

炭素繊維による既存煙突の耐震補強工法の開発（その1）

——円筒試験体による曲げ補強効果の検討と施工試験——

木村 耕三 小島 克朗
吉崎 正明 野村 潤
(本社 建築本部特殊工法部) (本社 建築本部特殊工法部)

Development of Strengthening Method Using Carbon Fiber for Earthquake Resistance of Existing Reinforced Concrete Chimney (Part 1)

——Bending Tests of Cylindrical Concrete Members and Execution Test——

Kozo Kimura Yoshiro Kobatake
Masaaki Yoshizaki Jun Nomura

Abstract

Some chimneys designed according to old standards have problems about earthquake resistance. A new method using carbon fiber for earthquake-resistant structures has been developed. The structural efficiency and execution techniques have been confirmed through experiments. As a result of the study it was recognized that the bending strength of a reinforced concrete member is increased by carbon fibers. The results of the experimental study are described in this report.

概要

旧設計体系で設計された鉄筋コンクリート造煙突の中には、現行の設計体系に照らして、耐震性に疑問のあるものがある。これらの煙突の耐震補強工法として、コンクリート表面に炭素繊維を貼付して、曲げせん断補強する工法を考案した。この工法によって、耐震補強した煙突の構造性能を、実構造物を模擬した試験体で実験的に検討するとともに、実構造物での施工試験を行なった。実験の結果、炭素繊維の貼付によって、鉄筋コンクリート部材の曲げせん断耐力の増大が期待でき、また、その施工が容易であることが分かった。

本報告では、炭素繊維による耐震補強効果の検討と施工試験について述べている。

1. 序

鉄筋コンクリート構造物は、設計基準の改定によって、高い耐震性が要求されるようになってきた。煙突では、大気汚染防止法の適用を受けるようになって以来、都市において低い煙突から、高い煙突、超高煙突へと進んできた。しかし、旧設計体系による鉄筋コンクリート造煙突のなかには、過去の地震で、かなりの被害を受けているものがある。

地震によって折損倒壊した鉄筋コンクリート造煙突の折損箇所は、地上より、その高さの1/3～2/3となっているものが大半である。これは、地震に対し、折損箇所での曲げ耐力が不足していることを示している。従って、旧設計体系で設計された既存煙突についても、耐震診断を実施し、耐震性に疑問のある場合には、補強を施し、耐震性を確保することが必要である。

このような煙突の中間部分を補強する材料としては、

経済性、施工性の面から、高強度かつ、軽量の材料が望まれる。

(株)大林組では、このような材料として、炭素繊維を補強材とした構造物の研究を行なってきた^{1)~5)}。

本報告は、既存鉄筋コンクリート造煙突の耐震補強工法の開発を目的とし、実構造物を模擬した試験体表面に貼付した炭素繊維による曲げ補強効果の確認実験と、実構造物での施工試験について述べたものである。

2. 既存鉄筋コンクリート造煙突の補強方法

2.1. 現状の補強方法と問題点

現在、主として行なわれている煙突の補強方法とその問題点は次のようなものである。

① 煙突の上部を切断し、ステンレスなどで復元する方法

〈問題点〉 操業を停止させる必要がある。

② 煙突の周囲に鋼板を巻き、補強する方法

〈問題点〉自重が増大するため、補強範囲が広がる。

2.2. 炭素繊維を用いた補強方法

2.2.1. 本工法の特徴と利点 本工法は、図-1に示すように、炭素繊維をコンクリート表面に貼付して曲げ補強を行なうもので、現状の補強方法に比べて、次のようなメリットがある。

- ① 煙突の外周のみ補強するため、作業を停止させる必要がない。
- ② 炭素繊維を用いるため、補強による自重の増大はほとんどなく補強範囲が最小限ですむ。
- ③ 既存コンクリート面を炭素繊維で覆うため、耐久性の向上が期待できる。
- ④ 過酷な環境条件（海岸地帯）にも適用できる。

