

# 論文 FFU 部材と鉄筋コンクリート部材の接合方法の研究

深田和志\*1・丸山久一\*2・竹中計行\*3・山内秀夫\*4

**要旨：**硬質発泡ウレタン樹脂をガラス長繊維で補強した材料である FFU 部材と鉄筋コンクリート部材を接合した複合部材を構造材料として利用することを目的として、両者の接合方法の選定試験および実物大試験を行い、支圧アンカー式接合を求めた。その結果を基に支圧アンカー式接合の設計法を考案し、その妥当性、実用性を確認するため、立坑の鉄筋コンクリート壁に FFU 部材を組込み、複合部材としての変形挙動、接合部の挙動、止水性の現場検証を行い、構造材料として利用できることを確認した。  
**キーワード：**鉄筋コンクリート, FFU, 複合部材, 接合方法, 実証試験

## 1. はじめに

立坑掘削時は土留め壁としての機能を有し、シールド発進到達時はシールド機で容易に切削できる土留め壁の研究開発を進めている。開発に当たっては、異質の材料である FFU 部材と鉄筋コンクリート(RC)部材からなる複合部材の最適な接合方法を決定するための载荷試験を行った。さらに実物大モデルでの確認試験の結果、接合方法として支圧アンカー式接合が最適であると判断された<sup>1)</sup>。

本文は、上記の試験結果、FFU 部材の材料特性を把握するために実施した载荷試験の結果、これらの結果を踏まえて考案した支圧アンカー式接合を用いた複合部材の設計法、さらにその妥当性・実用性を確認するために実施した立坑工事での現場検証の結果について述べたものである。

## 2. FFU の物性値

FFU(Fiber reinforced Foamed Urethane)は、硬質発泡ウレタン樹脂をガラス長繊維で補強したもので、高強度、耐腐食性、耐薬品性等を有する材料であり、鉄道のまくらぎやアースアン

カーの受圧板としての使用実績がある。FFU は、通常厚さ 3 センチ、幅 60 センチの長尺材として製造され、長尺方向にのみガラス繊維が挿入された異方性の材料である。FFU を構造材料として利用する場合は、エポキシ樹脂接着剤を用いて FFU を圧着積層し所定の厚さに形成する。以後、圧着積層した FFU のことを FFU 部材と呼ぶ。筆者らが行った FFU 部材の物性試験結果を表-1 に示す。また、同表には FFU 部材を仮設材料として利用する場合の許容応力度も示す。

表-1 FFU 部材の物性値

項目	FFU74
比重	0.74
曲げ強度	72.0(36.0)
曲げ弾性係数	$8.44 \times 10^3$
繊維方向圧縮強度	56.9(28.5)
繊維直角方向圧縮強度	13.2(6.60)
繊維方向圧縮弾性係数	$1.08 \times 10^4$
繊維方向引張弾性係数	$9.66 \times 10^3$
繊維方向せん断強度	9.10(4.55)
繊維直角方向せん断強度	6.2(3.10)
繊維方向引張強度	127(63.5)
接着せん断強度	9.10(4.55)

\* ( ) 内数字は許容応力度 (単位 N/mm<sup>2</sup>)

\*1 ㈱銭高組技術本部技術研究所課長 (正会員)  
 \*2 長岡技術科学大学教授 環境・建設系 工博 (正会員)  
 \*3 ㈱銭高組技術本部技術研究所研究員  
 \*4 積水化学工業(株)営業推進部課長

