

外部スパイラル鋼線巻立耐震補強工法 (A P A T工法) の開発

柴田輝和* 中村敏晴**
高橋一成*** 向 広吉****

1. まえがき

兵庫県南部地震では山陽新幹線および在来線の RC ラーメン高架橋や RC ラーメン橋台の柱に大きな被害が発生した。これらの応急復旧や緊急耐震補強においては、せん断破壊先行型の RC ラーメン高架橋等の柱を対象に、鋼板巻立て工法が用いられてきた。耐震補強対策は、必要個所で鋭意おこなわれているが、未対策の柱もいまだ多く存在しているのが現状である。一方、高架下を店舗等に活用している箇所や、重機が進入できない箇所などで、鋼板巻立て工法が適用できない箇所も多いことから、人力施工による耐震補強工法に対する期待も大きい。これら未対策箇所における耐震補強を加速化させるためにも、さらに経済的で施工性の良好な耐震補強工法の開発が強く望まれている。

鋼板巻立て工法に代わる耐震補強工法としては、炭素繊維シート巻立て工法¹⁾、アラミド繊維シート巻立て工法²⁾、および奥村組開発のスパイラル筋巻立て工法³⁾等がある。しかし、鋼板巻立て工法を含めこれらの各工法は柱全面を覆うため、地震発生時の緊急点検において、柱の損傷の有無やその程度を容易にかつ迅速に把握することは困難である。

そこで、既設 RC 柱の耐震補強工法として

① 変形性能の十分な向上が期待できること ② 地震の影響による損傷の有無や程度が容易に視認できること ③ 耐震補強実施後も既設 RC 柱の経年劣化の把握が容易なこと ④ 既設 RC 柱の中性化抑制効果が期待できること ⑤ 鋼板巻立て補強工法よりも、さらに安価であること ⑥ 普通作業員が人力で容易に施工できること

をコンセプトに、短形断面の柱の4側面に、ポリマーセメントモルタルを介して、楕形のプレキャストコン

クリートブロックを張り付け、その外周をスパイラル状に加工した亜鉛メッキ鋼より線（以下「スパイラル鋼線」と記す）で巻立て補強する外部スパイラル鋼線巻立耐震補強工法（A P A T工法：Aseismic reinforcements by Precast blocks and Additional Tendons）を西日本旅客鉄道㈱、ジェイアール西日本コンサルタンツ㈱と共同開発した。

本報告はA P A T工法の基本性能を確認する正負交番水平載荷試験結果と、A P A T工法の実用化を目指し軽量化したプレキャストブロックを用いた正負交番水平載荷試験結果について述べ、省力化とともにスパイラル鋼線の緊張管理の定量化を目指して開発したスパイラル鋼線自動巻付機ならびにA P A T工法の施工管理項目について述べるものである。

2. 水平載荷試験その1（円形セグメント使用）

A P A T工法の耐震性能を確認するために、図-1～3に示す試験体を用いて正負交番水平載荷試験を実施した。

補強対象とする既設 RC 柱は、耐震設計指針（案）解説（昭和54年）⁴⁾以前の基準（以下「旧基準」と記す）に基づいて設計された RC ラーメン高架橋の柱（断面寸法 80 cm×80 cm）である。試験体は、既設柱の断面寸法を 5/8 に縮小したもの（断面寸法 50 cm×50 cm）であり、軸方向鉄筋 D22（SD295）20 本と帯鉄筋 φ6（SR235）@94 mm を配置し、補強がなされない場合にはせん断破壊するものである。

プレキャストブロックの形状は、外周に巻立てたスパイラル鋼線の拘束力が既設 RC 柱のコンクリートに効果的に伝達されるように巻立て後の断面形状が円形となるようにした（以下「円形セグメント」と記す）。

*関西支社土木工務部 **技術研究所 ***東京支社土木技術部 ****技術本部技術開発部

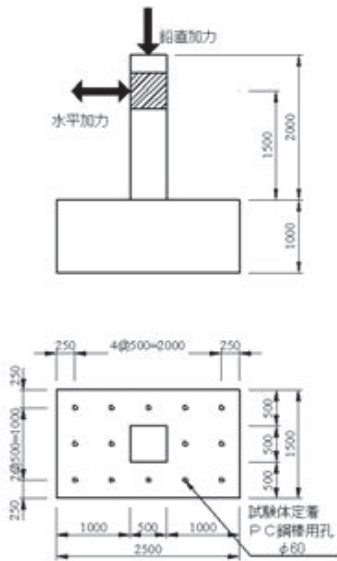


図-1 試験体構造図
(単位 mm)

