

# 軸圧縮力を受ける鋼材拘束応力履歴コンクリートシリンダーの補強効果と変形性状に関する研究

日大生産工 (研員)      ○水口 和彦      日大生産工      木田 哲量  
日大生産工                      加藤 清志      日大生産工      澤野 利章

## 1. はじめに

兵庫県南部地震の被害を教訓に、社会基盤施設に対する耐震性向上のための補修・補強工事が精力的に実施された。また、近年の公共事業費縮減などにより、社会基盤施設はスクラップ・アンド・ビルドの考え方から適切な補修・補強を行って長期使用という考えに移行しており、補強・補修工事は今後ますます増加するものと考えられている。

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代表的なものとして上げられる<sup>1,2)</sup>。これらのなかでも、各研究機関により実験解析が数多く行われおり、施工の信頼性が高く、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。しかし、この工法に関する既往の研究では、曲げに対する検討はよく行われているが、地震動を伴った軸圧縮力に対する補強効果の検討はあまりなされていないのが現状である。そこで、本研究では、RC 柱部材の補強においてもっとも使用頻度の高い鋼板巻き立て工法に着目し、鋼板巻き立て工法で鋼板補強したコンクリートシリンダー供試体に、軸圧縮力載荷実験を行い、鋼材の変形状況の解析を行い、コア・コンクリートの応力健全度の違いが補強効果に及ぼす影響を検討した。また、コンクリートと補強鋼材との間隙に注入する充填材の物性の違いが変形性状と補強効果に及ぼす影響を評価した。

## 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/cm<sup>3</sup>) を使用した。なお、コンクリート材の設計基準強度は 24N/mm<sup>2</sup> であった。

#### 2) 充填材

コンクリートシリンダーと補強鋼材間の充填材には、実橋の橋脚補強工事で使用されているエポキシ樹脂と、収縮低減剤 (主成分: 低級アルコールのアルキレンオキシド付加物, 以下 SCA と略記) を混入させた無収縮モル

Table 1 Characteristics of epoxy resin

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

Table 2 Characteristics of shrinkage compensating mortar

Compressive strength	23.2 N/mm <sup>2</sup>
Tensile strength	1.8 N/mm <sup>2</sup>

Table 3 Shape of steel pipe and physical properties

Filler	Inner diameter (mm)	Thickness (mm)	Length (mm)	Young's modulus (kN/mm <sup>2</sup> )	Tensile strength (N/mm <sup>2</sup> )
Epoxy resin	107.9	0.52	160	26	441
Shrinkage compensating mortar	132.6				

タルの 2 種類を使用する。ここで、エポキシ樹脂の特性を Table 1, 無収縮モルタルの強度特性を Table 2 にそれぞれ示す。

#### 3) 鋼材

コンクリートシリンダーを巻き立てる鋼材には、径厚比 (円形断面の場合、鋼材厚に対する巻き立て鋼材外径の比  $D/t$ ) の制限を考慮し、薄い厚さの亜鉛メッキ鋼板を使用することとした。ここで、鋼材の詳細形状および強度特性値を Table 3 に示す。

### 2.2 応力履歴コンクリートシリンダーの作製

φ10×20cm のコンクリートシリンダーに圧縮試験機を用いて、最大耐力直前まで軸方向圧縮力を作用させる。このとき、ピーク直前で荷重を除荷すると、コンクリートシリンダーは爆裂することなく原形を留める。また、この载荷中にウルトラソニースコープで、コンクリートシリンダー内部の超音波伝播時間を測定し、内部組織の変質に伴う伝播時間を観察すると、応力履歴の有無により伝播時間に違いが生じており、一般的には応力を履歴することにより伝播時間には増加が見られる。この载荷法を繰り返すことにより、コンクリートシリンダーの圧縮に対する耐力の低下率と伝播時間の増加率の間にある

