# 論文 FRPシートによるRC橋脚のせん断補強効果に関する実験的研究

益田 彰久\*1·丹間 泰郎\*2·岩田 秀治\*3·渡辺 忠朋\*4

要旨:制約の多い施工条件下に対応できる RC 橋脚の耐震補強工法に使用する補強材料として、ガラス繊維とステンレスメッシュに紫外線硬化型樹脂を含浸させた新しい複合体シートを開発した。この新型シートを用いて補強効果確認試験を実施した結果、せん断耐力に関してはガラス繊維補強と同様な理論で説明が可能であることを確認した。さらに実物大級試験体等を用いた交番載荷試験より 5δy 以上のじん性能確保を確認し、より大きな変形性能を目指すには補強材および樹脂の性能を調整することで対応可能なことが検証された。

キーワード: RC 橋脚, 耐震補強, 複合体シート

#### 1. はじめに

交通施設に供されているものは,公共性が高 く,社会に対する影響度から,優れた構造性能 を持つことが求められている。特に,兵庫県南 部地震以後は,その甚大な被災を教訓として, 新しい耐震基準も制定され,耐震性の向上が図 られている。

耐震性能を向上させなければならないのは, 新設構造物だけでなく,既存構造物についても 同様である。そこで既存構造物に対し,せん断 耐力・変形性能の向上を目的として鋼板巻きや RC巻立て等が,補強工法として施されている。

しかし,施工空間・時間などが大きく制約される場所も多く,条件の悪い箇所においても施工できる新たな耐震補強工法の開発が望まれている<sup>1)</sup>。

そこで,筆者らは繊維による巻立て補強に着 目し,人力のみで素早く所要の性能を発揮する 補強体を築造できる工法を目指し,新たな補強 用シートを開発した。また,その補強効果を確 認するため,実物大級試験体の載荷試験を含む 各種確認試験を実施し,その補強効果について 確認を行った。

#### 2. 補強用新型 FRP シートについて

## 2.1 新型シートの材質

新しい耐震補強材は、ガラス繊維とステンレ スメッシュに樹脂を含浸させた複合体 FRP シー トである。

ガラス繊維は、一方向強化ガラスロービング で、組成は一般的な FRP として使用されている E ガラスである。メッシュには、発錆が無く貯 蔵・保管が容易なステンレスを用いた。本シー トには SUS304W1 鋼線を用いている。樹脂は、 エポキシアクリレートであり、紫外線(触媒) の照射によって硬化するものとなっている。

シートは,厚さ2.5mm,重量4.8kg/m<sup>2</sup>と軽く, かつ柔らかいため補強対象部材の形状を問わず 貼り付けることができる。

#### 2.2 新型シートの性能

この新型シートは,次のような特徴を有する。

- 工場で生産されるため現場で繊維に樹脂を 含浸させる必要がない。そのため品質が均一 であり信頼性に優れている。
- 直射日光下で5分,紫外線ランプによっても
  20分程度で硬化する性能を有している。
- \*1 鉄建建設(株) 技術研究所 土木技術開発グループ (正会員)
- \*2 東海旅客鉄道(株) 新幹線鉄道事業本部 施設部 工事課
- \*3 東海旅客鉄道(株) 総合技術本部 技術開発部 博(工)
- \*4 北武コンサルタント(株) 博(工)(正会員)

 遮水性・耐熱劣化性・耐熱衝撃性・電気絶縁 性等に優れている。

このため新型シートの巻き付けには,重機の ような大きな設備は必要とせず,人力のみで施 工が可能であり,大掛かりな足場も不要である。 また硬化時間が早いため,連続的に速く施工す ることが可能である。

JIS K 7054「ガラス繊維強化プラスチックの引 張試験方法」に準拠して試験を行った結果,危 険率 2.5% (2 $\sigma$ )を加味した設計引張強度は  $1.67 \times 10^{3}$ N/mm<sup>2</sup>, また引張弾性率は  $1.01 \times 10^{5}$ N/mm<sup>2</sup>となった。シートの設計有効厚 さは 0.539mm であり,破断荷重で比較するとシ ート1枚は SS400材(設計引張降伏強度 235 N/mm<sup>2</sup>)鋼板 3.82mm に相当することとなる。

