

論文 繊維補強セメント系複合材料のせん断抵抗性に関する実験的研究

菊地 俊文*1・金本 清臣*2・橋田 浩*3

要旨: 繊維補強セメント系複合材料の中でも、特に高強度かつ高靱性となる超高強度ひずみ硬化型セメント系複合材料を対象とし、各種物性を把握するとともに、鉄筋を配した梁要素部材に対して、大野式加力によるせん断試験を行い、繊維混入率、加力時のシアスパンに着目し、せん断抵抗性とその耐力評価方法について検討した。試験によって得られた最大耐力は繊維混入率の増加に伴い増大し、繊維混入率 1.5vol.%では、未混入の場合と比較して、1.4 倍程度増加した。また、せん断耐力は、既往の耐力評価式により一定の評価が可能であった。

キーワード: 繊維補強セメント系複合材料, せん断, ポリエチレン繊維, 鋼繊維

1. はじめに

近年、繊維補強セメント系複合材料 (Fiber Reinforced Cementitious Composites, 以下, FRCC) の高性能化の研究・開発は著しく行われており¹⁾, セメントマトリクス
の超高強度化によって、ひび割れを発生させず、高耐久性を実現した超高強度繊維補強コンクリート²⁾, 高い引張変形と靱性によって、ひび割れ幅を微細に抑え、高耐久性を実現した複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料³⁾およびその両者の中間の特長を有する超高強度ひずみ硬化型セメント系(複合)材料⁴⁾ (Ultra High Performance – Strain Hardening Cementitious Composites, 以下, UHP-SHCC) 等が研究・開発されている。

本論文は、FRCC として、UHP-SHCC およびすでに土間スラブやトンネルの覆工体として使用されている鋼繊維補強コンクリート (Steel Fiber Reinforced Concrete, 以下, SFRC) を対象とし、各種物性、特に、せん断抵抗性を把握するとともにその耐力評価方法について検討した。

2. 試験概要

2.1 要因および水準

要因と水準は、FRCC の種類 (2 水準: UHP-SHCC および SFRC), FRCC それぞれの繊維混入率 (UHP-SHCC, 3 水準: 0vol.%, 0.75vol.% および 1.5vol.%, SHCC, 2 水準: 0.vol% および 1.0vol.%) および後述するせん断試験におけるシアスパン比 (2 水準: 0.125 および 1.0) とした。

2.2 FRCC の使用材料および配合

UHP-SHCC および SFRC に使用した材料をそれぞれ表-1 および表-2 に示す。UHP-SHCC は、セメント、
混和材および細骨材が予めプレミックスし、粉袋に詰め

たものを使用した。なお、低添加型膨張材 (標準添加量: 20kg) は、自己収縮ひずみ低減 (自己収縮ひび割れ抑制) のために使用した。

また、UHP-SHCC および SFRC の配合をそれぞれ表-3 および表-4 に示す。配合は、UHP-SHCC では繊維混入率 1.5vol.% が標準養生 28 日で 100N/mm² 以上、SFRC

表-1 使用材料 (UHP-SHCC)

材料名	記号	概要
セメント	C	低熱ポルトランドセメント 密度 3.24g/cm ³
水	W	上水道水
細骨材	S	7号けい砂 密度 2.68g/cm ³
混和材	SF	シリカフェューム 密度 2.20g/cm ³
	E	低添加型膨張材 密度 3.10g/cm ³ , エトリンガイト・石灰複合系
混和剤	SP	高性能減水剤 比重 1.10g/cm ³ , ポリカルボン酸系
	A	抑泡剤 比重 1.02g/cm ³
繊維	F	高強度ポリエチレン繊維 密度 0.97g/cm ³ , 直径 0.012mm, 長さ 6mm 引張強度 2700N/mm ² 以上

表-2 使用材料 (SFRC)

