CFRP による既存構造物の耐震補強工法[†]

小 島 克 朗*

A Seismic Retrofitting Method Using CFRP for Existing Reinforced Concrete Structures

by

Yoshiro KOBATAKE*

1 ま え が き

構造物の地震に対する設計法は、地震被害を教訓として段階的に発達してきた。建築物では、十勝沖地震や宮城県沖地震等の教訓も生かした新しい耐震設計法、いわゆる“新耐震”を導入した建築基準法・同施行令の大改定が1981年に施行された。一方、道路橋では、1980年に道路橋示方書耐震設計編が制定された。これらの基準改定以前に建設された構造物（“既存不適格構造物”と呼ばれる）の耐震補強の必要性が指摘されていたが、伸展しなかったのが実状であった。

既存構造物の耐震補強には、鉄筋コンクリートや鋼材が一般的に使用され、耐震壁や鉄骨ブレースの増設、柱の鉄板巻きによる補強などが行われている。これらの補強工法の問題点を解決する方法として考案したのが、CFRP による耐震補強工法である。この工法は、鉄筋と比較して引張強度が高く、軽量で耐久性があるなどの特徴を有する炭素繊維を活用したものである。

1995年の阪神・淡路大震災では、多くの構造物が被害を受けた。特に、倒壊など深刻な被害を受けたのは、既存不適格構造物であった。これらの構造物の地震に対する安全性向上対策の社会的要請が、今回の大震災を契機としてより高まった。そして、炭素繊維の既存構造物の補修・補強への適用が注目され、この分野での施工実績が飛躍的に増大している。

土木建築分野では、鉄とコンクリートが構造材料として使用されており、CFRP は特殊な新しい構造材料である。CFRP とこれを用いた構造物は JIS や JASS 化されていないため、建築基準法第38条の特殊な材料あるいは構法に該当し、基準法上は建設大臣の認定が必要となる。そのため、官界・学会・民間の各分野でいろいろな研究開発が実施された¹⁾。

CFRP による耐震補強工法の技術的な検討課題としては、炭素繊維と CFRP の規格や品質管理、構造性能の把握や設計法の確立、防・耐火性能や耐久性の確保、施工法とその管理法などである。これらの課題については、数多くの補強効果確認実験や各種の試験を行って検討されており、施工例も多数報告されている²⁾。また、CFRP による既存の建築の柱と煙突の耐震補強につい

ては、(財)日本建築防災協会から技術評価を取得しているものもある³⁾。

ここでは、CFRP による既存構造物の耐震補強工法の概要を紹介し、CFRP の材料諸特性の評価法とその品質管理について述べる。

2 CFRP 耐震補強工法の概要

既存構造物の耐震補強で一般的に用いられている炭素繊維は、直径が7～14 μm の連続繊維で高強度・高弾性のもので、ピッチ系と PAN 系の両方がある。炭素繊維の引張力と伸び（ひずみ）との関係を、アラミド繊維、ガラス繊維、および鉄筋と比較したものを図1に示す。CFRP の力学的な特徴は、強度が鉄筋と比較して非常に高く、弾性係数が他の繊維よりも高く鉄筋とほぼ同じであるが、鉄筋に見られるような降伏現象はなく伸びが小さいことである。一方、機能的な特徴は、鉄筋と比較して軽量で、錆びないので耐久性に優れており、炭素繊維の状態では柔軟性もあることである。なお、炭素繊維の弾性係数はアラミド繊維と比較して大きく、巻き付けた炭素繊維がコンクリートを拘束する効果がアラミド繊維よりも高い。そのため、既存構造物の耐震補強に使用される繊維は、ほとんど炭素繊維であったが、アラミド繊維も最近になってごく僅か使用され始めている。

炭素繊維は、エポキシ樹脂を含浸し硬化させた、CFRP の状態で強度を発揮する。施工時には、樹脂が未硬化の炭素繊維の場合と CFRP の場合の2種類がある。後者は最近開発されたもので例が少なく、柔軟性のある炭素繊維の状態で施工できる前者がほとんどである。前者の炭素繊維の製品形態は、図2に示すように、①

