

劣悪な施工条件に対応可能な新しい高性能な橋脚等の耐震補強法

岩田秀治¹・丹間泰郎²・下村 勝²・松岡 茂³・渡辺忠朋⁴

¹正会員 博(工) JR 東海 建設工事事務 管理課（〒450-6101 名古屋市中村区名駅 1-1-4）

²正会員 JR 東海 新幹線鉄道事業本部 施設部 工事課（〒103-0027 東京都中央区日本橋 3-1-17）

³正会員 工博 鉄建建設(株) エンジニアリング本部 技術研究所（〒286-0008 成田市新泉 9-1）

⁴正会員 博(工) 北武コンサルタント(株)（〒062-0020 札幌市豊平区月寒中央通 7）

1. はじめに

今日、交通施設などに関しては高性能化・高品質化が要求され、特に兵庫県南部地震以降は、構造物の耐震性能の向上が求められている。その要求に応じるため、鉄道・道路などは、震災による構造物の被害を教訓とした新しい耐震基準が制定され、新設構造物は基より、既存の構造物の耐震補強も行われ、耐震性能の向上を図っている¹⁾。

一般に、既存構造物の耐震性能の向上を目的とした耐震補強では、せん断破壊の防止、変形性能の向上として、鋼板巻き補強や RC 巻立て補強が行われている。しかし、施工条件が劣悪なものや、耐震性能の評価において難易度が高いものについては、その評価方法や、劣悪な条件下でも施工可能で要求性能を満たす補強工法の開発が急務と言える^{2~8)}。

以下、施工条件に多くの制約がある構造物の耐震補強を想定し、新しく開発した耐震補強材を用いた耐震補強法について示す。その新しい補強法は、新型プリプレグシート（グラスファイバーとステンレスメッシュに紫外線硬化樹脂を予め含浸させた複合材シート：以下、PP シート）を用いるもので、極めて劣悪な施工条件に対応でき、簡易に人力施工が可能なものである。

2. 耐震補強の想定構造物および検討項目

(1) 補強想定構造物

耐震補強は、既存構造物の耐震性能の向上を目的とし、せん断破壊の防止、変形性能の向上を図るため、一般には、要求性能を満たし、経済性に富む「鋼板巻

き補強」や「RC 巻立て補強」が行われている。今回、耐震補強工を検討している構造物は、写真-1、写真-2 に示すような、施工条件などの制約が非常に多い構造物を想定しており、それらの補強工法では施工が極めて困難なものである。



写真-1 補強想定構造物（その1）



写真-2 補強想定構造物（その2）

表-1 主な耐震補強工法の分類

分類	補強工法	補強工法の概要
部材増厚	コンクリート巻立て工法	既設部材に鉄筋を配置し、コンクリートを打足し、断面を増加させて増強を図る工法である。比較的大断面の橋脚等の補強を行う場合に適用される。鉄筋の代わりに PC 鋼線などを用いることも可能である。
	モルタル吹付け工法	既設部材に帯鉄筋やスパイラル鉄筋等を配置し、モルタルを吹付け一体化することにより増強を図る工法である。一般に、コンクリート巻立て工法に比べ部材断面の増加を少なくできるため、ラーメン高架橋柱等に用いることも可能である。
	プレキャストパネル巻立て工法	内部に帯鉄筋等を配置したプレキャストパネルを柱周面に配置し、接合キーにより閉合し、柱とパネルの空隙にグラウト材を注入することにより一体化し、増強を図る工法である。
増強材被覆	鋼板巻立て工法	既設部材に鋼板を巻き、鋼板との間に無収縮モルタルやエポキシ樹脂等を充填して、せん断およびじん性補強を行う。曲げ補強も期待する場合には、部材接合部や基礎に鋼板を定着することで可能である。
	FRP(炭素繊維・アラミド繊維)シート巻付け(接着)工法	炭素繊維シートあるいはアラミド繊維シート等を含浸樹脂を用いて部材表面に貼り付けて、増強を図る工法である。クレーン等の重機が不用であり、補強厚さも薄く建築限界等の支障が少ない。
	FRP 吹付け工法	ガラス繊維等と樹脂をスプレーガンで直接部材表面に吹付けて、増強を図る工法である。補強厚も薄く、建築限界等の支障が少ない。スチールクロス等を併用することにより、補強効果をさらに向上できる。
補強材挿入	鉄筋挿入工法	橋脚等の既設部材を削孔する。鉄筋を挿入し、モルタル等を充填して欠体断面内に所要鉄筋量を追加することにより、せん断補強およびじん性補強を行う。
	PC 鋼棒挿入工法	上記鉄筋の代わりに PC 鋼棒を挿入する。必要により、プレストレスを導入する。
部増材設	壁増設	ラーメン高架橋の柱間に壁を増設することにより、曲げおよびせん断耐力を大幅に増強させる工法である。
	ブレース増設	ラーメン高架橋等の柱間にブレースを増設することにより、既設柱部材等に作用する地震時水平力を低減させる工法である。
併用工法	コンクリート巻立て工法＋鋼板巻工法	橋脚等において、主として曲げ補強を鉄筋コンクリート巻立て工法により行い、せん断およびじん性補強を鋼板巻立て工法に期待する場合など。
	鉄筋挿入工法＋コンクリート巻立て工法	橋脚等において、コンクリートの拘束効果をより高めるため、鉄筋コンクリート巻立て工法に鉄筋挿入工法を併用する場合など。
	PC 鋼棒挿入工法＋鋼板巻立て工法	橋脚等において、鋼板巻立て補強工法によるコンクリートの拘束効果を高めるため、PC 鋼棒を挿入し鋼板をつなぐ場合など。

