

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

深田 和志¹・丸山 久一²・竹中 計行³

¹正会員 (株) 銭高組 技術研究所 主席研究員 (〒163-1011 東京都新宿区西新宿 3-7-1)

²フェロー 工博 長岡技術科学大学教授 環境・建設系 (〒940-2188 新潟県長岡市上富岡町 1603-1)

³正会員 (株) 銭高組 技術研究所 研究員 (〒163-1011 東京都新宿区西新宿 3-7-1)

本研究は、シールドトンネルの掘削発進部の構造性能として要求される、立坑掘削時には土圧に抵抗し、十分な安全性を有するとともに、シールド発進時には容易に切断可能な部材を開発することを目的として、曲げ抵抗は大きいながらも容易に切断できる FFU (硬質ウレタン樹脂をガラス長繊維で補強した材料) 部材と鉄筋コンクリート部材との接合方法を検討したものである。接合方法として機械式接合、アンカー式接合、フレア式接合の 3 方法を取り上げ、各々について最適な接合方法を検討するとともに、接合された複合部材について、曲げ性状、せん断性状を実験的に検討した。その結果に基づき、構造性能および経済性の観点から最も優れたアンカー式接合について、実物大モデルでも確認試験を行い、実用に十分耐えることを確かめた。

*Key Words : FFU, reinforced concrete, composite member, jointing method
structural behavior*

1. はじめに

都市部で地下鉄等の構造物を建造する場合、トンネル掘削にはシールド工法が多く使用されている。この工法は、周辺地盤への影響を小さくできる利点があるが、シールドマシンの発進部では、最初に立坑構造のコンクリートを掘削しなければならず、その労力が多大なものとなっている。そのため、立坑構造として土圧に十分耐えるとともに、シールドマシンの発進時には容易に掘削できる材料・部材の開発が求められている。

この要求性能を満たすとともに経済性も追求するとき、単一構造部材ではなく、シールドマシンの発進部のみを他の材料で置き換えた複合構造が考えられる。部材とした場合で、所要の曲げ耐力を保持しているながら、切断し易い材料として、炭素繊維、アラミド繊維、ガラス繊維等が考えられる。これらは、現在、土木建設分野において補強材料として利用されている。利用方法には、短繊維をセメントペーストやコンクリート等に混ぜ合わせる方法や、長繊維を帯状、布状、網状に加工し、コンクリート等の補強材とする方法がある。また、利用用途は、トンネ

ルのライニング、のり面補強材、PC橋の緊張材、補修補強材等がある¹⁾。

本研究で使用する材料は、木材の代替材料として開発され、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のある FFU (Fiber reinforced Foamed Urethane: 硬質ウレタン樹脂をガラス長繊維で補強した材料) である^{2), 3)}。FFU は、合成木材とも呼ばれており、部材として高強度、耐腐食性、耐薬品性を有し、吸水性が極めて小さい優れた材料である。また、加工性が良いことから 2 次製品として水処理施設、スポーツ・公園施設、住宅建築等に幅広く活用されている。

筆者らは、FFU 部材の強度・加工性に着目し、構造材料への適用について検討を行い、FFU 部材を鉄筋コンクリート部材に複合させたシールド直接発進工法を開発を行うことにした。

本工法は、図-1 に示すように、鉄筋コンクリート地中連続壁 (以後、地中連続壁と呼ぶ) のシールド機が通過する部分に FFU 部材を組み込んだものである。すなわち、シールド機は直接 FFU 部材を切削することができるため、危険を伴う人力または機械による地中連続壁の開口作業がなく、安全・確実にシールド機の発進が可能となる工法である。シー

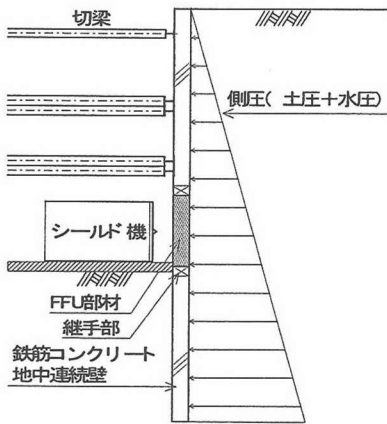


図-1 シールド直接発進工法の概要

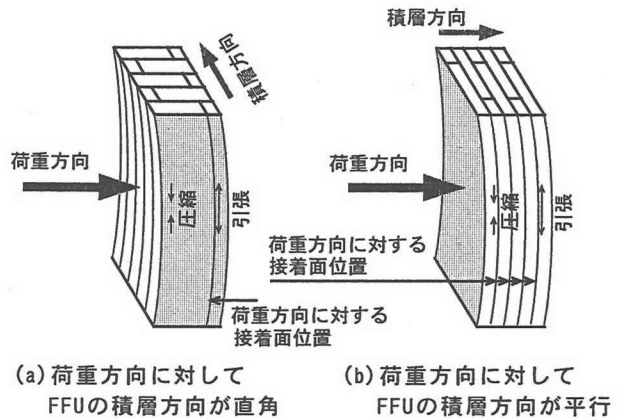


図-2 FFU 部材の構成方式

ルド直接発進工法としては、既に CFRP を補強筋とし石灰碎石を粗骨材として使用したプレキャストコンクリート部材を土留め壁に組込んだ工法が実用化されており、多数の施工実績を有している⁴⁾。

本研究は、FFU 部材と鉄筋コンクリート部材の接合された複合部材の構造材料としての可能性を検討したものである。しかし、不連続となる接合部の応力伝達が確実にできる接合方法は不明である。そこで、両者の接合方法の選定試験を行い、その結果を基に実用的な接合方法にするための試験を行った。さらに、実物大モデルでの確認試験を実施した。

本文は、これらの試験結果について考察するものである。

2. FFU の特性

(1) FFU の基礎物性

FFU は、硬質ウレタン樹脂発泡体とガラス長繊維からなる材料である。ウレタン樹脂発泡体は完全に独立した気泡により構成されており、ガラス長繊維はモノフィラメント状態まで均質に分散している。

FFU の特性は、ガラス繊維により一方向にのみ補強されているため、繊維方向と繊維直角方向で強度が異なる異方性の材料である。また、ウレタン樹脂発泡体の発泡倍率とガラス繊維の混入率により物性値が異なる。JIS の木材試験に準じて求められた FFU の基礎物性値を表-1 に示す^{2), 3)}。

(2) FFU 部材の構成方式

FFU は、工場で作厚さ 3 センチ、幅 60 センチの長尺材として製造され、長尺方向がガラス繊維の方向である。FFU を構造材料として利用する場合は、エポ

表-1 FFU の基礎物性値

項目	FFU74	
	繊維方向	繊維直角方向
比重	0.74	
曲げ強度 (N/mm ²)	144	6.08
曲げ弾性係数 (N/mm ²)	8.66×10^3	6.17×10^2
軸圧縮強度 (N/mm ²)	76.5	5.20
圧縮弾性係数 (N/mm ²)	1.04×10^4	6.94×10^2
せん断強度 (N/mm ²)	9.12	17.3
引張強度 (N/mm ²)	127	3.04
接着せん断強度	母材破壊	