図1 各種材料の応力～ひずみ関係の比較

† 原稿受理 平成8年7月1日 Received July 1, 1996

* (株)大林組技術研究所 〒204 清瀬市下清戸, Tech. Res. Inst., OBAYASHI Corp., Shimokiyoto, Kiyose, 204

繊維を束ねて糸状にした“炭素繊維ストランド”と、②繊維を一方方向に敷き並べてシート状にした“炭素繊維シート”の2種類であるが、②を使用する場合が多い。

炭素繊維を用いた既存構造物の補強は、基本的には次の2種類となる。

① “せん断補強”；コンクリート表面の部材軸と直角方向に、炭素繊維ストランドまたは炭素繊維シートを巻き付け、せん断ひび割れが開くのを拘束し、せん断破壊を防止する補強である（図3参照）。

② “曲げ補強”；コンクリート表面の部材軸方向に炭素繊維シートを貼り付け、部材が折れる曲げ破壊を防止する補強である（図4参照）。

せん断補強した部材は、巻き付けたCFRPがコンクリートを拘束するため、コンクリートの圧縮強度向上や破壊ひずみ増大の効果を期待できる場合がある。この効果によって、曲げ破壊する部材の破壊までの変形を大きくし、粘り強さ（じん性）を発揮させることができる。じん性を発揮させる補強をじん性補強と呼んでいるが、この解説では、せん断補強にじん性補強を含めて述べている。

既存構造物の耐震補強は、せん断補強と曲げ補強の単

炭素繊維ストランド 炭素繊維シート

図2 使用炭素繊維の製品形態

図3 せん断補強のメカニズム

図4 曲げ補強のメカニズム

独またはそれらの組み合わせとなる。補強対象は、建築構造物や土木構造物など非常に多くのものがある。ここでは、代表的な建築の柱、煙突、および橋脚の耐震補強について、それらの概要を紹介する。

2・1 建築の柱の耐震補強

柱は、せん断補強筋（帯鉄筋）量が少ない場合に、ぜい性的なせん断破壊をすることがある（図5）。柱の耐震補強は、炭素繊維ストランドをエポキシ樹脂を含浸させながら、あるいは、炭素繊維シートをエポキシ樹脂を用いて貼り付ける要領で、柱の外表面に巻き付けて前記①のせん断補強を行う（図6）。この補強は、せん断破壊を防止し、柱の両端部を曲げ破壊させることによって、柱を大きく変形させ地震力に抵抗する方法である。

2・2 煙突の耐震補強

煙突は、主鉄筋（曲げ補強筋）量が少ない場合に、地盤から高さの2/3前後の位置で曲げ破壊することがある（図7）。煙突の耐震補強は、炭素繊維シートを煙突の外表面の高さ（主鉄筋）方向に、エポキシ樹脂を用いて貼り付ける前記②の曲げ補強を行うとともに、その外側の水平（横鉄筋）方向に、炭素繊維ストランドまたは炭素繊維シートを、柱と同じ要領で巻き付けるものである（図8）。この補強は、主鉄筋量（曲げ耐力）が不足している部分に対して曲げ補強を行って、地震力に抵抗する方法である。

2・3 橋脚の耐震補強

橋脚には主鉄筋の量を少なくした部分（“段落し部”という）が設けられているものがあり、このような橋脚

図5 建築の柱の破壊例

図6 既存建築の柱の耐震補強工法

図7 煙突の破壊例

図9 橋脚の損傷例

図8 既存煙突の耐震補強工法

図10 既存橋脚の耐震補強工法

は段落し部が破壊する場合がある(図9)。橋脚の耐震補強は、段落し部のコンクリート表面に、炭素繊維シートを貼り付けて前記⑥の曲げ補強を行う。さらに、段落し部と基部の部材軸と直角方向にも、炭素繊維シートまたは炭素繊維ストランドを巻き付けて、前記⑧のせん断補強を行う方法である(図10)。この補強は、段落し部の曲げ破壊および段落し部と基部のせん断破壊を防止することによって、基部を曲げ破壊させて柱を大きく変形させ地震力に抵抗する方法である。