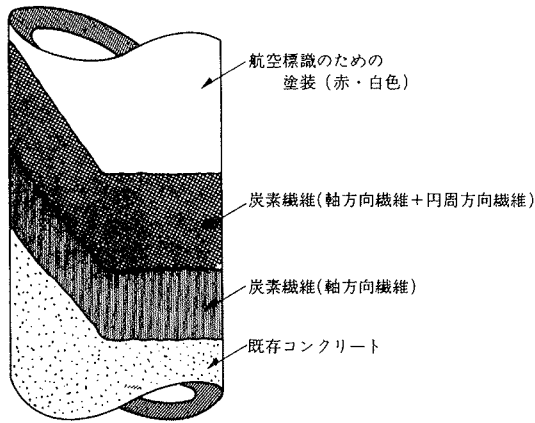


図-1 補強方法 詳細図

2.2.2. 施工方法 施工方法は、既存コンクリートの劣化状況などによって異なるが、一般には以下の施工手順による

- ① タラップ、避雷針などの撤去
- ② コンクリート表面の下地処理、下地調整
- ③ 軸方向炭素繊維の貼付
- ④ 円周方向炭素繊維の巻き付け
- ⑤ タラップ、避雷針などの復旧
- ⑥ 昼間障害標識（航空標識）のための塗装

2.2.3. 補強方針 耐震補強を必要とする構造物では、曲げ耐力あるいは、せん断耐力が不足しているものと、曲げ、せん断耐力ともに不足しているものがある。

外径に比べて、高さが高い煙突では、主として曲げ耐力の不足が問題となる。しかし、外径に比べて高さの低い煙突あるいは、塔状構造物では、せん断耐力が不足する場合も生じる。

本工法では、耐震診断結果に基づいて、曲げ耐力に対しては、軸方向の炭素繊維で、せん断耐力に対しては、外周に巻き付けた炭素繊維で、それぞれ補強することを基本としている。

3. 炭素繊維による曲げ補強効果の確認実験概要

3.1. 試験体

試験体の一覧を表-1に、試験体の形状・寸法を図-2に示す。

試験体は、鉄筋コンクリート造煙突を模擬した中空円筒6体で、その寸法は外径 306 mm、厚さ 28 mm、長さ 1800 mm である。加力点と支点部分には、実験時に局部破壊が生じないように、炭素繊維の貼付後、外周を補強している。

試験体のパラメータは、コンクリート表面の軸方向に貼付する炭素繊維の有無とその量（以下、軸方向繊維補強量と呼び、軸方向繊維比で表す）と、その製品形態(UD プリプレグ、クロス) および、外周に巻き付けた炭素繊維の量（以下、巻き付け繊維補強量と呼び、巻き付け繊維比で表す）である。使用した炭素繊維は、いずれもピッチ系、高性能グレード(HP)のものである。なお、UD プリプレグとは、炭素繊維を長さ方向に配し、シート状に加工したもので、クロスとは、炭素繊維を縦横方向に配し、布状に織ったものである。

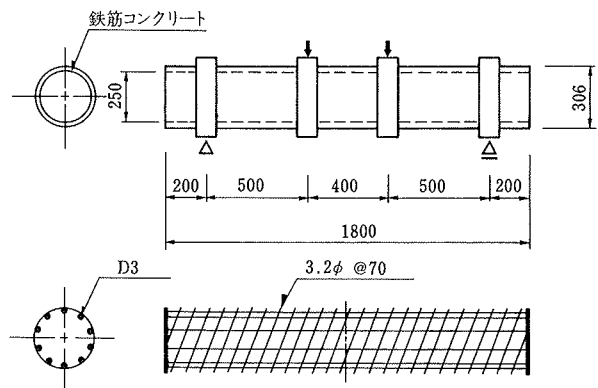


図-2 試験体の形状寸法と配筋

試験体 NO.	1	2	3	4	5	6
軸方向繊維比	0%	0.40%				0.81%
巻き付け繊維比	0%	0.33%		0.17%		
炭素繊維の製品形態	炭素繊維なし	UD プリプレグ		クロス	UD プリプレグ	
主鉄筋比	0.3%(10-D3)					

表-1 試験体一覧表

	降伏強度	引張強度	引張弾性係数
鉄筋(D3)	2890(kg/cm ²)	4460(kg/cm ²)	2180(t/cm ²)
炭素繊維		30300(kg/cm ²)	2450(t/cm ²)
	圧縮強度	圧縮弾性係数	
コンクリート	170(kg/cm ²)	169(t/cm ²)	