写真-1 は、門型ラーメン橋脚で、直下に鉄道が存在する。このような条件では、作業スペースも極めて狭隘で、重機が使用できない列車近接作業となり、作業時間は、夜間線路閉鎖間合い（列車が通過しない時間帯）の非常に短いものとなる。耐震補強工法としては、それらの制約に対応可能で、加えて、耐久性にも富み、鉄道システム上、絶縁性にも優れたものが要求される。

写真-2 は、駅部ラーメン高架橋で、乗降客も非常に多く、写真-1 のケース同様の施工条件・時間などの制約がある。また、駅空間として、騒音・振動および有機材料を極力使用しないなどの制限もある。

(2) 検討項目

新しい耐震補強工法の検討項目としては、以下に示すもので、それらの要求に満たすよう開発を行った。

a) 経済性

耐震補強法に求められる性能としては、力学的な性能のほか施工性や経済性などにも優れたものが要求される。

近年開発された耐震補強法には、施工性に優れたものが多いが、今回は、各種の繊維巻立て補強工法より安

価で、鋼板巻き補強や RC 巻立て補強に匹敵する経済性を求めた。

b) 耐久性

土木構造物は、耐用期間が長く、供用中に来襲する大地震に対して常に目的とする耐震性能を確保する必要があるため、数十年レベルの長期的な耐久性も求められる。高品質な補強材は、経済性にも関連するが、使用する補強材料は、耐腐食性、耐紫外線劣化性、耐アルカリ性、耐水性、耐熱・耐寒性、耐薬品性など、各項目に対する適切な耐久試験により、所期の性能が長期的に保たれることを求めた。

c) 施工性

施工面では、写真-1、写真-2 に示すような、非常に劣悪な条件下においても対応可能で、省力化を図った人力施工が可能なものを求めた。

d) 工学的な検討項目

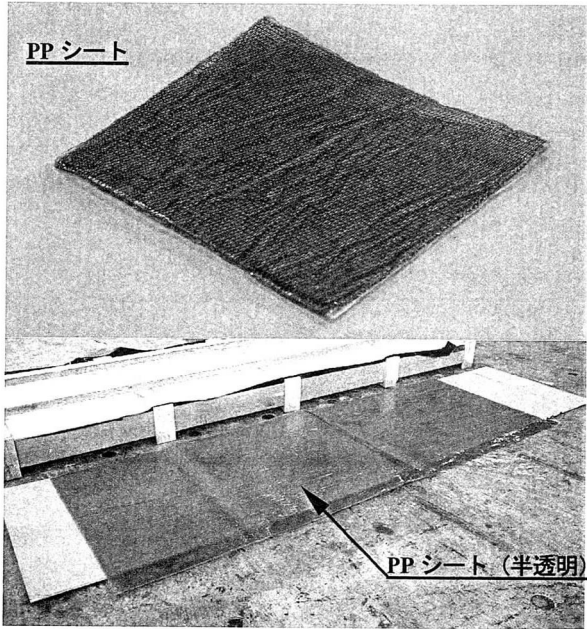
補強想定構造物においては、断面寸法が 1.5m 程度の大断面部材により構成されたものも多い。