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

FFU 部材の構成方式には、図-2 に示すように、荷重方向に対して FFU の積層方向は直角 (図-2(a)) と平行 (図-2(b)) の 2 通りがある。両者の違いは荷重方向に対する FFU の積層数であり、平行の場合の方が多くなる。接着は手作業で行うため接着不良に伴う危険率は、接着面の数が少ないほど低くなる。したがって、FFU の積層方向は荷重方向に対して直角が有利と考えられる。しかし、どちらの積層方向が曲げや圧縮に対して強いかは不明である。そこで、これらを確認することを目的として、FFU 部材の曲げ試験と圧縮試験を実施した。

a) 試験ケース

曲げ試験のケースを表-2、圧縮試験のケースを表-3 に示す。図-3(a)に曲げ試験体、図-3(b)に圧

表-2 曲げ試験のケース

試験体名	荷重方向に対するFFUの積層方向	荷重方向に対するFFUの積層数
FFU-BV	直角	0層
FFU-BH	平行	5層

表-3 圧縮試験のケース

試験体名	荷重方向に対するFFUの積層方向	荷重方向に対するFFUの積層数
FFU-CV	直角	0層
FFU-CH	平行	12層

縮試験体の形状を示す。曲げ試験は曲げスパン200cmとし、荷重は単純はりの一方向単調荷重で行った。計測項目はアムスラーの荷重と試験体の中央変位である。

b) 試験結果

曲げモーメントと中央変位の関係を図-4に示す。FFU-BVおよびFFU-BHとも破壊は、繊維方向のせん断破壊であった。最大曲げモーメントは、FFU-BVが65.7kN・m、FFU-BHが62.8kN・mであり、積層方向の違いによる明確な差は見られなかった。

圧縮応力と圧縮変位の関係を図-5に示す。最大圧縮強さは、FFU-CVが平均15.7N/mm²、FFU-CHが平均12.7N/mm²であり、FFU-CVの圧縮応力が24%大きく得られた。FFU-CVが大きくなった理由は、図-3(b)の上側の図に示すように、接着面が荷重方向と平行であるため、厚さ3cmのFFUの水平ひずみが接着剤により拘束されたためと考えられる。

曲げ試験体、圧縮試験体とも接着面での剥離は生じなかった。

以上の結果からFFU部材の構成方式は、荷重方向に対してFFUの積層方向を直角とすることにした。

3. 各種接合方法の力学的性能

(1) 目的

FFU部材と鉄筋コンクリート部材を接合した複合部材の構造材料としての可能性を追求するに当たって、不明となっている両者の接合方法を考案する必要があった。接合部に要求されることは、曲げモーメント・せん断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。そこで、接合方法として下記に示す3種類を考えた。各接合方法の概要を図-6に示す。

①機械式接合

機械継手と頂版を用いて鉄筋を接着鉄板に結合し、

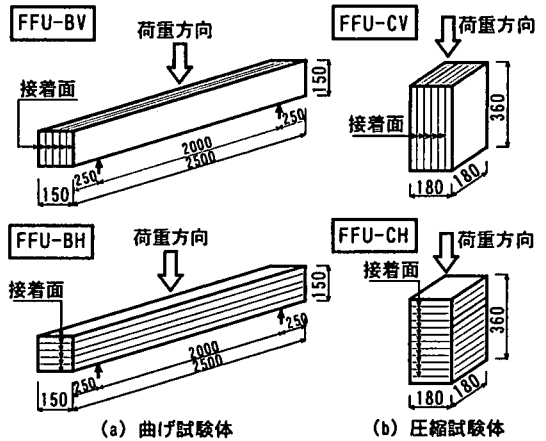


図-3 曲げ試験体と圧縮試験体の形状

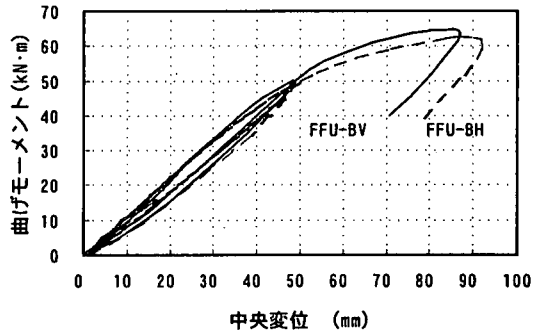


図-4 曲げモーメントと中央変位の関係

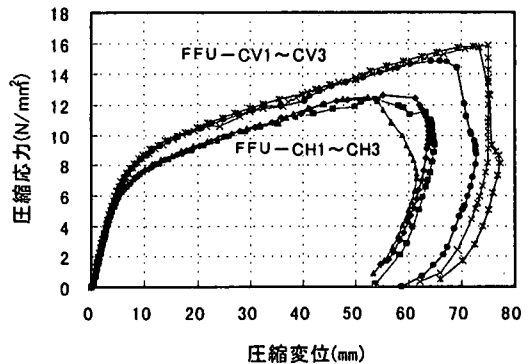


図-5 圧縮応力と圧縮変位の関係

これをFFU部材に挿入し接着剤で定着する。

②アンカー式接合

鉄筋をFFU部材に挿入し接着剤で定着する。

③フレア式接合

鉄筋を接着鉄板にフレア溶接し、これをFFU部材に挿入し接着剤で定着する。

接着鉄板および鉄筋の表面に付着している黒皮は付着力が無いため完全に除去する。接着剤はエポキ

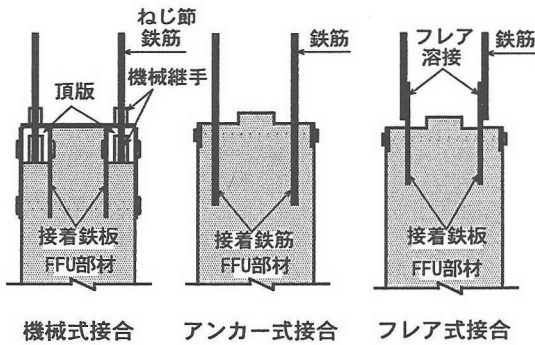


図-6 接合方法

樹脂を使用する。また、接合部は破壊を防止するため鉄板とボルトによる補強を行う。

上記3種類の接合方法の耐力を明らかにするとともに、最適な方法を選定することを目的として、曲げ試験とせん断試験を実施した。

(2) 曲げ試験

a) 使用材料

コンクリートは設計基準強度 23.5N/mm^2 とし、打設時には圧縮強度測定用の標準供試体を採用した。材令28日の試験結果を表-4に示す。

鉄筋はSD295A、D16とし、機械式接合にはねじ節鉄筋を用い、アンカー式接合とフレア式接合には異形鉄筋を用いた。鉄筋の引張試験結果を表-5に示す。

接着鉄板の鋼材はSS400、 $t=6\text{mm}$ とした。

b) 試験ケース

曲げ試験のケースを表-6に示す。表中の有効定着長さ(L)は、FFU部材と接着鉄板またはFFU部材と鉄筋の接着長さのことである。

機械式接合の $L=18\text{cm}$ は、FFU部材と接着鉄板の接着せん断強度(τ)と、鉄筋の引張強度との関係から求めた。 τ は、FFU部材に接着固定した鉄板(接着面積 25cm^2)の引張試験から、接着面で破壊せずFFU部材が母材破壊する結果が得られたので、FFU部材のせん断強度とした。また、接着面積が大きくなるとFFU部材または接着鉄板の凹凸により、両者の接着性が低下すると考え、本試験では τ を $1/2(4.56\text{N/mm}^2)$ に低減した。

アンカー式接合のLは、FFU部材に接着固定した鉄筋(D16)の引き抜き試験から求めた。その結果、Lを25cm以上にすれば鉄筋破断できることが解った。フレア式接合のLは機械式接合同じとし、また、鉄筋と接着鉄板のフレア溶接長さは $16\text{cm}(10D)$ とした。

試験体形状は、図-7に示すように、実物の1/2縮尺モデルとし、FFU部材と鉄筋コンクリート(RC)

