

1

新型タフシートによる耐震補強 (補強効果確認試験)

益田 彰久^{*1}松岡 茂^{*2}柳 博文^{*1}

概 要

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、従来のタフシートの引張強度・伸び性能を向上させた新型のタフシートを開発した。この新型タフシートを用いて補強効果確認試験を実施した結果、せん断耐力補強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载荷試験より $5\delta_y$ 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，新型タフシート

SEISMIC RETROFIT WITH NEW TUF-SHEET (VALIDATION TEST OF THE RETROFITTING EFFECT)

Akihisa MASUDA^{*1}Shigeru MATSUOKA^{*2}Hirofumi YANAGI^{*1}

Abstract

A new TUF-Sheet has been developed. It is a retrofitting material that can be used for seismic retrofit of reinforced concrete piers in sites on which many restrictions are imposed. This newly developed sheet features higher tensile strength and elongation performance than that of the preceding TUF-Sheet. The authors performed a series of tests to verify the retrofitting effect of this new sheet. The tests revealed that improvement in shear strength could be explained in a theory similar to that for glass fiber retrofitting. In addition, alternating loading tests using full size specimens confirmed a toughness of $5\delta_y$ or higher. The tests also demonstrated that by adjusting the characteristics of reinforcing material and resin, it is possible to provide higher ductility.

Keywords: reinforced concrete pier, seismic retrofit, TUF-Sheet

* 1 Civil Engineering Technology Development Group, Institute of Technology, Engineering Division

* 2 Manager, Civil Engineering Technology Development Group, Institute of Technology, Engineering Division

新型タフシートによる耐震補強（補強効果確認試験）

益田 彰久^{*1}・松岡 茂^{*2}・柳 博文^{*1}

1. はじめに

交通施設に供されているコンクリート構造物は公共性が高く、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¹⁾。

そこで、筆者らはトンネルや RC 部材の補修材として開発されているタフシートの利点を持ってすれば前述の問題にも対応可能であると考え、新たな耐震補強用タフシートを開発した。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. 新型タフシートについて

2.1 新型タフシートの材質

新型タフシートは、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、従来のタフシートではチョップドストランドマットを使用していたが、耐震補強用としては強度不足のため、新型タフシートでは一方向強化ガラスロービングとした。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/m² 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 新型タフシートの性能

この新型タフシートは、次のような特徴を有する。

- 1) 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。
- 2) 直射日光下は 5 分、紫外線ランプ照射によっても 20 分程度で硬化する性能を有している。
- 3) 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。

このため新型タフ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% (2σ) を加味した設計引張強度は $1.67 \times 10^3 \text{ N/mm}^2$ 、また引張弾性率は $1.01 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ 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/mm²）鋼板 3.82mm に相当することとなる。

*1 エンジニアリング本部 技術研究所 土木技術開発グループ

*2 エンジニアリング本部 技術研究所 土木技術開発グループリーダー

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(例えば 2)3)。新型タフ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⁴⁾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 体は新型タフ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/mm² から試験体のせん断耐力計算値 V_c は 246kN、曲げ降伏耐力計算値 M_y は 451kN となった(材料係数・部材係数とも 1.0、曲げ降伏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 θ で配置される単位幅あたりのシートの断面積、 θ : 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、ここでは $A_f \cdot f_t$ を 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。

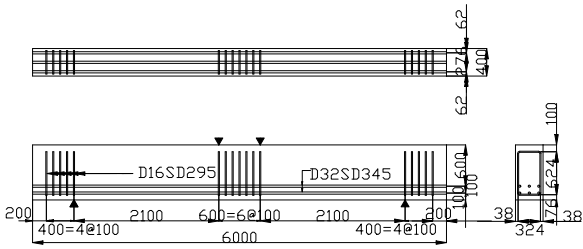


図-1 せん断補強効果確認試験体

表-1 試験条件・結果一覧

番号	$A_f \cdot f_t$ (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

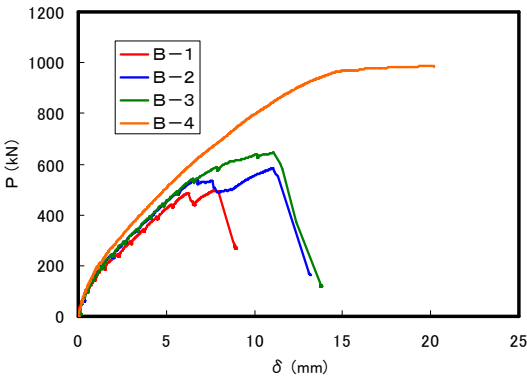


図-2 荷重-変位関係

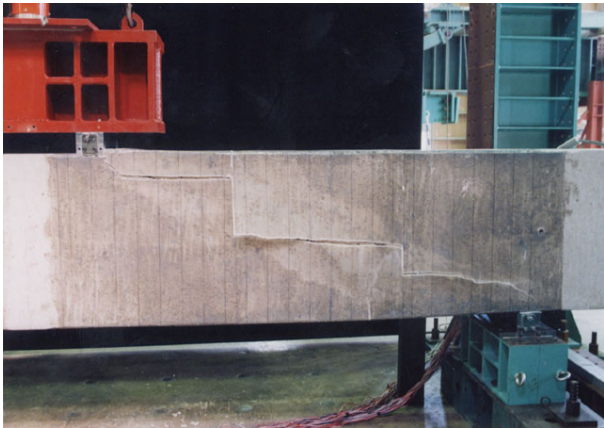


写真-1 シート破断状況 (B-3)