## Repairing Effect and Deformation Characteristic of Steel Pipe-Confined Concrete cylinder of Stress-Hysteresis under Axial Compression

by

Kazuhiko MINAKUCHI, Tetsukazu KIDA, Kiyoshi KATO and Toshiaki SAWANO

程度の線形関係が得られることから、ある伝播時間差を予測すれば、それに対応したコンクリートシリンダーの耐力（以下、予想耐力と称する）の推定が可能となる。そこで、本研究においては、ある耐力まで低下したコンクリートシリンダー、すなわち一時的に圧縮強度程度の応力を受けたものを“応力履歴コンクリートシリンダー”と称する。なお、荷重の載荷速度に関しては JIS A 1108 コンクリートの圧縮強度試験方法に従った。ここで、実験に用いたコンクリートシリンダーの圧縮強度および予想耐力を Table 4 に示す。

### 2.3 供試体の作製

応力履歴コンクリートシリンダーと応力無履歴コンクリートシリンダーをそれぞれ鋼材により補強する。このとき、現用の補強法の観点から、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シリンダー上下両端が 20mm 突出するように鋼管をはめ込む。鋼管とコンクリートとの間に充填材を注入し、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、無収縮モルタル充填の場合は約 25~30mm 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、間隙幅はエポキシ樹脂充填供試体の場合は 3 mm、無収縮モルタル充填の場合は 10mm とした。また、コンクリート表面および鋼管表面のそれぞれ 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。

### 2.4 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ひずみ測定器により計測した。ひずみゲージ貼付状況を Fig. 1 に示す。

### 3. 応力-ひずみ関係

本実験では、応力履歴供試体 (D1~3) と応力無履歴供試体 (ND1~3) を各 3 本ずつ用いた。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。この場合の応力とひずみの関係から、供試体の変形性状および充填材の違い (エポキシ樹脂充填供試体: EP, 無収縮モルタル充填供試体: MO) による変形性状を比較検討するものである。なお、応力-ひずみ関係は、応力履歴の有無により供試体の変形性状に違いが生じるため、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。

#### 1) エポキシ樹脂充填供試体

Fig. 2(a), (b)は、荷重とコンクリートおよび鋼材の軸方向ひずみの関係である。両図よりコンクリートと鋼材のひずみ変形は、応力履歴の有無にかかわらず比較的類

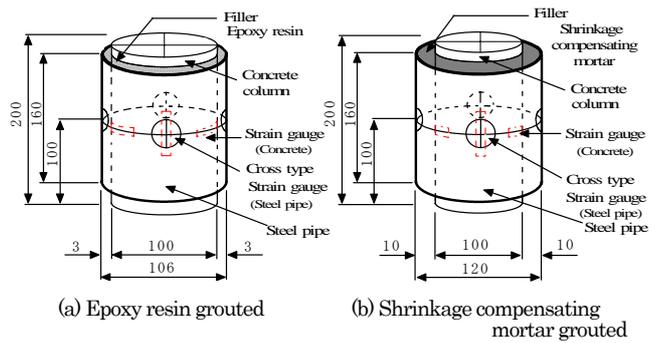


Fig. 1 Detail of confined column model (Unit in mm)

Table 4 Compressive strength and provisional load-carrying capacity of concrete cylinders (Unit in N/mm<sup>2</sup>)

	Epoxy resin grouted specimen			
	D*1	D2	D3	ND1~ND3
Compressive strength	28.7	26.7	29.7	(Av.) 29.9
Provisional load-carrying capacity	19.5	18.1	19.0	—
	Shrinkage compensating mortar grouted specimen			
	D*1	D2	D3	ND1~ND3
Compressive strength	29.6	29.1	29.3	(Av.) 29.3
Provisional load-carrying capacity	18.5	19.1	19.3	—

\*: damaged

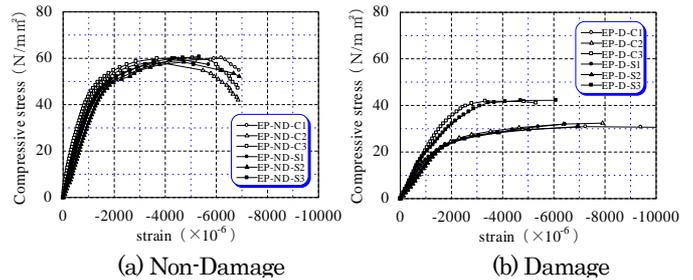


Fig. 2 Stress and axial strain relation (Epoxy resin)

