

# 論文 連続繊維ロープでせん断補強した鉄筋コンクリートはりのせん断耐荷機構

川名俊輔\*1・下村 匠\*2

**要旨：**連続繊維ロープは連続繊維をロープ状に成形加工したコンクリート用補強材である。連続繊維ロープは軽量で可搬性に優れており、エポキシ樹脂等を使用しなくても補強材としての機能を有するという点で作業性に優れている。本研究ではアラミド製の連続繊維ロープをせん断補強材として既設鉄筋コンクリートはりの外周に巻立て、その保護を目的とした巻立てコンクリートで被覆して載荷試験を行った。実験結果に基づき、連続繊維ロープを用いた RC はりのせん断耐荷機構について議論した。

**キーワード：**連続繊維ロープ, せん断耐力, コンクリート巻立て

## 1. はじめに

これまで、鉄筋コンクリート柱および橋脚の補強工法としては、鋼板巻立て、RC 巻立て、連続繊維シート巻立てをはじめとして多くの工法が開発されている。各種補強工法は、適用する構造物の事情に応じて使い分けられている。著者らは、耐食性、可搬性、作業性に優れた連続繊維ロープを用いた補強工法を研究している<sup>1)</sup>。

ロープ状連続繊維補強材(図-1)は、さまざまな形状に手作業で容易に加工できるので作業性に優れる。また、エポキシ樹脂などの繊維結合材を使用しなくとも、繊維単体でコンクリート用補強材として実用可能であることを確認している。これまで、新設時に連続繊維ロープをコンクリート中に埋め込み、せん断補強筋として機能させることが可能であること、既設鉄筋コンクリート柱の外周に連続繊維ロープを巻き立て、さらにその上にコンクリートを巻き立てることによりじん性補強の効果があることを実験的に確認した<sup>2)</sup>。しかし、連続繊維ロープを用いたこれらの補強工法を実用化するためには、設計法を確立しなければならない。そのためには、連続繊維ロープによる補強効果の確認だけでなく、補強メカニズムについて明らかにする必要がある。

本研究では、既設 RC はり部材の外周に連続繊維ロープを巻立て、その上にコンクリートを巻立てた場合の耐荷機構について実験的に検討した。そして、既往の研究で行った新設 RC はりの内部に連続繊維ロープをせん断補強筋として埋設した場合と比較した。

## 2. ロープ状連続繊維補強材

本研究で用いた連続繊維ロープはアラミド繊維から作られている。これは3本の繊維の束をねじりながら、さらに1本にまとめたものである。ロープの物性を表-1に示す。



図-1 連続繊維ロープ

表-1 連続繊維ロープの物性値

ロープの構造	より紐
断面積 (mm <sup>2</sup> )	11.8
引張強度 (kN)	2280
弾性係数 (MPa)	73500
破断ひずみ (%)	3.1

連続繊維ロープの引張試験は、本材料用に開発した鋼管グリッパと定着用膨張材を用いた試験方法により行った<sup>3)</sup>。

## 3. 既往の研究

図-2 に既往の研究において得られた連続繊維ロープを用いたはりの載荷試験の結果を示す。田坂らの研究<sup>3)</sup>では、連続繊維ロープを新設 RC はりの内部にせん断補強鉄筋の代替として埋設した試験体を単調載荷試験した。その結果、ロープがせん断補強筋として機能し、せん断耐力の向上が見られるという結果が得られている。

一方、松本らの研究<sup>2)</sup>では既設 RC はりの外周に連続繊維ロープを巻き立てただけでは、せん断耐力の向上は見られないという結果が得られている。

\*1 長岡技術科学大学大学院 工学研究科修士課程建設工学専攻 (正会員)

\*2 長岡技術科学大学 工学部環境・建設系 准教授 工博 (正会員)