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)と同様な線形性を持っている

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。

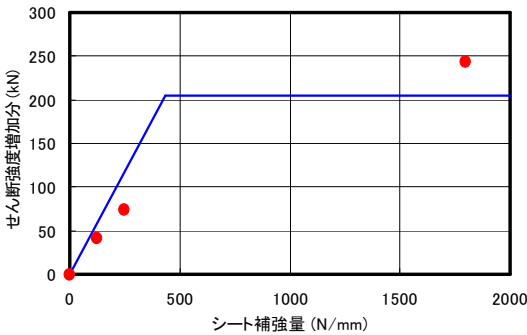
4. 1 試験体および試験条件

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。

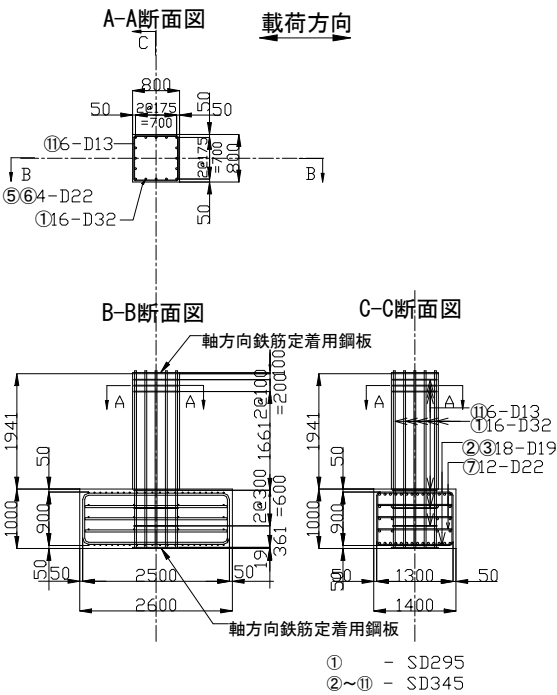
4. 2 試験結果

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、新型タフシートはせん断補強に対して十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5δ_y3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碎しており、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



図－3 せん断力の増分とシート補強量の関係



図－4 変形性能確認試験体（800mm角断面）

表－2 変形性能試験一覧

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 ²)	載荷・最終破壊状況	最終変形角
C4-1	400×400×1370	0.1	263	114	268	1.18	1.03	30.04	7δ _y -1サイクルクリア 7δ _y -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	5δ _y クリア 7δ _y -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	8δ _y クリア 以後ジャッキ押し切り	1/23
C8-1	800×800×1960	0.1	2164	362	898	1.63	1.19	33.62	5δ _y クリア 7δ _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	5δ _y クリア 7δ _y -1サイクル載荷途中でシート破断	1/40

C8-2 は柱基部から 0.5D(400mm)シート無し

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。

新型タフ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ので、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 G_g/G_s 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活かされ、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C4-3試験体ではじん性率も $8\delta_y$ 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C8-2の破壊状況より、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。

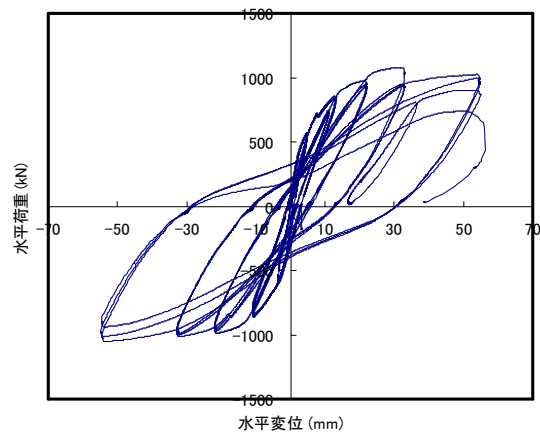


図-5 荷重-変位関係 (C8-1)

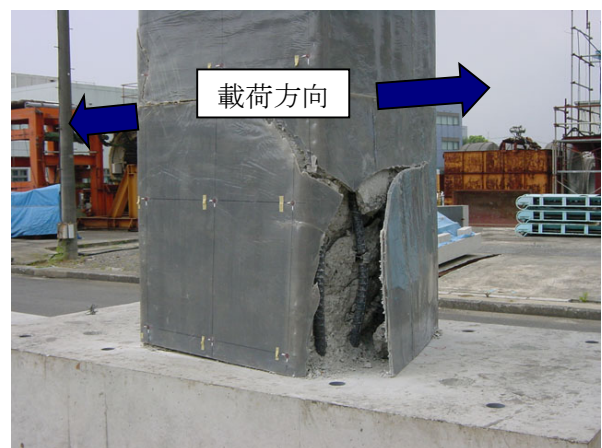


写真-2 最終破壊状況 (C8-1)