表-2 使用材料の機械的性質

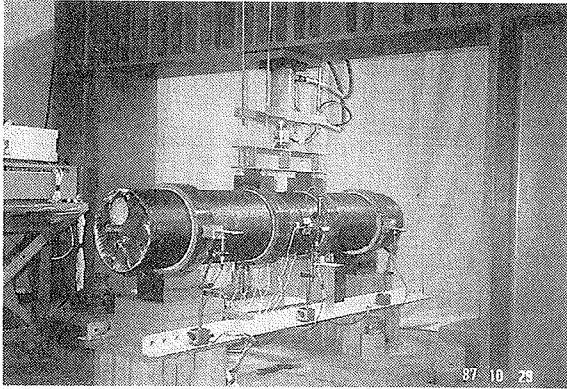


写真-1 荷重状況

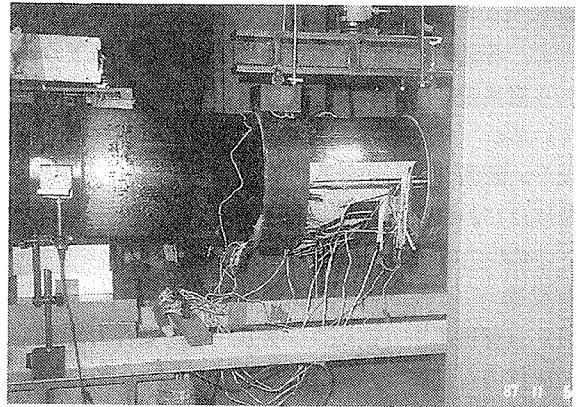


写真-2 破壊状況 (No. 2 試験体)

試験体の鉄筋コンクリート円筒には、曲げ補強筋として、縦筋 (D3) を、円周方向に10本、等間隔に配し、その外側を 3.2 φ のスパイラル筋 (@70) によって結束した鉄筋かごを配している。

円筒は、鋼製外型枠のなかに鉄筋かごを挿入後、コンクリートを投入、遠心成形によって製作した。コンクリート養生後、炭素繊維の貼付は、次の要領で行なった。

- ① コンクリート表面に下地 (プライマー) を塗布
- ② エポキシ樹脂を表面に塗布、シート状の炭素繊維を円筒試験体表面全面、軸方向に貼付
- ③ 炭素繊維の表面にエポキシ樹脂を含浸
- ④ 表面のエポキシ樹脂が硬化後、炭素繊維 (12000フィラメントを収束した糸) を表面に巻き付ける

使用した鉄筋、炭素繊維およびコンクリートの材料特性を表-2に示す。

3.2. 加力方法と測定方法

実験は、写真-1に示すように単純ばり形式で、2点集中荷重によって行ない、加力は、試験体の破壊による荷重の低下が見られるまでの一方向単調荷重とした。

各荷重ごとに、部材中央での鉛直方向変位と、純曲げ区間での鉄筋と炭素繊維のひずみを測定した。

3.3. 実験結果と考察

3.3.1. 破壊状況 破壊状況を写真-2 (No. 2 試験体)、写真-3 (No. 6 試験体) に示す。

補強をしていない No. 1 試験体は、曲げひびわれが発生すると急激に変位のみが増大し、コンクリートの圧壊によって耐力が大きく低下した。一方、補強した試験体は、いずれも、曲げひびわれ発生後も荷重と変位が増大した後、炭素繊維の破断と同時に鉄筋も破断し、荷重が急激に低下した。終局時には、巻き付け繊維補強を施していない No. 2 試験体では、円周方向の下半分で、コンクリートと軸方向繊維補強との剝離が見られた。しかし、他の試験体では、巻き付け繊維補強によって剝離は生じなかった。

