

鋼材補強コンクリート柱の鋼材厚の違いが圧縮耐力に及ぼす影響に関する実験研究

日大生産工（院）○片岡 利憲 日大生産工 木田 哲量 日大生産工 水口 和彦
日大生産工 澤野 利章 日大生産工 阿部 忠

1. はじめに

近年、建設事業費の削減を受け、社会基盤施設においてはライフコストの整合性、構造形式の合理化・簡素化が図られている。この傾向は、既存構造物に対しても同様であり、従来のスクラップ・アンド・ビルドの考え方から適切な補修・補強を施し、長期にわたって維持させるべく各研究機関で構造物の補修・補強に関する新材料・施工法の開発などの研究がなされている。

RC 橋脚の補強工法には、鋼板巻き立て工法、RC 巻き立て工法、炭素繊維巻き立て工法などがあり、それぞれに特徴を有している (Table 1)¹⁾。これらのなかで実験解析が数多く行われおり、施工における信頼性が高く、施工法および耐力を算出するときの応力計算などが比較的容易であるという利点から鋼板巻き立て工法がもっとも多く採用されている。この工法は、柱部材が水平力を受けた場合の曲げ破壊およびせん断によるぜい性の破壊を防ぎ、十分な地震時変形性能を付与して耐震性の向上を図る補強工法である^{2, 3)}。従来から、この鋼板巻き立て工法の補強効果については多くの研究が行われているが、研究の多くは曲げに対する検討を行ったものである。しかし、兵庫県南部地震の特徴の一つには大きな上下動が作用したことがあることから、軸力に対する変形性能や補強効果の検討をする必要がある。

そこで本研究では、RC 柱部材の補強に最も使用頻度の高い鋼板巻き立て工法に着目し、鋼材厚の異なる3種類の鋼材で補強した柱モデル供試体に、軸圧縮力載荷実験を行い、鋼材厚の違いが変形性状および耐力に及ぼす影響を検討した。また、鋼材厚の違いによる横拘束効果を検討したうえで、軸圧縮耐力を評価した。

2. 実験の概要

2. 1 材料特性

1) コンクリート

コンクリートには、普通ポルトランドセメントおよび最大寸法 20mm の粗骨材（密度 2.63g/cm³）を使用した。なお、コンクリート材の設計基準強度は 24N/mm² であった。ここで、コンクリート材の配合条件の詳細を Table 2 に示す。

2) 充填材

コンクリート柱と補強鋼材間の充填材には、実橋の橋脚補強工事でも使用されているエポキシ樹脂を使用した。ここで、エポキシ樹脂の特性を Table 3 に示す。

3) 鋼材

実橋の RC 橋脚補強においては、補強用鋼材を配置した後に溶接を行うが、モデル実験の場合には鋼材を溶接することは困難であるから、コンクリート柱を巻き立てる鋼材

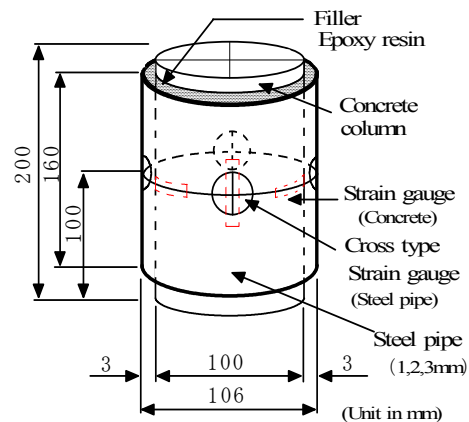


Fig. 1 Detail of confined column model

Table 1 Comparison among various bridge pier reinforcement methods

Method		RC lining method	Steel pipe lining method	Carbon fiber sheet lining method
Characteristics	Merit	•Economically excellent •Easy maintenance	•Thin covering depth •High rehabilitation effect	•Excellent for construction due to light weight •Thin covering depth
	Demerit	•Increase of dead load to foundation •Thick covering depth	•Required to use heavy equipment work •Required to repaint	•Require to make quality control •Unfittable for developing flexural load-carrying capacity

