

論文 水硬性樹脂と連続繊維シートを用いて補強したRC柱の耐震性能に関する実験的研究

笠倉 亮太*1・鈴木 将充*2・黒岩 俊之*3・岡本 大*4

要旨：筆者らは、鉄道高架橋の狭隘部や店舗利用箇所を対象とした、水硬性樹脂を含浸させた連続繊維シートを用いた耐震補強工法の開発を行っている。本稿では、柱試験体と事前の荷重試験によりせん断破壊し、ひび割れ注入を行った柱試験体に対して本工法による補強を行い、曲げ耐力および変形性能に関する検討を行った。その結果、本工法を適用した損傷を受けていない柱試験体の曲げ耐力、変形性能は既往の算定式により評価できることを確認した。また、せん断破壊した柱試験体に本工法を適用した場合、設計曲げ耐力程度まで耐力が回復することを確認した。

キーワード：水硬性樹脂, 連続繊維シート, 耐震補強, 復旧工法

1. はじめに

兵庫県南部地震以降、新幹線および都市部の高架橋や橋脚を中心に耐震補強工事が現在も進められている。今後の耐震補強工事は、都市部の施工スペースの確保が困難な狭隘部や早期開放を要求される店舗利用箇所等での施工が増加すると予想される。そこで筆者らは、このような施工困難箇所においても適用可能な水硬性樹脂と連続繊維シートを用いた耐震補強工法の開発を行っている(例えば¹⁾)。これまでに、柱の縮小試験体を用いた荷重試験により、せん断耐力は既往の算定式²⁾にて評価できることを確認し、じん性能がエポキシ樹脂を用いた従来工法と相違する可能性があることを示した。また、従来工法と比較し迅速な施工が可能であることを確認している¹⁾。

本稿では、本工法により補強したRC柱の曲げ耐力および変形性能を確認するため、せん断破壊先行型の実大柱試験体に対して本工法による補強を行い、ラーメン高架橋の地震時を想定した軸方向圧縮力下での耐震性能について検討するとともに、事前の荷重試験³⁾によりせん断破壊した実大柱試験体にひび割れ注入を実施した後に、本工法による補強を行い、死荷重相当の軸方向圧縮力下での耐震性能について検討した。

2. 水硬性樹脂と連続繊維シートによる補強工法

2.1 工法概要

工法概念図を図-1に示す。本工法は、一般的な連続繊維シートの含浸材として用いられるエポキシ樹脂に替え、水との接触で硬化する一液硬化性の水硬性ポリウレタン樹脂を用いた繊維巻立て工法である。また、大型の施工機械や揚重機を必要としないことから、損傷したRC構造物に対する復旧工法としても有効な技術である。

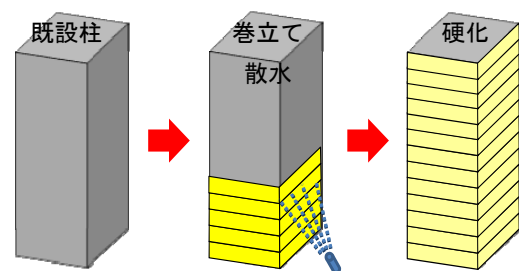


図-1 工法概念図

2.2 施工手順

本工法の施工フローを図-2に示す。なお、図中には含浸材にエポキシ樹脂を用いた従来工法の施工フローを合わせて示す。本工法は従来工法と比較し、施工ステップを省略できること、硬化待ち時間を大幅に短縮できることから迅速な施工が可能である¹⁾。

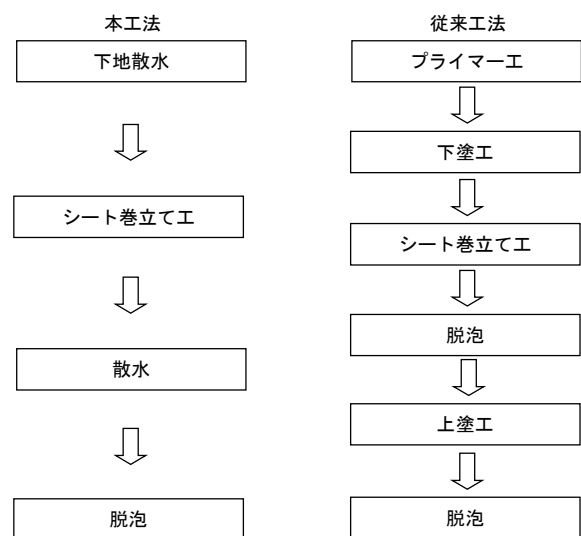


図-2 施工フロー

*1 東急建設(株) 技術研究所 土木研究室 修(工) (正会員)

