

U.D.C 624.012.45

## 水硬性ポリウレタン樹脂を含浸させた 連続繊維シートを用いた迅速復旧工法の開発

小島 文寛\* 笠倉 亮太\* 伊藤 正憲\*

**要約：** 地震等で損傷を受けた構造物は、余震に対する安全性や構造物の機能性の確保を目的として応急復旧する必要がある。しかしながら、既往の復旧技術は、施工が大掛かりであり、また効果発現までに数日を要するものが多い。これでは本震直後に頻発する余震に対応できない可能性が高い。このような背景の下、筆者らは安全・簡易・迅速に施工可能な工法として、水硬性樹脂を含浸させた連続繊維シート(以下、TST-FiSH)を用いた迅速復旧工法の開発を行っている。これまでに接着試験等による基礎物性の把握、梁試験体による補修効果検討、柱試験体による構造性能確認実験を行った。その結果、従来の連続繊維シート巻立て工法と比較し、1/10の施工時間で同等の補修効果が得られることが確認された。本稿では実験結果とともに、TST-FiSHの迅速復旧工法への適用の可能性について報告する。

**キーワード：** 迅速復旧、水硬性樹脂、連続繊維シート、せん断破壊

**目次：** 1. はじめに  
2. 実験概要

3. 実験結果と考察  
4. まとめ

### 1. はじめに

1995年の阪神・淡路大震災以降、その甚大な被害を鑑みコンクリート構造物の耐震補強が進んでおり、首都圏の主要交通機関や緊急輸送道路の耐震補強はほぼ完了している。しかしながら、地震の規模によっては、倒壊等の大規模被害に至らないまでも損傷を受ける構造物が、未だ多く存在している<sup>1)</sup>。また、新設構造物においても大規模地震に対してある程度損傷を許容する設計となっており、完全に損傷を免れることはできない。損傷を受けた構造物は、余震に対する安全性、構造物の機能性の確保を目的として応急復旧する必要がある<sup>2)</sup>が、既往の復旧技術は、施工が大掛かりであり、また効果発現までに数日を要するものが多い。これでは本震直後に頻発する余震に対応できない可能性が高い。このような背景の下、被災後に迅速に対応ができ、安全でかつ簡易に施工可能な復旧工法の開発が望まれている<sup>例えば3)</sup>。そこで、著者らは医療用ギプスをアイデアの起源とし、損傷したRC柱部材に対し、水硬性樹脂が含浸された連続繊維シートを巻き立てた後、散水するだけで補修効果が得られる新しい迅速復旧工法を開発している(図1)。連続繊維シートは、運搬が容易で任意の形状の構造物に巻き立て可能であり、医療用ギプスと同様にあらかじめ連続繊維シートに樹脂を含浸させた状態で保存されていることを想定しているため、従来技術と比較し大幅に施工時間が短縮される。また、水硬性ポリウレタン樹脂およ

びガラス連続繊維シートを用いた補修効果検討実験より、損傷前と同程度以上に耐荷力が回復したことから、実用化の可能性が示唆されたと考えている<sup>4)</sup>。しかし、提案する迅速復旧工法がどの程度の損傷まで補修効果を発揮することが可能か、また、一般的に使用されている連続繊維シート(炭素、アラミド、ビニロン)を適用した場合の挙動など、工法の確立に向けた課題が残されている。

そこで、各種連続繊維シートを用いた場合の水硬性樹脂の適用可能性を検討し、その補修効果を梁部材および柱部材を用いた試験によって確認した。本稿では、これらの検討結果について報告する。なお、水硬性樹脂が含浸された連続繊維シートをTST-FiSH(Fiber Sheets containing Hydraulic resin)、連続繊維シートの種類の違いを繊維名+TST-FiSH(例えば、炭素TST-FiSH)と称す。

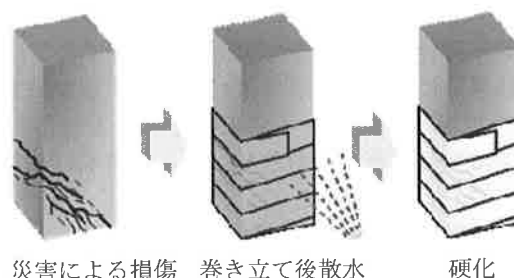


図1 TST-FiSHの施工概念図

### 2. 実験概要

\*土木総本部 土木技術部

## 2.1 使用材料

### (1) 水硬性ポリアウレタン樹脂

本研究で用いた水硬性ポリアウレタン樹脂(粘度：35000～45000 mPa・s at 25℃)は、一液硬化性であり、水と接触することで反応・硬化が始まり、それに伴い炭酸ガスを発生する。原液のままでは粘性が高く扱いが困難であるため、グリコールエーテル系溶剤により希釈し使用した。樹脂濃度が高い場合、強度は高いが発泡し、樹脂濃度が低い場合、発泡は抑制できるが強度は低くなる性質を有している。また、樹脂濃度の低下に伴い、単位量当たりの反応成分が少なくなるため、水との見掛けの反応速度は速くなる。樹脂濃度 80%を用いて実験を試みたが、発泡量が多く試験が行えなかった。そこで、発泡が抑制可能な樹脂濃度 75%および 66%を選定した<sup>4)</sup>。

