

論文 力学性状の異なるハイブリッド型ひずみ硬化セメント複合材料に埋設されたアンカーボルトの引抜き性状に関する研究

菊田 貴恒^{*1}・三橋 博三^{*2}・西脇 智哉^{*3}

要旨: ひずみ硬化セメント複合材料の効果的な構造利用の一例としてアンカーボルトの固定部に使用することを想定し、力学性状の異なる 3 種類のハイブリッド型ひずみ硬化セメント複合材料に埋設されたアンカーボルトの引抜き実験を実施した。その結果、引抜き最大荷重はひずみ硬化セメント複合材料の引張強度や靱性能よりも圧縮強度に依存することが明らかとなった。また、アンカーボルトの引抜き強度を推定する式を既往の学会式等から検討したところ、アンカーヘッド部の支圧強度を考慮した式を用いることで精度よく実験による引抜き強度を推定可能であることが明らかとなった。

キーワード: ひずみ硬化セメント複合材料, アンカーボルト, 引抜き性状, 材料特性

1. はじめに

ひずみ硬化セメント複合材料 (Strain Hardening Cementitious Composites, 以下 SHCC) は、ひび割れ抵抗性能が極めて高く、靱性に富んだ材料である。また、SHCC のひび割れ幅は 0.1mm 前後から 0.2mm 以下となり、引張ひずみの増加に伴い、ひび割れ幅が増加するのではなく、ひび割れ本数が増加するため¹⁾、従来のコンクリートに比して、ひび割れが局所化しにくい特徴がある。近年では実際の構造物にも SHCC の適用が始まってきており^{2), 3)}、さまざまなコンクリート分野で効果的な利用が期待されている⁴⁾。

SHCC の優れた性質を生かした構造利用の一例として、山下⁵⁾らや稲熊⁶⁾らは、高靱性セメント複合材料に埋設したアンカーボルトの引抜き実験を実施し、アンカーボルトを高靱性セメント複合材料に埋設することで、高いエネルギー吸収性能等を示すことを明らかにしている。また、筆者ら⁷⁾もポリエチレン繊維とスチールコードを混入したハイブリッド型 SHCC を対象にアンカーボルトの埋込み深さに着目した引抜き実験を実施し、引抜き最大荷重は埋込み深さに比例すること、埋込み深さが深いほどコーン状のひび割れ破壊領域が拡大し、引抜き靱性能が大きくなることを明らかにしている。

そこで本研究では、これら既往の研究を踏まえながら、SHCC の力学性状 (特に引張終局ひずみや圧縮強度) の違いが引抜き最大荷重や引抜き性状に及ぼす影響を明らかにする目的で、力学性状の異なる 3 種類のハイブリッド型 SHCC に埋設されたアンカーボルトの引抜き実験を実施した。また、SHCC に埋設されたアンカーボルトの実験による引抜き最大荷重と学会式などから算出される許容引抜き耐力とを比較検討した。

2. 実験概要

2.1 使用材料および調査

本研究に使用した材料は、早強ポルトランドセメント、シリカフューム、フライアッシュ 2 種、5 号珪砂、7 号珪砂、ポリカルボン酸系高性能減水剤、セルロース系増粘剤である。詳細を表-1 に示す。また、使用したポリビニールアルコール繊維 (以下 PVA 繊維)、ポリエチレン繊維 (以下 PE 繊維)、スチールコード (以下 SC 繊維)、ストレート鋼繊維 (以下 OL 繊維) の物性値を表-2 に示す。本研究では 2 種類の物性の異なる繊維を混入したハイブリッド型 SHCC を用いている。これは著者ら⁸⁾の研究に示すように、それぞれの繊維の相互作用による複合効果を期待した繊維配合となっており、それぞれの繊維を単独で混入した場合よりもひずみ硬化域の増加などの効果が確認されている。尚、ここで言うスチールコードとは、直径 0.15mm の鋼繊維を 5 本集束して、ピッチ 4.6mm で撚って製造されているものである。

本研究に用いた調査と繊維混入率を表-3 に示す。水結合材比 (W/B) は SC-PE 調査で 45Wt.%、PVA-PVA 調査及び OL-PVA 調査では 40Wt.% に設定した。細骨材は SC-PE 調査では 5 号珪砂、PVA-PVA 調査及び OL-PVA 調査では 7 号珪砂を使用した。尚、3 調査のテーブルフロー値をおおよそ合わせるため、PVA-PVA 調査及び OL-PVA 調査には増粘剤を混入した。