## 3. せん断補強効果確認試験

従来の鋼板や繊維シート補強工法に対しては, それぞれの補強材に適した設計手法が考案され ている<sup>例えば2)3)</sup>。新型シートはガラス繊維を主た る補強材としているため,ガラス繊維を補強材 とする設計法<sup>4)</sup>への適用性を確認することとし, そのための載荷試験を行った。

# 3.1 試験体および試験条件

試験体は、図-1に示すようなせん断スパン 内にせん断補強鉄筋を配しない RC 構造とした。 せん断スパン比は 3.23、引張鉄筋比は 1.83%で ある。シート巻き付けに際しては補強量をパラ メータとし、4 種の試験を行った。1 体は補強量 を 0 とし試験体のせん断破壊・耐力を確認、1 体は十分な補強により曲げ降伏となることを確 認、残り 2 体は新型シートが破断するように補 強量を設定した。

#### 3.2 試験結果

表-1に試験条件および結果,また図-2に 荷重-変位関係を示す。試験体と同時に作成し たテストピース 4 体の圧縮強度の平均値 30.0N/mm<sup>2</sup>から試験体のせん断耐力計算値 Vc は 246kN,曲げ降伏耐力計算値Myは 451kN と なった(材料係数・部材係数とも 1.0,曲げ降伏



図-1 せん断補強効果確認試験体

表-1 試験条件・結果一覧

番号	A <sub>f</sub> ∙f <sub>t</sub> (N∕mm)	最大荷重 (kN)	最終状態
B-1	0	498	RCのせん断破壊
B-2	62	583	シートの破断
B-3	124	646	シートの破断
B-4	991	986	RCの曲げ降伏



図ー2 荷重一変位関係



写真-1 シート破断状況(B-3)

耐力計算時の鉄筋降伏値は材料規格値の 1.2 倍 とした)。新型シートによる補強について,式(1) に対する適用性を確認した。

$$V_f = A_f \cdot f_t \cdot (\sin\theta + \cos\theta) \cdot z \quad (1)$$

ここに  $V_f$ : 繊維シートにより受け持たれるせん 断耐力,  $A_f$ : 角度  $\theta$  で配置される単位幅あたり のシートの断面積,  $\theta$ : シートが部材角と成す角 度(=90 度),  $f_t$ : シートの引張強度, z: 圧縮応力 の合力の作用位置から引張鋼材の図心までの距 離 (z=d/1.15 とする) である。なお,シートを はりに巻き付けた結果,はりの両面で補強体が 形成されるため,  $A_f \cdot f_t$ は 2 倍にする必要があ る。また,曲げ降伏耐力計算値とせん断耐力計 算値との差である 205kN がせん断耐力増加分の 上限となる。

載荷条件から, せん断耐力は試験より得られ た最大荷重値の 1/2 であり, B-1 の試験値との 差がシートによるせん断力の増分となる。図-3に, 式(1)を実線で, 試験結果を丸印で示す。 試験値は, 式(1)と同様な線型性を持っていると 判断され, よって, 式(1)を基本にせん断耐力を 算定することができると考えられる。

#### 4. 変形性能確認試験

部材が曲げ降伏した後の変形に対する性能を 確認するため,高架橋の柱を模した RC 試験体 により交番載荷試験を実施した。

#### 4.1 試験体および試験条件

試験体は,図-4に示すようにせん断スパン にはせん断補強鉄筋を配しないせん断破壊先行 型の柱部材で,高架橋柱を想定した断面寸法を 800mm×800mm としたものを2体,1/2 縮小断面 の400mm×400mm のものを3体とした。試験は 表-2に示すようにせん断曲げ耐力比と軸力比



# 図-4 変形性能確認試験体(80cm角断面)

をパラメータとした。また 800mm×800mm 断面 では柱基部にシートを施工できない場合を想定 し, 0.5D=400mm の高さについてシート補強し ない試験体を用いた載荷試験を実施した。