材料名	記号	概要
セメント	C	普通ポルトランドセメント 密度 3.16g/cm ³
水	W	上水道水
細骨材	S	千葉県君津市産山砂 表乾密度 2.62g/cm ³ , 吸水率 1.46%, 粗粒率 2.76
粗骨材	G	東京都青梅市産硬質砂岩碎石 表乾密度 2.65g/cm ³ , 吸水率 0.56%, 粒径 15mm 以下
混和剤	SP	高性能 AE 減水剤 ポリカルボン酸系, 比重 1.07g/cm ³
繊維	F	インデント型鋼繊維 密度 7.85g/cm ³ , 直径 0.6mm, 長さ 30mm 引張強度 700N/mm ² 以上

*1 清水建設 (株) 技術研究所 生産技術センター 研究員 修士 (工学) (正会員)

*2 清水建設 (株) 技術研究所 生産技術センター 副主任研究員 修士 (工学) (正会員)

*3 清水建設 (株) 技術研究所 生産技術センター センター所長 博士 (工学) (正会員)

では繊維混入率 1.0vol%が標準養生 28 日で 40N/mm²以上となるように事前に確認し、設定した。

また、混和剤量は繊維の有無に関わらず一定とし、UHP-SHCC がセメントおよびシリカフュームの質量に対して 1.2%および SFRC がセメントの質量に対して 0.85%とした。それに加えて、繊維は体積比で混入し、ベースとなるモルタルおよびコンクリートの配合を一定とした。

2.3 試験項目

せん断試験を除く試験項目を表-5に示す。材料試験として、フレッシュ性状、圧縮および引張性状（UHP-SHCCは一軸引張試験³⁾、SFRCは割裂引張試験）を確認した。

2.4 せん断試験

(1) 供試体

せん断試験に用いた供試体形状を図-1に示す。供試体形状は 100×100×800mm 角柱供試体とし、供試体数は 3 体（そのうち 1 体は、供試体中央部に位置する鉄筋にひずみゲージを設置）とした。供試体に設置した主筋の種類、径および量は、シアスパン比によって異なり、曲げ降伏よりもせん断破壊が先行するように、十分な余裕度をもたせて設定した。つまり、シアスパン比 0.125 の場合、上端筋および下端筋に SD295A の D6 鉄筋をそれぞれ 2 本ずつ使用し、シアスパン比 1.0 の場合、上端筋および下端筋に KSS785（降伏強度 785N/mm²以上）の D10 鉄筋をそれぞれ 3 本ずつ使用した。また、せん

表-3 配合 (UHP-SHCC)

記号	W/B wt.%	F vol.%	単体量					
			W kg/m ³	C kg/m ³	SF kg/m ³	E kg/m ³	S kg/m ³	F kg/m ³
UHP-SHCC	22.0	0	335	1322	198	40	152	0
		0.75	332	1312	196	40	151	8
		1.5	330	1303	195	40	150	15

※ B=C+SF

表-4 配合 (SFRC)

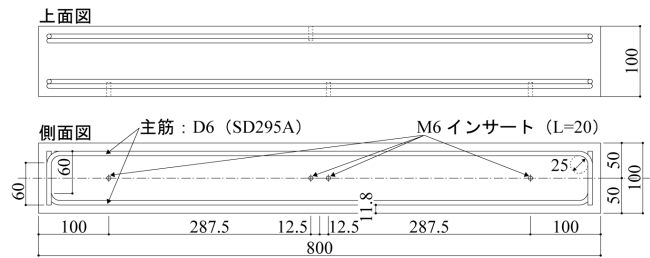
記号	W/C wt.%	s/a %	F vol.%	単体量				
				W kg/m ³	C kg/m ³	S kg/m ³	G kg/m ³	F kg/m ³
SFRC	50.0	50.0	0	175	350	877	887	0
			1.0	173	346	867	877	79

