

分割されたFFUセグメントの継手の開発

Development of a joint in a divided FFU segment

原田尚幸*1 八重島吉典*2

概要

シールドトンネルに分岐・合流部を構築する場合、既設トンネルの側方セグメントを直接切削する技術の一つとしてFFU (Fiber reinforced Foamed Urethane) セグメントがある。しかし、本管に対して接続管の径が比較的大きい場合、切削する開口率が大きくなり、一体物のFFUセグメントでは施工できない等の課題が生じた。そこで、FFUセグメントを分割しトンネル坑内で組み立てる方法を採用するためセグメント間継手の開発を行った。本報では、FFUセグメント間継手の適用範囲およびせん断耐力、圧縮耐力について報告する。

key words : FFUセグメント、分岐合流、ほぞ継手、せん断耐力、圧縮耐力

1. はじめに

既設トンネルの側方セグメントを直接切削する技術の一つとして図-1に示すFFU(Fiber reinforced Foamed Urethane)セグメント¹⁾がある。しかし、シールドトンネルに分岐・合流部を構築する場合、本管に対して接続管の径が比較的大きいケースでは、図-2に示すように切削する開口率が大きくなり、一体物のFFUセグメントでは取り回しが困難で施工できない等の課題が生じる。

そこで、FFUセグメントを分割し、トンネル坑内で組み立てるためセグメント間継手を開発した。継手の構造形式は、せん断力と軸力を伝達するピン構造のほぞ形式を採用した。なお、FFUセグメントとは高強度で耐薬品性に優れた硬質発泡ウレタンをガラス長繊維で強化したFFUとボックス形状の端部鋼材により構成されるセグメントである。

本報では、FFUセグメント間継手の適用範囲およびせん断耐力、圧縮耐力の検証結果について報告する。

2. 継手の構造と材料特性

FFUセグメント間継手は、継手選定試験²⁾および製作精度、施工性などから図-3に示すほぞ形式とした。FFUセグメントは、薄い板状のFFU74(密度が0.74g/cm³のFFU材)³⁾をほぞ形状になるようにエポキシ系接着剤で接着積層し、嵌合部は表層を高強度樹脂で成型しAセグメントの凹にBセグメントの凸を挿入する際の嵌合精度を確保した。FFU74と高強度樹脂の物性を表-1に示す。高強度樹脂はFFU74の繊維方向と同等以上の圧縮強度となるようフィラー(水酸化アルミニウム粉末)を配合したウレタン樹脂を選定した。

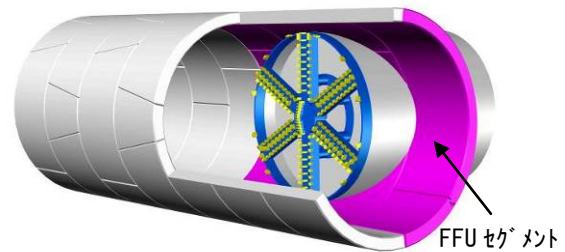


図-1 FFUセグメントを用いたシールド到達工法

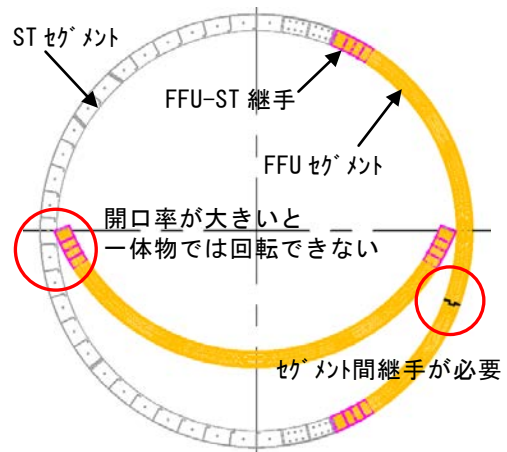


図-2 切削開口率が大きい場合のFFUセグメントの課題

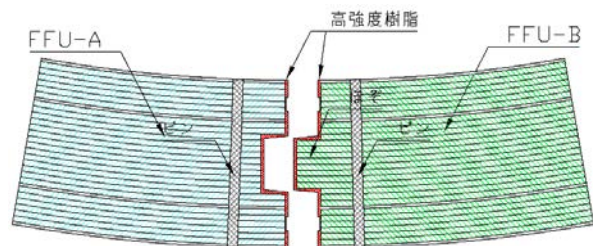


図-3 FFUセグメントの継手構造(ほぞ継手)