2.2 練混ぜおよび養生

試験体の練混ぜには、容量 50 リットルの強制一軸ミキサーを用い、粉体及び細骨材を空練後、水と高性能減水剤を投入して 4 分混練、1 種類目の繊維を投入して 4 分混練、最後に 2 種類目の繊維を投入して 4 分混練した。練上がり直後のテーブルフロー値は各調査で概ね

*1 東北大学大学院 都市・建築学専攻 助教 博士 (工学) (正会員)

*2 東北大学 名誉教授 工博 (正会員)

*3 東北大学大学院 都市・建築学専攻 准教授 博士 (工学) (正会員)

200mm (SC-PE) ~230mm (PVA-PVA) 程度であった。アンカーボルトを埋設した試験体の養生方法は、打設後、型枠を断熱材で覆い気中養生とし、その養生状態を保持したまま材齢 14 日目に脱枠、引抜き実験を行った。材料自体の圧縮性状及び引張性状を評価する円柱試験体（直径 50mm、高さ 100mm）、ダンベル型試験体は打設後、気中養生としアンカーボルトの引抜き試験と合わせて材齢 14 日目に一軸引張試験を行った。

2.3 アンカーボルト引抜き試験体と試験装置概要

アンカーボルト引抜き試験に用いた試験体の概要を図-1に示す。試験体の寸法は、300×500×300mmとした。アンカーボルト（JIS G 3108、降伏点 418MPa、引張強さ 545MPa）は直径φ16mmの丸鋼とし、埋設部のアンカーヘッドは直径 30mmとした。埋込み深さ（本論文では l_e と示す）は、 $l_e=64\text{mm}$ （すなわち、ボルト径 d に対して $4d$ ）とし、各 2 体の試験体でアンカーの引抜き実験を実施した。

アンカーボルトの引抜きはφ16mmのアンカーボルトに振じ込み式に鋼棒を接続し、200kN センターホール型油圧ジャッキで変位制御により載荷した。

アンカーボルトの変位計測は、図-1に示すように、試験体底部に取り付けられた溝型鋼に鋼棒を設置し、アンカーボルト頂部の引抜き変位を LVDT により計測した。また、アンカーボルト頂部の引抜き変位には荷重によるアンカーボルトの弾性的な伸びが含まれるため、正確なアンカーヘッドの変位を計測する目的で、試験体底部に設けた孔より直接 LVDT でヘッドの変位を計測した。

2.4 引張性状評価用試験体および一軸引張試験方法

本研究ではハイブリッド型 SHCC の引張性状を評価するために、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）³⁾ に記された厚さ 30mm のダン

ベル型試験体を使用し、一軸引張試験を実施した。一軸引張試験は最大容量 30kN の小型万能試験機（インストロン社製）を用い、万能試験機と試験体の固定条件を両端固定とし、載荷速度 0.4mm/min で変位制御にて実施した。写真-1 に小型万能試験機の全景を示す。万能試験機への試験体の取り付けには専用の治具を用い、引張力の伝達が十分に行えるように、試験体の前後を厚さ 10mm の鉄板で挟み込み、ネジ止めした。試験体挟み込み治具の詳細を図-2に示す。

試験体の変位計測は、図-2に示すように試験体の軸と平行になるように高感度変位計を設置し行った。

表-1 使用材料

材料名称	略号	備考
セメント	C	早強ポルトランドセメント(密度:3.14g/cm ³)
シリカフューム	SF	シリカフューム(密度:2.2g/cm ³)
フライアッシュ	FA	フライアッシュ2種(密度:2.33g/cm ³)
高性能AE減水剤	SP	ポリカルボン酸系(密度:1.05g/cm ³)
細骨材	S	5号珪砂および7号珪砂(密度:2.61g/cm ³)

表-2 使用繊維物性

繊維名	略号	密度	長さ	直径	引張強度	弾性係数
		(g/cm ³)	(mm)	(μm)		
スチールコード	SC	7.84	32	400	2850	—
ストレート鋼繊維	OL	7.84	13	160	2000	—
ポリエチレン繊維	PE	0.97	6	12	2580	73
ポリビニルアルコール繊維 (PVA)	PV6	1.3	6	40	1600	40
	PV8		8			
	PV12		12			

表-3 調合

調合名	W/B (Wt.%)	SF/B (Wt.%)	FA/B (Wt.%)	S/B (Wt.%)	混入繊維					
					SC (Vol.%)	PE (Vol.%)	OL (Vol.%)	PV6 (Vol.%)	PV8 (Vol.%)	PV12 (Vol.%)
SC-PE	45	15	—	45	0.75	0.75	—	—	—	—
OL-PVA	40	—	20	40	—	—	0.75	—	0.75	—
PVA-PVA	40	—	30	40	—	—	—	0.75	—	2.30