### (2) 連続繊維シート

実験で使用した連続繊維シートの物性値を表-1 に示す。炭素繊維シートは高強度、2 方向クロスタイプ、アラミド繊維シートは 1 方向、ビニロン繊維シートは 2 方向クロスタイプである。なお、表 1 に示す物性値は公称値である。

表 1 連続繊維シート種類

連続繊維シート種類	目付量 (g/m <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	弾性係数 (N/mm <sup>2</sup> )	破断伸度 (%)
炭素 1	200	3400	2.45×10 <sup>5</sup>	1.5
炭素 2	300	3400	2.45×10 <sup>5</sup>	1.5
アラミド 1	280	2060	1.18×10 <sup>5</sup>	1.8
アラミド 2	415	2060	1.18×10 <sup>5</sup>	1.8
ビニロン	285	2000	4.30×10 <sup>4</sup>	4.8

表 2 施工方法選定試験条件

樹脂濃度	連続繊維シート種類	給水方法	仕上げ時間 (脱泡・水切り)
66%	炭素 2	散水浸漬	直後
75%			5 分後 10 分後

表 3 連続繊維シート選定試験条件

樹脂濃度	連続繊維シート種類	給水方法	仕上げ時間 (脱泡・水切り)
66%	炭素 1, 2 アラミド 1, 2 ビニロン	散水	直後
75%			5 分後

## 2.2 接着試験

TST-FiSH の施工方法、連続繊維シートの種類と目付量の選定を行うため、接着試験を JSCE-E 545-2007 に準拠して行い、接着強度により評価した。接着試験は、コンクリート平板(300mm × 300mm, 厚さ 60mm)に TST-FiSH を貼り付け、1 日および 7 日間気中(20℃, RH60%)にて養生後、表面にエポキシ樹脂を用いて鋼製治具(40mm× 40mm)を接着し、接着試験を行った。

接着強度  $f_{au}$  は、式(1)により算出した。

$$f_{au} = \frac{F_{au}}{A_s} \quad (1)$$

ここに、 $f_{au}$ ：接着強度(N/mm<sup>2</sup>)、 $F_{au}$ ：最大荷重(N)、 $A_s$ ：鋼製治具の面積(mm<sup>2</sup>)

### (1) 施工方法および樹脂濃度の選定

試験条件を表 2 に示す。炭素 2(表 1)に樹脂濃度 66%または 75%の樹脂を含浸させた後、給水方法およびシート貼り付けから仕上げまでの時間を実験要因として試験を行った。なお、給水方法の散水とはシート貼り付け後に霧吹きで給水する方法であり、浸漬とは事前にシートを水に漬けて給水する方法である。また本実験における仕上げとは、シートの浮き・剥離を防ぐ事を目的とし、ゴム製ワイパーを用いた脱泡・水切り作業のことである。

### (2) 連続繊維シートおよび目付量の選定

試験条件を表 3 に示す。(1)より、給水方法および樹脂濃度毎の仕上げ時間を選定し、各種連続繊維シートについて検討した。

## 2.3 梁部材の載荷試験

接着試験より選定した TST-FiSH の補修効果を検証するため、梁部材を用いて 2 点集中載荷を行った。試験体寸法を図 2、試験体諸元を表 4、使用材料を表 5 に示す。

実験は、梁部材にせん断損傷を与え(1 次載荷)、TST-FiSH をせん断スパンに一層巻き立て、梁上面にて 150mm の継手長を設け補修を行い(図 2 の緑部)、6 日間養生した後、再載荷(2 次載荷)した。載荷は 1 方向単調増加とし、荷重を漸増させた。また、目視によるひび割れの観察を行うとともに、荷重、鉛直変位、軸方向鉄筋ひずみおよびせん断補強筋ひずみを適宜測定した。

なお、損傷度の設定は、日本道路協会「道路震災対策便覧—震災復旧編—<sup>5)</sup>」に示されている被災判定表に基づき以下のように決定した。

### (1) 損傷度：小

被災判定表<sup>5)</sup>より被災度 B：中被害における斜めひび割れ貫通(残留ひび割れ幅  $W < 0.5\text{mm}$ )を再現するため、斜めひび割れ発生後、せん断補強筋が初期降伏ひずみ 1830 $\mu$ (事前に鉄筋引張試験で確認)に到達した時点で除荷し(図 8 参照)、残留ひび割れ幅から判定した。

### (2) 損傷度：大

被災度 B：中被害における斜めひび割れ幅(残留ひび割れ幅  $0.5\text{mm} \leq W < 2\text{mm}$ )を再現するため、最大荷重到達後も載荷を継続させ、最大荷重の 80%に低下した時点で除荷し(図 8 参照)、残留ひび割れ幅から判定した。

