

論文 常温硬化型超高強度繊維補強コンクリートの打継目せん断性能に関する実験的研究

佐々木 一成^{*1}・野村 敏雄^{*2}・武田 篤史^{*3}・吉田 浩一郎^{*4}

要旨: 常温養生により硬化する超高強度繊維補強コンクリート (以下, UFC と表記) は現場での打込みが可能であり, 一度に打込みができない構造物の施工においては通常のコンクリートと同様に打継目が発生する。そこで, UFC を用いたときに発生する各種打継目に対してせん断性能を把握するため, 簡易一面せん断実験を行った。その結果, UFC の打継目のせん断強度は打継面の処理方法により異なること, 打継面の摩擦係数は打継面の処理方法に関係なく材料によること, 普通コンクリートと UFC の打継目せん断性能は普通コンクリート同士の打継目と同様に評価できることがわかった。

キーワード: 超高強度繊維補強コンクリート, 常温硬化型, 打継目, せん断強度

1. はじめに

従来, 超高強度繊維補強コンクリート (Ultra high strength fiber reinforced concrete: 以下, UFC と表記) は硬化時に高温の給熱養生が必要であり, 工場で作成されたプレキャスト部材として使用されることが一般的であった。プレキャスト部材で規模が大きい構造物を建設する場合, 部材間にジョイント部が発生するため, 各種の接合方法について検討が行われてきている¹⁾。また, UFC の打継の検討は, UFC を埋設型枠として使用する場合に発生する普通コンクリートとの打継に限られていた²⁾。

一方, 本稿で対象とする UFC は常温硬化型であり, 高温の給熱養生を必要としないため, 現場での打込みが可能であるといった特長がある。常温硬化型 UFC を用いて, 規模が大きく一度に打込みを行うことができない橋梁などの構造物を建設する場合, UFC 同士の打継目を設けることが必要となる。プレキャスト部材の接合と異なり, 先打ち部にせん断キーを設けるなどの打継目処理を施した上で, 新しい UFC を直接打ち継ぐ方法が考えられる。

また, 新設工事で普通コンクリートに UFC を打ち継ぐ場合や, 耐震補強などでは既設コンクリートに UFC を打ち継ぐ場合が想定される。先打ち部の普通コンクリートにせん断キーを設ける方法や, 薄層を除去して凹凸を成形する方法, および打継面の普通コンクリートをチップングする方法が考えられる。

そこで, UFC 同士の打継目, UFC に普通コンクリートを打ち継ぐ場合, および普通コンクリートに UFC を打ち継ぐ場合を対象として, 簡易一面せん断実験を行った。比較のために打継目を持たない試験体や UFC から鋼繊維を除いたモルタル試験体についても実験を行った。

なお, UFC は普及しはじめた新しい材料であることから, 打継が計画されていない既設の硬化した UFC に普通コンクリートや UFC を打ち継ぐことは考えにくいので, 本稿では検討の対象外とした。

2. 簡易一面せん断実験方法

2.1 実験方法

(1) 試験機

荷重は図-1 に示す簡易一面せん断試験装置³⁾を用いて, 最大容量 5000kN の圧縮試験機により行った。簡易一面せん断試験装置は鋼製で, 上下のスペーサーを交換することにより試験体の傾斜角 α を $20\sim 40^\circ$ の範囲で 5° 刻みに変化させることができる。試験装置に作用させる最大荷重 P と傾斜角 α から, 打継面に作用するせん断応力 τ と垂直応力 σ の関係を整理した。載荷速度はせん断面に作用するせん断応力が $0.4\sim 0.5\text{N/mm}^2/\text{min}$ となるように設定した。

(2) 試験体

試験体は直径 200mm, 高さ 200mm の円柱である。高さ 100mm の位置に打継目を設けた。先打ち部を高さ 100mm で作製し, 打継目になる面を処理した後, 後打ち部を打込んだ。1 ケースあたり 3 種類 (一部 2 種類) の傾斜角で実験を行い, 1 つの傾斜角あたり 3 体, 合計 9 体の試験体を使用した。