表-4 コンクリートの試験結果(材令28日)

試験体の種類	圧縮強度(N/mm ²)
機械式	24.2
アンカー式・フレア式	21.7

表-5 鉄筋の引張試験結果

鉄筋の種類	降伏点(N/mm ²)	引張強さ(N/mm ²)	伸び(%)
D16, SD295A			
ねじ節鉄筋	363.4	539.9	23.3
異形鉄筋	361.4	529.0	20.2

表-6 曲げ試験のケース

試験体名	接合方式	有効定着長さ(L)	使用鉄筋(鉄筋比)
BT1-18	機械式	18cm	SD295A
BT2-25	アンカー式	25cm	5-D16 @75
BT3-18	フレア式	18cm	(0.73%)

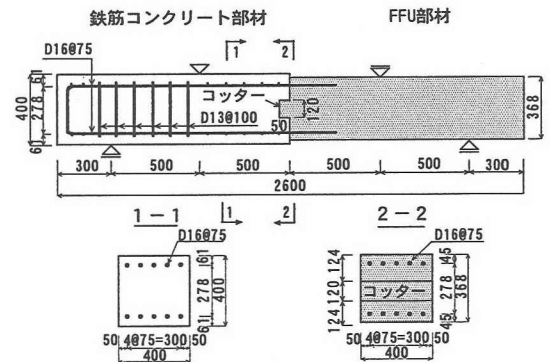


図-7 曲げ試験体の形状

表-7 安定液の使用材料と配合

材料の種類	配合(kg)
ベントナイト	30.0
ポリマー	3.0
分散材	1.0

(水1m³当り)

部材の複合部材(以後、複合部材と呼ぶ)である。

試験体の製作は、実際の地中連続壁の施工状況を考慮すると、鉄筋および接合面には劣化した安定液やスライムが付着する可能性があるため、表-7に示す安定液を塗布した。

c) 試験方法

荷重試験は1962kNアムスラーを使用し、加力は2点集中荷重を受ける曲げスパン200cmの単純ばり形式の一方単調荷重とした。荷重はRC部材に曲げせん断ひび割れが入るまで9.8kNづつとし、その後は破壊するまで19.6kNとした。

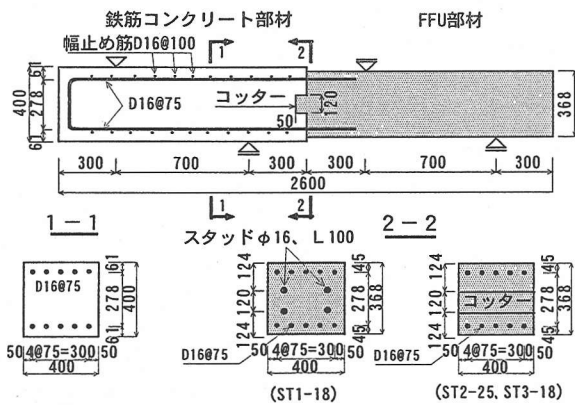


図-8 せん断試験体の形状

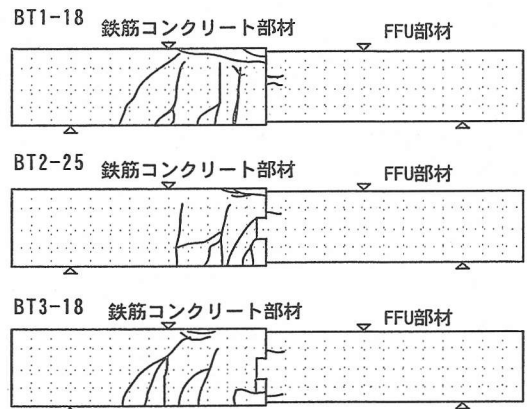


図-9 曲げ試験体の最終ひび割れ状況

計測項目は、アムスラーの荷重、鉄筋のひずみ、接合部のずれと試験体の変位である。破壊に至るまでのひび割れの進展状況は目視により観察した。

(3) せん断試験

a) 使用材料

コンクリート、鉄筋および鋼材は曲げ試験と同じ材料を使用した。

b) 試験ケース

せん断試験のケースを表-8に示す。接合部はせん断抵抗を高めるため、機械式接合には、直径16mm、高さ10cmのスタッドを4本取り付け付けた。アンカー式接合とフレア式接合には、FFUで形成したせん断長さ12cm、深さ5cmのコッターを設けた。試験体形状を図-8に示す。その他の試験条件は曲げ試験と同じである。

c) 試験方法

加力はせん断スパン30cmの大野式逆対称せん断加力法の一方向単調載荷とした。その他の試験方法は曲げ試験と同じである。

表-8 せん断試験のケース

試験体名	接合方式	せん断機構	有効定着長さ(L)	使用鉄筋(鉄筋比)
ST1-18	機械式	スタッド	18cm	SD295A 5-D16 @75 (0.73%)
ST2-25	アンカー式	コッター	25cm	
ST3-18	フレア式	コッター	18cm	

(4) 試験結果

a) 曲げ試験の結果

各試験体の最終ひび割れ状況を図-9に示す。BT1-18の破壊状況を写真-1に示す。各試験体とも破壊は、RC部材の引張鉄筋の降伏による曲げ引張破壊となった。FFU部材は、曲げモーメントが $90\text{kN}\cdot\text{m} \sim 98\text{kN}\cdot\text{m}$ に達したとき、接合部に5cm~10cmの水平クラックが生じたが、RC部材が破壊した後も弾性的な挙動を示した。

曲げモーメント(M)と中央変位(δ)の関係について接合方式の違いによる比較を図-10に示す。同図には、曲げスパン200cm、断面40cm×40cmのRCはりの

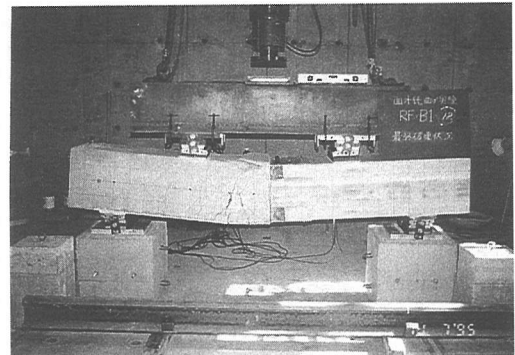


写真-1 曲げ試験体BT1-18の破壊状況

曲げ試験結果⁵⁾を比較のためにプロットした(以後、ZRCと呼ぶ)。ZRCの鉄筋量およびコンクリートの設計基準強度は、今回製作したRC部材と同じである。各試験体ともRC部材が破壊した後もMと δ は増加傾向を示したが、さらに載荷を続けると鉄筋が破断し急激な変位が生じると考え試験を中断した。

初期の直線範囲においてM/ δ の関係を曲げ剛性と定義し、M/ δ について比較すると各試験体のM/ δ は $16.7\text{kN}\cdot\text{m}/\text{mm} \sim 20.3\text{kN}\cdot\text{m}/\text{mm}$ となり、接合方法の違いによる力学的な特性に差は見られなかった。しかし、ZRCのM/ $\delta=29.4\text{kN}\cdot\text{m}/\text{mm}$ と比べると約30%~40%小さいことが解った。最大変位で比較する

