

## (58) CFRP管内に充填した定着用膨張材による 連続繊維定着に関する研究

九州工業大学 工学部                      ○山崎 竹博  
同 上                      正会員 出光 隆  
同 上    前口 剛洋  
同 上                      正会員 渡辺 明

### 1. まえがき

コンクリート構造物の早期劣化にはコンクリートそのものの劣化に起因する場合と、補強材に用いる鉄筋の腐食膨張によるひびわれ発生に起因するものがある。その耐久性向上には劣化要因の除去、使用材料の品質向上、劣化促進物質の遮蔽性改善などの対策が可能であるが、塩害に関しては鉄筋の代わりに錆の発生しない連続繊維の採用も有効な対策と考えられる。

本研究では、塩害対策として鋼材を全く使用しないポストテンション方式プレストレストコンクリート部材の製作を試み、まず、緊張材の定着体をノンメタル化することを検討した。使用するCFRP緊張材は延性に乏しいため、応力集中が生じないことや繊維間のマトリクスに過大なせん断力が作用しないような定着方法が望ましい。その方法の一つとして緊張材を水圧的に拘束し、その付着力と摩擦力とによって緊張材を定着する定着用膨張材の使用が考えられる。定着用膨張材は石灰系の膨張機構を持ち、膨張ひずみが拘束された状態ではそれ自身が強度を持つ材料で、拘束の程度にもよるが長期的に700~1000 kgf/cm<sup>2</sup>以上の圧力を保持できる。ここでは、軸方向および円周方向にカーボン繊維を配したCFRPパイプに定着用膨張材を注入して緊張材を定着するための問題点に関する基礎的実験結果について報告する。

### 2. 実験方法

#### 2.1 概要

連続繊維をコンクリート用の補強材として用いる場合、繊維の保護、緊張力の分散や定着性状の改善などの理由から樹脂で集束硬化させCFRPとして使用することが多い。このような材料では直径が大きくなるほど曲げに対する剛性が高くなり、緊張材の曲げ上げや定着が困難となる。本研究では、直径13mm程度のストランド6本をそれぞれ独立に定着できるポストテンション方式ノンメタル定着体の製作を目標に、定着材の膨張圧力と引抜き耐力の関係調べた。定着体には図-1、図-2に示すようにドーナツ型と多孔管型の使用が考えられるが、CFRP管は弾性係数が低いためにドーナツ型定着体のように直接膨張圧が外管に作用するような構造では外管が膨らみ、周囲のコンクリートにひびわれを生じる可能性がある。そこで、定着用膨張圧を単管で受け持てる多孔管型の使用を検討した。

多孔管型定着体を用いたプレストレス導入には、①コンクリートに埋め込まれた多孔管定着体にストランドを通した後、②仮緊張定着体にストランドを定着する。③仮緊張定着体を引っ張ってストランドに所定の緊張力を与えた状態で、④多孔管に膨張材を注入する。⑤所定の膨張圧力が発生した時点で仮定着

