

# 論文 高強度繊維補強セメント系複合材料の支圧強度特性の把握

酒井 賢太\*1・田中 康二\*2・三木 朋広\*3

**要旨：**高強度繊維補強セメント系複合材料の支圧強度特性の把握のために、円柱供試体を用いて支圧強度試験を行い、支圧強度、供試体の表面ひずみおよび破壊形態を確認した。試験結果から、円形支圧板の断面積に対する供試体断面積の比（支圧面積比）が1～3の範囲においては支圧面積比の増加にともない支圧強度は増加する傾向にあり、その関係は概ね直線近似が可能であること、支圧強度に対する支圧荷重によるひび割れ発生強度の比は0.44～0.71であること、供試体の破壊形態は、支圧面積比が大きいほど載荷軸方向にひび割れが卓越することがわかった。

**キーワード：**高強度繊維補強セメント系複合材料, 超高強度繊維補強コンクリート, 支圧強度, 破壊形態

## 1. はじめに

近年、より少ない人数で生産性の高い建設現場の実現が求められていること、コンクリート構造物は大型化傾向にあることから、今後、コンクリート構造物に対し、大型のプレキャストコンクリート部材（以下、PCa 部材）の適用の増大が予想される。普通コンクリートを採用した PCa 部材を大型コンクリート構造物に適用する場合、部材の運搬上の制約から構造物を構成する PCa 部材数が増大し、運搬コストの増加にともなう建設コストの増加や接合部における耐久性の確保が課題としてあげられる。

この課題の解決策の一つとして高強度繊維補強セメント系複合材料（以下、VFC）や超高強度繊維補強コンクリート（以下、UFC）を採用したプレキャスト・プレストレストコンクリート構造の適用があげられる。VFC および UFC は、土木学会の VFC あるいは UFC の設計・施工指針（案）<sup>1) 2)</sup>に規定された繊維補強を行ったセメント系複合材料である。VFC は粗骨材を用いるものも含まれ、圧縮強度の特性値が 60N/mm<sup>2</sup> 以上と示されているのに対し、UFC は、圧縮強度の特性値が 150N/mm<sup>2</sup> 以上、ひび割れ発生強度の特性値が 4N/mm<sup>2</sup> 以上、引張強度の特性値が 5N/mm<sup>2</sup> 以上と示されているのが特徴である。VFC および UFC は、普通コンクリートと比較して高い圧縮強度を有することが特徴である。この材料特性を活かすことで、部材厚の低減とともに大きなプレストレス力の導入が可能となり、部材の軽量化を図ることができる。また、各種定着工法<sup>3) 4) 5)</sup>では、プレストレス導入時のコンクリートの圧縮強度は 20～48N/mm<sup>2</sup> 程度であることから、VFC および UFC の採用により支圧板の小型化、定着具の配置間隔および部材における縁端距離の短縮が可能となり、さらなる部材厚の低減が可能となる。しかし、これらの検討に必要な VFC もしくは UFC の支圧強度特性は、既往の研究<sup>6)</sup>はあるもののデータが

少なく、明らかになっていないのが実状である。

以上より、大型コンクリート構造物に VFC および UFC を採用したプレキャスト・プレストレストコンクリート構造の適用可能性の検証を目的に、VFC および UFC の支圧強度特性について検討した。

## 2. 実験概要

### 2.1 実験ケース

表-1に実験ケースを示す。実験パラメータとして、結合材を主とした UFC 専用混合粉体と練混ぜ水の質量比（以下、W/B）、供試体寸法および支圧面積比を設定した。本研究における支圧面積比とは、円形支圧板の断面積に対する供試体断面積の比である。W/B は 15%、20%、25%の3水準とした。供試体の寸法および形状は、直径 100mm、高さ 200mm の円柱供試体を基本とし、W/B が 15%のコンクリートにおいては、支圧強度への寸法の影響を確認するために、直径 125mm、高さ 250mm の円柱供試体を設定した。支圧面積比は、直径 100mm の円柱供試体に対しては、1.0、1.3、1.6、2.0 および 3.0 の5水準を、直径 125mm の円柱供試体に対しては、1.0、1.3、1.6、2.1 および 3.1 の5水準を設定した。