2・4 耐震補強工法の特徴

CFRPによる既存構造物の耐震補強工法は、他の工法と比較して、次のような特徴がある。

- ① 補強による重量の増加が少ない。
- ② 執務空間を区切らず、外観を損なわない。
- ③ 補強作業が容易で、その信頼性も高い。
- ④ 作業員に特殊な技能や資格が不要である。
- ⑤ 補強による柱断面の増加がない。
- ⑥ 錆びない補強材のため、耐久性が向上する。
- ⑦ 短い期間で補強工事が可能である。
- ⑧ 重機が不要で狭い場所で施工が可能である。
- ⑨ 煙突の場合操業を停止しないで補強できる。

2・5 耐震補強工法の施工要領

CFRPによる耐震補強工法の施工は、前述した建築の柱(せん断補強)、煙突(曲げ補強)、および橋脚(曲げ補強とせん断補強)によって一部異なるが、基本的に

は次の手順となる。

- ① 既存仕上げや補強障害物の撤去や移設
- ② コンクリートの補修や下地処理、矩形断面の場合には、隅角部の丸みづけ(“面取り”)も行う。
- ③ コンクリート表面への樹脂(プライマー)塗布
- ④ 炭素繊維シートの貼り付け(曲げ補強)
- ⑤ 炭素繊維ストランドまたは炭素繊維シートの巻き付け(せん断補強)
- ⑥ CFRP表面の仕上げ
- ⑦ 撤去した補強障害物の復旧

これらの通常の施工内容は、次のようである。

(1) 下地処理工事

CFRPが所要の強度を発揮するように、コンクリート表面を調整する。CFRPは突起物に当たると非常に折れやすいため、凸部を削り取って平滑にする。また、表面の風化層を除去し、凹部はモルタルで埋めて平滑にする。なお、コンクリートの有害なひび割れや浮き、錆びた鉄筋は、それらを補修する。

(2) 隅角部の面取り工事

鋭角的な隅角部に巻き付けられたCFRPは、所要の引張強度を発揮する前に破断する。そのため、矩形断面の建築の柱や橋脚の場合には、隅角部に“面取り”を行う。建築の柱では半径3 cm以上、橋脚では半径5 cm以上としている。

(3) プライマー工事

コンクリートの表面を強化し、曲げ補強の炭素繊維シ

ートとコンクリートとの接着力を向上させるために、樹脂を塗布する。この際、コンクリート表面が十分乾燥していることを確認する必要がある。

(4) 炭素繊維シート貼り付け（曲げ補強）工事

必要枚数の炭素繊維シートを、エポキシ樹脂を主成分とする含浸・接着樹脂を用いて、手作業で順次貼り付けて積層する（図11）。含浸・接着樹脂は、炭素繊維シートの内部に浸透してCFRP化させる繊維結合剤の役目と、シートをコンクリート表面に接着させる接着剤の役目を兼ねるものである。

(5) 炭素繊維の巻き付け（せん断補強）工事

炭素繊維ストランドの巻き付けは、“自動巻き付け機械”によって施工する。建築の柱の施工状況を図12に示すが、高い煙突の場合には、ゴンドラと一体の巻き付け機械を使用している。自動巻き付け機械による施工は、品質管理が容易で省力化・工期短縮が可能となり、コストダウンを図れるなどのメリットがある。一方、炭素繊維シートを巻き付ける場合には、曲げ補強工事と同じ含浸・接着樹脂を用い、また、貼り付ける場合と同じ要領で、必要枚数の炭素繊維シートを巻き付ける。

(6) 仕上げ工事

CFRPに含まれているエポキシ樹脂が火災時に燃焼することや、保護・仕上げの観点から表面の仕上げを行う。特に建築の柱の場合には、“防火性能”または“耐火性能”を確保する被覆が必要となる。火災に対しての延焼を防止する防火被覆または、火災中にCFRPを守るための耐火被覆を設置する。