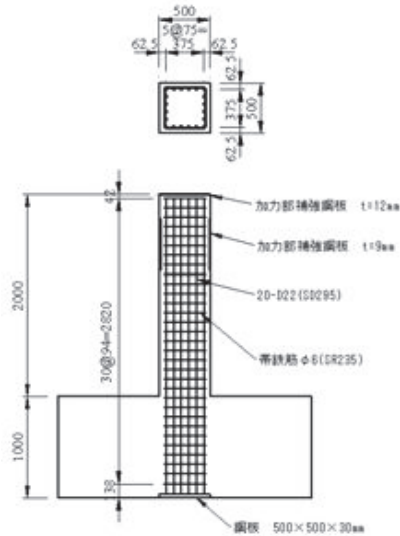


図-2 試験体配筋図
(単位 mm)

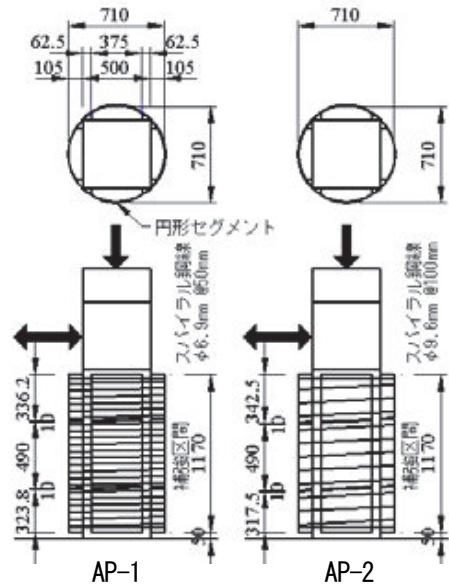


図-3 補強詳細図
(単位 mm)

表-1 試験体の種類と仕様

試験体名	N-1*	AP-1	AP-2
補強方法	補強なし	N-1をAPAT工法 円形セグメントで補強	
柱形状	断面寸法 50cm×50cm、有効高さ (d) 44cm せん断スパン (a) 150cm、a/d=3.4		
鉄筋	軸方向鉄筋	D22 20本 (SD295)	
	帯鉄筋	φ6@94mm (SR235) 帯鉄筋比 0.12%	
コンクリート	設計基準強度 21 N/mm ²		
使用補強材	補強なし	亜鉛メッキ鋼より線 2号(a)1種A級	
		φ6.9@50mm	φ9.6@100mm
		補強筋比 0.23%	
		セグメント設計基準強度 40N/mm ²	
軸方向圧縮応力度	0	1 N/mm ²	
柱下端の無補強区間		5cm	

*N-1 試験体の載荷試験は平成8年度実施³⁾

2.1 試験体の種類

表-1に試験体の種類と仕様を示す。

試験体はAPAT工法の耐震補強効果を確認することを目的に円形セグメントをスパイラル鋼線で巻立てた2体である。この2体の試験体は、スパイラル鋼線の巻立て間隔の相違が変形性能やひび割れ発生に与える影響を確認することを目的に、AP-1 (スパイラル筋配置間隔 50 mm)、AP-2 (スパイラル筋配置間隔 100 mm) とした。スパイラル鋼線量は文献³⁾に示されるせん断補強に必要な量とした。なお、AP-1、AP-2でスパイラル鋼線の間隔は異なるが鋼線量はほぼ同量である。

