

◆ 特集：動的実験施設を活用した研究開発 ◆

橋脚の耐震補強载荷実験

中村敏晴* 廣中哲也** 柴田輝和*** 松田好史**** 北後征雄*****

1. はじめに

鉄筋コンクリート (以下、RC と記す) ラーメン高架橋の耐震補強工法として、①スパイラル筋巻立工法 (既設 RC 柱にフープ状の高強度鉄筋を巻立て後、モルタルを吹付けて補強) と、②外部スパイラル鋼線巻立工法 (既設 RC 柱にプレキャストブロックを設置後、その外側に鋼より線を巻立てて補強) を開発した。これまでに、反力床・壁と自動制御加力装置を用いた载荷実験を行い、その耐震補強効果を確認した。更に、施工実験により施工性を実証し、実補強工事へ適用した。

本報では、耐震補強効果を確認するために実施した载荷実験について、工法毎に報告する。

2. スパイラル筋巻立工法

帯鉄筋量が少なく、耐震補強の必要な既設 RC 柱の代表的な補強工法に鋼板巻立工法が採用され

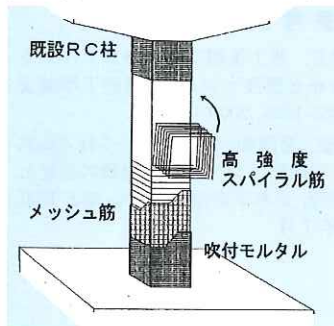


図-1 工法概念図

ているが、より安価で施工性の良い耐震補強工法として、スパイラル筋巻立工法を開発した¹⁾。

この工法は、図-1 に示すように、あらかじめフープ状に加工された高強度スパイラ

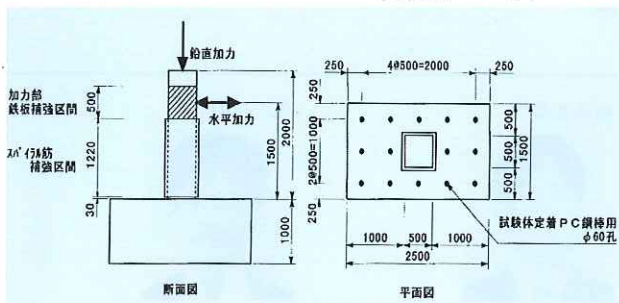


図-2 試験体形状 (単位 mm)

ル筋を、ひねりを加えながら既設柱の外面に巻立て、メッシュ筋を設置後、その上にモルタルを所定の厚さまで吹付け、コテで仕上げる工法である。

以下に、本工法の変形性能、補強効果および靱性率の評価方法を把握するために実施した载荷実験結果について報告する。

2.1 実験概要

対象とする既設柱は「耐震設計指針 (案) 日本国有鉄道編 昭和 54 年」以前の基準に基づいて設計された RC 高架橋の柱で、せん断破壊が予想されるものである。表-1 に試験体の諸元、図-2 に試験体形状を示す。試験体は、既設柱が 1 体、スパイラル筋の量および軸応力度 (地震時の軸力変動を考慮) をパラメータとしたスパイラル筋巻立て補強した 6 体、比較対象として帯鉄筋量を増やした曲げ破壊型が 1 体、鋼板および炭素繊維シートで補強した 2 体とした。

载荷方法は、図-3 と表-2 に示すものを使用し、試験体頭部に一定の軸力を加えた状態で交番の水平力を加えた。载荷は、主筋のひずみが降伏ひずみに達した時点を降伏変位 (δ_y) とし、それ以降、降伏変位の偶数倍の変位を変位制御で各 3 ループずつ载荷した。载荷の終了は、水平荷重が荷重-変位曲線の包絡線において最大水平荷重の 50% を下回る時点とした。

