論文 迅速復旧工法開発のための TST-FiSH の基礎物性と補修効果の検討

鈴木 将充^{*1}·小島 文寬^{*2}·伊藤 正憲^{*3}·加藤 佳孝^{*4}

要旨:本研究は、被災後の RC 構造物に対して、簡便でかつ安全に施工可能な迅速復旧工法を開発するため、 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)』と定義し、接着 試験等による基礎物性の確認を行った。また、梁試験体を用いてその補修効果について検討した。その結果、 接着試験から TST-FiSH に適用する最適な材料構成および作業工程を確認することができ、その仕様による施 工方法で補修効果を発揮できることが確認できた。さらに従来工法との比較では、1/10 の施工時間で同等の 補修効果が得られたことから、TST-FiSH を迅速復旧工法へ適用できることが明らかとなった。 キーワード:TST-FiSH、水硬性樹脂、連続繊維シート、せん断破壊、迅速復旧

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行われている。こ れは主として柱部材の脆性的な破壊である「せん断破壊」 を回避し、変形性能を向上させるものである。首都圏の 主要交通機関や緊急輸送道路の耐震補強は既にほぼ完 了しているが、地震の規模によっては大きな被害となる と予想される構造物が未だ多く存在する¹⁾。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,損傷は免れない。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 震に対して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、簡便でかつ安全に施 工可能な復旧工法の開発が望まれている。そこで、著者 らは医療用ギプスをアイディアの起源とし,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提案している(図-1)。連続繊維シー トは、運搬が容易で任意の形状のものに巻き立て可能で あり, 医療用ギプスと同様にあらかじめ樹脂が連続繊維 シートに含浸済みの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 されている。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証実験より、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²⁾。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問題が残っている。

そこで、本研究は、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) と定義し、接着試験によりその基礎物性を確認した。ま た、(社)日本道路協会が提示する「RC 橋脚のせん断によ る損傷が生じている場合の被災判定表³⁾」(以下,被災判 定表)より被災度 B:中被害を再現し、損傷が異なる2種 類の梁試験体に本工法を適用しその補修効果について 検討した。

2. 実験概要

2.1 TST-FiSH 使用材料

(1) 水硬性ポリウレタン樹脂

本研究で用いた水硬性ポリウレタン樹脂(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非常に大きく扱いが困 難であるため、グリコールエーテル系溶剤により希釈し て使用した。濃度が高い場合、強度は高いが発泡しやす



*1 芝浦工業大学大学院 工学研究科 建設工学専攻 (正会員)
*2 東急建設(株) 技術研究所 土木研究室 修(工)
*3 東急建設(株) 土木技術部 技術推進グループ 博(工) (正会員)
*4 東京大学 生産技術研究所 准教授 博(工) (正会員)

く,濃度が低い場合,発泡し難いが強度は低くなるなどの性質を有している。また,濃度が低くなるにつれて, 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 みたが試験が行えないほど発泡した。そこで,本研究で は,発泡し難い原液濃度75%および66%を使用するこ ととした。

(2) 連続繊維シート

実験で使用した連続繊維シートを表-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。

2.2 接着試験

TST-FiSH とコンクリートとの接着強度を検討するた め,接着試験をJSCE-E 545-2000 に準拠して行った。接 着試験は図-2 に示すように、コンクリート平板 (300mm× 300mm,厚さ 50mm)に水硬性ポリウレタン樹脂 が含浸された連続繊維シートを貼り付け、1 日または 7 日養生後、表面にエポキシ樹脂(2℃環境下ではアクリル 樹脂)を用いて鋼製治具(40mm× 40mm)を接着し、建研式 接着試験を行った⁴⁾。

接着強度 fauは,式(1)により算出した。

$$f_{au} = \frac{F_{au}}{A_s} \tag{1}$$

ここに, f_{au}:接着強度(N/mm²), F_{au}:最大荷重(N), A_s:鋼製治具の面積(mm²)

(1) 施工方法比較

試験条件を表-2 に示す。連続繊維シートに樹脂含浸 後,散水と水中浸漬の2種類の給水方法および、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検討 した。なお、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て脱 泡・水切りを行った。また、シートの養生期間は1日お よび7日とした。

(2) 連続繊維シート選定

試験条件を表-3 に示す。施工方法選定試験より,水 の供給方法および樹脂濃度による仕上げ時期を選定し た。環境温度は20℃(常温)および2℃(低温)とした。ま た,2℃環境下における鋼製治具の接着では,20℃環境 下で使用したエポキシ樹脂が硬化しないためアクリル 樹脂を用いたが,1日では硬化しなかったため樹脂材齢 を2日とした。これにより,シートの養生期間は,20℃ 環境では1日および7日とし,2℃環境では2日および7 日とした。

