

論文 Ultra High Performance-Hybrid Fiber Reinforced Cementitious Composites(UHP-HFRCC)の引張性能に及ぼす水結合材比の影響

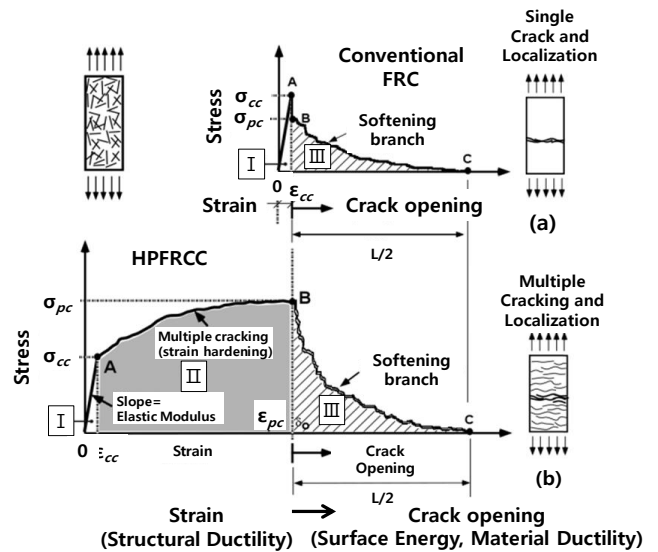
Sukmin Kwon^{*1}・菊田 貴恒^{*2}・西脇 智哉^{*3}・三橋 博三^{*4}

要旨: 本研究は、UHP-HFRCC のマトリックス強度が引張強度やひずみに与える影響を調べるために繊維なし、マイクロ繊維、マクロ繊維、ハイブリッド繊維シリーズのそれぞれに対して、水結合材比をパラメータとして実験的に検討した。引張性能として最大引張強度、最大引張強度時のひずみ、最大引張強度までのエネルギー吸収量を取り上げて検討した。その結果、ハイブリッド繊維シリーズにおいて、他のシリーズよりも引張性能の向上が確認された。加えて、水結合材比は最大引張強度に大きな影響があった。一方で、最大引張強度時ひずみには影響はなかった。また、エネルギー吸収量においてはひずみ硬化現象が大きな影響を及ぼした。

キーワード: UHP-HFRCC, 繊維補強, 引張性能, 引張強度, 引張ひずみ, エネルギー吸収量

1. はじめに

近年、UHPC (Ultra High Performance Concrete)及びHPFRCC (High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites) の研究が活発に行なわれている。UHPC は150~200MP 程度の高強度と高耐久性を有する材料である¹⁾。しかし、UHPC では圧縮に対して爆裂し、引張に対して脆性破壊が起こる²⁾。その弱点を改善するため、UHP-Fiber Reinforced Cementitious Composites (UHP-FRCC)が開発されている。これは繊維の混入によって、引張強度の向上だけではなくひび割れ幅の進展も抑制できる。HPFRCC は図-1のように、既往のFRCCで示しているひずみ軟化現象(III)ではなく一軸引張応力下において複数ひび割れ(マルチプルクラック)特性とひずみ硬化特性(II)を示すような繊維補強セメント複合材料とされている。すなわち、初期ひび割れが発生した後も引張強度は更に上昇し、その結果、引張ひずみが初期ひび割れ発生した後も更に大きく進展する特性をもっている。しかし、UHP-FRCCの場合、ひずみ硬化現象を伴う最大荷重時のひずみが0.2%を超えることは未だ容易ではない。特にストレート鋼繊維のみを適用する場合、ひずみ硬化を得るためには一般的に繊維量4~6%が必要である。これは鋼繊維とマトリックスの付着性能が低いことがその一因である。また、多量の鋼繊維混入はコストの増加や施工性の低下に直接影響を与える。最近 Willeら³⁾は、UHPCマトリックスに鋼繊維2.5%を混入する事で最大荷重14.2MPa、最大荷重時のひずみ0.25%を得ることができたと報告している。筆者ら⁴⁾と Kawamataら⁵⁾は図-2に示したように、サイズの異なる繊維が可視レ



(a) 単一ひび割れ (b) 複数ひび割れ
図-1 HPFRCCの引張応力-ひずみ関係²⁾

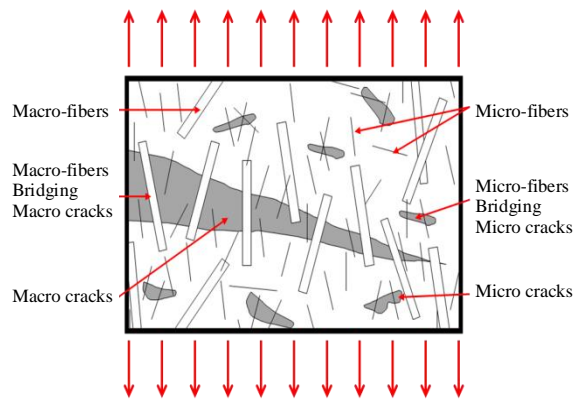


図-2 マルチレベル補強手法によるひび割れ抑制概念図⁴⁾

*1 東北大学大学院工学研究科 都市・建築学専攻 博士課程後期 修士(工学) (正会員)