*2 東急建設(株) 技術研究所 土木研究室 修(工) (正会員)

*3 東急建設(株) 技術研究所 土木研究室 博(工) (正会員)

*4 (公財)鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 コンクリート構造 博(工) (正会員)

表 - 1 試験体諸元

試験体	断面形状		せん断 スパン la mm	有効 高さ d mm	既設柱				補強				
	幅 b mm	高さ h mm			軸方向鉄筋		帯鉄筋		事前載荷		アラミド繊維シート		
			規格 径 本数	引張鉄筋比 ρ_t %	規格 径 間隔	帯鉄筋比 ρ_w %	最大荷重		目付量 g/m ²	層数	せん断補強量比 ρ_f %		
No. 1	800	800	3000	740	SD345 D25 28	0.68	SR235 $\phi 9$ 150(300)	0.053 0.106				-	-
No. 2	750	1100	2600	1040	SD345 D25 26	0.45	SR235 $\phi 9$ 150(300)	0.057 0.113	903	-902	280	4	0.206

表 - 2 耐力の算定値

試験体	耐力 (kN)								破壊形態			じん性率	
	My/la	V _{mu}	V _c	V _s	文献6)		文献2)		補強前 V _{mu} /(V _c +V _s)	補強後		文献6)	文献2)
					V _{AF}	V _{AFY}	V _f	V _{fY}		V _{mu} /V _{AFY}	V _{mu} /V _{fY}		
No. 1	637	763	449	100	485	1034	928	1477	1.39	0.82	0.52	5.21	5.20
No. 2	820	1070	418	139	1374	1931	2320	2877	0.46	0.37	6.11	5.67	

表 - 3 材料試験結果

試験体	コンクリート			鉄筋				アラミド繊維シート (水硬性樹脂硬化後)		
	圧縮強度 f' _c N/mm ²	割裂引張強度 f _t N/mm ²	静弾性係数 E _c KN/mm ²	軸方向鉄筋		帯鉄筋		引張強度 f _{AFu} N/mm ²	弾性係数 E _{AF} KN/mm ²	破断ひずみ ϵ_{AFu}
				降伏強度 f _y N/mm ²	弾性係数 E _s KN/mm ²	降伏強度 f _y N/mm ²	弾性係数 E _s KN/mm ²			
No. 1	25.6	2.56	24.7	375	193	366	208	2440	145	17240
No. 2	31.7	2.27	30.4	392	192	363	203	2460	144	17080

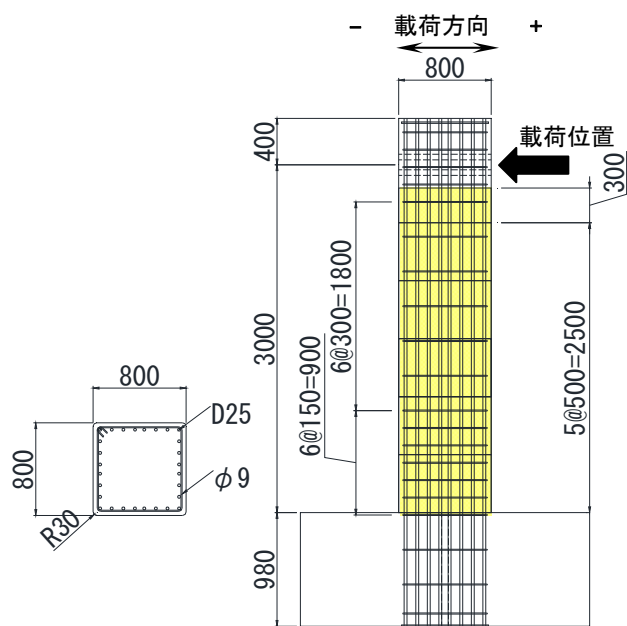


図 - 3 試験体寸法, 配筋 (試験体 No. 1)