また、円形セグメントに用いるコンクリートの設計基準強度は、プレキャスト工場における市場性を考慮

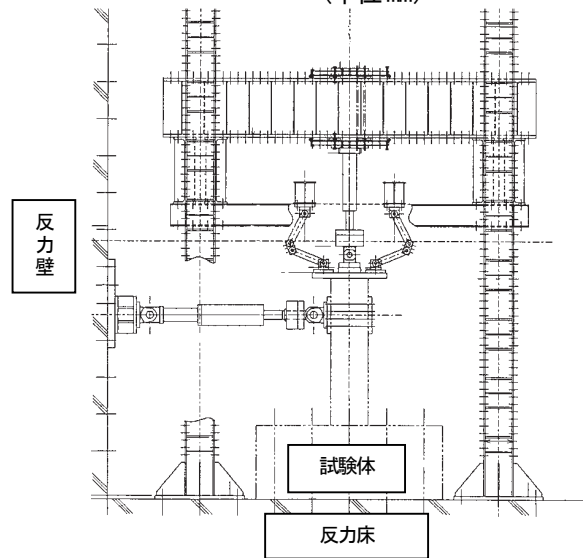


図-4 載荷装置

して 40N/mm²とした。

2.2 載荷方法

載荷方法は、図-4に示す載荷装置を用いて、試験体頭部に所定の軸力を載荷した後に正負交番の水平力を加えるものである。載荷は、軸方向鉄筋の降伏時点を降伏変位 δ_y として、降伏変位の1倍、2倍、4倍、6倍 (以後降伏変位の偶数倍) の変位を各3サイクルずつ与える変位制御でおこなった。

2.3 試験結果

試験体の水平荷重-水平変位の関係は、図-5に示すように、AP-1、2ともに 12 δ_y まで水平荷重がほぼ一定のじん性に富む変形性状を示した。なお、図-

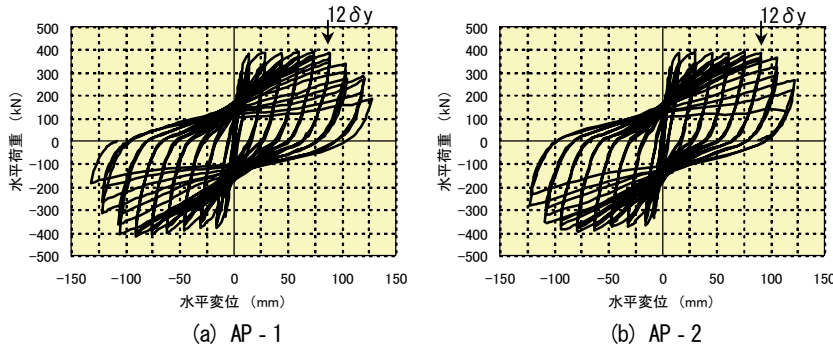


図-5 水平荷重-水平変位 (履歴)

5、6より、AP-1とAP-2の荷重-変位性状に特筆すべき差異は見られないことがわかる。

また、図-6に示す無補強のN-1との比較により本工法の優れた耐震補強効果が明らかである。

試験体の損傷状況について述べる。まず、 $1\delta y$ までに $1.9D$ (950 mm D : 柱の断面高さ) までの柱下端部に曲げひび割れが生じた。この時点で円形セグメントにはひび割れは見られなかった。その後、柱中間部の曲げひび割れの下方への進展および $4\delta y$ からの柱曲げひび割れに付随する円形セグメントのひび割れ発生等の現象を伴う柱下端の塑性ヒンジの形成により、 $12\delta y$ まで水平荷重がほぼ一定の安定した状態が続く。 $12\delta y$ 以降は柱下端から $0.34D$ (170 mm) 区間の軸方向鉄筋の座屈、かぶりコンクリートのはらみ出しに伴う最下段の円形セグメントのはらみ出しがあり、柱下端から約 $0.3D$ (150 mm) 区間のコンクリートが剥落して曲げ破壊した。なお、軸方向鉄筋は柱基部において座屈したが破断はしなかった。この損傷状況はAP-1とAP-2で特筆すべき差異は見られなかった。

帯鉄筋のひずみ分布、スパイラル鋼線のひずみ分布を図-7に示す。図は縦軸に柱基部からの高さを示し、横軸にひずみの値を示したものである。柱基部より $0.7D\sim 1.5D$ ($360\sim 740\text{ mm}$) までの帯鉄筋が $6\delta y$ で降伏した。スパイラル鋼線の方は、柱基部より $1.1D$ (530 mm) までのひずみ増加が $6\delta y$ 以降に顕著である。すなわち、当初は帯鉄筋が主にせん断破壊に抵抗し、帯鉄筋が降伏するとスパイラル鋼線が主にせん断破壊に抵抗するようになるものと考えられる。なお、スパイラル鋼線の最終ひずみは降伏ひずみ以下であった。

