

シールド直接発進到達工法の開発および FFU 部材と H 鋼部材の接合方法の研究

深田 和志¹・丸山 久一²・山内 秀夫³・谷口 良一⁴・竹中 計行⁵

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積水化学工業(株) 営業推進部 課長 (〒105-8450 東京都港区虎ノ門 2-3-17)

⁴積水エフ・エフ・ユー工業(株) エンジニアリング部 主任技師 (〒529-1100 滋賀県犬上郡豊郷町高野瀬 193-1)

⁵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、立坑掘削時には土圧・水圧に抵抗し、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、曲げ抵抗は大きい容易に切断できる FFU (硬質発泡ウレタン樹脂をガラス長繊維で補強した材料) 部材の力学的特性および、FFU 部材と H 鋼部材との接合方法を実物大モデルで検討したものである。接合方法としては、コッター式接合、接着式接合の 2 方法を取り上げ、最適な接合方法を検討すると共に、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、構造性能の最も優れた接着式接合について確認試験を行い、実用に十分耐えることを確かめた。

Key Words : FFU, steel pile, composite member, jointing method, structural behavior

1. はじめに

都市部では、地下鉄、上下水道、電気通信設備等の社会資本を道路等の公共用地下に建造する場合が多く、これらのトンネル掘削では、円形、矩形や円形を上下左右に並べた複円形のシールド工法が多く採用されている。また、今後の社会資本整備にあたっては、限られた地下空間を有効利用する観点から掘削深度は深くなる傾向にあり、これら地下開発の主流となるのがシールド工法である。

シールド工法の中で施工上重要な位置を占めているのがシールド機の発進・到達である。従来の発進・到達は、薬液注入工法や高圧噴射攪拌工法等による地盤改良が行われ、その後人力または機械によって鏡切が行われているため、安全面、コスト面からこれに替わる施工方法が望まれている¹⁾。

筆者らは、従来工法の抱える諸課題を解決するため、図-1 に示すように、土留め壁のシールド機が通過する部分に高強度で耐久性に優れた性質を持つ新素材を組み込み、シールド機が直接新素材を切削して発進または到達することのできる直接発進・到達工法の開発を進めている。

土留め壁としては、鉄筋コンクリート地中連続壁、柱列式連続壁等があるが、既に鉄筋コンクリート地中連続壁については、新素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について検討を行い、最適な接合方法を選定し、土圧・水圧に十分抵抗できる複合部材であることを確認している²⁾。しかし、よく採用される土留め壁は、H 鋼を芯材とする柱列式連続壁のため、新素材と H 鋼部材の接合した複合部材の可能性について検討を行う必要があった。

ここで新素材とは、鉄道のまくらぎやアースアンカーの受圧板として使用実績のある硬質発泡ウレタン樹脂をガラス長繊維で補強した FFU (Fiber reinforced Foamed Urethane) のことである^{3), 4)}。

シールド直接発進・到達工法としては、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み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⁵⁾。

本研究は、FFU 部材の力学的特性および、FFU 部材と H 鋼部材 (以降、H 鋼と呼ぶ) の接合された複合部材の構造材料としての可能性を実物大モデルで検討したものである。前者は FFU 部材の形状の違いによる力学的特性を把握するための試験を行った。後者は不連続となる接合

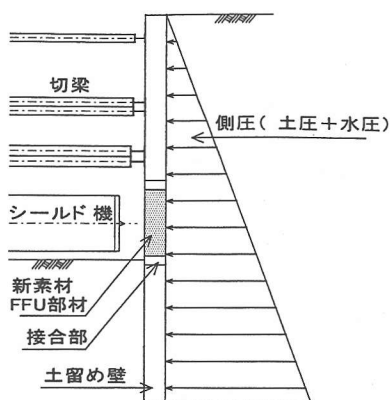


図-1 シールド直接発進工法の概要

表-2 FFU 部材の曲げ試験のケース

試験体名	高さ H (mm)	幅 B (mm)	曲げスパン L_b (mm)
B-20	200	100	1800
B-30	300	150	2200
B-40	400	200	2600
B-50	500	250	3000
B-60	600	300	3400
B-70	700	350	3600

部の応力伝達が確実にできる接合方法が不明であるので、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。

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 部材の力学的特性

(1) FFU の特性

FFU は、硬質発泡ウレタン樹脂とガラス長繊維からなる材料であり、通常厚さ 3 セチ、幅 60 セチの長尺材として製造され、長尺方向にガラス繊維が挿入された材料である。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。

本研究では、FFU 部材は一方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。JIS の木材試験に準じて求められた FFU の基礎物性値^{3),4)}に筆者らが行った試験結果を追加したものを表-1 に示す。

(2) 目的

FFU 部材は、繊維方向と繊維直角方向で強度特性が異なる材料のため、部材の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。そこで、FFU 部材の高さの違いによる力学的特性を把握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。

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	60.8
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	5.21
圧縮弾性係数 (N/mm ²)	1.08×10^4	6.47×10^2
引張弾性係数 (N/mm ²)	9.66×10^3	5.09×10^2
せん断強度 (N/mm ²)	9.10	17.3
引張強度 (N/mm ²)	127	3.03
接着せん断強度	母材破壊	

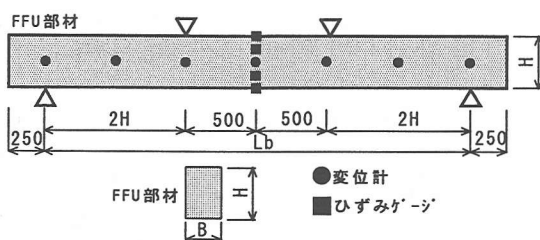


図-2 FFU 部材の曲げ試験体の形状

(3) 曲げ試験

a) 試験ケース

曲げ試験のケースを表-2、試験体形状を図-2 に示す。試験体の断面は、H 鋼断面を想定し高さは 200mm～700mm、幅は 100mm～350mm とした。

b) 試験方法

荷重試験は 1962kN アムスラーを使用し、試験体 B-20～B-60 の加力は、2 点集中荷重を受ける単純ばり形式の一方単調荷重とした。B-70 は、予想破壊荷重が荷重試験機的能力を超えるため、発生曲げモーメントを大きくできる 1 点集中荷重の一方単調荷重とした。

計測項目は、アムスラーの荷重、FFU 部材のひずみと試験体の変位である。破壊に至るまでのクラックの進展状況は目視により観察した。

(4) せん断試験

a) 試験ケース

せん断試験のケースを表-3、試験体形状を図-3 に示す。試験体の断面は、H 鋼断面を想定し高さは 300mm～440mm、幅は 300mm～350mm とした。

表-3 FFU 部材のせん断試験のケース

試験体名	高さ H (mm)	幅 B (mm)	せん断スパン L_s (mm)
S-30	300	300	131 (7H/16)
S-35	350	350	153 (7H/16)
S-44	440	300	193 (7H/16)