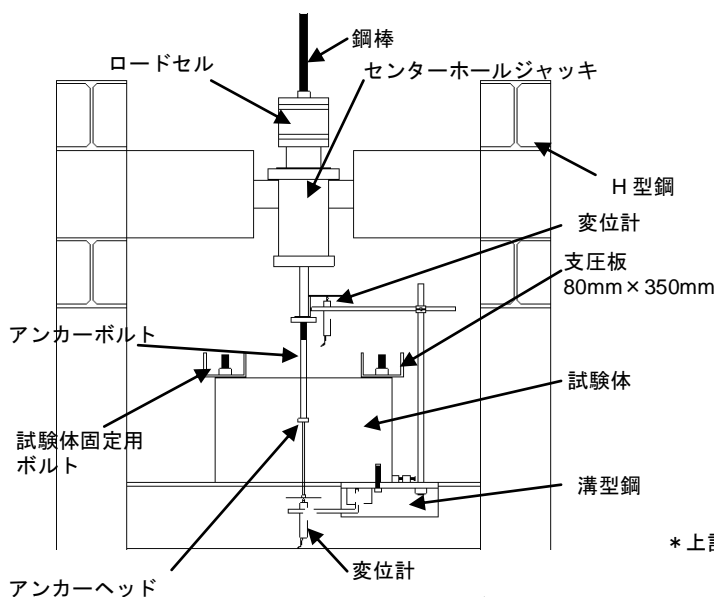
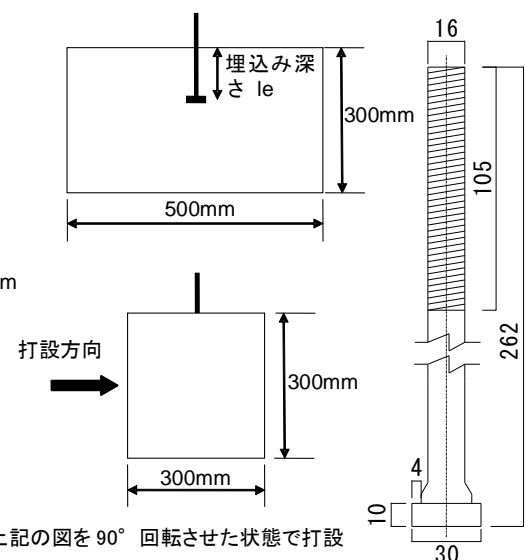