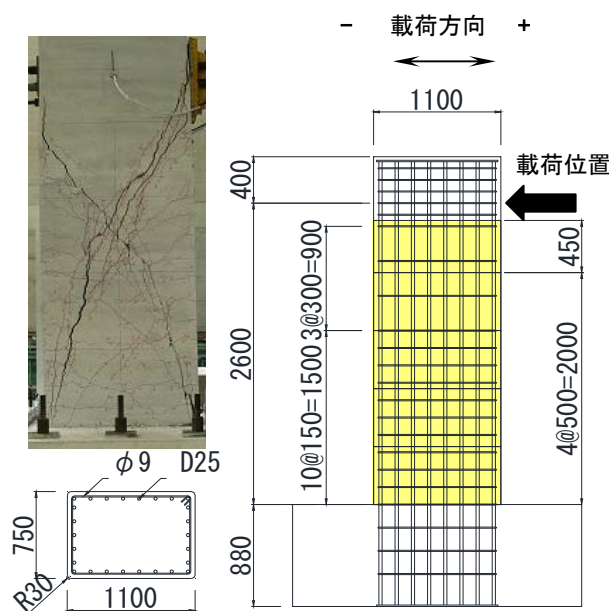


図 - 4 試験体寸法, 配筋および事前載荷時の損傷状況

3. 実験概要

3.1 試験体諸元

本実験に用いた試験体の諸元を表 - 1 に、耐力の算定値を表 - 2 に、材料試験結果を表 - 3 に示す。また、試験体 No.1 の試験体寸法, 配筋を図 - 3 に、試験体 No.2 の寸法, 配筋および事前載荷時の損傷状況を図 - 4 に示す。なお, 図中にはアラミド繊維シートの割付を併せて示す。

補強前の試験体はせん断破壊先行型とし, ラーメン高架橋のせん断スパンを取り出した実大モデルである。試

験体 No.1 は事前載荷を実施していない試験体であり, 既往の研究⁴⁾を参考に仕様を決定した。試験体 No.2 は事前の載荷試験³⁾によりせん断破壊した試験体である。表 - 2 に示す耐力およびじん性率の算定値は材料係数および部材係数を 1.0 とし, 鉄道構造物等設計標準・同解説 コンクリート構造⁵⁾ (以下, RC 標準と略す。), 「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⁶⁾」 (以下, アラミド繊維シート指針と略す。) に加え, 連続繊維シートの終局ひずみの影響を考慮した「連

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²⁾」(以下、連続繊維シート指針と略す。)に準拠して計算した。なお、耐力の算定には表-3に示す材料試験結果を用いた。以下にアラミド繊維シート指針⁶⁾および連続繊維シート指針²⁾に示されるアラミド繊維シートにより受け持たれるせん断耐力の算定式を示す。

(1) アラミド繊維シート指針⁶⁾

$$V_{AFy} = V_c + V_s + V_{AF} \quad (1)$$

$$V_{AF} = K \cdot \left\{ A_{AF} \cdot f_{AFu} \cdot (\sin\theta_{AF} + \cos\theta_{AF}) / S_{AF} \right\} \cdot z \quad (2)$$

ここに、

V_{AFy} : 棒部材のせん断耐力 (N)

V_c : せん断補強鋼材を用いない棒部材のせん断耐力 (N)

V_s : せん断補強鋼材により受け持たれる棒部材のせん断耐力 (N)

V_{AF} : アラミド繊維シートにより受け持たれる柱部材のせん断耐力の算定値 (N)

A_{AF} : 角度 θ_{AF} で配置される単位幅あたりのアラミド繊維シートの断面積 (mm^2)

f_{AFu} : アラミド繊維シートの引張強度 (N/mm^2)

K : アラミド繊維シートの補正係数 (0.4)

θ_{AF} : アラミド繊維シートが部材軸となす角度

S_{AF} : アラミド繊維シートの単位幅 (mm)

$$\mu_{AF} = 2.5 + 2.0 \cdot \frac{V_{AFy} \cdot l}{M_{AFu}} \leq 10 \quad (3)$$

ここに、

μ_{AF} : 柱部材の補強じん性率 (下限式)

M_{AFu} : 柱部材の補強曲げ耐力 ($\text{N} \cdot \text{mm}$)

l : せん断スパン (mm)

(2) 連続繊維シート指針²⁾

$$V_{fy} = V_c + V_s + V_f \quad (4)$$

$$V_f = K \cdot \left\{ A_f \cdot f_{fu} \cdot (\sin\alpha_f + \cos\alpha_f) / S_f \right\} \cdot z \quad (5)$$