3 CFRPの材料諸特性と品質管理

3・1 CFRPの引張特性

CFRPの断面は、炭素繊維と樹脂で構成されているが、炭素繊維のみが引張強度を発揮し、樹脂はそれを助ける役目を果たす。そのため、CFRPの引張強度は、炭素繊維の量やそれ自体の引張強度、シート成形法の違いによって決まることになる。また、同じ引張強度の炭素繊維の場合には、断面内に含まれる繊維の量（“繊維率”）によって決まる。プレストレストコンクリートに用いるストランドや、鉄筋コンクリートに用いる鉄筋の代替などとして使用されるCFRPは、工場で生産されるため繊維率がほぼ一定となる。しかし、既存構造物の

図11 炭素繊維シートの貼り付け

耐震補強工法に用いるCFRPは、現場での施工時に製造することになるため、繊維率が一定とならない。そのため、補強工法の研究や設計におけるCFRPの材料特性は、その断面内に含まれる炭素繊維断面積のみで、評価するのが一般的となっている。この節では、CFRPの引張特性の評価法と品質管理の概要を述べる。

(1) CFRPストランド

炭素繊維ストランドは、連続繊維を束ねて糸状にしたものである。これを用いる補強では、必要量の炭素繊維を巻き付けて、所要の強度を確保することになる。束ねる繊維の本数が増える程、ストランド1本あたりの引張強度が高くなり、巻き付ける回数が少なくなるため施工時間を短縮でき有利となる。しかし、施工時に樹脂が炭素繊維ストランドに十分含浸し、全断面がCFRP化できることを確認する必要がある。

ここでは、通常用いている炭素繊維の素線を1万2千本束ねたCFRPストランド（断面積0.46 mm²）の引張特性について述べる。引張試験は、JIS R7601「炭素繊維試験方法（図13）」に基づいて行なっている。なお、試験片の断面積が大きい場合には、後述の多積層CFRPシートの試験法に準じて行うことになる。

CFRPストランドの引張強度（破断時の強度）の試験結果（試験片合計67本）は、平均値2.99 GPa、標準偏差0.15 GPaである。また、弾性係数の試験結果は、平均値224 GPa、標準偏差15 GPaであった。

CFRPストランドによる耐震補強の設計では、地震時の荷重に対して、柱や橋脚のせん断破壊を防止するために必要な、CFRPストランドの巻き付け量を算定する。この算定に用いるCFRPストランドの設計用引張強度は次式で求めている。

$$K_1 \times [\text{平均値} - K_2 \times \text{標準偏差}] \quad (1)$$

平均値はCFRP破断時の引張強度で、係数 K_1 はせん断耐力に対する利用率（有効係数）である。また、係数 K_2 は引張強度の信頼係数で、2（不良率2.5%）ま

図12 炭素繊維ストランドの巻き付け

図13 CFRPストランドの引張試験片

まは3（不良率≒0）としている。 K_1 は、主に実験結果に基づくことになるが、使用環境条件や施工性なども加味して決めている。 K_1 と K_2 両係数を関連づけて決める必要もあり、 $K_2=2$ で $K_1=2/3$ 、 $K_2=3$ で $K_1=3/4$ としている例もある。この場合の設計用引張強度は1.80 GPa程度となる。

(2) CFRPシート

炭素繊維シートは、連続繊維を一方方向に敷き並べてシート状にしたものである。エポキシ樹脂を含浸させたもの（以下、UD プリプレグ）と、含浸させていないもの（以下、UD クロス）やガラス繊維でクロス状に編んだもの（以下、UD シート）など、特殊な紡織技術でシート状にしたものでいろいろな製品がある。これらの炭素繊維シートは、単位 m^2 当たりの炭素繊維量（“目付量”という）で区別される。