3. 水平載荷試験その2 (扁平セグメント使用)

優れた耐震補強効果を持つAPAT工法の実用化を

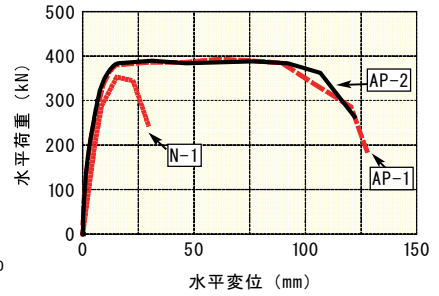


図-6 水平荷重-水平変位 (包絡)

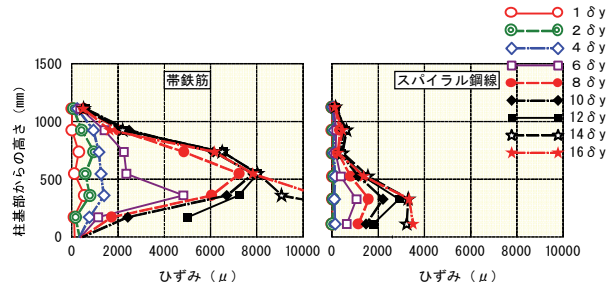


図-7 せん断補強材のひずみ分布 (AP-2)

目指し、コストダウンや施工性向上を図り円形セグメントの厚さを半減した扁平なセグメントを開発した(以下「扁平セグメント」と記す)。この形状は、円形セグメントに比べ拘束効果の低下により変形性能の改善効果の減少が懸念されるため、正負交番水平載荷試験を実施した。

3.1 試験体の種類

表-2に試験体の種類と仕様を示し、図-8に補強詳細を示す。

補強対象とする既設RC柱は前章と同様のものであり、3試験体ともに扁平セグメントとスパイラル鋼線で補強した。なお、スパイラル鋼線の間隔は前章の試験結果と施工性を考慮して 100 mm とした。AP-3は、セグメント形状の差が耐震補強効果に与える影響を検討するものであり、前章のAP-2に比べセグメント厚さが半減したこと以外は同一である。AP-4は、柱下端に設けた $0.25D$ (125 mm) の無補強区間が耐震補強効果へ与える影響を検討するものであり、補強施工時の掘削省略等に対処するものである。AP-5は、変形性能が低下すると言われる高軸力下における耐震補強効果を確認するものであり、地下鉄の中柱等への展開を図るものである。

