

[耐震性向上技術]

炭素繊維による耐震補強技術

勝 俣 英 雄
岡 野 素 之

1. はじめに

阪神・淡路大震災によって既存の構造物、特に古い設計規準で建設された構造物の耐震対策が重要視されるようになった¹⁾。これら構造物の耐震診断を実施し、必要に応じて耐震補強をしなければならない。しかし、既存構造物の耐震補強の問題は既に過去の地震被害によっても明らかであり、昨日今日の問題ではない。にもかかわらず、耐震補強がこれまであまり実施されてこなかったのは、社会的に耐震対策に対する意識が欠落していたことおよびバブル経済の発生など経済環境についての要因のほか、効率的で経済的な耐震補強技術がほとんどなかったためであると考えられる。

炭素繊維が土木建築分野で応用され始めたのは1980年代半ばであるが、大林組は炭素繊維を耐震補強に用いる研究を開始した²⁾。炭素繊維は高強度、高弾性率という構造材料として優れた性質を有しており、軽量、しなやかさという既存構造物に対する施工性に優れた性質も持っており、耐震補強には非常に有用と判断されたためである。これまでは、鉄筋コンクリート造煙突、建築物の柱、道路橋脚の補強技術を研究・開発し、設計・施工指針を確立した^{3)~5)}。さらに、実施工を通じた知見をフィードバックして、より合理的な設計・施工方法を開発している。

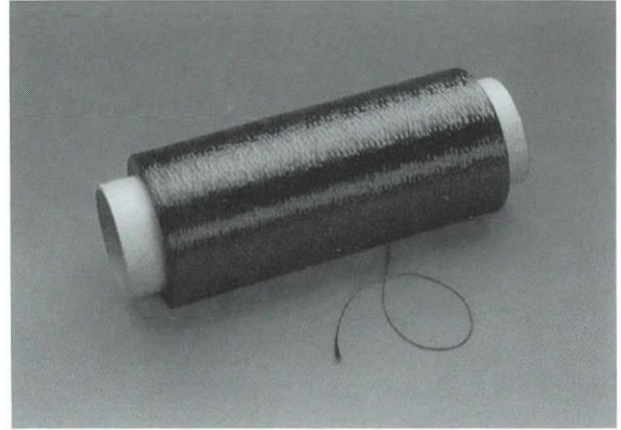
この論文では、炭素繊維を利用した耐震補強技術を簡単に紹介する。

2. 炭素繊維の基本物性

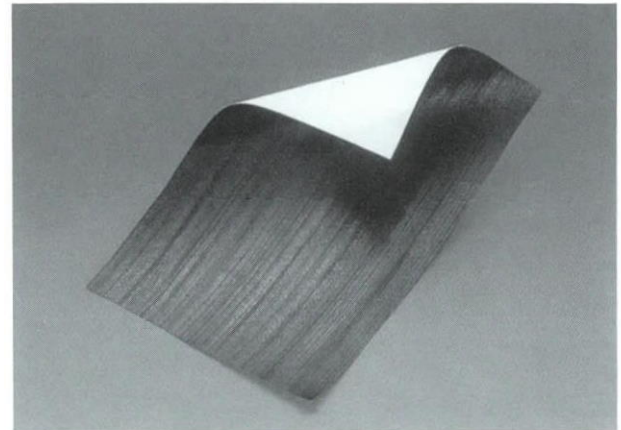
炭素繊維とはほぼ純粋な炭素からなる繊維状の物質で、その素線の直径は約7 μ である。耐震補強には炭素繊維ストランド(素線を12,000本集束)および炭素繊維シート(炭素繊維ストランドを織ったり、敷き並べたもの)が用いられる(Photo 1)。現在は、炭素繊維ストランドとして断面積が0.46cm²のもの、炭素繊維シートとして厚みが0.111mm および0.167mm のものが使用されている。

- 炭素繊維の基本物性を鋼材と比較し以下に示す。
- 引張強度 ; 3~4kN/mm² (鋼材の降伏強度の10倍)
 - 引張弾性率; 240kN/mm² (鋼材と同等)
 - 比重 ; 1.8 (鋼材の1/4)
 - 耐久性 ; 錆びない

