

# 論文 シート状連続繊維によりせん断補強された RC 柱の靱性能に関する実験的研究

片岡隆広\*<sup>1</sup>・松崎育弘\*<sup>2</sup>・福山洋\*<sup>3</sup>・荒木伸宏\*<sup>4</sup>

要旨：本論文は、シート状連続繊維によってせん断補強された RC 柱の部材降伏後の靱性能についての基礎資料を得るために行った実験結果をまとめたものである。既存 RC 柱に巻き付けるシートの量及び素材を主な変動要因とした実験を行い、純 RC 柱の性状と比較検討した。その結果、シート補強することで、既存 RC 柱の靱性能を向上させることが出来、その補強効果は強度比換算されたせん断補強筋比によって概ね評価出来ることを明らかにした。また、中心軸圧縮実験及び残存軸圧縮実験を行い、シート補強により既存 RC 柱の圧縮靱性を向上させることが出来ることも明らかにした。

キーワード：耐震補強、シート状連続繊維、靱性能、中心軸圧縮、残存軸圧縮

## 1. はじめに

1981年の新耐震設計法の施行に伴い、それ以前に建てられた RC 造建物の多くは「既存不適格」とされ、耐震補強を行う必要が生じた。しかし、社会一般の問題意識の低さから、実際に耐震補強を行った建物は少なかった。そのため、1995年の阪神淡路大震災では、数多くの「既存不適格」の RC 造建物が大きな被害を受けた。現在、既存 RC 造建物の耐震診断及び耐震補強・補修は社会的な問題として強く認識され、早急な対応が迫られている。

一方、著者らは、ここ十数年来、炭素繊維やアラミド繊維に代表される新素材の建築構造材への適用に関する研究を行ってきた。これらの素材は、軽量・高強度・高耐食性・非磁性といった特性を持ち、PC緊張材・鉄筋の代替材として、すでに実用化が図られている。

このような情勢の中、著者らは新素材、特にシート状連続繊維（以下、シート）の補強・補修工法への利用に注目し、その可能性について検討を進めてきた。耐震補強・補修が急務である現在、シートを既存 RC 部材にエポキシ樹脂等により貼り付ける補強工法（以下、シート補強）は、その施工性の良さから、従来の工法に比肩する有用な工法として期待され、実用化が始まっている。しかし、その補強効果については定量的に把握されていないのが、まだ実状であると思われる。著者らは、文献 [1] において、シート補強された RC 柱の部材実験を行い、そのせん断補強効果及び構造性能を把握するための基軸を作成し報告した。実験結果としては、付着劣化が顕著であり、部材降伏に至らず、部材降伏後の靱性能が不明確であった。そこで、本研究では、確実に部材降伏するように試験体を計画し、純 RC 柱と比較することで、シート補強された RC 柱の部材降伏後の靱性能に関する基礎資料を得ることを目的とした。また、シート補強された RC 柱の中心軸圧縮性状についても、その基礎資料を得ることを目的とした。

- 
- |    |                                  |       |
|----|----------------------------------|-------|
| *1 | (株) 鴻池組                          | (正会員) |
| *2 | 東京理科大学教授 工学部建築学科, 工博             | (正会員) |
| *3 | 建設省建築研究所 国際地震工学部第一耐震工学室主任研究員, 工博 | (正会員) |
| *4 | 東京理科大学大学院 工学研究科建築学専攻             | (正会員) |

## 2. 実験概要

### 2. 1. 試験体

図1に試験体形状、表1、表2に試験体一覧、表3、表4に使用材料特性を示す。

試験体総数は19体で、靱性実験9体、中心軸圧縮実験10体である。共通要因は、断面 $b \times D = 30\text{cm} \times 30\text{cm}$ 、せん断スパン $45\text{cm}$ 、主筋 $12\text{-D13}$ (SD295)である。主な変動要因は、シート補強されていない試験体（以下、純RC試験体）のせん断補強筋比 $p_w$ 、シートの巻付け量、シートの種類（高強度炭素繊維、アラミド繊維）である。靱性実験・中心軸圧縮実験とも、 $p_w = 0.13\%$ のNo.1と同様の純RC試験体にシートを巻付けることとした。文献[1]より、シートによる補強効果は、式(1)によりシートをせん断補強筋に換算すること（以下、強度比換算）で概ね評価できるとの知見が得られた。そこで、実験計画では、シート補強後のせん断補強筋比 $\Sigma p_w$ が純RC試験体の $\Sigma p_w$  ( $p_w$ ) に対応するようにシートの巻付け量を設定し、 $\Sigma p_w$ が対応する純RC試験体と比