ここに、

V_f : 連続繊維シートにより受け持たれるせん断耐力の算定値 (kN)

K : 連続繊維シートのせん断補強効率

$$K = 1.68 - 0.67R \quad (0.4 \leq K \leq 0.8)$$

$$R = (\rho_f \cdot E_f)^{1/4} (f_{fu} / E_f)^{2/3} (l / z)^{1/3}$$

$$\rho_f = A_f / (b_w \cdot S_f)$$

A_f : 区間 S_f における連続繊維シートの総断面積 (mm^2)

S_f : 連続繊維シートの配置間隔 (mm)

f_{fu} : 連続繊維シートの引張強度 (N/mm^2)

E_f : 連続繊維シートの弾性係数 (N/mm^2)

f_c : コンクリートの圧縮強度 (N/mm^2)

b_w : 部材幅 (mm)

α_f : 連続繊維シートが部材軸となす角度

$$\mu_f = \left[1.16 \cdot \frac{(0.5 \cdot V_c + V_s)}{V_{mu}} \cdot \left\{ 1 + \alpha_0 \frac{\varepsilon_{fu} \cdot \rho_f}{V_{mu} / (b_w \cdot z)} \right\} + 3.58 \right] / \gamma_{bf} \leq 10 \quad (6)$$

ここに、

μ_f : 連続繊維シートにより補修補強された部材のじん性率

ε_{fu} : 連続繊維シートの終局ひずみ

α_0 : 部材のじん性率の算出に用いる係数 (=帯鉄筋の弾性係数)

3.2 試験体の補強

試験体の補強は、図-2に示す本工法の施工フローに従って行った。水硬性ポリウレタン樹脂の含浸量、散水量は既往の研究⁷⁾を参考にそれぞれ $450\text{g}/\text{m}^2$ 、 $500\text{g}/\text{m}^2$ とした。試験体 No.2 は、事前の荷重試験³⁾によりせん断破壊に至っており、斜めひび割れ幅が大きく開いていたため、エポキシ樹脂系注入材の注入を行った後に補強を行った。試験体 No.1 は2層、試験体 No.2 は4層巻立てとし、両試験体とも、継手部には 200mm のラップ長を設けている。なお、両試験体ともに軸方向圧縮応力は作用させずに補強を行った。

3.3 荷重方法

試験体は一定の軸方向圧縮力を作用させた状態で、水平方向に正負交番荷重を行った。試験体 No.1 は、地震時に作用する軸方向圧縮応力⁴⁾を参考に 2356.6kN ($\sigma_n = 3.68\text{N}/\text{mm}^2$)、試験体 No.2 は、事前の荷重試験³⁾を参考に死荷重に相当する 594kN ($\sigma_n = 0.72\text{N}/\text{mm}^2$) とした。

試験体 No.1 の荷重サイクルは軸方向鉄筋が降伏した変位の正負の平均値 (19.6mm) δ_y とし、 δ_y までは繰り返しのない正負交番荷重、 δ_y 以降は δ_y を基準とした3サイクルの繰り返し正負交番荷重とした。一方、試験体 No.2 は、事前の荷重試験³⁾を参考に部材角による変位制御とし、 $\pm 1/400$ までは繰り返しのない正負交番荷重、 $\pm 1/400$ 以降は3サイクルの繰り返し正負交番荷重とした。

計測項目は、荷重、変位、鉄筋のひずみおよびアラミド繊維シートのひずみである。なお、試験体 No.2 の鉄筋ひずみは、事前の荷重試験³⁾にてひずみ計のコードが破断したため計測を行っていない。

4. 耐震性能の検討

4.1 実験結果

実験結果の一覧を表-4に、試験体の損傷状況を写真-1, 2に示す。

表 - 4 実験結果の一覧

試験体	主筋降伏時			最大荷重時			終局時	じん性率		
	算定値	実験値		算定値	実験値		実験値	算定値	実験値	
	降伏荷重 kN	降伏荷重 kN	変位 mm	最大荷重時 kN	最大荷重時 kN	変位 mm	変位 mm	μ_{AF}	μ_f	μ
No. 1	正	637	712.9	763	874.7	52.0	128.0	5.20	5.21	6.53
	負		-682.8		-19.7	-825.1				-73.9
No. 2	正	820	885.2 ^{*1}	1070	1175.7	78.3	155.7	6.11	-	10.33
	負		-		-	-1067.0				-77.1