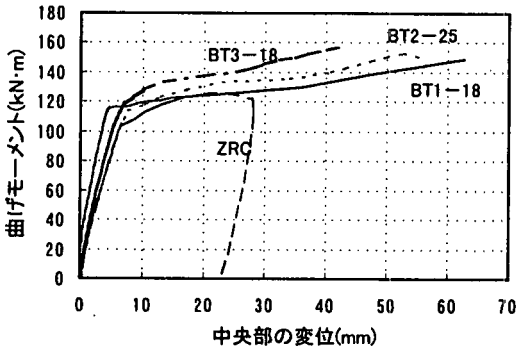


図-10 曲げモーメント(M)と中央変位(δ)の関係

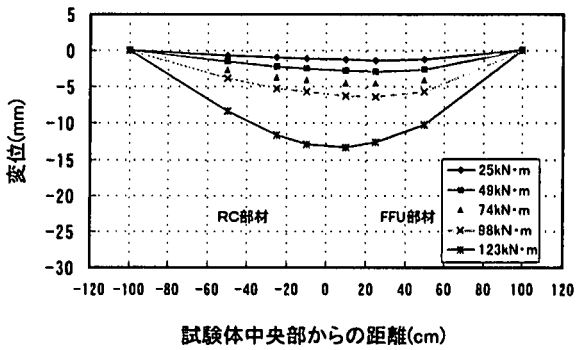


図-11 曲げ試験体 BT2-25 の変位分布

と、ZRC は変位が28mmに達したときコンクリートが圧縮破壊したのに対して、各試験体はδの増加と共にMも増加し続けている。これは複合部材が、ZRCに比べて高い靱性を持っていることを示している。

BT2-25 の変位分布を図-11に示す。RC部材とFFU部材の変位分布を比べると、FFU部材の方が約1mm~2mm大きくなっているが、これはRC部材の弾性係数(試験値 $1.80 \times 10^4 \text{N/mm}^2$)に比べてFFU部材の弾性係数が約1/2と小さいためである。各試験体とも引張鉄筋が降伏するまでは、接合部でのずれ量もなく、一体となって変位したことが解った。

最終破壊がRC部材で生じたので、RC部材の曲げ耐力について実測値と計算値の比較を行った。比較結果を表-9に示す。ここでの実測値は引張鉄筋が降伏したときの曲げモーメントである。また、計算値は複鉄筋長方形断面の曲げ終局耐力⁹⁾であり、式(1)を用いて求めた。なお、試験体の鉄筋比は、つり合鉄筋比(3%)より小さいので、計算値は引張鉄筋降伏先行型の曲げ終局耐力とし、実測値と比較を行った。

$$M_u = A_{s1} \cdot f_y \cdot \left(d_1 - \frac{a}{2}\right) + A_{s2} \cdot f_y' \cdot \left(\frac{a}{2} - d_2\right) \quad (1)$$

$$a = \frac{2 \cdot P_1 \cdot f_y - P_2 \cdot f_y'}{1.7 \cdot f_c'} \cdot d_1$$

- ここに M_u : 曲げ終局耐力 (kN·m)
 A_{s1} : 引張鉄筋の断面積 (mm²)
 A_{s2} : 圧縮鉄筋の断面積 (mm²)
 d_1 : はりの有効高さ
 $d_1 = 339 \text{mm}$ (ZRC $d_1 = 347 \text{mm}$)
 d_2 : 圧縮鉄筋のかぶり (mm)
 $d_2 = 61 \text{mm}$ (ZRC $d_2 = 53 \text{mm}$)
 P_1 : 引張鉄筋比
 P_2 : 圧縮鉄筋比

表-9 RC部材の曲げ耐力の実測値と計算値の比較

試験体名	鉄筋降伏時の荷重 (kN)	鉄筋降伏時の変位 (mm)	実測値 M (kN·m)	計算値 M_u (kN·m)
BT1-18	451	10.4	113	114
BT2-25	471	10.5	118	113
BT3-18	412	5.4	103	113
ZRC	451	4.2	112	112

f_t : 鉄筋の引張降伏強度(N/mm²)

f_c : 鉄筋の圧縮降伏強度(N/mm²)

f_c' : コンクリートの圧縮強度(N/mm²)

各試験体とも実測値と計算値はよく一致しており、ZRCと同等の曲げ耐力を有していることが確認できた。一方、鉄筋降伏時のFFU部材に発生した曲げ応力は、曲げモーメントとFFU部材の断面係数の関係から求めると $11.4 \text{N/mm}^2 \sim 13.1 \text{N/mm}^2$ と得られた。この値は、FFU基本物性値である引張強度の約9%~10%、軸圧縮強度の約15%~17%に相当し、FFU部材の曲げ耐力に対して余裕があったことを示している。

試験体を壊し接合部の状態を調査した結果は次の通りである。

- ①BT1-18, BT3-18は、接着鉄板とFFU部材とのずれ、剥離は生じていなかった。
- ②BT2-25は、引張鉄筋の引き抜けや圧縮鉄筋の押し込みは生じていなかった。
- ③FFU部材は、接着面での剥離は生じておらず、また、試験時に発生した変位も復元していた。

b) せん断試験の結果

各試験体の最終ひび割れ状況を図-12に示す。ST1-18の破壊状況を写真-2に示す。各試験体とも破壊は、逆対称加力点間の接合部ではなく端部のRC部材の斜め引張破壊となった。FFU部材は、ST1-18

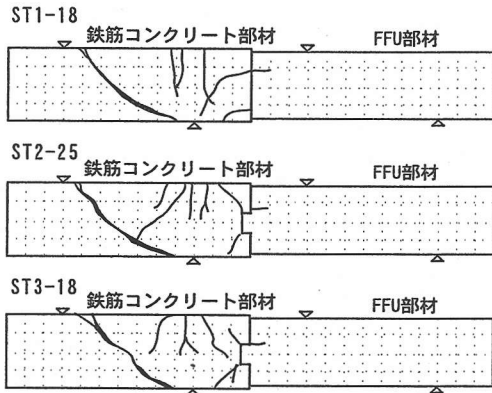


図-12 せん断試験体の最終ひび割れ状況

が荷重 280kN に達したとき、ST2-25 と ST3-18 が 343kN に達したとき、接合部に 5cm~10cm 程度の水平クラックが生じたが、RC 部材が破壊した後も弾性的な挙動を示した。

接合部に作用したせん断力と接合部中央の鉛直ずれ量の関係を図-13 に示す。このせん断力は荷重の 7/13 に相当する。各試験体とも鉛直ずれは約 200kN まで 0.1mm~0.2mm と微小であった。破壊時の鉛直ずれは、ST1-18 と比べて ST2-25、ST3-18 は約 1/5 程度となった。これはせん断力を負担したスタッドとコッターの違いであり、コッターの方がせん断に対して有効であったことを示している。

本試験では、接合部のせん断強さを確認できなかったが、下記に述べる理由から接合部は、RC 部材と同等以上のせん断強さを有していたと言える。今回の試験体は複合部材であるが、これを全て RC 部材とした場合の逆対称加力点間の計算で求めた終局せん断耐力は 208kN~216kN となる。これに対して接合部に作用した実測せん断力は 373kN~380kN であり、実測値は計算値の約 1.8 倍に相当するが、接合部は破壊しなかった。

ここでの計算値は、せん断スパン(a)と有効高さ(d)の比 a/d が約 2.0 のため、斜めひび割れの発生後ただちに破壊に至るせん断補強筋を用いない RC 部材のせん断耐力とし、式(2)を用いて求めた⁷⁾。

$$V_c = 0.2(P_w \cdot f'_c)^{1/3} \cdot (d/100)^{-1/4} \cdot \{0.75 + 1.4/(a/d)\} \cdot (100b_w \cdot d) \quad (2)$$