連続繊維ロープを新設 RC はりのせん断補強筋に用いた場合について、せん断補強筋に鉄筋を使用した場合のトラス理論によるせん断耐力算定式を準用して、連続繊維ロープの受け持つせん断耐力の計算を行った。

$$V_{cf} = A_w f_{fu} (\sin \alpha + \cos \alpha) z / s \quad (1)$$

ここで、 $V_{cf}$ は連続繊維ロープが受け持つせん断耐力、 $A_w$ は区間  $s$  における連続繊維ロープの総断面積、 $f_{fu}$ は連続繊維ロープの引張強度、 $\alpha$ は連続繊維ロープが部材軸となす角度、 $z$ は圧縮応力の合力の作用位置から引張鋼材の図心までの距離で  $d/1.15$ 、 $s$ は連続繊維ロープの配置間隔である。すなわち、最大耐力時には、せん断ひび割れをまたぐ連続繊維ロープがすべて同時に引張強度に達するとの仮定で耐力を算定したことになる。

表-2 に計算値と実験値を示す。表中の試験体条件は図-2 における新設 RC はりのせん断補強筋の代替として用いた場合の連続繊維ロープの巻立て間隔である。実験値から得られた連続繊維ロープの受け持つせん断耐力  $V_{cf,exp}$  は最大荷重と斜めひび割れ発生荷重との差である。また、 $V_{cf,cal}$ は式(1)より算定した。

統計的な検討を行うにはデータ数が少ないが、表-2 によると、連続繊維ロープの分担するせん断耐力の計算値は算定精度が良いとはいえない。耐力算定のための最適な計算仮定を検討し、精度の高い耐力算定法を確立するためには、今後実験データの蓄積を行わなければならない。

なお、連続繊維ロープと同様に、降伏点を持たず弾性一破断型の引張性状を示す連続繊維棒材や連続繊維シートをせん断補強材に用いた場合には、式(1)の仮定で分担せん断耐力を算定すると過大評価になることが知られている<sup>4)</sup>。これは、最大耐力時にせん断ひび割れをまたぐせん断補強筋が必ずしもすべて同時に引張強度に達するわけではないことによる。そのため、連続繊維棒材や連続繊維シートをせん断補強材に用いた場合には、式(1)の冒頭に低減係数を乗じることにより分担せん断耐力を算定する方法がとられている。連続繊維ロープに関しても、同様の考え方が適用できるかどうかを明らかにすることが今後の課題である。

#### 4. 連続繊維ロープ巻立てとコンクリート巻立てを併用した RC はりの載荷試験

##### 4.1 実験概要

既設 RC はりの外周に連続繊維ロープを巻立て、その上にコンクリートを巻立てた試験体の載荷試験を行う。そしてその結果を新設 RC はりにおいて連続繊維ロープ

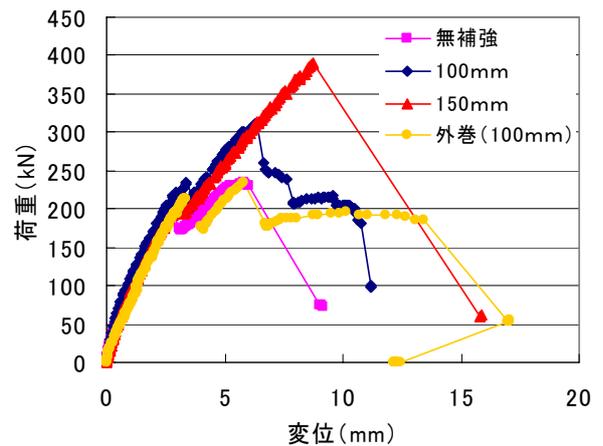


図-2 既往の研究による実験値

表-2 既往の実験結果における連続繊維ロープの分担するせん断耐力の実験値と計算値

試験体条件	斜めひび割れ発生荷重(kN)	最大荷重(kN)	実験値 $V_{cf,exp}$ (kN)	計算値 $V_{cf,cal}$ (kN)
無補強	196	234	—	—
100mm	234	312	39	71
150mm	193	390	98	49