### 2.2 使用材料およびコンクリート配合

表-2にコンクリートの配合を示す。土木学会の VFC あるいは UFC の設計・施工指針（案）<sup>1) 2)</sup>によると U-15%は UFC に、V-20%および V-25%は、VFC に分類される。使用材料は、結合材を主とした UFC 専用混合粉体、骨材を主とした UFC 専用混合粉体、水、鋼繊維および混和剤とした。骨材を主とした UFC 専用混合粉体に含まれる骨材の粒径は 2.5mm 以下であるため、本研究における配合にはいずれも粗骨材が含まれない。鋼繊維は、引張強度 2000N/mm<sup>2</sup> 以上、直径 0.2mm、長さ 15mm のものとし、配合によらず配合の内割で 2vol.% 混入した。混和剤

\*1 戸田建設（株） 土木技術統轄部 課長代理 修士（工学）（正会員）

\*2 戸田建設（株） 土木技術統轄部 課長

\*3 神戸大学 大学院工学研究科市民工学専攻 准教授 博士（工学）（正会員）

表-1 実験ケース

No	W/B※ (%)	供試体寸法 (mm)	支圧板の直径 (mm)	支圧板の断面積 (mm <sup>2</sup> )	支圧面積比 (-)	No	W/B※ (%)	供試体寸法 (mm)	支圧板の直径 (mm)	支圧板の断面積 (mm <sup>2</sup> )	支圧面積比 (-)
1	15	直径 100 × 高さ 200	100	7,854	1.0	11	25	直径 100 × 高さ 200	100	7,854	1.0
2			87	5,945	1.3	12			87	5,945	1.3
3			80	5,027	1.6	13			80	5,027	1.6
4			71	3,959	2.0	14			71	3,959	2.0
5			58	2,642	3.0	15			58	2,642	3.0
6	20	直径 100 × 高さ 200	100	7,854	1.0	16	15	直径 125 × 高さ 250	125	12,272	1.0
7			87	5,945	1.3	17			109	9,331	1.3
8			80	5,027	1.6	18			100	7,854	1.6
9			71	3,959	2.0	19			87	5,945	2.1
10			58	2,642	3.0	20			71	3,959	3.1

※結合材を主とした UFC 専用混合粉体と練混ぜ水の質量比

表-2 コンクリートの配合

配合名	W/B (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )							
		W <sup>※1</sup>	SP1 <sup>※2</sup>	SP2 <sup>※3</sup>	SP3 <sup>※4</sup>	AE <sup>※5</sup>	B <sup>※6</sup>	S <sup>※7</sup>	FM <sup>※8</sup>
U-15%	15.0	200	18	—	—	—	1,333	896	154
V-20%	20.0	241	—	11	—	12.07	1,207		
V-25%	25.0	276	—	—	17	11.02	1,102		

※1: 上水道水 ※2: UFC 専用高性能減水剤 ※3: 高性能減水剤 ※4: 高性能 AE 減水剤 ※5: 空気量調整剤

※6: 結合材を主とする UFC 専用混合粉体 ※7: 骨材を主とする UFC 専用混合粉体

※8: UFC 専用鋼繊維(引張強度 2000N/mm<sup>2</sup>以上, 直径 0.2mm, 長さ 15mm)

は、JIS R 5201 のフロー試験を参考に、落下運動を行わない条件で測定したフローが 270±20mm の範囲となるように、U-15%は UFC 専用高性能減水剤を、V-20%は市販の高性能減水剤を、V-25%は市販の高性能 AE 減水剤を水に内割添加した。添加量は予備試験によって設定した。予備試験において、V-20%および V-25%は U-15%より空気量が大きくなったため、空気量の増大にともなう支圧強度の低下を防止するために、空気量調整剤を内割添加した。

### 2.3 供試体の作製方法

コンクリートの練混ぜは、気温 20°C、湿度 80%RH 以上の恒温室内で実施した。練上り後、コンクリートのフレッシュ性状を確認し、土木学会の UFC の設計・施工指針 (案) <sup>2)</sup> に準拠して、手で持てる程度の容器を使用して型枠の上面まで締固めは行わず連続的に流し込んだ。なお、本研究における想定部材は、寸法が幅 6m 程度、高さ 1.5m 程度、厚さ 0.7m 程度の厚さ方向に 2 列のシースが配置されプレストレスにより接合される PCa 部材である。想定部材に対する打込み方法は、部材の高さ方向に打上がるように部材の幅中央に設置したホッパ 1 箇所より鋼製型枠の天端まで締固めは行わず連続的に流し込む方法を想定している。このため、供試体と想定部材において、2.4(3)に示す試験時の載荷荷重、プレストレス力の作用方向に対する打上がりの方向および打込み方法は同様である。供試体は各実験ケースにつき 3 本作製した。打込み後は一次養生として 20°C 環境下において封緘養生を行い、材齢 24 時間にて脱型した。脱型後は土木学会の UFC の設計・施工指針 (案) <sup>2)</sup> に準拠して養生温度 90°C を 48 時間保持する標準熱養生を実施した。なお、標