試験体		試験条件				試験結果				
番号	寸法 (mm)	軸力比	曲げ耐力 (kNm)	せん断耐力 (kN)	シート補強量 (N/mm)	せん断曲げ 耐力比	ガラス繊維と ステンレスメッシュとの 破断エネルギー比率	テストピースの 圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	載荷·最終破壞状況	最終変形角
C4-1	400 × 400 × 1370	0.1	263	114	268	1.18	1.03	30.04	7δy-1サイクルクリア 7δy-2サイクル載荷途中でシート破断	1/29
C4-2		0.1	269	116	394	1.48	0.56	32.01	5δyクリア 7δy-1サイクル載荷途中でシート破断	1/39
C4-3		0.2	327	117	566	1.58	1.28	32.58	8δyクリア 以後ジャッキ押し切り	1/23
C8-1	8-1 800 × 800 × 1960	0.1	2164	362	898	1.63	1.19	33.62	5 δ yクリア 7 δ y−1サイクル載荷途中でシート破断	1/36
C8-2		0.1	1995	336	898	1.74	1.19	26.79	5δyクリア 7δy-1サイクル載荷途中でシート破断	1/40

表-2 変形性能試験一覧

C8-2 は柱基部から 0.5D(40cm)シート無し

#### 4.2 試験結果

**表-2**, 図-5に試験結果を示す。いずれの 試験体も斜めひび割れが発生した以後も耐力を 保持しており,新型シートはせん断補強に対し て充分な性能を有していることが確認された。

軸方向鉄筋の降伏時における変位を1とした じん性率については、すべての試験で58<sub>y</sub>3 サイ クルの載荷をクリアしている。柱の破壊箇所は **写真-2**に示すように、破断したシート内側の コンクリートが粉砕しており、軸方向鉄筋は外 側に向かって湾曲している。これはコンクリー トが損傷しシート破断部からコンクリートが飛 び出したために軸力が鉄筋に集中し座屈したも のと思われる。この現象を回避するにはコンク リートの飛び出しを防止すればよく、そのため にはシートの伸び性能を高め、コンクリートの 飛び出しによる膨らみにシートが追従できるよ うにすればよいと考えられる。

新型シートの特性としては,ガラス繊維とス テンレスメッシュを補強材とした複合体である ことから,シートが破断する際には,各々の補 強材が破断性能に影響を与えると考えられる。

図-6に示したものは、ガラス繊維・ステン レスメッシュ単体を含んだシートが破断までに 吸収するエネルギーのイメージを示したもので ある。ガラス繊維の特性としては、変形量は小 さいものの破断強度が大きいため, せん断耐力 の補強に大きく寄与していると考えられる。一 方,ステンレスメッシュの特性としては,破断 強度は小さいものの,大きな変形に対しても引 張力を保持できるため, ガラス繊維が破断した 後の変形性能を維持するものと考えられる。そ こでガラス繊維・ステンレスメッシュの持つエ ネルギー比率 Gs/Gg をシートの引張試験結果か ら算出し,表-2に試験結果と合わせて示した。 これより、ステンレスメッシュのエネルギー比 率が大きくなると変形性能も大きくなっている 傾向を見出すことができ、相互の材料特性の長 所が生かされ、複合材として高性能化されてい る。特に、エネルギー比率が最も大きな C4-2



図-5 荷重-変位関係(C8-1)



写真-2 最終破壊状況(C8-1)



図-6 シート破断時のエネルギーの考え方

試験体ではじん性率も 8δ<sub>y</sub>まで達し,最終的に は軸力が不安定になることなく水平方向ジャッ キを押し切ることとなった。

柱基部 0.5D を無補強とした C8-2 の試験結果 は、全体を補強した C8-1 と破壊状況・じん性率 ともほとんど変わりがなかった。このことから 無補強部分は耐震補強に対して、ほとんど影響 がないと考えられる。また終局状態はシートの 破断ではなく、コンクリートの飛び出し・鉄筋 の座屈で決定されていると再確認した。

# 5. 実物大級試験体載荷試験

耐震補強に関する基本的な性能は以上の試験 結果により確認された。しかし施工対象として 検討されている構造物の中には大断面で,また その断面形状も正方形でなく長方形となってい るものが存在している。よって変形が進行した 場合の長辺のハラミ出し・耐力の低下等,断面 形状の影響が懸念される。そこでこれらの挙動 を確認するために実構造物を模した試験体によ り交番載荷による変形性能試験を行うこととし た。

# 5.1 試験体および試験条件

実構造物を想定し,試験体の断面形状は 1,600mm×1,000mmとした。形状・配筋等を図-7に示す。せん断スパン比は載荷方向で3.33・ 直角方向で2.0,軸方向鉄筋比は2.63%,引張鉄 筋比は0.90%とした。