それら大断面部材の補強として、補強材で巻立てる耐震補強では、補強材の横方向の剛性が小さいために、せん断破壊や主鉄筋の座屈を防止することができないことや、大変形時のハラミ出しの影響が懸念される。

表－2 基本性能試験および結果

試験体	試験体寸法 (mm)	試験条件						試験終局状態	
		軸力比	曲げ耐力 (kNm)	せん断耐力 (kN)	PP シート 補強量 (N/mm)	せん断曲 げ耐力比	圧縮強度 (N/mm ²)	載荷・破壊状況	変形 角
①	400×400×1370	0.1	263	114	268	1.18	30.04	7δy:1 回目クリア. 7δy:2 回目載荷途中でシート破断	1/29
②		0.1	269	116	394	1.48	32.01	5δy クリア. 7δy:1 回目載荷途中でシート破断	1/39
③		0.2	327	117	566	1.58	32.58	8δy クリア. 以後押し切り	1/23
④	800×800×1960	0.1	2164	362	898	1.63	33.62	5δy クリア. 7δy:1 回目載荷途中でシート破断	1/36
⑤		0.1	1995	336	898	1.74	26.79	5δy クリア. 7δy:1 回目載荷途中でシート破断	1/40

※ 試験体⑤は、実構造物の土かぶりを想定し、柱基部から 0.5D(40cm)シート無し



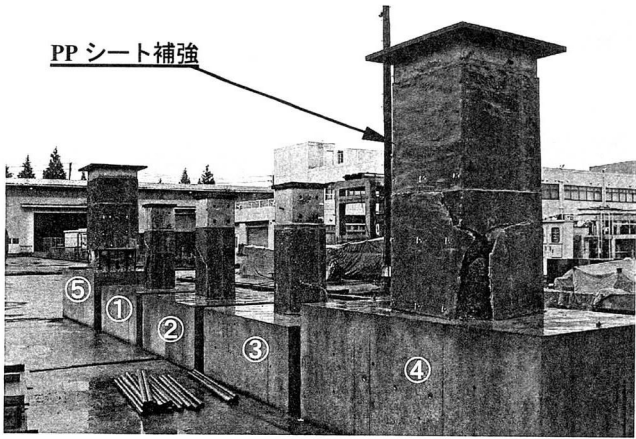
写真－3 新しい耐震補強材

それは、種々の巻立て耐震工法において、その耐震性能評価式は、断面形状が大きいもので 80cm×80cm 程度の比較的小さな断面の実験供試体を用いた実験結果により算定されたものが多いためである。

今回は、大断面部材においても十分適用可能で、鋼板巻き補強と同等の耐震設計上の要求性能を満たすものを検討した^{9, 10)}。

3. 新しい耐震補強材

主な耐震補強工法は、表－1 のように分類される^{2~8)}。今回の検討では、既存構造物の基礎への影響も考慮し、部材増厚による補強方法ではなく、鋼板巻立て工法や、FRP（炭素繊維・アラミド繊維）シート巻付け（接着）工法などに代表される補強材被覆による補強に分類されるものを前提とし、前途に記述した検討項目の要求性能を可能な限り満たす耐震補強材料を、数



写真－4 基本性能試験の試験体

多くの検討の末に見出した。具体的には、既存の補強材被覆による補強方法の短所を補い、軽量で、補強対象部材の形状は問わないもので、より合理的な補強が可能となるようにと検討し、そのイメージは、ガムテープを補強対象部材に巻き付けるだけのものとした。