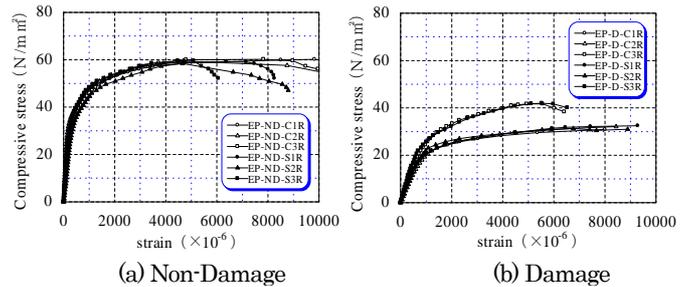


Fig. 3 Stress and circumferential strain relation (Epoxy resin)

似したひずみ変形の増加傾向を示しており、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。しかしながら、鋼板補強コンクリートとしての供試体の変形性状には、応力履歴の有無により顕著な変形能の差異がみられた。とくに、応力履歴供試体の方は剛性低下のために初期段階から変形の増加が著しいことがわかる。この原因には、応力履歴によって、コンクリートシリンダー内部に付着ひび割れ、モルタルひび割れ、骨材ひび割れ、気泡殻ひび割れなどによる組織

弛緩が生じたために、変形量が大きくなったものと考えられる。

Fig. 3 (a), (b)は、荷重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。両図より、コンクリートおよび鋼材のひずみ関係では、応力履歴の有無にかかわらず比較的類似したものになっており、応力履歴の有無による顕著な差異は確認できない。

#### 2) 無収縮モルタル充填供試体

Fig. 4(a), (b)は、荷重とコンクリートおよび鋼材の軸方向ひずみの関係である。両図より、コンクリートと鋼材のひずみの関係では、応力履歴の有無にかかわらずコンクリートのひずみ増加に対し、鋼材のひずみ増加が伴っていないことが確認できる。この現象は、充填材として用いた無収縮モルタルの鋼材との付着力が小さく、両者の間ですべりが生じるために、鋼管へ力が十分に伝達されなかったものと考えられる。

Fig. 5(a), (b)は荷重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。両図より、応力履歴の有無によりひずみの増加傾向に顕著な差が生じている。この要因には、エポキシ樹脂充填供試体の場合と同様に、応力履歴を受けたことによるコンクリートシリンダー内部の組織弛緩の影響と充填無収縮モルタルの物性に大きく依存しているものと考えられる。

以上の結果から、本研究の範囲内においては、エポキシ樹脂の方が無収縮モルタルよりも軸方向の拘束効果が高く、接着性に優れているものと判断される。また、コンクリートシリンダーに圧縮力を作用させた場合、終局圧縮破壊時の平均圧縮ひずみは、Winter<sup>4)</sup>、畑野<sup>5)</sup>の研究により、それぞれ  $2000 \sim 2500 \times 10^{-6}$ 、 $2100 \times 10^{-6}$  程度であることが報告されている。これと比較すると、両充填供試体ともにコンクリートのひずみは増加を続けており、最終的に  $6000 \times 10^{-6}$  を超えるひずみとなり、約3倍程度の大変形を示しており、鋼材で補強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。

#### 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  $\epsilon_C \cdot \epsilon_T$  とすると、体積ひずみ  $\epsilon_V$  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<sup>6,7)</sup>、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  $20000 \times 10^{-6}$  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シリンダーの応力と体積ひずみの