ここに V_c : 終局せん断耐力(kN)
 A_s : 引張鉄筋の断面積 $A_s = 99.3\text{mm}^2$
 d : はりの有効高さ $d = 339\text{mm}$
 b_w : はり幅 $b_w = 400\text{mm}$

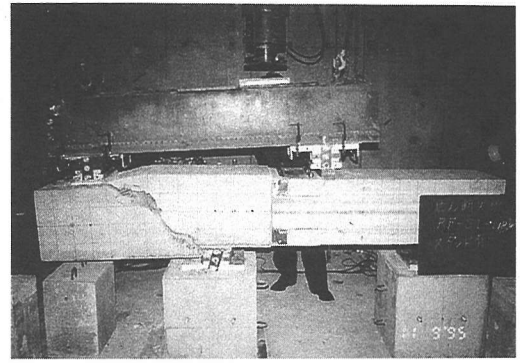


写真-2 せん断試験体 ST1-18 の破壊状況

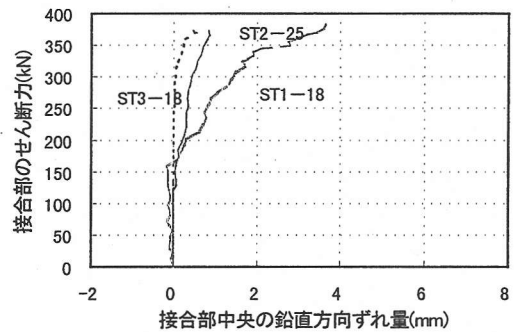


図-13 接合部のせん断力と鉛直ずれ量の関係

表-10 RC 部材のせん断耐力の実測値と計算値の比較

試験体名	最大荷重 (kN)	実測値 V (kN)	計算値 V_c (kN)
ST1-18	706	163	132
ST2-25	693	160	127
ST3-18	697	161	127

f'_c : コンクリートの圧縮強度(N/mm²)

a : せん断スパン a=600mm

接合部で破壊しなかった理由は、逆対称加力点間の FFU 部材が曲げ変形を起こしたこと、接合部に鉛直ずれが生じたことにより、逆対称加力点間の RC 部材がディープビーム的な挙動を示したためと想定される。

端部の RC 部材で破壊したので、RC 部材のせん断耐力について実測値と式(2)を用いて求めた計算値の比較を行った。比較結果を表-10 に示す。実測値は計算値より 23%~27% 大きく得られた。一方、破壊時の FFU 部材に発生したせん断力は、せん断力と FFU 部材の断面積の関係から求めると 1.1N/mm²

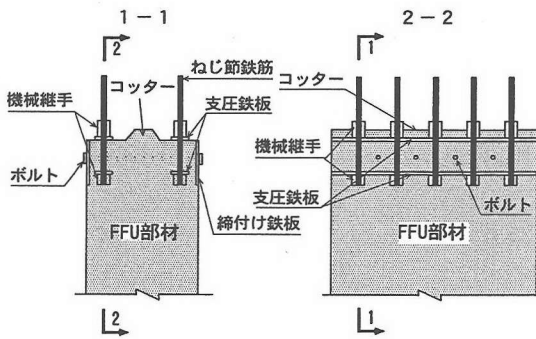


図-14 支圧アンカー接合

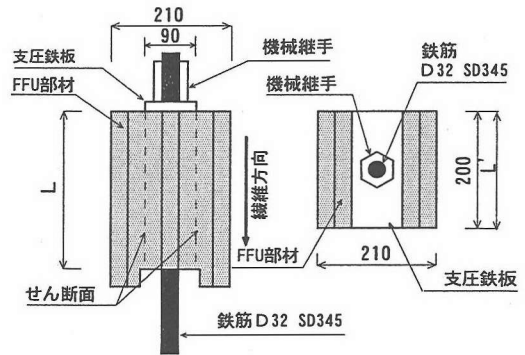


図-15 支圧アンカーの引張試験体の形状

と得られた。この値は、FFU 基本物性値の繊維直角方向のせん断強度の約 6.4%に相当し、FFU 部材のせん断耐力に対して余裕があったことを示している。試験体を壊し接合部の状態を調査した結果は次の通りである。

- ①スタッドは 4 本とも同じ形状で曲がっていたが、コッターの変形は無かった。
- ②ST1-18, ST3-18 は、接着鉄板と FFU 部材とのずれ、剥離は生じていなかった。
- ③ST2-25 は、引張鉄筋の引き抜けや圧縮鉄筋の押し込みは生じていなかった。
- ④FFU 部材は、接着面での剥離は生じておらず、また、試験時に発生した変位も復元していた。

c) 試験結果のまとめ

機械式接合、アンカー式接合およびフレア式接合は、RC 部材と同等の曲げ耐力、せん断耐力を有していることと、RC 部材に比べて曲げ剛性は約 30%～40%小さいが、高い靱性を持っていることが確認できた。また、接合部のせん断抵抗を高めるためには、コッターが有効であることと、コッターの材質は FFU でよいことを確認した。

接合部の製作面および経済性から見れば、機械式接合は構造が複雑であり費用が高くなる。一方、フレア式接合は、鉄筋径が大きくなると溶接に欠陥が起りやすく信頼性が低下する問題があると言われて⁹⁾いる。

以上の結果から FFU 部材と RC 部材の接合方法は、アンカー式接合が適していると判断された。

4. 支圧アンカーの引張耐力

(1) 目的

前述の試験結果よりアンカー式接合を選定したが、この接合方法は、FFU 部材と鉄筋の定着を接着剤で

表-11 支圧アンカーの引張試験のケース

試験体名	鉄筋挿入長さ(L)	試験体の形状 (cm) 支圧鉄板の形状 (cm)
FV-10	10cm	幅 21×長さ 20× 高さ 10~40 幅 9×長さ 20×厚さ 1.2
FV-20	20cm	
FV-30	30cm	
FV-40	40cm	

行っているため、次の問題がある。

- ①FFU 部材と鉄筋の定着長さは、鉄筋の径と材質によって大きく変化する。
- ②FFU 部材と鉄筋の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。

上記の問題に対してアンカー式接合で対応するには限界があるため、図-14 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接合を考えた。この接合方法は、鉄筋の引き抜けを FFU 繊維方向のせん断強さで抵抗させる考え方である。

そこで、FFU 部材への鉄筋挿入長さを決めるための支圧アンカーの引張試験を実施した。

(2) 支圧アンカーの引張試験

a) 試験ケースと試験方法

試験のケースは、表-11 に示すように、FFU 部材への鉄筋挿入長さの違いとした。試験体形状を図-15 に示す。使用したねじ節鉄筋は SD345, D32 である。計測項目はアムスラーの荷重と鉄筋頭部の変位である。

b) 試験結果

試験結果を表-12 に示す。同表に示す FFU 部材のせん断耐力は、支圧鉄板両側の FFU 繊維方向のせん断強さとし、式(3)で求めた値である。

表-12 支圧アンカーの引張試験結果

試験体名	引張最大荷重 (kN)	鉄筋頭部変位 (mm)	支圧鉄板の平均応力 (N/mm ²)	破壊モード	FFU 部材のせん断耐力 V_f (kN)
FV-10	370	—	—	FFU 破壊	365
FV-20	475	2.4	26.4	鉄筋破断	730
FV-30	474	2.5	26.3	鉄筋破断	1094
FV-40	473	1.8	26.3	鉄筋破断	1459

$$V_f = 2L \cdot L' \tau_m \quad (3)$$

ここに V_f : FFU 部材のせん断耐力(N)