準熱養生時における昇温および降温速度は、いずれも 15°C/hr とした。標準熱養生後に端面仕上げ機により供試体の打込み面および底面を研磨処理した。

### 2.4 実験方法

#### (1) フレッシュ性状試験

コンクリートのフレッシュ性状を把握するために、フロー、空気量およびコンクリートの温度を測定した。フロー試験は、JIS R 5201 を参考に、落下運動を行わない状態でコーンを抜き取り、200mm フロー到達時間、90 秒後および 180 秒後のフローを測定した。また、空気量試験は、JIS A 1116 を参考に実施した。

#### (2) 圧縮強度試験

コンクリートの圧縮強度を把握するために、JIS A 1108 を参考に圧縮強度試験を実施した。載荷速度は、圧縮応力度の増加が毎秒 0.6N/mm<sup>2</sup> となる速度とした。

#### (3) 支圧強度試験

支圧強度試験は、円柱供試体の打込み面を研磨し、鋼製の円形支圧板を設置して、供試体の破壊まで圧縮載荷することで実施した。本研究において、型枠上面まで鉛直方向に打上がるため打込み面付近の供試体側面における鋼繊維の配向は、底面付近の供試体側面と比較して水平面に対し上向きあるいは斜め上向きになりやすいことならびに支圧荷重によるひび割れが供試体の載荷軸方向に発生することが想定された。このため、鋼繊維の架橋効果が発揮されにくく、供試体における VFC および UFC の支圧強度特性を過大評価しないために円柱供試体の打込み面に支圧板を設置した。載荷速度は、支圧面積比によらず一定とし、JIS A 1108 を参考に支圧板がない場合 (全面載荷) の圧縮応力度の増加が毎秒 0.6N/mm<sup>2</sup> と

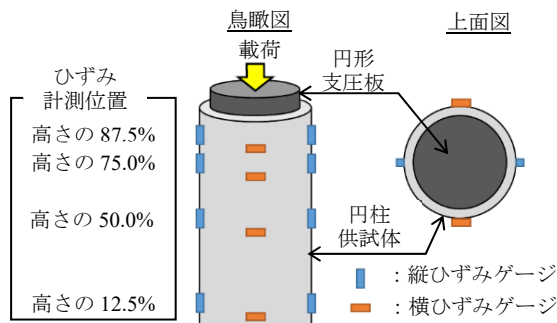


図-1 表面ひずみの計測位置

る速度を目安に载荷した。圧縮载荷中は、供試体の表面ひずみの変化を把握するために、図-1に示すように供試体底面を基準に供試体高さの12.5%、50.0%、75.0%および87.5%の位置に検長10mmのひずみゲージを取付け、供試体の縦ひずみと横ひずみを各高さ2箇所ずつ測定した。試験終了後は供試体の破壊形態を目視にて確認した。

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 コンクリートのフレッシュ性状と圧縮強度

表-3にフレッシュ性状試験の結果を示す。いずれの配合の90秒後のフローは $270 \pm 20 \text{mm}$ の範囲であった。U-15%は、他の配合と比較して200mmフロー到達時間が遅いこと、フローコーンの抜き取り90秒後から180秒後にかけたフローの変化が大きいことから、粘性が高い配合であるといえる。空気量に関して、V-20%およびV-25%は、空気量調整剤を添加したため、U-15%より小さい値であった。一方、U-15%における空気量は、3.6%であったが、UFCは粘性が高く練混ぜ中および打込み中に3~5%の空気が混入する可能性がある<sup>2)</sup>と報告されていることから、通常の範囲にあると判断し、空気量の調整は行わないこととした。

圧縮強度に関して、U-15%の配合を採用した直径100mmと直径125mmの円柱供試体において、それぞれ $213 \text{N/mm}^2$ および $209 \text{N/mm}^2$ であり供試体寸法によらず同程度であったのに対し、V-20%は $167 \text{N/mm}^2$ 、V-25%は $152 \text{N/mm}^2$ であり、W/Bが大きくなると圧縮強度は小さくなることを確認した。