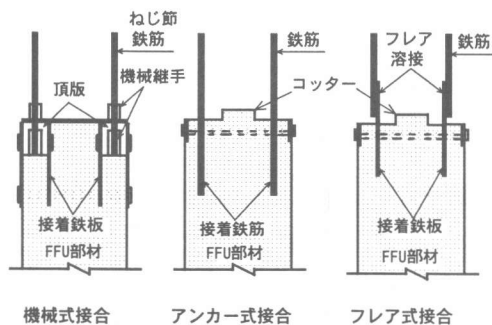


図-1 接合方法

本研究では、FFU 部材は一方向のり材として利用し、引張・圧縮応力はガラス繊維の方向で負担させるものとする。

### 3. 複合部材の試験結果

#### 3.1 接合方法の試験と結果

FFU 部材と RC 部材の接合部に要求されることは、応力が確実に伝達できることと、施工性・経済性に優れていることである。接合方法としては、図-1 に示すように、機械式接合、アンカー式接合およびフレア式接合を考え、図-2 に示すような 1/2 モデルの試験体を作成し曲げ試験とせん断試験を実施した。その結果、各接合方法とも RC 部材と同等の曲げ耐力とせん断耐力を有することと、施工性・経済性からみればアンカー式接合が適していることが確認できた。

しかし、アンカー式接合は、FFU 部材と鉄筋の定着を接着剤で行っているため、鉄筋の径と材質によって定着長さが大きく変化することと、定着長さを大きくしても接着剤は進行性破壊を起こすため、両者の定着強度に限界がある。したがって、図-3 に示すように、機械継手と支圧鉄板を用いて鉄筋を FFU 部材に固定する支圧アンカー式接合を考えた。

FFU 部材への鉄筋挿入長さは、鉄筋の引き抜きを FFU 繊維方向のせん断強さで抵抗させる考え方であり、式(1)を用いて求めることとした。

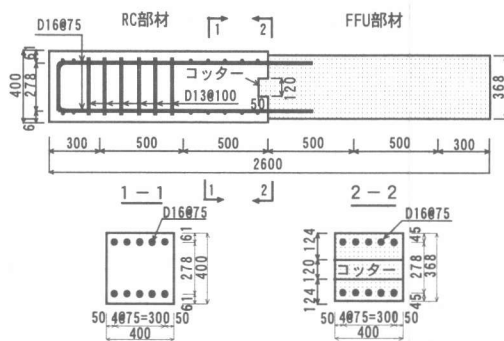


図-2 接合方法の選定試験体

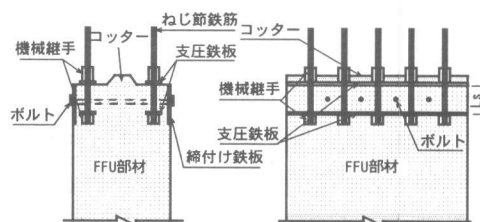


図-3 支圧アンカー式接合

$$L_s = \frac{f_u \times A_s}{n \times s \times \tau_{fh}} \quad (1)$$

$L_s$ : FFU 部材への鉄筋挿入長さ (mm)

$f_u$ : 鉄筋の引張強度 (N/mm<sup>2</sup>)

$A_s$ : 鉄筋の断面積 (mm<sup>2</sup>)

$n$ : 支圧鉄板のせん断面の数 ( $n=2$ )

$s$ : 鉄筋の最小ピッチ (mm)

$\tau_{fh}$ : FFU 繊維方向のせん断強度 (N/mm<sup>2</sup>)

支圧アンカー式接合の可能性を確認することを目的として、図-4 に示す実物大モデルでの載荷試験を実施した。その結果、曲げ試験、せん断試験とも破壊は接合部ではなく RC 部材で生じ、支圧アンカー式接合は実用に十分耐えることを確認した<sup>1)</sup>。

#### 3.2 FFU 部材の載荷試験と結果

FFU 部材は繊維方向と繊維直角方向で強度特性が異なる異方性の材料のため、曲げ変形に伴う FFU 部材のひずみ分布を把握することを目的として載荷試験を実施した。試験体は、図-5 に示すように、断面 400×200mm、曲げスパン