表-1 試験体一覧（靱性実験）

試験体名	$p_w$ (%)	$p_w$ (%)	$\Sigma p_w$ (%)	繊維種類	目付 (g/m <sup>2</sup> )	シート巻付け幅	$\sigma_B$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	
No. 1 RC-013-II	0.13	0.13	0.13	高強度炭素繊維	200	3 (cm)	275	
No. 2 RC-060-II	0.60		0.60			9 (cm)	277	
No. 3 RC-119-II	1.19		1.19			305		
No. 4 CFA-028-II	0.13	0.014	0.28	高強度炭素繊維	200	3 (cm)	306	
No. 5 CFA-058-II		0.042	0.58			9 (cm)	292	
No. 6 CFA-134-II		0.111	1.34			300	全面1層	298
No. 7 CFA-254-II		0.223	2.54				全面2層	298
No. 8 CFA-374-II		0.334	3.74	全面3層	298			
No. 9 AFC-345-II		0.430	3.45	アラミド繊維	300	全面3層	298	

表-2 試験体一覧（中心軸圧縮実験）

試験体名	$p_w$ (%)	$p_w$ (%)	$\Sigma p_w$ (%)	繊維種類	目付 (g/m <sup>2</sup> )	シート巻付け幅	$\sigma_B$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	加力方法
No. 1 RC-013-III	0.13	0.13	0.13	高強度炭素繊維	300	全面1層	318	中心軸圧縮のみ
No. 2 RC-119-III	1.19		1.19			全面3層	319	
No. 3 CFA-134-III	0.13		0.111			1.34	全面3層	
No. 4 CFA-374-III		0.334	3.74	全面3層	320			
No. 5 AFC-345-III	0.430	3.45	アラミド繊維	300	全面3層	326		
No. 6 RC-060-III	0.60	0.60	0.60	高強度炭素繊維	300	全面1層	320	靱性実験後 残存軸圧縮
No. 7 RC-119-III	1.19		1.19			全面3層	303	
No. 8 CFA-134-III	0.13		0.111			1.34	全面3層	
No. 9 CFA-374-III		0.334	3.74	全面3層	303			
No. 10 AFC-345-III	0.430	3.45	アラミド繊維	300	全面3層	305		

表-3 シート材料特性

	引張強度* (kgf/cm <sup>2</sup> )	弾性係数 (kgf/cm <sup>2</sup> )
高強度炭素繊維	35000	$2.35 \times 10^6$
目付200 (gf/m <sup>2</sup> )	41100	$2.50 \times 10^6$
高強度炭素繊維	35000	$2.35 \times 10^6$
目付300 (gf/m <sup>2</sup> )	44100	$2.39 \times 10^6$
アラミド繊維	25000	$0.89 \times 10^6$
目付300 (gf/m <sup>2</sup> )	29400	$0.81 \times 10^6$

\*上段：カタログ値  
下段：材料試験結果平均値

表-4 鉄筋材料試験結果

	降伏強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	ヤング係数 ( $\times 10^{-6} \text{kgf/cm}^2$ )
D6 (SD295)	3242	1.77
D10 (SD295)	3742	1.96
D13 (SD295)	3818	1.97