*1: 事前載荷時³⁾

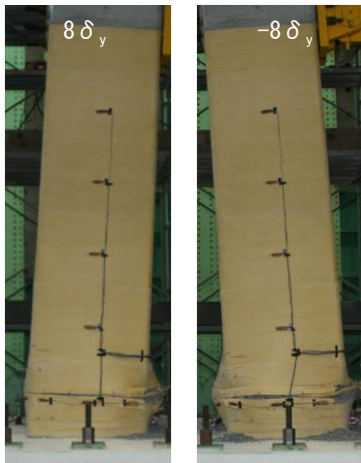


写真 - 1 試験体の損傷状況 (試験体 No. 1)

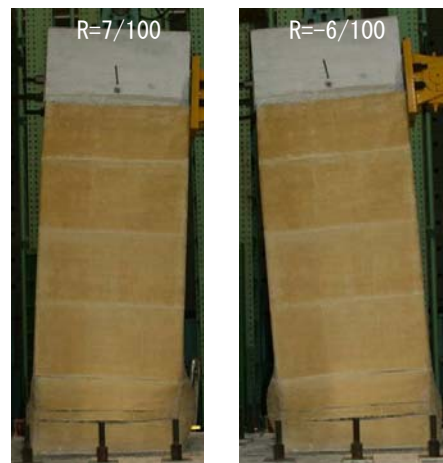


写真 - 2 試験体の損傷状況 (試験体 No. 2)

試験体 No.1 は、 $\pm 4\delta_y$ の繰り返し時に柱基部のはらみ出しが認められた。 $6\delta_y$ の繰り返し時に柱基部のはらみ出しが顕著となり、緩やかな荷重低下を生じた。 $\pm 8\delta_y$ の繰り返し時にアラミド繊維シートが隅角部にて破断し、荷重が大きく低下したため載荷を終了した。最大荷重は、正負ともに $\pm 4\delta_y$ でそれぞれ 874.7kN, -825.1kN であった。また、アラミド繊維シートは曲げ変形とともに、繊維方向に割裂が発生したものの、継手部破壊は生じなかった。一方、事前の載荷試験³⁾にてせん断破壊した試験体 No.2 は事前載荷の最大荷重を大きく上回り、 $\pm 4/100$ 載荷中に柱基部がはらみ出し、緩やかな荷重低下を生じた。 $\pm 6/100$ 載荷中に軸方向鉄筋が破断し、大きな荷重低下を生じたため、 $+7/100$ にて載荷を終了した。最大荷重は、正負ともに $\pm 3/100$ でそれぞれ 1175.7kN, -1067.0kN であった。試験体 No.2 は、アラミド繊維シートは、曲げ変形とともに繊維方向に割裂が発生したものの、継手部破壊や繊維破断は生じなかった。

4.2 水平荷重 - 水平変位関係

(1) 曲げ耐力と破壊形態

水平荷重 - 水平変位の包絡線を図 - 5, 6 に示す。ここで、水平荷重は、軸力による付加曲げモーメントの補正を行ったものであり、じん性率 μ は最大耐力以降に降伏荷重を維持できる最大変位点 (N 点) と軸方向鉄筋が降

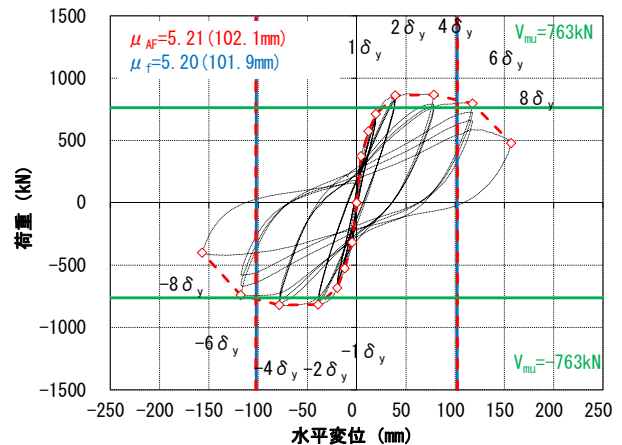


図 - 5 水平荷重 - 水平変位の包絡線 (試験体 No. 1)