2.2 実験結果

試験結果一覧を表-3 に、各試験体の荷重-変位

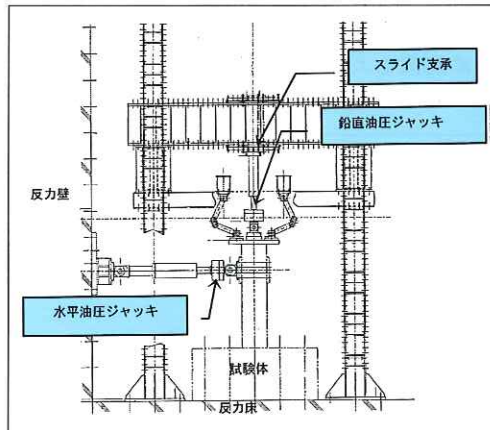


図-3 载荷装置図

表-1 試験体の諸元

試験体名	N1	N2	PL1 ^{*1)}	CF ^{*2)}	SP1 ^{*3)}	SP2	SP3	SP4	SP5	SP6
補強方法	補強無 (既設)	帯鉄筋 増加	銅板 巻立	炭素繊維 巻立	スパイラル筋巻立					
帯鉄筋 (帯筋比)	φ6 SR235 @94mm (0.12%)	D13 SD295 @75mm (0.68%)			*3)	スパイラル筋@31.3m, スパイラル筋比0.33%				
					φ6 SR235 @94mm (0.12%)	無し				φ6 SR235 @94mm (0.12%)
コンクリート	断面寸法50cm×50cm, 高さ150cm, 設計基準強度21N/mm ²									
吹付けモルタル	無し				厚40mm, 強度50N/mm ² , 自由収縮量－600×10 ^{－6} 以下					
載荷軸応力度 (N/mm ²)	0					圧縮載荷		引張載荷		
						+4	+1	－2		

*1) PL1: SS400 t=3.2mm 30mm モルタル注入

*2) CF1: 炭素繊維 t=0.165mm 2巻き

*3) SP1: スパイラル筋 @62.5mm スパイラル筋比 0.17%

曲線を図-4 に示す。既設柱の試験体 (N1) は、脆性的なせん断破壊性状を呈し、補強した試験体は、いずれも靱性に富む曲げ圧縮破壊の性状を示した。軸力を載荷しない場合、降伏荷重および最大荷重は、いずれの試験体もほぼ同じ値を示した。また、銅板巻立て (PL1) とスパイラル筋巻立て (SP2) の終局変位および荷重-変位曲線は、ほぼ同等であることがわかる。軸力を載荷した場合 (試験体 SP2~SP6)、圧縮軸力が大きくなるにしたがって降伏荷重、降伏変位、最大荷重は増加し、終局変位は減少する傾向が認められる。

図-5 に軸応力度と靱性率の比 (実験値/計算値) の関係を示す。ここに、靱性率の計算値には、既往の RC 部材の靱性率算定式「鉄道構造物等設計標準・同解説 コンクリート構造物 平成 4 年」(以下、RC 標準式と称す) を用いた。ただし、試験体の断面寸法は補強前の寸法とし、スパイラル筋の受け持つせん断耐力は、帯鉄筋と同じトラス理論から求める算定式を用いた。また、スパイラル筋の降伏強度の上限値を $25f'_{ck}$ (N/mm²)=750N/mm² (f'_{ck} : コンクリートの設計基準強度) とした²⁾。軸力の影響により、実験値と計算値の比は、引張軸力下では大きく、高圧縮軸力下では小さくなっており、靱性の評価には軸力の影響を考慮する必要があると考えられる。

図-6 に軸力補正後の計算靱性率と実験値の

表-2 載荷装置の性能

機器名	性能
反力床	寸法: 14m(L)×19m(W)×4.6m(D) 許容曲げモーメント: 110,000kN・m
反力壁	寸法: 13m(L)×4.5m(W)×12m(H) 許容曲げモーメント: 22,000kN・m
鉛直油圧ジャッキ	最大出力: 押し 1,000kN, 引き 500kN ストローク: ±250mm
水平油圧ジャッキ	最大出力: 押し 1,000kN, 引き 1,000kN ストローク: ±250mm
スライド支承	許容荷重 1,000kN ストローク: ±250mm