2.3 補修効果検証試験

接着試験より選定した TST-FiSH および使用材料を表 -4 に,供試体諸元を図-3 に示す。供試体は,150mm×

表-1 連続繊維シート種類

種類	目付量	引張強度	弹性係数	破断伸度 (%)
	(g/m)	(N/mm)	(N/mm)	(90)
炭素繊維1	200	3400	2.45×10 ⁵	1.5
炭素繊維2	300	3400	2.45×10 ⁵	1.5
アラミド1	280	2060	1.18×10 ⁵	1.8
アラミド2	415	2060	1.18×10 ⁵	1.8
ビニロン	285	2000	4.3×10 ⁴	4.8



図ー2 接着試験

表-2 施工方法選定試験条件

樹脂濃度	連続繊維シート	水の供給	脱泡・水切り		
66%	出手讲, 40	散水	直後 5分後 10分後		
75%	火糸瓢稚2	浸漬			

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	水の供給	脱泡・水切り	
66%	炭素繊維 1,2	ᄨᅶ	直後	
75%	アラミト _{繊維1,2} ビニロン繊維	FX /N	5分後	

150mm×900mm, せん断スパン比(a/d)=2.5 の複鉄筋コン クリート梁で, せん断破壊が先行するように設計した。 載荷方法は, 載荷スパン 100mm, せん断スパン 300mm の2点載荷とし, ひび割れの挙動を観察するため, 斜め ひび割れ発生後, 10kN 毎にひび割れ進行確認および斜め ひび割れ幅を測定した。載荷時は, 荷重, 変位(支間中央, 載荷点, 支点), ひずみ(主筋, 帯筋)を測定した。補修方 法は, 所定の損傷を与えた後, 載荷装置から降ろし, TST-FiSH をせん断スパンに一層巻き立て梁上面に 150mm 継ぎ手長を設け端部を固定させ, 給水および仕上 げにより補修を施し, 6日間養生した後再載荷した(図-4)。また, 従来の工法と比較するため損傷度:大におい ては, 炭素繊維シートをエポキシ樹脂で接着し補修した 供試体についても検討した。

(1) 損傷度:小

被災判定表⁴⁾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<0.5mm)を再現するため, 斜めひび割れ発生後,帯鉄筋が初期降伏ひずみ1830μ(事



前に鉄筋引張試験実施)に到達した時点で除荷し(図-11 参照),残留ひび割れ幅を測定した。

(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)0.5mm≦W<2mm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-11 参照),残留ひび割れ幅を測定した。

3. 実験結果と考察

3.1 接着試験

(1) 施工方法選定試験

図-5に材齢1日における接着強度を示す。給水方法 が散水の場合は、樹脂濃度に関わらず仕上げ時期5分後 の接着強度が最大となったが、樹脂濃度66%-直後は5 分後と同程度まで強度を発現していた。樹脂濃度75%-直後は、樹脂濃度 66%と比較し水との見掛けの反応速度 が遅いため、給水直後に仕上げを施すと硬化に必要な樹 脂および水分まで取り除かれ、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。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、貼り付け後 は、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ことで接着が確保 されなかった。そのため、樹脂濃度 75%-5,10 分後は シートが接着せず浮いてしまい試験を行うことができ なかった。また、全体的に強度は増加しているが、材齢 7日(図-6)においても同様の挙動を示していることがわ かる。これらの実験結果より、樹脂濃度75%を用いた場



合の施工方法は、散水から5分後に仕上げを施すこととし、樹脂濃度66%を用いた場合は、早期強度発現は勿論のこと、施工の迅速さおよび仕上げ後の美観が良いことから、散水直後に仕上げを施すこととした。

(2) 連続繊維シート選定試験

20℃環境下材齢1日および7日における接着強度を図 -7,8に示す。20℃環境下では、炭素2,アラミド1, ビニロンが安定した接着強度を発現しており、特にビニ ロンは比較的高い接着強度が得られた。ここで着目すべ きは、上記の3種類の連続繊維シート目付量が300g/m² 程度という点である。水硬性ポリウレタン樹脂は、水と 反応することでウレタン硬化物および炭酸ガスを発生 させるという特徴を有しており、これが、シートの浮き



などの原因となるため TST-FiSH に用いる連続繊維シートに求められる性能の一つは、ウレタン硬化物の厚みを 極力薄くすることができ、また、炭酸ガスが逃げやすい 環境を確保できることと考えられる。これにより、 TST-FiSH に用いるシート目付量は 300g/m²程度が最適で あると考えられた。

