

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実験的検討

芝浦工業大学 学生会員 ○山崎 孝史 芝浦工業大学院 学生会員 鈴木 将充
 東急建設株式会社 正会員 笠倉 亮太 東急建設株式会社 正会員 伊藤 正憲
 東京大学 正会員 加藤 佳孝 芝浦工業大学 正会員 勝木 太

1. はじめに

1995 年兵庫県南部地震以後、耐震補強が実施され、首都圏の主要交通機関等は概ね完了している¹⁾。しかし、地震の規模によっては大きな被害と予想される構造物が未だに多く存在する。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。損傷し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た応急復旧をする必要があるが、現状の技術では施工が大掛かりのもの、効果発現に数日を要するものが多いことから、迅速復旧工法の開発が望まれている²⁾。

そこで、著者らは医療用ギブスをアイディアの起源とし、損傷した RC 部材に対し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巻き立て後、散水するだけで補修効果が得られる新たな迅速復旧工法を提案した(図-1)。連続繊維シートは運搬が容易で任意の形状に巻き立て可能であり、医療用ギブスと同様に、予め水硬性ポリウレタン樹脂を連続繊維シートに含浸させた状態を想定しているため、従来の技術と比較すると施工時間が大幅に短縮され、また、水のみで硬化するため簡便かつ安全に施工できる。既往の研究では、水硬性ポリウレタン樹脂が含浸されたガラス連続繊維シートを用いた補修効果実験より、損傷前と同等以上に耐力が回復したことから、新たな補修材料としての可能性が示された³⁾。

本研究では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 TST-FiSH(Fiver Sheets containing Hydraulic-resin)と定義し、一般的な連続繊維シート(炭素、アラミド、ビニロン)を使用し、接着試験で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⁴⁾」(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

本研究で使用した樹脂は原液では粘性が高いため溶剤で希釈して使用した。既往研究²⁾から水硬性ポリウレタン樹脂の性質として濃度が高い場合、強度は高いが発泡しやすく、濃度が低い場合、発泡し難いが強度は低下すると示されている。そこで本研究では予備実験より、樹脂の濃度を 66%, 75%, 80%とした。

(2)連続繊維シート

本研究で使用した 5 種類の連続繊維シートを表-1 に示す。

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方法(JSCE-E 545-2000)に準拠して行った⁵⁾。

2.2.1 施工方法選定

試験条件を表-2 に示す。給水方法及び仕上げ時期を実験要因として検討した。養生期間は 1, 7 日とした。

2.2.2 連続繊維シートの選定

施工方法選定より、選定した試験条件を表-3 に示す。シートは 5 種類(表-1)を使用した。また、養生期間は 20°C で 1, 7 日, 2°C の場合は鋼製治具とシートを接着させたアクリル樹脂が 1 日では硬化しなかったため, 7 日とした。

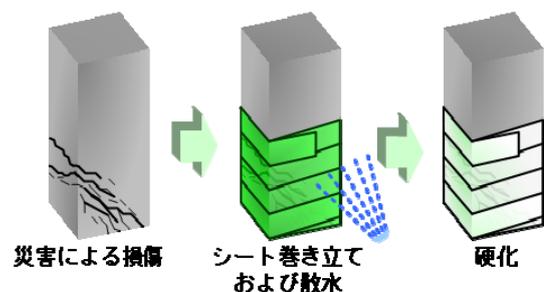


図-1 新たな迅速復旧工法の提案

2.3 補修効果検証試験

接着試験により選定した TST-FiSH を使用し、補修効果を検討した。使用材料を表-4 に示す。供試体諸元を図-2 に示す。供試体寸法は 150×150×900(mm)、せん断スパン比を 2.5 とし、せん断破壊するように設計した。載荷方法は 2 点載荷とし、斜めひび割れ発生後、10kN 毎にひび割れ進行確認及び斜めひび割れ幅測定を行った。載荷時は荷重、変位(支点間中央、載荷点、支点)、ひずみ(主筋、帯筋)を測定した。試験条件および補修方法は損傷度大・小を与えた後、TST-FiSH をせん断スパンに一層巻き立てし梁上面にてラップ(150mm)させ、せん断補修を施し、養生 6 日で再載荷した。