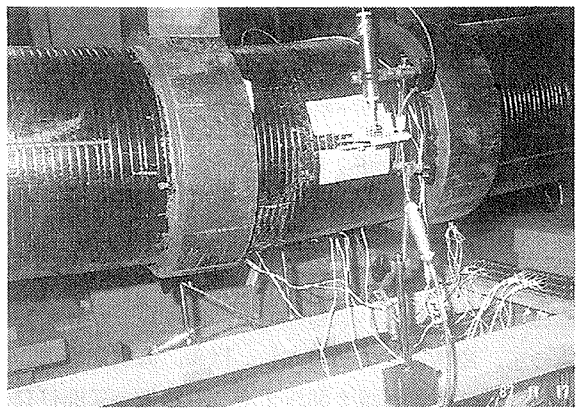


写真-3 破壊状況 (No. 6 試験体)

軸方向補強繊維が剝離した No. 2 試験体の純曲げ区間の引張側コンクリート表面をみると、数多くの曲げひびわれが分散して生じていた。また、圧縮側ではコンクリートの圧壊による炭素繊維の膨らみが見られた。

3.3.2. 諸荷重 実験時の曲げひびわれ荷重、降伏荷重、最大荷重を表-3に示す。

曲げひびわれ荷重は、目視で確認出来ないため、炭素繊維および鉄筋の荷重～ひずみ曲線から、曲げひびわれ荷重を推定した。実験値は、コンクリートの曲げ強度を $1.8 \times \sqrt{F_c}$ として求めた計算値の1.24~1.75倍となっており、炭素繊維を貼付したものは、貼付しないものに比べて、多少曲げひびわれ荷重が増大している。

炭素繊維を貼付した試験体の最大荷重は、炭素繊維を貼付していない No. 1 試験体にくらべて大きく、その値は、No. 3, No. 4, No. 2, No. 5, No. 6の順に大きくなっている。この結果、同量の軸方向繊維量で補強する場合、UD プリプレグよりもクロスの方が、軸方向繊維量の多い方が、それぞれ曲げ耐力が高くなる。最大荷重の値は、解析値の0.85~0.93倍となっている。

解析は、使用材料の特性を図-3に示すようにモデル化した曲げ解析である。なお、軸方向の繊維は、等価な断

面を有する薄板に置換した。

次に、各試験体の最大荷重時における炭素繊維の負担力から炭素繊維が、素材強度に対してどの程度有効に働いているか（有効率）を、次式によって求めた。

なお、鉄筋コンクリートの負担力①は、No. 1 試験体の曲げひびわれ後の荷重状態から 2.17 t、鉄筋コンクリートの負担力②は、計算から 1.81 t とした。

有効率 = { (実験値) - (鉄筋コンクリートの負担力①) } / { (解析値) - (鉄筋コンクリートの負担力②) }
 各試験体の有効率は、No. 2=0.85, No. 3=0.80, No. 4=0.84, No. 5=0.88, No. 6=0.82, 平均0.84であった。

以上の結果から、炭素繊維を貼付した試験体の曲げ耐力は、次式によって求めることができる。

$$P = P_c + \alpha \cdot P_f$$

P_c ; 鉄筋コンクリートの負担力
 P_f ; 炭素繊維の素材強度を用いた曲げ耐力
 α ; 有効率

3.3.3. 荷重～変位関係 図-4～図-6に、パラメータごとに各試験体の荷重～変位関係を示した。

図-4は、軸方向繊維補強量による性状の比較である。炭素繊維を貼付しない試験体では、曲げひびわれの発生によって、急激に変位が増大し、以後、荷重が増大しないのに対し、炭素繊維を貼付することによって曲げひびわれ後も荷重が増大し、最大荷重および最大荷重時の変位が増大する。しかし、初期剛性に対する顕著な差は見られない。従って、炭素繊維を貼付することによって、耐力および終局変位の増大が期待できる。

図-5は、巻き付け繊維補強量の違いによる性状の比較である。いずれの試験体も、曲げ破壊をしているために、巻き付け繊維補強量による耐力および最大荷重時の変位への影響は見られない。

図-6は、炭素繊維の製品形態の違いによる性状の比較である。クロスを用いた試験体は、縦糸が曲折しているため鉄筋降伏後、引張りによる伸びが大きくなり、UD プリプレグに比べて、同一荷重に対する変位が大きく、最大荷重時の変位は、UD プリプレグを用いた試験体の