(3) せん断性能の評価方法

最大荷重 P と試験体の傾斜角 α から式(1),(2)より垂直応力 σ とせん断応力 τ を求めた。

$$\sigma = (P/A)\sin\alpha \quad (1)$$

$$\tau = (P/A)\cos\alpha \quad (2)$$

*1 (株)大林組 技術研究所 構造技術研究部 修 (工) (正会員)

*2 (株)大林組 技術研究所 構造技術研究部 主任研究員 博 (工)

*3 (株)大林組 技術研究所 構造技術研究部 副主任研究員 修 (工) (正会員)

*4 宇部興産 (株) 建設資材カンパニー 技術開発研究所 コンクリート開発部 主席研究員 (正会員)

ここに、 σ ：垂直応力(N/mm²)
 τ ：せん断応力(N/mm²)
 P ：最大荷重(N)
 A ：せん断面積(mm²)
 α ：せん断破壊面の傾斜角(°)

次に垂直応力 σ とせん断応力 τ の関係から Mohr-Coulomb のせん断破壊基準線を仮定し、式(3)からせん断強度 τ_0 と摩擦係数 μ を求めた。

$$\tau = \tau_0 + \mu\sigma \quad (3)$$

ここに、 τ_0 ：せん断強度(N/mm²)
 μ ：摩擦係数

2.2 使用材料

本実験では以下の材料を使用した。圧縮強度試験結果を表-1に示す。

(1) UFC

本実験に使用した UFC はポルトランドセメント、ポゾラン材、無機粉体、粒径 5mm 以下の骨材、特殊高性能減水剤、水および鋼繊維から構成され、標準養生により材齢 28 日で圧縮強度 180N/mm²、引張強度 8.8N/mm² (いずれも特性値) を満足する材料である。使用した鋼繊維は直径 0.16mm、長さ 13mm、引張強度 2800N/mm² で 2vol.% 混入している。本実験では試験体を気中で養生した。

(2) 普通コンクリート

本実験に使用した普通コンクリートは呼び強度 30N/mm²、粗骨材の最大寸法は 20mm である。

(3) モルタル

鋼繊維が打継目に与える影響を把握するため、鋼繊維を混入しない UFC (モルタル) を使用した。

2.3 実験パラメータ

打継面の方向、打継処理方法 (UFC 同士、UFC と普通コンクリート)、打込み順序、鋼繊維の有無をパラメータとした。詳細を以下に示す。

(1) 打継面の方向

打継面の方向が打継目のせん断性能に与える影響を把握するため、図-3 に示すように打継面を水平にして打ち継いだ試験体と鉛直にして打ち継いだ試験体を作製して実験を行った。

(2) UFC 同士の打継処理方法

新設の UFC 同士の打継面の処理方法の影響を把握するため、表-2No.1~7 に示す以下の 4 種類の処理方法について実験を行った。

a. せん断キー (No.1, No.4 試験体)

せん断キーを直径 200mm の断面に対し図-2 のように配置した。1 つの凸部は直径が根元で 20mm、高さ 8mm である。この形状は、コンクリート用鉛直打継目処理シート (以下、打継シートと表記) を使用して成形した。