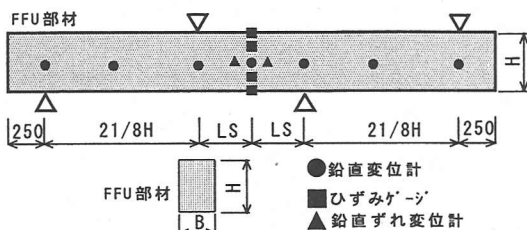


図-3 FFU 部材のせん断試験体の形状

b) 試験方法

加力は大野式逆対称せん断加力法の一方向単調載荷とした。計測項目は曲げ試験と同じである。

(5) 試験結果

a) 曲げ試験の結果

試験体 B-40 の最終クラック状況を図-4、破壊状況を写真-1 に示す。B-20～B-50 は、FFU 部材の繊維方向のせん断破壊であり、各試験体とも部材端部から荷重点に向かって中立軸付近に水平クラックが発生した。B-60 はアムスラーの能力限界である 1944kN を載荷したが、破壊させることはできなかった。また、B-70 は 1527kN まで載荷したが、これ以上載荷すると危険と判断し試験を中止した。したがって、B-60、B-70 は最大曲げモーメントが得られていない。

各試験体とも FFU 部材は、荷重位置において鉛直方向に長さ 20mm～30mm の亀裂が生じたが、FFU 部材の全長に渡って水平クラックが発生するまで FFU 接着面での剥離は生じず弾性的な挙動を示した。

各試験体の曲げモーメント (M) と中央変位 (δ) の関係を図-5 に示す。FFU 部材の高さが大きくなると最大曲げモーメントは大きくなっているが、 M と δ の関係は直線状態から曲線状態へと移行する傾向にある。

B-40 の変位分布を図-6 に示す。FFU 部材は、ウレタン内にガラス繊維が均質に配置されているとは限らないが、変位量が左右対称に生じていることは、FFU 部材の物性がガラス繊維方向 (部材軸方向) にほぼ均等であることを示している。また、破壊するまで弾性的な変形挙動を示した。

B-40 のひずみ分布を図-7 に示す。ひずみ分布は、破壊するまで中立軸が FFU 部材の中心にあり、ほぼ直線関

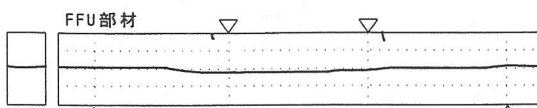


図-4 曲げ試験体 B-40 の最終クラック状況

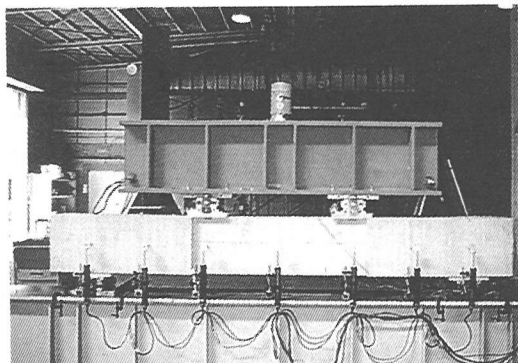


写真-1 曲げ試験体 B-40 の破壊状況

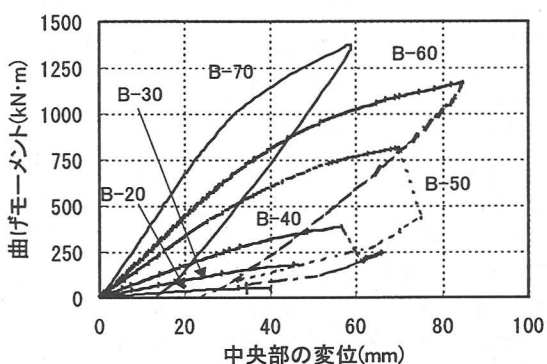


図-5 FFU 部材の曲げモーメントと中央変位の関係

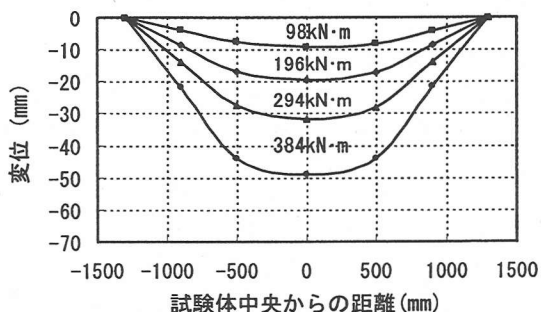


図-6 曲げ試験体 B-40 の変位分布

係にある。しかし、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、破壊時は引張ひずみ (7574μ) に対して圧縮ひずみの発生率が 67% の 5091 μ である。この現象は B-20 で 104%、B-30 で 89%、B-50 で 65% と得ら

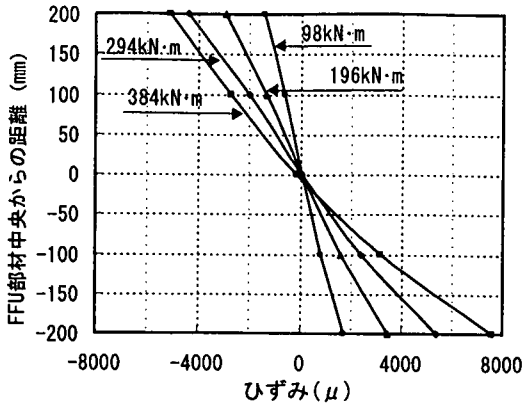


図-7 曲げ試験体B-40のひずみ分布

れ、FFU 部材の高さが大きくなると圧縮ひずみの発生量は少なくなっている。引張側と圧縮側のひずみ量に差が生じた理由は、FFU の引張弾性係数 (9.66kN/mm²) と圧縮弾性係数 (10.8kN/mm²) の違いであり、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ためである。

FFU 部材に発生した最大曲げ応力度を表-4に示す。この値は、最大曲げモーメントをFFU 部材の断面係数で除して求めたものである。FFU 部材破壊時におけるひずみ量は引張側と圧縮側で異なるが、ひずみ分布が部材中心を通過するほぼ直線関係にあるので、平面保持の仮定が成り立つものと仮定した。

B-20～B-50 の最大曲げ応力度は 72.1N/mm²～79.4N/mm²と得られ、FFU 部材の高さの違いによる明確な差は見られなかった。この値はFFU 基礎物性値の約 50%～55%に相当する。B-60、B-70 は、試験体を破壊できなかったため最大曲げ応力度は求められていないが、他の試験体と同様にFFU 部材に水平クラックが発生するまで曲げ応力度は増加するものと推定される。

試験体が破壊した B-20～B-50 の曲げ割線弾性係数を表-5に示す。この値は、最大荷重の約 1/2 の荷重と、その時の試験体中央部の変位の関係から式(1)を用いて求めた。

$$E = \frac{pa}{12I\delta} \left(\frac{3}{4} \ell^2 - a^2 \right) \quad (1)$$

ここに E : FFU 部材の曲げ割線弾性係数 (N/mm²)
 p : 最大荷重の約 1/2 の荷重 (kN)
 δ : 試験体中央部の変位量 (mm)
 I : 試験体の断面二次モーメント (mm⁴)
 ℓ : 曲げスパン (mm)
 a : 載荷点の距離 (mm)

曲げ割線弾性係数は 6.96kN/mm²～11.3kN/mm²と得られ、FFU 部材の高さが大きくなると小さくなっており、この

表-4 FFU 部材の最大曲げ応力度

試験体名	最大荷重 (kN)	最大曲げモーメント (kN・m)	最大曲げ応力度 (N/mm ²)	破壊形状
B-20	265	52.9	79.3	FFU 部材端部からのせん断破壊
B-30	596	179	79.4	
B-40	961	385	72.1	
B-50	1627	814	78.1	
B-60	1944	1166	64.8 以上	破壊できず
B-70	1527	1374	48.1 以上	