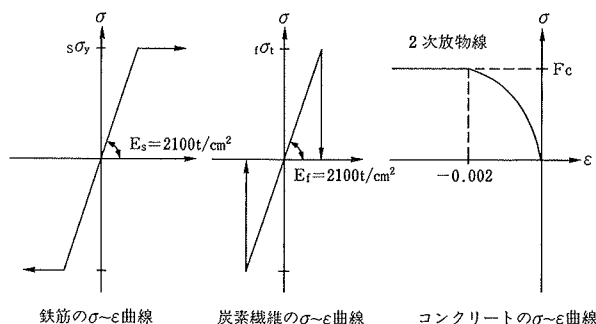


図-3 使用材料のモデル

1.28倍となっている。

3.3.4. 荷重～ひずみ関係 図-7～9に No. 2 試験体の、図-10～11に No. 3 試験体の補強筋の荷重～ひずみ関係を示す。試験体の圧縮側表面に貼付した炭素繊維のひずみ履歴（図-7）から、最大荷重の約 88% に相当する荷重まで炭素繊維はコンクリートと一体となって圧縮力を負担している。その後、コンクリートのひびわれ（圧壊）によって、その表面に貼付した炭素繊維には力が伝わらなくなると考えられる。

図-8～11の引張側の炭素繊維および、鉄筋の荷重～ひずみ履歴をみると、鉄筋の降伏まで、炭素繊維と鉄筋のひずみはほぼ一致している。しかし、引張側の最外縁（図-9, 11）では、鉄筋の降伏後、両者のひずみに差

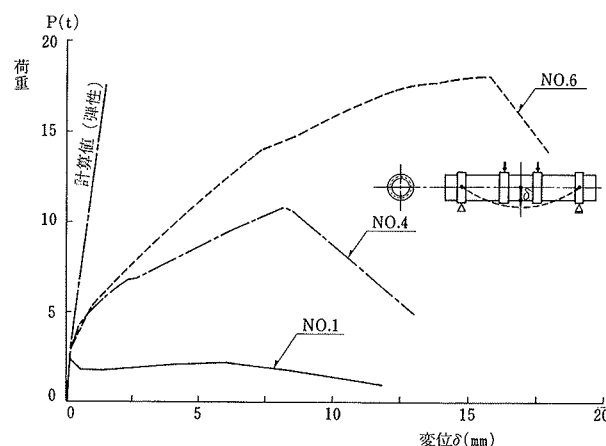


図-4 荷重～変位関係（軸方向繊維補強量による比較）

試験体 NO.	曲げひびわれ発生時				鉄筋降伏時		最大荷重時			
	荷重(t)	変形(mm)	計算値	実/計	荷重(t)	変形(mm)	荷重(t)	変形(mm)	計算値	実/計
NO. 1	2.30	0.22	1.85	1.24	1.79	0.61	2.17	6.06	1.81	1.20
NO. 2	2.40	0.21	1.89	1.27	4.19	0.92	10.83	8.17	12.04	0.90
NO. 3	2.51	0.27		1.33	3.31	0.51	10.35	7.59		0.86
NO. 4	3.30	0.28		1.75	4.01	0.51	10.82	8.21		0.90
NO. 5	2.56	0.22		1.35	3.80	0.69	11.15	10.51		0.93
NO. 6	2.90	0.26		1.93	1.50	6.09	1.52	18.00		15.72

表-3 諸荷重一覧表

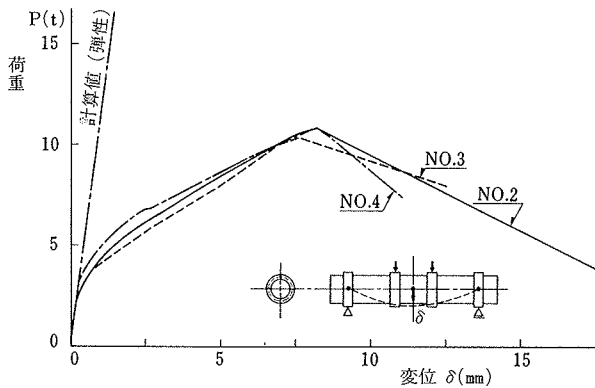


図-5 荷重～変位関係 (巻き付け補強量による比較)