をせん断補強筋として当初からコンクリート中に埋設させた場合と比較し、耐荷機構の違いを検討する。

##### 4.2 試験体

試験体寸法を図-3 に示す。

No.1 試験体は比較用のせん断補強なしの試験体である。他の2体の試験体と比較するために、既設の RC はりにコンクリート巻立てのみを施してある。

No.2 試験体と No.3 試験体は、既設の RC はりの外周に連続繊維ロープを巻立て、その上にコンクリートを巻立てた試験体である。No.2 試験体と No.3 試験体はロープの間隔は同じ 100mm であるが、No.3 試験体は補強量を少なく調節するため、繊維数を3分の1にしたロープを用いている。

試験体は、No.1 試験体において鉄筋が降伏する前にせん断破壊するように設計した。No.1 試験体の計算上のせん断破壊荷重は 132kN、主鉄筋降伏荷重は 280kN、曲げ終局荷重は 468kN である。なお、補強後の耐力は、巻立てコンクリートを有効として算定した。コンクリート巻立てを施した後の  $a/d$  を 3.7 とした。

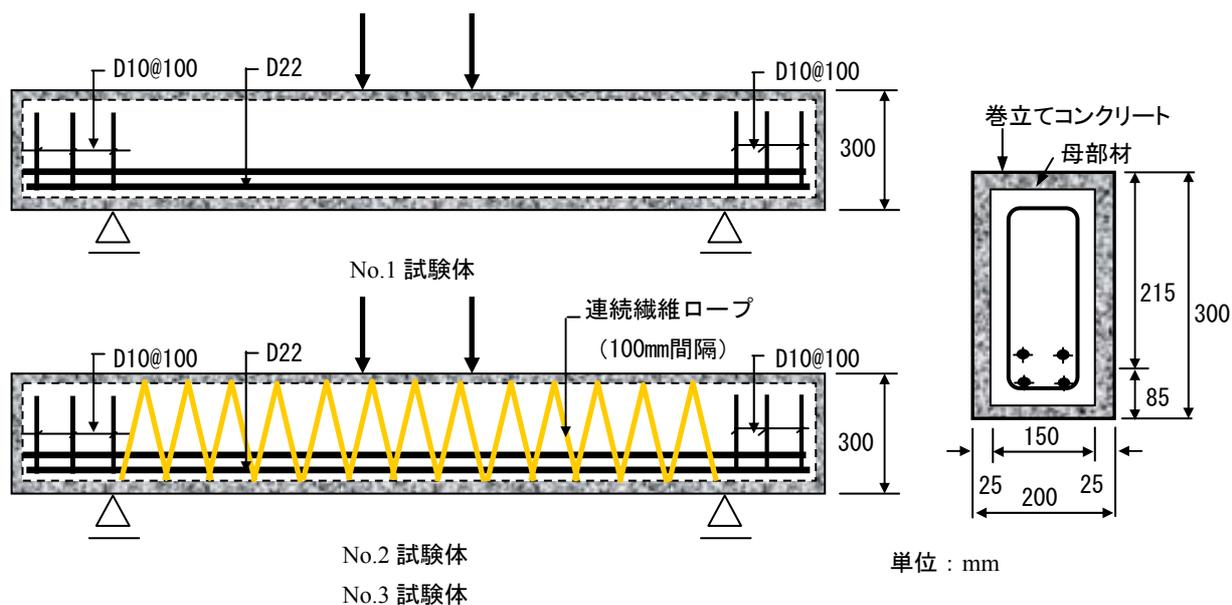


図-3 試験体寸法

試験体作製手順は以下のようである。

まず、既設部材に相当する母部材の RC はりのコンクリート打設後、2 週間湿布養生を行った。その後、母部材と巻立てコンクリートとの付着を確保するために、母部材のコンクリート表面をグラインダーにより研磨し表面処理を行った。同時に、隅角部でのロープへの応力集中を防ぐため、母部材の隅角部の面取りを行った。

その後、連続繊維ロープを巻き付けた。連続繊維ロープは支点上から巻き始め、反対の支点到達すると反転して巻き始めの支点に向かって巻立て、巻き始めと巻き終わりの部分を結んだ。巻付け作業は人力により行った。樹脂は一切用いていない。たるみやゆるみが生じないように注意した(図-4)。