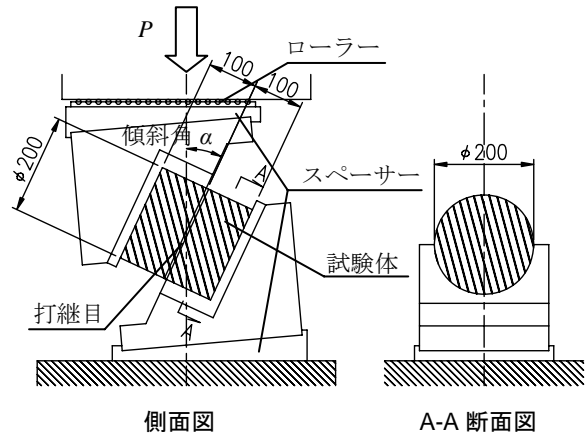


図-1 簡易一面せん断試験機

表-1 実験に使用した材料の圧縮強度

	a. 先打ち部			b. 後打ち部		
	番号	圧縮強度	材齢 (日)	番号	圧縮強度	材齢 (日)
UFC(1)	U-a1	211	66	U-b1	208	28
UFC(2)	U-a2	184	55	U-b2	204	33
普通コン	N-a	30	55	N-b	32	33
モルタル	M-a	179	55	M-b	177	33

※ 圧縮強度の単位は N/mm²

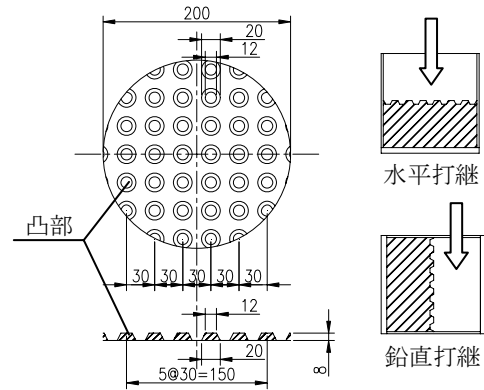


図-2 せん断キー 図-3 打継方向

表-2 実験ケース

No.	打継方向	打継処理方法	先打ち部*	後打ち部*	傾斜角 α (°)
1	水平	せん断キー	U-a1	U-b1	20,25,30
2	〃	薄層除去	U-a1	U-b1	25,30,35
3	〃	処理なし	U-a1	U-b1	25,30,35
4	鉛直	せん断キー	U-a1	U-b1	25,30,35
5	〃	薄層除去	U-a1	U-b1	25,30,35
6	〃	処理なし	U-a1	U-b1	30,35,40
7	—	打継目なし	—	U-b1	20,25
8	水平	せん断キー	U-a2	N-b	25,30,35
9	〃	〃	N-a	U-b2	25,30,25
10	〃	薄層除去	N-a	U-b2	25,30,35
11	〃	〃	N-a	N-b	25,30,35
12	〃	チップング	N-a	U-b2	25,30,35
13	水平	薄層除去	M-a	M-b	25,30,35
14	—	打継目なし	—	M-b	20,25,30

※ 番号は表-1 に示す使用材料をあらわす。

打継面全体の断面積（=31400mm²）に対する凸部根元の断面積（=314mm²×34=10680mm²）は約 1/3 である。水平打継試験体の作製では、先打ち部作製時に打込み面に打継シートの凸部を下向きにして打継面にかぶせた。鉛直打継では先打ち部作製時に打継目となる型枠面に打継シートを貼り付けた。UFC 硬化後、打継シートを外して後打ち部を打ち継いだ。

水平打継では打込み後に打継シートを載せて試験体を作製したため、凹部に気泡の跡が見られた（写真-1）が、鉛直打継では凹凸に UFC が完全に充填されていた。

b. 薄層除去（No.2, No.5 試験体）

UFC が硬化する前に高圧の水で表面の薄層を除去し、表面に凹凸を設けた。

水平打継試験体では先打ち部を打込み後、打継面に遅延剤を塗布し、24 時間後に表面の薄層を洗い流した。鉛直打継では先打ち部作製時に打継目となる型枠面に市販の硬化遅延シートを貼り付けて UFC を打込んだ。24 時間後に型枠を脱型して高圧の水で表面を洗い流し、薄層を除去した。