図-1 アンカーボルト引抜き実験試験体概要とアンカーボルト詳細



* 上記の図を 90° 回転させた状態で打設

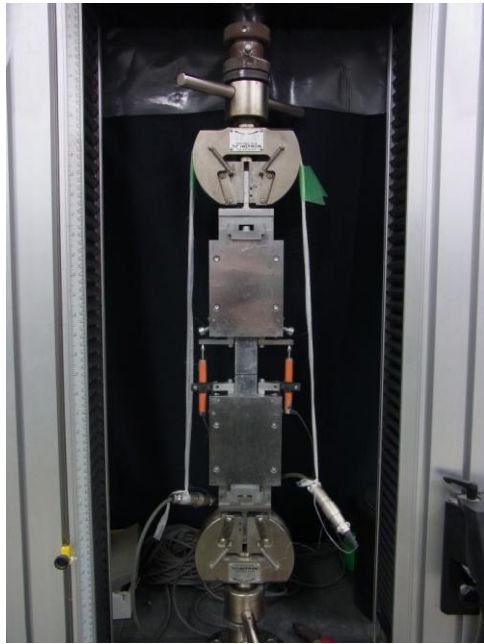


写真-1 ダンベル型試験体の载荷装置設置状況

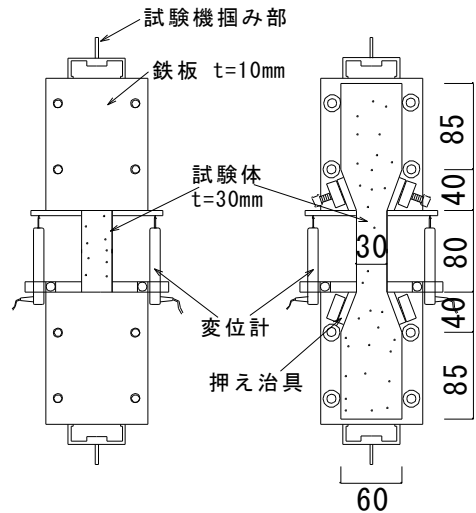


図-2 ダンベル試験体挟み込治具と試験体寸法

2.5 SHCC の力学特性値の定義

合成繊維のみを混入した一般的な SHCC の場合、最大応力に達した後急激に応力の低下が生じるため、最大応力時のひずみを引張終局ひずみと定義する場合が多く見られる。しかし本研究で対象としている鋼繊維などを混入したハイブリッド型 SHCC では、最大応力に達した後に急激に応力が低下するものは少なく、ひずみ硬化域からひずみ軟化域へ穏やかに移行するケースが多いため、引張終局ひずみの同定がやや難しい。そこで、本研究では図-3 に示すように、ひずみ軟化域においてひび割れ発生応力と同じ応力まで下降した点のひずみを引張終局ひずみと定義した。

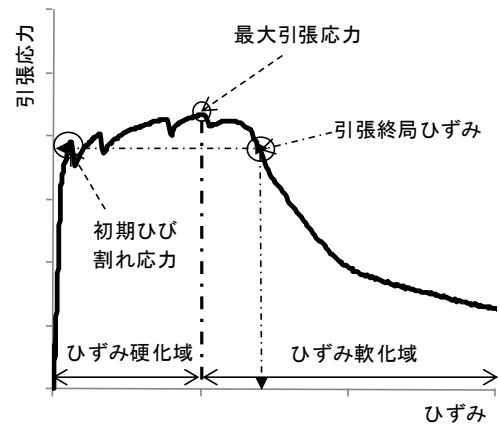


図-3 SHCC の引張応力-ひずみ関係における力学特性値の定義

3. 実験結果および考察

3.1 3種のハイブリッド型 SHCC の力学性状

本研究はハイブリッド型 SHCC の力学性状（特に引張終局ひずみや圧縮強度）の違いがアンカーボルトの引抜き

き最大荷重や引抜き性状に及ぼす影響を明らかにすることが目的である。そこで、あらかじめアンカーボルトを埋設するハイブリッド型 SHCC の基本的な力学性状を明らかにするため、ダンベル型試験体を用いた一軸引張試験と円柱試験体による圧縮試験を実施した。

図-4 に一軸引張試験から得られた各調合の引張応力-ひずみ関係を示す。また、表-4 に各調合の初期ひび

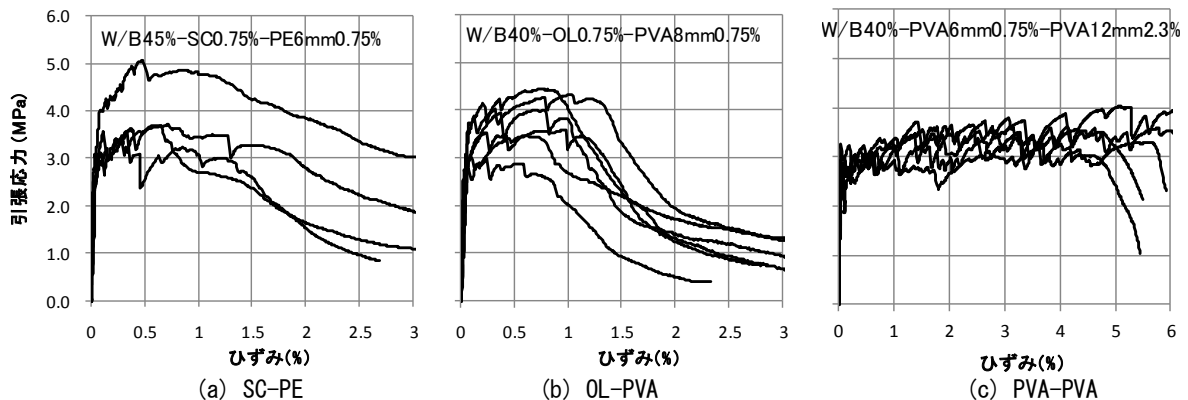


図-4 一軸引張試験による各調合シリーズの引張応力-ひずみ関係

割れ応力や引張終局ひずみ、圧縮強度などの力学特性値を示す。図-4 よりすべての調合において初期ひび割れ発生以降のひずみ硬化挙動が確認でき、特に物性の異なる PVA 繊維を混入した PVA-PVA では、引張終局ひずみが 5%を超える非常に大きな靱性を有していることが確認できる。一方、SC や OL のような鋼繊維を混入した SC-PE と OL-PVA を比較すると、繊維長の長い SC を混入した SC-PE の方が、軟化域における応力の低下が緩やかであり、表-4 に示すように引張終局ひずみもより大きな値となっている。しかし、SHCC において重要なポイントであるひずみ硬化挙動に着目すると、SC-PE と OL-PVA では鋼繊維の繊維長や繊維の表面特性が大きく異なるにも関わらず、最大応力時のひずみ（ひずみ硬化