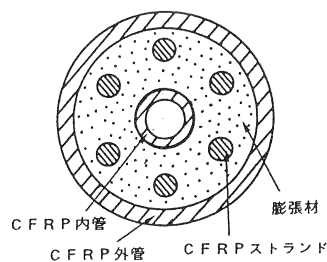


図-1 ドーナツ型定着体

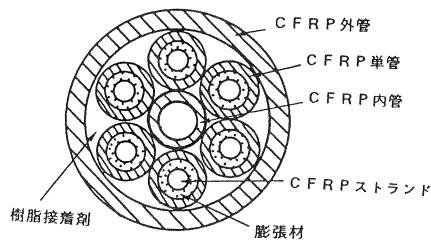


図-2 多孔管型定着体

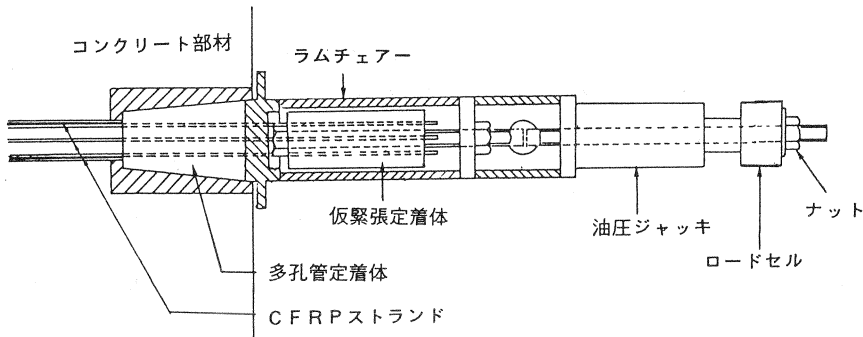


図-3 CFRP多孔管型定着体によるプレストレス導入システム

体を解放し、プレストレスを導入する。そのシステムを図-3に示す。仮緊張定着体は繰り返し使用可能なドーナツ型金属外管と内管を用いることが可能である。

### 2.2 供試体および試験要領

a) 使用材料 連続繊維には、直径12.5mm, 7本よりCRRPストランド, 保証荷重14.5tf(東京製鋼製)を使用した。

CFRP管はA管(外径28.7mm, 内径20.1mm, 断面積3.30cm<sup>2</sup>)と、B管(外径30.4mm, 内径20.1mm, 断面積4.09cm<sup>2</sup>)の2種類を用い、軸方向および90°の2方向を繊維補強している。繊維容積率は軸方向:90°≒1:2である。繊維およびマトリクスの弾性係数はそれぞれ $2.35 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$ ,  $3 \times 10^4 \text{ kgf/cm}^2$ である。

b) 膨張圧の推定 軸方向とその直角方向とにワイヤーストレインゲージを貼付した金属製内管を、引抜き供試体とは別の単管内に図-4のように埋込み、その実測ひずみ値から管内の圧力を算定した。また、定着用膨脹材注入後のCFRP単管内の圧力発現状況およびCFRP管のひずみとの関係を調べるため、CFRP外管にも軸方向とその直角方向とにそれぞれストレイゲージをはり、ひずみを測定した。

c) 引抜き試験 定着用膨脹材と単管との付着力および摩擦係数を求めるため、膨脹材注入後3段階程度の適当な圧力が発生した時点で引抜き試験を実施した。

CFRP単管の引抜き強度は管内面と膨脹材との摩擦力に大きく依存するため、その内面に粒径0.3~0.6mmの砂をエポキシ樹脂で接着し強度増加を狙った単管も製作した。引抜き供試体の他端は700kgf/cm<sup>2</sup>以上の膨脹圧が確認された金属管の定着体を用い、図-5のように万能試験器で荷重した。

CFRP単管はチャックなどで万能試験器に直接固定できないため、図-6に示すように、外周にねじを切った金属管内に挿入してエポキシ樹脂で接着し、これを試験機にナット定着した。このとき、単管を金属管に接着した後に膨脹材を注入した場合、単管に膨脹材を注入し膨脹圧が発生した後にこれを金