Deformation Characteristics and Evaluation of Compressive Capacities of Concrete Column Strengthened with Steel Pipes of Various Thicknesses

by Toshinori KATAOKA

Tetsukazu KIDA, Kazuhiko MINAKUCHI, Toshiaki SAWANO, Tadashi ABE

には、鋼材の溶接に関わる諸要因を考慮して JIS G3444 に規定されている一般構造用鋼管を鋼材厚 1, 2, 3 mm に加工したものを用いることとする。ここで、実験に用いた鋼管の形状を Table 4 に示す。

2. 2 供試体の作製

コンクリート柱をそれぞれ鋼管で補強する。このとき、実際の補強法と同様に、軸方向圧縮力が鋼管に直接作用しないようにコンクリート柱上下両端が 20mm 突出するように鋼管をはめ込む。鋼管とコンクリート柱との間隙に充填材を注入し、柱モデル供試体とした。なお、鋼板巻き立て工法においては、実務上、流動性などの問題からエポキシ樹脂の場合は約 4 mm 程度の間隙幅を確保することとなっている。よって、本研究においてもこの点を考慮し、間隙幅を 3 mm とした。また、コンクリート表面および鋼管表

Table 2 Mix proportions

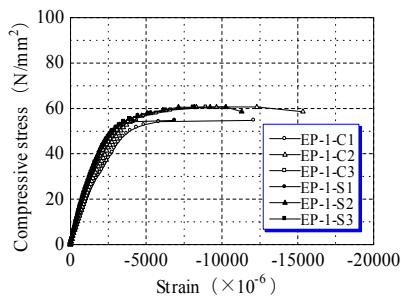
W/C (%)	s/a (%)	Unit content (kg/m ³)				Ad* (kg/m ³)
		W	C	S	G	
52.8	45.4	178	338	790	986	3.38

Table 3 Characteristics of epoxy resin

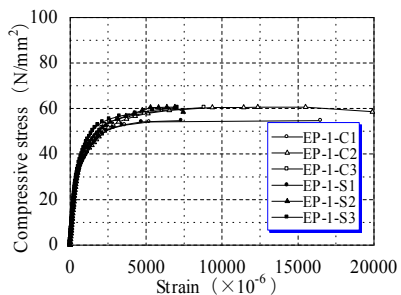
Compressive strength	71.9 N/mm ²
Modulus of elasticity	2080 N/mm ²
Flexural strength	68.6 N/mm ²
Tensile strength	52.5 N/mm ²
Adhesive shear strength	16.3 N/mm ²

Table 4 Shape of steel pipe

Filler	Inner diameter (mm)	Thickness (mm)	Length (mm)	Young's modulus (kN/mm ²)
Epoxy resin	clearance 107.9	3.0	160	200
		2.0	160	
		1.0	160	

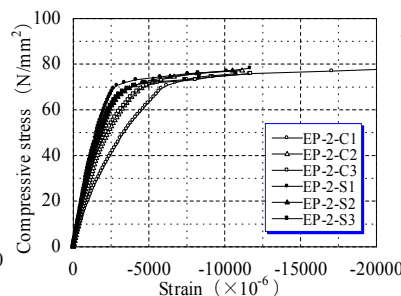


(a) Axial strain

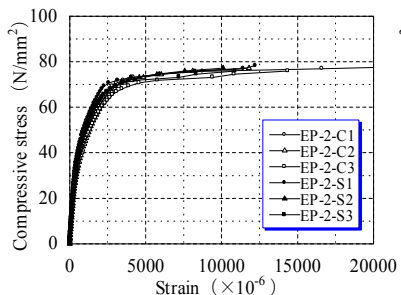


(b) Circumferential strain

Fig.2 Load-strain relation (EP-1)

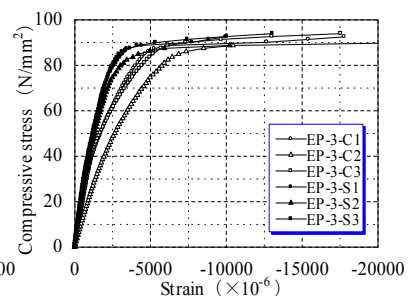


(a) Axial strain

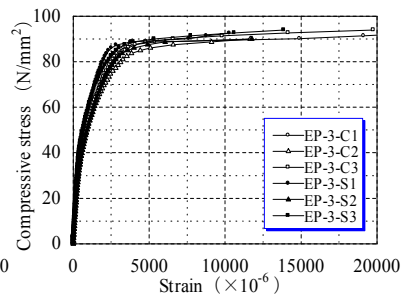


(b) Circumferential strain

Fig.3 Load-strain relation (EP-2)