応力度が 0 の場合、RC 標準式の靱性率になり、釣合い破壊時の軸応力度が作用する場合、靱性率が 1 になると仮定し、直線的に靱性率を低減させた (式 (1) 参照)。

$$\mu = \mu_0 + (1 - \mu_0) \cdot (\sigma_0 / \sigma_b) \quad (1)$$

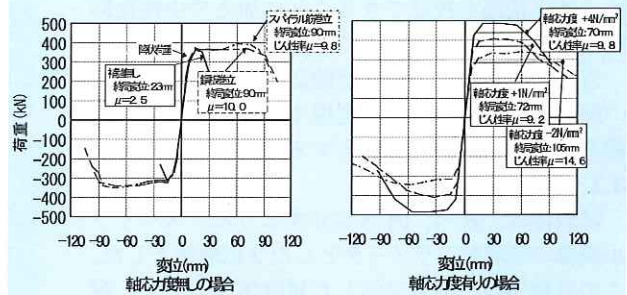
 μ_0 : RC 標準式で算定される補強後の靱性率 μ : 軸力の影響を考慮した靱性

図-4 荷重-変位曲線

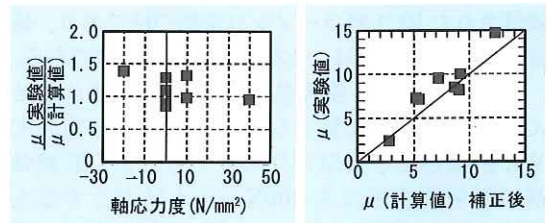


図-5 軸応力度と靱性率比

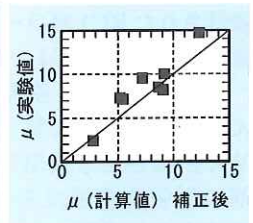


図-6 軸力補正後の靱性率

表-3 試験結果一覧表

試験体名	N1	N2	PL1	CF1	SP1	SP2	SP3	SP4	SP5	SP6
補強方法	補強無	帯鉄筋 増加	銅板 巻立	炭素繊維 巻立	スパイラル筋巻立					
軸応力度 (N/mm ²)	0					圧縮載荷		引張載荷		
						+4	+1	-2		
降伏荷重 (kN)	292	307	310	295	326	309	421	335	345	259
降伏変位 (mm)	9.2	8.9	8.5	9.1	8.2	7.9	9.3	7.8	8.6	7.2
最大荷重 (kN)	360	380	380	389	400	390	494	417	426	343
終局変位 (mm)	23	75	90	120	75	90	70	72	78	105

δ_0 : 作用軸圧縮応力度

δ_b : 釣合い破壊時の軸圧縮応力度

図-6によれば、補正後の計算靱性率は、高圧縮軸力下および引張軸力下の実験値についても比較的精度良く評価していることがわかる。

3. 外部スパイラル鋼線巻立工法

外部スパイラル鋼線巻立工法 (APAT 工法 : Aseismatic reinforcements by Precast blocks and Additional Tendons) は、RC ラーメン高架橋の耐震補強工法として考案したものである。

この工法は、図-7に示すように、既存高架橋矩形柱の周囲に、楕形状に製作したプレキャストコンクリートブロック (以下 CB と記す) を設置し、その周囲に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) を巻立て、RC 柱の靱性の確保を狙うものである。本工法は、鋼板巻立工法に比べ安価であり、地震時の柱の被害状況も視認できることに加えて中性化抑制効果も期待できるものである。

以下に、本工法の靱性能確認とスパイラル鋼線の間隔と靱性能の関係を把握するために実施した載荷実験結果について報告する。

3.1 実験概要

試験体は、表-4、図-8に示すように、スパイラル鋼線の間隔をパラメータとした2試験体とした。この試験体は、前章に示した試験体と同一で、耐震設計指針 (案) (昭和54年) 以前の基準に基づいて設計された RC1 層ラーメン高架橋の柱であり、補強されない場合には、せん断破壊するものである。