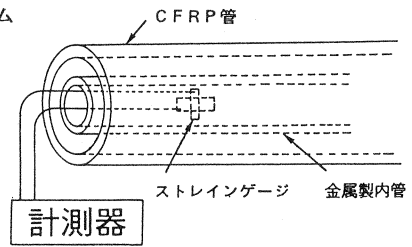


図-4 内管法による膨張圧の測定

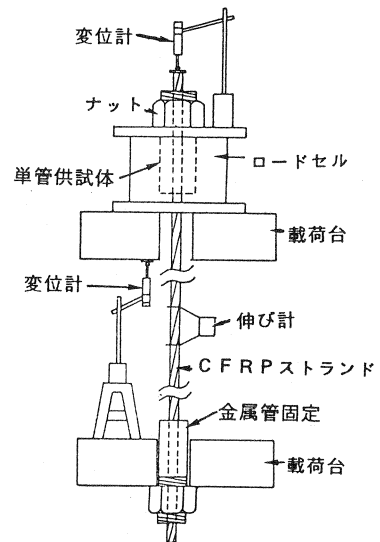


図-5 万能試験器による引抜き試験

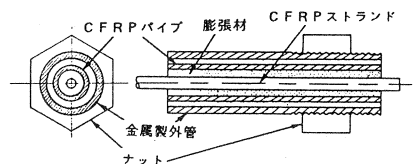


図-6 定着用金属管

属管へ接着した場合とでは管の剛性が異なるため膨張圧が異なる。ここでは両方の場合について圧力測定用供試体を製作し、金属製の内管により圧力を測定した。

一連の実験で、使用した供試体の種類を表-1に示す。

表-1 供試体の種類

試験項目	管材	供 試 体	
圧力測定	A管	金属外管有り	金属外管無し
	B管	金属外管有り	金属外管無し
引抜き試験	A管	内面砂付き	内面無処理
	B管	内面砂付き	内面無処理

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 CFRP管の膨張圧および弾性係数

膨張材注入後に膨張圧力によって発生する金属内管のひずみの経時変化を図-7、図-8に示す。図-7はB管を金属管内に接着後膨張材を注入したもので、拘束力の大きい場合である。図-8はB管のみの拘束による内管のひずみを示す。膨張ひずみは数時間から発生し、2日程度でその伸びが鈍化する。両者の比較から、金属管の剛性が加味された場合、内管のひずみが約3割程大きくなる結果を得た。しかし、軸方向のひずみは拘束度合いに拘わらず全て  $550 \times 10^6$  で安定し、膨張材の強度発現に見合う摩擦係数で滑りが生じていると考えられる。これらのひずみを式(1)に代入して膨張圧力  $p$  を求めた結果、図-9に示すように鋼管の拘束で6~7割の圧力増が認められた。

$$p = -Es(k^2 - 1)(\epsilon_r + \nu_s \epsilon_z) / \{2(1 - \nu_s)k^2\} \quad (1)$$

ただし、 $k = \text{鋼管の外径} / \text{内径}$

膨張圧  $p$  が分かっても、CFRP管の応力~ひずみの関係は式(2)、(3)のようになり、CFRP管の軸方向(z方向)および円周方向(r方向)の実測ひずみ ( $\epsilon_z'$ ,  $\epsilon_r'$ ) と応力 ( $\sigma_z$ ,  $\sigma_r$ ) から弾性係数 ( $E_z$ ,  $E_r$ )、ポアソン比 ( $\nu_{zr}$ ,  $\nu_{rz}$ ) など4個の未知数を求めることは不可能となる。そこで、図-10に示すようにCFRP管にゲージをはり1軸圧縮試験から  $E_z$  を求めた。

$$\epsilon_z' = (\sigma_z / E_z) - \nu_{rz} (\sigma_r / E_r) \quad (2)$$

$$\epsilon_r' = (\sigma_r / E_r) - \nu_{zr} (\sigma_z / E_z) \quad (3)$$

$$\sigma_z = (p \times A_c - A_i \times \epsilon_{iz} \times E_s) / A_o \quad (4)$$

$$\sigma_r = p \times d / (D - d) \quad (5)$$

ただし、 $E_s$  は鉄筋の弾性係数、 $A$  は断面積、 $D$  は外管の外径、 $d$  は外管の内径、沿え字  $p$  は管を、 $i$  は内管、 $o$  は外管、 $c$  は膨張材を意味する。