また、炭素繊維の応力ひずみ関係を鋼材と比較してFig.1に示す。炭素繊維は降伏することがない脆性材である。したがって、炭素繊維を効果的に利用するには、脆性的な破断を回避する工夫が必要になる。一つは、炭素繊維にエポキシ樹脂を含浸させて用いることである。素線に応力集中が起きても、別の素線にエポキシ樹脂が応力を



(a) 炭素繊維ストランド
Carbon Fiber Strand



(b) 炭素繊維シート
Carbon Fiber Sheet

Photo 1 炭素繊維
Carbon Fiber

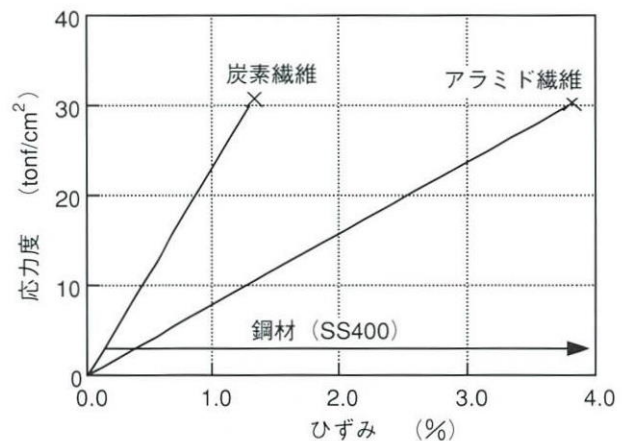


Fig. 1 炭素繊維の応力ひずみ関係
Stress-Strain Relationship of Carbon Fiber

伝達することができる。これによって炭素繊維の製品の強度として、(素線強度)×(素線本数)を期待することができる。別の一つは、コンクリート表面のR面取りである。炭素繊維はシャープなエッジに当てると破断強度が極端に低下するが、エッジをR(半径30mm以上)に面を取ることによって強度の低下をほとんどなくすることができる⁹⁾。

材料試験(JIS R7601またはJIS K7073に準拠)での炭素繊維の強度や弾性率の分布は正規分布によって近似できている^{3)~5)}。これから、炭素繊維の基準強度を以下のように考え、さらに数字を丸める。

$$\begin{aligned} \text{基準強度} &= \text{平均値} - \alpha \times \text{標準偏差} \\ \alpha; \text{係数} &= 2 \text{ (建築の場合)} \\ &= 3 \text{ (土木の場合)} \end{aligned}$$

ただし、この応力が構造物中で炭素繊維に必ずしも発揮されるわけではない。補強方法や構造物の形状に応じてひび割れの生じ方が異なり、その近傍の炭素繊維の応力状態も異なってくる。このため、炭素繊維が破断する時点での平均炭素繊維応力は材料試験時の強度に満たない。したがって、炭素繊維の設計強度は、構造物や補強工法の種類に応じて上記の基準強度に有効係数 ν ($0 < \nu < 1$)を乗じた値とする。具体的な数値は3.1節で示す。

炭素繊維の重ね継手長さについてはFig.2に示す試験を実施し、炭素繊維シート1層(厚み=0.097mm、強度=3kN/mm²)の場合は継手長が100mmあれば剥離ではなく、母材破断が生じることを確認している。コンクリートと炭素繊維との定着についても同様な実験を行い、同種の炭素繊維シート1層では定着長が200mmあれば母材破断する⁷⁾ことがわかっている。

耐久性については促進暴露試験(JIS A1415に準拠)を実施し、実用上十分な性能を確認している。

3. 炭素繊維による補強工法の概要

3.1 基本的な補強技術

炭素繊維による既存鉄筋コンクリート部材の補強方法には次のAおよびBの2種類があり、両者を組合せることも可能である。

A) 材軸方向に部材の表面に炭素繊維シートを貼付けて曲げ耐力を向上させる (Fig.3)。

この方法は軸方向鉄筋を増設した効果があり、補強効果の算定すなわち曲げ耐力の計算において炭素繊維による軸方向鉄筋が増えたものとして計算する。曲げ耐力算定用の炭素繊維強度の有効係数(ν)は2/3~3/4(最大は0.85)としている。