補強スパイラル鋼線量は指針¹⁾に示されるせん断補強に必要な量とした。この方法は高強度せん断補強筋を使用した場合でも、せん断補強筋の引張降伏強度を 400N/mm^2 以下とするものである。必要となるスパイラル鋼線量を、試験体 SWS-1 は $\phi 6.9\text{mm}@50\text{mm}$ 、試験体 SWS-2

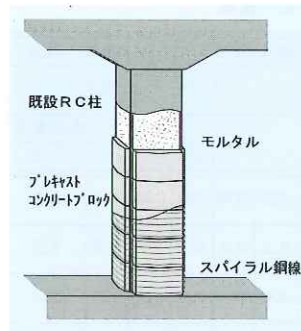


図-7 APAT 工法概念図

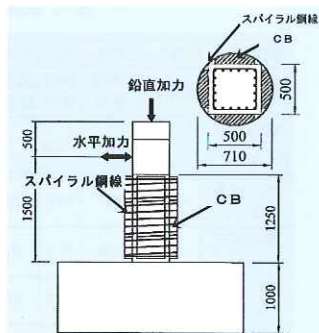


図-8 試験体構造図

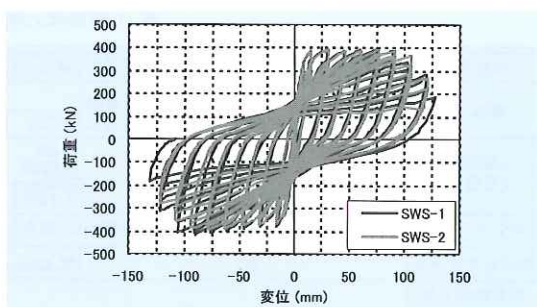


図-9 水平荷重-水平変位 (水平加力位置)

表-4 試験体の種類

試験体名		SWS-1	SWS-2
スパイラル鋼線	亜鉛メッキ鋼より線 2号1種 引張強度		
	$\phi 6.9\text{mm}@50\text{mm}$	$\phi 9.6\text{mm}@100\text{mm}$	
	帯鉄筋比 0.23%		
CB	形状	楕形	
	コンクリート	設計基準強度 40N/mm^2	
柱	形状	断面寸法 $50\text{cm} \times 50\text{cm}$ 高さ 150cm	
	コンクリート	設計基準強度 21N/mm^2	
	主鉄筋	20-D22 (SD295)	
	帯鉄筋	$\phi 6 \text{ SR235 } @94\text{mm}$ 帯鉄筋比 0.12%	
載荷軸応力度		圧縮載荷 1N/mm^2	

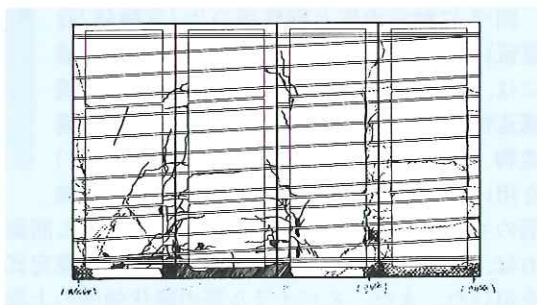


図-10 終局時ひび割れ観察展開図 (SWS-2)

は $\phi 9.6\text{mm}@100\text{mm}$ で巻立てた。載荷方法は、図-3に示すように、試験体を PC 鋼棒で定着し、試験体頭部に 1N/mm^2 の一定圧縮軸力を加えた状態で、交番の水平力を加えた。載荷は変位制御で、降伏変位 (主鉄筋降伏) の 1, 2, 4, 6, ... 倍、それぞれ 3 ループとした。用いた載荷装置は前章と同一のものである。

3.2 実験結果

図-9に加力部の水平荷重-水平変位曲線、図-10に終局時のひび割れ観察図を示す。破壊状況は、両試験体ともほぼ同様の曲げ破壊で、①曲げクラックの発生、②水平変位 7.7mm ($1\delta_y$) 程度で主鉄筋が降伏、③その後水平荷重がほぼ一定で安定した靱性を示し、④終局は、水平変位 108mm