表-5 FFU 部材の曲げ割線弾性係数

試験体名	最大荷重の約 1/2 (kN)	変位 (mm)	曲げ割線弾性係数 (kN/mm ²)
B-20	132	13.2	11.3
B-30	298	17.3	8.37
B-40	481	18.6	7.13
B-50	814	21.3	6.96

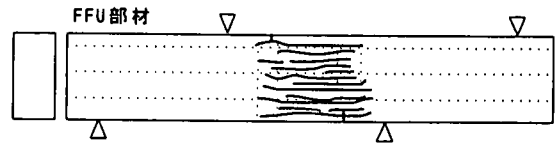


図-8 セン断試験体S-35の最終クラック状況

値はFFU 基礎物性値の 80%～131%に相当する。

b) セン断試験の結果

試験体 S-35 の最終クラック状況を図-8、破壊状況を写真-2に示す。各試験体は、載荷重が 933kN～1067kN に達したとき逆対称加力点間のFFU 部材に多数の水平クラックが発生した。また、載荷重が 1030kN～1109kN に達したとき載荷位置において、FFU 部材には鉛直方向に長さ 10mm～20mm の亀裂が生じたが、試験終了まで接着面での剥離は生じなかった。

各試験体のせん断力 (τ) と中央部鉛直ずれ量 (δ_v) の関係を図-9に示す。 τ は逆対称加力点間の値であり、載荷重の 3/4 に相当する。 δ_v は、図-3に示すように、試験体の中心から左右 50mm 離れた位置でのFFU 部材鉛直方向の変位差である。各試験体の τ と δ_v の関係は、約 700kN～800kN まで比例関係にあり、 δ_v は 5mm～8mm 程度であった。その後、FFU 部材に水平クラックが発生し急激に δ_v が増加し始めたが、FFU 部材はガラス繊維が抵抗し鉛直方向に破断する傾向は見られなかった。

FFU 部材に発生した最大せん断応力度を表-6に示す。この値は、逆対称加力点間の最大せん断力をFFU 部材の断面積で除して求めたものである。

最大せん断応力度は 8.85 N/mm²～12.1N/mm²と得られ、FFU 部材の高さが大きくなると小さくなる傾向にあり、この値はFFU 基礎物性値の 51%～70%に相当する。

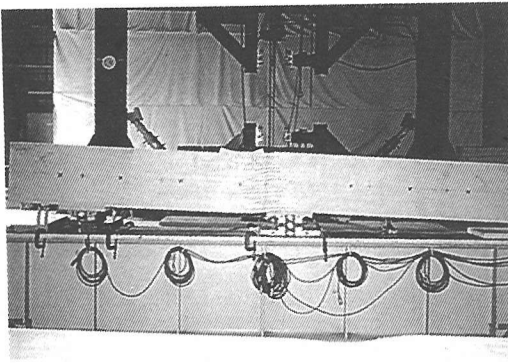


写真-2 セン断試験体 S-35 の破壊状況

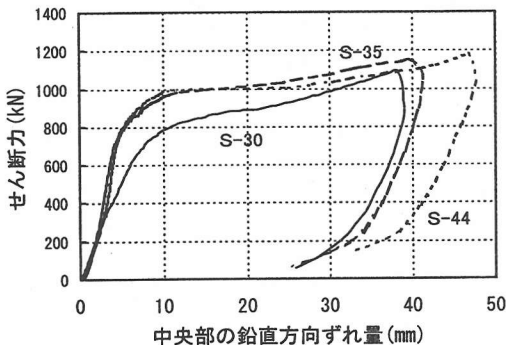


図-9 セン断力と鉛直ずれ量の関係

c) 試験結果のまとめ

FFU 部材は、曲げ変形すると繊維方向でせん断破壊を起し易い材料である。また、引張ひずみは圧縮ひずみより大きく発生するが、中立軸はFFU 部材の中心にあり、ひずみ分布はほぼ直線関係にあることが確認できた。

FFU 部材の最大曲げ応力度は、部材の高さ 200mm～500mm の範囲では、部材の高さの違いによる明確な差は見られなかった。この値はFFU 基礎物性値と比べると約 50%低いことが確認できた。また、H鋼の最大曲げ応力度 (392N/mm²) と比べると約 1/5 と小さいが、H鋼に比べてFFU 部材の断面係数は約 5 倍大きいため、最大抵抗曲げモーメントでは両者に差がないことが確認できた。

FFU 部材の曲げ割線弾性係数は、部材の高さが大きくなると小さくなるが、FFU 基礎物性値と比べるとほぼ同等の値であることが確認できた。

FFU 部材の繊維直角方向の最大せん断応力度は、部材の高さが大きくなると小さくなる傾向にある。この値はFFU 基礎物性値と比べると約 30%～50%低いことが確認できた。また、H鋼の最大せん断応力度 (227N/mm²) と比べると約 1/24 と小さいが、H鋼に比べてFFU 部材の断面積は約 26 倍大きいため、最大抵抗せん断力では両者に差がないことが確認できた。さらにFFU 部材はガラス繊維の抵抗により破断する現象は見られず、高い靱性を

表-6 FFU 部材の最大せん断応力度

試験体名	最大荷重 (kN)	最大せん断力 (kN)	最大せん断応力度 (N/mm ²)
S-30	1456	1092	12.1
S-35	1531	1148	9.38
S-44	1558	1168	8.85

持っていることが確認できた。

3. 接合方法の選定試験

(1) 目的

FFU 部材とH鋼を接合した複合部材（以後、複合部材と呼ぶ）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 2 種類を考えた。各接合方法の概要を図-10 に示す。

①コッター式接合

H鋼に鉄製のコッターを取付け、これにFFU 部材を引掛けるように設置する。FFU 部材とH鋼のウェブは接着剤で定着する。

②接着式接合

接着鉄板をFFU 部材内に挿入し接着剤で定着し、これをH鋼に取付けたコッターに引掛ける。また、FFU 部材とH鋼のウェブは接着剤で定着する。

接着鉄板およびH鋼の表面には、鋼材製造過程で薄い膜が付着しているのをこれを完全に除去する。接着剤はエポキシ樹脂を使用する。また、接合部の破壊を防止するため次の対策を行う。イ) 締付け用の鉄板とボルトで接合部に支圧力を与え接着効果を高める。ロ) FFU 部材の曲げ剛性は、H鋼 (H-400×200×8×13) の曲げ剛性に対して約 1/6 と小さいため、両者の境目に応力集中が発生する可能性がある。これを緩和させるためH鋼のウェブをカットしフランジだけの緩衝域を設ける。

上記 2 種類の接合方法の耐力を明らかにすると共に、最適な接合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) 試験ケース

曲げ試験のケースを表-7 に示す。試験体形状は、図-11 に示すように、断面 400mm×200mm のFFU 部材とH鋼 (H-400×200×8×13) の複合部材である。H鋼の材料特性を表-8 に示す。