#### 3.2 支圧強度特性

##### (1) 支圧耐力

図-2に支圧強度試験によって得られた支圧耐力を示す。なお、支圧耐力は各実験ケースにおける供試体3本の平均値である。図-2より、W/Bや供試体寸法によらず、支圧面積比1~3の範囲においては、支圧面積比が大きくなるほど支圧耐力は減少する傾向にあることを確認した。

##### (2) 支圧強度と支圧面積比の関係

図-3に支圧強度と支圧面積比の関係を示す。なお、

表-3 コンクリートのフレッシュ性状

配合名	200mm フロー 到達時間 (秒)	90秒 フロー (mm)	180秒 フロー (mm)	空気量 (%)	温度 (°C)
U-15%	8.8	275	292	3.6	28
V-20%	3.4	266	266	1.1	25
V-25%	4.2	263	264	0.1	23

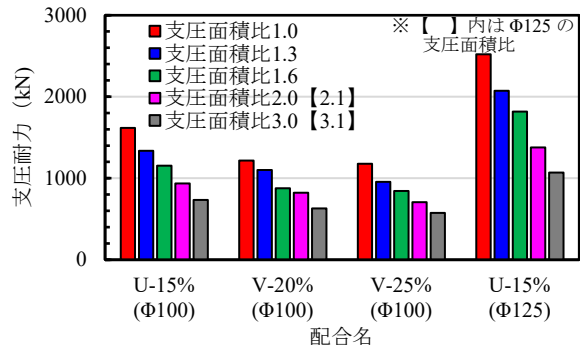


図-2 支圧耐力

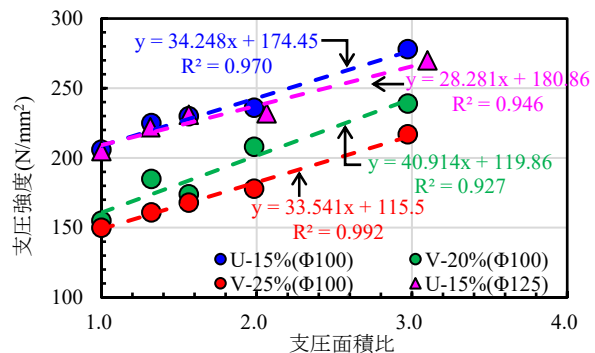


図-3 支圧強度と支圧面積比の関係

支圧強度は、各実験ケースにおける支圧耐力を支圧板の断面積で除して算定した値の供試体3本の平均値である。図-3よりW/Bによらず、支圧面積比1~3の範囲においては、支圧面積比が大きくなるほど支圧強度は増加する傾向にあり、その関係は支圧面積比が3程度までは概ね直線近似が可能であることを確認した。また、U-15%の直径100mmと直径125mmの試験結果の比較より、支圧面積比1~3の範囲においては、支圧強度と支圧面積比の関係は、供試体寸法によらず概ね同様であった。

##### (3) 支圧強度に対する支圧荷重によるひび割れ発生強度の比と支圧面積比の関係

図-4に支圧強度試験によって得られた応力ひずみ曲線の一例を示す。なお、図-4における応力は載荷荷重を支圧板の断面積で除して算定した。また、縦1、縦2、横1および横2はそれぞれ円柱供試体の側面に貼り付けたひずみゲージに対応している。本研究では支圧強度試験により同一の供試体から得られる16本の応力ひずみ曲線において、ひずみが急増するような変曲点あるいは不連続点のうち最小値となる応力のときにひび割れが発生したものとし、そのときの応力を支圧荷重によるひび割れ発生強度とした。図-4をはじめとする応力ひずみ

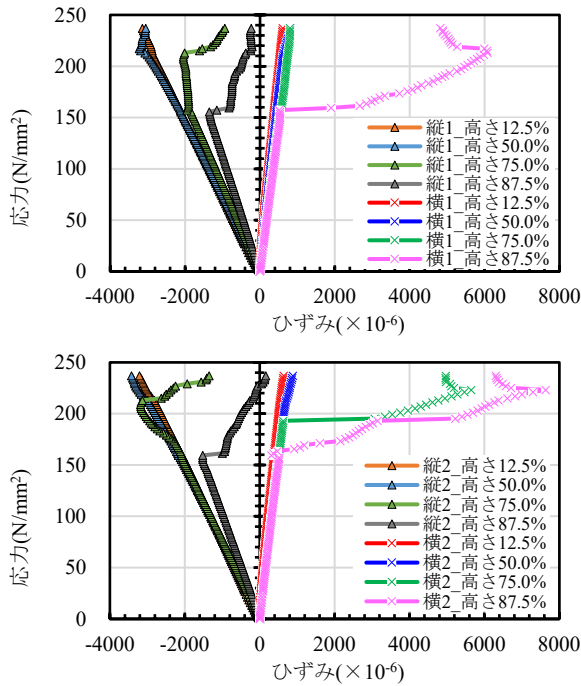


図-4 応力ひずみ曲線 (U-15%(Φ100), 支圧面積比 1.6, 供試体 No3)