(1) 損傷度小

日本道路協会が提示する被災判定表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 $W < 0.5\text{mm}$)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 (事前に引張試験実施)に到達した時点で除荷し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 $0.5 \leq W < 2\text{mm}$)を再現するため、最大荷重到達後、最大荷重の 80%に低下するまで載荷を継続し、80%到達時に除荷および残留ひび割れ幅を測定した。また、従来工法との比較として炭素 1 をエポキシ樹脂で巻き付けた供試体を作成した。

3. 実験結果と考察

3.1 接着試験

3.1.1 施工方法選定

図-3 に材齢 1 日の接着強度を示す。給水方法が散水の場合は、濃度 66%、75%-5 分後の接着強度が最大となった。濃度 75%-直後は濃度 66%と比較し、水との見掛けの反応速度が遅く、粘性が高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てしまい、接着強度が発現されなかったと考えられる。水中浸漬させ給水した場合は、シート両面が同時に反応を開始し、時間の経過とともにシートとコンクリート表面のウレタン硬化物の厚さが増すことで接着が確保されなかったと考えられる。濃度 75%-5、10 分後はシートが接着せず浮いてしまい試験不可能となった。濃度 80%においては 66%、75%と比較し接着強度は低い結果が得られた。当初、濃度が高いほど強度

表-1 連続繊維シートの物性値

繊維名	目付量 (g/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	弾性係数 (N/mm ²)	破断伸度 %
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

表-2 施工方法選定試験条件

使用繊維	樹脂母材率	給水方法	脱泡、水切り
炭素 2	66%、75% 80%	散水 浸漬	直後、5分後 10分後

表-3 連続繊維シート選定試験条件

環境条件	樹脂母材率	給水方法	脱泡、水切り
20℃	66%	散水	直後
2℃	75%	散水	5分後

表-4 使用材料

種類	仕様
コンクリート	21-12-20H材齢7日圧縮強度24.9N/mm ² 引張強度2.14N/mm ²
主筋	SD345-D13 引張強度566N/mm ² ,降伏ひずみ2080μ 弾性係数1.80×10 ⁵ N/mm ²
帯筋	SD295-D6 引張強度462N/mm ² ,降伏ひずみ3840μ 弾性係数1.69×10 ⁵ N/mm ²
連続繊維シート	炭素2、アラミド1、ビニロン
水硬性樹脂	母材率66%、給水方法:散水、仕上げ時期:直後

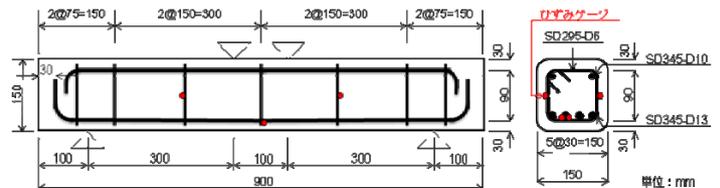


図-2 供試体諸元

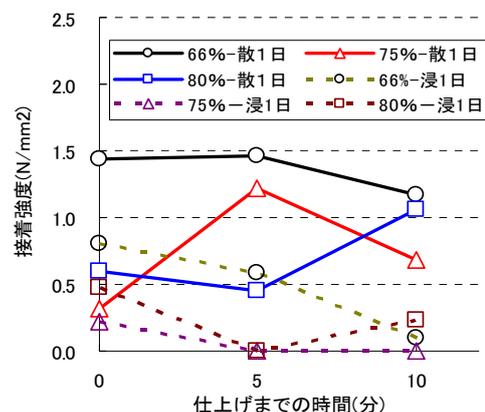


図-3 施工方法選定—材齢 1 日

が高いと考えられていたが、濃度が高すぎるとウレタン硬化物の厚さが増すため、シートとコンクリート間に浮きでき接着強度が発現し難いと考えられる。また、全体的に強度が増加している材齢 7 日においても同様の挙動を示している。

これらの実験結果より、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とし、濃度 66%を用いた場合は早期強度発現、施工の容易さ及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。また、濃度 80%は接着強度が低い上、安定性に欠けるため、対象外とした。

3.1.2 連続繊維シート選定

20℃環境下における接着強度を図-4 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得られた。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。これが、シートの浮きや発泡の原因となるためシートに求められる性能は、ウレタン硬化物の厚みを極力薄くすることができ、また、炭素ガスが逃げやすい環境であることと考えられる。これにより、TST-FiSH に最適な目付量は 285g/m²~300g/m²程度あると考えられる。