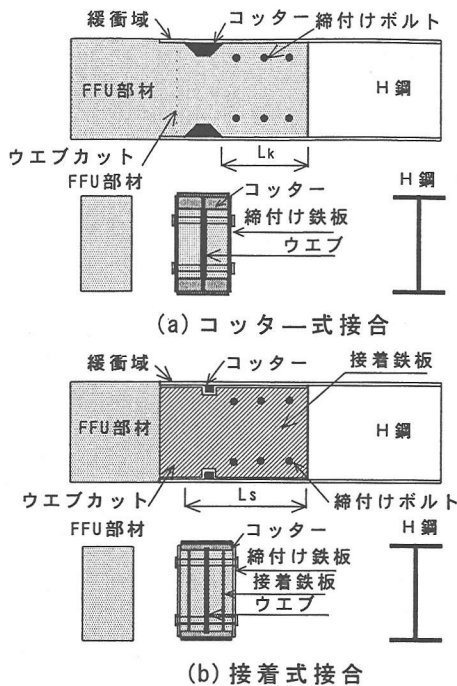


図-10 接合方法

表-8 H鋼部材の材料特性

	引張強度 (N/mm ²)	せん断強度 (N/mm ²)
SS400	392	227

コッター式接合の接合長さ(L_K)は、図-10(a)に示すように、コッター位置のFFU部材のせん断強度およびFFU部材とH鋼(ウェブ)の接着せん断強度(τ)と、H鋼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25cm²)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。上記の考えで求めた L_K は320mmである。

接着式接合の接合長さ(L_S)は、図-10(b)に示すように、FFU部材と接着鉄板およびFFU部材とH鋼(ウェブ)の接着せん断強度(τ)と、H鋼の引張強度との関係から求めた。接着面積が大きくなると接着鉄板またはFFU部材の表面の凹凸により、両者の接着性が低下すると考え、本試験では τ を1/2(4.55N/mm²)に低減した。上記の考えで求めた L_S は、接着鉄板2枚で320mmである。

b) 試験方法

載荷試験は1962kNアムスラーを使用し、加力は曲げスパン3000mmの2点集中荷重を受ける単純ばり形式の一方向単調載荷とした。

計測項目は、アムスラーの荷重、接合部のずれと試験

表-7 曲げ試験のケース

試験体名	接合方式	試験内容	
BK-32	コッター式	接合長さ (Lk mm)	320
BK-42			420
BT-2	接着式	接着鉄板挿入枚数 (Ls=320mm)	2
BT-4			4

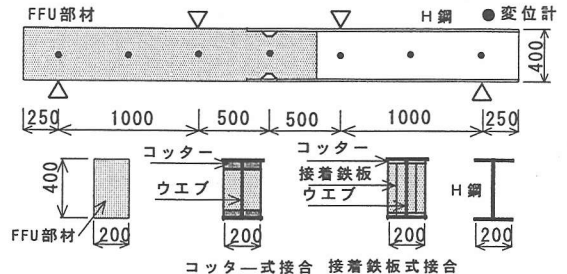


図-11 曲げ試験体の形状

表-9 せん断試験のケース

試験体名	接合方式	緩衝域の長さ(mm)
S-10	コッター式	100
S-20		200

体の変位である。破壊に至るまでのクラックの進展状況は目視により観察した。

(3) せん断試験

a) 試験ケース

せん断試験のケースを表-9に示す。この試験は、コッター式接合のみとし、緩衝域の長さの違いによる影響を把握することを目的とした。試験体形状は、図-12に示すように、曲げ試験と同じ形状とし接合長さ(L_K)は320mmとした。

b) 試験方法

加力はせん断スパン350mmの大野式逆対称せん断加力法の一方向単調載荷とした。計測項目は曲げ試験と同じである。

(4) 試験結果

a) 曲げ試験の結果

各試験体の最終クラック状況を図-13に示す。試験体BT-2の破壊状況を写真-3に示す。コッター式接合のBK-32、BK-42は、曲げモーメントが108kN・m～132kN・mに達したとき、接合部下側のコッター先端よりH鋼方向に向かってFFU部材が急激なせん断破壊を起した。その後、モーメントの増加とともにFFU部材に多数の水平クラックが生じ、FFU部材とH鋼(ウェブ)の接着面が剥離した。

接着式接合のBT-2、BT-4は、曲げモーメントが275kN・m

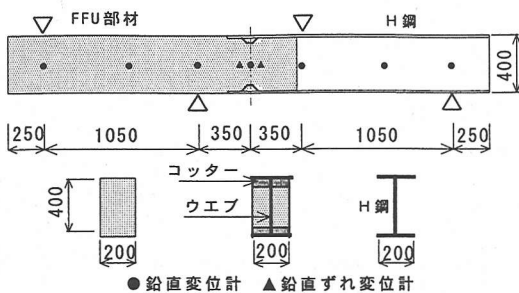


図-12 せん断試験体の形状

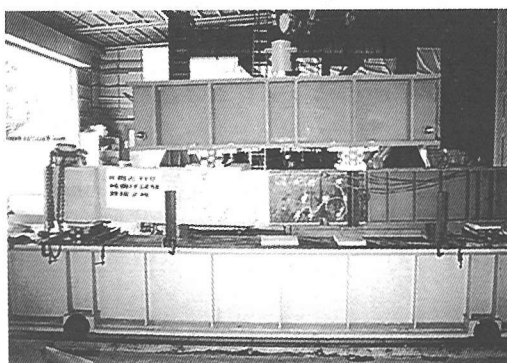


写真-3 曲げ試験体 BT-2 の破壊状況

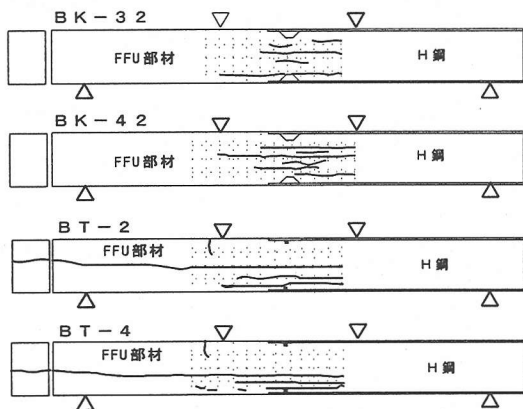


図-13 曲げ試験体の最終クラック状況

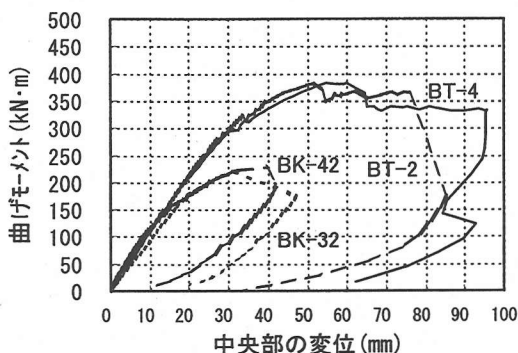


図-14 接合部の曲げモーメントと中央変位の関係

～299kN・mに達したとき、接合部下側のFFU 部材に水平クラックが生じ始めた。その後、FFU 部材端部から荷重点に向かって中立軸付近に水平クラックが生じ破壊した。

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-14に示す。BK-32、BK-42より接合長さの違いによる力学的な特性に差は見られなかった。同様にBT-2、BT-4より接着鉄板の枚数の違いによる力学的な特性に差は見られなかった。

BT-2の変位分布を図-15に示す。FFU 部材とH鋼の変位分布を比べると、荷重の増加とともにFFU 部材の変位が大きくなっているが、これはFFU 部材の曲げ剛性がH鋼の剛性に比べて約1/6と小さいためである。BK-32、BK-42は、最終的に接合部で最大10mm程度のずれが生じたが、BT-2、BT-4は破壊するまで接合部のずれ量もなく一体となって変位した。また、各試験体とも破壊するまでFFU 部材は弾性的な変形挙動を示した。