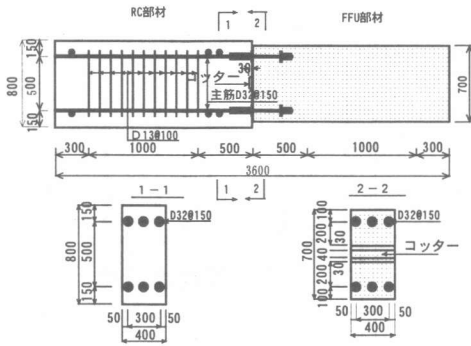


図-4 実物大モデルの試験体

2600mmの形状とした。

FFU部材のひずみ分布は、図-6に示すように、破壊するまで中立軸がFFU部材の中心にあり、ほぼ直線関係にある。引張側と圧縮側のひずみ量について比較すると、曲げモーメントが196kN・mまでは両者ともほぼ同じ値であるが、破壊時(384kN・m)は引張ひずみ(7574 $\mu$ )に対して圧縮ひずみの発生率が67%の5091 $\mu$ である。

引張側と圧縮側のひずみ量に差が生じた理由は、FFU部材の引張弾性係数(9.66kN/mm<sup>2</sup>)と圧縮弾性係数(10.8kN/mm<sup>2</sup>)の違いと考えられる。一般にプラスチックの破断ひずみは1%以上期待できるが、FFU部材はウレタンを約2倍に発泡させているため破断ひずみが約0.6~0.7%程度である。破壊時は、引張ひずみが約0.8%発生しているのでウレタンは破断していることになる。したがって、引張力はガラス繊維で負担し、圧縮力はウレタンとガラス繊維で負担していると考えられる。

#### 4. 複合部材の設計法

「3. 複合部材の試験結果」を基に接合部、FFU部材の設計法を設定した。

##### (1) FFU部材への鉄筋挿入長さ

FFU部材への鉄筋挿入長さは、FFU部材を取り付けた鉄筋かごの組み立て、吊り上げ、建て込み時の衝撃・ねじれ等による不確定要因に対しても安全性を確保するため、式(1)に安全率を考慮した式(2)で求めることとする。また、接合部

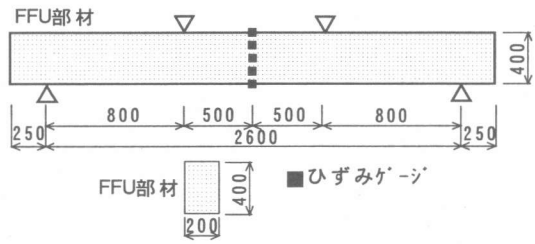


図-5 FFU部材の試験体

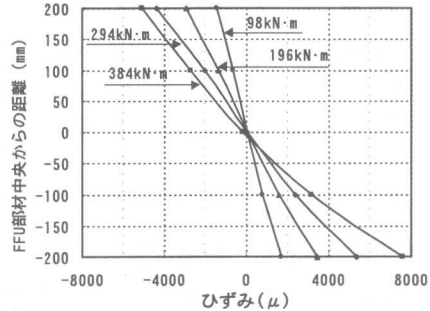


図-6 FFU部材のひずみ分布

は、図-3に示すように、締付け鉄板および締付けボルトで補強し、外力に抵抗させる構造とする。

$$L = \frac{\sigma_{sa} \times A_s}{n \times b \times \tau_{fah}} \times F \quad (2)$$

$L$  : FFU部材への鉄筋挿入長さ(mm)

$\sigma_{sa}$  : 鉄筋の許容引張応力度(N/mm<sup>2</sup>)

$A_s$  : 鉄筋の総断面積(mm<sup>2</sup>)

$n$  : 支圧鉄板のせん断面の数( $n=2$ )

$b$  : 部材幅(mm)

$\tau_{fah}$  : FFU部材の繊維方向の許容

せん断応力度(N/mm<sup>2</sup>)

$F$  : 安全率( $F=2$ )

##### (2) 接合部のコッター

接合部のコッター形状を図-7に示す。コッター高さ( $H_f$ )は式(3)で求めることとし、コッター深さ( $D_f$ )は $H_f$ の1/3、角度( $\theta_f$ )は45°とする。

$$H_f = \frac{V_{cd}}{\tau_{fav} \times b} \quad (3)$$

$H_f$  : コッター高さ(mm)