## 2.4 柱部材の載荷試験

接着試験と梁部材試験により選定した TST-FiSH のせん断耐力とその補修効果を検討するため、柱部材を用いて軸力を作用させずに、正負交番載荷を行った。なお、

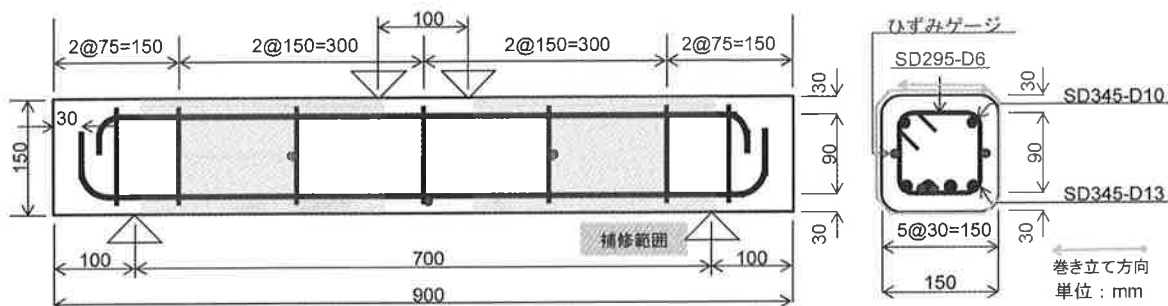


図2 試験体寸法および補修範囲

表4 梁部材載荷試験の試験体諸元

試験体 No.	有効高さ d (mm)	スパン a (mm)	a/d	軸方向鉄筋		せん断補強筋		損傷度	連続繊維シート種類	樹脂種類
				材質径	鉄筋比 (%)	材質径	鉄筋比 (%)			
1	120	300	2.5	SD345 D13	2.8	SD295A D6	0.094	無	-	-
2								小	炭素 2	水硬性 ポリウレタン
3								ビニロン		
4								アラミド 1		
5								炭素 2		
6								ビニロン		
7								アラミド 1		
8								大	炭素 2	

表5 梁部材載荷試験の使用材料の物性値

	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )		静弾性係数 (N/mm <sup>2</sup> )
コンクリート	27.8		2.30×10 <sup>4</sup>
鉄筋	降伏応力 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	弾性係数 (N/mm <sup>2</sup> )
	軸方向鉄筋 SD345 D13	374	566
せん断補強筋 SD345 D6	310	462	1.69×10 <sup>5</sup>

表7 柱部材載荷試験の試験体諸元

	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )		静弾性係数 (N/mm <sup>2</sup> )
コンクリート	29.4		2.58×10 <sup>4</sup>
鉄筋	降伏応力 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	弾性係数 (N/mm <sup>2</sup> )
	軸方向鉄筋 SD345 D22	374	443
軸方向鉄筋 SD490 D25	543	710	1.86×10 <sup>5</sup>
せん断補強筋 SD295A D4	320	488	1.84×10 <sup>5</sup>

表6 柱部材載荷試験の試験体諸元

試験体 No.	破壊形態	有効高さ d (mm)	スパン a (mm)	a/d	軸方向鉄筋		せん断補強筋		損傷度	連続繊維シート種類	樹脂種類	備考
					材質径	鉄筋比 (%)	材質径	鉄筋比 (%)				
1	せん断	260	910	3.5	SD490 D25	7.8	SD295A D4	0.072	無	アラミド 1	水硬性	せん断耐力検討
2	曲げ				SD345 D22	6.0			大		エポキシ	従来工法
3					水硬性	TST-FISH						

載荷点の境界条件は、下端のみを固定し上端は自由端とした。表6に試験体諸元、表7に使用材料、図3に試験体寸法を示す。

試験体 No.1 は、TST-FISH が受け持つせん断耐力の算定を目的としているため、1次載荷による損傷を与えずに補強を施して、正負交番載荷を行った。試験体 No.2, 3 は、損傷後の補修効果を検証するため従来工法との比較を行った。梁部材と同様に、1次載荷により残留ひび割れ幅  $0.5\text{mm} \leq W < 2\text{mm}$  (損傷度：大)のせん断損傷を与え、変位 0mm にてせん断スパンにシート幅 100mm のアラミド繊維を一層巻き立てて補修を行い、6日間養生した後、2次載荷を行った。なお、各試験体とも、アラミド繊維シートの継手長は 200mm とした。載荷は部材角による変位制御とし、部材角 1/1000, 1/500, 1/

250, 1/100, 1.5/100, 2/100, 3/100…と破壊に至るまで順次変位を増加させた。なお、軸方向鉄筋の降伏後は、各部材角で3回の繰り返し載荷を行った。また、目視によるひび割れの観察を行うとともに、荷重、鉛直変位、軸方向鉄筋、せん断補強筋ひずみおよびアラミド繊維シートのひずみを適宜測定した。

### 3. 実験結果と考察

#### 3.1 接着試験

##### (1) 施工方法および樹脂濃度の選定

図4に給水方法を散水とした場合の接着強度を示す。給水方法が散水の場合は、樹脂濃度に関わらず仕上げ時間5分後の接着強度が最大となったが、樹脂濃度6%一直後は5分後と同程度まで強度を発現していた。