挙動が継続したひずみ)が 0.59%と 0.66%となっており、それぞれの調合でほぼ同程度であった。

これら 3 調合それぞれの引張応力-ひずみ関係を平均化した引張応力-ひずみ関係の平均モデルを図-5 に示す。図-5 より、本研究に用いた各ハイブリッド型 SHCC は初期ひび割れ応力並びに最大引張応力は殆ど同程度の材料性状となっているのに対して、引張終局ひずみ及び軟化挙動に著しい違いのあることが確認された。なお、各調合の圧縮強度は SC-PE で 36.8MPa、OL-PVA で 28.5MPa、PVA-PVA で 24.3MPa であった。

3.2 アンカーボルトの引抜き荷重-引抜き変位関係

前節で示した 3 種のハイブリッド型 SHCC に埋設したアンカーボルトの引抜き荷重-引抜き変位関係を図-6 (SC-PE)、図-7 (OL-PVA)、図-8 (PVA-PVA) に示す。なお、前述したがアンカーボルトの埋込み深さは 64mm (アンカーボルト径の 4 倍: 4d) とした。

図-6 に示す SC-PE 試験体では、初期ひび割れ後、アンカーヘッドの変位（試験体底部からヘッド部の変位を直接計測した変位）が平均 1.7mm 付近まで引抜き荷重が増加し、最大引抜き荷重 84 kN に達したが、その後は瞬間

表-4 各調合シリーズの力学特性値

調合名	一軸引張試験				圧縮試験 圧縮強度 (MPa)
	初期ひび割れ応力 (MPa)	最大引張応力 (MPa)	最大応力時ひずみ (%)	引張終局ひずみ (%)	
	SC-PE	2.73	3.43	0.59	
OL-PVA	2.78	3.69	0.66	1.06	
PVA-PVA	2.68	3.51	4.38	5.51	