載荷は、まず無補強状態で行い、せん断耐力・ 破壊形態(せん断破壊先行型)を確認した。そ の後、ひび割れをエポキシ注入により補修した 上で、新型シートを巻き付け補強した状態で再 度載荷試験を実施した。なお、試験時のコンク リート圧縮強度 32.6N/mm<sup>2</sup>から求めた試験体の せん断耐力 V は 1,009kN、曲げ耐力 Mu は 2,040kN(材料係数・部材係数とも 1.0、曲げ耐 力の鉄筋降伏値は 1.2 倍とした)であり、せん 断破壊先行型である。また、新型シートによる せん断耐力の補強値 V<sub>f</sub>は 2,814kN であり、補強 後のせん断曲げ耐力比は 1.87 となった。

# 5.2 無補強時の試験結果

 $0.5\delta_y$ 載荷時では斜めひび割れは発生しなかった。 $1\delta_y$ への載荷途中で斜めひび割れが発生し荷重が低下したため載荷終了とした。荷重の最大値は 1,585kN であり,その時の軸方向鉄筋最大ひずみ値は 1,912 $\mu$ ,降伏ひずみ 2,300 $\mu$ で除すことにより得られるじん性率は 0.83 であった。

最大荷重は前述のせん断耐力の計算値 1,009kN よりかなり大きくなった。これは計算



図-7 実物大級試験体





写真-4 終局時のシート破断状況



における鉄筋の影響は引張側鉄筋のみが評価さ れているのに対し,実際には斜めひび割れが引 張鉄筋以外の軸方向鉄筋とも多く交わっている ことが影響していると考えられる。

## 5.3 補強後の試験結果

荷重-変位関係を図-8に示す。同図中に無 補強時の結果を重ねて示すが、シートにより試 験体がせん断補強され曲げ降伏となっているこ とが確認できる。最大荷重は2,131kNであった。

 $4\delta_y$ 載荷中に高さ  $0.5 \sim 1.0m$  の範囲でシート に斜め方向の細かな亀裂を目視で確認できるよ うになってきた。 $5\delta_y 1$  サイクル載荷中に試験体 角のシートに大きな亀裂が発生・進展してきた ため、 $5\delta_y 2$  サイクルにて+方向へジャッキを押 し切り終了とした。

大きな亀裂は基部から約 1m の高さから始ま った。亀裂は写真-4に示す側を正面として右 手前角部から発生したものは下方向へ,左奥角 部から発生したものは上方向へ伸びていき,両 者とも最終的には破断へ至り荷重が低下した。 また,試験終了後の試験体では,軸方向鉄筋の 座屈は生じなかった。

## 6. まとめ

新型シートの耐震補強効果を確認するために 各種試験を行い、以下の結果を得た。

- 新型シートによるせん断補強はガラス繊維 補強と同様な理論により算定が可能である。
- 新型シートによる、せん断曲げ耐力比 1.18 以上となる補強に対して、変形性能は 58<sub>y</sub>を 確保するものとなった。
- 3) せん断破壊先行型の実物大級試験体は、ひび 割れ補修および新型シートによる補強によ り原状を回復し、さらに曲げ降伏先行型となった。

また,新型シートに含有されるガラス繊維, ステンレスメッシュの量は自由に調整すること ができ,その比率は,変形性能に影響する可能



図-8 荷重-変位関係(実物大級)

性があることを示した。このことは、補強対象 構造物によって適切な性能を持った補強材を提 供できることを示している。今後は、更なるコ スト縮減を行い、多様な要望に応えるべく、合 理的な樹脂剤・補強材の改良を行うものである。

#### 参考文献

- 岩田秀治,丹間泰郎,下村勝,松岡茂,渡 辺忠朋:劣悪な施工条件に対応可能な高性 能な橋脚等の耐震補強法,第6回地震時保 有耐力法に基づく橋梁等構造の耐震設計に 関するシンポジウム講演論文集,pp.215-220, 2003.1
- 鉄道構造物等設計標準・同解説(耐震設計):運輸省鉄道局監修,(財)鉄道総合技術研究所編,1999.10
- 鉄道総合技術研究所:炭素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,1996.7
- 4) 鉄道総合技術研究所:既存鉄道コンクリート高架橋柱等の耐震補強設計・施工指針 FRP 吹付け補強編, 1996.11