打継面の状態を写真-2 に示す。細骨材および鋼繊維が見える状態になり、凹凸の深さは 2mm 程度であった。露出した鋼繊維は表面に沿っていて、打継面に直角となる鋼繊維は見られなかった。鉛直打継では打継面に型枠があり、水平打継では金ゴテで直角に向いた繊維が押さえられたためと考えられる。

c. 打継処理なし（No.3, No.6 試験体）

打継目の処理を行わず、水平打継は打継面を金ゴテ仕上げ、鉛直打継は打継面を木製型枠の型枠面とした。UFC は粘性が高く金ゴテ仕上げが難しいため、水平打継では打継面の表面に水性タイプのコンクリート養生剤を塗布して表面を仕上げた。

金ゴテ仕上げ面は、型枠による打継面に比べて不陸が見られたが、凹凸の深さは 1mm 以下であった。鉛直打継試験体の打継面は平滑な型枠面であった。

d. 打継目なし（No.7 試験体）

打継目を設けず、一体で成形した試験体である。

(3) UFC とコンクリートの打継処理方法

UFC とコンクリートの打継面の影響を把握するため、表-2No.8~12 に示す以下の 3 種類の処理方法について実験を行った。なお、UFC と普通コンクリートの打継処理方法については、打継面の方向はパラメータとせず、すべての試験体の打継面を水平とした。

a. せん断キー（No.8, No.9 試験体）

打継シートを先打ち部の型枠底面に敷いて、普通コンクリートまたは UFC を打込んだ。後打ち部は先打ち部試験体の上下を反転させて凹凸が成形された面を上向きにして打込んだ。打継面の凹凸の配置は図-2 と同様であ



写真-1 せん断キーの成形状況（水平打継）（No.1 試験体）



写真-2 UFC の薄層除去後の状況（No.2 試験体）

るが、材料の強度差を考慮して、普通コンクリートと UFC の打継面での断面積の比が 2:1（UFC が凸部、コンクリートが凹部）となるように凹凸を配置した。打継面は UFC、普通コンクリートとも気泡が残ることなく凹凸が成形された。

b. 薄層除去（No.10 試験体）

先打ち部打込み後に打継面となる表面に遅延剤を塗布し、24 時間後に水洗いして薄層を除去した。コンクリートの粗骨材が見える状態で 3mm 程度の凹凸が成形された。

c. チッピング（No.12 試験体）

普通コンクリートの表面をピックおよびハンマーを用いてチッピングした。粗骨材が見える程度で 8mm 程度の凹凸が成形された。薄層除去と比べて凸部が尖った形状となっていた。

(4) UFC と普通コンクリートの打込み順序

打込み順序の違いが打継目のせん断性能に与える影響を把握するため、表-2No.8, 9 に示す UFC に普通コンクリートを打込んだ場合と、普通コンクリートに UFC を打込んだ場合について実験を行った。

(5) 鋼繊維の有無

鋼繊維が打継目のせん断性能に与える影響を把握するため、表-2No.13, 14 に示す鋼繊維なしの薄層除去処理した打継目を設けた試験体と打継目なしの試験体について実験を行った。

薄層除去した打継面は細骨材が見える状態で、鋼繊維が入った UFC の薄層除去と同様の凹凸が成形された。

3. UFC 同士の打継目せん断実験結果

3.1 実験後の破壊性状

(1) せん断キー

後打ち部 UFC の凸部根元で一面せん断破壊し、鋼繊維の引き抜けも観察された。凸部への UFC の充填が十分でない試験体が見られたが、そのような場合であっても凸

部の根元で一面せん断破壊していた。最大荷重直後に載荷を終了し、打継面を観察したところ、写真-3に示すように凸部の根元にひび割れが見られた。しかし、この時点で破断している凸部はなかった。

なお、水平打継と鉛直打継で破壊性状に違いは見られなかった。

(2) 薄層除去処理

打継面がすべることにより破壊した。破壊後の打継面には薄層除去後にみられた細骨材による凹凸はみられずマトリックスが一方から剥離してもう一方に付着していた。また、薄層処理後に直線で露出していた鋼繊維は曲がった状態となっていた。水平打継と鉛直打継で破壊性状に違いは見られなかった。