炭素繊維シートを用いる補強では、必要枚数のシートを積層して所要の引張強度を確保することになる。目付量が多い程必要枚数が少なくなるため施工上有利となるが、目付量が多くなると、樹脂を含浸させるのが難しくなる。施工時に樹脂を容易に含浸できる範囲で目付量が多い程よいことになる。炭素繊維シートに樹脂を容易に含浸でき、十分CFRP化できる目付量を検討する必要がある。最近では、目付量が300グラムのものも、強度を確保することができるようになり、一部用いられ始めている。ここでは、目付量が175グラムまたは200グラムの炭素繊維シートについて述べる。

CFRPシートは、炭素繊維シートを必要枚数積層したものである。積層数としては、3～5層以内で使用される場合が多いが、10層となる場合もある。それらの厚さは、炭素繊維シート1層の目付量と、メーカーの公称値による炭素繊維断面積のみで求めている。

CFRPシートの引張試験は、JIS K7073「炭素繊維強化プラスチックの引張試験方法（図14）」に準拠して行なわれている。この方法で試験できる積層数は、目付量が200グラム程度の場合、5層前後までである。積層数が多い場合には、他の方法で試験する必要があるが、

図14 積層数が少ないCFRPシートの引張試験片

図15 積層数が多いCFRPシートの引張試験片

試験片の例を図15に示す。この試験片は、試験するCFRPシートの両端部を鋼管の中央に設置し、両者の空隙に膨張セメントを充填するものである。なお、この方法は、CFRPストランドの断面積が大きい場合にも採用されている。

前述した3種類の炭素繊維シート1層で製作した、CFRPシートの引張試験結果一覧を表Iに示す。引張強度（破断時の強度）の平均値は、3.17 GPa、2.90 GPa、および4.07 GPa、弾性係数の平均値は、241 GPa、242 GPa、および234 GPaである。引張強度は炭素繊維シートの違いで差があるが、弾性係数は3種類とも近似した値となっている。

炭素繊維シートを1層～10層積層した3種類のCFRPシートの引張試験を、引張強度と弾性係数を把握することを目的として行った。試験片は、積層数が1～6層は図14、10層は図15とした。試験結果について、積層数と引張強度との関係を、図16に示す。プロットした値は試験片5本の平均である。

この図から、積層数の違いによる引張強度の顕著な差はないことが分かる。この結果から、1～10層を積層したCFRPシートの単位断面積当たりの引張強度はほぼ同じで、1層の試験によって評価することができるといえる。なお、CFRPシートの弾性係数も、引張強度と同じような試験結果であった。

CFRPシートによる耐震補強の設計では、地震時の荷重に対して安全になるように使用量を算定する。すなわち、柱や橋脚のせん断破壊、または煙突や橋脚の曲げ破壊を、それぞれ防止するために必要な貼り付け量を算定する。これらの算定に用いるCFRPシートの設計用引張強度は、式(1)に基づき前述したCFRPストランドと同じように決めている。

3・2 CFRPシートの付着性状

CFRPによる耐震補強工法における曲げ補強は、コ

表I CFRPシートの引張試験結果の一覧

炭素繊維シートの種類	目付量 グラム	1層の厚さ mm	引張強度 GPa		弾性係数 GPa	
			平均値	標準偏差	平均値	標準偏差
UD プリプレグ	175	0.0972	3.17	0.24	241	11
UD クロス	200	0.115	2.90	0.15	242	6
UD シート	175	0.0972	4.07	0.23	234	15

（注）試験片の断面積＝炭素繊維シート1層の厚さ×試験片の幅（12.5 mm）

図16 積層数～引張強度関係

ンクリート表面に炭素繊維シートを貼り付けて行うものである。曲げ補強効果を発揮するためには、CFRPシートとコンクリートとが一体化し、それらの界面での付着力が十分あることが必要となる。この節では、“接着試験”および“付着試験”について述べる。

(1) 接着試験

CFRPシートとコンクリートとの一体性（接着性）を確認する試験で、JIS A6909「薄付け仕上げ塗料の付着強さ試験」に準拠して行っている。試験は、図17に示すように、40 mm×40 mmで厚さ10 mmの鋼製治具をCFRPシートの表面に貼り付け、その治具を引張ることによって行う。CFRPシートの断面内やコンクリートとの界面で破壊しないで、コンクリート内で破壊したものが良好な結果である。接着強度は、破壊時の引張力を接着面積で割って求める。