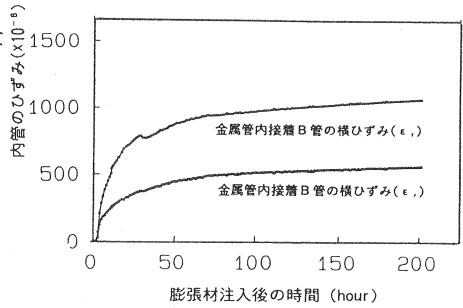


図-7 膨張材注入後の内管ひずみ

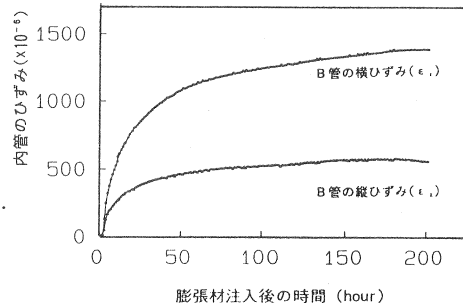


図-8 膨張材注入後の内管ひずみ

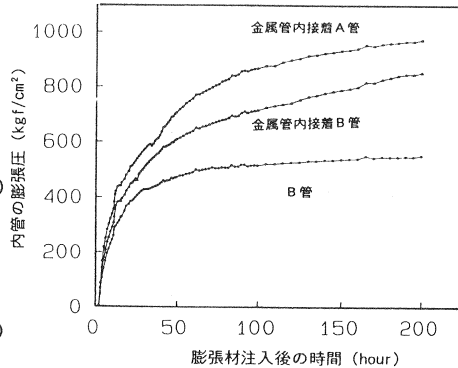


図-9 剛性の異なる管内の圧力

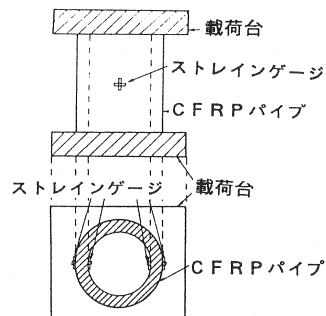


図-10 CFRP管の一軸圧縮試験

さて、CFRP材の弾性係数に関する上村、山田らの研究によれば<sup>1)</sup>、部材軸に0°と90°の2方向に補強された管のポアソン比は $\nu_{rz}$ 、 $\nu_{rz}$ 共に0.03~0.06程度であるので、ここでは簡略化のためポアソン比を無視して計算した。CFRPの弾性係数は図-11に示す1軸圧縮試験の結果を用いて $E_z=0.44 \times 10^6$  kgf/cm<sup>2</sup>、図-12に示す膨張圧力とひずみの関係を用いて $E_z=0.43 \times 10^6$  kgf/cm<sup>2</sup>、 $E_r=0.77 \times 10^6$  kgf/cm<sup>2</sup>と計算され、実用的にはポアソン比を省略して計算しても良いと考えられる。

一般に、繊維率( $V_{fr}$ 、 $V_{fz}$ )と弾性係数は式(6)で表されるので、上記の複合体の弾性係数を用いて繊維率を計算すると管の周囲方向で $V_{fr}=32\%$ 、軸方向で18%となった。

$$E_f \times V_f + E_m (1 - V_f) = E_c \quad (6)$$

ただし、 $E_f$ 、 $E_m$ 、 $E_c$ はそれぞれ繊維、マトリクス、複合体の弾性係数を表す。

### 3. 2 単管定着体のせん断耐力

図-5の様に定着体の引抜き試験を実施し、得られた最大荷重をCFRP管内面の面積で除して引抜き強度を求めた。一方、試験時の膨張圧力を式(1)から求めた。それらの結果を表-2に示す。

表-2 引抜き試験結果

内面処理	No	膨張圧力 kgf/cm <sup>2</sup>	引抜荷重 tonf	引抜き強度 kgf/cm <sup>2</sup>	接着時期
無処理	1	343	6.9	46.6	注入前
	2	334	6.3	42.6	"
	3	435	8.0	54.1	"
	4	569	11.2	75.9	膨張後
	5	569	10.8	73.1	"
砂付き	6	382	6.6	37.3	注入前
	7	485	7.5	42.4	"
	8	896	11.2	75.9	"