*1 Naoyuki HARADA

技術本部技術研究所 副所長

*2 Yoshinori YAESHIMA

技術本部技術研究所 主席研究員

表-1 FFU材 (FFU74) と高強度樹脂 (ウレタン樹脂) の物性

試験気温 [23℃]	FFU74 繊維方向	ウレタン樹脂 (ファイ入)
密度 [g/cm ³]	0.74	1.65
圧縮強度 [N/mm ²]	63.1	67.2
圧縮弾性率 [N/mm ²]	11,290	3,880

3. 継手の適用範囲³⁾

一般にほぞ形式のRCセグメント間継手は、セグメントに生じる軸圧縮力が支配的となる地盤で採用実績が多く、曲げモーメントが支配的となる地盤ではあまり用いられていない。したがって、ほぞ形式のFFUセグメント間継手も同様に適用できる地盤に制限が生じると考えられる。

そこで、FFUセグメントが主に用いられるシールドトンネル内空径4,000mm、6,000mmに対して、FFUセグメント間継手の適用範囲を検討した。適用範囲の照査項目を

表-2に、検討条件を表-3に示す。ほぞ形式のFFUセグメント間継手を適用できるセグメント形状および地盤条件は、表-2に示す3つの照査項目を全て満足した場合とする。設計条件、地盤条件等をパラメータとした照査結果を表-4示す。

砂質土、粘性土に係わらず「緩み土圧」を採用できるような比較的硬質な地盤(砂質土:N値15以上、粘性土:N値8以上)において軸力が卓越する傾向となり、FFUセグメント間継手は全圧縮応力状態となり、ほぞ形式のFFUセグメント間継手が適用できることがわかった。一方、N値の小さい粘性土の場合は、鉛直荷重と側方荷重の関係から曲げが卓越する傾向となり継手部に引張が生じるため、ほぞ形式のFFUセグメント間継手を適用することは困難である。なお、本検討は、土被り30m、50mの比較的深い位置における検証結果であるため、低土被り等の条件下での適用に当たっては別途検討が必要である。

表-2 適用範囲の照査項目

① 継手部の応力状態の照査

- 全圧縮となるかを照査
- $N/A \pm M/Z > 0$

② 継手部のせん断応力度照査

- せん断応力度が許容値以内となるかを照査
- $\tau_1 = S / A_1 < \tau_a$
- $\tau_2 = S / A_2 < \tau_a$
- ここに、 $\tau_a = 2.0 \text{ (N/mm}^2\text{)}$

③ 継手部の圧縮応力度照査

- 曲げ圧縮応力度が許容値以内となるかを照査
- $N/A + M/Z < \sigma_a$
- ここに、 $\sigma_a = 29.0$

表-3 検討条件

<検討条件>

- 許容応力度設計法
- 剛性一様な梁としてモデル化 (1リングモデル)
- STセグメントとFFUセグメントの複合構造
- FFUセグメントは、30° ~ 150° の範囲
- 地盤反力係数は、トンネル標準示方書を参考に全周地盤ばねモデルを用いる
- 解析ステップは、完成時に作用する荷重(自重+土圧)を同時に作用させる

シールド内径 [mm]	4,000	6,000
桁高 [mm]	175 (150)	250
主桁本数 [本]	3	3
リング幅 [mm]	1,200 (1,000)	1,200 (1,000)
土被り [m]	30	50
地下水位 [m]	地下水位は地表面を想定する。	

表-4 設計条件、地盤条件等のパラメータと照査結果一覧 (内空径4,000mm、6,000mm)