表-5 試験項目

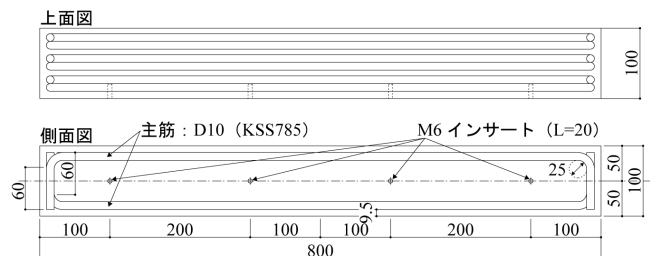
項目	概要
スランブ	JIS A 1101 (SFRCのみ)
スランブフロー	JIS A 1150
空気量	JIS A 1128
圧縮強度	JIS A 1108
圧縮弾性係数	JIS A 1149
割裂引張強度	JIS A 1113 (SFRCのみ)
一軸引張強度	一軸引張試験 ³⁾ 、供試体厚さ13mm
引張終局ひずみ	(UHP-SHCCのみ)

断補強筋は、セメントマトリクスのみによるせん断抵抗性を確認するために、設置をしなかった。

供試体は打込み後、室温：20℃、相対湿度 99%の環境下にて 24 時間静置し、脱型した。その後、載荷する前日（材齢 28 日以上）まで標準養生を行った。なお、UHP-SHCC は、自己収縮によるひび割れが懸念されたが、目視による検査では、全ての供試体でひび割れは確認されなかった。



(1) シアスパン比 0.125 の場合



(2) シアスパン比 1.0 の場合

図-1 供試体形状 (せん断試験)

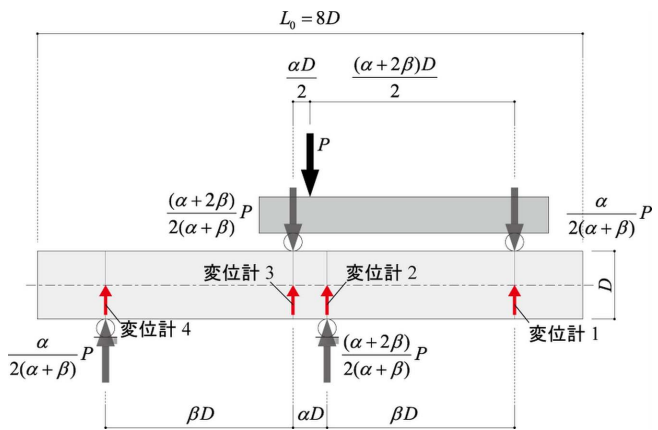


図-2 せん断試験概要 (シアスパン比 0.125 の場合)



写真-1 せん断試験状況 (シアスパン比 0.125 の場合)

(2) 試験方法

逆対称加力式一方向せん断試験⁵⁾の概要 ($\alpha=0.25$, $\beta=2.875$ となるシアスペン比 0.125 の場合) およびせん断試験状況をそれぞれ図-2 および写真-1 に示す。コンクリート梁の加力形式が単純梁加力式と逆対称加力式との2つの形式があるが、せん断抵抗区間が2つ形成される単純梁加力式と比較して、逆対称加力式は、試験装置が煩雑になるものの、せん断抵抗区間は1つしか形成されないため、安定的な破壊性状が得られると考え、逆対称加力式を採用した。

あ載荷は、アムスラー型万能試験機(能力2000kN)を用いて、最大荷重までを載荷速度1kN/s程度で、最大荷重以降も急激な荷重低下がない場合は、載荷速度を維持した。なお、シアスペン比0.125の場合、支持点の位置、供試体自重および載荷治具自重によって、静置状態でも供試体を不安定にさせる回転モーメントが生じるため、載荷後供試体が安定するまでは、変位計1を設置した供

試体下部付近に、ジャッキによる支持点を設置した。

測定項目は、載荷荷重および供試体高さ方向の中心軸における支持(載荷)点ごとの変位とし、得られた測定結果からせん断力とせん断変形角を算出した。

3. 試験結果および考察

3.1 材料試験結果

(1) フレッシュ性状

FRCCのフレッシュ性状一覧を表-6に示す。各FRCCともに、繊維混入率が増加するのに伴い、スランプフローが減少し、空気量が増加する傾向にあったが、供試体を製作するための十分な施工性を有していた。

(2) 力学性状

FRCCの力学性状一覧を表-7に示す。UHP-SHCCは、繊維混入率が増加するのに伴い、圧縮性状(強度および弾性係数)はそれぞれ15%および10%程度減少する傾向にあった。また、一軸引張試験から得られたUHP-SHCCの引張応力-ひずみ関係を図-3に示す。繊維混入率