新しい補強材（PP シート：写真－3）の使用材料および材料特性を以下に示す。

- ・ 樹脂主成分 ： エポキシアクリレート
- ・ 硬化方式 ： 紫外線硬化型
- ・ 補 強 材 ： ガラス繊維
 ＋ステンレスメッシュ（SUS304）
- ・ 設計基準強度： 1,667N/mm²
- ・ 設計有効厚 ： 0.539mm
- ・ 大 き さ ： 厚 2.5mm/層、幅 1,000mm
- ・ 設計破断荷重： 898N/mm
- ・ 重 量 ： 4.8kg/ m²

この特性は、別途行った試験結果より、SS400（設計引張降伏強度：fsy=235N/mm²）の鋼板の 3.82mm に相当し、ガラス繊維とステンレスメッシュの複合材料として、極めて優れた性能を示したものであり、シート巻付け後は、太陽光の下では約 5 分程度で自然に硬

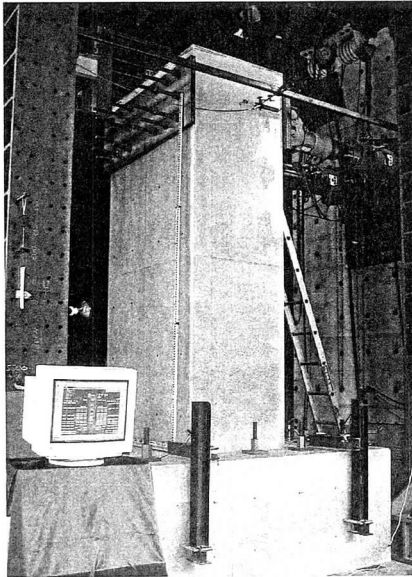


写真-5 実験供試体（無補強）

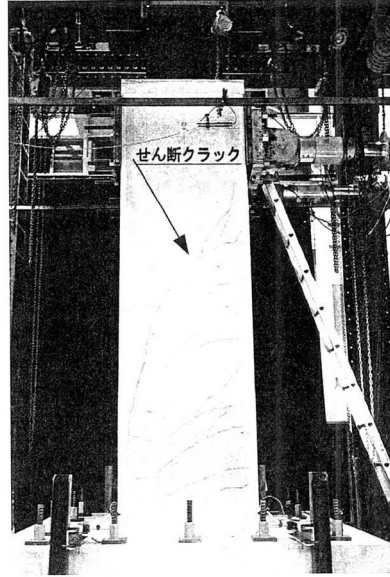


写真-6 初期載荷状況（無補強）

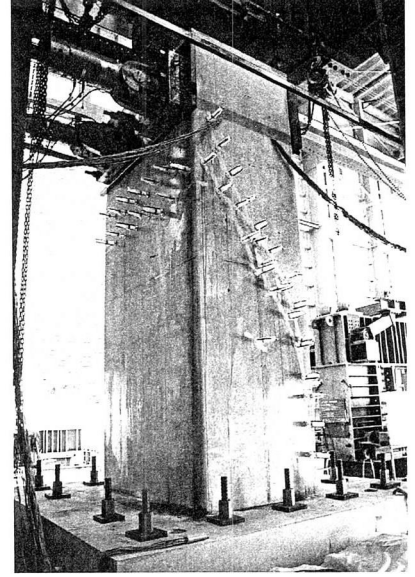


写真-7 エポキシ樹脂補修状況

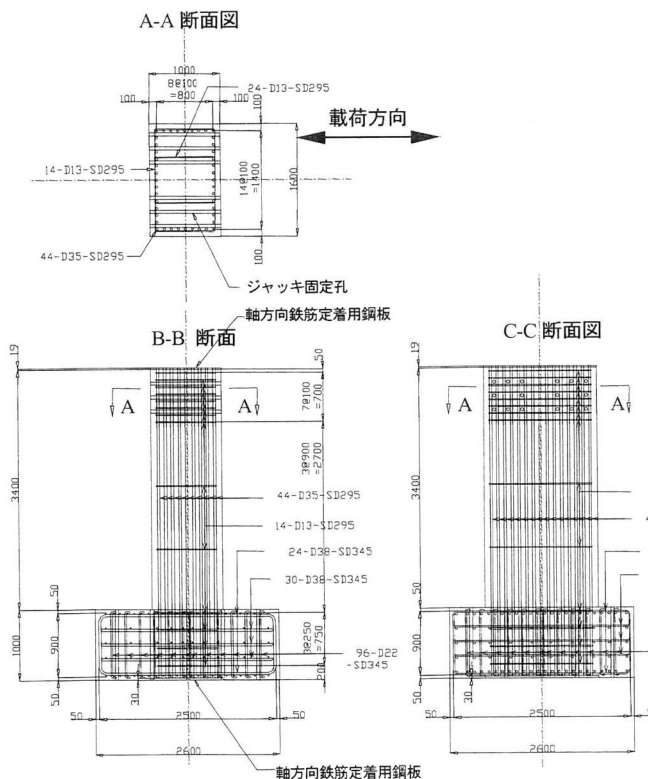


図-1 実験供試体配筋図（無補強時：せん断破壊先行）

化するものである。なお、樹脂主成分のエポキシアクリレートは、近年、自動車、ヨットの車体にも用いられ、加工し易く安価な材料である。

4. 基本性能試験および結果

PP シートの基本的力学性能を検証するため、写真-4 に示す試験体を用い、補強巻き数に対する耐震補強効果の確認を行った。試験結果を表-2 に示す。

いずれの試験体も、ひび割れが発生した以后も耐力を保持しており、PP 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、じん性率については、すべての試験で5δy-3サイクルの載荷をクリアしている。

このことは、せん断補強に対して、PP シートにより補強対策が可能であると判断され、また、じん性に対する補強については、ステンレスメッシュの伸び性能が大きく寄与することが判明した。

柱基部0.5D(40cm)を無補強とした試験体⑤の結果は、全体を補強した試験体④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せん断補強に対してほとんど影響がないと考えられ、終局状態では、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考えられる。

なお、PP シート自体の基本物性の確認として、①耐薬品性(硫化水素、酸、アルカリ等)、②コンクリートの一体性、③水密性、④変形性能、⑤耐磨耗性、⑤耐衝撃性、⑥耐熱性、⑦絶縁性などについて、所定のJIS試験法により各種試験を行い、その基本物性が基準値を満たしていることも確認している。