2℃環境下における接着強度を図-5 に示す。材齢 2 日では濃度による差があまり見られないが、材齢 7 日では、濃度 66%における接着強度が高くなる挙動を示した。これは、常温化と比較し、低温環境下において樹脂の粘性が高くなったため、単純に樹脂強度自体が増加したと考えられる。また、濃度 75%は樹脂と水との反応速度が遅くなったため、7 日時点では接着強度が発現されなかったと考えられる。これにより、濃度 66%が環境作用下において安定した接着強度を確保できると考えられる。

以上、これらの実験から連続繊維シート 3 種(炭素 2, アラミド 1, ビニロン)に、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 に各試験体耐力の計算値、実験値及び破壊形式一覧を示す。一次載荷は損傷大・小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。図-6 に梁の挙動を確認するために行った事前載荷の荷重-変位関係を示す。

3.2.1 樹脂の影響

炭素及びエポキシ樹脂と炭素 TST-FiSH で補修し、再載荷を行った荷重-変位関係を図-7 に示す。なお、いずれも損傷大である。双方とも破壊形式は曲げ破壊であり、主筋降伏後荷重が緩やかに増加、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と炭素繊維シートの接着試験では、接着強度が水硬性ポリウレタン樹脂の 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は確認されなかった。これにより、水硬性ポリウレタン樹脂はエポキシ樹脂と同程度の補修効果が期待できると確認された。

3.2.2 連続繊維シートの影響

アラミド TST-FiSH は炭素 TST-FiSH と同様の挙動が観察された。荷重-変位関係を図-8 に示す。ビニロン TST-FiSH の破壊形式はせん断破壊になり、最大荷重到達後ゆるやかに荷重が低下し、変位が約 11mm にてシートが破断したため試験終了した。

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、せん断補修効果が確認された。ビニロン繊維の場合、弾性係数が $4.3 \times 10^4 \text{N/mm}^2$ とコンクリートとはほぼ同等であるため、一次載荷時の斜めひび割れ幅の拡張もしくは二次載荷時による新たな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、せん断破壊したと考えられる。ただし、耐荷力向上効果は他の TST-FiSH と同等の値となった。なお、