炭素繊維シートは必要補強量に応じて複数枚貼付ける。表面に増設した炭素繊維シートはかぶりコンクリートを介して応力伝達を行うので、定着・付着を確保するためにコンクリートの下地処理を行う。具体的には、プライマーと呼ばれる浸透性の高いエポキシ樹脂を塗布して表面のコンクリートを強化し、接着強度を高める^{3)・5)}。

B) 材軸直交方向に部材の表面に炭素繊維シートまたは炭素繊維ストランドを巻付けて閉鎖型にし、せん断耐

力を向上させる (Fig.4)。

この方法はせん断補強筋を増設した効果があり、補強効果の算定すなわちせん断耐力の計算において炭素繊維によるせん断補強筋が増えたものとして計算する。また、せん断耐力の増加に伴い、部材の靱性能も増加する。せん断耐力算定用の炭素繊維強度の有効係数(ν)は2/3~3/4とする。

必要補強量に応じて炭素繊維シートは複数枚貼付け、炭素繊維ストランドは巻付けピッチを調整する。炭素繊維とコンクリートはコンクリートにひび割れが生じると、プライマー処理をしても終局的には剥離してしまう。しかし、閉鎖型に炭素繊維を巻付けておけば、矩形断面ならば隅角部の支圧によって炭素繊維とコンクリート躯体