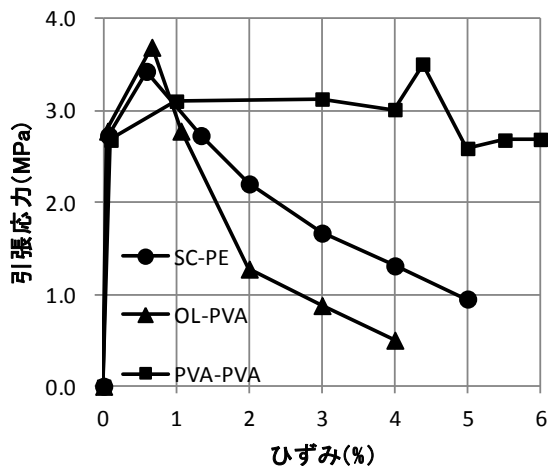


図-5 各調合の引張応力-ひずみ関係の平均モデル

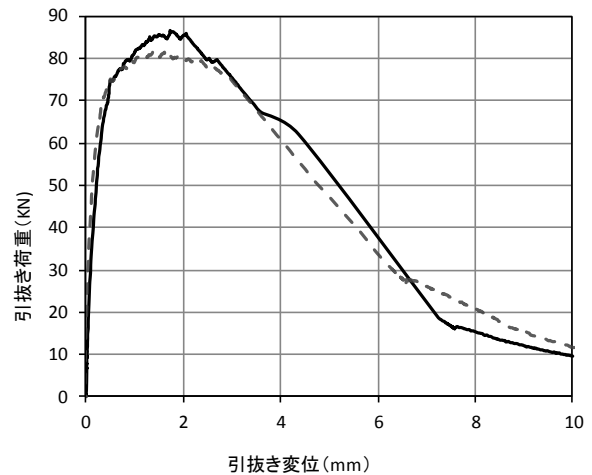


図-6 SC-PE の引抜き荷重-引抜き変位関係

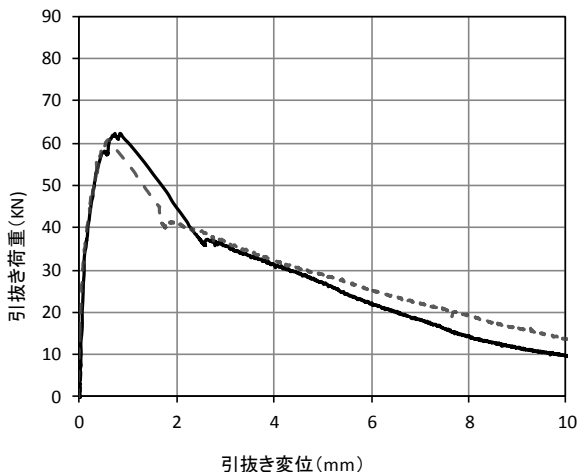


図-7 OL-PVA の引抜き荷重-引抜き変位関係

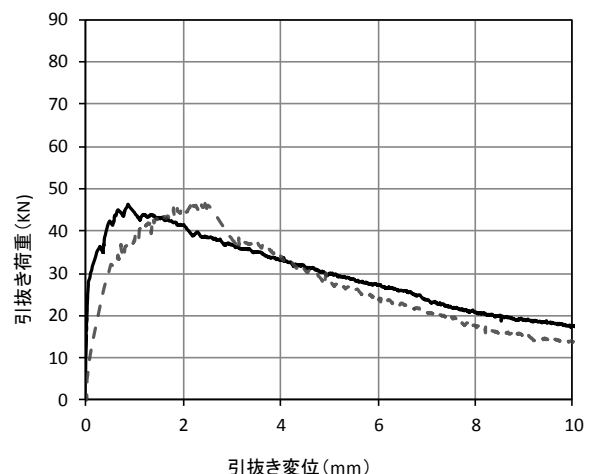


図-8 PVA-PVA の引抜き荷重-引抜き変位関係

的に荷重が 20~30kN まで低下し、それに伴い引抜き変位が 7mm まで増加した。これは最大荷重に達した後にヘッド部から進展するコーン状のひび割れが急激に広がった結果、引抜き荷重の低下が生じたものと考えられる。図-7 に示す OL-PVA 試験体では、アンカーヘッドの変位が平均 1mm 程度で約 61kN の最大引抜き荷重に達した。その後試験体上面のアンカーボルトを中心としたひび割れの発現に伴い急激に荷重が低下したが、アンカーヘッドの変位が平均 3mm 以降からは緩やかな引抜き挙動となった。図-8 に示す PVA-PVA 試験体は、他の調合シリーズとは異なるアンカーボルトの引抜き挙動を示しており、他の試験体に見られたような最大荷重以降の急激な引抜き変位の増加と荷重の低下は起こらず、最大引抜き荷重に達したと同時に緩やかな軟化挙動に移行している。

このように図-6 から図-8 に示すアンカーボルトの引抜き最大荷重が異なる要因に関して、アンカーボルトを埋設したハイブリッド型 SHCC の各力学特性値と引抜き最大荷重との相関性を検討したところ、表-4 から分かるように、初期ひび割れ応力、最大引張応力、引張終局ひずみ等の材料の引張性状と引抜き最大荷重とは明確な相関性は確認できなかった。一方、圧縮強度と引

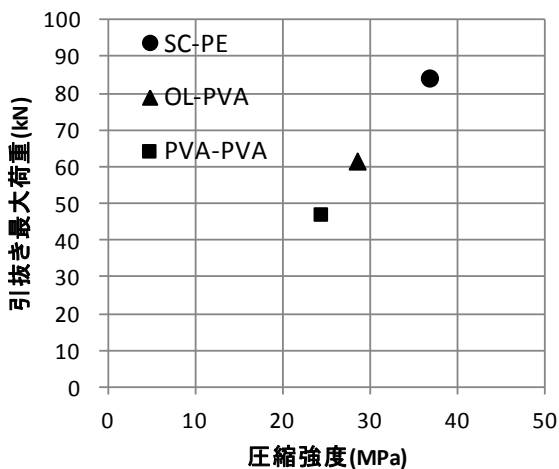


図-9 各調合の圧縮強度と引抜き最大荷重関係

抜き最大荷重との相関性を検討したところ、図-9 に示すように、各調合の圧縮強度とアンカーボルトの引抜き最大荷重には明確な相関関係が認められた。したがって、ハイブリッド型 SHCC に埋設したアンカーボルトの引抜き最大荷重は、材料の圧縮強度に強く依存していると言え、アンカーヘッド部の局所的な支圧が大きな影響を及ぼしていると考えられる。