土水の扱い	土の種類	土層条件					荷重条件	深度(内空径4000mmの場合)				深度(内空径6000mmの場合)						
		N値による目安	N値	k	λ	土被り30m		土被り50m		土被り30m		土被り50m						
						照査項目		判定	照査項目	判定	照査項目	判定	照査項目	判定				
①	②	③	①	②	③	①	②	③	①	②	③	①	②	③				
土水分離	非常によく締まった砂質土	30 ≤ N	50	50.0	0.35	緩み土圧(最少土圧)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		
			30	30.0	0.45	緩み土圧(最少土圧)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		
	締まった砂質土	15 ≤ N ≤ 30	15	10.0	0.55	緩み土圧(最少土圧)	○	○	○	○	○	○	○	○	○			
			緩い砂質土	N < 15	14	9.3	0.51	全土被り荷重	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
	12	8.0			0.52	全土被り荷重	×	○	○	×	×	○	○	○	○			
	10	6.7			0.53	全土被り荷重	×	○	○	×	×	○	○	○	○			
	6	4.0			0.56	全土被り荷重	—	—	—	—	—	—	×	○	○	×	×	○
	団結した粘性土	25 ≤ N	50	50.0	0.35	緩み土圧(最少土圧)	○	○	○	○	○	○	○	○	○			
			25	30.0	0.45	緩み土圧(最少土圧)	○	○	○	○	○	○	○	○	○			
	固い粘性土	8 ≤ N < 25	8	10.0	0.55	緩み土圧(最少土圧)	○	○	○	○	○	○	○	○	○			
中位の粘性土			4 ≤ N < 8	7	8.8	0.48	全土被り荷重	○	○	○	○	○	○	○	○	○		
	6	7.5		0.50	全土被り荷重	—	—	—	—	—	—	○	○	○	○			
	4	5.0		0.55	全土被り荷重	○	○	○	○	○	○	○	○	○				
土水一体	中位の粘性土	4 ≤ N < 8	7	8.8	0.68	全土被り荷重	×	○	○	×	×	○	○	○	○			
			4	5.0	0.75	全土被り荷重	×	○	○	×	×	○	○	○	×	○	×	
	軟らかい粘性土	2 ≤ N < 4	2	0.0	0.75	全土被り荷重	—	—	—	—	—	—	×	○	○	×	—	—
			0	0.0	0.85	全土被り荷重	—	—	—	—	—	—	×	○	○	×	—	—

4. 継手のせん断耐力

ほぞ継手はピン構造になるので、せん断耐力を把握するためせん断試験を実施した。せん断試験は縮小モデルでほぞ形状を決定した後に、実大モデルで耐力を確認した。

4.1 縮小モデルによるせん断耐力確認試験

(1) 試験方法

縮小モデルによるせん断試験は、図-4 に示す1点荷のせん断試験とした。荷重時には、試験体の継手部に隙間が生じないように鋼棒に水平方向の軸力1,100kN/m²を作用させ拘束した。試験ケースを表-5 に示す。試験パラメータは、ほぞの形状 h/d (ほぞ高さ h とほぞ深さ d の比) とほぞから縁端までの距離とし、各ケースとも試験体数を3体とした。

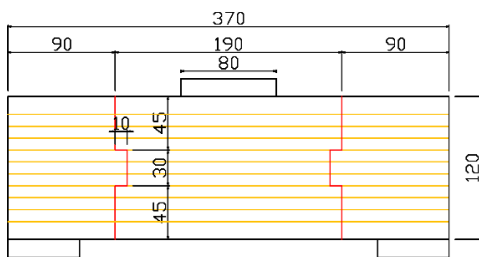


図-4 縮小モデルでのせん断試験

(2) 試験結果

縮小モデルのせん断試験結果を表-5 に示す。せん断破壊状況を写真-1 に示す。継手部の破壊形態は、ほぞ上部から荷重点付近までの水平クラックである。破壊荷重は、ほぞから縁端までの距離が大きいかほど増加し、せん断強さは7.4N/mm²以上となった。せん断強さはほぞからの縁端距離が小さい方が大きくなったが、水平クラックが生じたせん断強さはほぼ同じであったことから、縁端距離が小さい方が軸力の影響により破壊荷重が伸びたと考えられる。また、ほぞの形状は、h/d=2 が最も安定し