その後、母部材周囲に型枠を設置し、巻立てコンクリートを打設した。巻立てコンクリートの厚さは 25mm とし骨材の最大寸法は 13mm とした。

巻立てコンクリートは、実構造物では、紫外線や異物の衝突等の外的因子による劣化から連続繊維ロープと既存コンクリートを保護する役割を担っている。また、補強後の外観上、巻きつけた連続繊維ロープが露出しているのは好ましくないので覆い隠す効果もある。力学的には、連続繊維ロープの端部を定着する役目と、ひび割れ後も付着によって引張応力を効果的に連続繊維ロープへ伝達する役目、一箇所でロープが破断した場合に急激に耐力を失ったり、ロープが飛散するなどの危険がないようにする役目を期待している。

#### 4.3 載荷方法

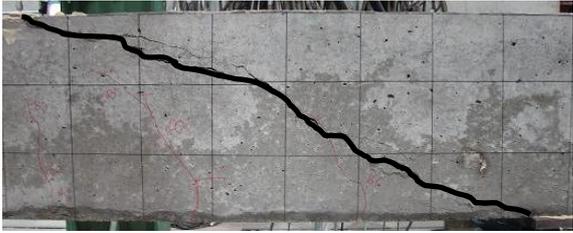
載荷は 500kN の油圧ジャッキを使用し、等曲げモーメント区間が 300mm の対称 2 点載荷で行った。荷重によるはりの全体の挙動ができるだけ左右対称になるように、支承を両端ともローラー支持とした。載荷方法は、部材が破壊に至るまで静的単調載荷をした。測定項目は荷重、中央変位と支点変位、主鉄筋ひずみ、連続繊維ロープのひずみとした。また、載荷試験中にはりの両側面に発生したひび割れを目視により確認した。



図-4 連続繊維ロープ巻立て状況

表-3 コンクリートの圧縮強度

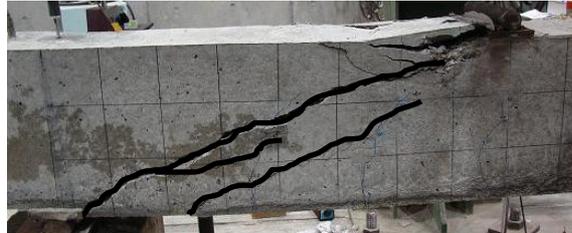
試験体	母部材のコンクリート強度 (MPa)	巻立てコンクリートの強度 (MPa)
No.1	39	40
No.2	34	47
No.3	35	44



No. 1試験体



No. 2試験体



No. 3試験体

図-5 各試験体の破壊性状

## 5. 実験結果

### 5.1 試験体破壊性状

使用したコンクリートの物性値を表-3 に、実験結果を表-4 に示す。No.1 試験体はせん断引張破壊を起こした。No.2, No.3 試験体は、No.1 試験体に比べて斜めひび割れが多く発生し、上部コンクリートが圧縮破壊することにより終局に至った。No.2 試験体は変位が 70mm に達するまで荷重を行ったが、これ以上荷重を続けても急激に荷重が低下する可能性は低く、最大荷重の約 65%まで荷重が低下したところで荷重を終了した。図-5 に各試験体の終局時の様子を示す。

### 5.2 荷重-変位関係

図-6 に荷重-変位関係を示す。いずれの試験体もせん断ひび割れの発生まではほぼ同じ挙動を示した。また全ての試験体において、引張主鉄筋は降伏していない。

せん断補強筋がなくコンクリート巻立てのみの No.1 試験体は、斜めひび割れの発生後に急激に荷重が低下し終局に至った。

連続繊維ロープを巻立ててせん断補強した No.2 試験体は、斜めひび割れ発生後 No.1 試験体のような急激な荷重の低下は見られず、一度荷重は下がるが再度荷重が上がり徐々に低下して終局に至った。No.2 試験体に巻立てた連続繊維ロープの断面積を 3分の1にして巻立てた No.3 試験体は、No.2 試験体と同様な挙動を示したが連続繊維ロープの破断により急激に荷重が低下した。