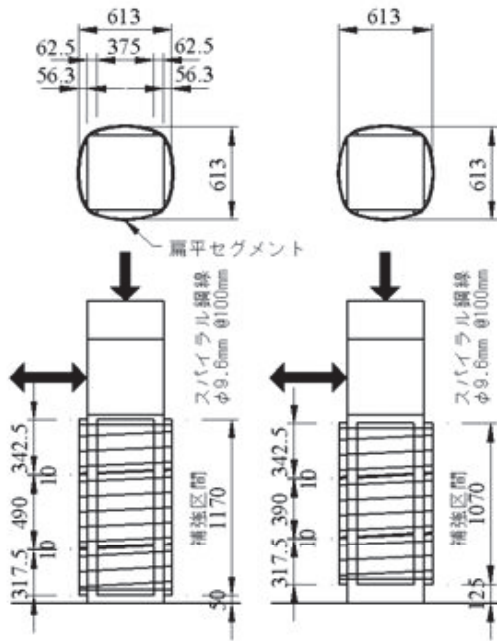
載荷方法は前章に示したものと同様である。

3.2 試験結果

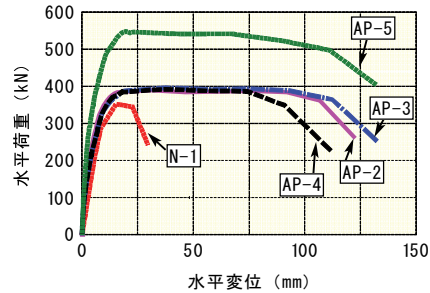
試験体の水平荷重-水平変位の関係は、図-9に示

表一 2 試験体の種類と仕様

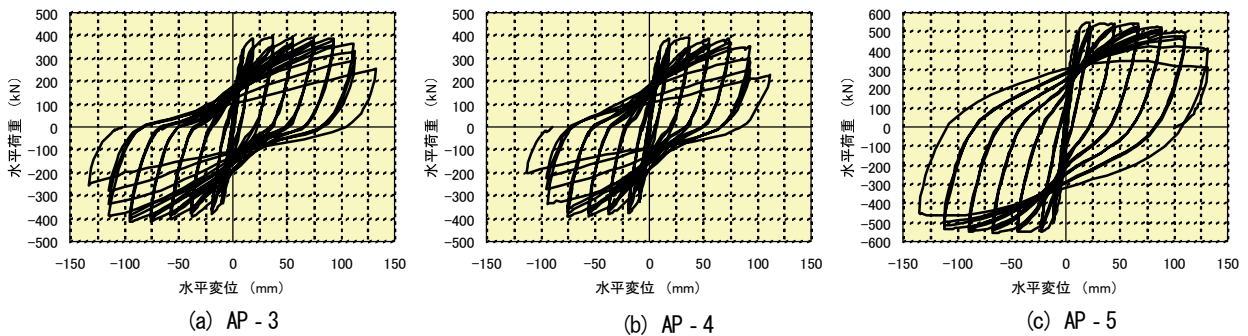
試験体名	AP - 3	AP - 4	AP - 5
補強方法	N - 1 を APAT 工法 扁平セグメントで補強		
柱形状	断面寸法 50cm×50cm、有効高さ (d) 44cm せん断スパン (a) 150cm、a/d=3.4		
鉄筋	軸方向鉄筋 D22 20本 (SD295) 帯鉄筋 $\phi 6@94\text{mm}$ (SR235) 帯鉄筋比 0.12%		
コンクリート	設計基準強度 21 N/mm ²		
使用補強材	亜鉛メッキ銅より線 2号 (a) 1種 A級		
	$\phi 9.6@100\text{mm}$ 補強筋比 0.23%	$\phi 10.5@100\text{mm}$ 補強筋比 0.27%	
	セグメント設計基準強度 40N/mm ²		
軸方向圧縮応力度	1 N/mm ²		7 N/mm ²
柱下端の無補強区間	5cm	12.5cm 0.25D	5cm



図一 8 補強詳細図 (単位 mm)



図一 10 水平荷重-水平変位 (包絡)



図一 9 水平荷重-水平変位 (履歴)

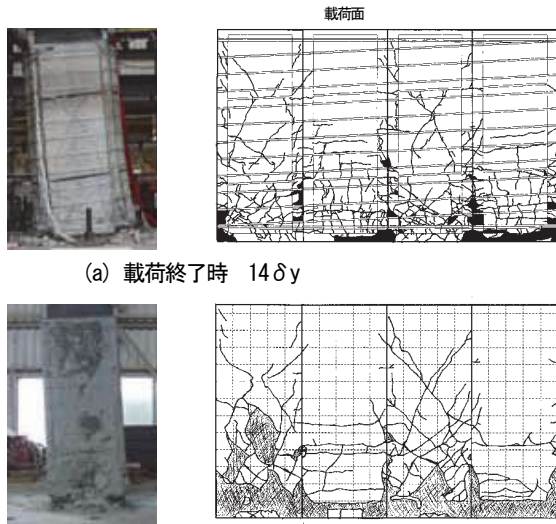
すように、AP - 3 で $10\delta_y$ 、AP - 4 で $8\delta_y$ 、AP - 5 では $10\delta_y$ まで水平荷重がほぼ一定のじん性に富む変形性状を示した。セグメント形状の差が耐震補強効果に与える影響は、図一 10 に示すように、円形セグメントの AP - 2 と扁平セグメントの AP - 3 の変形性能がほぼ同等であることから、小さいことがわかる。柱下端に設けた無補強区間が耐震補強効果へ与える影響は、図一 10 に示す無補強区間の小さい AP - 3 と無補強区間が $0.25D$ (125 mm) の AP - 4 の比較より、無補強区間が大きくなると変形性能は僅かではあるが小さくなることわかる。高軸力下における耐震補強効果については、図一 10 に示すように、 7N/mm^2 の高軸応力度を載荷した AP - 5 の変形性能が AP - 3 と遜色ない結果となっていることから、APAT 工法は高軸力下でも