接着強度はコンクリートの圧縮強度によって決まることになり、圧縮強度が30 MPa程度の場合、接着強度は0.9 MPa～1.6 MPaとなる。この試験は、CFRPシートとコンクリートとの接着性に関する、施工時の品質管理に利用することができる。

(2) 付着試験

コンクリートに貼り付けたCFRPシートに引張力が作用した場合の、付着面での強度（付着強度）の把握を目的とする試験である。現在試験法に関するJIS規定がないため、考案したのが図18に示す試験片である。CFRPシートの付着長さと炭素繊維シートの種類を試験パラメーターとして行った試験の結果について、付着長さと最大引張力との関係を図19に、付着長さと最大付着応力度との関係を図20に、それぞれ示す。最大付着応力度は、最大引張力を付着面積で割った値である。なお、試験時のコンクリート圧縮強度は38.6 MPaである。

図17 CFRPシートの接着試験方法

図18 CFRPシートの付着試験体

る。

最大引張力（付着面のせん断力）は、炭素繊維シートの違いで多少の差異があるが、ほぼ一定の値となっている。また、最大付着応力度（付着強度）は、付着長さが長くなるに従って低下しており、付着長さが30 cmの場合には、0.5 MPa～0.6 MPaとなっている。

以上に述べた付着試験や接着試験、次節で述べる耐久性試験の結果、およびCFRPシートで曲げ補強した部材の実験結果に基づいて、設計で使用する付着強度を決めている。なお、接着試験は、施工時の品質管理や補強後の構造上の安全性確認の資料としている。

3.3 CFRPシートとその接着面の耐久性

CFRPによって耐震補強した構造物は、長期間使用することになるため、CFRPおよびCFRPとコンクリートとの接着面の耐久性が問題となる。これらの耐久性は、促進暴露試験と屋外暴露試験で検討されている。この節では、促進暴露試験について述べる。

促進暴露試験は、JIS A1415「プラスチック建築材料の促進暴露試験方法」に基づく、サンシャインカーボンタイプのウエザーメーターを用いている。CFRPシートの耐久性は、図14に示した試験片のCFRP部分のみを暴露した。また、CFRPシートとコンクリート面との接着面の耐久性は、炭素繊維シートを貼り付けたモルタル板を暴露した。

CFRPシートの暴露時間と引張強度との関係を図21に、接着面の暴露時間と接着強度との関係を図22に、それぞれ示す。プロットした値は、試験片5本の平均である。これらの図から、CFRPシートおよびCFRPシートとコンクリート面との接着面の強度は、炭素繊維シートの違いで経過がやや相違しているが、2千時間の促

図19 付着長さ～最大引張力関係

図20 付着長さ～最大付着応力度関係

図21 促進暴露時間～引張強度関係

図22 促進暴露時間～接着強度関係

進暴露による顕著な強度の低下はないといえる。促進暴露の時間と実構造物での年数との相関関係が十分解明されていないため、屋外暴露または実構造物での試験結果が重要となる。最初に施工した煙突の耐震補強例では、9年経過した現在強度は低下していないが、耐久性については実構造物での検証を継続する必要がある。

4 あとがき

CFRPによる既存構造物の耐震補強について述べたが、この技術は橋梁の桁や床板、建築の梁や床、工作物などの補強にも幅広く適用できる。既存不適格構造物の耐震補強は社会的要請であり、ここで述べた耐震補強工法が貢献できるように、さらなる研究開発と改善が促進

されることが期待される。

参考文献

- 1) 建設省建築研究所，国土開発技術研究センター監修，“建設省総合技術開発プロジェクト，建設事業への新素材・新材料利用技術の開発—非金属系分科会報告書”（1993）国土開発技術研究センター。
- 2) 連続繊維補強コンクリート編集委員会編，“連続繊維補強コンクリート [諸性質と設計法]”（1995）技報堂出版。
- 3) (株)大林組，“CRS工法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—”（1995）CRS研究会。