連続繊維ロープ巻立てを施した試験体は、斜めひび割れの発生後に一時的に荷重が低下し、その後再度荷重が増加する傾向が見られる。これは、斜めひび割れの発生

後、部材の変形が進むに従ってひび割れは開こうとするが、徐々に連続繊維ロープのゆるみがなくなり引張力が連続繊維ロープに伝達されはじめるためであると考えられる。

連続繊維ロープで補強した No.2, No.3 試験体と巻立てコンクリートのみの No.1 試験体を比較すると、連続繊維ロープ補強をした試験体の方がわずかにせん断耐力が向上したが、新設 RC はりのせん断補強筋の代替として使用した場合<sup>3)</sup>のように大幅なせん断耐力の向上は見られなかった。しかし、斜めひび割れ発生後の変形状には、連続繊維ロープの効果が現れたといえる。

表-4 実験結果

試験体	最大荷重 (kN)	最大変位 (mm)
No.1	181	5
No.2	199	70
No.3	216	20

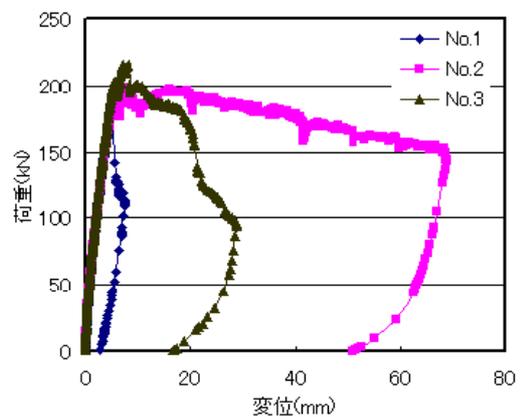


図-6 荷重-変位関係

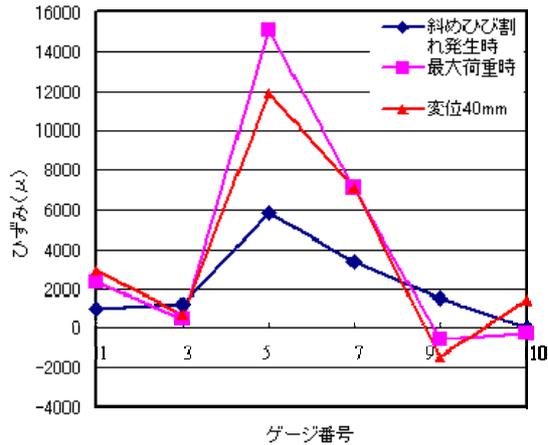
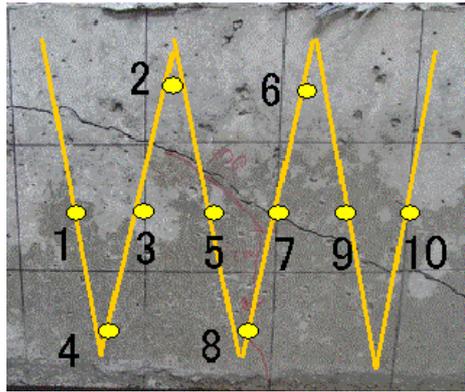


図-7 No. 2 試験体の軸方向ひずみ分布

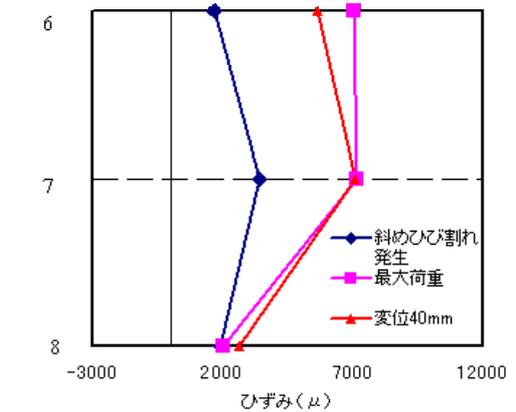
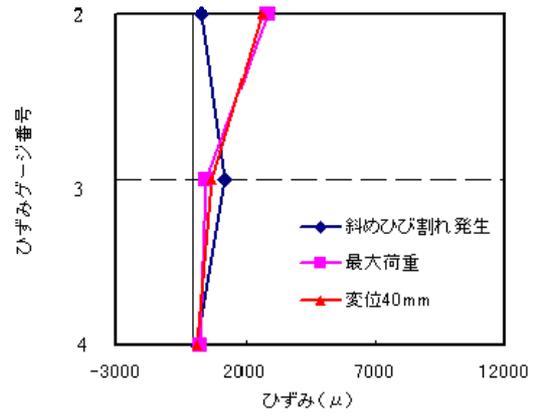