て耐力を確保できることを確認した。



写真-1 縮小モデルでのせん断試験状況 (No. 6)

4.2 実大モデルによるせん断耐力確認試験

(1) 試験方法

実大モデルによるせん断試験は、図-5 に示す端部支点の上下を固定した純せん断試験とした。荷重時には、試験体の継手部に水平方向の隙間が生じないように PC 鋼棒で拘束し、安全側の結果となるように荷重前の水平方向の軸力は0とした(写真-2)。実大モデルの試験体は、縮小モデルの試験結果よりほぞの形状 h/d=2 とし、試験体高さを200mm、250mm、300mm とすることでほぞからの縁端距離を変えた。

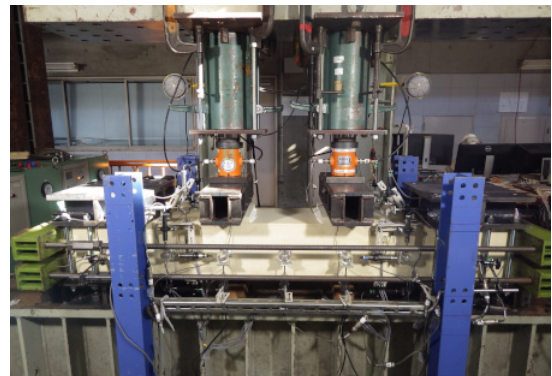


写真-2 実大モデルでのせん断試験状況 (No. 2)

表-5 縮小モデルでのせん断試験結果

No	試験体形状 (mm) 幅 B×高さ H	ほぞの形状 高さ h/深さ d	ほぞから縁 端距離 (mm)	破壊荷重 (kN)	せん断強さ (N/mm ²)
1	B120×H90	h30/d10=3	30	64.1	11.8
2	B120×H90	h30/d15=2	30	56.7	10.5
3	B120×H90	h30/d30=1	30	54.9	10.2
4	B120×H120	h30/d10=3	45	79.9	7.4
5	B120×H120	h30/d15=2	45	82.2	7.6
6	B120×H120	h30/d30=1	45	79.8	7.4

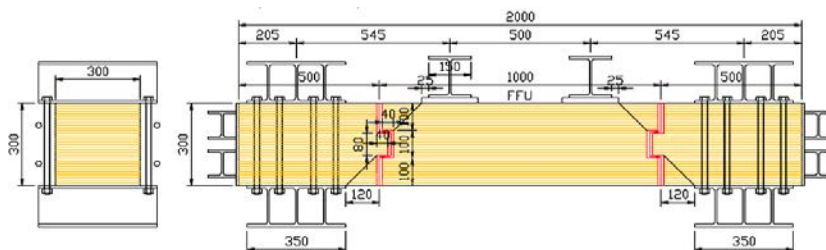


図-5 実大モデルでのせん断試験 (No. 3)

表-6 実大モデルでのせん断試験結果

No	試験高さ (mm)	ほぞ高さ h (mm)	ほぞ深さ d (mm)	ほぞから縁端距離 (mm)	破壊荷重 (kN)	ほぞ上下部せん断強さ (N/mm ²)	ほぞ部せん断応力 (N/mm ²)	ほぞ部圧縮応力 (N/mm ²)
1	200	60	30	60	260.4	7.23	7.23	14.47
2	250	70	35	80	349.4	7.28	8.32	16.64
3	300	80	40	100	404.4	6.74	8.43	16.85

(2) 試験結果

実大モデルのせん断試験結果を表-6に示す。せん断破壊状況を写真-3に示す。継手部の破壊は縮小モデルと同様にほぞ上部から荷点付近までの水平クラックにより発生した。また、荷重と目違い量の関係(図-6)から、目違い量は荷重荷重が130~200kN以下までは小さいが、その後は発生した水平クラックにより目違い量は急増する。なお、目違い量はほぞ部の試験体中央の相対変位の平均値とした。破壊時のほぞ上部には目違いや目開きはほとんど発生しないが、ほぞ中央部や下部では目違いが1mm以上発生した。このため、FFUセグメントのほぞ上下部には2段シールを配置し止水性を確保する必要がある。