(3) 打継処理なし

打継面における付着が小さく、載荷前に打継面で分裂する試験体も見られた。打継面でのモルタルの剥離、付着は見られなかった。

(4) 打継目なし

破壊面に鋼繊維が露出し、折れ曲がったものや一部破断した鋼繊維が見られた。

3.2 せん断特性

せん断キー、薄層除去、処理なし、打継目なしの垂直応力とせん断応力の関係を図-4~7に示す。近似線は最小二乗法により線形近似して求めた。各実験のせん断強度 τ_0 および摩擦係数 μ を表-3に示す。



写真-3 最大荷重直後の凸部の状況 (No.4 試験体)

図-4~6に示すようにいずれの打継処理方法においても打継方向によるせん断強度の大きな違いは見られなかった。これは、UFCは水が少なくブリージングがないためであると考えられる。

せん断キーのせん断強度 τ_0 は水平打継と鉛直打継に差はなく、 8.0N/mm^2 程度である。一方、一体型のせん断強度 τ_0 は 26.1N/mm^2 であり、その比は約1:3であった。凸部根元の断面積が全断面積の1/3であることから、打継面のせん断強度はせん断破壊する面の面積に比例するものと考えられる。

薄層除去をした打継のせん断強度はせん断キーの強度の0.7倍程度と小さい。露出した細骨材がとれることで破壊しており、鋼繊維が入った凸部に抵抗しているせん断キーと破壊形態が異なると考えられる。

打継処理をしていない試験体についてはほとんどせ

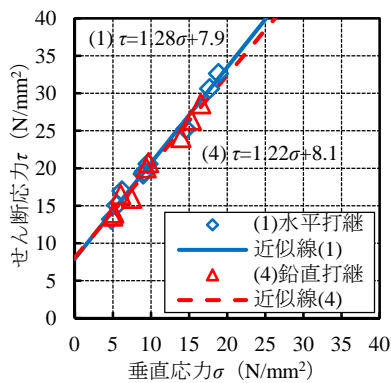


図-4 せん断キー打継の σ - τ 関係

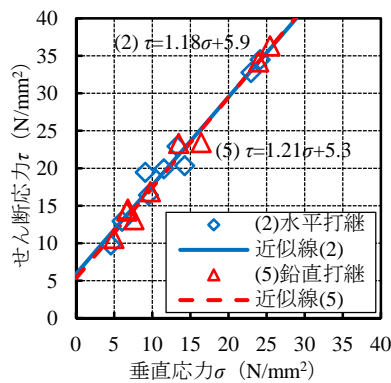


図-5 薄層除去打継の σ - τ 関係

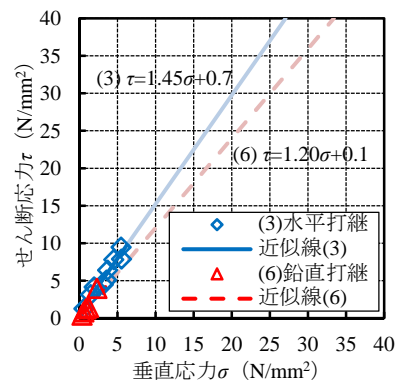


図-6 無処理打継の σ - τ 関係

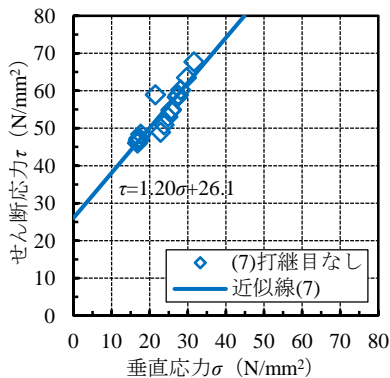


図-7 打継目なしの σ - τ 関係

表-3 UFC 同士の打継目のせん断強度と摩擦係数

No.	打継処理方法	打継方向	せん断強度 τ_0 (N/mm ²)	摩擦係数 μ	相関関数 r
1	せん断キー	水平	7.9	1.28	0.99
4	"	鉛直	8.1	1.22	0.99
2	薄層除去	水平	5.9	1.18	0.98
5	"	鉛直	5.3	1.21	0.99
3	処理なし	水平	0.7	1.45	0.97
6	"	鉛直	0.1	1.20	0.97
7	打継目なし	-	26.1	1.20	0.91