図-8 No. 2 試験体の縦方向ひずみ分布

### 5.3 連続繊維ロープのひずみ分布

No.2 試験体の連続繊維ロープのひずみ分布を図-7, 8 に, No.3 試験体のひずみ分布を図-9, 10 示す。連続繊維ロープのひずみは, 斜めひび割れ発生後にひび割れ近傍において増大している。これは, 連続繊維ロープが斜めひび割れ発生後にひび割れの開口を抑えていることを意味している。しかし, 部材のせん断耐力の向上をもたらすほどではなかったということになる。また, No.3 試験体および既往の研究の既設 RC はりの外周に巻立てただけの場合でも同じ傾向が見られる。

No.2 試験体の縦方向のひずみ分布に着目すると, 上縁のひずみが増大している(ゲージ番号 2, 6)。No.3 試験体の場合は下縁のひずみが増大している(ゲージ番号 4)。これはひずみゲージ貼付位置で連続繊維ロープとコンクリートが剥離していることを表すと考えられる。

部分的には連続繊維ロープがせん断力を負担する箇所もあるが, 付着が失われる部分が出てしまうために, 全体としてはせん断補強の効果がほとんど発揮されないと考えられる。

### 5.4 既往の研究との比較

本実験の結果と既往の研究<sup>2),3)</sup>の結果を比較する。新設当初からせん断補強筋としてコンクリートの中にロープを埋設した場合にはせん断補強効果が見られたが, 既

設部材の外周に連続繊維ロープを巻き立てる方法では, せん断耐力向上は得られなかった。

この理由は, 連続繊維ロープを新設 RC はりに埋設した場合, ロープとコンクリートの間に良好な付着が確保されるが, 連続繊維ロープを既設 RC はりの外周に巻立てた場合には, 既設部材とロープの付着が弱く, コンクリートがひび割れ後に直ちにロープが力を受け持つメカニズムが実現されないからであると考えられる。ロープの上にコンクリートを巻立てを行っても, ひび割れ発生後には既設部材と巻立てコンクリートの剥離が進行するので, ロープと既設部材の一体化にはあまり貢献しないと考えられる。

しかし, 正負交番荷重下における柱部材の場合には, せん断補強筋(横補強筋)と既設部材の付着がなくとも, 部材降伏後に十分変形が進んだ際にロープが既設部材のコンクリートの剥落を防ぐことで, 部材の耐荷メカニズムが維持されるので, 連続繊維ロープによる巻立て補強工法はじん性補強として有効であったと考えられる<sup>5)</sup>。