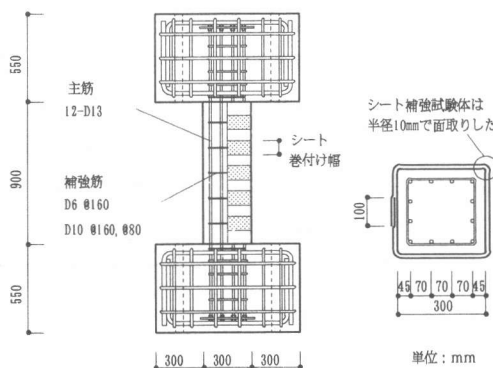


図-1 試験体形状

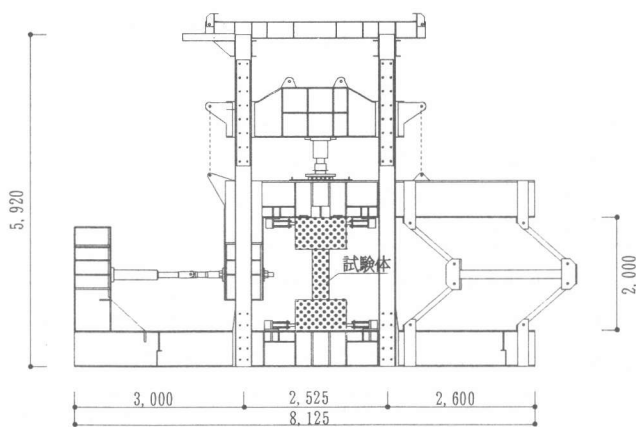


図-2 加力装置 (靱性実験)

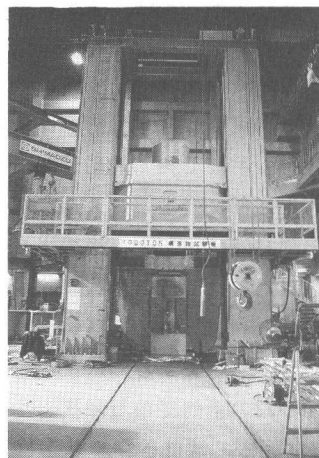


写真-1 加力装置 (中心軸圧縮実験)

較することで、シート補強した柱部材の構造性能を評価することを意図した。また、シートを2層、3層と巻付け、補強効果の限界を実験的に明らかにすることとした。

$$\Sigma \rho_w = \rho_w + \frac{f_{\sigma u}}{w \sigma_y} \times \rho_w \quad \dots (1)$$

$\Sigma \rho_w$ : シート補強後のせん断補強筋比

$\rho_w$ : 既存RC部のせん断補強筋比

$\rho_w$ : シートのせん断補強筋比

$w \sigma_y$ : せん断補強筋の降伏強度

$f_{\sigma u}$ : シートの引張強度

尚、シート引張強度にはカタログ値を用いることとした。カタログ値は、シートの引張試験結果が正規分布になるものとして、不良率が0.1%以下になるように、メーカーから出されている値である。本実験で用いたシートについて各5本ずつの引張試験を行った結果、高強度炭素繊維は40200~46900 (kgf/cm<sup>2</sup>)、アラミド繊維は28000~32000 (kgf/cm<sup>2</sup>)で、いずれもカタログ値を上回っていた。

## 2. 2. 実験方法

図2、写真1に加力装置、図3に靱性実験の加力模式図、図4に靱性実験の载荷履歴を示す。

靱性実験の加力は、建研式加力装置によって行い、一定軸力下(軸力比0.2)での正負交番繰り返し载荷とする。また、中心軸圧縮実験は1000tf構造物試験機によって行った。尚、中心軸圧縮実験シリーズのNo.6~No.10において、靱性実験で層間変形角 $R=1/20$ radまで加力し、変形を0に戻した試験体を、中心軸圧縮する残存軸圧縮実験を行った。

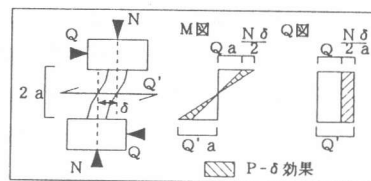


図-3 加力模式図 (靱性実験)

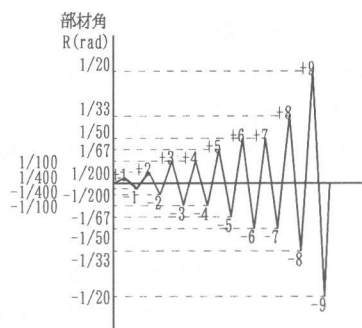


図-4 载荷履歴 (靱性実験)

### 3. 靱性実験－実験結果及び検討

#### 3. 1. 破壊性状

図5に最終破壊状況を示す。

最初に本実験の基本軸である純RC試験体No.1～3の破壊性状について述べる。No.1は、 $R=1/100\text{rad}$ の手前で突発的にせん断破壊し、急激に耐力低下した。No.2は、 $R=-1/100\text{rad}$ の手前で、試験体上端部に発生した大きなせん断ひび割れによりせん断破壊した。No.3は、 $R=-1/100\text{rad}$ の手前で部材降伏し、その後の繰り返し载荷により付着ひび割れが大きく進展した。