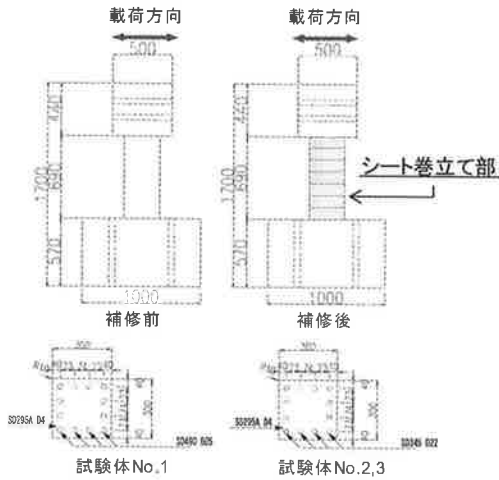


図3 試験体寸法

樹脂濃度 75% 直後は、樹脂濃度 66% と比較し樹脂濃度が高いため、水との見掛けの反応速度が遅くなり、給水直後に仕上げを施すと硬化に必要な樹脂および水分が取り除かれ、シートとコンクリート表面の接着が確保されず、接着強度が発現しなかったと考えられる。また、材齢 7 日では全体的に強度が増加していることがわかる。水中浸漬した場合は、貼り付け前に、シートの接着面にウレタン硬化物の膜が形成され、時間の経過とともにシートとコンクリート界面のウレタン硬化物の厚さが増加していくため、接着が確保されなかった。特に、樹脂濃度 75% - 5 分、10 分後においてはシートが浮いてしまい試験を行うことができなかった。以上の実験結果より、樹脂濃度 66% の場合は、散水直後および 5 分後に仕上げても同程度の接着強度になったことから、なるべく迅速に作業を行うために散水直後に仕上げることにした。一方、樹脂濃度 75% の場合は、散水から 5 分後に仕上げ作業を行うことにした。

### (2) 連続繊維シートおよび目付量の選定

材齢 1 日および 7 日における接着強度を図 5, 6 に示す。目付量が 300g/m<sup>2</sup> 程度の炭素 2, アラミド 1, ピニロンが安定した強度発現を示しており、特にピニロンは高い接着強度が得られた。前述したように、水硬性ポリウレタン樹脂は、水との反応過程においてウレタン硬化物および炭酸ガスを発生させ、これが、シートの浮きの原因となる。これにより、TST-FISH に用いる連続繊維シートの目付量は、極力炭酸ガスを内包せず、ウレタン硬化物の厚みも極力薄くすることができる 300g/m<sup>2</sup> 程度が適切であると考えられた。以上の結果から、連続繊維シート 3 種(炭素 2, アラミド 1, ピニロン)に、樹脂濃度 66% を含浸させた TST-FISH を用いて梁部材の載荷試験を行った。

### 3.2 梁部材の載荷試験

表 8 に各試験体の最大耐力の計算値、実験値、および破壊形態を示す。ここで、せん断耐力は参考文献<sup>6)</sup>に

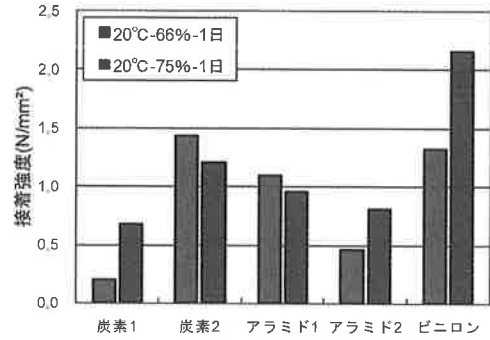


図4 仕上げ時間-接着強度関係(散水)

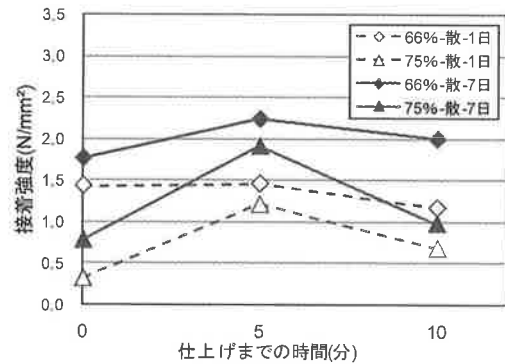


図5 接着強度(20°C, 材齢 1 日)

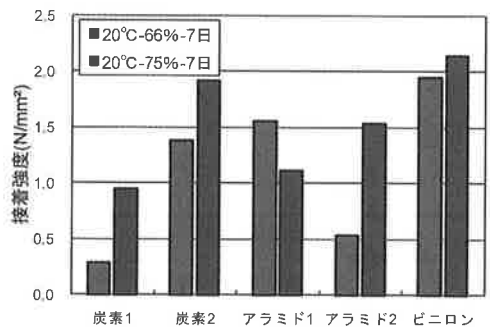


図6 接着強度(20°C, 材齢 7 日)

基づき式(2)、式(3)により算出した。

$$V_{fd} = V_{cd} + V_{sd} + V_{fd} \quad (2)$$

ここに、 $V_{fyd}$ : 部材のせん断耐力(kN),  $V_{cd}$ : コンクリートが受持つせん断耐力(kN),  $V_{sd}$ : せん断補強筋が受持つせん断耐力(kN),  $V_{fd}$ : 連続繊維シートが受持つせん断耐力(kN)

$$V_{fd} = K \cdot [A_f \cdot f_{fd} (\sin \alpha_f + \cos \alpha_f)] / s_f \cdot z \quad (3)$$

ここに、 $K$ : 連続繊維シートのせん断補強効率,  $A_f$ : 区間  $s_f$  における連続繊維シートの総断面積(mm<sup>2</sup>),  $s_f$ : 連続繊維シートの配置間隔(mm),  $f_{fd}$ : 連続繊維シートの設計引張強度(N/mm<sup>2</sup>),  $\alpha_f$ : 連続繊維シートが部材軸となす角度(°),  $z$ : 圧縮応力の合力の作