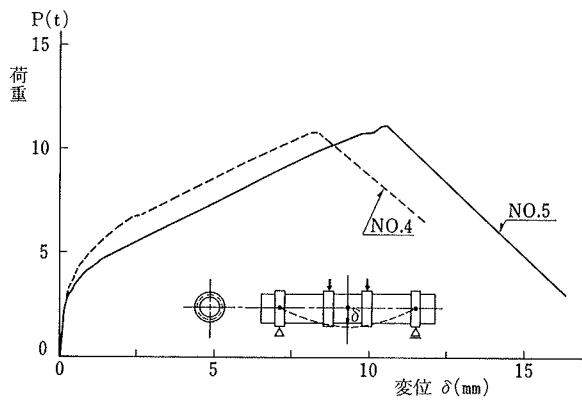


図-6 荷重～変位関係 (炭素繊維の製品形態による比較)

が見られる。これは、コンクリート面でのひびわれ等の影響によるものと思われる。

4. 炭素繊維による煙突補強の施工試験概要

4.1. 試験概要

施工試験は、図-12に示す、当社技術研究所内にある高さ 15 m、頂部外径 930 mm、底部 1385 mm の煙突で実施した。補強範囲は、地上 9.0 m から 13.5 m の 4.5 m (補強面積は、約 12 m²) である。

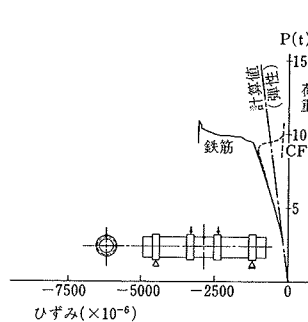


図-7 荷重～ひずみ関係 (No. 2 試験体)

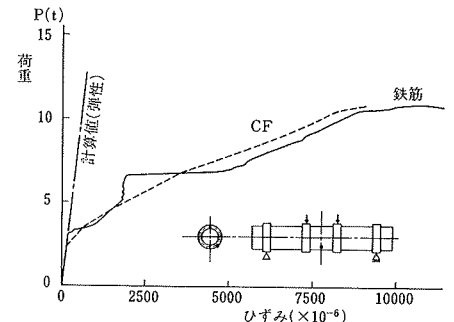


図-8 荷重～ひずみ関係 (No. 2 試験体)

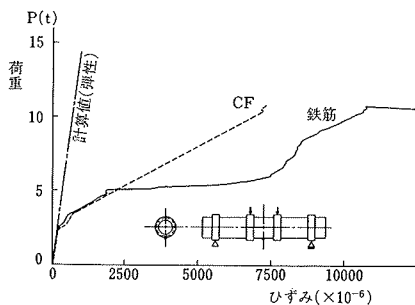


図-9 荷重～ひずみ関係 (No. 2 試験体)

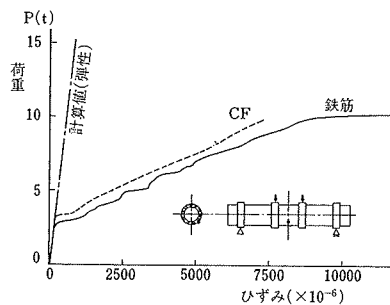


図-10 荷重～ひずみ関係 (No. 3 試験体)

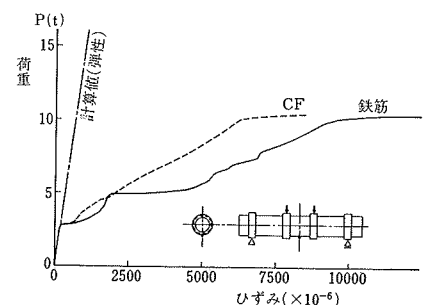


図-11 荷重～ひずみ関係 (No. 3 試験体)

作業は、主として、高所作業車によって行ない、円周方向繊維の巻き付けは、当社で開発した巻き付け機を使用した。

巻き付け機は、内輪、外輪、ブームの三つの運動部分からできている。内輪は、ジャッキを用いて機械全体を煙突に固定する役目をし、外輪は、煙突の回りを回転しこの回転にあわせてブームが上下、外輪に乗せた炭素繊維をブームの先から、送り出すことによって、一定のピッチで巻き付けていく。(この機械では、4本の炭素繊維を同時に巻き付けることができ、施工時間の短縮が図れる。)