複合部材の曲げ耐力について実測値と計算値の比較を表-10に示す。ここでの実測値は最大荷重が作用したときの曲げモーメントである。計算値は曲げ応力度に断面係数を掛けて求めた。なお、FFU 部材の曲げ応力度は、表-4に示すFFU 部材の最大曲げ応力度から 77.2N/mm^2 (試験体B-20～B-50の平均値)とし、H鋼は

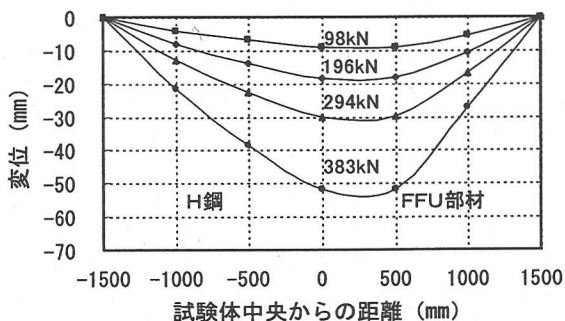


図-15 曲げ試験体 BT-2 の変位分布

表-8に示す値とした。

BK-32、BK-42の実測値は $218\text{kN}\cdot\text{m}$ ～ $226\text{kN}\cdot\text{m}$ であり、この値は計算値と比べるとFFU 部材の53%～55%、H鋼の48%～49%に相当する。一方、BT-2、BT-4の実測値は $383\text{kN}\cdot\text{m}$ であり、この値はFFU 部材の93%、H鋼の83%に相当する。接合方式の違いで比較すると接着式接合は、コッター式接合より約1.7倍の曲げ耐力を有する結果が得られた。

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。

表-10 複合部材の最大曲げ耐力の実測値と計算値の比較

試験体名	実測値 (最大値)		計算値 (最大値)		備考
	荷重 (kN)	曲げモーメント (kN・m)	H 鋼 (kN・m)	FFU 部材 (kN・m)	
BK-32	437	218	459	412	接合部のせん断破壊 FFU 部材のせん断破壊
BK-42	452	226			
BT-2	766	383			
BT-4	765	383			

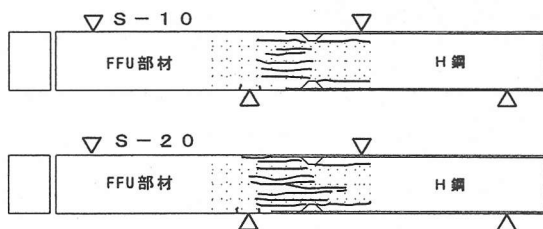


図-16 せん断試験体の最終クラック状況

- ①BK-32, BK-42 は、緩衝域の上側のフランジが 30mm 程度めくれ上がっており、接合部の FFU 部材には多数の水平クラックが発生していた。FFU 部材と H 鋼 (ウェブ) は剥離しており 10mm~20mm のずれが生じていた。また、ボルトはくの字に大きく曲がっていた。
- ②BT-2, BT-4 は、緩衝域の上側のフランジが 20mm 程度めくれ上がっており、接合部の FFU 部材には水平クラックが発生していた。しかし、FFU 部材と接着鉄板および H 鋼 (ウェブ) の剥離は生じていなかった。
- ③FFU と FFU の接着面で剥離は生じていなかった。

b) せん断試験の結果

試験体 S-10, S-20 の最終クラック状況を図-16 に示す。S-10 の破壊状況を写真-4 に示す。両試験体は、載荷重が 500kN~510kN に達したとき、コッター先端付近において FFU 部材と H 鋼 (ウェブ) の接着面が剥離し、FFU 部材が H 鋼方向に向かって急激なせん断破壊を起した。その後、載荷重の増加と共に接合部の FFU 部材に多数の水平クラックが生じた。

接合部に作用したせん断力 (τ) と接合部鉛直ずれ量 (δ_v) の関係を図-17 に示す。 τ は載荷重の 3/5 に相当する。 δ_v は、図-12 に示すように、試験体の中心から左右 50mm 離れた位置での FFU 部材鉛直方向の変位差である。S-10, S-20 とも δ_v は約 400kN まで 0.2mm 以下と微小であり、緩衝域の長さの違いによる力学的特性に差は見られなかった。

複合部材のせん断耐力について実測値と計算値の比較を表-11 に示す。ここでの実測値は最大荷重が作用したときの接合部のせん断力である。計算値はせん断応力度に断面積を掛けて求めた。なお、FFU 部材のせん断応力

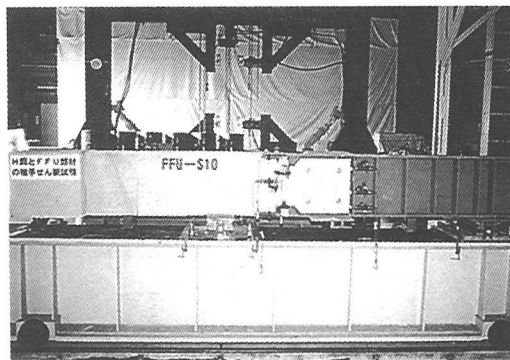


写真-4 せん断試験体 S-10 の破壊状況

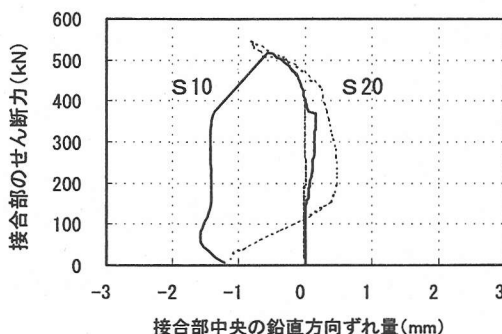


図-17 接合部のせん断力と鉛直ずれ量の関係

表-11 複合部材の最大せん断耐力の実測値と計算値の比較

試験体名	実測値 (最大値)		計算値 (最大値)		備考
	荷重 (kN)	せん断力 (kN)	H 鋼 (kN)	FFU 部材 (kN)	
S-10	865	519	678	810	接合部のせん断破壊
S-20	910	546			

度は、表-6 に示す FFU 部材の最大せん断応力度から 10.1N/mm^2 (試験体 S-30~S-44 の平均値) とし、H 鋼は表-8 に示す値とした。

S-10, S-20 の実測値は 519kN~546kN であり、この値は計算値と比べると FFU 部材の 64%~67%, H 鋼の 77%~81% に相当する。

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緩衝域の上側のフランジが 50mm 程度めくれ上がっており、接合部の FFU 部材には多数の水平クラックが発生していた。
- ②ボルトには大きな曲がりは見られなかった。
- ③FFU と FFU の接着面で剥離は生じていなかった。

c) 試験結果のまとめ

接着式接合の曲げ耐力は、FFU 部材とほぼ同等の耐力

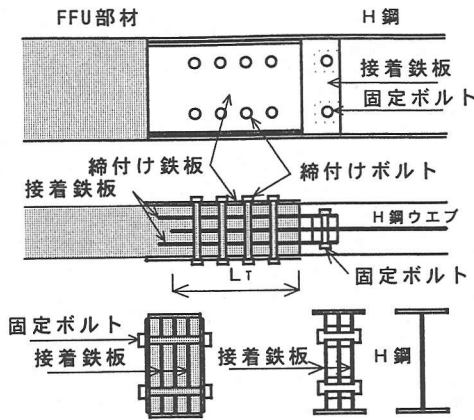


図-18 改良後の接合方法

を有するが、H鋼と比べると約20%低い結果が得られた。
コッター式接合のせん断耐力は、FFU部材の耐力と比べると約30%低く、H鋼と比べると約20%低い結果が得られた。