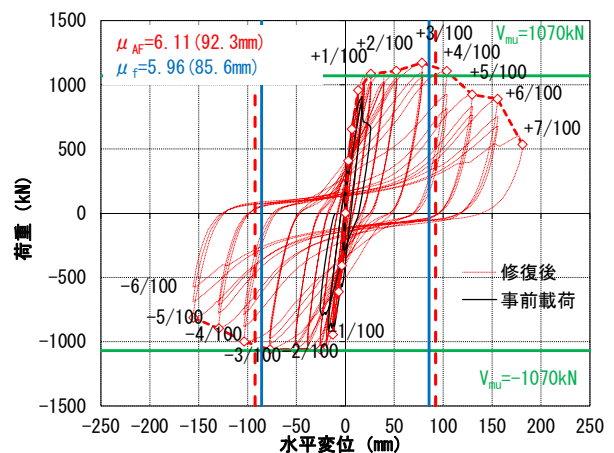


図 - 6 水平荷重 - 水平変位の包絡線 (試験体 No. 2)

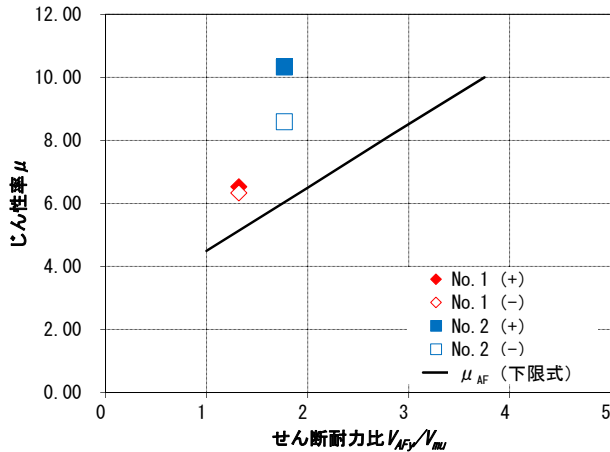


図-7 じん性率 μ_{AF} の算定値と実験結果 μ の比較

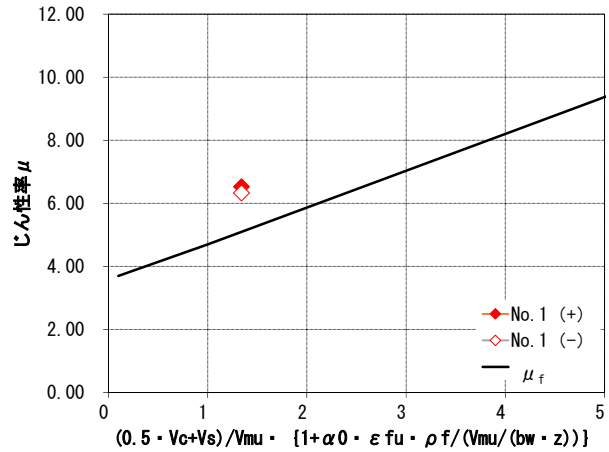


図-8 じん性率 μ_f の算定値と実験結果 μ の比較

伏する変位点 (Y 点) の比である。また、図中には、曲げ耐力時の水平荷重の計算値 V_{mu} 、じん性率 μ_{AF} 、 μ_f から求まる終局変位の計算値 δ_n を併せて示す。なお、試験体 No.2 の δ_n は事前の載荷試験³⁾の初降伏変位により算出した。

試験体 No.1 の水平荷重 - 水平変位は $4\delta_y$ の繰り返し時に若干の荷重低下を生じているが、安定した履歴を描いており、RC 標準⁵⁾に示される繰り返しにより顕著な荷重低下を生じない最大変位点である M 点は $4\delta_y$ と考えられる。曲げ耐力の実験値と計算値の比 (実験値/計算値) は、正負それぞれ 1.15, 1.08 となった。また、軸方向鉄筋の降伏、座屈を生じていることから、試験体 No.1 は曲げ破壊したものと考えられる。以上より、試験体 No.1 は、本工法により補強することで、RC 標準⁵⁾によりせん断破壊型と判定される試験体の破壊形態を曲げ破壊型に移行させることができ、その曲げ耐力は、RC 標準⁵⁾に準拠した算定値を上回ることを確認した。