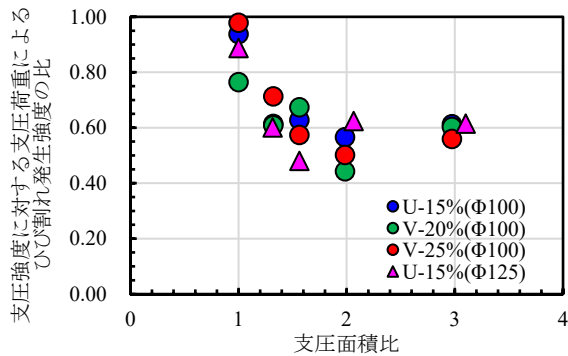


図-5 支圧強度に対する支圧荷重によるひび割れ発生強度の比と支圧面積比の関係

曲線より、支圧面積比が 1~3 の範囲の場合、W/B や供試体寸法に関わらず、支圧荷重によるひび割れ発生後も、応力は増加することを確認した。

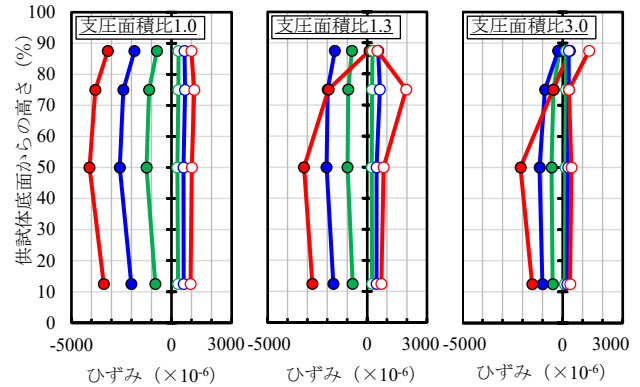
図-5 に支圧強度に対する支圧荷重によるひび割れ発生強度の比と支圧面積比の関係を示す。なお、図-5 に採用した支圧荷重によるひび割れ発生強度は、各実験ケースにおける供試体 3 本の平均値である。支圧面積比 1.0 の場合、W/B や供試体寸法に関わらず、支圧強度に対するひび割れ発生強度の比は 0.76~0.98 である一方で、支圧面積比 1~3 の範囲の場合、支圧強度に対するひび割れ発生強度の比は、0.44~0.71 であった。応力ひずみ曲線と支圧強度に対する支圧荷重によるひび割れ発生強度の比を考慮すると、支圧荷重によりひび割れが発生しても応力は増加していることから、ひび割れ発生直後に破壊に至る可能性は低いと考えられる。