接着式接合の曲げ耐力は、コッター式接合の約1.7倍であることが確認できた。

接合部のせん断耐力は、緩衝域の長さの違いによる明確な差はないことが確認できた。

接着式接合のせん断試験は行っていないが、下記の理由により接着式接合はコッター式接合と同等のせん断耐力を有するものと推定される。

①両接合方法ともFFU部材とH鋼の接合は接着剤で行っている。

②接着式接合は、図-10に示すように、FFU部材内に接着鉄板を2枚挿入しており、接着面積はコッター式接合の3倍である。

③曲げ耐力は接着式接合の方が大きいとの結果が得られている。

以上の結果からFFU部材とH鋼の接合方法は、接着式接合が適していることと、緩衝域の長さは100mmでよいと判断された。

4. 接着式接合

接着式接合は、図-10(b)に示すように、接着鉄板をH鋼に取付けたコッターに引掛ける方法を探っていた。しかし、接着鉄板とコッターの間に製作上必ず2mm～3mmの隙間が生じるため、接合部に大きな力が作用すると接着鉄板がすべる可能性があった。そこで接着鉄板とH鋼を一体化するため、図-18に示すように、接着鉄板をH鋼のウェブにボルトで固定する方法に変更した。

この接合方法は、FFU部材とH鋼を接着剤で接合する

ことを基本としており、接着面積を増やすために接着鉄板をFFU部材内に挿入するものである。FFU部材とH鋼の接合長さ(L_T)は、図-18に示すように、FFU部材と接着鉄板およびFFU部材とH鋼(ウェブ)の接着せん断強度(τ)と、H鋼の引張強度との関係から式(2)を用いて求めることとした。なお、本式を使用するにあたっては次の条件を設定することにした。

④FFU部材とH鋼の接着せん断強度(τ_f)は、接着鉄板またはFFU部材の表面の凹凸により接着性が低下すると考え1/2(4.55N/mm²)に低減する。

⑤「2.FFU部材の力学的特性」の試験結果より、FFU部材が曲げ変形を起すと中立軸は部材の中心付近に位置するが、引張りひずみは圧縮ひずみより大きく生じることが判明したので、FFU部材の有効接着面幅(L_b)は引張領域のみとし1/2に低減する。

$$L_T = \frac{\sigma_{sa} \times A_s}{\tau_f \times L_b \times n} \quad (2)$$

ここに L_T : FFU部材とH鋼の接合長さ(mm)

σ_{sa} : H鋼の引張応力度(N/mm²)

A_s : H鋼の断面積(mm²)

τ_f : FFU部材とH鋼の接着せん断強度(N/mm²)

L_b : FFU部材の有効接着面幅(mm)

$$L_b = H - 2(t_2 + 5)$$

H : H鋼のウェブ高さ(mm)

t_2 : H鋼のフランジ厚さ(mm)

n : 接着面の数

$$n = 2(n_1 + n_2)$$

n_1 : FFU部材に挿入する接着鉄板の枚数

n_2 : H鋼のウェブの枚数 $n_2=1$

5. 複合部材の力学的特性

(1) 目的

接着式接合を用いた複合部材の力学的特性を把握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) 試験ケース

曲げ試験のケースを表-12、試験体形状を図-19に示す。表中に示す接合長さ(L_T)は式(2)を用いて求めた。

b) 試験方法

曲げ試験の加力は、曲げスパン3800mmの2点集中荷重を受ける単純ばり形式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。

表-12 複合部材の曲げ試験のケース

試験体名	H 鋼		FFU 部材の形状 (mm)	接合長さ L_T (mm)
	形状 (mm)	断面係数 ($\times 10^3 \text{ mm}^3$)		
HFB-1	H-350×175×7×11	771	350×175	534
HFB-2	H-300×300×10×15	1350	300×300	699
HFB-3	H-400×200×8×13	1170	400×200	602
HFB-4	H-350×350×12×19	2280	350×350	849
HFB-5	H-440×300×11×18	2490	440×300	614
HFB-6	H-400×400×13×21	3330	400×400	927

表-13 複合部材のせん断試験のケース

試験体名	H 鋼		FFU 部材の形状 (mm)	せん断スパン (mm)
	形状 (mm)	ウエブ面積 ($\times 10^2 \text{ mm}^2$)		
HFS-1	H-350×175×7×11	23.0	350×175	306
HFS-2	H-300×300×10×15	27.0	300×300	263
HFS-3	H-400×200×8×13	29.9	400×200	350
HFS-4	H-350×350×12×19	37.4	350×350	306
HFS-5	H-440×300×11×18	44.4	440×300	385
HFS-6	H-400×400×13×21	46.5	400×400	350

(3) せん断試験

a) 試験ケース

試験ケースを表-13、試験体形状を図-20 に示す。接合長さは曲げ試験と同じである。

b) 試験方法

加力は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。

(4) 試験結果

a) 曲げ試験結果

試験体 HFB-4、HFB-5 の最終クラック状況を図-21、HFB-4 の破壊状況を写真-5 に示す。各試験体の破壊状況は次の通りである。HFB-1 は、載荷重が 200kN に達したとき接合部付近の H 鋼の上部フランジが座屈し始めた。HFB-2、HFB-4 は、接合部の FFU 部材が水平方向にせん断破壊を起し、引張側の FFU 部材が 10mm～20mm 抜け出した。HFB-3、HFB-5、HFB-6 は、FFU 部材端部から接合部に向かって中立軸付近に水平クラックが生じ破壊した。

各試験体の曲げモーメント (M) と中央変位 (δ) の関係を図-22 に示す。HFB-3、HFB-5、HFB-6 は、FFU 部材の端部から破壊したため M が急激に低下しているが、HFB-2、HFB-4 は、接合部で破壊したため δ の増加と共に M も増加している。

HFB-4 の変位分布を図-23 に示す。FFU 部材と H 鋼の変位分布を比べると、載荷重の増加と共に FFU 部材は曲線状態となり変位が大きくなっている。これは FFU 部材の曲げ剛性が H 鋼の剛性に比べて小さいためである。しかし、各試験体とも破壊するまで FFU 部材は弾性的な変