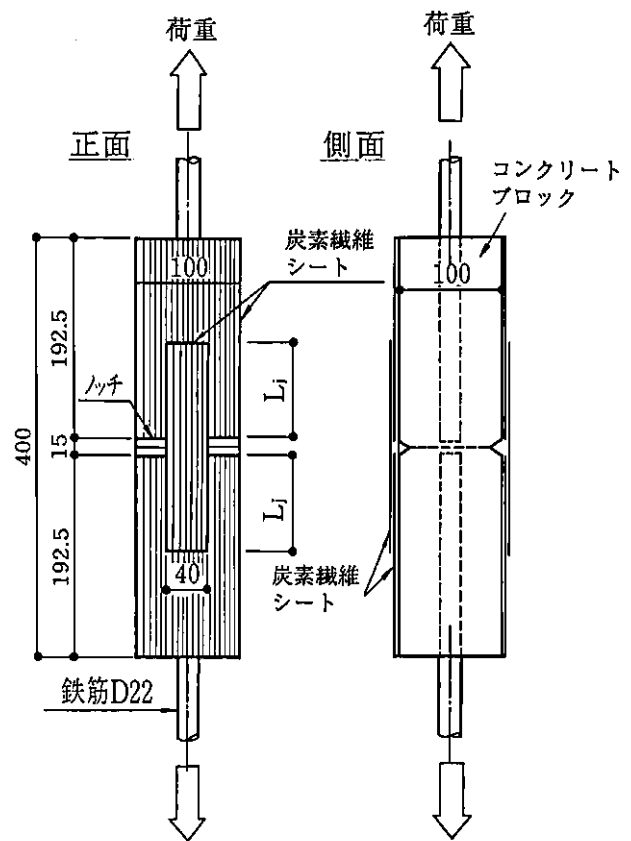


Fig.2 炭素繊維シートのラップ長に関する実験
Lapped Joint Test of Carbon Fiber Sheet

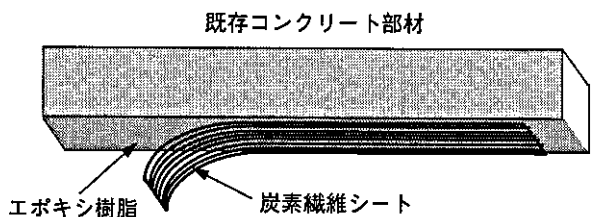


Fig.3 炭素繊維による曲げ補強
Retrofitting for Bending Moment by Carbon Fiber

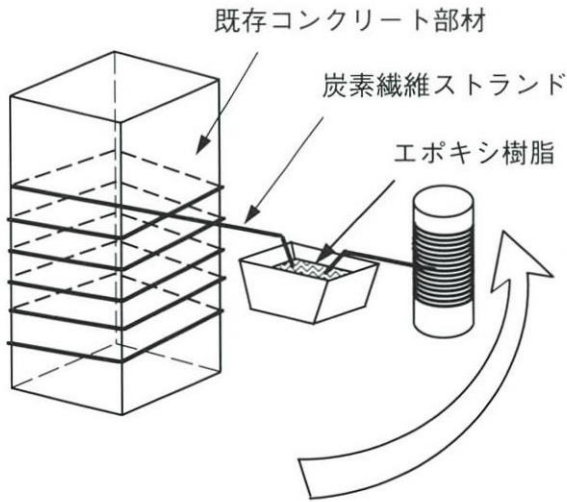


Fig. 4 炭素繊維によるせん断補強 (建築物の柱の場合)
Retrofitting for Shear Force by Carbon Fiber
(Columns of Building)

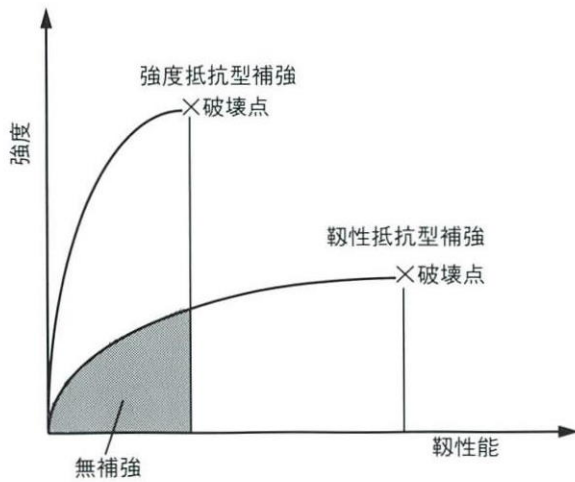


Fig. 5 耐震補強の戦略
Strategy of Seismic Retrofitting

は応力伝達ができる。したがって、高い補強効果を得るためには閉鎖型に炭素繊維を巻付けておく必要がある。

3.2 耐震補強への適用

耐震補強には強度抵抗型補強と靱性抵抗型補強があることに注意する必要がある。構造物に入力する地震の影響はエネルギー量としてとらえることができる。つまり、構造物の耐震性能は、強度が高くても、変形性能が高くてもよい (Fig. 5)。3.1 節で述べた方法を分類すれば、Aは強度抵抗型補強であり、Bは靱性抵抗型補強である。

実際、A単独、B単独、およびAとBの併用による耐震補強が実施される。さらには他の補強工法(壁やブレースの増設など)との併用もよく行われる。これらの耐震補強工法の選択は、構造物の種類や施工条件などから判断される。

なお、耐震補強においては地震力(主として水平方向)