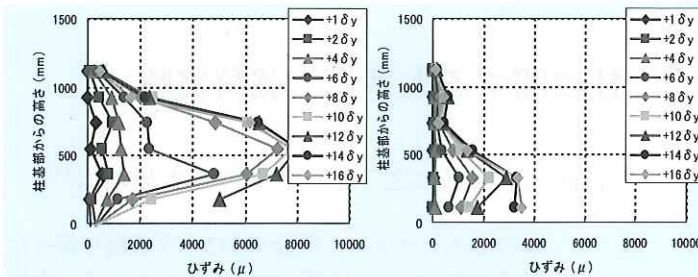


図-11 帯鉄筋・スパイラル鋼線のひずみ分布 (SWS-2)

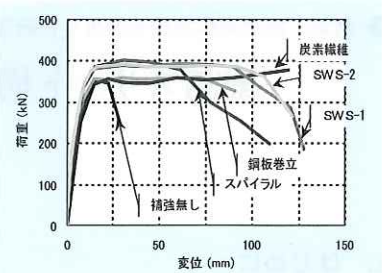


図-12 荷重-変位曲線の比較

(14 δy)以降に、柱下部のCBがはらみ出し、柱下端の被りコンクリートが剥落して終局に至った。両試験体の水平荷重-水平変位曲線は、同様の形状を示し、吸収エネルギーも大きく安定した紡錘形を示している。

帯鉄筋、スパイラル鋼線のひずみ分布を図-11に示す。図より、帯鉄筋は柱基部より35～55cm付近のひずみが大きく4 δy 以降で降伏ひずみ(3,600 μ)を越え、これとほぼ同時にスパイラル鋼線のひずみは増大するが終局状態でも降伏ひずみ(7,000 μ)を越えないことがわかる。

図-12に前章に示した載荷実験結果との比較を示す。図より、APAT工法は、他のいずれの補強工法より優れた変形性能を有することがわかる。

4. まとめ

本実験により得られた結果を以下に示す。

- (1) スパイラル筋巻立により補強した試験体(スパイラル筋比0.17～0.33%)は、鋼板巻立により補強した試験体($t=3.2\text{mm}$)と同等の変形性能および補強効果を有することを確認した。
- (2) 今回の実験では、スパイラル筋巻立により補強した試験体の靱性率は、RC標準式により比較的精度良く評価することができ、高圧縮および引張軸力下の軸力に対する補正は、土木学会式でおおむね評価することが可能であった。
- (3) 外部スパイラル鋼線巻立工法により補強した

試験体は、確実にせん断補強され、その靱性率は14～15を示し、既往の耐震補強工法に比べて良好であった。

- (4) 外部スパイラル鋼線巻立工法のスパイラル鋼線間隔の違いは、破壊性状、変形状に影響しないことが明らかになった。

5. おわりに

スパイラル筋巻立工法は、これまでにRCラーメン高架橋に1,000本余り適用してきており、今後も本工法の信頼性をさらに高めるとともに、施工法の合理化に努めたい。また、外部スパイラル鋼線巻立工法では、今回の実験結果より施工性を考慮してスパイラル鋼線間隔の広いパターンを基本に実施へ反映させていきたいと考えている。なお、外部スパイラル鋼線巻立工法の開発は、西日本旅客鉄道(株)およびジェイアール西日本コンサルタンツ(株)との共同で実施した。

最後に、スパイラル筋巻立工法の開発に際し、ご指導頂いた(財)鉄道総合技術研究所の方々に、厚く謝意を表します。

参考文献

- 1) (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
- 2) (社)日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の終局強度型耐震設計 指針(案)・同解説、1988。

中村敏晴*



(株)奥村組技術研究所第1研究グループ主任研究員
Toshiharu NAKAMURA

廣中哲也**



(株)奥村組技術研究所第1研究グループ主任研究員
Tetsuya HIRONAKA

柴田輝和***



(株)奥村組関西支社土木部次長
Terukazu SHIBATA

松田好史****



西日本旅客鉄道(株)大阪建設工事事務所所長
Yoshifumi MATSUDA

北後征雄*****



ジェイアール西日本コンサルタンツ(株)執行役員技師長
Masao KITAGO