せん断強度を期待することができない。

すべてのケースで摩擦係数 μ は1.18~1.45で分布しているが、概ね1.2程度であり打継処理方法や打継の有無によらず、1.2を用いることで評価可能と考えられる。

UFC 同士の打継面処理にはせん断キーが有効であったが、今回使用した打継シートは普通コンクリート用に市販されているもので、凸部が小さく、鋼繊維が凸部に入りにくい形状であった。実験結果から、凹凸を1:1にすることにより最適化が図れるものと考えられるが、凹凸の深さをパラメータとした実験は行うなどして、より最適な凹凸の形状を求めることが課題となる。

4. コンクリートとUFCの打継目せん断実験結果

4.1 実験後の破壊性状

いずれの打継処理による試験体においても普通コンクリート側が破壊することにより実験を終了した。実験終了後のUFCに欠けやひび割れなどは見られなかった。

(1) せん断キー

UFCで成形された凸部は欠けることなく、普通コンクリートがUFCに付着していた。凸部の頂部は平滑であるため、普通コンクリート側の破壊面に凸部頂部の跡が残っている箇所が見られた(写真-4)。

(2) 薄層除去

普通コンクリート側で破断しており、UFC側には普通コンクリートが全面に付着していた。破壊面の普通コンクリートの粗骨材は割れた状態であった。

(3) チッピング処理

薄層除去と同様に普通コンクリート側で破壊しており、UFC側には普通コンクリートが全面に付着していた。破壊面の普通コンクリートの粗骨材は割れた状態であった。

4.2 せん断特性

各打継目の垂直応力とせん断応力の関係を図-8~10に、せん断強度 τ_0 および摩擦係数 μ を表-4に示す。

打継面の処理方法をせん断キーとし、先打ち部:UFC、後打ち部:普通コンクリートとした場合と、先打ち部:

普通コンクリート、後打ち部:UFCとした場合の実験結果を図-8に示す。両者のせん断強度、摩擦係数に大きな違いは見られず、打込みの順序の影響は小さいと考えられる。先打ち部のUFCの圧縮強度が他と比べて小さかったが、普通コンクリートで破壊しており、強度が小さいことによる影響はなかったと考えられる。

先打ち部の普通コンクリートの打継面を薄層除去処理し、後打ち部にUFCを打込んだ場合と、普通コンクリートを打込んだ場合の実験結果を図-9に示す。UFCと普通コンクリートの打継目のせん断強度は、普通コンクリート同士のせん断強度と同等であった。

普通コンクリートをチッピングすることにより打継面を処理した結果を図-10に示す。せん断キーや薄層除去による処理に比べてせん断強度が大きくなった。凹凸の深さはせん断キーと同程度であるので、凹凸の形状や粗骨材とUFCとの付着が影響しているものと考えられる。特にせん断キーは凸部の頂部が平滑であるため、せん断力に抵抗できず、せん断強度が小さくなったものと考えられる。

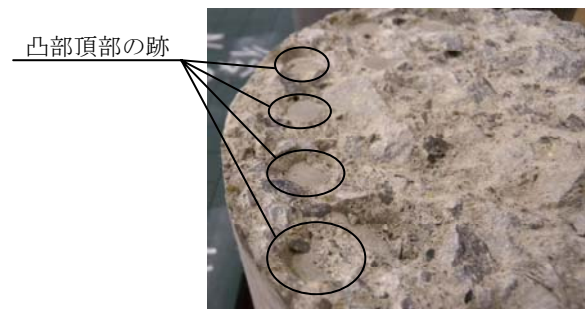


写真-4 普通コンクリート側の破壊面 (No.9 試験体)