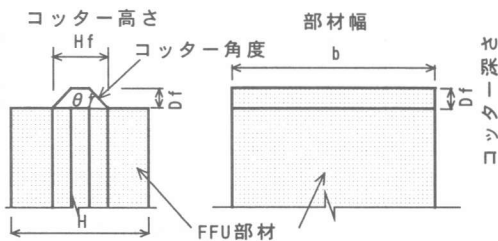


図-7 接合部のコッター形状

$V_{cd}$ : せん断補強鋼材を用いない鉄筋コンクリートの設計せん断耐力 (N)

$\tau_{fav}$ : FFU部材の繊維直角方向の許容せん断応力度 (N/mm<sup>2</sup>)

$b$ : 部材幅 (mm)

### (3) 接合部付近の補強対策

FFU部材とRC部材の接合部は、大きな曲げモーメントが作用すると接合部付近のコンクリートが剥離し易いので、コンクリートの剥離防止のため、図-8に示すように、スターラップを配置する。設計上スターラップが配置されていない場合は、配置範囲をRC部材厚の1/2とし、ピッチを200mm以下、鉄筋径を13mm以上とする。

### (4) 接合部の鉄筋のかぶり

接合部の鉄筋のかぶりは、図-9に示す通りとし、式(4)を用いて求めることとする。

$$d_j = d + d_t + d_f \quad (4)$$

$d_j$ : FFU部材の鉄筋のかぶり (mm)

$d$ : FFU部材のコンクリートのかぶり (50mm)

$d_t$ : 締め付け鉄板の板厚 (mm)

$d_f$ : FFU部材の純かぶり (50mm以上)

### (5) FFU部材の応力計算

FFU部材の曲げ試験結果から最大荷重の約1/2程度までは、FFU部材に発生する引張側と圧縮側のひずみ量が同程度であることと、ひずみ分布がほぼ直線関係にあることが解ったので、FFU部材は平面保持の仮定が成り立つものとし、曲げ応力度は式(5)、せん断応力度は式(6)で照査するものとする。

#### a) FFU部材の曲げ応力度

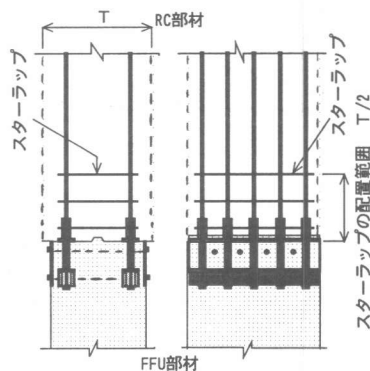


図-8 接合部付近の補強

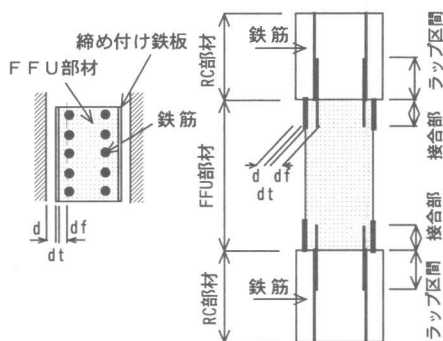


図-9 接合部の鉄筋のかぶり

$$\sigma_f = \frac{N'_d}{A_f} + \frac{M_d}{Z_f} \quad (\leq \sigma_{fah}) \quad (5)$$

$\sigma_f$ : FFU部材の曲げ応力度 (N/mm<sup>2</sup>)

$\sigma_{fah}$ : FFU部材の許容曲げ  
応力度 (N/mm<sup>2</sup>)

$N'_d$ : 設計軸力 (N)

$M_d$ : 設計曲げモーメント (N・mm)

$A_f$ : FFU部材の断面積 (mm<sup>2</sup>)

$Z_f$ : FFU部材の断面係数 (mm<sup>3</sup>)

#### b) FFU部材のせん断応力度

$$\tau_f = 1.5 \frac{V_d}{A_f} \quad (\leq \tau_{fav}) \quad (6)$$

$\tau_f$ : FFU部材のせん断応力度 (N/mm<sup>2</sup>)