表-6 フレッシュ性状一覧

対象材料	繊維混入率 vol.%	スランプ cm	スランプフロー cm×cm	空気量 %
UHP-SHCC	0	-	55.5×55.5	1.8
	0.75	-	46.0×43.0	2.1
	1.5	-	40.0×38.5	2.7
SFRC	0	19.0	38.5×36.0	4.6
	1.0	14.0	28.5×27.0	6.0

表-7 力学性状一覧

対象材料	繊維混入率 vol.%	圧縮強度 N/mm ²	弾性係数 kN/mm ²	引張強度 N/mm ²	引張終局ひずみ -
UHP-SHCC	0	135.0	33.5	2.8	-
	0.75	121.3	30.7	5.1	0.0054
	1.5	114.0	30.2	6.6	0.0133
SFRC	0	42.6	34.4	3.3	-
	1.0	49.3	32.1	4.1	-

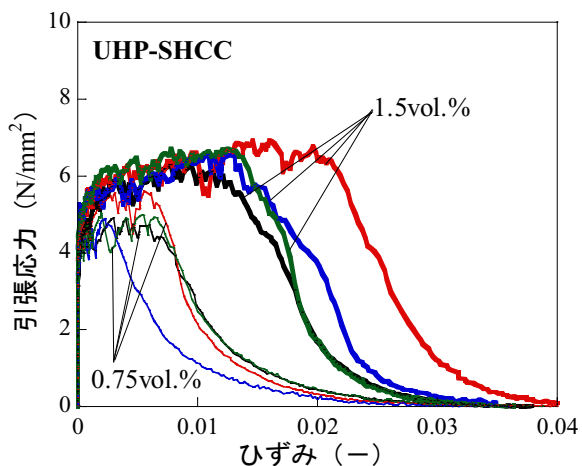
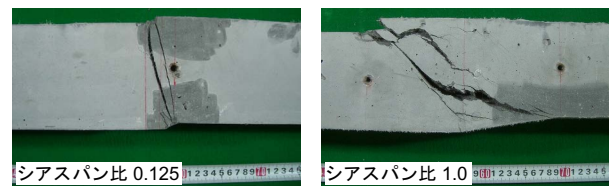
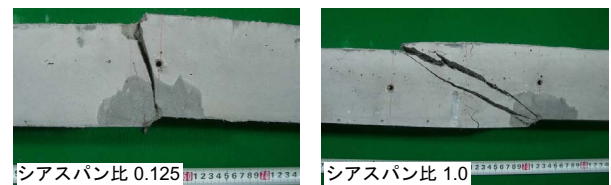


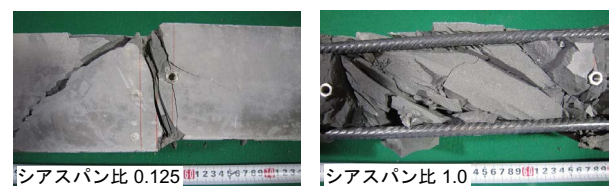
図-3 引張応力-ひずみの関係 (UHP-SHCC)