(a) Axial strain



(b) Circumferential strain

Fig.4 Load-strain relation (EP-3)

面のそれぞれ 4 カ所にひずみゲージを供試体高の 1/2, 周長の 1/4 間隔の交点となる位置に貼付した。供試体の詳細形状寸法を Fig. 1 に示す。

2. 3 載荷方法および計測方法

圧縮試験機(能力:2000kN)により、荷重を一定の速度で載荷させ、圧縮力 10kN 増加ごとの軸方向および周方向のひずみを計測した。ひずみゲージ貼付状況を Fig. 1 に示す。

3. 応力-ひずみ関係

本研究では、補強鋼材厚の異なる 3 種類の供試体を各々 3 本ずつ用いた。供試体の名称は鋼材厚 1, 2, 3 mm でそれぞれ EP-1, EP-2, EP-3 と称することとする。実験では、各供試体に軸方向圧縮力を作用させた場合のコンクリート (C) および鋼材 (S) の各方向のひずみを計測する。ここでは、実験より得られた各方向のひずみを平均した値を用いて応力-ひずみ関係より、変形性状について検討する。なお、応力-ひずみ関係は、鋼管内コンクリートの応力に統一性が得られないことから、コンクリートの断面積で除したマクロな圧縮応力を用いることとする。

Fig. 2(a), 3(a), 4(a)は、応力と拘束コンクリート柱表面および鋼材の軸方向ひずみの関係である。各図より、コンクリートと鋼材のひずみ変形を見ると、初期段階より比較的類似したひずみの増加を示しており、コンクリートのひずみ増加に追従して鋼材のひずみが増加していることがわかる。これは、充填材として使用したエポキシ樹脂の付着が良好であることから、コンクリートと鋼材に一体性が保たれ、軸圧縮力に抵抗しているためと考えられる。また、コンクリート柱に圧縮力を作用させた場合、その終局圧縮破壊時の平均圧縮ひずみは、Winter⁴⁾, 畑野⁵⁾らの報告には、それぞれ $2000 \sim 2500 \times 10^{-6}$, 2100×10^{-6} 程度であるとされて

いる。これと比較すると、EP-1、EP-2、EP-3 供試体ともにコンクリートのひずみは 2100×10^{-6} 以降も圧縮応力の増加に対してひずみ硬化的な増加を続けており、最終的に約 10000×10^{-6} を超える大変形となり、約4倍程度の大変形を示している。以上のことから、鋼材でコンクリート柱を横拘束することによって変形能が大きくなり、じん性が向上していることがわかる。

Fig. 2(b), 3(b), 4(b)は応力とコンクリートおよび鋼材の周方向ひずみの関係である。各図より、コンクリートおよび鋼材のひずみ関係を見ると、EP-1、EP-2、EP-3 供試体でそれぞれ、 50 N/mm^2 、 65 N/mm^2 、 80 N/mm^2 付近まではコンクリートの体積膨張、およびそれに伴って生じる内圧による鋼管のひずみの増加が見られ、荷重とひずみの関係は比較的直線的なものとなっている。それ以降になると、コンクリート柱の体積膨張により鋼管は塑性変形をなし、コンクリート・鋼管ともにひずみの増加が大きくなっている。なお、EP-1 供試体においては、鋼材ひずみが約 7000×10^{-6} 程度と、他の供試体に比して低い値を示しているが、これはEP-1 供試体の鋼材厚が1mmと薄いため、最終的に鋼材に破断が生じたためである。

4. 変形挙動特性に関する検討

供試体を単純圧縮した場合の縦・横ひずみを $\varepsilon_c \cdot \varepsilon_t$ とすると、体積ひずみ ε_v はその等方性を仮定するならば、弾性論により非弾性領域にも拡張される式(1)として与えられる。体積変形はコンクリートの非弾性的挙動と破壊の定量的指標として有効であることが実験的に確認されていることから⁹⁾、本研究においても、実験より得られた鋼材の各方向ひずみを平均した値から、体積ひずみを式(1)により算出し、応力と体積ひずみの関係を考察した。なお、変形性能の限界値はひずみゲージの信頼性を考慮して 20000×10^{-6} までとした。また、鋼材による拘束効果を明確にするために、拘束を受けていない場合のコンクリート柱の応力と体積ひずみの関係についても併記した。