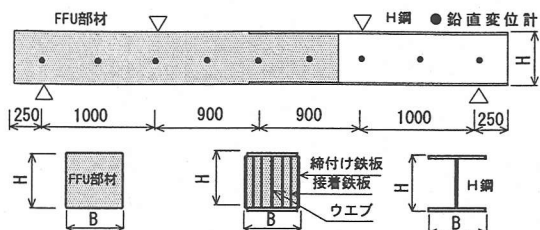


図-19 複合部材の曲げ試験体の形状

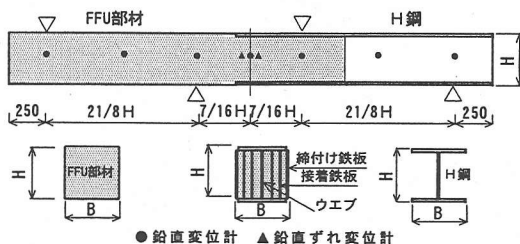


図-20 複合部材のせん断試験体の形状

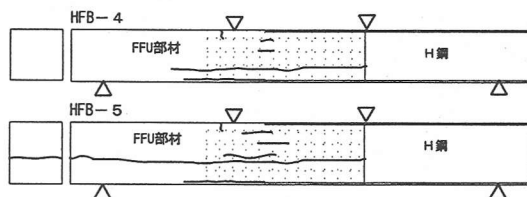


図-21 曲げ試験体の最終クラック状況

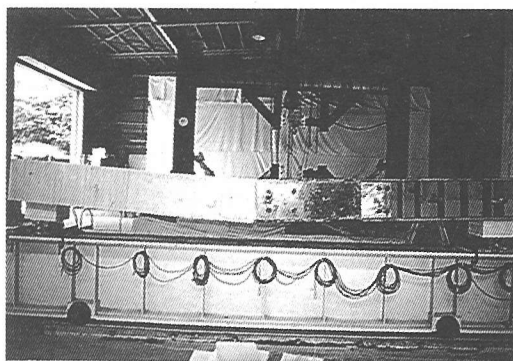


写真-5 曲げ試験体 HFB-4 の破壊状況

形挙動を示し、接合部でのずれ量もなく一体として変形したことが解った。

複合部材の曲げ耐力について実測値と計算値の比較を表-14 に示す。ここでの実測値は最大荷重が作用したときの曲げモーメントである。計算値は曲げ応力度に断面係数を掛けて求めた。なお、FFU 部材の曲げ応力度は

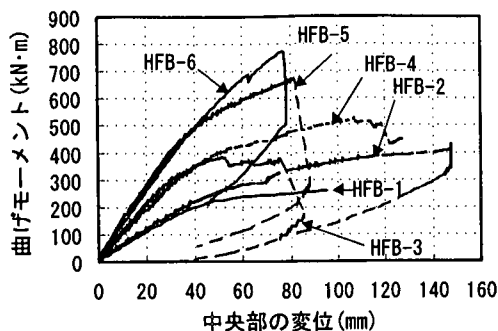


図-22 接合部の曲げモーメントと中央変位の関係

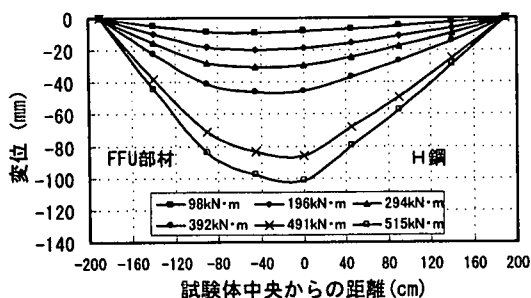


図-23 曲げ試験体 HFB-4 の変位分布

77.2N/mm²とし、H鋼は表-8に示す値とした。曲げ耐力は、FFU部材の93%~122%、H鋼の58%~86%であり、FFU部材とはほぼ同等の耐力を有するがH鋼より小さい結果が得られた。

FFU部材の高さと最大曲げ応力度の関係を図-24に示す。同図は、表-14に示す複合部材の最大曲げ応力度と、表-4に示すFFU部材の最大曲げ応力度を重ね合わせたものである。複合部材の最大曲げ応力度は、HFB-2を除けば68.4N/mm²~73.3N/mm²と得られ、部材の高さの違いによる明確な差はなかった。複合部材とFFU部材の曲げ応力度は、部材の高さ200mm~500mmの範囲では70N/mm²~80N/mm²と評価できる。

複合部材の曲げ割線弾性係数を表-15に示す。この値は、最大荷重の約1/2の荷重と、その時の試験体中央部の変位の関係から式(1)を用いて求めた。曲げ割線弾性係数は、部材の高さによってバラツキはあるが、平均値は13.4kN/mm²であり、FFU部材の平均値(8.44kN/mm²)に対して約1.6倍と得られた。これはH鋼の曲げ剛性の影響を受けたためである。

b) セン断試験の結果

試験体HFS-4の最終クラック状況を図-25、破壊状況を写真-6に示す。HFS-6はアムスラーの能力限界に近い1884kNを載荷したが、破壊させることはできなかった。その他の試験体は、接合部のFFU部材に多数の水平クラックが生じ、最終破壊はFFU部材のせん断破壊となった。

接合部に作用したせん断力(τ)と接合部鉛直ずれ量

表-14 接合部の最大曲げ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(最大値)		計算値(最大値)	
		曲げモーメント(kN·m)	曲げ応力度(N/mm ²)	H鋼(kN·m)	FFU部材(kN·m)
HFB-1	523	262	73.3	303	276
HFB-2	848	424	94.2	530	347
HFB-3	765	383	71.7	459	412
HFB-4	1030	515	72.1	895	552
HFB-5	1323	662	68.4	977	747
HFB-6	1560	780	73.1	1307	823

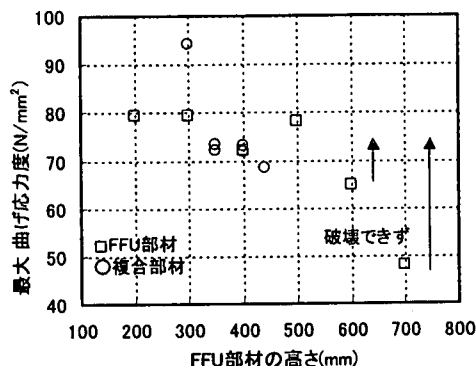


図-24 FFU部材の高さと最大曲げ応力度の関係

表-15 接合部の曲げ割線弾性係数

試験体名	最大荷重の約1/2(kN)	変位(mm)	曲げ割線弾性係数(kN/mm ²)	部材高さ(mm)
HFB-1	265	23.4	14.8	350
HFB-2	429	36.8	14.1	300
HFB-3	373	17.7	16.2	400
HFB-4	514	24.8	13.6	350
HFB-5	661	20.5	12.4	440
HFB-6	793	31.8	9.57	400

(δ_v)の関係を図-26に示す。 τ は載荷重の3/5に相当する。 δ_v は、図-20に示すように、試験体の中心から左右50mm離れた位置でのFFU部材鉛直方向の変位差である。最大せん断力に達した時の δ_v は、HFS-6を除けばFFU部材の高さによる差は見られず3mm~5mm程度である。HFS-6は試験を中止したため脆性的な破壊形状となっている。また、その他の試験体は、最大せん断力に達した後も δ_v は増加傾向を示したが、載荷を継続すると危険と判断し試験を中止した。特にHFS-3は試験体が傾斜し始めたので即試験を中止した。したがって、最大せん断力に達した後の τ と δ_v の明確な関係は得られていないが、接合部はFFU部材に水平クラックが生じて急激なせん断破壊を起すのではなく、韌性を持っていると推定される。

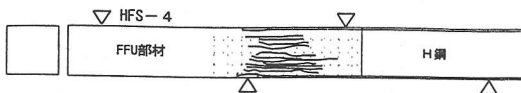


図-25 せん断試験体の最終クラック状況

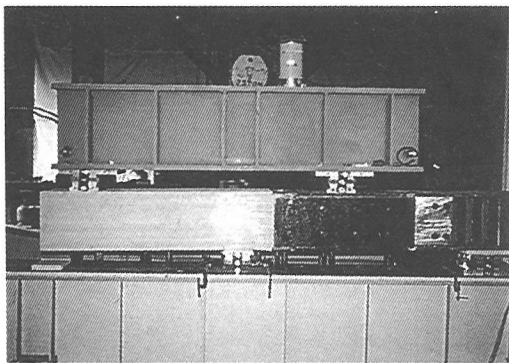


写真-6 せん断試験体 HFS-4 の破壊状況

複合部材のせん断耐力について実測値と計算値の比較を表-16に示す。ここでの実測値は最大荷重が作用したときの接合部のせん断力である。計算値はせん断応力度に断面積を掛けて求めた。なお、FFU 部材のせん断応力度は 10.1N/mm^2 とし、H鋼は表-8に示す値とした。せん断耐力は、FFU 部材の 61%~70%、H鋼の 78%~107% であり、FFU 部材より小さいがH鋼とほぼ同等の耐力を有する結果が得られた。