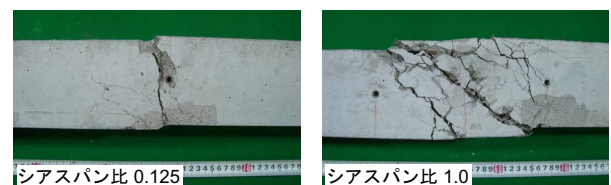
(1) UHP-SHCC1.5vol.%



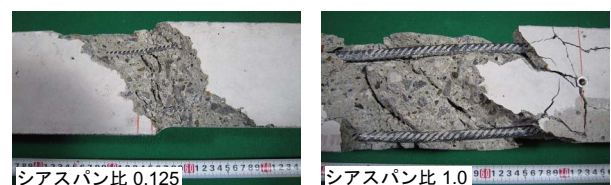
(2) UHP-SHCC0.75vol.%



(3) UHP-SHCC0vol.%



(4) SFRC1.0vol.%



(5) SFRC0vol.%

写真-2 せん断試験における最終破壊状況の一例

1.5vol.%では、繊維混入率 0.75vol.%と比較して、引張強度は 30%程度、引張終局ひずみは 2.5 倍程度増加した。

3.2 せん断試験結果

最終破壊状況の一例を写真-2 に示す。最終的な破壊モードは、繊維の混入されている全ての供試体で、せん断破壊が確認された。一方、繊維が混入されていない供試体では、主にせん断・付着破壊が確認された。最大耐力後には、せん断ひび割れのほかに主筋の抜け出しに伴う、主筋に沿った付着ひび割れも生じ、かぶり部分がはく落した。既往の研究⁶⁾によれば、(鋼) 繊維の混入により、コンクリートと鉄筋との付着性能が向上し、割裂ひび割れの形成を抑制する効果があるとされる。本研究においても、UHP-SHCC、SFRC ともに、繊維が混入されたことで、かぶり部分の著しい破壊が抑制されたことから、同様の現象が確認された。

UHP-SHCC は、シアスパン比 1.0 では、繊維混入率 0.75vol.%および 1.5vol.%で初期ひび割れ後、複数微細ひび割れを伴い、最大耐力に達した。一方、せん断がより厳しく生じるシアスパン比 0.125 では、繊維混入率 1.5vol.%でのみ、シアスパン比 1.0 と同様に複数微細ひび割れを確認した。ただし、せん断応力が著しく卓越することによりひび割れが局所化しやすいため、複数微細ひび割れの発生した範囲は、シアスパン比 1.0 と比較して小さかった。また、最大耐力に達するまでのひび割れの発生傾向は、既往の高靱性セメント複合材料を用いた同程度の寸法の供試体を対象とした既往のせん断試験⁷⁾と同様であった。