表 8 各試験体の最大荷重および破壊形態(梁部材)

試験体 No.	1次載荷				2次載荷		破壊形態	
	計算値		実験値	残留	損傷度	計算値		
	せん断耐力 (kN)	曲げ耐力 (kN)				せん断耐力		最大荷重
1	84.5	114.6	120.1	-	-	-	せん断	
2			126.7	0.15	小	205.4	153.1	曲げ
3			105.6	0.20		151.1	141.5	せん断
4			110.0	0.25		174.2	162.5	曲げ
5			125.0	0.60		205.4	167.1	曲げ
6			114.1	1.10	大	151.1	125.0	せん断
7			136.1	0.60		174.2	161.4	曲げ
8			120.0	0.60		205.4	165.9	曲げ

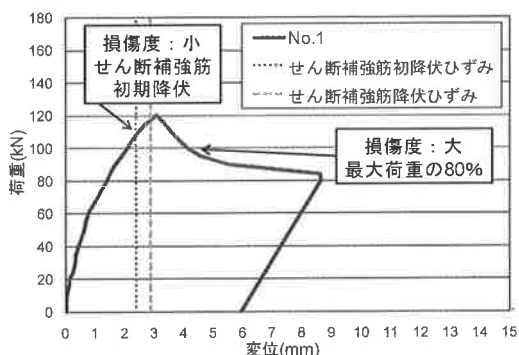


図 7 荷重-変位(試験体 No. 1)

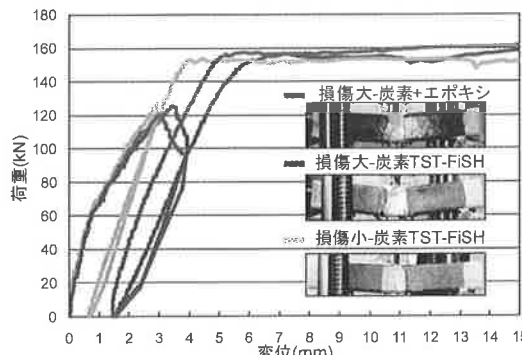


図 8 荷重-変位(樹脂および損傷度の影響)

用位置から引張鋼材の図心までの距離 (mm)。なお、安全係数はすべて 1 として計算し、また、2 次載荷の計算値においては、コンクリートの受け持つせん断力  $V_{cd}$  を無視した。

無補修、無損傷の試験体 No.1 の荷重-変位関係を図 8 に示す。試験体 No.1 は、荷重が 64.5kN で斜めひび割れが発生し、せん断補強筋の降伏後も耐力が増加し、最大荷重は 120.1kN であった。破壊形態はせん断補強筋の降伏後のせん断破壊となった。

(1) 樹脂の影響

連続繊維シートは炭素繊維を使用し、水硬性ポリウレタン樹脂およびエポキシ樹脂にて接着した試験体 No.5, 8 の荷重-変位関係を図 8 (図中青線, 赤線) に示す。なお、いずれも損傷度は大である。両者とも破壊形態は曲げ破壊であり、軸方向鉄筋降伏後、荷重が緩やかに増加し、コンクリート上縁が圧壊したため変位 15mm にて試験を終了した。

両者を比較すると、2 次載荷開始時の荷重増加の挙動が若干異なっているが、これはそれぞれの樹脂の硬度の相違が、補修された試験体の剛性に影響を及ぼしているためと考えられる。しかし、表 8 に示す最大荷重から補修効果(補修後の最大荷重を補修前の最大荷重で除した値)を計算すると、試験体 No.5(TST-FiSH)が 1.34, No.8 (従来工法)が 1.38 と本実験条件下では両者とも同程度の補修効果を有していることが確認できた。

(2) 損傷度の影響

水硬性ポリウレタン樹脂を使用し、異なる損傷度を炭素 TST-FiSH にて補修した試験体 No.2, 5 の荷重-変位関係を図 8 (図中緑線-青線) に示す。1 次載荷の条件が異なるため 2 次載荷開始時の変位は異なるが、両者とも破壊形態は曲げ破壊であり、軸方向鉄筋降伏後に荷重が緩やかに増加しコンクリート上縁が圧壊したため変位 15 mm にて試験を終了した。本実験の損傷条件では、既往の研究と同様に損傷度の違いが補修効果へ及ぼす影響は無いことが確認できた。

(3) 連続繊維シートの影響

損傷度：大をアラミド TST-FiSH にて補修した試験体 No.7 の荷重-変位関係を図 9 (図中青線) に示す。アラミド TST-FiSH も図 8 に示された炭素 TST-FiSH と同様の挙動が観察され、破壊形態は曲げ破壊であり、軸方向鉄筋降伏後、荷重が緩やかに増加しコンクリート上縁が圧壊したため変位 15mm にて試験を終了した。

損傷度：大をビニロン TST-FiSH にて補修した試験体 No.6 (図 9 中赤線) の破壊形態はせん断破壊であり、最大荷重到達後緩やかに荷重が低下し、変位が約 11mm にてビニロン繊維が破断したため試験を終了した。ビニロン TST-FiSH の場合、表 1 に示すようにシート自体の弾性係数が他よりも低く、斜めひび割れ発生後、試験体の変形にシートが追従して破断したため、補修効果が小さくなったと考えられる。