なお、巻き付け機の概要は、次のとおりである。回転数 4.58 rpm、ブーム昇降ピッチ 10 mm/rpm、外径 2.91 m、内径 1.75 m、重量 1 ton。

既存コンクリートと炭素繊維の接着性をよくするために、あらかじめコンクリート表面をサンダー掛けするとともに、面の凹凸を補修し、コンクリート面にプライマーを塗布した。

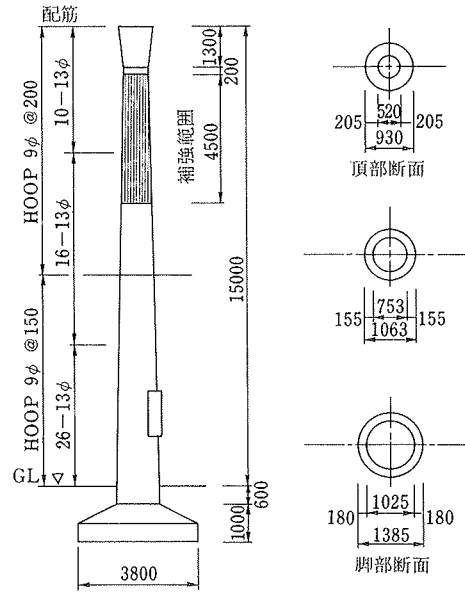
軸方向には、ピッチ系炭素繊維(UD プリプレグ 175 g/m²)を2層重ねて、貼付し、円周方向には、エポキシ樹脂を含浸させた炭素繊維(12000フィラメント)を5 mmピッチで巻き付けた。

今回使用した炭素繊維量は、約 5.5 kg である。

4.2. 施工順序

施工は、次の順序で行ない、施工状況を写真一4～9に示す。

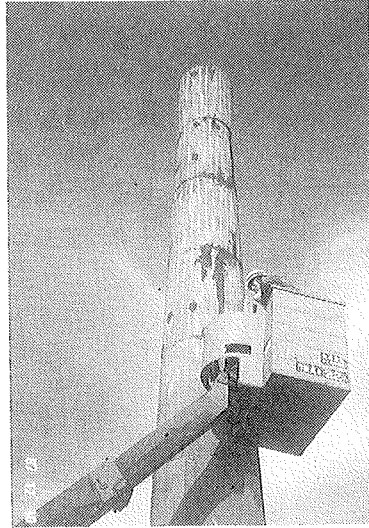
- ① タラップ、避雷針の撤去
- ② 下地処理 (サンダー掛け)
下地調整 (コンパーマ工法による補修)
- ③ プライマーの塗布
- ④ 接着剤 (レジン) の塗布
- ⑤ 軸方向炭素繊維の貼付 (1層目) (写真一6)
- ⑥ 接着剤の塗布
- ⑦ 軸方向炭素繊維の貼付 (2層目)
- ⑧ 接着剤の塗布
- ⑨ 円周方向炭素繊維巻き付け機の据付
- ⑩ 円周方向炭素繊維の巻き付け (写真一7)
- ⑪ 避雷針の復旧
- ⑫ 航空標識のための塗装 (写真一9)



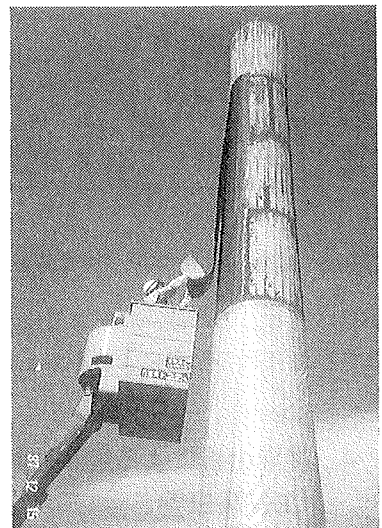
図一12 施工試験煙突概要



写真一4 下地処理 (サンダー掛け)