せん断強度と繊維混入率の関係およびせん断試験によって得られた荷重と鉛直変位との関係から求めたせん断応力とせん断変形角との関係の一例をそれぞれ図

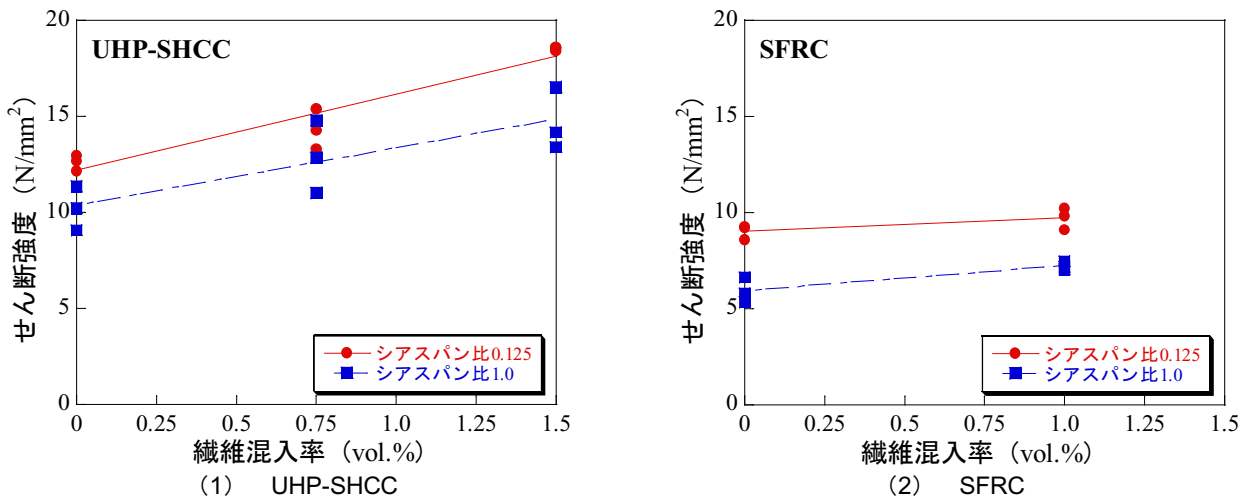


図-4 せん断強度と繊維混入率の関係

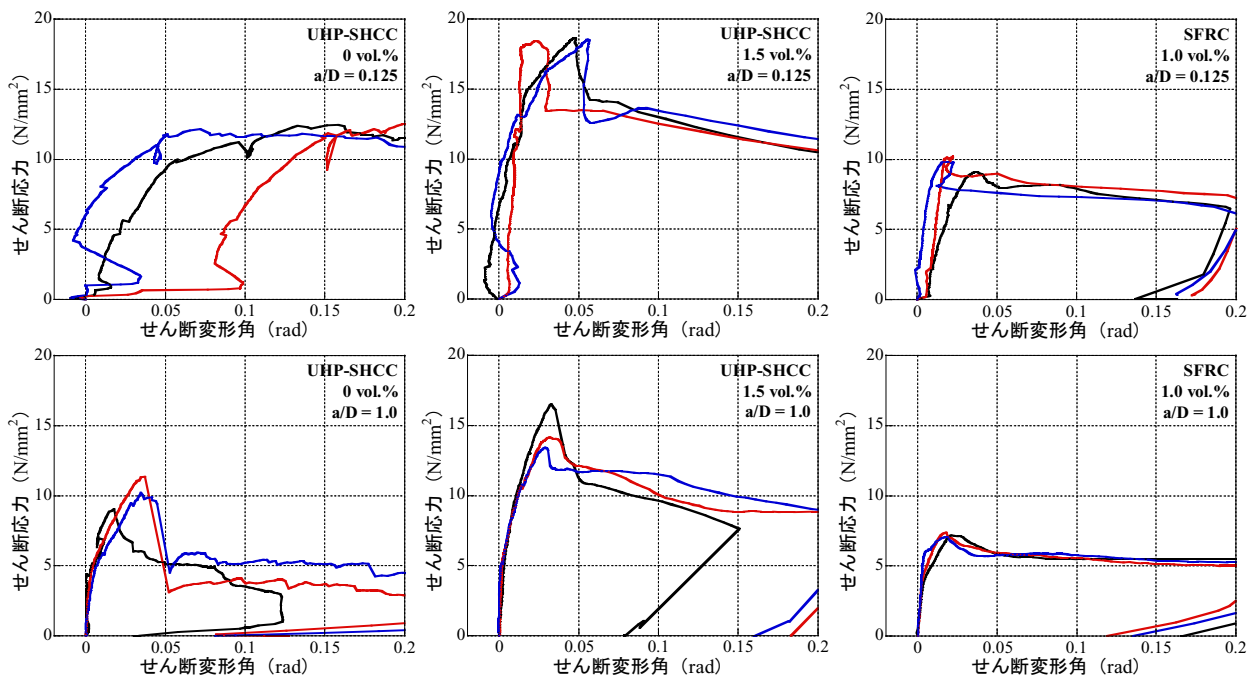


図-5 せん断応力-せん断変形角の関係の一例

—4 および図—5 に示す。UHP-SHCC では、繊維混入率が増加するのに伴い、せん断強度は増加し、繊維混入率 1.5vol.% では、1.4 倍程度となった。また、シアスパン比 1.0 の場合、せん断変形角 0.04rad (1/25) 程度で最大耐力となった。シアスパン比 0.125 の場合、荷重初期から供試体が安定するまで設置したジャッキによる影響（例えば、図—5 左上段の初期の変形）を受けたため、適切に変形を計測できていない可能性が十分にあり、最大耐力時のせん断変形角が著しく増加したと推察される。

一方、適切に計測がなされたと考えられるシアスパン比 1.0 の場合（図—5 下段）で比較すると、繊維混入率 1.5vol.% の UHP-SHCC は、せん断変形角が大きい範囲で、高いせん断耐力を維持できた。これは、FRCC の（圧縮）強度の違い、繊維の補強効果による靱性の違いを考えると、高い強度と靱性を兼ね備えたことによるものと考えられる。