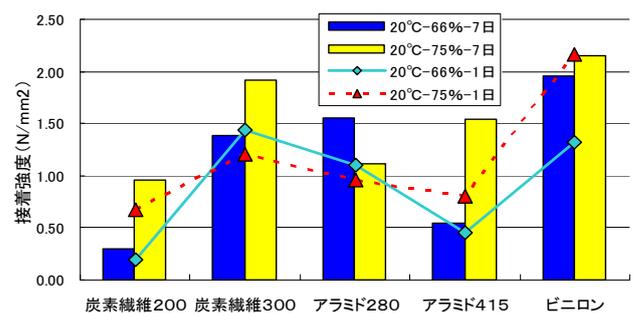


図-4 連続繊維シート選定試験-材齢 1, 7 日

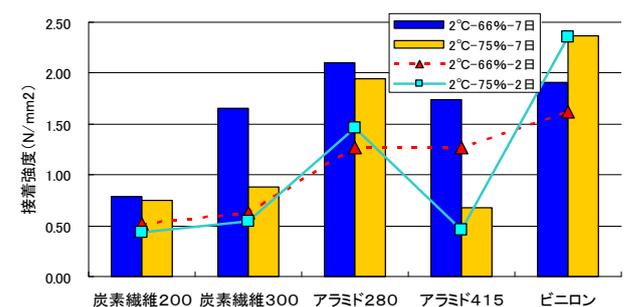


図-5 連続繊維シート選定試験-材齢 2, 7 日

表-5 各試験耐力計算値及び実験値

試験体 No.	種類	一次載荷					二次載荷		
		計算値 kN		実験値 kN	残留ひび割れ mm	損傷レベル	計算値 kN	実験値 kN	破壊形式
		せん断耐力	曲げ耐力	せん断耐力 除荷時荷重			せん断耐力	最大荷重	
1	-	84.5	114.6	120.1	-	-	-	せん断破壊	
2	炭素FiSH	84.5	114.6	126.7	0.15	小	152.8	153.1	曲げ破壊
3	ビニロンFiSH	84.5	114.6	114.1	0.20	小	91.4	141.5	せん断破壊 (シート破断)
4	アラミドFiSH	84.5	114.6	110.0	0.25	小	113.6	162.5	曲げ破壊
5	炭素FiSH	84.5	114.6	125.0	0.60	大	128.2	167.1	曲げ破壊
6	ビニロンFiSH	84.5	114.6	105.6	1.10	大	66.8	122.4	せん断破壊 (シート破断)
7	アラミドFiSH	84.5	114.6	136.1	0.60	大	89.0	160.6	曲げ破壊
8	炭素+エポキシ	84.5	114.6	120.0	0.60	大	128.2	167.1	曲げ破壊

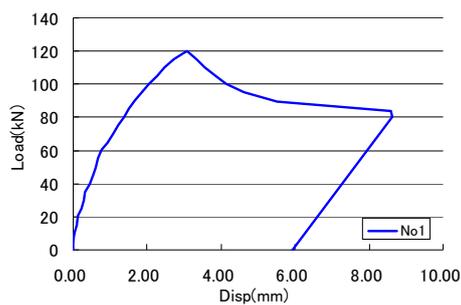


図-6 事前載荷 No1, 荷重-変位関係

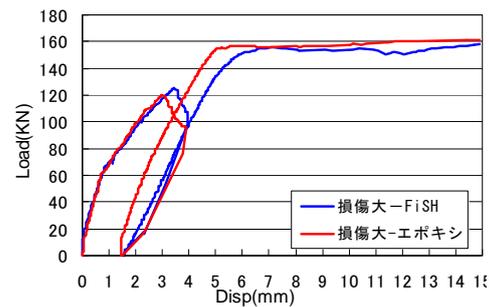


図-7 炭素 2 (エポキシと TST-FiSH) の荷重-変位関係

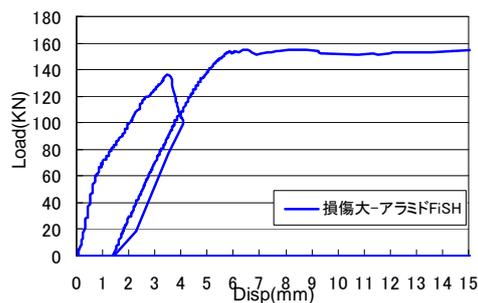


図-8 アラミド TST-FiSH 荷重-変位関係

損傷度小は損傷度大と同様の挙動を示すことを実験的に確認している。

4.まとめ

- (1) 接着試験結果より、水硬性ポリウレタン樹脂の濃度は 66%で給水直後に仕上げを施す方法が効果的であり、連続繊維シートの目付量は 300g/mm²が樹脂との相性が良いと確認された。
- (2) 被災判定表より、被災度 B：中被害までは本工法において補修効果があると確認された。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。

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。

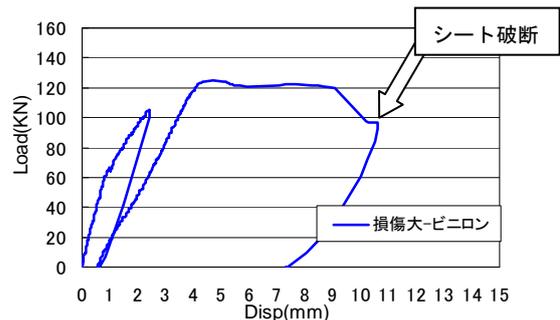


図-9 ビニロン TST-FiSH 荷重-変位関係

謝辞：本研究は、平成 20 年度国土交通省建設技術開発助成制度（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）小島文寛氏、ならびに研究室各位の協力を得た。ここに感謝の意を表す。

参考文献

- 1)国土交通省道路局・橋梁耐震補強マップ
- 2)日本コンクリート工学協会, 耐震補強の評価に関する研究委員会報告書・論文集, 2000.6
- 3)鈴木僚ほか：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, 土木学会第 63 回年次学術講演概要集, V-323,P645~646, 2008.9
- 4)日本道協会, 道路震災対策便覧震災復旧編, 1988.2
- 5)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, 2007.7