2℃環境下材齢2日および7日における接着強度を図 -9,10に示す。材齢2日では樹脂濃度による差があま り見られないが、材齢7日では、殆どの場合で樹脂濃度 66%における接着強度が高くなる挙動を示した。また、 樹脂濃度75%の接着強度が発現されない理由は、粘性増 加によりシートとコンクリート界面のウレタン硬化物 の厚みが増すことで炭酸ガスが逃げられず、接着面積の 減少を引き起こしたことや、樹脂と水との見掛けの反応 速度が遅くなったため接着強度の増加率が低下したと 考えられた。これにより、樹脂濃度66%は低環境下にお いても安定した接着強度を発現することができると考 察された。

以上,これらの実験結果から,連続繊維シート3種(炭素2,アラミド1,ビニロン)に、樹脂濃度66%を含浸さ せた TST-FiSH を用いて補修効果検証試験を行うことと した。

3.2 補修効果検証試験

表-5に各供試体の最大耐力の計算値,実験値,および 破壊形式を示す。ここで,せん断耐力は「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」⁴⁾の



考えに基づき式(2)、式(3)により算出した。

$$V_{fyd} = V_{cd} + V_{sd} + V_{fd} \tag{2}$$

ここに、*V_{frd}*: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}*:せん断補強鋼材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)

$$V_{fd} = K \cdot \left[A_f \cdot f_{fud} \left(\sin \alpha_f + \cos \alpha_f \right) / s_f \right] \cdot \frac{z}{\gamma_b}$$
(3)

$$K = 1.68 - 0.67 R \qquad (0.4 \le K \le 0.8)$$

$$R = \left(\rho_{f} \cdot E_{f}\right)^{\frac{1}{4}} \left(\frac{f_{fid}}{E_{f}}\right)^{\frac{2}{3}} \left(\frac{1}{f'_{cd}}\right)^{\frac{1}{3}} \qquad (0.5 \le R \le 2.0)$$

$$\rho_{f} = \frac{A_{f}}{b_{w} \cdot s_{f}}$$

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(mm²)、 s_f :連続繊 維シートの配置間隔(mm)、 f_{fud} :連続繊維シートの設計引 張強度(N/mm²)、 E_f :連続繊維シートの弾性係数(kN/mm²)、 α_f :連続繊維シートが部材軸となす角度(°)、 γ_b :部材係 数 (本実験では γ_b =1)

一次載荷は、損傷を与えるために載荷し、二次載荷は 補修効果を検証するために再載荷した。事前載荷の荷重 一変位関係を図-11 に示す。全ての試験体の損傷(一次 載荷)を操作する基準となるため、載荷荷重、帯鉄筋ひず みおよび斜めひび割れ幅に留意し、最大荷重の 60%まで 載荷し続けその挙動を観察した。梁の破壊形態はせん断

		一次載荷						二次載荷			
実験 No. 道	連続繊維	おいたごデキス	計算値 (kN)		実験値 (kN)	残留	1 4 传和中	計算値 (kN)	実験値 (kN)		
	シート	倒加作生积	せん断耐力	曲げ耐力	除荷時荷重(No.2-4) せん断耐力(No1,5-8)	(mm)	惧	せん断耐力	最大荷重	「吸塔形式」	
1	-	-	84.5	114.6	120.1	-	-	-	-	せん断破壊	
2	炭素	水硬性ポリウレタン	84.5	114.6	126.7	0.15	小	152.8	153.1	曲げ破壊	
3	ビニロン	水硬性ポリウレタン	84.5	114.6	105.6	0.20	小	91.4	141.5	せん断破壊(シート破断)	
4	アラミド	水硬性ポリウレタン	84.5	114.6	110.0	0.25	小	113.6	162.5	曲げ破壊	
5	炭素	水硬性ポリウレタン	84.5	114.6	125.0	0.60	大	128.2	167.1	曲げ破壊	
6	ビニロン	水硬性ポリウレタン	84.5	114.6	114.1	1.10	大	66.8	125.0	せん断破壊(シート破断)	
7	アラミド	水硬性ポリウレタン	84.5	114.6	136.1	0.60	大	89.0	161.4	曲げ破壊	
8	炭素	エポキシ	84.5	114.6	120.0	0.60	大	128.2	165.9	曲げ破壊	

表-5 各供試体の最大耐力および破壊形式

表-6 損傷大-正規化荷重

実験No.	連続繊維シート	樹脂種類	ー次載荷せん断耐力(kN)	二次載荷最大荷重(kN)	正規化荷重
5	炭素	水硬性ポリウレタン	125.0	167.1	1.34
6	ビニロン	水硬性ポリウレタン	114.1	125.0	1.10
7	アラミド	水硬性ポリウレタン	136.1	161.4	1.19
8	炭素	エポキシ	120.0	165.9	1.38