表-4 せん断強度と摩擦係数

No.	打継処理方法	先打ち	後打ち	せん断強度 τ_0 (N/mm ²)	摩擦係数 μ	相関関数 r
8	せん断キー	U	N	3.3	1.18	0.98
9	〃	N	U	4.8	1.05	0.99
10	薄層除去	N	U	5.1	1.04	0.99
11	〃	N	N	4.2	1.08	0.99
12	チッピング	N	U	7.0	1.02	0.98

U: UFC, N: 普通コンクリート

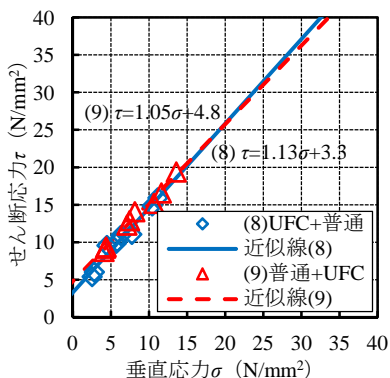


図-8 せん断キー打継の σ - τ 関係

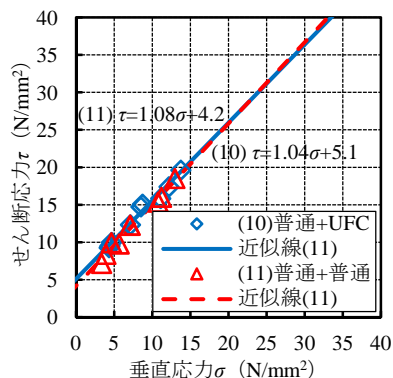


図-9 薄層除去打継の σ - τ 関係

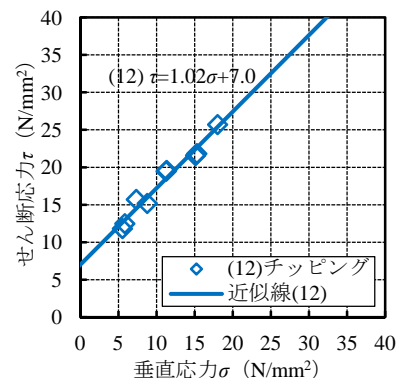


図-10 チッピング打継の σ - τ 関係

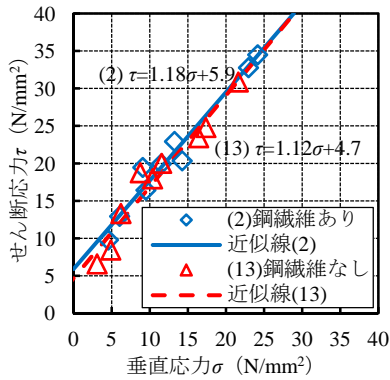


図-11 薄層除去打継の σ - τ 関係

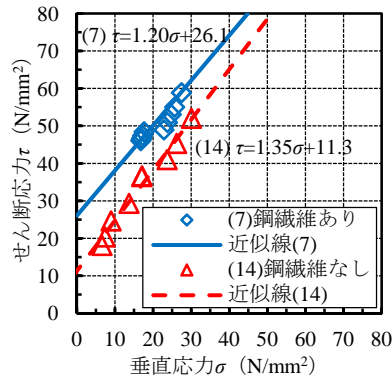


図-12 UFC 一体成型の σ - τ 関係

表-5 せん断強度と摩擦係数

No.	打継方法	鋼繊維	τ_0	μ	r
2	薄層	有	5.9	1.18	0.98
13	除去	無	4.7	1.12	0.97
7	打継	有	26.1	1.20	0.91
14	なし	無	11.3	1.35	0.99