### 3.3 供試体の表面ひずみ分布

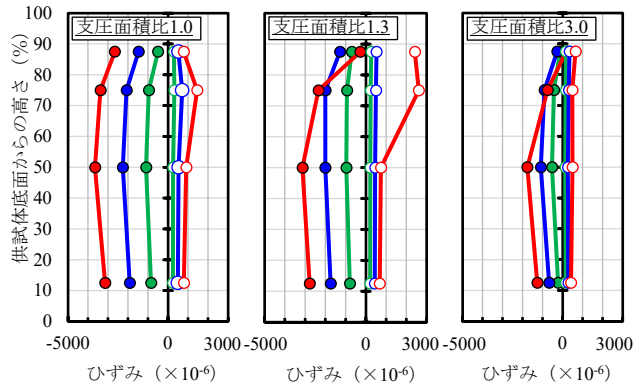
図-6 に支圧面積比 1.0, 1.3 および 3.0 あるいは 3.1 の

【凡例】

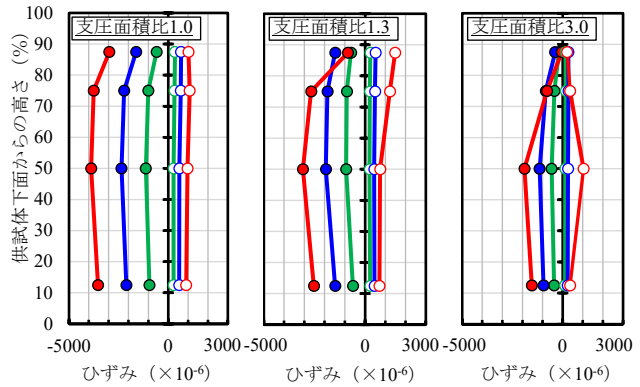
- 支圧耐力×30%時点の縦ひずみ
- 支圧耐力×30%時点の横ひずみ
- 支圧耐力×60%時点の縦ひずみ
- 支圧耐力×60%時点の横ひずみ
- 支圧耐力×90%時点の縦ひずみ
- 支圧耐力×90%時点の横ひずみ



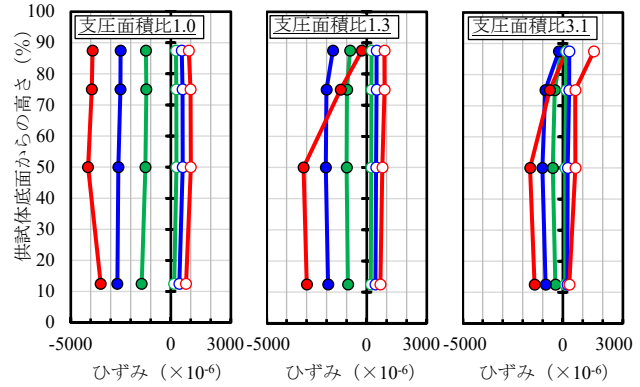
(a)U-15%(Φ100)



(b)V-20%(Φ100)



(c)V-25%(Φ100)



(d)U-15%(Φ125)