L : FFU 部材への鉄筋挿入長さ(mm)

L' : 支圧鉄板の長さ(mm)

τ_m : FFU 繊維方向のせん断強度(N/mm²)

FV-10 は、鉄筋の引張荷重が FFU 部材のせん断耐力 (V_f) に達した直後に、FFU 部材が割れつ破壊を起こした。他の試験体は鉄筋破断する結果が得られ、破断時の荷重は V_f の 32%~65% であった。支圧鉄板は FFU 部材に 2mm~3mm くい込んだが、FFU 部材にクラックは発生しなかった。また、鉄筋破断時の支圧鉄板の平均応力は 26.3N/mm² と得られた。この値は支圧応力であるが FFU 繊維方向の圧縮強度の約 34% に相当する。

以上の結果より FFU 部材への鉄筋挿入長さ (L_s) は、鉄筋の引張強さと FFU 繊維方向のせん断強度の関係から、式(4)を用いて求めることとした。

$$L_s = \frac{f_u \times A_s}{2 \times s \times \tau_m} \quad (4)$$

ここに L_s : FFU 部材への鉄筋挿入長さ(mm)

f_u : 鉄筋の引張強度(N/mm²)

A_s : 鉄筋の断面積(mm²)

s : 鉄筋の最小ピッチ(mm)

τ_m : FFU 繊維方向のせん断強度(N/mm²)

5. コッターによるせん断伝達効果

(1) 目的

支圧アンカー接合の接合面は、図-14 に示すように、コッターと機械継手により FFU 部材と RC 部材を接合する構造である。したがって、接合部のせん断耐力は「コッターのせん断伝達効果」と「機械継手のせん断抵抗」の累加となる。そこで、コッター有りの試験体とコッター無しの試験体のせん断強さの差が「コッターのせん断伝達効果」と考え、これを確認することを目的として曲げせん断試験を実施した。

表-13 試験のパラメータ

試験体名	試験条件
SK-74V	コッター有り
SN-N	コッター無し

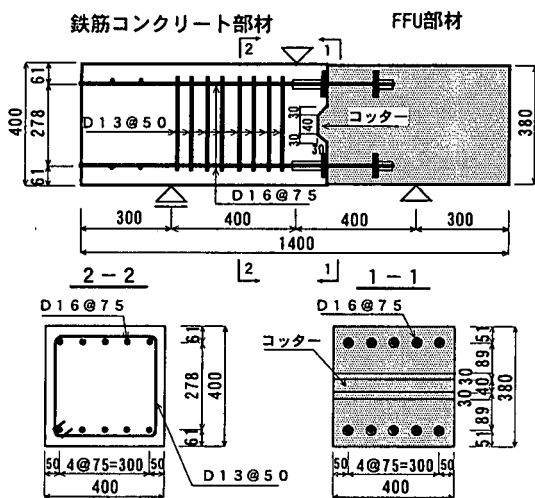


図-16 曲げせん断試験体の形状

(2) 曲げせん断試験

a) 使用材料

コンクリートは設計基準強度 23.5N/mm² を使用した。鉄筋はねじ節鉄筋の SD345, D16 を、支圧鉄板は SS400, t=9mm を使用した。

b) 試験ケース

試験ケースを表-13 に示す。試験体形状は、図-16 に示すように、実物の 1/2 縮尺モデルの複合部材である。FFU 部材への鉄筋挿入長さは、式(4)で求めた値に安全率 1.5 を掛けて 16cm とした。コッター形状は、せん断長さ 10cm, 深さ 3cm, コッター角度 0.785rad とした。なお、鉄筋および接合面には表-7 に示す安定液を塗布した。

c) 試験方法

加力方法は、1点集中荷重を受ける曲げスパン 80cm の単純ばり形式の一方方向単調載荷とした。その他の試験方法は「3.(2)曲げ試験」と同じである。

d) 試験結果

各試験体の最終ひび割れ状況を図-17 に、SK-74V の破壊状況を写真-3 に示す。接合部のせん断力と接合部中央の鉛直ずれ量の関係を図-18 に示す。コッター有りの SK-74V は、せん断力 325kN まで鉛直ずれは生じなかった。その後、RC 部材は、コッター先端から載荷点の方向にクラックが発生し、載荷不可能となった。試験体を壊しコッター部の状態を調

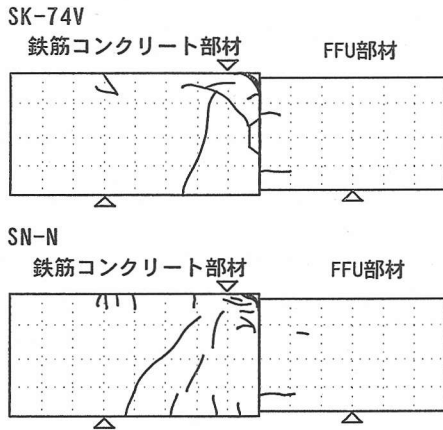


図-17 曲げせん断試験体の最終ひび割れ状況

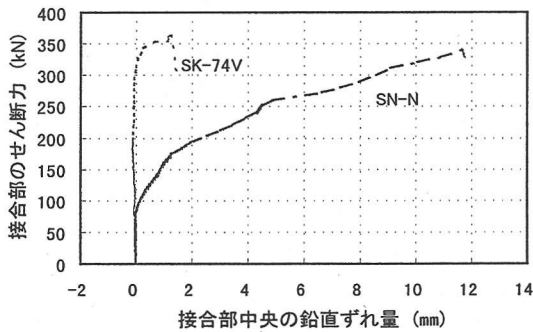


図-18 接合部のせん断力と鉛直ずれ量の関係

査した結果、コッターの変形は見られなかった。

一方、コッター無しの場合のSN-Nはせん断力88.3kNまで鉛直ずれは生じなかったが、その後はせん断力の増加とともに鉛直ずれも大きく発生した。また、RC部材は、上側の機械継手の押し上げにより多数のクラックが発生した。

本試験は曲げせん断試験のため、せん断抵抗には接合面の摩擦力が含まれているが、鉛直ずれが発生するまでのせん断力で比較すると、コッターが負担したせん断力は約73%程度であったと推定される。

以上の結果より、接合部のせん断耐力は、コッターのせん断伝達効果が大きな比重を占めていることが明らかとなった。

6. 実物大試験体の力学的挙動

(1) 目的

支圧アンカー接合の実用性を確認することを目的として、実物大モデルでの曲げ試験とせん断試験を実施した。

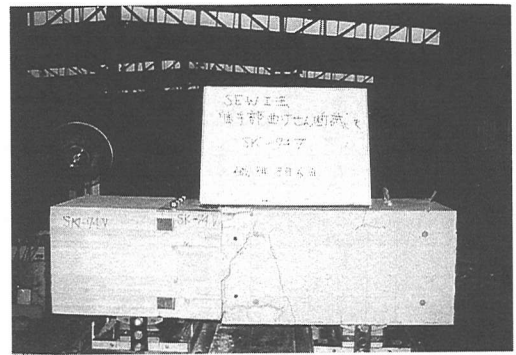


写真-3 曲げせん断試験体SK-74の破壊状況

表-14 コンクリートの試験結果(材令28日)