表-2の結果を膨張圧力~引抜き強度との関係として図-13に示した。ただし、供試体No. 4および5は単管を金属定着管に接着するまでに560kgf/cm<sup>2</sup>以上の圧力が発生しており、図-14に示すように単管に変形が生じていた。そのため、それらの引抜き強度は若干高くなったものと考えられ、引抜き強度~膨張圧の回帰直線から除外した。その結果、CFRPと膨張材との純付着力は管内面の処理の有無に拘わらず一定値7.8kgf/cm<sup>2</sup>となった。このことは、0.3~0.6mm程度の粒径の砂による内面粗さ加工は純付着力向上には寄与しないことを意味し、引抜き強度増加を図るには単管の内面に一体化した十分粗い加工が必

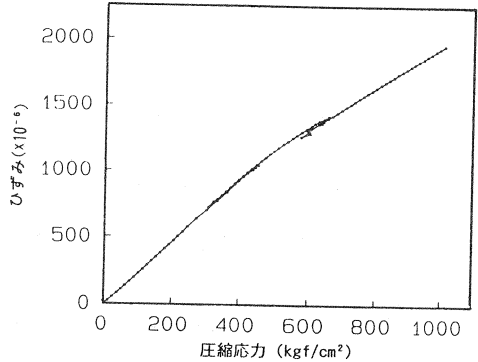


図-11 CFRP管の一軸圧縮ひずみ

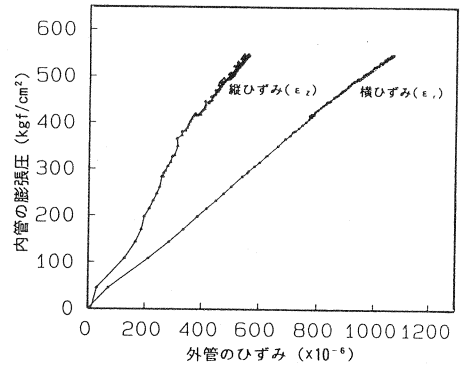


図-12 膨張圧力と外管のひずみの関係

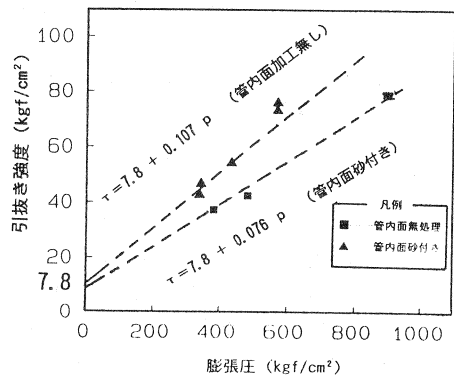


図-13 膨張圧と引抜き強度の関係

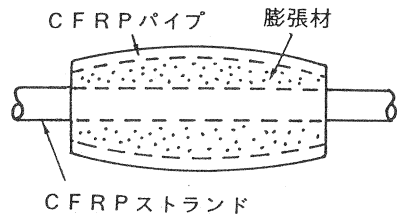


図-14 CFRP管の膨張圧による変形

要と考えられる。また、その摩擦係数は加工なしでは $\mu=0.107$ 、砂付きでは $\mu=0.076$ となり、表面の粗いほうが小さい摩擦係数となる結果を得た。その理由として、管内面が不十分に粗い場合にはすべり発生後に界面破壊が生じることや、接着に使用した樹脂との馴染みなどで十分な摩擦力が発揮できないことなどが上げられる。

以上の結果を数式表示すれば式(7)、(8)が得られる。

$$\tau = 7.8 + 0.107 p \quad (\text{内面加工無し}) \quad (7)$$

$$\tau = 7.8 + 0.076 p \quad (\text{内面砂付き}) \quad (8)$$

いま、CFRPの保証荷重に相当する引抜き強度を得るには、管の長さを25cmとすれば $\tau = 185 \text{ kgf/cm}^2$ が必要となり、 $1656 \text{ kgf/cm}^2$ もの膨張圧を導入しなければならない計算になる。したがって、実用的には今後CFRPと膨張材の摩擦係数や付着力を高くする工夫が必要と考えられる。