5. 大断面供試体による水平交番載荷実験

(1) 実験概要

大断面柱部材の構造物におけるPP シート巻き補強の効果確認のため、せん断破壊を防止する最低巻き厚

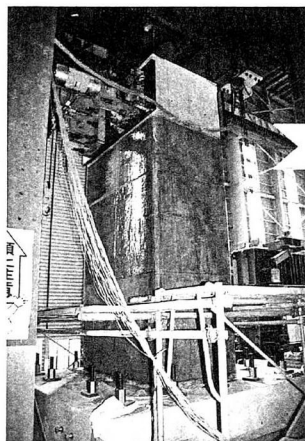


写真-8 下地シート貼付

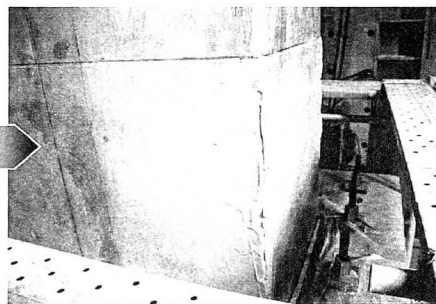


写真-9 プライマー塗布

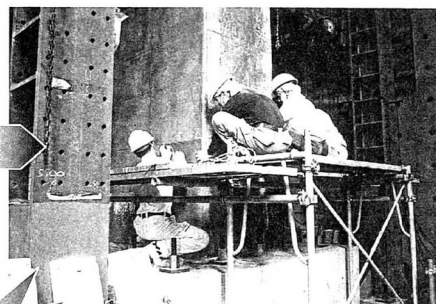


写真-10 PPシート貼付（下端）

※ 室外では紫外線照射は不要

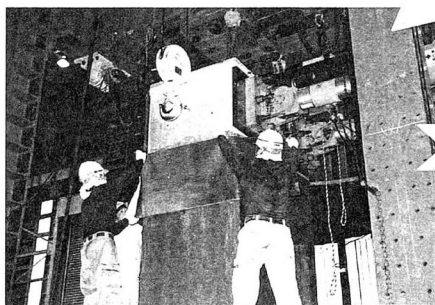


写真-11 PPシート貼付（上端）

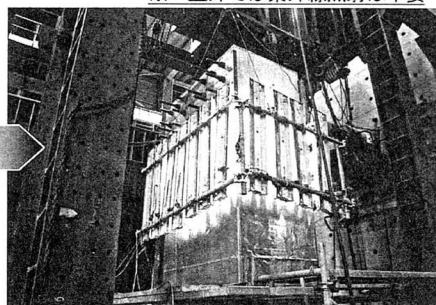


写真-12 紫外線照射

および耐震性能の検証を目的として、交番載荷試験を行った。

本補強工法は、前途の基本性能試験において、脆性的なせん断破壊から粘りのある曲げ破壊へと移行させる変形性能の向上や、主鉄筋の座屈を抑制する効果を確認しているが、大断面部材での適用に関しては、補強対象部材の断面に比べ、シートの横方向の剛性が小さいために、所定のせん断破壊防止や主鉄筋の座屈を防止の効果が得られない懸念もあり、実大断面を想定した供試体における補強効果の確認を行った。

(2) 供試体の諸元および実験方法

実大構造物の大断面柱部材を想定した供試体の断面寸法は、図-1、写真-5に示すよう 1.6m×1.0m である。

実験方法は、PP シート巻き補強後のせん断破壊防止の検証のため、補強前の供試体はせん断先行破壊として製作し、無損傷の供試体に水平交番載荷を行い、降伏前にせん断破壊した状態を生じさせた。その後、補修・PP シート補強を行い、再度、水平交番載荷を行い、本補強効果の確認を行った。

無補強の供試体の載荷実験結果は、計算上の降伏変位+1 δy において主鉄筋が降伏する前にせん断ひび割れが進展し、図-2、写真-6に示すように 0.84 δy で、せん断破壊に至った。

補修補強工は、①せん断クラック部にエポキシ樹脂注入による補修（写真-7）、②PP シート 2 層巻きの補強を行った。なお、補強工の手順を写真-8～12 に示

し、写真-13 は補強後を示す。

(3) PP シート補強の載荷実験結果

せん断破壊後に補修補強を施した供試体の載荷実験では、 $\pm 1 \delta y$ 、 $\pm 2 \delta y$ 、… $\pm 5 \delta y$ …と正負 3 回の載荷を行った。実験結果の荷重変位の関係を図-2 に示す。写真-14 は+7 δy の 1 回目載荷後の PP シート破断状況である。

結果としては、PP シート補強により、せん断破壊を防止でき、破壊形態が曲げ破壊型に移行した。また、計算上の最低巻き数（2 層）でも、変形性能が 5 δy を確保できることも確認できた。終局状態では、供試体隅角部の PP シートが縦方向に 2 箇所破断し、供試体基部の内部コンクリートが圧壊し、柱部材として軸力保持ができなくなる挙動を示した。また、主鉄筋は座屈したものの破断は確認されなかった。

今後の改善としては、変形性能の向上のため、補強対象部材の隅角部にあたる部分のみ増層や、PP シートに局部的伸縮率を付加させることなどが挙げられる。

6. まとめ

今回、新しい補強材料（PP シート）を用いた耐震補強法の検討を行った。このシートは複合材としての利点を発揮し、優れた性能を示すとともに、補強対象構造物の耐震性能の向上を目的とした「せん断破壊の防止」や「変形性能の向上」の要求性能を満たすものである。

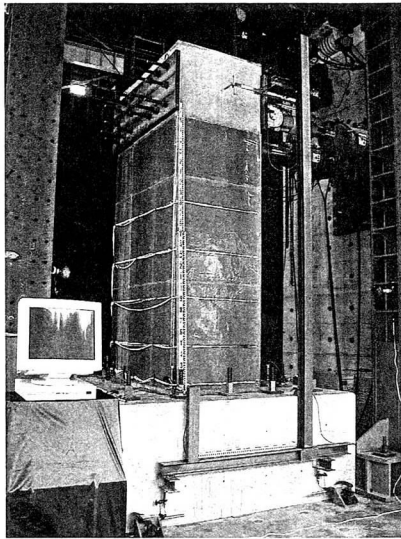


写真-13 PP シート補強 (2層巻き)