試験体	圧縮強度(N/mm ²)
支圧アンカー接合	35.8

表-15 鉄筋の引張試験結果

鉄筋の種類	降伏点(N/mm ²)	引張強さ(N/mm ²)	伸び(%)
D32, SD345			
ねじ節鉄筋	369	571	22.3

表-16 実物大試験のケース

試験	試験体名	鉄筋挿入長さ(L)	使用鉄筋(鉄筋比)
曲げ	B-80	25cm	SD345, D32@150 (0.92%)
せん断	S-80	25cm	

(2) 曲げ試験とせん断試験

a) 使用材料

コンクリートは設計基準強度29.4N/mm²である。材令28日の試験結果を表-14に示す。

鉄筋はねじ節鉄筋のSD345, D32である。引張試験結果を表-15に示す。

支圧鉄板はSS400, t=12mmとした。

b) 試験ケース

試験ケースを表-16に示す。曲げとせん断の試験体形状は、図-19、図-20に示すように、実物大の複合部材である。FFU部材への鉄筋挿入長さは、式(4)で求めた値に安全率1.5を掛けて25cmとした。コッター形状は、せん断長さ10cm、深さ3cm、コッター角度0.785radとした。なお、鉄筋および接合面には表-7に示す安定液を塗布した。

c) 試験方法

曲げ試験の加力方法は、2点集中荷重を受ける曲げスパン300cmの単純ばり形式の一方向単調載荷とした。せん断試験は、せん断スパン50cmの大野式

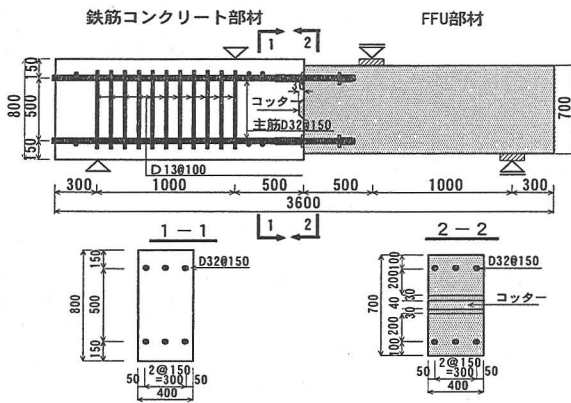


図-19 曲げ試験体の形状

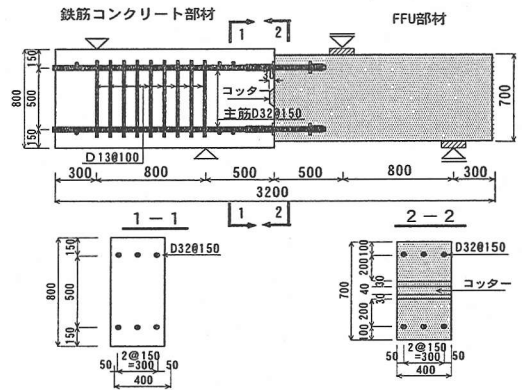


図-20 せん断試験体の形状

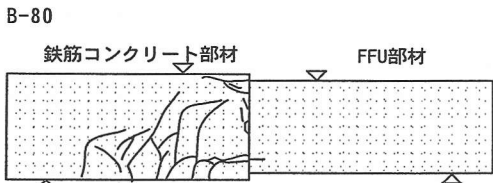


図-21 曲げ試験の最終ひび割れ状況

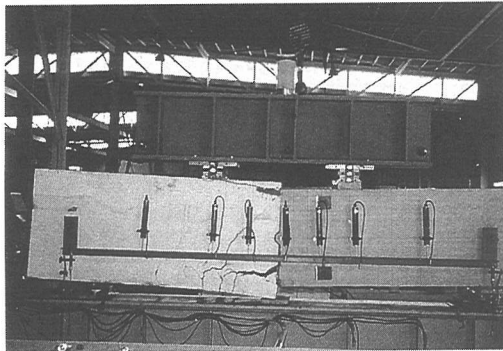


写真-4 曲げ試験体 B-80 の破壊状況

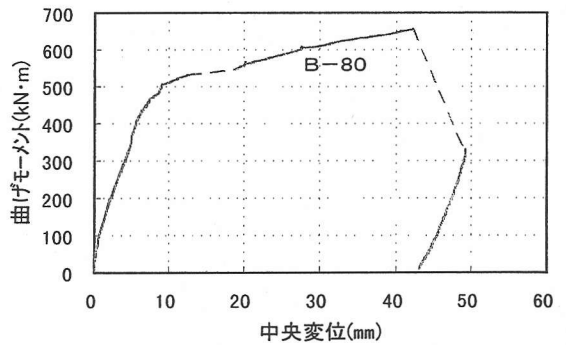


図-22 曲げモーメントと中央変位の関係

表-17 曲げ耐力の実測値と計算値の比較

試験体名	鉄筋降伏時の荷重 (kN)	鉄筋降伏時の変位 (mm)	実測値 M (kN·m)	計算値 M_u (kN·m)
B-80	1022	10.3	511	561

鉄筋降伏後も曲げモーメントは増加し、複合部材は高い靱性を有していることが解った。RC部材の曲げ耐力について実測値と計算値の比較を表-17に示す。ここでの実測値は引張鉄筋が降伏したときの曲げモーメントで、計算値はRC部材の曲げ終局耐力であり、式(1)を用いて求めた。実測値は計算値の0.91倍と得られた。一方、鉄筋降伏時の曲げモーメントからFFU部材に発生した曲げ応力を求めると 15.6N/mm^2 と得られた。この値は、FFU基本物性値である引張強度の約12%、軸圧縮強度の約20%に相当し、FFU部材の曲げ耐力に対して余裕があったことを示している。

試験体の変位分布を図-23に示す。RC部材が破壊するまでのRC部材とFFU部材は、両者の変位量に明確な差は見られず、また、接合部でのずれ量も

逆対称せん断加力法の一方向単調載荷とした。その他の試験方法は「3.(2)曲げ試験」と同じである。

(3) 曲げ試験とせん断試験の結果

曲げ試験の最終ひび割れ状況を図-21に、破壊状況を写真-4に示す。B-80の破壊は、RC部材の引張鉄筋の降伏による曲げ引張破壊となった。FFU部材は、曲げモーメントが $329\text{kN}\cdot\text{m}$ に達したとき、15cm程度の水平クラックが発生したが、RC部材が破壊するまで弾性的な挙動を示した。

曲げモーメントと中央変位の関係を図-22に示す。

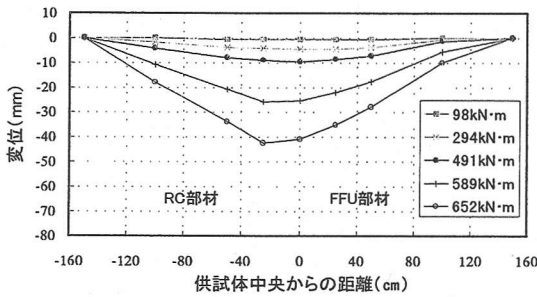


図-23 曲げ試験体 B-80 の変位分布

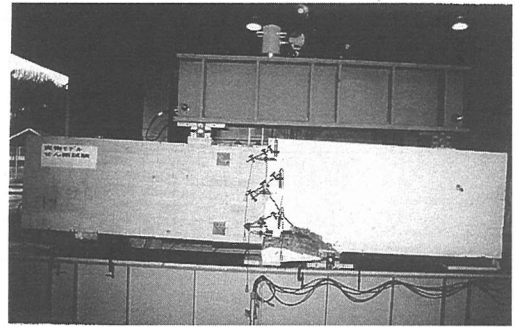


写真-5 せん断試験体 S-80 の破壊状況

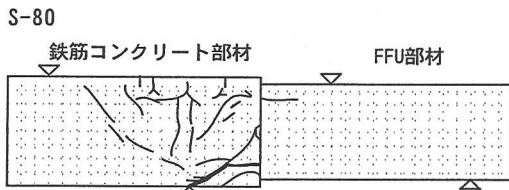


図-24 せん断試験の最終ひび割れ状況

なく、一体となって変位したことが解った。さらに、RC 部材にクラックが発生しても、FFU 部材は弾性的な変形挙動を示した。

せん断試験の最終ひび割れ状況を図-24 に、破壊状況を写真-5 に示す。S-80 は、接合部に作用するせん断力が 559kN のときコッター先端から支承方向に向かってコンクリートに斜めひび割れが発生し、832kN に達したとき接合部のコンクリートが壊れた。FFU 部材は、せん断力が 545kN に達したとき、25cm 程度の水平クラックが生じたが、RC 部材が壊れるまで弾性的な挙動を示した。