一方、試験体 No.2 の水平荷重 - 水平変位は $3/100$ の繰り返し時に若干の荷重低下が生じているが、安定した履歴を描いており、RC 標準⁵⁾に示される M 点は $3/100$ と考えられる。曲げ耐力の実験値と計算値の比 (実験値/計算値) は、正負それぞれ 1.10, 0.99 となった。試験体 No.1 の実験値と計算値の比と比較すると、試験体 No.2 では実験値と計算値の比は正負ともにやや小さくなっている。これは、事前の載荷試験³⁾により発生した斜めひび割れにはエポキシ樹脂系注入材を注入したものの、初期剛性が低下していることが影響していると考えられる。しかしながら、軸方向鉄筋の座屈、破断が生じていることから試験体 No.2 は曲げ破壊したものと考えられる。以上より、試験体 No.2 はひび割れにエポキシ樹脂系注入材を注入し、本工法にて補強することで、せん断破壊した試験体の破壊形態を曲げ破壊型に移行させることができ、その曲げ耐力は、RC 標準⁵⁾に準拠した曲げ耐力の算定値

と同等になることを確認した。

(2) 変形性能

鉄道構造物の耐震補強は、部材角に基づく変形性能の評価を行い、設計を行うことが一般的である⁸⁾。しかしながら、連続繊維シートを用いた耐震補強工法では、部材角に基づく変形性能の評価方法は提案されていない。このため、本稿では、アラミド繊維シート指針⁶⁾および連続繊維シート指針²⁾に示されたじん性率による評価方法に基づき本工法の変形性能を検討することとした。また、本実験では材料係数、部材係数を 1.0 としているため、アラミド繊維シート指針⁶⁾に示される下限式によりじん性率の評価を行った。なお、試験体 No.2 は、せん断補強量比 ρ_f が連続繊維シート指針²⁾に示されたじん性率の評価方法の適用外であるため、連続繊維シート指針²⁾による検討から除外した。

じん性率の算定値 μ_{AF} 、 μ_f と実験結果 μ の比較を図-7, 8 に示す。

じん性率の実験値 μ とアラミド繊維シート指針⁶⁾によるじん性率の算定値 μ_{AF} の比 (実験値/算定値) は、試験体 No.1 で正負それぞれ 1.25, 1.21, 試験体 No.2 では 1.69, 1.41 となり、アラミド繊維シート指針⁶⁾に示される式(3)を上回ることを確認した。しかしながら、試験体 No.2 のじん性率の実験値 μ は算定値 μ_{AF} を大きく上回っている。試験体 No.2 は引張鉄筋比が 0.45% と小さく、軸方向圧縮応力も 0.72N/mm^2 と小さい。式(3)は、引張鉄筋比 0.9% 程度、軸方向圧縮応力 3.5N/mm^2 程度の正負交番載荷試験から導き出される実験式である。このため、じん性率とせん断耐力比の関係式である式(3)ではこれらの影響を考慮できていないと考えられる。

また、じん性率の実験値 μ と連続繊維シート指針²⁾に示されるじん性率の算定値 μ_f の比 (実験値/計算値) は試験体 No.1 が正負それぞれ 1.26, 1.22 となり、連続繊維シート指針²⁾に示される式(6)を上回ることを確認した。

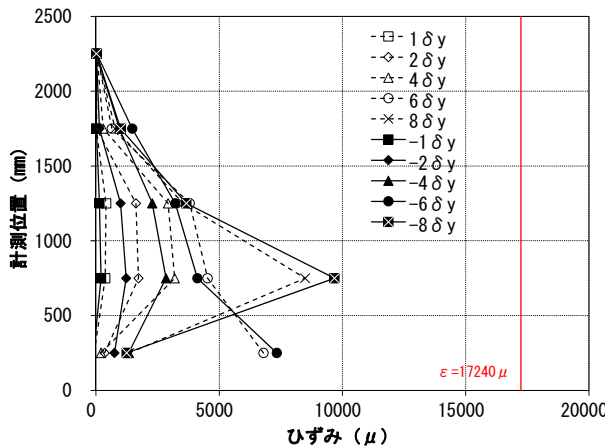


図-9 アラミド繊維シートのひずみ分布 (試験体 No. 1)