図-6 供試体の表面ひずみ分布

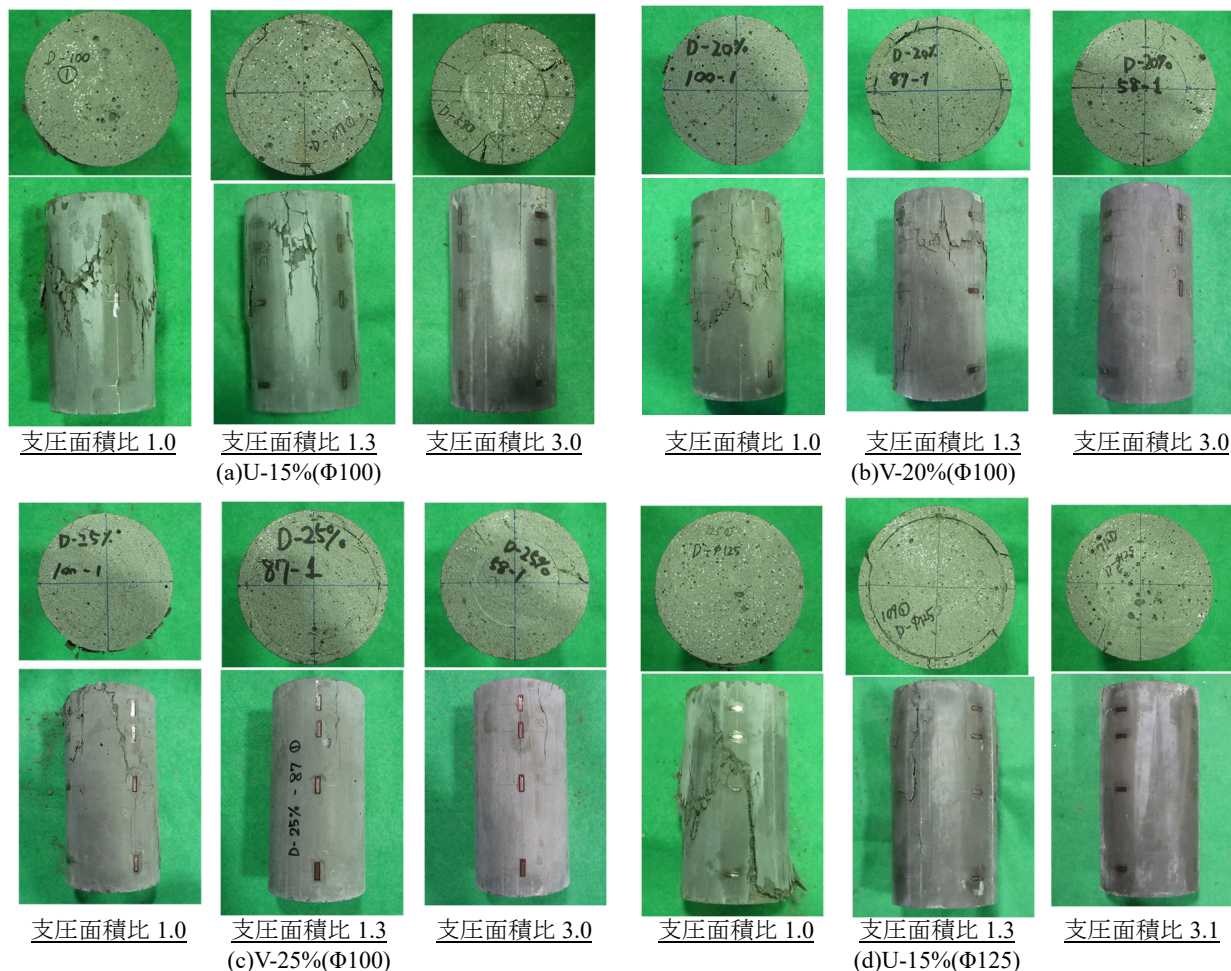


写真-1 供試体の破壊形態

供試体の表面ひずみ分布を示す。なお、図-6は、引張ひずみを正、圧縮ひずみを負とし、各供試体の支圧耐力の30%、60%および90%時点のひずみを示している。また、ひずみは各実験ケースにおける供試体3本の平均値である。

縦ひずみに着目すると、支圧面積比、W/B および供試体寸法によらず、ひずみ分布は、概ね供試体の高さ方向の中央部が大きくなる一方で、載荷面付近が小さくなることを確認した。ただし、支圧面積比が1~3の範囲の場合、載荷荷重が支圧耐力の70~80%程度以上となると、供試体底面からの高さ87.5%の位置のひずみは開放され、ほぼゼロになることを確認した。また、支圧面積比が大きくなると、ひずみ量や載荷荷重の増大にともなうひずみの変化量は小さくなることを確認した。

横ひずみに着目すると、支圧面積比1.0の場合、W/B および供試体寸法によらず、ひずみ分布は供試体の高さ方向に概ね一樣になることを確認した。一方、支圧面積比1~3の範囲の場合、W/B および供試体寸法によらず、ひずみ分布は、載荷荷重が支圧耐力の60%程度までは供試体の高さ方向に概ね一樣となるが、載荷荷重が支圧耐力に近づくと、供試体底面からの高さ75.0%および87.5%の位置は引張ひずみが大きくなることを確認した。なお、

図-6において、U-15%を採用した直径125mmの供試体の支圧面積比1.3およびV-25%を採用した供試体の支圧面積比3.0における支圧耐力の90%時点のひずみ分布は、他のケースと異なっているが、支圧耐力の80%時点において供試体底面からの高さ75.0%および87.5%の位置は引張ひずみが大きくなっていてを確認している。また、支圧面積比が大きくなるに従い、縦ひずみと同様に横ひずみは小さくなる一方で、載荷荷重の増大にともなうひずみの変化量は、縦ひずみより小さくなることを確認した。

### 3.4 供試体の破壊形態

写真-1に支圧強度試験終了後の支圧面積比1.0、1.3および3.0あるいは3.1の供試体の破壊形態を示す。写真-1より、W/Bや供試体寸法に関わらず支圧面積比が異なると破壊形態が異なることを確認した。全面圧縮載荷となる支圧面積比1.0の場合、供試体の側面においては斜め方向のひび割れが発生した。支圧面積比1.3の場合、載荷面においては支圧板の形に沿ったひび割れとともに支圧板縁から放射状に複数のひび割れが、供試体側面においては斜め方向と載荷軸方向のひび割れが発生した。支圧面積比3の場合、載荷面においては支圧板の形に沿ったひび割れとともに支圧板縁から放射状に複数の

ひび割れが、供試体側面では、載荷軸方向にひび割れが発生した。なお、支圧面積比 1.3 以上において確認された支圧板縁から放射線状に発生したひび割れは供試体側面における載荷軸方向に発生したひび割れとつながっていた。