優れた変形性能を示す工法であることがわかる。

試験体の損傷状況は、扁平セグメントを用いた AP - 3~5 いずれも、円形セグメントを用いた AP - 1、2 同様に、曲げひび割れの発生、鉄筋降伏後の柱下端の塑性ヒンジ形成に伴う水平荷重一定の安定した状態、その後の軸方向鉄筋の座屈、かぶりコンクリートのはらみ出しに伴う最下段の扁平セグメントのはらみ出し、柱下端のコンクリート剥落と続く曲げ破壊であった。

ただし、円形セグメントの場合は終局状態においてもセグメントには数本の曲げクラックがあるのみであるが、扁平セグメントの場合は初期の $2\sim 4\delta_y$ の時期で、セグメントに多数のせん断クラックや曲げクラックが生じる結果となった。

AP - 3 について試験終了時のひび割れ状況と、扁平



(a) 載荷終了時 14δy

(b) 扁平セグメント撤去後

図-11 試験体の損傷状況 (AP-3)

表-3 水平載荷試験結果

試験体	N-1	AP-1	AP-2	AP-3	AP-4	AP-5
降伏荷重 P_y (kN)	286	303	322	333	326	494
降伏変位 δ_y (mm)	8.4	7.5	7.6	9.3	9.0	11.2
最大荷重 P_{mu} (kN)	353	393	390	396	393	548
終局変位 δ_u (mm)	23	115	113	118	95	112
じん性率 δ_y / δ_u	2.7	15.4	14.8	12.7	10.6	10.0

荷重正の値で算定
 降伏荷重：最外縁主鉄筋ひずみが降伏ひずみに達した時点の水平荷重
 降伏変位：降伏荷重時の水平変位
 終局変位：水平荷重-水平変位曲線の包絡線において、水平荷重が降伏荷重を下回らない最大の変位
 じん性率：終局変位を降伏変位で除した値

セグメントを撤去した状態の既設 RC 柱に生じたひび割れ状況を図-11 に示す。この図より、柱の隅角部や扁平セグメントのひび割れ発生状況は、既設 RC 柱に生じているひび割れの状況を示す指標となることがわかる。

表-3 に水平載荷試験結果を示す。表より各試験体のじん性率は、円形セグメントを用いた AP-1、2 で 15 程度、扁平セグメント用いた AP-3 で 13 程度、無補強区間が 0.25D (125 mm) の AP-4 で 11 程度、高軸力下の AP-5 で 10 程度となることがわかる。

図-12 に APAT 工法と他の耐震補強工法との比較を示す。PL-1 は N-1 を鋼板 (t=3.2mm) で巻立補強したものである。CF-1 は N-1 を炭素繊維シート (t=0.167 2 層) で巻立補強したものである。図より扁平セグメントを用いた AP-3 は鋼板巻立て補強および炭素繊維シート巻立て補強と同等以上の変形性能を有することがわかる。また、無補強区間が 0.25D (125mm) の AP-4 でも一般的な鋼板巻立補強と同等

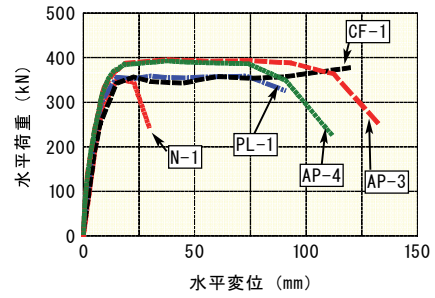


図-12 各耐震補強工法の水平荷重-水平変位 (包絡) 比較



写真-1 スパイラル鋼線自動巻付機

の変形性能を有することがわかる。

4. 施工法

APAT 工法により山陽新幹線の RC ラーメン高架橋柱 216 本を耐震補強した。施工にあたっては下記の施工手順を標準化するとともに、スパイラル鋼線巻きつけの省力化およびスパイラル鋼線の定量的な緊張管理を目的に、スパイラル鋼線自動巻付機 (写真-1 参照) を開発した。自動巻付機は鋼より線巻き取り・取り出しと緊張力導入等の複合機能を持ち、所定の緊張力 (1KN~2KN) 導入が可能であるほか、人力運搬ができるように分割可能な構造 (最大 35kg/個) とした。