$\tau_{fav}$ : FFU部材の繊維直角方向の  
許容せん断応力度 (N/mm<sup>2</sup>)

$V_d$ : 設計せん断力 (N)

$A_f$ : FFU部材の断面積 (mm<sup>2</sup>)

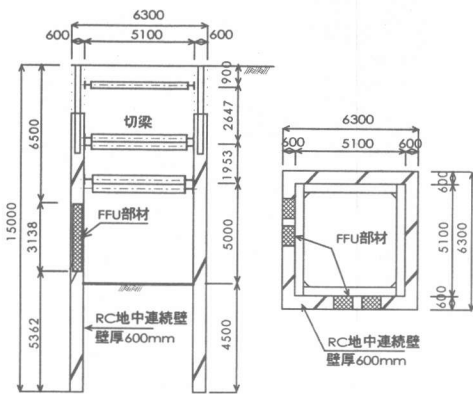


図-10 立坑の断面と平面

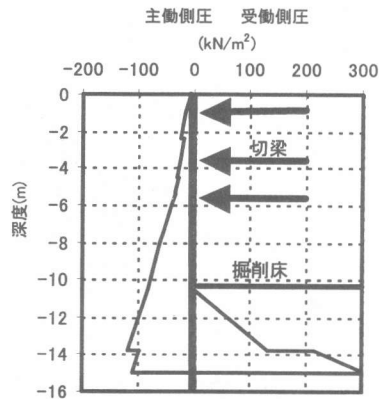


図-11 ランキン主働土圧

## 5. 現場実証試験

### 5.1 試験概要

実証試験は、RC地中連続壁（以後、連壁と呼ぶ）で築造される立坑工事で行った。立坑の掘削深さは約10.5mであり、断面・平面形状は図-10に示す通りである。地盤は地下水の豊富なN値10~15程度の礫混じり砂である。

FFU部材は図-10に示すような配置で連壁に組込んだ。連壁およびFFU部材に発生する曲げモーメント、せん断力は、図-11に示すランキン主働土圧を用いて弾塑性土留め解析で求めた。接合部およびFFU部材の形状を図-12に示す。また、連壁とFFU部材の仕様を表-2に示す。

立坑掘削に伴う接合部およびFFU部材の挙動を把握するため変位測定を実施した。

FFU部材は、図-12に示すように、大きな矩形形状を有するため、①鉄筋かごの吊り上げ時、建て込み時にかごが変形しないように、FFU部材周囲の鉄筋かごを補強した（写真-1）。②FFU部材は比重が0.74と小さいため、コンクリート打設による鉄筋かごの浮き上がり対策として、鉄筋かごの上端はガイドウォールに固定した。

ここでFFU部材を組込んだ連壁を複合壁、組込まない連壁をRC壁と呼ぶことにする。

### 5.2 複合壁の挙動

#### (1) 複合壁の変形

掘削に伴う複合壁とRC壁の実測変位を図-13

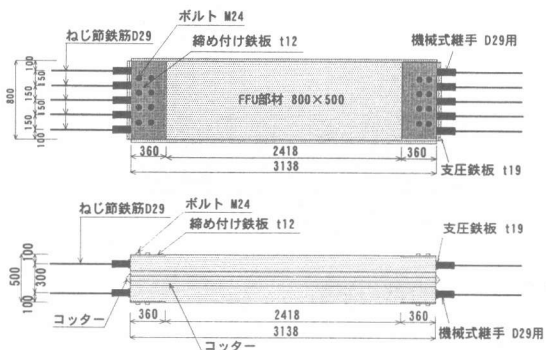


図-12 接合部とFFU部材の形状

表-2 RC地中連続壁の仕様

項目	仕様
壁厚(mm)	600
設計基準強度(N/mm <sup>2</sup> )	210
鉄筋(SD295)	D29@150
最大曲げモーメント(kN・m)	329
最大せん断力(kN)	233
FFU部材の形状(mm)	500×800×3138
接合部コッター	$H_f=120, D_f=40, \theta_f=45^\circ$