なお、土被り50m、砂地盤N=10、シールド径6,000mm、FFU配置角度120°の場合、ほぞ部に発生するせん断力は144kNであり、試験結果(No.2のせん断耐力をセグメント幅1.2m当りに換算すると699kN)は十分安全であると考えられる。

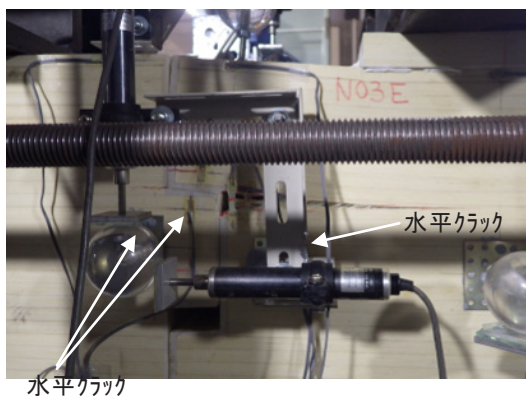


写真-3 実大モデルでのせん断試験状況 (No.3)

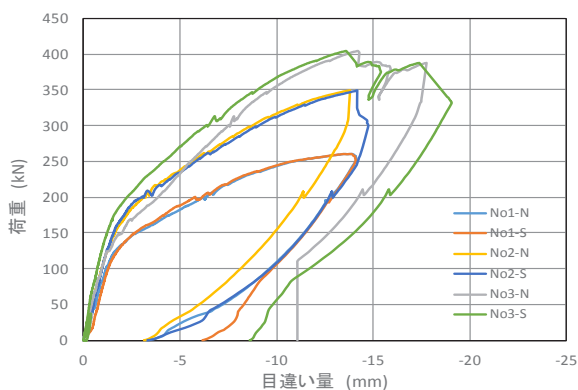


図-6 荷重と目違い量の関係

5. 継手の圧縮耐力

ほぞ継手は軸力が卓越し、全断面圧縮となることから、圧縮耐力を把握するため圧縮試験を実施した。圧縮試験は、縮小モデルで嵌合部表層の樹脂厚の影響を確認した後、実大モデルで耐力を確認した。

5.1 縮小モデルによる圧縮耐力確認試験

(1) 試験方法

縮小モデルによる圧縮試験は、一軸圧縮試験とした。試験体(w60mm×h100mm×L200mm)は、ほぞの形状h/d=2とし、ほぞ寸法は桁高200mm場合の1/2と桁高300mm場合の1/3で設定した。また、樹脂厚みによる圧縮強度への影響を確認するため、3種類の樹脂厚(2.5mm、5mm、10mm)で試験を行った。試験数はFFU74単体を3体、ほぞ継手ありは1/2モデル、1/3モデルともに各樹脂厚1体ずつとした。

(2) 試験結果

試験結果を表-7に、試験体の破壊状況を写真-4に示す。ほぞ継手がある試験体の圧縮強さは、FFU74単体の85%程度となった。破壊形態は、FFU単体の場合は荷点付近の座屈破壊、ほぞ継手がある試験体は荷点付近およびFFUと樹脂の界面の座屈破壊となった。また、樹脂厚みが2.5mmと薄い場合、高強度樹脂の突合せ面にも圧縮破壊がみられ圧縮強さは低下する傾向にある。これはFFUのガラス長繊維が圧縮力で高強度樹脂に貫入したことによる局所的な応力集中が原因であると考えられる。樹脂厚を5mm以上とすることで突合せ面の破壊が緩和されたため、樹脂厚は5mm以上として設計することとした。