3.3 せん断耐力評価

既往の研究において、FRCC 特に、超高強度繊維補強コンクリートおよび複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料をそれぞれ対象とし、繊維による補強効果を考慮したせん断評価式^{2,3)}が提案されている。両者ともに、土木構造物のような比較的大きな部材を対象とした経験式である、土木学会式⁸⁾をベースとして構築されており、前者は設計圧縮強度 150N/mm² 以上を、後者は設計圧縮強度 45N/mm² 以下という適用範囲としている。本研究のような断面が小さいせん断試験では、寸法効果による影響も大きいこと、圧縮強度が適用範囲外であったことから、(社)日本建築学会「鉄筋コンクリート造建築物の靱性保証型耐震設計指針・同解説」の梁のせん断強度式⁹⁾（以下、靱性式）を準用し、降伏ヒンジの発生する部材の保証変形角が 0 の場合の耐力を算定した。靱性式を下記に示す。

$$V_u = \min(V_{u1}, V_{u2}, V_{u3}) \quad (1)$$

$$V_{u1} = \mu \cdot p_{we} \cdot \sigma_{wy} \cdot b_e \cdot j_e +$$

$$\left\{ v \cdot \sigma_B - \frac{(1 + \cot^2 \phi) p_{we} \cdot \sigma_{wy}}{\lambda} \right\} \cdot \frac{b \cdot D}{2} \tan \theta \quad (2)$$

$$V_{u2} = \frac{\lambda \cdot v \cdot \sigma_B + p_{we} \cdot \sigma_{wy}}{3} \cdot b_e \cdot j_e \quad (3)$$

$$p_{we} \cdot \sigma_{wy} = \frac{\sum a_w \cdot \sigma_{wy}}{b_e \cdot s} \quad (4)$$