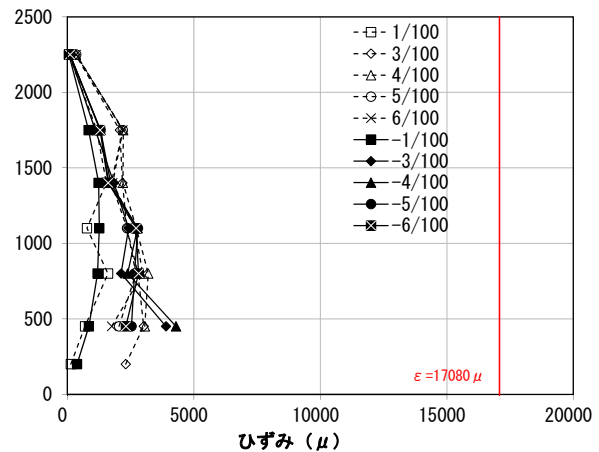


図-10 アラミド繊維シートのひずみ分布 (試験体 No. 2)

4.3 アラミド繊維シートのひずみ

アラミド繊維シートのひずみ分布を図-9, 10に示す。隅角部にてアラミド繊維シートが破断した試験体 No.1 は柱基部から750mm位置にてひずみの最大値となった。ひずみの最大値は8δy時に9700μ程度であった。一方、アラミド繊維シートの破断がみられなかった試験体 No.2 では柱基部から450mm位置にてひずみの最大値となった。ひずみの最大値は4/100時に4300μ程度であった。なお、試験体 No.2 では3/100の繰返し時に柱基部から250mm位置のひずみ計が計測不能となっている。

5. おわりに

本稿では、RC標準⁵⁾によりせん断破壊型と判定される試験体と事前の荷重試験³⁾にてせん断破壊し、ひび割れ注入を行った試験体に対し、本工法による補強を行い、正負交番荷重試験を実施した。本実験により得られた所見を以下に示す。

- $V_{mu}/V_{AFyd}(V_{fyd}) < 1.0$ となるように、本工法にて補強することで、RC標準⁵⁾によりせん断破壊型と判定されるRC柱の破壊形態をせん断破壊型から曲げ破壊型に移行できる。
- 本工法により補強したRC柱の曲げ耐力はRC標準⁵⁾により評価できる。
- $V_{mu}/V_{AFyd}(V_{fyd}) < 1.0$ となるように、本工法にて補強することで、事前の荷重試験³⁾にてせん断破壊し、ひび割れ注入を行ったRC柱の破壊形態をせん断破壊型から曲げ破壊型に移行できる。
- ひび割れ注入を行い、本工法にて補強したせん断破壊したRC柱の曲げ耐力はRC標準⁵⁾とほぼ同程度となる。
- 本工法により補強したRC柱のじん性率は、アラミド繊維シート指針⁶⁾により評価できる。
- 本工法により補強したRC柱のじん性率は、連続繊維シート指針²⁾により評価できる。

謝辞

本実験は、エムシー工業(株)山崎久史氏にご協力を頂き、東京理科大学加藤佳孝准教授に多大なるご指導頂きました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 笠倉亮太ほか：水硬性樹脂を含浸させた連続繊維シートを用いた迅速復旧工法の開発，コンクリート工学，Vol.47，No.12，pp.12-25，2009.12
- 2) 土木学会：コンクリートライブラリー101 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，2000.7
- 3) 渡邊竜太ほか：柱中間部の帯鉄筋量と帯鉄筋形状に着目した既設高架橋柱の破壊性状について，土木学会第67回年次学術講演会公演概要集，pp.847-848，2012.9
- 4) 勝木太，中井裕司，渡辺忠朋，森山智明：アラミド繊維シートによる鉄道高架橋柱のじん性能に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文報告集 Vol.19，No.2，pp.1569-1574，1997.7
- 5) (公財)鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説 コンクリート構造物，2004.4
- 6) (公財)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，アラミド補強研究会，1996.12
- 7) 笠倉亮太ほか：水硬性樹脂を用いた連続繊維シートの継手性状に及ぼす施工方法の影響，土木学会第67回年次学術講演会公演概要集，pp.891-892，2012.9
- 8) 前田友章，岡本大，谷村幸裕：鋼板巻立て補強した鉄筋コンクリート柱の変形性能算定手法，コンクリート工学年次論文報告集 Vol.31，No.2，pp.1087-1092，2009.7