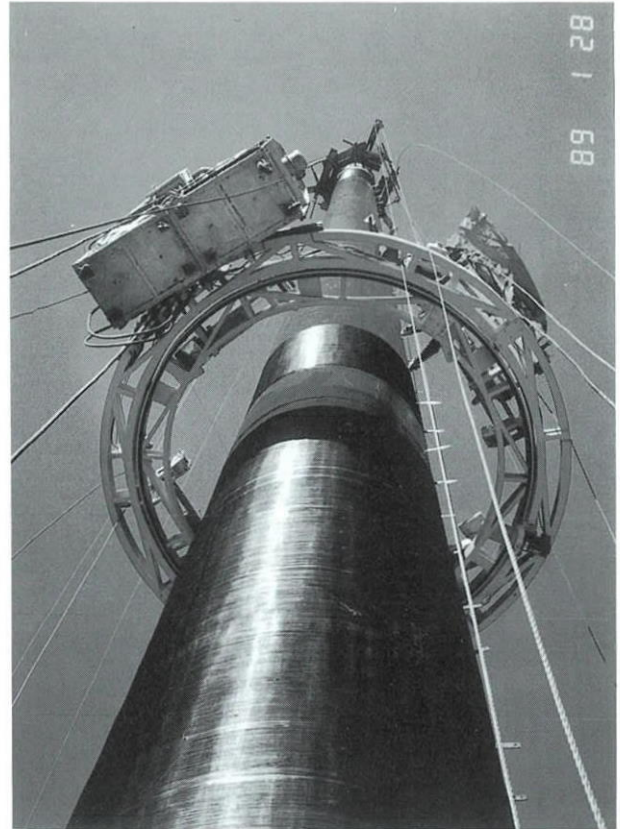


Photo 2 煙突の補強
Retrofitting of Concrete

に対して抵抗する能力だけでなく、地震後まで構造物の重量を支え続ける能力を確保することが重要である。これを目的に、柱および橋脚にBの靱性補強を行う例もある。

3.3 施工

炭素繊維による曲げ補強・せん断補強、いずれの場合もエポキシ樹脂の含浸は施工現場で、炭素繊維を設置する直前または同時に行われ、現場で硬化養生がされる。エポキシ樹脂が硬化すると、炭素繊維の柔軟性が失われ、躯体に密着させることができず、補強効果が大きく失われるためである。

このため、現場での施工管理として樹脂含浸および躯体との密着性を確保することが重要となる。特に、炭素繊維シートを用いる場合、しわ・気泡・樹脂の塊ができやすく、またコーナーで密着させるににくいので、注意が必要である。ただし、これらは目視で確認できる事項であり、特別な技能が必要ではない。

この他に、炭素繊維の巻付け・貼付け面の下地調整も重要である。炭素繊維の応力集中を回避するために、表面の凹凸を除去し、必要に応じてR面取りを実施する。また、平面精度や鉛直精度を確保し、炭素繊維シートにしわができにくくすることも必要である。