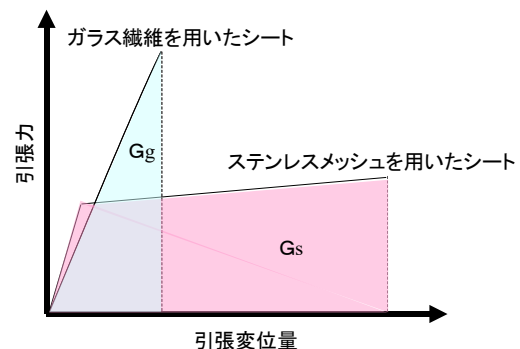


図-6 シート破断時のエネルギーの考え方

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载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 $1,600\text{mm} \times 1,000\text{mm}$ とした。形状・配筋等を図-7に示す。せん断スパン比は载荷方向で 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。

载荷は、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载荷試験を実施した。なお、試験時のコンクリート圧縮強度 32.6N/mm^2 から求めた試験体のせん断耐力 V は $1,009\text{kN}$, 曲げ耐力 M_u は $2,040\text{kN}$ (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、新型タフシートによるせん断耐力の補強値 V_f は $2,814\text{kN}$ 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

$0.5\delta_y$ 载荷時では斜めひび割れは発生しなかった。 $1\delta_y$ への载荷途中で斜めひび割れが発生し荷重が低下したため载荷終了とした。荷重の最大値は $1,585\text{kN}$ 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 $1,009\text{kN}$ よりかなり大きくなった。これは計算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 $2,131\text{kN}$ であった。

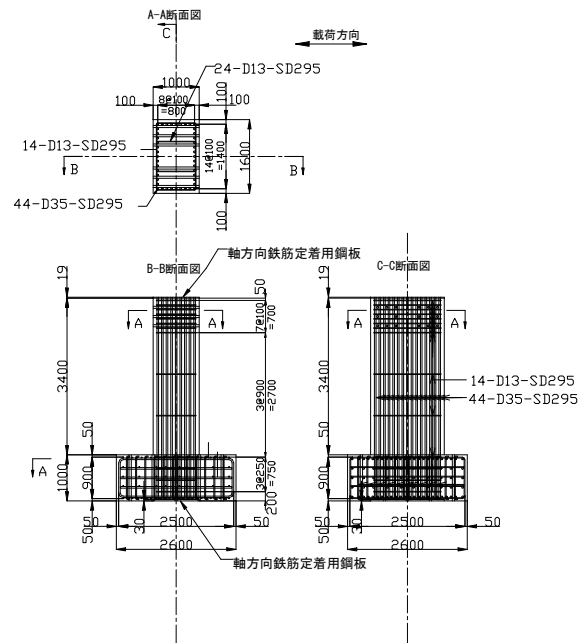


図-7 実物大級試験体

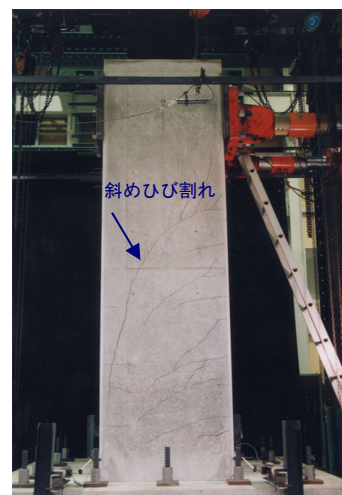


写真-3 無補強载荷時の斜めひび割れ状況



写真-4 終局時のシート破断状況

4 δ_y 載荷中に高さ0.5～1.0m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 δ_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 δ_y 2サイクルにて+方向へジャッキを押し切り載荷終了とした。

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

新型タフ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。

- 1) 新型タフ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。
- 2) 新型タフ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5 δ_y 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タフ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。

また新型タフ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

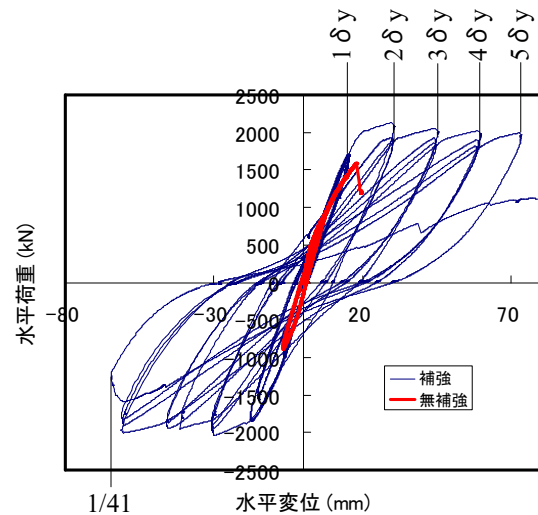


図-8 荷重-変位関係（実物大級）

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

- 1) 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物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
- 2) 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
- 3) 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