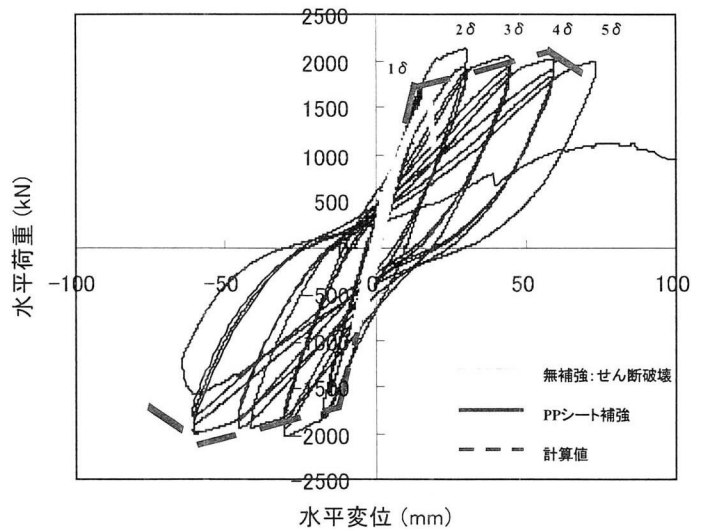


図-2 実験結果 (荷重-変位曲線)

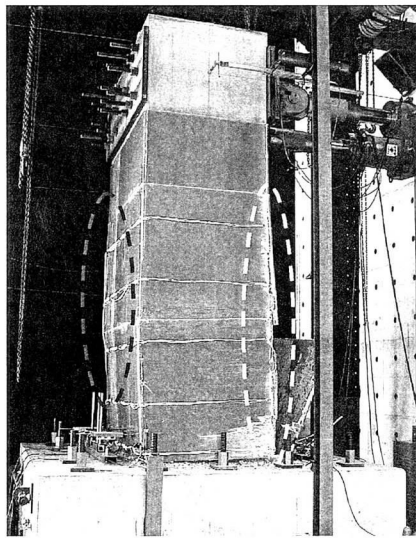


写真-14 載荷後のPPシート破断

経済性については、施工環境に制約の無い場合の「鋼板巻き補強」よりは劣るものの、既存の巻立て補強工法より優れ、材料強度に対する力学的特性のロスも少ないものである。

また、想定した対象構造物のような劣悪な作業条件に対しても、十分適用可能で、重機不要で省力化した人力施工が図れるもので、騒音・振動など環境にも配慮できるものである。

最後に、本補強工法は、補強対象とする部材に応じ、補強材の強度、幅長等の自由度があり、いろいろなニーズに対応可能なものと考えられるものであるが、まだ多くの検討を重ねる余地が多く存在する。今後は、鉄道・道路構造物以外の構造物への耐震補強としての適用も念頭に入れ、改良改善を行い完成度の高い補強工法として確立させたい。

参考文献

- 1) 鉄道構造物等設計標準・同解説(耐震設計)：(財) 鉄道総合技術研究所編，平成 11 年 10 月
- 2) 鉄道総合技術研究所：吹付けモルタルによる高架橋柱の耐震補強工法設計・施工指針，1996.10.
- 3) 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—スパイラル筋巻立法編一，1996.12.
- 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—RC プレキャスト型枠工法編一，1996.12.
- 5) 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.
- 6) 鉄道総合技術研究所：炭素繊維シートによる地下鉄 RC 柱構造物の耐震補強工法設計・施工指針，1997.1.
- 7) 鉄道総合技術研究所：アラミド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，1996.11.
- 8) 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 吹付け補強編一，1996.11.
- 9) 岩田秀治，大滝 健，家村浩和：損傷後の大断面 RC 橋脚の耐震補修・補強効果に関する実験的研究，第 26 回地震工学研究発表会論文集，第 2 分冊，p.p.1393～1396，2001.8
- 10) 岩田秀治：大断面ラーメン橋脚の耐震補強，第 5 回橋梁構造等の耐震設計法に関する講習会論文集 9 章，p.p.159～175，2002.10