これに対し、シート補強試験体は、No.4は、No.1とよく似たひび割れ性状を示し、+5サイクルの $R=1/100\text{rad}$ 付近でせん断破壊し、急激に耐力低下した。その後、 $R=1/50\text{rad}$ の手前においてせん断面でシートが破断した。また、No.5は $\Sigma p_w$ の対応するNo.2とよく似たひび割れ性状を示したが、 $R=1/100\text{rad}$ の手前で部材降伏し、 $R=-1/100\text{rad}$ で試験体上端部に発生したせん断ひび割れよりせん断破壊した。その後、 $R=-1/20\text{rad}$ の手前においてコーナー部でシートが破断した。試験区間全面にシートを巻付けたNo.6～No.9は、最後までシート破断せず、実験後にシートを除去した結果、No.5と同様のひび割れ性状であった。シート補強した試験体は、純RC試験体に比べて付着劣化が抑えられ、シートによる付着性能の改善が観察された。

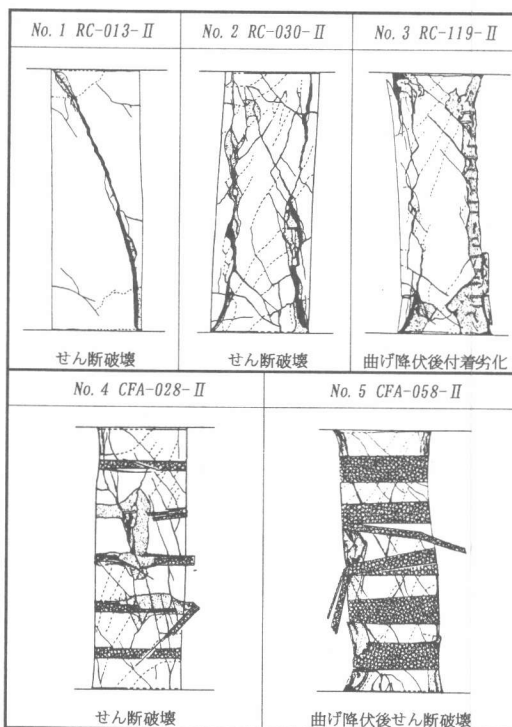


図-5 最終破壊状況

#### 3. 2. 変形状

図6に純RC試験体の $Q$  (せん断力) -  $\delta$  (相対変位) 包絡線比較、図7～9にシートによる補強効果を示す $Q - \delta$  包絡線比較を示す。図6より、シート補強試験体の既存RC部であるNo.1の性状は、 $R=1/100\text{rad}$ の手前で最大耐力を迎えると同時にせん断破壊し、急激に耐力低下した。また、純RC試験体は、 $\Sigma p_w$ を大きくすることで初期剛性を変化させずに、部材の変形性能を向上させることが出来た。図7より、No.5～8は $R=1/100\text{rad}$ 手前で部材降伏した後、最大耐力を迎えた。そして、 $\Sigma p_w$ を増やすことで、純RC試験体と同様に、初期剛性を変化させることなく、部材降伏後の変形性能を向上させることが出来た。特に、シートを試験区間全面に1層、2層、3層と巻付けたNo.6～No.8は $R=1/100\text{rad}$ 以降の耐力低下が少なく、本実験の範囲ではシート巻付け量を増やすほど高い靱性能を発揮すること

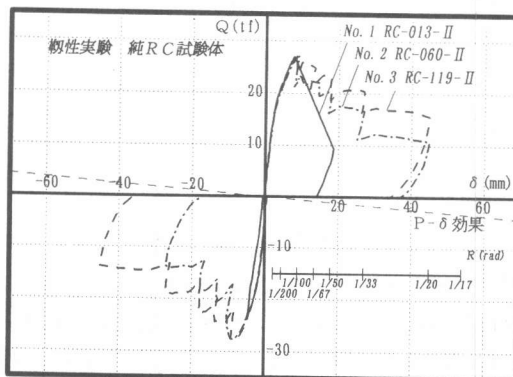


図-6  $Q - \delta$  包絡線 (純RC試験体)