### 6. まとめ

本研究では, 以下の知見が得られた。

- (1) 既設 RC 部材の外周に連続繊維ロープを巻立てた後にコンクリートを巻立てる補強方法では, 既設部材

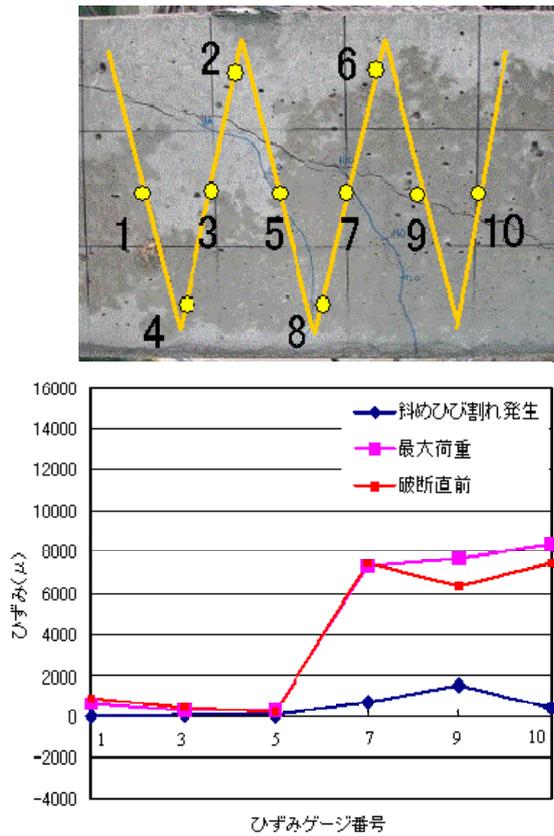


図-9 No. 3 試験体の軸方向ひずみ分布

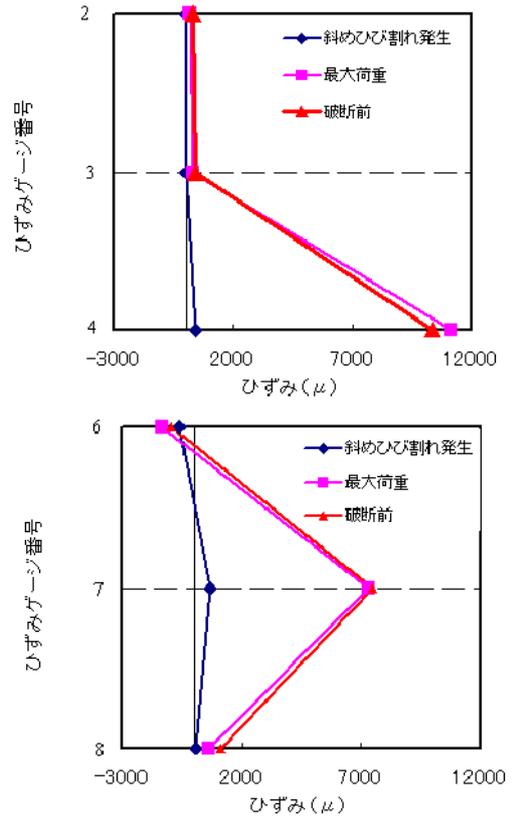


図-10 No. 3 試験体の縦方向ひずみ分布

とロープの付着が弱いので、新設当初よりロープを埋設した場合のようにせん断補強効果を発揮することはできない。

- (2) 既設 RC 部材の外周に連続繊維ロープを巻立てた後にコンクリートを巻立てる補強方法は、せん断耐力は増加させることはできないが、大変形時にロープがコンクリートの剥落を抑えるので、じん性補強には有効である。

#### 謝辞

本研究の実施にあたり、倉測建設コンサルタント株式会社より連続繊維ロープの提供を頂きました。ここに記して謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) Phong, N.H. et al.: Experimental study on Shear Behavior of Concrete Beams Reinforced with Continuous Fiber Rope, コンクリート工学年次論文集, Vol.27, No.2, pp.1441-1446, 2005

- 2) 松本 章裕, Nguyen Hung PHONG, 下村 匠, 関島 謙蔵: 既設コンクリート部材の補強における連続繊維ロープの適用, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.2, pp.1423-1428, 2006
- 3) 田坂 雄治, Nguyen Hung PHONG, 下村 匠, 関島 謙蔵: 連続繊維ロープによるコンクリート部材のせん断補強, 土木学会第 60 回年次学術講演会講演概要集, pp.465-466, 2005.9
- 4) 土木学会: 連続繊維シートを用いたコンクリート構造物の補修補強指針, コンクリートライブラリー 101, pp.23-29, 2000
- 5) Phong, N.H. et al.: Seismic Retrofitting of Reinforced Concrete Columns with Continuous Fiber Rope, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.2, pp.1171-1176, 2006