伏後も緩やかに耐力増加は続き、6~8 δ_y で最大水平力に達し、それ以降はやや急激な耐力低下を示した。最終的に試験は 14 δ_y まで行なったが、この試験体も補強鋼板ははらみ以外に目立った変状や損傷は見られなかった。試験終了後補強鋼板を切断し四隅コーナー部のモルタルの損傷状況を確認したところ、1D (D: 柱断面高さ) 程度以上の高さではモルタルにはひび割れ等の損傷はほとんど見られず、健全な状態であった (写真-2)。

試験体 No.1・No.2 ともに、じん性率 10 程度の変位レベルでも降伏強度

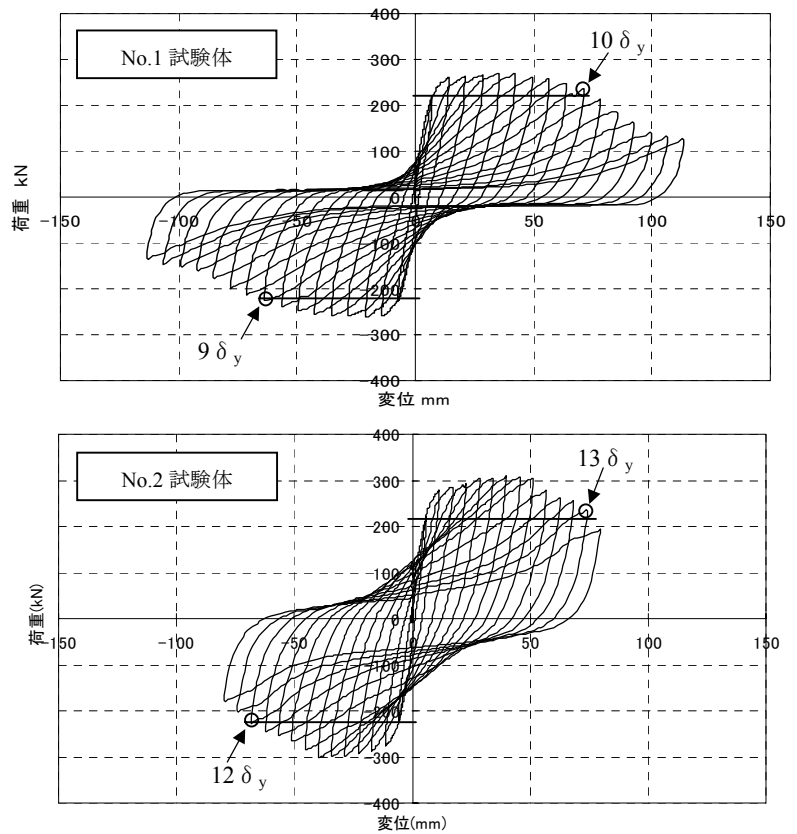


図-3 荷重-変位曲線



(a) 最大荷重時
(6 δ_y 荷重時)



(b) 8 δ_y 荷重時



(c) 終局変位時
(10 δ_y 荷重時)



(d) 16 δ_y 荷重終了時



(e) 試験終了後
砂充填状況



(f) 補強鋼板撤去後

写真-1 No.1 試験体の損傷状況



(a) 最大荷重時
(7δy 荷重時)



(b) 10δy 荷重時



(c) 終局変位時
(13δy 荷重時)



(d) 14δy 荷重終了時



(e) 試験終了後
モルタル充填状況



(f) 補強鋼板撤去後

写真-2 No. 2 試験体の損傷状況

以上の耐力を有しており、曲げ降伏後にも変形性能は十分に有していることがわかる。また、四隅コーナー部のみモルタル注入した試験体 No.2 は、全周を砂充填した試験体 No.1 よりも最大荷重は大きくなった。

3.2 じん性能の評価

表-6 にじん性率 μ ($\mu = \delta_u / \delta_y$) の試験結果を示す。なお、既往の実験結果 (試験体 No. i⁷⁾, ii⁸⁾) も合わせて表記した。これらは、ともに試験体寸法や配筋、補強鋼板厚は試験体 No.2 と同一で、無補強での耐力比は 0.6 程度、補強後の耐力比は鋼板を帯鉄筋換算して評価すると 2.5 程度となるものである。RC 試験体と鋼板との隙間は、試験体 No. i は全周にモルタル注入したもので、試験体 No. ii は砂充填 (水締め) したものである。なお、No. ii 試験体の基部の周りには、試験体 No.1 のように細骨材用砂を敷き詰めておらず、水平荷重荷重時に補強鋼板下端