が明らかになった。そこで、シートによるせん断補強効果を定量的に把握するため、 $\Sigma pw$ の対応する純RC試験体とシート補強試験体を比較する。図8より、 $\Sigma pw=1.2\%$ 前後のNo. 3, 6を比較すると、剛性、耐力、変形性能においてほぼ同様の性状を示している。また、 $\Sigma pw=0.6\%$ 前後のNo. 2, 5の比較では、No. 2で部材降伏が確認されなかったものの、ほぼ同様の性状を示した。即ち、シートのせん断補強効果は強度比換算した $\Sigma pw$ で概ね評価出来るといえる。しかし、図9より、アラミド繊維により補強した場合、No. 1よりは確実に靱性能が向上しているものの、 $\Sigma pw$ から期待される靱性能を発揮するには至らなかった。つまり、シートによるせん断補強効果を強度比換算で評価するには、シートの引張強度に低減係数を乗じる等の工夫が必要であると考えられる。

#### 4. 中心軸圧縮実験 - 実験結果及び検討

図10~12にN(軸力)- $\Delta L$ (軸縮み)曲線の比較を示す。

純RC試験体のNo. 1は、軸歪み約1400 $\mu$ で主筋が圧縮降伏し、軸歪み約2700 $\mu$ で最大耐力を迎え、主筋の座屈により急激に耐力低下した。最大耐力は296tfであるのに対し、最終的に保持した軸耐力は100tfに満たなかった。これに対しpwを増やしたNo. 2は、最大耐力まではほぼ同様の性状を示した。No. 1に比べ最大耐力は312tfとやや高く、急激な耐力低下の後に保持する軸耐力も約230tfと高かった。純RC試験体では、pwを高くすることで最大耐力発揮以降の圧縮靱性を向上させることが出来た。

これに対しシート補強試験体No. 3~No. 5は、No. 1及びNo. 2に比して、初期剛性はやや高いものの、最大耐力までは純RC試験体とほぼ同様の性状を示した。その後、純RC試験体と同様に試験区間中央での主筋の座屈により急激に耐力低下した。この時保持した軸耐力は約230tfでNo. 2と同程度であるが、その後の下り勾配はNo. 2より緩やかであった。つまり、シート補強することで、純RC試験体と同様に、最大耐力発揮以降の圧縮靱性を向上させることが出来た。なお、シート破断が生じたのは、No. 4が軸歪み約28900 $\mu$ 、No. 5が軸歪み約42300 $\mu$ であり、いずれもコーナー

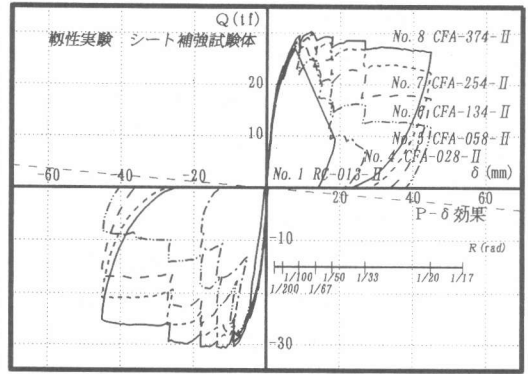


図-7 Q- $\delta$ 包絡線 (シート補強試験体)

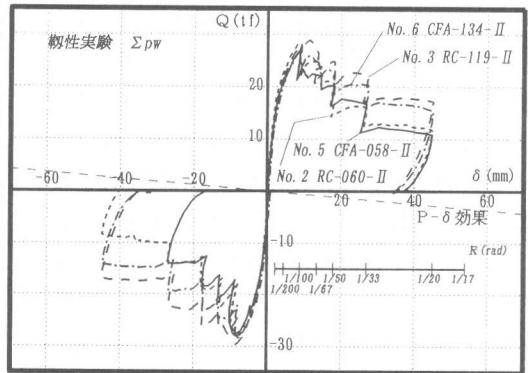


図-8 Q- $\delta$ 包絡線 ( $\Sigma pw$ による比較)

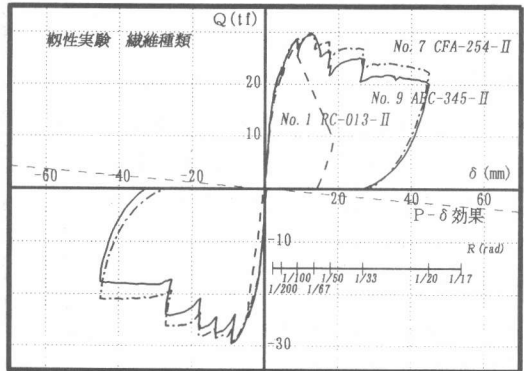


図-9 Q- $\delta$ 包絡線 (繊維種類)