3.3 SHCC に埋設されたアンカーボルトの引抜き強度の推定式

頭付きアンカーボルトの引抜き耐力を推定する式として、日本建築学会式⁹⁾が提案されている。式を以下に示す。

$$p_{a1} = \phi_1 \cdot \sqrt{f_c} \cdot A_c \quad (1)$$

$$p_{a2} = \phi_2 \cdot s \sigma_y \cdot s_c a \quad (2)$$

$$p_{a3} = \phi_3 \cdot f_n \cdot A_0 \quad (3)$$

ここで、 p_{a1} はコーン破壊により決まる許容引抜き力 (kN)、 p_{a2} はボルトの降伏により決まる許容引抜き力 (kN)、 p_{a3} は支圧による許容引抜き力 (kN)、 $\phi_{1,2,3}$ は低減係数(ここでは 1 とする)、 f_n は支圧強度 $\sqrt{(A_c/A_0)} \cdot F_c$ 、 F_c はコンクリート設計基準強度(N/mm²)、 A_c はコーン破壊面水平投影面積 (mm²)、 A_0 はアンカーヘッド部の支圧面積 (mm²)、 $s \sigma_y$ はアンカーボルトの降伏点(N/mm²)、 $s_c a$ は軸部断面積とねじ部有効断面積の小さい方の値(mm²)である。

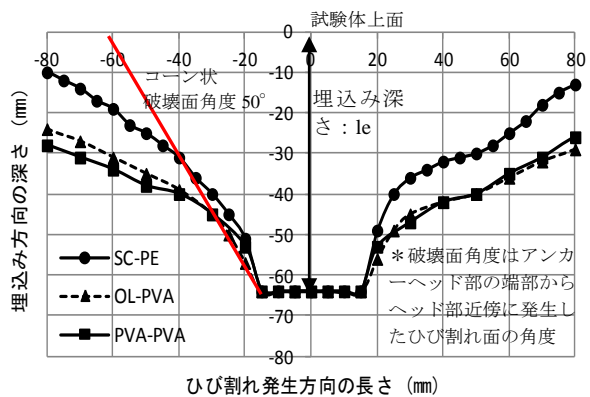
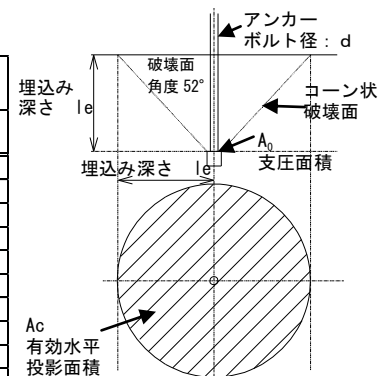


図-10 試験体のコーン状破壊面の実測値

表-5 アンカーボルトの引抜き最大荷重の計算値と実験値の比較

No.	試験体名	A_0	A_c	l_e	F_c	計算引抜き強度 (kN)	実験引抜き強度 (kN)
		(mm ²)	(mm ²)				
1	SC-PE	326.73	12867.96	64	36.80	75.46	84.26
2	OL-PVA	326.73	12867.96	64	28.50	58.44	61.66
3	PVA-PVA	326.73	12867.96	64	24.30	49.83	47.22
4	SC-PE-3d *1	326.73	7238.23	48	36.80	56.59	60.00
5	SC-PE-5d *1	326.73	20106.19	80	36.80	94.32	96.00
6	ECC-1 *2	706.86	7853.98	50	34.00	80.11	79.00
7	ECC-2 *2	706.86	3848.45	35	34.00	56.08	51.90
8	ECC-3 *2	706.86	3848.45	35	33.00	54.43	49.70
9	ECC-4 *3	126.45	7853.98	50	41.70	41.56	41.50
10	ECC-5 *3	126.45	1963.50	25	41.70	20.78	18.50
11	ECC-6 *3	126.45	1963.50	25	54.40	27.11	19.60

*1: 参考文献 7), *2: 参考文献 6), *3: 参考文献 10) 11)



* 本研究における支圧面積 A_0 と有効水平投影面積 A_c の定義

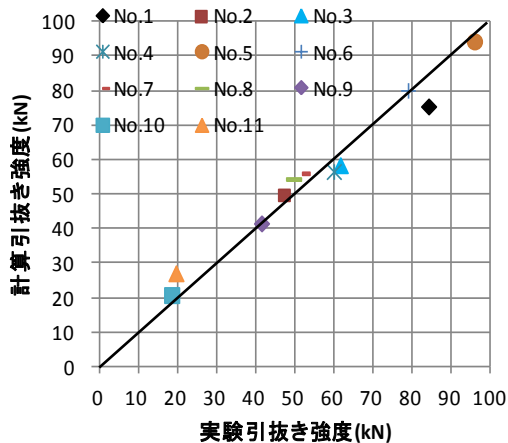


図-11 実験値と計算式による引抜き荷重との関係

著者らの既往の研究⁷⁾において高靱性繊維補強セメント複合材料にアンカーボルトを埋設した場合、最終的にはコーン状の破壊面が形成されるが、式(1)のコーン破壊を想定した式を用いて引抜き強度を計算しても、計算値と実験値の間には非常に大きな隔たりがあることがわかっている。