破壊であり、荷重 66kN にて斜めひび割れが発生し、せん断耐力は 120kN 程度であった。また、二次載荷は、一 次載荷との比較を容易にするため、残留変位の変化を考 慮せず一次載荷の続きとして同一図内に荷重-変位関 係を作成している。

(1) 樹脂の影響

連続繊維シートは炭素繊維を使用し, エポキシ樹脂およ び水硬性ポリウレタン樹脂にて接着した補修供試体の 荷重-変位関係を図-12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, 主筋 降伏後, 荷重がゆるやかに増加し, 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。著者らが 過去に実施したエポキシ樹脂にて貼り付けた炭素繊維 シートの接着強度は約 4N/mm²と前述してある水硬性ポ リウレタン樹脂を用いた場合の2倍以上であったが,本 実験では樹脂の接着強度による影響が確認されなかっ た。これにより, 水硬性ポリウレタン樹脂を用いた場合 でも, エポキシ樹脂と同程度の補修効果が期待できる。

(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 素繊維にて補修した供試体の荷重-変位関係を図-13 に示す。一次載荷の条件が違うため二次載荷開始時の変 位は異なるが,両者とも破壊形態は曲げ破壊であり,主 筋降伏後,荷重がゆる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。これによ り,本実験の条件下では損傷度による補修効果への影響 は無いと考えられた。

(3) 連続繊維シートの影響

水硬性ポリウレタン樹脂を使用し,損傷度:大をアラ ミド繊維にて補修した供試体の荷重-変位関係を図-14 に示す。アラミド繊維も図-13 に示された炭素繊維 と同様の挙動が観察され,破壊形態は曲げ破壊であり,









図-14 荷重-変位関係(損傷大-アラミド)

主筋降伏後,荷重がゆる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。

水硬性ポリウレタン樹脂を使用し,損傷度:大をビニ ロン繊維にて補修した供試体の荷重-変位関係を図-15に示す。破壊形態はせん断破壊であり,最大荷重到達 後ゆる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。

これらの実験結果から、ビニロン繊維以外は破壊形態 が曲げ破壊へと移行し、せん断補修効果が観察された。 ビニロン繊維の場合、弾性係数が 4.3×10⁴N/mm²(表-1 参照)とコンクリートほぼ同等であるため、斜めひび割れ 発生後、供試体の変形にシートが追従してしまったため 補修効果が小さくなったと考えられる。ただし、表-6 に示す正規化荷重(補修後最大荷重/補修前最大荷重)では ビニロン繊維はアラミド繊維と大差のない値を示して おり、耐荷力向上効果はあると考えられる。

3.3 施工時間の検討

従来の工法(表-5 より実験 No.8)と TST-FiSH の作業 工程を図-16 に示す。また,図-4 の供試体作成の施工 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 分かる。

4. まとめ

本研究では、迅速復旧工法開発のための TST-FiSH の 基礎物性と補修効果を検討した。本研究で得られた知見 を以下に示す。

- 接着試験結果より、TST-FiSHに使用する水硬性ポリ ウレタン樹脂濃度は66%で、給水直後に仕上げを施 す方法が効果的であり、含浸される連続繊維シート は目付量 300g/m²が水硬性ポリウレタン樹脂との相 性が良いことが確認された。
- 2) 被災判定表より被災度 B:中被害までの損傷ならば



<u>従来工法(300分/本)</u> <u>TST-FiSH(30分/本)</u> 図-16 施工工程比較

仕上げエ

給水・仕上げエ

本工法において補修効果が発揮できる結果が得ら れた。しかし、補修目的に応じて使用する連続繊維 シートは検討すべきである。

3) 本実験において、従来の工法(炭素繊維+エポキシ 樹脂)と比較し、1/10の施工時間で同等の補修効果 が得られたことから、TST-FiSHを使用した補修工法 の適用性が検証された。

本研究は, TST-FiSH の補修効果を梁試験体で検討した が,今後は,実大構造物によって補修効果を検証したい と考えている。

謝辞:本研究は,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:加藤佳孝)によるものである。また, 樹脂を提供していただいたエムシー工業山崎久史氏に, 研究実施において,東急建設(株)技術研究所笠倉亮太氏, 芝浦工業大学学部4年山崎孝史君,ならびに研究室各位 の協力を得た。ここに記して,感謝の意を表す。

参考文献

- 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 http://www.mlit.go.jp/road/bosai/taisin/taisin.html
- 鈴木僚,水硬性樹脂が含浸された連続繊維シートによる迅速復旧工法の開発,学位論文,2008
- 3) 日本道路協会,道路震災対策便覧震災復旧編, 1988.2
- 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