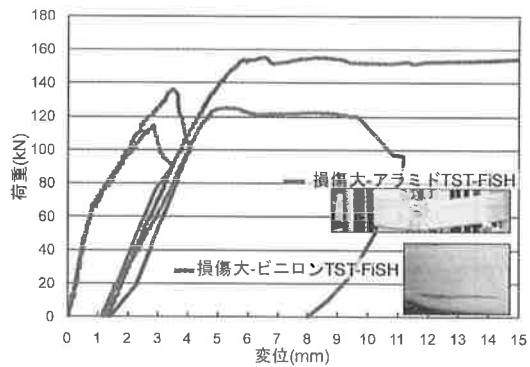


図9 荷重-変位(試験体 No. 6, 7)



図10 施工工程比較

表9 各試験体の最大荷重および破壊形態(柱部材)

試験体 No.	1次荷重							2次荷重				破壊形態	
	計算値			曲げ耐力 (kN)	実験値 除荷荷重 (kN)	残留 ひび割れ幅 (mm)	損傷度 判定	計算値					実験値 最大荷重 (kN)
	せん断耐力 (kN)							せん断耐力 (kN)					
	$V_{cd}$	$V_{sd}$	$V_{vd}$	$V_{cd}$	$V_{sd}$	$V_{fd}$	$V_{fyd}$						
1	-	-	-	331.0	-	-	-	116.3	15.6	139.2	271.1	292.1 (-273.0)	せん断
2	113.4	15.6	129.1	208.4	166.7 (-150.1)	0.5	大	-	15.6	139.2	154.8	229.9 (-221.5)	曲げせん断
3	113.4	15.6	129.1	208.4	172.8 (-160.1)	0.5	大	-	15.6	139.2	154.8	218.6 (-210.5)	曲げせん断

ただし、表8に示す最大荷重から補修効果(補修後の最大荷重を補修前の最大荷重で除した値)を計算すると1.0を上回っており、耐荷力の回復効果はあると考えられる。

(4) 施工時間の比較

従来工法(試験体 No.8)と TST-FiSH の施工工程を図10に示す。図2の試験体作成に要する施工時間を比較すると従来の工法は、約5時間費やしたのに対し、TST-FiSHは樹脂を連続繊維シートに含浸させる工程を含めても約30分と1/10の時間で施工が終了でき、被災後の迅速復旧工法として有効な工法であることが確認できた。

(5) 梁部材の荷重試験のまとめ

以上の実験結果から、樹脂濃度66%の水硬性ポリウレタン樹脂は、1/10の施工時間で従来用いられるエポキシ樹脂と同等の補修効果があることが確認できた。なお、以降の柱部材の荷重試験においては、施工性等を考慮し連続繊維シートはアラミド1を用いることとした。

3.3 柱部材の荷重試験

表9に各試験体の最大耐力の計算値、実験値、および破壊形態を示す。なお、表9に示す計算値は、梁部材と同様に式(2)、(3)より求めた。

3.3.1 TST-FiSHが受け持つせん断耐力

図11にアラミド TST-FiSH を用いた試験体 No.1 の荷重-変位包絡線を示し、試験体最外縁の軸方向鉄筋降伏時の荷重を破線にて示す。試験体 No.1 は、部材角 1/250

から 1.5/100 の途中でせん断補強筋が降伏し、3/100 および 2/100 で最大荷重となり、次サイクルでせん断破壊を生じた。荷重低下後も正側のみ載荷を継続すると、9/100 を超えた後、アラミド繊維シートが隅角部から破断し急激な耐力低下を生じた。

試験体 No.1 におけるアラミド繊維シートの荷重-ひずみ包絡線を図12に示す。ひずみ計は試験体側面中央、柱高さ 325mm に設置している。また、同位置に設置したせん断補強筋のひずみも併記する。せん断補強筋およびアラミド繊維シートのひずみは、荷重が 120 kN 程度から発生しており、せん断補強筋が降伏する 161 kN までは、せん断補強筋とアラミド繊維シートに生じるひずみはほぼ同等である。その後、アラミド繊維シートのひずみは継続して増加しており、せん断補強筋の降伏後もアラミド繊維シートがせん断力を負担していると考えられる。最大荷重時のひずみの値は、既往の研究<sup>8)</sup>と同様に  $12,200 \times 10^{-6}$  程度となり、破断ひずみの 71%であった。修正トラス理論による差分(最大荷重 - ( $V_{cd} + V_{sd}$ ))で求められる連続繊維シートの受持つせん断力  $V_f$  は正側の耐力で 160.2kN、負側の耐力で 141.1kN となり、トラス理論とせん断補強効率  $K$  により示される計算値(表9  $V_{fd} = 139.2kN$ )より安全側に評価できている。このため、TST-FiSH においても、参考文献<sup>6)</sup>に示される、各せん断耐力の累加により、せん断耐力を評価できると考えられる。