表-7 縮小モデルでの圧縮試験結果

	樹脂厚 [mm]	破壊荷重 [kN]	圧縮強さ [N/mm ²]	対単体比
FFU 単体 (N3 平均)	—	459.2	76.5	100%
ほぞ継手あり (桁高 200 の 1/2 モデル)	2.5	378.4	63.0	82%
	5.0	397.3	66.2	87%
	10.0	397.3	66.3	87%
ほぞ継手あり (桁高 300 の 1/3 モデル)	2.5	373.6	62.1	81%
	5.0	399.4	66.5	87%
	10.0	383.7	64.0	84%

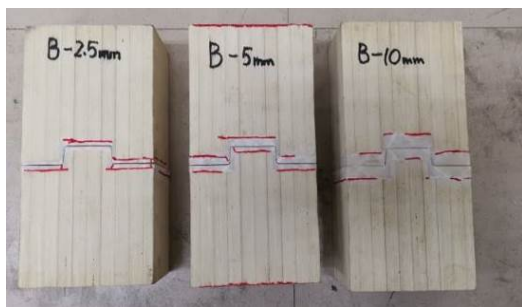


写真-4 縮小モデルの破壊状況 (1/2 モデル)

5.2 実大モデルによる圧縮試験

(1) 試験方法

実大モデルによる圧縮試験は、一軸圧縮試験とした。載荷方法は、初期段階は荷重制御で行い、その後 1500～2200kN で変位制御に切り替えた。試験状況を写真-5 に示す。実大モデルの試験体は、ほぞの形状 $h/d=2$ 、樹脂厚さ 5mm とし、FFU74 単体 1 体、ほぞ継手 2 体の 3 体で実施した。試験体寸法を図-7 に示す。



写真-5 実大モデルの圧縮試験状況

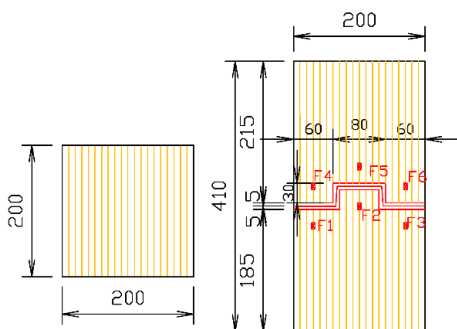


図-7 実大モデルの試験体寸法

(2) 試験結果

試験結果を表-8 に示す。ほぞ継手がある試験体の圧縮強さは、FFU74 単体に比べ 90%程度の圧縮強さとなった。ほぞ継手がない試験体は上下の載荷点付近の座屈破壊となったが、ほぞ継手がある試験体は上下の載荷点付近の座屈破壊に加えて、ほぞ継手の樹脂-FFU 界面の座屈破壊となった。荷重と鉛直変位の関係を図-8 に示す。荷重と鉛直変位の関係は全ての試験体で同じ傾向を示し、圧縮応力 55N/mm² 付近までは比例関係で、その後は変形が伸びるようになった。圧縮応力 55N/mm² 付近では、ほぞ継手は単体に比べて 20%程度変位量が大きくなった。

ほぞ継手-1 の荷重と鉛直ひずみの関係を図-9 に示す。圧縮応力とひずみの関係は破壊までほぼ比例関係であった。ほぞ継手面の上下ではひずみ量に差はほとんど見られなかったが、断面で整理すると F3-F6 断面のひずみは他の断面に比べて 2000×10^{-6} 程度小さくなっており、長さに換算すると 0.8mm 程度の微小な片当りが生じていたことが確認できた。ほぞ継手の圧縮強さが低下した原因は、縮小モデルの試験と同様に、高強度樹脂にガラス繊維が貫入し、ほぞ継手部に局所的な応力集中が発生したことや片当りが発生したことが考えられる。破壊部の状況を写真-6 示す。また、ほぞ継手の変位量が FFU74 単体に比べて大きいのは高強度樹脂の弾性率が FFU74 繊維方向より小さいためと考えられる。

なお、土被り 50m、砂地盤 $N=10$ 、シールド径 6,000mm、FFU 配置角度 120° の場合、ほぞ部に発生する軸力は 3625kN (圧縮応力に換算すると約 12N/mm^2) であり、試験結果 (圧縮強さ約 62N/mm^2) は十分安全であると考えられる。