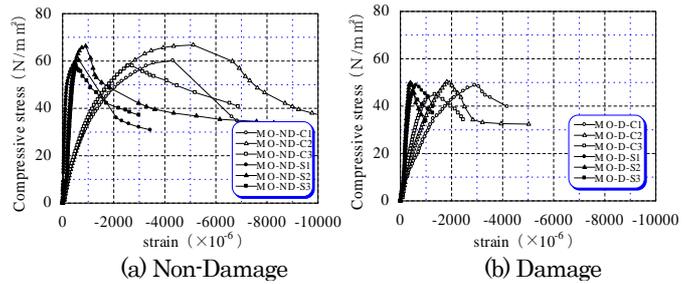


Fig. 4 Stress and axial strain relation (Shrinkage compensating mortar)

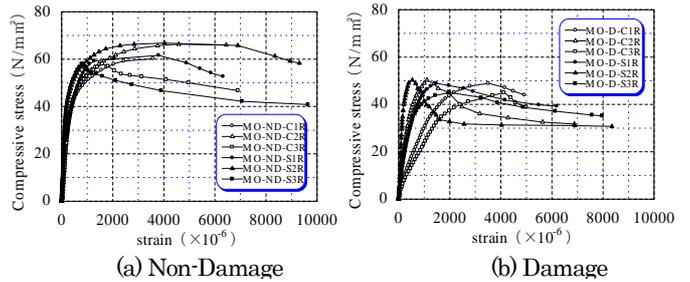


Fig. 5 Stress and circumferential strain relation (Shrinkage compensating mortar)

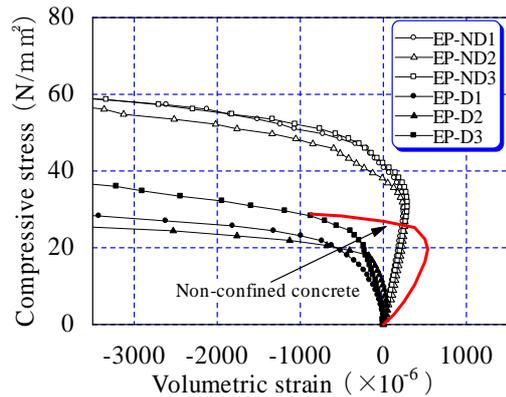


Fig. 6 Stress-volumetric strain relation when epoxy resin

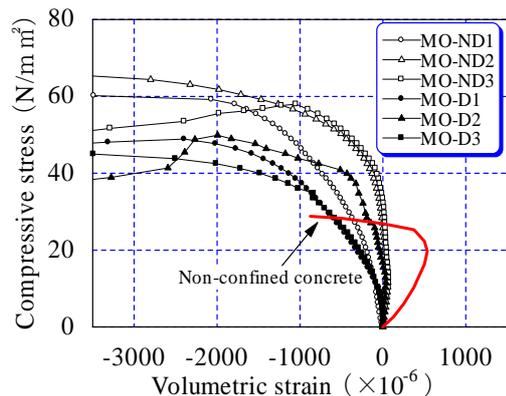


Fig. 7 Stress-volumetric strain relation when shrinkage compensating mortar

関係についても併記した。

$$\epsilon_V = \epsilon_C - 2 \epsilon_T \quad (1)$$

ここで、 $\epsilon_V$ : 体積ひずみ、 $\epsilon_C$ : 軸方向ひずみ、 $\epsilon_T$ : 周方向ひずみ

Fig. 6(a)より、エポキシ樹脂充填供試体の体積ひずみは、応力履歴の有無による違いが生じており、応力無履歴供試体では圧縮変形が顕著となっている。これは、充填材として用い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が一体性を持って軸圧縮力に抵抗したためと考えられる。

Fig. 6(b)より、無収縮モルタル充填供試体の変形状況を見ると、応力履歴の有無にかかわらず比較的類似したひずみの増加傾向を示しており、初期段階より体積変形は膨張傾向を示している。