なお、この工法はコンクリートが健全であることを前提にしている。コンクリートにひび割れなどの劣化があ

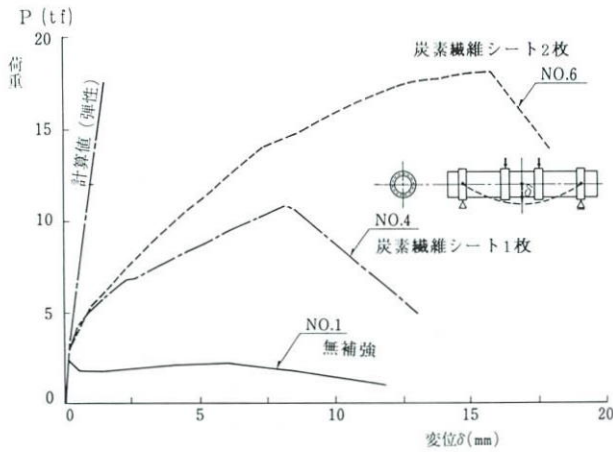


Fig. 6 中空円筒を補強した実験の結果
Load-Displacement Relationship of
Chimney Model

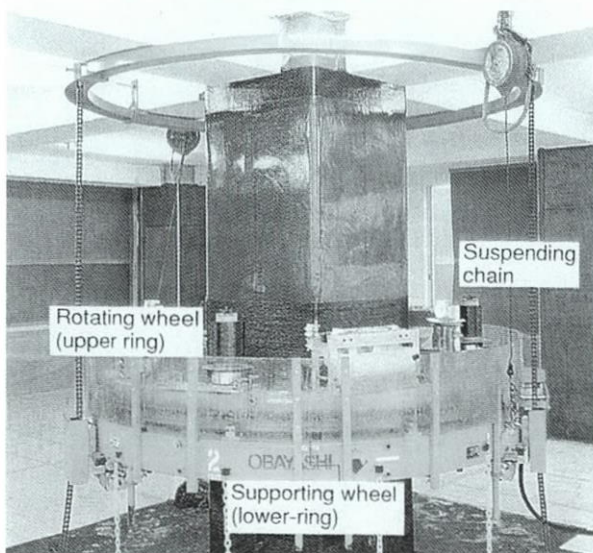


Photo 3 炭素繊維ストランドの巻き付け機械
Winding Machine of Carbon Fiber Strand

る場合は、これを適切に補修してから炭素繊維の施工を行う必要がある。

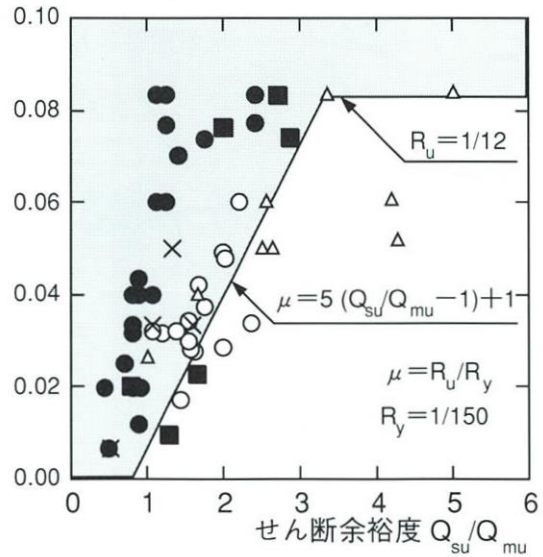
4. 補強技術の適用例

4.1 煙突^{3), 8)}

既存の鉄筋コンクリート煙突は地震時に頂部から高さの1/3の近傍で折れることが多い。これは古い設計規準で上述近傍の要求曲げ耐力が低いためである。これに対しては炭素繊維による曲げ補強が行われる (Photo 2)。実際には温度応力などの処理のため、せん断補強も実施されるほか、煙突ではコンクリートの劣化が一般に激しいので、コンクリートの補修もなされる。施工は高所作業となるので、ゴンドラに炭素繊維巻付け機能を組込んだ機械を開発し、使用している。

補強効果は鉄筋コンクリート造の中空円筒梁の曲げせ

終局部材角 R_u (rad)



- せん断破壊 $a/D = 1.5$
- せん断破壊 $a/D = 3.0$
- 純RC
- × 付着破壊
- △ 軸方向筋の座屈

Fig. 7 炭素繊維で補強した柱のせん断余裕度と
終局変位の関係
Relationship between Ultimate Displacement and
Ductility

ん断加力実験によって確認した (Fig. 6)。曲げ耐力が補強によって大幅に増加することがわかる。また、炭素繊維量が増加するほど、耐力が大きくなることも指摘できる。この耐力増加 (すなわち補強効果) は既往の断面曲げ解析手法によって適切に評価できる。

4.2 建築物の柱^{4), 6)}

鉄筋コンクリート造既存建物の柱はせん断破壊し、床を支持できずに建物全体の倒壊に結びつくことが地震時によく見られる。これは、古い設計規準の要求せん断耐力や必要せん断補強筋量が小さいことが原因である。これに対しては炭素繊維によるせん断補強が実施され (Fig. 4)、柱のせん断耐力が増大し、コンクリートも十分に拘束されて柱の靱性能が向上する。

施工スペースが広い場合には、巻付け機械を用いて炭素繊維ストランドを巻付け、高い施工効率と信頼性を得ることができる (Photo 3)。施工スペースが狭いなどの場合は人力で炭素繊維シートを巻付ける。

補強効果は鉄筋コンクリート柱の実験によって確認した (Fig. 7)。図は終局変位 (靱性能の指標) と炭素繊維によって補強された柱のせん断余裕度 (せん断耐力/曲げ耐力) の関係を示す。炭素繊維の補強によってせん断余裕度は増大するが、このとき終局変位すなわち靱性能も向