部において破断した。No. 5はシート破断した箇所で補強筋が絞り破断していた。

残存軸圧縮実験を行ったNo. 6～No. 10は、中心軸圧縮のみを行ったNo. 1～No. 5に比して、初期剛性が著しく低かった。軸歪み3000 $\mu$ 前後での軸耐力を比較すると、中心軸圧縮のみを行った試験体は最大耐力の約300tfを發揮したのに対し、残存軸圧縮を行った試験体は約100tfで、1/3程度であった。その後、荷重の増加に伴い、剛性が徐々に低くなり、pwが対応する中心軸圧縮のみの試験体のN- $\Delta$ L曲線に漸近する傾向が観察された。ここで、図11より、No. 6については初期剛性は同程度であったが、軸歪み8000 $\mu$ の手前で發揮した最大耐力は約100tfと非常に低かった。この実験結果から、大きな地震力を受けた後に保持する軸耐力は、水平力の履歴を受けない初期条件での軸耐力に比して、非常に低くなることもあり、今後、設計を行う上で、残存軸耐力に対する配慮が必要であると考えられる。

#### 4. まとめ

- (1)シート 巻付け量を増やすことで部材降伏後の靱性能を向上させることが出来た。
- (2)シート 補強した柱部材の靱性能は、シートによるせん断補強効果を強度比換算することで純RC柱部材と同様に評価できる。
- (3)シート 補強することで部材の圧縮靱性を向上させることが出来た。
- (4)pwの低い柱は、最大耐力に対して残存軸耐力が著しく低くなる。

本研究は日米共同研究(Hybrid構造)のFRP-Hybrid研究委員会(主査:東京理科大学教授 松崎育弘)の下で行われたものである。

#### 参考文献

- [1]松崎育弘ほか：シート状連続繊維によりせん断補強されたRC柱の構造性能に関する実験的研究，コンクリート工学年次講演会論文集，Vol. 18, No. 2, pp1463-1468, 1996.
- [2]日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算 規準・同解説，1988, 1991一部改
- [3]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・同解説，1990

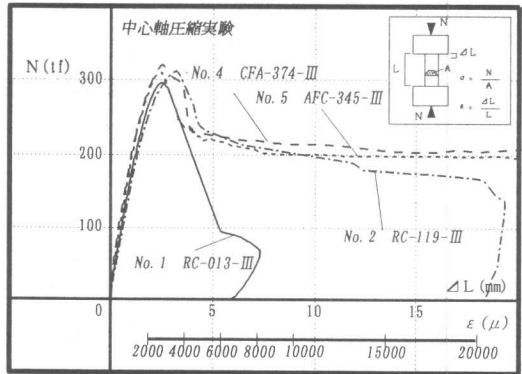


図-10 N- $\Delta$ L曲線(中心軸圧縮実験)

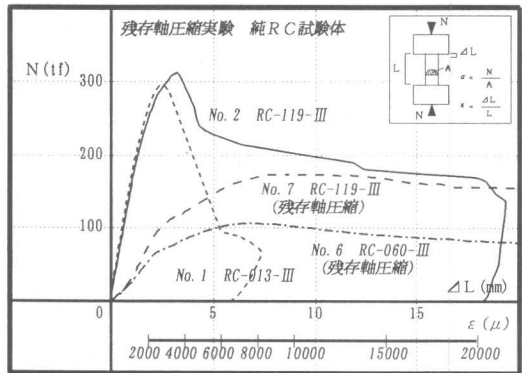


図-11 N- $\Delta$ L曲線(純RC試験体)

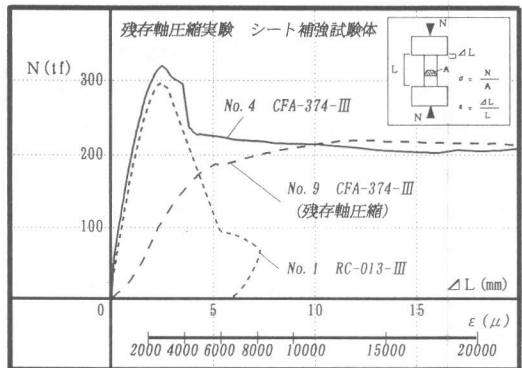


図-12 N- $\Delta$ L曲線(シート補強試験体)