$$\varepsilon_v = \varepsilon_c - 2\varepsilon_t \quad (1)$$

ここで、 ε_v ：体積ひずみ、 ε_c ：軸方向ひずみ、 ε_t ：周方向ひずみ

Fig. 5 より、鋼材厚が増すにつれて、圧縮応力と体積ひずみの関係は直線的な挙動を示している。これは、鋼材厚の増加に伴って横拘束量が増加することから、弾性挙動を示す範囲が大きくなることを示している。また、鋼材厚の違いからは、EP-2、3 供試体に比して、EP-1 供試体は圧縮変形が顕著になっていることが分かる。この現象的事実は、構造物全体から見た構成部材は均衡のとれた剛性を有するとする観点から、適正な鋼材厚さの存在を意味するものと考えられる。

Table 5 Experimental load-carrying capacity

Test specimen	Compressive strength of concrete (N/mm^2)	Maximum compressive load-carrying capacity (N/mm^2)	Average compressive load-carrying capacity (N/mm^2)	Confined strength ratio
EP-1-1	35.1	54.6	57.9	1.6
EP-1-2		58.8		1.7
EP-1-3		60.4		1.7
EP-2-1		78.6	77.3	2.2
EP-2-2		77.3		2.2
EP-2-3		75.9		2.2
EP-3-1	92.2	92.6	92.2	2.6
EP-3-2		90.0		2.6
EP-3-3		94.0		2.7

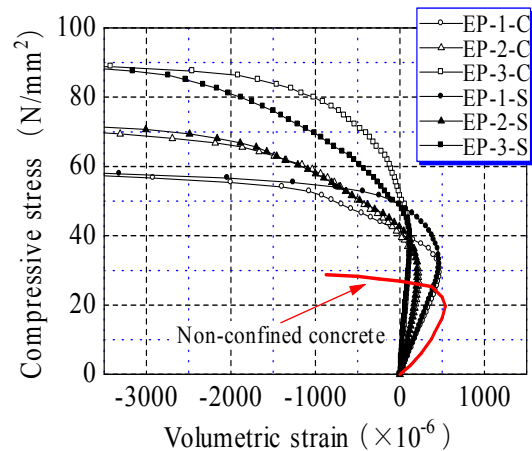


Fig. 5 Stress-volumetric strain relation

次に、無拘束コンクリートの挙動と比較すると、EP-1、EP-2、EP-3 供試体ともに、鋼材により横拘束を与えることで変形性能に格段の向上が見られており、三軸応力状態を期待した鋼材とコンクリート部材の複合構造、すなわち、部材の高性能化は有利であることを示している。

5. 拘束効果の検討

5. 1 供試体耐力

本実験の供試体耐力は、荷重載荷中における最大値を耐力力として評価することとし、各供試体の耐力力を Table 5 に示す。なお、表中の拘束強度比とは、コンクリート柱の圧縮強度に対する比である。Table 5 より、鋼材で補強することにより、コンクリート柱の圧縮強度に比して、EP-1、EP-2、EP-3 供試体でそれぞれ、約1.7、2.2、2.6倍程度の補強効果が得られており、鋼材厚が大きくなるに伴って耐力力に増加が見られた。

5. 2 鋼材厚と拘束強度比との関係

Fig. 6 は、鋼材厚と鋼管補強コンクリート柱の耐力力をコンクリートの圧縮強度で除した耐力力比との関係である。Fig. 6 より、鋼材厚の増加に伴って拘束強度比は増加しており、その増加傾向は曲線的になっている。ここで、本実験の範囲内での鋼材厚と拘束強度比との関係は、Eq. 3 に示す

Table 6 Comparison between compressive capacities

Test specimen	Compressive	Experimental		Confined	Confined strength:Eq.3	
	strength of concrete	strength		strength	Theoretical	Theoretical
	f'_c	f'_{cc}		ratio (Eq.2)	value	Experimental
	(N/mm ²)	(N/mm ²)		α	(N/mm ²)	($\alpha f'_c/f'_{cc}$)
EP-1-1	35.1	54.6	57.9	1.70	59.5	1.09
EP-1-2		58.8				1.01
EP-1-3		60.4				0.99
EP-2-1		78.6	77.3	2.22	77.7	0.99
EP-2-2		77.3				1.01
EP-2-3		75.9				1.02
EP-3-1		92.6	92.2	2.59	90.9	0.98
EP-3-2		90.1				1.01
EP-3-3		94.0				0.97