施工手順は以下を標準とする。

- ① 準備工 — 柱の原寸を確認するとともに支障物の移設撤去をおこなう。
- ② 柱表面処理工 — 柱表面の劣化部の補修をおこない、地中部の土砂、表面に付着している汚れ・異物等を除去した後、水洗い等の清掃をおこなう。
- ③ 扁平セグメント取付工 — 柱にポリマーセメントモルタル (t=4~5mm) を塗布し、型枠パイプレーターの振動を利用して扁平セグメントを密着させる。扁平セグメント取り付け後は一段毎に締めつ

けによる仮止めを施す。補強範囲は基礎+5cm～上梁-5cmとし、扁平セグメント間は1cmの離隔を確保する

- ④ スパイラル鋼線巻付工 — 自動巻付機を用いて扁平セグメントに設けられた巻付ガイド溝に沿ってスパイラル鋼線を巻き付けた後緊張力を導入する。

緊張力は1kN程度を標準とする。スパイラル鋼線は、所定径の80%程度の径でスパイラル状に加工し、人力で運搬できる重量(約60kg/巻)に分割搬入する。スパイラル鋼線の定着は端部を2重に巻き、柱隅角部4箇所をワイヤーグリップ(JISB2809)で緊結することによる。スパイラル鋼線の継ぎ手は突合せ継ぎ手ができる専用の曲線用グリップを用いておこなう。これはスパイラル鋼線と同一材料の全強摩擦継ぎ手で、人力施工が可能なものである。

- ⑤ 保護コンクリート工 — 地中部には必要に応じて保護コンクリートを設置する。保護コンクリートの厚みは10cmとする。また、保護コンクリート底部は基礎との離隔5cmを確保する。
- ⑥ 復旧工 — 準備工で移設・撤去した各種設備・施設は所定の箇所に復旧する。

5. まとめ

A PAT工法の基本性能を確認する正負交番水平載荷試験とA PAT工法の実用化を目指し軽量化した扁平セグメントを用いた正負交番水平載荷試験より以下のことが明らかになった。

- ① A PAT工法により補強された柱は、曲げ破壊の変形性能に富む破壊性状を示した。そのじん性率は円形セグメントを用いた場合で15程度、セグメント厚さを円形の約半分とした扁平セグメントで13程度と極めて良好である。
- ② A PAT工法により耐震補強された柱は、鋼板巻立て補強工法、炭素繊維シート巻立て補強工法による柱の変形性能と同等以上である。
- ③ スパイラル鋼線の間隔の違いは、破壊性状、変形性状に影響しない。
- ④ A PAT工法により耐震補強された柱は、柱コーナー部分の扁平セグメントのない部分および扁平

セグメントのひび割れより柱の損傷状況を把握することが可能である。これは柱の損傷状況を目視できない鋼板巻立て工法、炭素繊維シート巻立て工法に比べ地震発生時の緊急点検に有利である。

- ⑤ 柱下端に無補強区間0.25D(D:柱の断面高さ)を有しても一般的な鋼板巻立補強と同等の変形性能を有する。
- ⑥ 高軸力下においてもじん性率10程度と優れた変形性能を示す。

6. あとがき

既往の耐震補強工法に比べ、より経済的で施工性のよい耐震補強工法の開発を目的にA PAT工法を開発した。この工法は、耐震補強工法としての基本的な性能を十分満足しているとともに、地震発生時の緊急点検や日常の維持管理の容易さを確保することのできるものである。試験体数が少ないことから変形性能を定量的に評価するまでには至っていないが、工法の普及に向けての課題と考え、取り組んでいく予定である。

【参考文献】

- 1) (財) 鉄道総合技術研究所、「炭素繊維シートによる鉄道高架橋柱の耐震補強工法 設計・施工指針」、平成8年7月
- 2) (財) 鉄道総合技術研究所、「アラミド繊維シートによる鉄道高架橋柱の耐震補強工法 設計・施工指針」、平成8年12月
- 3) (財) 鉄道総合技術研究所、「既存鉄道コンクリート高架橋柱等の耐震補強設計・施工指針—スパイラル筋巻立工法編—」、平成8年12月
- 4) (社) 日本鉄道施設協会、「耐震設計指針(案) 解説日本国有鉄道編」、昭和54年7月