そこで、前節で述べたようにSHCCのようにひび割れ抵抗性能の高い材料の場合、アンカーボルトの引抜き最大荷重は、材料の圧縮強度とそれに伴う支圧に強く依存していると考えられることから、アンカーヘッド部の支圧破壊を考慮した式(3)を用いてSHCCに埋設されたアンカーボルトの引抜き荷重の計算を行った。

計算を行うにあたり、支圧強度を算出するのに重要な有効水平投影面積 A_c について試験後の破壊面を基に検討したところ、図-10に示すようにコーン状のひび割れ面はヘッド部端部からおおよそ 50° 程度の角度(文献9では 45°)を有していることが確認された。そこで本研究では、この実測値を基本とし有効水平投影面積 A_c の半径を埋め込み深さ l_e と決め、 A_c を式(4)で算出した。

$$A_c = \pi \cdot l_e^2 \quad (4)$$

表-5に式(4)による A_c を導入した式(3)を用いて求めた引抜き荷重と実験値を示す。なお、表-5には稲熊ら⁶⁾やLiら^{10), 11)}が行った実験値と式(3)を用いて求めた計算値も示している。また、図-11に式(3)から求めた計算による引抜き強度と実験による引抜き最大荷重の関係を示す。図-11より、材料の支圧強度を考慮した式を用いることで、SHCCに埋設されたアンカーボルトの引抜き強度を非常に高い精度で推定できることが明らかとなった。

以上の結果から、ある一定程度の靱性能を有するSHCCにアンカーボルトを埋設した場合、その引抜き性状に与えるSHCCの力学的要因は、圧縮強度とそれに伴う支圧強度が支配的であると考えられる。

4. まとめ

本研究から得られた知見を以下に示す。

- (1) SHCCの引張靱性が異なることで、それに埋設したアンカーボルトの引抜き挙動が変化することが確認された。
- (2) SHCCに埋設したアンカーボルトの引抜き最大荷重は、SHCCの引張強度や靱性能よりも圧縮強度に依存することが明らかとなった。
- (3) SHCCの支圧強度を考慮した式を用いることで、SHCCに埋設されたアンカーボルトの引抜き強度を非常に高い精度で推定できることが明らかとなった。

参考文献

- 1) 稲熊唯史, 閑田徹志, 林承燦, 内田裕市: 複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料の引張性状の評価, コンクリート工学, Vol.44, No.7, pp.3-8, 2006.7
- 2) 丸田誠ほか: プレキャスト ECC 連結梁を用いた高層 RC 新架構, コンクリート工学, Vol.43, No.11, pp.18-26, 2005
- 3) 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), 土木学会コンクリート委員会, 2007
- 4) (社)日本コンクリート工学協会: 高靱性セメント複合材料を知る・使う・使う, 2002
- 5) 山下賢司, 国枝稔, 稲熊唯史, 六郷恵哲: 高靱性セメント複合材料におけるアンカーボルトの引抜き挙動, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.1, pp.297-302, 2004.6
- 6) 稲熊唯史ほか: 高靱性セメント複合材料におけるアンカーボルトの引抜き性状, 高靱性セメント複合材料に関するシンポジウム, pp.15-22, 2003.12
- 7) 菊田貴恒, 三橋博三, Choi Donguk, 石川直哉: 高靱性セメント系複合材料に埋設されたアンカーボルトの引抜き性状に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.30, No.1, pp.327-332, 2008
- 8) 菊田貴恒ほか: ハイブリッド型 SHCC の開発とその引張性状評価法に関する研究, 日本建築学会技術報告集, 第15巻, 第31号, pp.643-648, 2009.10
- 9) 日本建築学会 各種合成構造設計指針同解説, pp.191-198, 2004
- 10) Shunzhi Qian and Victor C. Li : Influence of Concrete Material Ductility on Headed Anchor Pullout Performance, ACI Materials Journal, Vol.106 No.1, pp.72-81, 2009.2
- 11) Shunzhi Qian and Victor C. Li : Headed Anchor/Engineered Cementitious Composites(ECC) Pullout Behavior, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.9, No.3, pp.339-351, 2011.10