上することがわかる。

4.3 道路橋脚⁹⁾

古い設計基準で設計された鉄筋コンクリート造道路橋脚は全般に帯筋が不足しており、地震により1) 曲げ靱性の不足による破壊、2) せん断補強筋の不足によるせん断破壊、および3) 主筋段落とし部での曲げ破壊が発生している。1), 2) の破壊の場合には、前述した鉄筋コンクリート煙突や、建築物の柱と同様に曲げあるいは靱性に関し補強を行うことにより耐震性能を向上させることができる。

一方、3) の主筋の段落とし部の補強は橋脚全体の性能を考慮して計画する。段落とし部での破壊はこの部分で

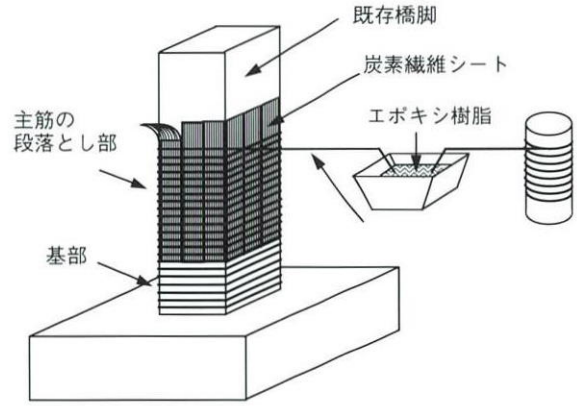
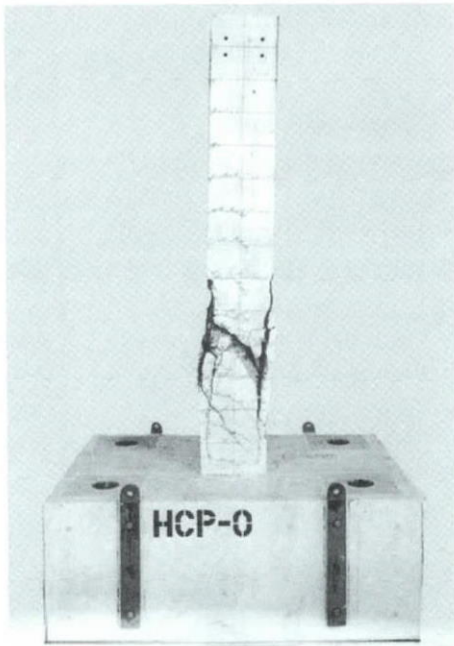
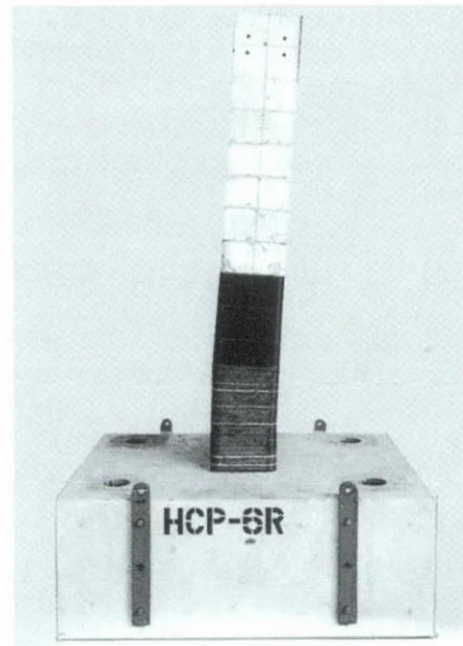