### 3.4 多孔管型定着体の試作と引抜き試験

定着用膨張材を用いたポストテンション方式PC部材を多孔管型定着体を用いて試作する場合、各単管に容易にかつ十分に定着用膨張材が充填されることが重要である。その効果を確認するため写真-1に示すようなアクリル管を使用して単一流路で膨張材が注入できるモデル装置を作製した。モデル装置での定着用膨張材は注入孔に1m程度の圧力水頭を作用させることで容易に注入できた。しかし、実際に図-15の部材で写真-4のように仮緊張を行ったまま定着用膨張材を注入するにはかなりの時間が必要であった。その原因は、仮緊張を行う際に各単管を繋ぐ流路がラムチェアーの反力で潰されたためである。

写真-2はドーナツ型仮緊張定着体の組立状況を示している。ドーナツ型の定着体ではストランドと端版との間で膨張材の漏れがないようパッキン処理が必要である。写真-3の状態では仮緊張定着体に膨張材を注入して所定の定着圧力に達した後、写真-4のラムチェアーで仮緊張を行い、多孔管定着体に定着用膨張材を注

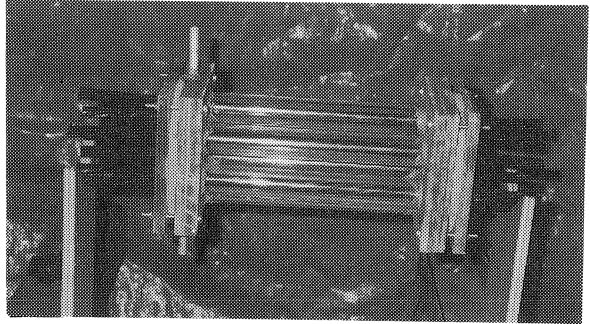


写真-1 アクリル管製膨張材注入モデル

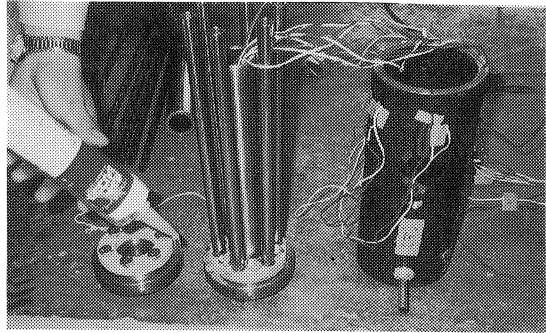


写真-2 ドーナツ型仮緊張定着体の組立状況

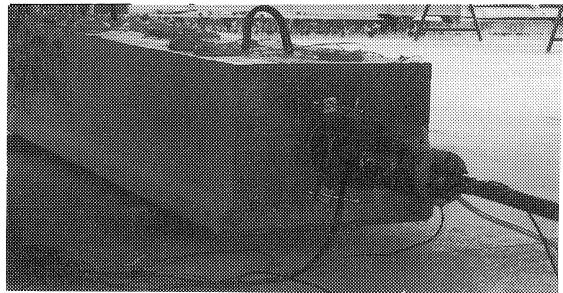


写真-3 仮緊張定着体の定着状況

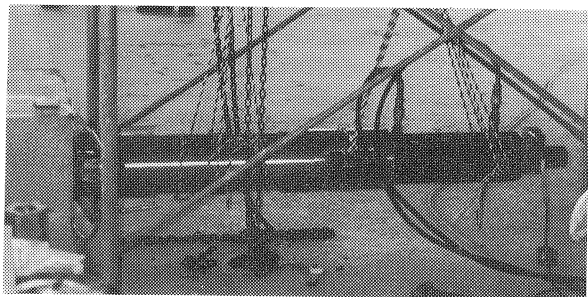


写真-4 ラムチェアーを用いた仮緊張状況

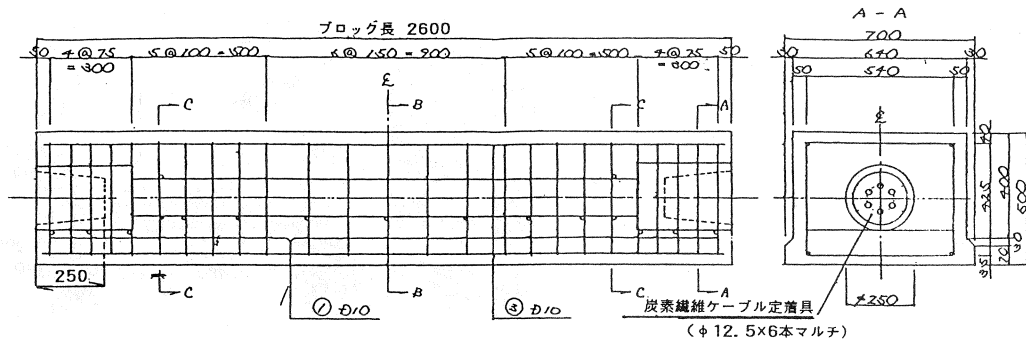


図-15 CFRP多孔管型定着体を用いたPCポステン供試体