### 3.3.2 補修効果の検証

図13に試験体 No.2, 3 の1次載荷の荷重-変位包絡線を、写真1に1次載荷による損傷状況を示す。

#### (1) 1次載荷

1次載荷において、試験体 No.2, 3 とともにほぼ同様な荷重-変位関係となった。試験体 No.2, 3 とともに部材角が 1/250 のときに斜めひび割れが発生し、部材角 1/200 でせん断補強筋が降伏した。部材角 1/100 の終了後の残留ひび割れが、0.5mm となったことから、前述 2.3.1 にて設定した損傷大の条件を満たしたと判断し載荷を終了した。なお、1次載荷終了時点で試験体 No.2, 3 の軸方向鉄筋のひずみは降伏直前であった。

#### (2) 2次載荷

写真2に終局時の破壊状況、図14に各試験体の2次載荷の荷重-変位包絡線を示す。なお、図14には各試験体の最外縁の軸方向鉄筋降伏時の荷重を破線にて示す。

#### (3) 破壊経過

エポキシ樹脂とアラミド1を用いた試験体 No.2 は、軸方向鉄筋の降伏後、1次載荷で発生した斜めひび割れ面を滑るように変形が進行し、部材角 $\pm 8/100$ で耐力低下を生じた。その後正側のみ載荷を継続し、最終的には部材角 10/100 を超えた後、アラミド繊維シートが隅角部より破断し終局に至った。軸方向鉄筋降伏後も荷重増加が観察されるが、部材角 $\pm 8/100$ で急激な荷重低下が生じており、終局時の破壊状況(写真2)においてもせん断変形が卓越していることから、破壊形態は曲げ降伏後のせん断破壊であると考えられた。また、補修にアラミド TST- FiSH を用いた試験体 No.3 でも、軸方向鉄筋降伏後、1次載荷で発生した斜めひび割れ面を滑るように変形が進行した。緩やかな荷重低下が $\pm 4/100$ から始まり、部材角 $\pm 8/100$ で降伏時の荷重を下回った。その後正側のみ載荷を継続し、最終的には 10/100 を超えた後、アラミド繊維シートが隅角部から破断し終局に至った。荷重低下開始時期は異なるが、破壊形態は試験体 No.2 と同様に、曲げ降伏後のせん断破壊であると考えられ、せん断損傷を与えた柱部材に対して、試験体 No.2 と同様の補修効果が確認された。

試験体 No.2 と No.3 の荷重-変位包絡線を比較すると、最大耐力と耐力低下の過程において若干の差がみられる。

しかし、参考文献<sup>9)</sup>に示される終局時の耐力  $P_u$  は、降伏限界時の荷重であり、試験体 No.3 は No.2 とほぼ同程度の耐力を有するものと考えられる。なお、これらの領域の差は、コンクリートの拘束効果に差があると推測され<sup>10)1)</sup>、エポキシ樹脂および水硬性ポリウレタン樹脂の物性の

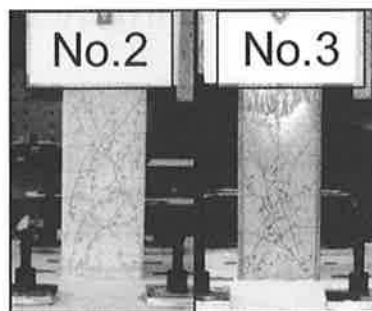


写真1 1次載荷による損傷状況

差が拘束効果に影響を及ぼしていると考えられた。

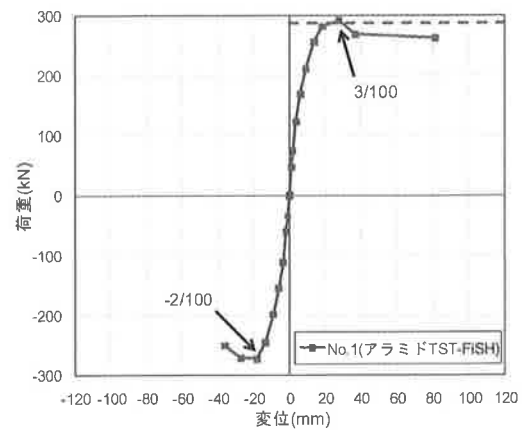


図11 荷重-変位包絡線(試験体 No.1)

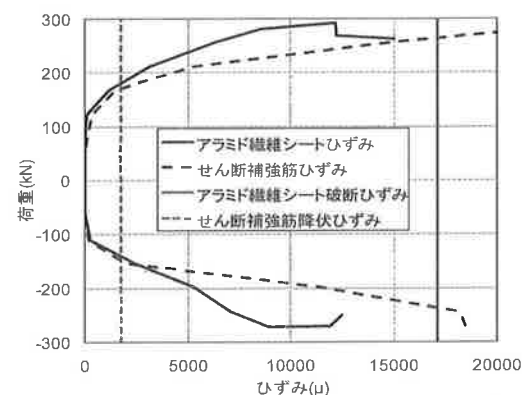


図12 荷重-アラミド繊維シートひずみ包絡線

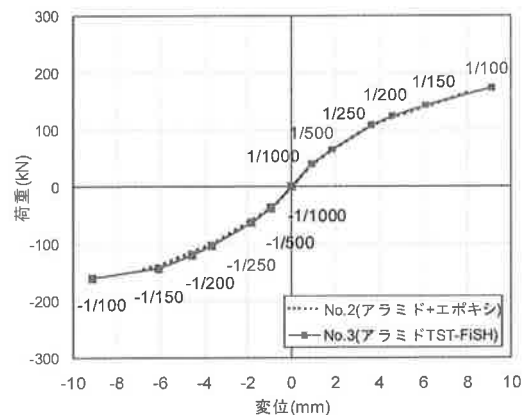


図13 荷重-変位包絡線(1次載荷)