に示す。同図には弾塑性土留め解析で求めた計算変位もプロットした。計算では、FFU部材の曲げ剛性がRC部材の約1/20程度のため、複合壁の方がRC壁より最大変位で約3mm大きく得られている。しかし、実測変位と比較すると複合壁とRC壁に差は見られなかった。なお、実測変位が計算値の約1/3になった理由は、計算は1次元のはり部材として解いているが、実際は立坑の隅角部の効果が作用したためと考えられる。

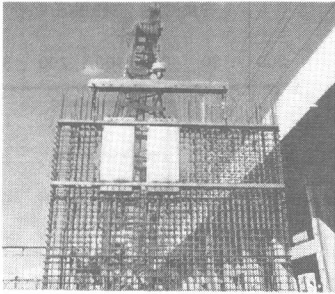


写真-1 鉄筋かごの建込み状況

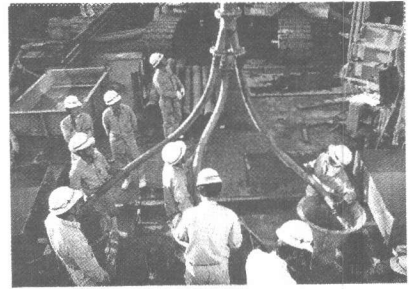


写真-2 コンクリート打設状況  
変位(mm)

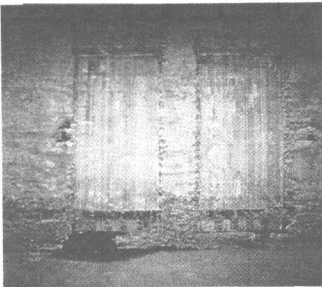


写真-3 FFU 部材設置状況

## (2) 接合部の挙動

掘削完了後に接合部の状態をチェックしたが、接合部付近のコンクリートのクラックおよび、FFU 部材と RC 部材の境目での目開きは見られず、両者は一体となって変位したことが確認できた。

## (3) 複合部材の止水性

FFU 部材周囲の止水性を確保するため、①FFU 部材側面中央に高さ 40mm のコッター (FFU の突起物) を取り付けた。②FFU 部材と FFU 部材の間 (400mm) のコンクリートを確実に充填すること、FFU 部材下端へのスライム堆積防止を図るため、トレミー管 3 本打設とした(写真-2)。

FFU 部材は、写真-3 に示すように、所定の位置に設置されており、FFU 部材と周辺コンクリートとの間に隙間もなく、止水性は確保できていた。これは FFU 部材周囲に取り付けたコッターの効果と考えている。

## 6. 結論

複合部材試験および現場実証試験の結果から次の点が確認できた。FFU 部材と RC 部材の接合方法は支圧アンカー式接合が適している。接合

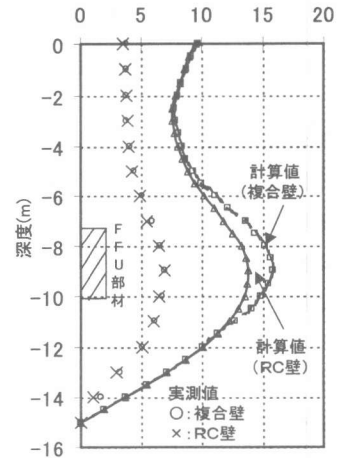


図-13 複合壁の変位分布

部および FFU 部材の設計は式(2)～式(6)を用いることが可能である。FFU 部材周囲に取り付けたコッターは止水に有効である。

今後、土圧が大きく作用する大深度立坑工事で実証試験を行い、複合部材に発生する変位・応力等の計測や施工性試験を行い、検証していく考えである。

謝辞：最後に九州旅客鉄道，ジェイアール九州コンサルタンツの皆様へ多くの御指導と御助言をいただき感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 深田和志，丸山久一，竹中計行：FFU 部材と鉄筋コンクリート部材の接合方法の開発およびその力学的挙動に関する研究，土木学会論文集，No.620/V-43，pp.95～107，1999.5.