充填材の違いによる比較をすると、応力無履歴供試体においては両充填供試体ともに比較的直線的なひずみの増加を示している。これは、応力履歴を受けていないことから組織が弛緩していないため弾性的挙動を示すことを表している。一方、応力履歴供試体でも充填材種の違いによる顕著な差異はあまり見受けられないが、応力を履歴したことによる組織弛緩のために初期段階より体積膨張が生じやすくなっている。また、両供試体の変形能を比較すると、応力無履歴供試体では両充填供試体ともに比較的類似した変形能を示しており、ほぼ同等の吸収エネルギー量を有しているものと考えられる。しかし、応力履歴供試体では、その変形能に顕著な差が生じており、エポキシ樹脂充填供試体に比して無収縮モルタル充填供試体の方が変形量が大きい。この要因には、前述の効果と同様、応力を履歴したことによるコンクリート内部の組織弛緩の影響や、充填材の特性の影響が考えられる。

### 5. 供試体耐力の検討

本実験供試体の耐力は、荷重載荷中における最大値で評価することとし、各供試体の耐力をTable 5に示す。なお、表中の耐力比とは、応力無履歴供試体の場合はコンクリートシリンダーの圧縮強度、応力履歴供試体の場合は予想耐力に対する耐力比である。Table 5より、応力無履歴供試体は、鋼材で補強することにより、コンクリートシリンダーの圧縮強度に比してエポキシ樹脂および無収縮モルタル充填供試体ともに約2.0倍程度の補強効果が得られた。次に、応力履歴供試体では、コンクリートの予想耐力に比してエポキシ樹脂充填供試体で約1.9倍、無収縮モルタル充填供試体で約2.5倍の補強効果を得た。

以上の結果より、コンクリートの応力上の健全度の違いが補強効果に大きく影響することが明らかとなった。なお、応力履歴供試体では充填材種の違いによる耐力差が大きく生じる結果となった。この要因には、コンクリートシリンダー内部の組織弛緩の影響、充填材や拘束材の物理的特性、とくに、応力-ひずみ関係における軸方向ひずみ (Fig. 2, 4)に見られる両充填材の付着力やポアソン比の影響が考えられる。加えて、充填材種の違いによる注入間隙の構造的な違いが及ぼす影響も考えられる

Table 5 Experimental load-carrying capacity

(Unit in N/mm <sup>2</sup> )						
	Epoxy resin grouted specimen					
	ND1	ND2	ND3	D1	D2	D3
Compressive strength of concrete	29.9			19.5	18.1	19.0
Load-carrying capacity after reinforced by steel pipe	60.2	58.4	60.2	30.9	32.4	41.9
Load-carrying capacity ratio	2.01	1.95	2.01	1.58	1.79	2.21
	Shrinkage compensating mortar grouted specimen					
	ND1	ND2	ND3	D1	D2	D3
Compressive strength of concrete	29.3			18.5	19.1	19.3
Load-carrying capacity after reinforced by steel pipe	60.2	66.8	58.1	48.9	50.3	45.1
Load-carrying capacity ratio	2.05	2.28	1.98	2.64	2.63	2.34

ことから、この細部解明は今後の課題とする。

### 6. まとめ

- ① 応力履歴の有無により変形挙動には顕著な差異が見られ、最終的な耐力にも差が生じる。
- ② 応力履歴を受けた場合、両充填供試体ともに初期段階からひずみの増加傾向が著しい。
- ③ 体積ひずみの面からは、エポキシ樹脂充填供試体では応力履歴の有無による変形性状に顕著な違いが生じる。
- ④ 応力履歴の有無および充填材の違い等、種々の条件により変形性状に差が生じるが、補強効果は、補強材に依存していることから、これらの相関性等をより定量的に解析する必要がある。

今後は、弾塑性論的視点を踏まえ、充填材の物理特性値、補強材の限界鋼材厚等を考慮した耐力式の定式化を行う予定である。

### 参考文献：

- 1) 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)
- 2) 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)
- 3) 寺澤正子ほか：超音波伝播時間による軸圧縮コンクリートの応力特性に関する基礎的実験、日本大学生産工学部第29回学術講演会講演概要集、pp.9-12 (1996)
- 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) P.Desayi and C.Viswanatha : True Ultimate Strength of Plain Concrete, RILEN Bulletin, No.36, pp.163-173 (1967).