支圧面積比 1~3 の範囲において、載荷荷重が支圧耐力に近づくと、供試体底面からの高さ 75.0%および 87.5%の位置の横ひずみが大きくなる。このひずみ分布と支圧強度試験終了後の供試体のひび割れ発生状況を考慮すると、UFC および圧縮強度が約 150~160N/mm<sup>2</sup>の VFC を採用した円柱供試体に支圧荷重が作用する場合、載荷荷重の増加にともない支圧板端部から円錐状にすべり面が形成され、円錐体のくさび作用により載荷面側から載荷軸直角方向に供試体が押し広げられ載荷軸方向にひび割れが発生するものと考えられる<sup>7) 8)</sup>。なお、円錐体のくさび作用は、供試体側面に支圧板からの載荷荷重が直接伝達されなくなるとともに載荷軸方向のひび割れを発生させることにより、供試体底面からの高さ 87.5%の位置の縦ひずみが小さくなることに影響を及ぼしていると考えられる。一方、全面圧縮載荷となる支圧面積比 1.0 において、載荷荷重が支圧耐力の 90%程度の横ひずみ分布は高さ方向に概ね一様であること、供試体の側面に載荷軸方向のひび割れは発生していないことから、円錐体のくさび作用は生じていないと考えられる。

図-2 および図-6 より、支圧面積比が小さくなるに従い、支圧耐力および円柱供試体の縦横ひずみの値は、全面圧縮載荷時となる支圧面積比 1.0 の値に近づくため、破壊形態も、全面圧縮載荷時の破壊形態に近づくと考えられる。以上のことが要因となり、支圧荷重が作用する供試体の側面において、支圧面積比が小さい場合は、支圧荷重によって形成される円錐体のくさび作用による載荷軸方向のひび割れとあわせて全面圧縮載荷時に確認される斜めひび割れが発生する一方で、支圧面積比は大きい場合には、全面圧縮載荷にはならないため、円錐体のくさび作用による載荷軸方向のひび割れのみが発生するものと考えられる。

#### 4. 結論

本研究では、大型コンクリート構造物に VFC および UFC を採用したプレキャスト・プレストレストコンクリート構造の適用可能性の検証を目的に、圧縮強度が約 150~160N/mm<sup>2</sup>の VFC、ならびに約 200N/mm<sup>2</sup>の UFC の支圧強度特性について検討した。本研究における結論を以下に示す。

(1) W/B や供試体寸法に関わらず、支圧面積比 1~3 の範囲では支圧面積比の増加にともない支圧強度は増加する傾向にあり、その関係は概ね直線近似が可

能であった。

- (2) W/B や供試体寸法に関わらず、支圧面積比 1~3 の範囲では、支圧強度に対する支圧荷重によるひび割れ発生強度の比は 0.44~0.71 であった。
- (3) W/B や供試体寸法に関わらず、円柱供試体に作用する支圧荷重が、支圧耐力に近づくと供試体底面からの高さ 87.5%の位置の縦ひずみは小さくなる一方で、横ひずみは大きくなった。これは、載荷荷重の増大にともない支圧板端部から円錐状にすべり面が形成され、円錐体のくさび作用により載荷面側から載荷軸直角方向に供試体が押し広げられることが原因であると考えられる。
- (4) 支圧面積比により供試体の破壊形態は異なり、支圧面積比が小さい場合は斜め方向と載荷軸方向のひび割れが発生したのに対し、支圧面積比が大きい場合は載荷軸方向にひび割れが卓越した。

#### 謝辞

この成果は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の助成事業 (JPNP21015) の結果得られたものです。また、試験の実施にあたり、ご協力いただいた日本ヒューム (株) に感謝いたします。

#### 参考文献

- 1) 土木学会：高強度繊維補強セメント系複合材料の設計・施工指針 (案)，コンクリートライブラリー166，2024.9
- 2) 土木学会：超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針 (案)，コンクリートライブラリー113，2004.9
- 3) FKK 極東鋼弦コンクリート振興株式会社：FKK フレシネー工法施工基準，2022.7
- 4) VSL 協会：プレストレストコンクリート VSL 工法設計施工基準，2020.4
- 5) 高周波熱錬株式会社：ネツレン PC 鋼棒定着工法マニュアル，2022.9
- 6) 安田瑛紀，小亀大佑，河野克哉：鋼繊維補強した PFC (無孔性コンクリート) の支圧強度特性，土木学会第 75 回年次学術講演会講演概要集，V-258，2020.8
- 7) 小林一輔，梅山和成：鋼繊維補強コンクリートの支圧強度に関する実験的研究，生産研究，Vol.35，No.3，pp.33-36，1983.3
- 8) 関俊力，瀬古繁喜，山田和夫：鋼繊維によって内的拘束を受けるコンファインドモルタルの支圧特性に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.38，No.1，pp.453-458，2016.6