$$\phi = L/D \quad (5)$$

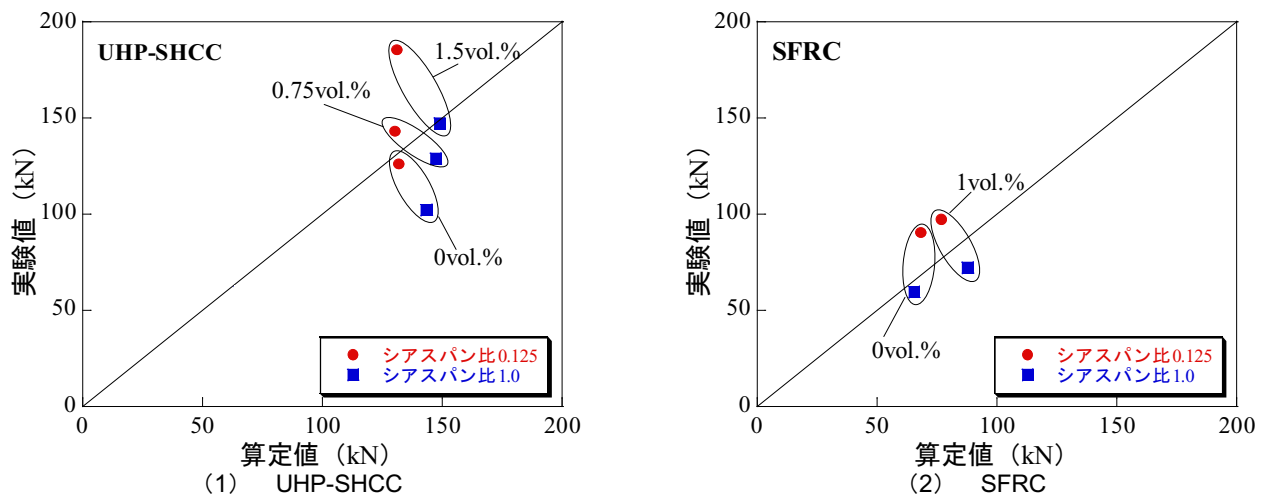
ここに、

V_u : 部材のせん断強度（最大せん断力）(N), σ_B : コンクリートの圧縮強度 (N/mm²), σ_{wy} : せん断補強筋の信頼強度算定用強度 (N/mm²), p_{we} : 有効せん断補強筋比 (-), a_w : 1 組のせん断補強筋の断面積 (N/mm²), s : 横補強筋間隔, v : コンクリート圧縮強度の有効係数, ϕ : トラス機構の角度 (rad), μ : トラス機構の角度を表わす係数 (-), λ : トラス機構の有効係数 (-), b_e : トラス機構に関与する断面の有効幅 (mm), j_e : トラス機構に関与する断面の有効せい (mm), b : 断面の幅 (mm), L : せん断スパン (mm), D : 断面せい (mm), とする。なお、せん断強度は、本研究の範囲では、 V_{u1} または V_{u2} によって決定されたため、 V_{u3} の詳細は省略した。

また、コンクリート圧縮強度の有効係数は高強度コンクリートの範囲でも適用可能とされている CEB 式を用いた。

$$v = 1.7 \sigma_B^{-0.333} \quad (6)$$

さらに、せん断補強筋の効果の項に対して、FRCC の



図—6 せん断耐力の実験値と算定値の比較

引張強度を導入することで、繊維による補強効果を考慮した。つまり、

$$p_{we} \cdot \sigma_{wy} = \frac{\sum a_w \cdot \sigma_{wy}}{b_e \cdot s} = \frac{\sigma_t \cdot b \cdot dx}{b_e \cdot dx} = \frac{b}{b_e} \sigma_B \quad (7)$$

ここに、

σ_B : 繊維補強セメント系複合材料の引張強度(N/mm²), とする。

3.4 実験値と算定値の比較

実験値と算定値の比較を図-6に示す。シアスパン比0.125の場合、実験値/算定値は1.0をほぼ上回り、安全側に評価でき、逆にシアスパン比1.0の場合は実験値/算定値は1.0をほぼ下回り、危険側に評価できる結果となった。つまり、本研究の範囲において、著しくせん断が卓越する破壊モードでは、既存式を利用することによって、安全側の評価は可能であった。

4. まとめ

本研究により得られた主な知見を以下に示す。

- 1) UHP-SHCCは、せん断応力下においても複数微細ひび割れが発生した。ただし、せん断応力が著しく卓越する場合はひび割れが局所化し、複数微細ひび割れは少なかった。
- 2) UHP-SHCCでは、繊維混入率が増加するのに伴い、せん断強度は増加し、繊維混入率1.5vol.%では、1.4倍程度せん断強度は増加した。
- 3) UHP-SHCCでは、せん断が卓越する破壊モードの場合、既往の耐力式を用いて、ほぼ安全側の評価が可能であった。

謝辞

本研究において、UHP-SHCCの配合は、名古屋大学大学院工学研究科の国枝稔准教授に協力をして戴いた。また、ポリエチレン繊維は、東洋紡績株式会社の小西拓也

氏に提供して戴いた。ここに記して、謝意を表す。

参考文献

- 1) 例えば、社団法人日本コンクリート工学協会：高強度・高靱性コンクリート利用研究委員会報告書，2009.3
- 2) 社団法人土木学会：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) 社団法人土木学会：複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料設計・施工指針（案），コンクリートライブラリー127，2007.3
- 4) 国枝稔，Ahmed Kamal，中村光，Eugen Brühwiler：超高強度ひずみ硬化型セメント系材料の開発，コンクリート工学年次論文集，Vol.29，No.1，pp.315-320，2007
- 5) 例えば，荒川卓，大野和男：新載荷法による鉄筋コンクリート梁のせん断抵抗について，日本建築学会論文報告集，Vol.57，pp.581-584，1957.7
- 6) 松林卓，竹内秀聡，原夏生，三島徹也：鋼繊維補強コンクリートによる鉄筋の付着性能向上に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.29，No.3，2007
- 7) 鈴木里美，三橋博三，川又篤，大塚浩司：せん断加力を受ける高靱性セメント複合材料梁のひび割れ挙動と破壊過程，高靱性セメント複合材料に関するシンポジウム論文集，pp.67-72，2003.12
- 8) 社団法人土木学会：コンクリート標準示方書〔構造性能照査編〕，pp.65-80，2004
- 9) 社団法人日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針・同解説，pp.138-207，1999