接合部のせん断力と鉛直ずれ量の関係を図-25 に示す。鉛直ずれ量の計測は、接合部のコンクリート上端から 15cm の位置(VU)と 65cm の位置 (VL) で行った。鉛直ずれは、せん断力が 400kN まで 2mm と僅かであった。変位計(VU)の鉛直ずれ量は、せん断力が 400kN に達した直後に急激に増加し始めたが、これはコッター先端付近に発生したクラックの影響を受けたためである。

接合部のせん断耐力について実測値と計算値の比較を表-18 に示す。ここでの計算値は RC の終局せん断耐力であり、式(2)を用いて求めた。実測値は計算値より 1.2 倍大きく得られた。一方、破壊時のせん断力から FFU 部材に発生したせん断応力を求めると 2.0N/mm^2 と得られた。この値は、FFU 基本物性値の繊維直角方向のせん断強度の約 12% に相当し、FFU 部材のせん断耐力に対して余裕があったこ

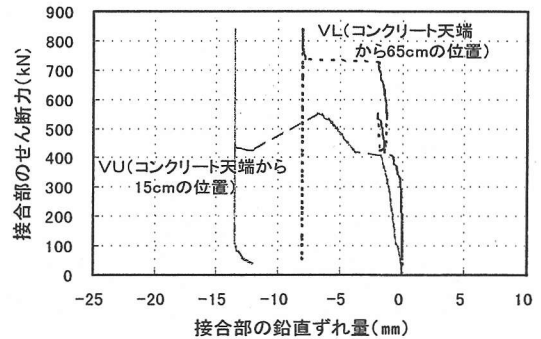


図-25 接合部のせん断力と鉛直ずれ量の関係

表-18 せん断耐力の実測値と計算値の比較

試験体名	せん断破壊時の荷重 (kN)	実測値 V (kN)	計算値 V_c (kN)
S-80	1258	559	477

とを示している。

以上の結果より実物大モデルでも支圧アンカー接合は、RC と同等の曲げ耐力およびせん断耐力を有していることが確認できた。

7. 結論

FFU 部材と RC 部材を接合した複合部材の構造材料としての可能性を検討するために行った一連の研究について報告した。本研究から以下の結論が得られた。

- ①FFU 部材の構成方式は、荷重方向に対して FFU の積層方向を直角とする方が構造材料に適していることが明らかとなった。
- ②機械式接合、アンカー式接合、フレア式接合は、ともに RC 部材と同等の曲げ耐力、せん断耐力を有することが確認できた。
- ③複合部材は、RC 部材で破壊し、FFU 部材は弾性

的な挙動を示し破壊しないことが確認できた。

- ④FFU 部材の曲げ耐力およびせん断耐力は、RC 部材の耐力に比べて余裕があることが確認できた。
- ⑤複合部材は、RC 部材に比べて曲げ剛性は約 30%~40%小さいが、高い靱性を持っていることが確認できた。
- ⑥接合部に設けたコッターは、せん断力を確実に伝達できる方法であることと、コッターの材質は FFU でよいことが確認できた。
- ⑦構造性能および経済性の観点からアンカー式接合が、FFU 部材と RC 部材の接合方法に最も適していることが明らかとなった。
- ⑧支圧アンカー接合の FFU 部材への鉄筋の挿入長さは、鉄筋の引張強さと FFU 繊維方向のせん断強さの関係から求められることが確認できた。
- ⑨支圧アンカー接合は、実物大モデルでも RC 部材と同等の曲げ耐力、せん断耐力を有することが解り、実用に十分耐え得ることを確認した。
- ⑩FFU 部材と RC 部材を接合した複合部材は、構造材料として利用できることが明らかとなった。

今後の課題は、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、部材形状によって曲げ耐力およびせん断耐力が変化することが考えられるので、FFU 部材の形状効果について研究する考えである。また、本研究結果を基に、FFU 部材を RC 部材に複合させたシールド直接発進工法の開発を進めてゆく考えである。

謝辞：本研究は積水化学工業と共同で実施したものである。試験を実施するに当たっては、長岡技術科学大学 環境・建設系コンクリート研究室の皆様

多くの御指導と御助言をいただいた。また、積水化学工業の大島祥嗣氏、谷口良一氏、錢高組の原沢堅也氏、森本敏幸氏、水取和幸氏から適切なアドバイスをいただいた。ここに、関係各位に深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 土木学会：連続繊維補強材を用いたコンクリート構造物の設計・施工指針(案)、コンクリートライブラリー88、1997.9.
- 2) 鉄道技術研究所速報：合成まくらぎの実用性能、NO.A-87-71、1987.3.
- 3) 橋本崇、青柳計太郎、丸山久一：FFU のグラウンドアンカー受圧板への適応に関する研究、土木学会第 51 回年次学術講演会講演梗概集 第 6 部、pp.244~245、1996.
- 4) 園田徹士、中村稔、新井時夫、宮田弘之介、栗原和夫：NOMST の開発、土木学会論文集、No.522/VI-28、pp.31~34、1995.9.
- 5) 森本敏幸、石田忠、石川康夫、保足彦彦、笠松照親、小林恒一：地中連続壁の構造機能の拡充に関する研究(その 4、壁間剛接接合の面外曲げせん断試験および面外曲げ試験)、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.1569~1570、1994.9.
- 6) 吉川弘道：鉄筋コンクリートの解析と設計、丸善、pp.67~96、1996.
- 7) 二羽淳一郎、山田一字、横沢和夫、岡村甫：せん断補強鉄筋を用いない RC 部材のせん断強度式の再評価、土木学会論文集、No.372/V5、pp.167~176、1986.8.
- 8) 溶接工作規準Ⅳ・同解説：サブマージアーク自動溶接、日本建築学会、pp.45~46、1994.

(1998. 4. 27 受付)

CONNECTING METHOD OF FFU MEMBER TO RC MEMBER AND ITS EFFECTIVENESS IN MECHANICAL BEHAVIOR

Kazuyuki FUKADA, Kyuichi MARUYAMA and Kazuyuki TAKENAKA

A vertical shaft of the shield tunneling method requires a bearing pile-wall to resist earth pressure at excavation. Then, the part of the pile-wall should be cut at proceeding a shield tunnel. Therefore, the most desirable material property of the shaft is a sufficient resistance against bending moment, and is also easiness to be cut by shear force. For this purpose the authors have developed a hybrid member which consists of a fiber reinforced foamed urethane (FFU) member and a reinforced concrete member. The key of the hybrid member lies in the way how to connect both members. The authors initially proposed three connection methods, such as a mechanical connection, an anchor connection and a flare welding connection. The mechanical behaviors of these three connections were examined experimentally and the anchor connection was found out as the most desirable connection. Finally, the full scale model was tested and was proved to be sufficient for actual use.