FFU 部材の高さと最大せん断応力度の関係を図-27に示す。同図は、表-16に示す複合部材の最大せん断応力度と、表-6に示すFFU 部材の最大せん断応力度を重ね合わせたものである。複合部材の最大せん断応力度は $6.22\text{N/mm}^2 \sim 7.06\text{N/mm}^2$ と得られ、部材の高さの違いによる明確な差はなかった。複合部材とFFU 部材の最大せん断応力度は、部材の高さ 300mm~450mm の範囲では $6.0\text{N/mm}^2 \sim 9.0\text{N/mm}^2$ と評価できる。

c) 試験結果のまとめ

複合部材の曲げ耐力は、FFU 部材とほぼ同等の耐力を有するが、H鋼と比べると形状によって異なるが耐力は約 20%~40%低い結果が得られた。最大曲げ応力度は、部材の高さの違いによる大きな差はないこと、また、曲げ割線弾性係数はFFU 部材の値と比べると約 1.6 倍大きいことが確認できた。

複合部材のせん断耐力は、FFU 部材の耐力より約 30%~40%低い、H鋼とほぼ同等の耐力を有する結果が得られた。最大せん断応力度は、部材の高さの違いによる大きな差はないことが確認できた。

複合部材とFFU 部材は、曲げ応力度は部材の高さ 200mm~500mm の範囲で $70\text{N/mm}^2 \sim 80\text{N/mm}^2$ と評価できること、

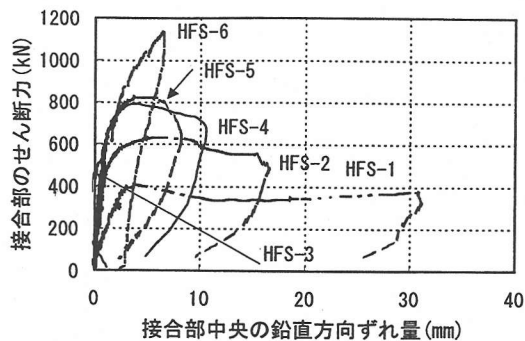


図-26 接合部のせん断力と鉛直ずれ量の関係

表-16 接合部の最大せん断耐力の実測値と計算値の比較

試験体名	実測値 (最大値)			計算値 (最大値)	
	荷重 (kN)	せん断力 (kN)	せん断応力度 (N/mm^2)	H 鋼 (kN)	FFU 部材 (kN)
HFS-1	673	404	6.59	520	620
HFS-2	1052	631	7.01	612	911
HFS-3	910	546	6.83	678	810
HFS-4	1317	790	6.45	848	1240
HFS-5	1369	821	6.22	1007	1336
HFS-6	1884	1130	7.06	1054	1619

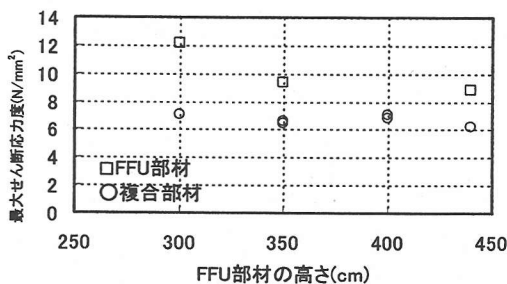


図-27 FFU 部材の高さと最大せん断応力度の関係

せん断応力度は部材の高さ 300mm~450mm の範囲で $6.0\text{N/mm}^2 \sim 9.0\text{N/mm}^2$ と評価できることを確認した。

6. 結論

FFU 部材の力学的特性および、FFU 部材とH鋼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 部材は、曲げ変形すると FFU 繊維方向でせん断破壊を起し易い材料であることが確認できた。
- ②FFU 部材は、曲げ変形しても中立軸は部材の中心にあり、

ひずみ分布はほぼ直線関係にあることが確認できた。

- ③FFU 部材の曲げ応力度は、部材の高さ 200mm~500mm の範囲では高さの違いによる明確な差はないことが確認できた。
- ④FFU 部材の曲げ割線弾性係数は、部材の高さが大きくなると小さくなることが確認できた。
- ⑤FFU 部材の繊維直角方向のせん断応力度は、FFU 部材の高さが大きくなると小さくなる傾向にあるが、ガラス繊維の抵抗により高い靱性を持っていることが確認できた。
- ⑥接着式接合は、コッター式接合の約 1.7 倍の曲げ耐力を有しており、FFU 部材と H 鋼の接合方法に適していることを確認した。また、緩衝域の長さは 100mm でよいことを確認した。
- ⑦複合部材の曲げ耐力は、H 鋼の耐力と比べると小さいが、FFU 部材とほぼ同等の耐力を有することが確認できた。
- ⑧複合部材の曲げ割線弾性係数は、FFU 部材の曲げ割線弾性係数に対して約 1.6 倍大きいことが確認できた。
- ⑨複合部材のせん断耐力は、FFU 部材の耐力と比べると小さいが、H 鋼とほぼ同等の耐力を有することが確認できた。また、接合部は靱性を持っていることが推定された。
- ⑩接着式接合は、十分な曲げ応力度、せん断応力度を有しており、実用に耐え得ることを確認した。
- ⑪FFU 部材と H 鋼の接合は接着剤でよいことと、接合長さは FFU 部材と鋼材（接着鉄板・H 鋼）の接着せん断強度と、H 鋼の引張強度との関係から求められることを確認した。

⑫複合部材および FFU 部材とも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 部材と H 鋼を接合した複合部材を用いたシールド直接発進工法の実施工で各種計測を行い、その結果と実験結果との検証を行っていく考えである。

謝辞：試験を実施するに当たっては、銭高組青梅技術研究所の皆様に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、積水エフ・エフ・ユー工業の宇野元隆氏、銭高組の原沢堅也氏、森本敏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) シールドトンネルの新技术研究会：シールドトンネルの新技术，土木工学社，pp. 127~135，1996. 1.
- 2) 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. 6.
- 3) 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.
- 4) 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概要集 第 6 部，pp. 244~245，1996.
- 5) 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.

(1999. 9. 30 受付)

DEVELOPMENT OF METHOD BY WHICH SHIELD MACHINE CAN DEPART AND ARRIVE DIRECTLY AND METHOD CONNECTING FFU MEMBER WITH STEEL PILE MEMBER

Kazuyuki FUKADA, Kyuichi MARUYAMA, Hideo YAMAUCHI, Ryouichi TANIGUCHI and Kazuyuki TAKENAKA

A vertical shaft of shield tunnel plays a role of bearing pile-wall to resist earth pressure at excavation, but the part of the shaft must be cut to proceed a shield tunnel horizontally. Therefore, the requested properties for the shaft are sufficient resistance against bending moment and easiness for cutting by shear force. For this purpose the authors have developed a hybrid member consisting of a fiber reinforced foamed urethane (FFU) member and a steel pile member. The key of the hybrid member lies in how to connect both members. Two connection methods, such as a cotter connection and a bond connection are proposed and the mechanical behaviors of them are examined experimentally in terms of flexure and shear. Finally, the prototype is tested and is proved to have sufficient strength for actual use.