τ_0 : せん断強度(N/mm²)

μ : 摩擦係数

r : 相関係数

すべてのケースで摩擦係数 μ は概ね 1.1 程度であり打継処理方法によらず, 1.1 を用いることで評価可能であると考えられる。

5. 鋼繊維を含まないモルタルのせん断実験結果

5.1 実験後の破壊性状

(1) 薄層処理

打継面がすべることにより破壊した。薄層除去処理時に見られた細骨材による凹凸は小さくなった。

(2) 打継目なし

せん断破壊面の他に斜めひび割れが生じた。せん断破壊面での破壊時の衝撃でせん断破壊面以外にもひび割れが生じたものと考えられる。

5.2 せん断特性

垂直応力とせん断応力の関係を図-11, 12 に, せん断強度, 摩擦係数を表-5 に示す。

薄層除去による打継面ではせん断強度に有意な差はみられなかった。このことから, 鋼繊維はせん断にほとんど抵抗せず, 細骨材による打継面の粗さによってせん断に抵抗しているものと考えられる。打継面に露出した鋼繊維が打継面に沿っていて後打ち部の UFC への付着が小さかったためと推測される。UFC の薄層除去は打継面に鋼繊維が露出するため, 耐久性が問題となるが, 露出した鋼繊維は打継目のせん断強度にほとんど効いておらず, 鋼繊維なしの薄層除去による打継目として評価すれば問題ない。

打継目がない試験体では鋼繊維の有無でせん断強度に差がみられた。Mattock らは, RC 部材において, $\tau = \tau_0 + \mu(p \cdot f_y + \sigma)$ (ここに, p : せん断補強鉄筋比, f_y : せん断補強鉄筋の降伏強度) の関係があるとしている⁴⁾。本実験に使用した UFC は引張に対して鋼繊維が切れることはなく引き抜けるため, 繊維の混入率と降伏強度を当てはめることはできない。しかし, UFC の引張強度は平均 12N/mm² 程度であり, ひび割れ後に最大となる特徴があることから, $p \cdot f_y$ に 12N/mm² を当てはめると, 鋼繊維

を含まない一体成型モルタルのせん断強度 $\tau_0 = 11.3$, 摩擦係数 $\mu = 1.35$ を代入して $\tau = 11.3 + 1.35(12 + \sigma) = 27.5 + 1.35\sigma$ となり, 鋼繊維を含む一体成型 UFC のせん断応力をあらす式に近くなる。よって, UFC においては鋼繊維がせん断補強鉄筋と同様の働きをしていると考えられる。

6. まとめ

UFC による各種打継目の簡易一面せん断実験を行い, 以下の結果が得られた。

(1) UFC 同士の打継について

- せん断キーの場合, 凸部の面積によりせん断強度が決定すると考えられる。
- UFC の摩擦係数は打継面の処理方法によらず, 今回は 1.2 であった。
- 打継面のせん断強度は打継方向によらない。

(2) 普通コンクリートと UFC の打継について

- いずれの打継面処理方法においても普通コンクリート側で破壊を生じる。打継目のせん断性能は普通コンクリート同士のせん断性能と同等と考えてよい。

参考文献

- 武者浩透, 渡辺典男, 竹田康雄, 松川文彦: 東京国際空港 GSE 橋梁 桁間ジョイントの実験, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.3, pp1477-1482, 2008
- (財) 土木研究センター: 超高強度繊維補強コンクリートを用いた高耐久性薄肉埋設型枠「ダクトフォーム」, 建設技術審査証明報告書, 建技審証 第 0124 号, 2007.3
- 瀬古育二, 山口温朗, 自閑茂治: RCD コンクリートのせん断強度に関する検討, ダム技術, No.26 増刊, pp56-65, 1988
- Alan H. Mattock, Neil M. Hawkins: Shear transfer in reinforced concrete-recent research, PCI Journal, pp.55-75, March-April 1972