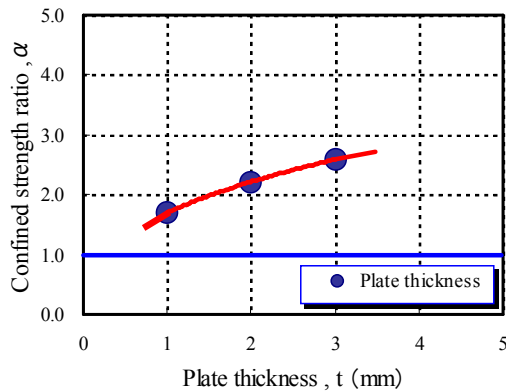


Fig.6 Confined strength ratio vs. plate thickness

近似相関式（鋼材厚立方根式）で得られる。

$$\alpha = 1.70\sqrt[3]{t} \quad (\gamma = 1.00) \quad (2)$$

ここで、 α ：拘束圧縮強度比、 t ：鋼材厚 (mm)、 γ ：相関係数

5. 3 拘束強度比を適用した耐力算定式

鋼管で拘束したコンクリート柱の圧縮耐力式は、式(2)の相関式をもとに算出することとする。ここで、式(2)をもとに Fig.6 より、Eq.3 が得られる。

$$\alpha = f'_{cc}/f'_c \rightarrow f'_{cc} = \alpha f'_c \quad (3)$$

ここで、 f'_{cc} ：鋼管拘束コンクリートの圧縮強度、 f'_c ：コンクリートの単純圧縮強度

したがって、式(3)より得られた α を側圧の係数として圧縮耐力式に導入し、鋼管補強コンクリート柱の圧縮耐力 $\alpha f'_c$ の算定を行い、その結果を Table 6 に示す。

Table 6 より、拘束強度比を適用した場合の理論圧縮耐力

力は EP-1、EP-2、EP-3 供試体でそれぞれ 59.5 N/mm²、77.7 N/mm²、90.9 N/mm² となった。これを実験耐力と比較すると、EP-1、EP-2、EP-3 供試体で 0.97~1.09 となり、理論耐力は実験耐力とよく一致する結果を得た。また、本例のような短柱状圧縮耐力を算出する場合、視点を変えた解析法は誤算防止上、きわめて重要であると考ええる。

6. まとめ

- ①各供試体ともに、鋼材で拘束することによりコンクリート柱の変形能に大きな向上が見られる。
- ②3種類の鋼材厚を用いて補強したコンクリート柱に軸圧縮力耐力実験を行った結果、それぞれ約 1.7、2.2、2.6 倍程度の補強効果が得られた。
- ③鋼材厚と拘束強度比との関係より、実用的な近似相関式を鋼材厚立方根式として与えた。

参考文献：

- 1) 横山好幸ほか：橋脚の耐震補強(鋼板巻立て)におけるセメント系充填材の評価、コンクリート工学論文集、第 13 巻第 2 号 pp.47-55, 2002.
- 2) 川島一彦ほか：鉄筋コンクリート橋脚の耐震補強とその設計、橋梁と基礎、No.1, pp.27-34 (1996)
- 3) 日本道路公団：設計要領第Ⅱ集、橋梁保全編、5 章耐震補強 (2000)
- 4) Winter, G.: Properties of Steel and Concrete and the Behavior of Structures, Proc. ASCE, Journal of the Structural Division, Vol.86, No.ST2, pp.33-61 (1960)
- 5) 畑野正：コンクリートの如き脆性体のひずみに立脚した破壊論、土木学会論文報告集、第 153 号、pp.31-39 (1968)
- 6) 加藤清志：コンクリートの真の強度に対する研究：防衛大学校理工学研究報告、第 15 巻第 1 号、pp.29-57 (1977)
- 7) 水口和彦ほか：鋼管拘束コンクリート柱の変形挙動と鋼管耐力分担能に関する基礎的実験、土木学会第 56 回年次学術講演会講演概要集 V 部門、pp.1215~1216 (2002)