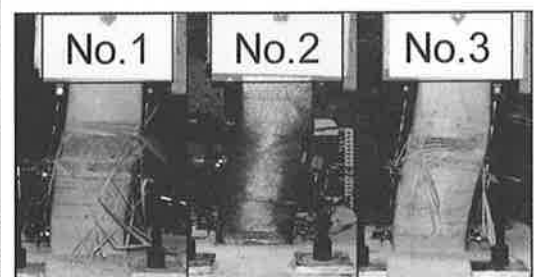


写真2 終局時の破壊状況

#### 4. まとめ

本実験で得られた知見を以下に示す。

TST-FiSH は、エポキシ樹脂等を使用した従来の連続繊維シート巻立て工法と比較し短時間に施工可能であり、被災した RC 構造物の迅速復旧工法に適用できる可能性がある。

TST-FiSH では、濃度 66%の水硬性ポリウレタン樹脂、目付量 300g/m<sup>2</sup>程度の連続繊維シートを使用し、仕上げ作業は、散水直後に実施するのが適当である。

TST-FiSH で補強した RC 部材のせん断耐力は、参考文献 6 に示されている、各せん断耐力の累加により評価できる。

樹脂自体の物性の違いからコンクリートの拘束効果に若干の差異はあるが、TST-FiSH は、中被害損傷程度であれば、エポキシ樹脂を使用した従来工法と同様の補修効果が期待できる。

#### 謝 辞

本研究は、東京大学生産技術研究所との共同研究であり、平成 20 年度国土交通省建設技術研究開発助成制度(研究代表者：東京大学生産技術研究所 加藤佳孝准教授)によるものです。実験に際し、樹脂のご提供をエムシー工業山崎久史氏に、物性試験において芝浦工業大学鈴木将充君・山崎孝史君に多大なご協力をいただきました。ご関係各位に、心より御礼申し上げます。

#### 参考文献

- 1) 国土交通省道路局国道・防災課道路防災対策室, 橋梁耐震補強マップ, 2006.3.
- 2) 日本コンクリート工学協会, 被災構造物の復旧性能評価研究委員会報告書, 2007.8
- 3) 第3期科学技術基本計画分野別推進戦略
- 4) 鈴木僚, 前原聡, 他 2 名: 災害損傷構造物の安全迅速復旧工法の開発(2)-材料の選定と材料の性質が補修効果に及ぼす影響-, 生産研究, Vol. 60, No. 3, pp.200-203, 2008.
- 5) 日本道路協会, 道路震災対策便覧-震災復旧編-, 2007.3
- 6) 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
- 7) 植松工, 益尾潔, 他 2 名: 損傷程度が異なる被災 RC 柱の補強実験 (その 2 破壊性状および荷重・変形状), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp307-308, 1996.
- 8) 中島規道, 中井祐司, 他 2 名: アラミド繊維シートにより補強した鉄道高架橋のせん断性状, コンクリート工学年次論文報告集 Vol.19, No.2, pp.255-260, 1997.
- 9) 日本道路協会, 道路橋示方書・同解説IIIコンクリート橋編, 2002.3
- 10) 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
- 11) 鉄道総合技術研究所, 既存鉄道コンクリート高架橋等の耐震補強設計・施工指針 A&P 耐震補強工法編, 2006.

## DEVELOPMENT OF EMERGENCY RAPID RETROFITTING METHOD USING FIBER SHEETS CONTAINING HYDRAULIC RESIN

M.Ito, F.Ojima, and R.kasakura,

**Synopsis** The authors propose an emergency rapid retrofitting method utilizing fiber sheets containing hydraulic resin (TST-FiSH). The goals of this new method are to provide higher safety, speed, and ease of application compared to modern methods. The basic properties were evaluated by adhesion test, the repair effect was investigated by beam specimen, and the structural performance was confirmed by column specimen. As a result, in comparison with conventional fiber sheet wrapping method, TST-FiSH was confirmed that it can provide same repair effect on 1/10 application time. This paper reports these experiment results and the applicability of emergency rapid retrofitting method TST-FiSH.

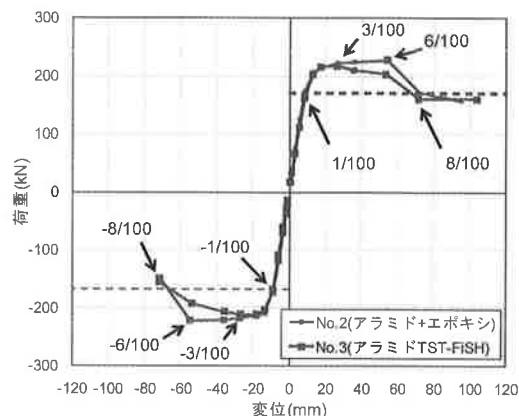


図 14 荷重-変位包絡線(2 次載荷)