入した。また、同様の手順で作製した多孔管定着体の引抜き試験を写真-4、写真-5の状況で実施した。定着用膨張圧は注入後の時間から400kgf/cm<sup>2</sup>程度と推定される。引抜き試験の結果39.8tfで6本のストランドの内の1本に単管内部の抜けが生じ、その衝撃で次々と引抜けが生じた。引抜けまではストランドの力が均等に作用していると仮定して、引抜き荷重からストランド1本当たりの力を計算すると6.6tfとなり、引抜き強度は42kgf/cm<sup>2</sup>となる。式(7)から膨張圧を400kgf/cm<sup>2</sup>として引抜き強度を計算すると48kgf/cm<sup>2</sup>となり単管の引抜き試験結果と整合する結果を得た。

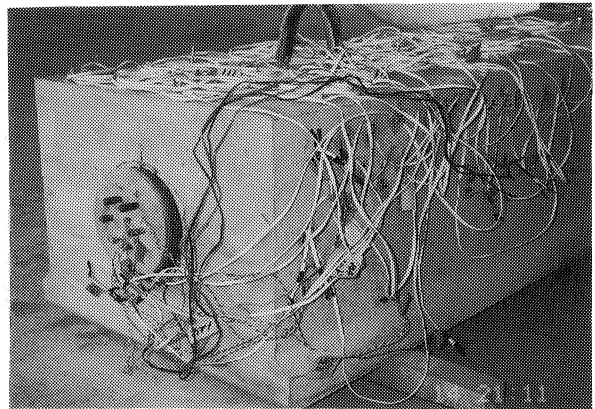


写真-5 CFRP定着体セット状況

#### 4. まとめ

以上の実験から得た知見をまとめると次のようになる。

- 1) CFRP管に定着用膨張材の膨張圧でPC用緊張材を定着する場合、膨張圧によるCFRP管の膨張が大きくなるため、単管を埋め込んだ多孔管型の定着体が望ましい。
- 2) CFRP単管内の膨張圧による軸方向ひずみは管の拘束度によらず一定値 $550 \times 10^6$ 程度となった。
- 3) CFRP単管と定着用膨張材間の引抜き強度は純付着強度を7.8kgf/cm<sup>2</sup>、摩擦係数を0.107として式(7)から計算できる。
- 4) 管内面に粒径0.3~0.6mmの砂を接着加工しても引抜き強度の向上は見られなかった。今後、効果的な加工方法を検討する必要がある。
- 5) 軸方向と90°方向に補強されたCFRP管の応力とひずみの関係式を用いる場合、便宜的にポアソン比を0としてもよい。

#### 謝辞

本研究を実施するに当たり富士ピーエス、ショーボンド建設、東レの各社に多大のご支援を頂いたことを付記し深謝致します。

#### 参考文献

- 1) 植村益次, 山田直樹, 炭素繊維強化プラスチック材の弾性係数, 材料, 第24巻, 第257号。
- 2) 出光隆, 山崎竹博, 原田哲夫, 吉岡民夫, FRP緊張材の引張試験方法に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文報告集, 13-1, 1991。