Fig. 8 炭素繊維による橋脚補強
Retrofitting of Pier by Carbon Fiber

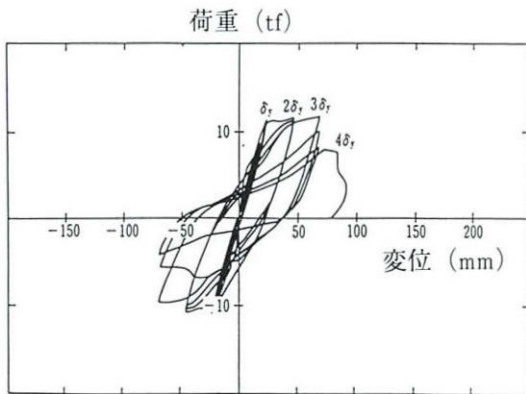


(a) 無補強
Unretrofitted

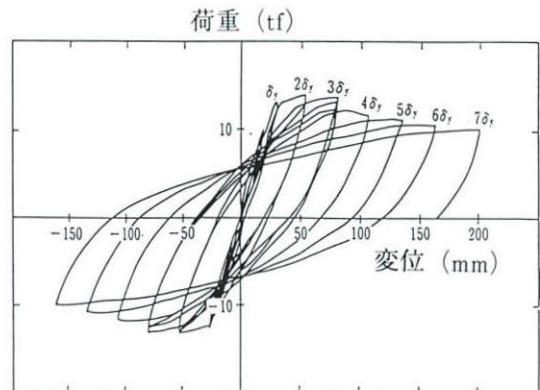


(b) 炭素繊維により補強
Retrofitted by Carbon Fiber

Photo 4 破壊モード
Failure Modes of Pier Model



(a) 無補強
Unretrofitted



(b) 炭素繊維により補強
Retrofitted by Carbon Fiber

Fig. 9 橋脚模型試験体の荷重と変位の関係
Load-Displacement Relationship of Pier Model

の曲げ耐力・靱性の不足によるものであり、曲げおよびせん断補強を行う。段落とし部の耐力・靱性が向上すると破壊が基部（フーチング上面）に移行する。そこで、基部を同様に補強し、全体の耐震性能を向上させる（Fig. 8）。補強効果は実験により確かめられている。Photo 4に段落とし部で破壊した試験体と補強した試験体の破壊モードを、また荷重と変位の関係をFig. 9にそれぞれ示す。補強した試験体では大きな変位に至るまで荷重の低下が少なく、補強効果が確認できる。

5. まとめ

炭素繊維による耐震補強工法に関して、素材、補強の基本方式、および適用例を簡単に紹介した。適用例として、施工実績が多い煙突、柱、道路橋脚について示したが、この他に道路橋脚の桁の曲げ補強、鉄道橋脚および建築物の梁や壁のせん断補強に関しても実験的および解析的研究を行っており、実務に適用されようとしている。

今後も様々な部位の補強のニーズが生じると思われるが、これに対して炭素繊維が適用できるか研究・開発を続けていきたい。

謝 辞

この論文には、日本道路公団試験所との共同研究、CRS研究会からの委託研究、および三菱化学株式会社との

共同研究の成果を引用しました。

参考文献

- 1) 例えば、日本建築学会：兵庫県南部地震災害調査報告速報，（1995）
- 2) 勝俣，他：新素材による既存鉄筋コンクリート柱の耐震補強に関する研究，大林組技術研究所報No.33，（1986）
- 3) 大林組：CFRPによる既存RC造煙突の耐震補強工法設計・施工指針，（1991）
- 4) 大林組：CFRPによる既存鉄筋コンクリート柱の耐震補強工法 設計・施工指針，（1991）および（1995）
- 5) 日本道路公団試験研究所橋梁研究室：炭素繊維による鉄筋コンクリート橋脚の補強工法 設計・施工要領，試験研究所技術資料第615号，（1995）
- 6) 勝俣，他：既存鉄筋コンクリート部材の耐震補強に関する研究，日本コンクリート工学年次講演論文集11-1，p.861～866，（1989）
- 7) 岡野，他：炭素繊維貼付けによる既存部材の補強に関する研究（その1），大林組研究所報No.43，p.29～32，（1991）
- 8) 木村，他：炭素繊維による既存煙突の耐震補強工法の開発，大林組研究所報No.37，p.73～79，（1988）
- 9) 岡野：炭素繊維強化プラスチックによる既存道路橋の補強，耐火物No.45 [5]，p.332～339，（1993）