にできる隙間から砂の漏れが確認されたものである。なお、終局変位は、実験から得られる荷重変位曲線において、試験体の水平荷重の値が降伏荷重を下回らない最大変位とする。

表-6 より、試験体 No.2 は、試験体 No. i と同等の変形性能を有しており、モルタルは四隅コーナー部のみ注入することで、全周にモルタルを注入した場合とほぼ同等の補強効果が得られることが確認できた。また、荷重途中で隙間に充填した砂に漏れが見られた試験体 No. ii は、試験体 No. i と比べると十分な補強効果が得られていないが、砂の漏れ防止を行なった試験体 No.1 は、試験体 No. i と同等の変形性能を得ることができた。なお、試験体 No.1 と試験体 No.2 の比較から、無補強での耐力比が 0.7 程度の場合、補強鋼板と既設 RC 柱の隙間には、四隅コーナー部のみモルタル注入したほうが、砂を充填 (水締め) するよりも大きな変形性能を有すること

表-6 試験結果

No.	耐力比		降伏荷重 P _y (kN)	最大荷重 P _{max} (kN)	降伏変位 δ _y (mm)	終局変位 δ _u (mm)	じん性率 μ
	補強前	補強後					
1	0.69	2.85	219.3	269.7	7.2	71.1	9.92
2	0.67	2.60	220.2	305.2	5.8	71.3	12.27
i	0.62	2.51	252.8	322.4	6.9	64.5	9.35
ii	0.61	2.51	227.9	254.3	7.9	19.4	2.45

※ 試験体 No. i ; f'ck=30.7N/mm², 試験体 No. ii : f'ck=30.1 N/mm²

※ 軸方向鉄筋の降伏強度は試験体 No. i , ii ともに f_{syk}=374 N/mm²

を得た。

4. まとめ

鋼板巻き耐震補強工法における既設 RC 柱と補強鋼板との隙間の充填材の種類、充填方法をパラメータとした正負交番載荷試験を行なった。本試験のパラメータの範囲内ではあるが、得られた知見を以下に示す。

- (1) 若干の帯鉄筋を配置した RC 柱と補強鋼板の隙間全周に砂を充填（水締め）し、載荷中の砂の漏れ出しを防止することで、隙間全周にモルタル注入した場合と同等の変形性能が得られる。
- (2) 帯鉄筋のない RC 柱と補強鋼板の隙間の四隅コーナー部のみにモルタル注入すれば、隙間全周にモルタル注入した場合と同等の変形性能が得られる。
- (3) 今回の試験範囲では、無補強での耐力比が 0.7 程度の場合、RC 柱と補強鋼板の隙間には、四隅コーナー部のみにモルタル注入したほうが、砂を充填（水締め）するよりも大きな変形性能が得られる。

- 3) 津吉毅・石橋忠良・小林将志・田附伸一：鉄筋を柱外周に配置し柱の四隅で定着する既設 RC 柱の耐震補強方法に関する研究，土木学会論文集，No.662/V-49，pp.205-216，2000.11
- 4) 国土交通省鉄道局監修，鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説 コンクリート構造物，pp.133-150，丸善，2004.4
- 5) 二羽淳一郎，山田一字，横沢和夫，岡村甫：せん断補強鉄筋を用いない RC はりのせん断強度式の再評価，土木学会論文集，No.372/V-5，pp.167-176，1986.8
- 6) 石橋忠良，斉藤啓一，寺田年夫：重ね梁のせん断設計，日本国有鉄道構造物設計事務所監修 構造物設計資料，No.84，pp.8-12，1985.12
- 7) 管野貴浩，石橋忠良，大庭光商，山内俊幸：鋼板巻き補強 RC 柱の交番載荷実験，コンクリート工学年次論文集，Vol.18，No.2，pp.113-118，1996
- 8) 松田芳範，管野貴浩，大庭光商，石橋忠良：充填材を各種変えた RC 柱の鋼板巻き補強の交番載荷の実験的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.18，No.2，pp.107-112，1996

参考文献

- 1) 鉄道施設耐震構造検討委員会：既存の鉄道構造物に係る耐震補強の緊急措置について，1995. 7. 26
- 2) 土方康裕・小林薫・吉田徹・石橋忠良：柱一面から鉄筋を後挿入した RC 柱の補強効果の実験的研究，コンクリート工学年次論文 Vol.23，No.3，pp.1309-1314，2001