表-8 実大モデルでの圧縮試験結果

	ほぞ高さ h [mm]	ほぞ深さ d [mm]	破壊荷重 [kN]	圧縮強さ [N/mm ²]	対単体比
FFU74 単体	—	—	2697	67.4	100%
ほぞ継手-1	60	30	2534	63.4	94%
ほぞ継手-2	60	30	2492	62.3	92%

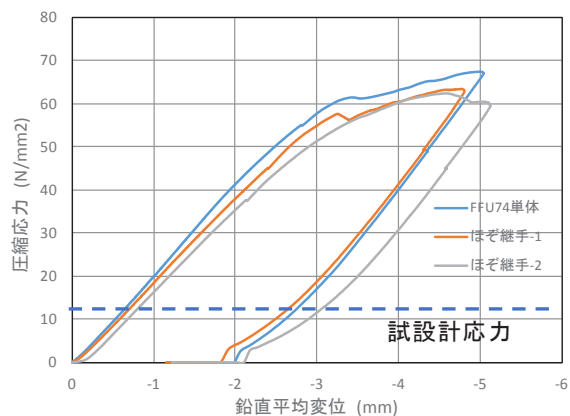


図-8 圧縮応力と鉛直変位

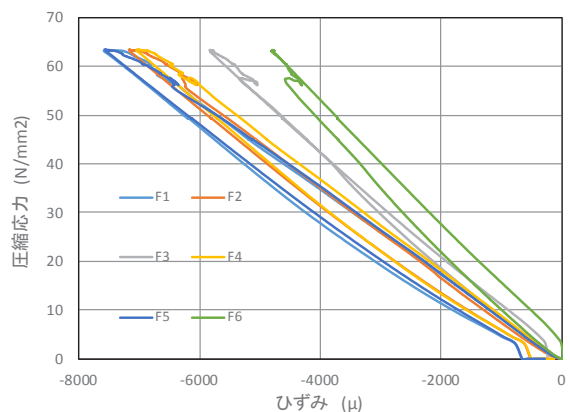


図-9 圧縮応力と鉛直ひずみ



写真-6 破壊部の拡大写真

6. おわりに

分割されたFFUセグメントの継手のせん断試験および圧縮試験を行い、実用的な継手耐力を確認した。

その結果、ほぞ継手のせん断耐力は①ほぞ上下のせん断耐力、②ほぞ部のせん断耐力、③ほぞ部の圧縮耐力のうち最小となる耐力で設計できること（図-10 参照）、ほぞ継手の軸方向圧縮耐力は、FFU74単体の80%の耐力で設計できることがわかった。

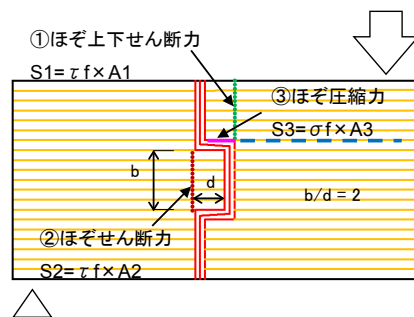


図-10 ほぞ継手のせん断耐力算定

【謝辞】

本報告は、大成建設、積水化学工業との共同研究成果の一部であり、関係各位に謝意を表します。

【参考文献】

- 1) 角田晋相、竹中計行、深田和志：FFU セグメントの開発、銭高組技報 No. 30, 2005. 11.
- 2) 国土技術研究センター：FAST 工法に適用するFFUセグメント及びその切削技術、建設技術審査証明事業（一般土木工法）報告書、2006. 11.
- 3) 大成建設、積水化学工業、銭高組：FFU セグメント継手の選定試験、2018年度FFUセグメント継手構造の開発報告書（内部資料）、2018. 3.
- 4) 大成建設、積水化学工業、銭高組：ほぞ形式のFFUセグメント継手の適用範囲検討、2019年度FFUセグメント継手構造の開発報告書（内部資料）、2019. 3.