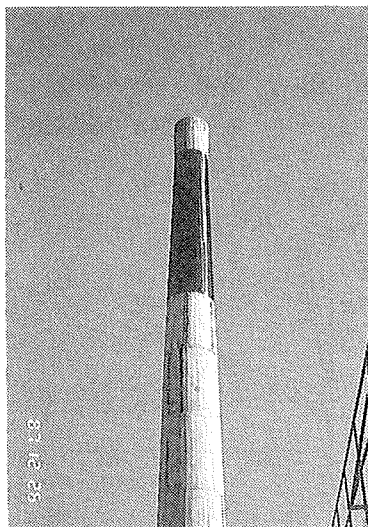
写真一5 下地調整



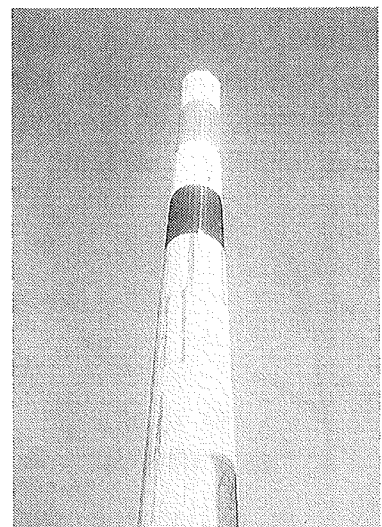
写真一6 UD プリプレグの貼付



写真一7 円周方向繊維巻き付け



写真一8 補強完了



写真一9 航空標識のための塗装後

コンパーマ工法は、大林組が開発したコンクリートの中性化、アルカリ骨材反応、コンクリート中の鉄筋の発錆などで劣化したコンクリート構造物を補修・保護し、耐久性を高めるための補修・保護工法である。

4.3. 補強工事の実施工程

施工試験での実働日数は、準備工事（前節の施工順序①、②）が3日、補強工事の内、UD プリプレグの貼付工事（同、③～⑧）が、4日、円周方向炭素繊維の巻き付け工事（同、⑨、⑩）が3日、仕上げ工事（同、⑪、⑫）が3日、計13日であった。

5. まとめ

鉄筋コンクリートの表面に炭素繊維を貼り付けて、曲げ補強した円筒試験体の曲げ実験と施工試験を行なった結果、炭素繊維が既存煙突の耐震補強材料として利用でき、かつ、容易に施工できることが明らかになった。

また、曲げ部材実験の結果から以下のことが分かった。

(1) 曲げ最大荷重は、炭素繊維の貼り付けによって増大し、その値は、貼付量が多くなるほど高くなる。

(2) クロス、UD プリプレグを貼付した試験体を比較すると、同一荷重に対する変位は、前者の方が大きい。

(3) 圧縮面に貼付した炭素繊維は、コンクリートが圧壊するまで、コンクリートと一体となって圧縮力を負担している。また、引張力を負担する炭素繊維と鉄筋のひずみは、鉄筋の降伏までは近似し、降伏後、ひびわれな

どによりその挙動は異なるものの、両者は、協同し、引張力を負担している。

謝 辞

本研究では、三菱化成工業㈱のピッチ系炭素繊維を使用した。本研究を進めるにあたり、終始、御協力、御助言をいただきました、三菱化成工業㈱炭素事業部 星島時太郎氏、ほか、同部の方々、および三菱化成工業㈱総合研究所 谷木謙介氏、田中常雄氏、ほか、同所の方々に対し、感謝いたします。

参考文献

- 1) 木村，小島，武田：炭素繊維を補強筋とした曲げ部材実験，第30回材料連合講演会（昭和61），pp. 71～72
- 2) 木村，小島，武田：新素材の構造物への適用に関する研究（その1）日本建築学会大会学術講演梗概集，（昭和61），pp. 79～80
- 3) 木村，小島，武田：同標題（その2），日本建築学会大会学術講演梗概集，（昭和62），pp. 515～516
- 4) 勝俣，小島，武田：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（その1），日本建築学会大会学術講演梗概集，（昭和61），pp. 553～554
- 5) 勝俣，小島，武田：同標題（その2），日本建築学会大会学術講演梗概集，（昭和61），pp. 129～130
- 6) コンパーマ工法，㈱大林組パンフレット・技術資料