*2 東北大学大学院工学研究科 都市・建築学専攻 助教 博士(工学) (正会員)

*3 東北大学大学院工学研究科 都市・建築学専攻 准教授 博士(工学) (正会員)

*4 東北大学 名誉教授 工博 (正会員)

表-1 使用材料

材料名称	略号	備考
セメント	SFC	シリカフェームセメント (密度 3.01 g/cm ³)
細骨材	S	珪砂 6号(密度: 2.6g/cm ³)
ワラストナイト	Wo	(密度: 2.9g/cm ³)
高性能減水剤	SP	ポリカルボン酸エーテル系化合物 (密度: 1.05g/cm ³)
消泡剤	D	(密度: 1.05g/cm ³)

ベルのひび割れと微細レベルのひび割れそれぞれを連続的に効率良く補強するマルチレベル補強手法による引張性能の向上を報告した。特に筆者らが開発した UHP-HFRCC (Ultra High Performance - Hybrid Fiber Reinforced Cement Composites)⁴⁾は、繊維量 2.5%を混入する事で最大荷重 16.1MPa, 最大荷重時のひずみ 1.06%の結果を得ている。引張性能を評価する指標の中で最大引張強度, 最大引張強度時のひずみとエネルギー吸収量はひずみ硬化現象の有無によって大きく左右される。従って, UHP-FRCC ではひずみ硬化現象の誘導が最も重要である。ひずみ硬化現象を誘導するには, 以下の3つの方法がある。すなわち, (1)繊維量を 5~8%混入する方法, (2)大量のフライアッシュを投入し, 初期ひび割れ強度を低下させる方法, (3)繊維の形状を変化させることなどにより付着強度を高める方法, である⁶⁾。本研究では, 筆者らが開発した UHP-HFRCC⁴⁾を基として, 繊維なし, ミクロ繊維, マクロ繊維, これらのハイブリッド繊維シリーズに対してマトリックスの強度が引張性能に及ぼす影響を水結合材比の変化により確認することを目的とする。

2. 実験概要

2.1 使用材料

表-1 に示す材料を用いて表-2 の調合表に従いモルタルを作製した。ワラストナイトは, マトリックスのミクロレベルでの補強のために使用した。ただし, この効果に関する定量的検討は, 今後の課題である。また, 写真-1 のように繊維には異なる2種類の鋼繊維(ミクロ繊維(OL):直線状 6mm, マクロ繊維(H):両端フック付 30mm)を使用した。それぞれの物性を表-3 に示す。

2.2 試験体製作

実験に用いたシリーズの調合を表-2 に示す。本実験では UHP-HFRCC に用いられることを想定して(一般的な UHP-FRCC の水結合材比は 12~22 程度), 水結合材比の異なる3水準(W/B=15, 20, 25)を使用した。これらのマトリックスの圧縮強度はそれぞれ 201MPa, 147MPa, 80MPaであった。減水剤は水結合材比が低い順に, シリ

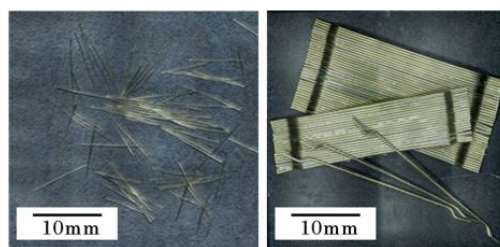
表-2 調合表

シリーズ名	W/B wt.%	SP/B wt.%	D/B wt.%	S/B wt.%	Wo/B wt.%	圧縮 強度 (MPa)
P-15	15	1.7	0.02	35	13	201
P-20	20	0.9				147
P-25	25	0.7				80

W:水, B:結合材, D:消泡剤, S:細骨材, Wo:ワラストナイト

表-3 繊維物性

繊維名称	略号	形状	密度 g/cm ³	繊維長 mm	直径 μm	アスペクト比	引張 強度 MPa
ミクロ 繊維	OL	ストレート	7.85	6	160	37.5	2000
マクロ 繊維	H	両端フック	7.85	30	380	78.9	3000



(a) ミクロ繊維(OL) (b) マクロ繊維(H)

写真-1 繊維の種類

ーズ別の水準(SP/B=1.7%, 0.9%, 0.7%)とした。試験体名称としては繊維なしのシリーズを P, ミクロ繊維が 1%混入されているシリーズ OL1, マクロ繊維が 1.5%混入されているシリーズ H1.5, これらのハイブリッド繊維シリーズの場合を OL1H1.5 と表記した。また, 水結合材比の違いも 15, 20, 25 と試験体の名称の後に表記した。練混ぜには 5L オムニミキサーを使用し, セメントと骨材を 1 分間練混ぜた後, 水と混和剤を入れ 3 分間練混ぜ, 型枠に打ち込んで試験体を製作した。繊維を混入するシリーズでは, 単繊維の場合には 2 分間, ハイブリッドの場合には繊維を 2 種類に分けてそれぞれ 2 分間練混ぜ, 型枠に打ち込んで試験体を製作した。引張試験のためには, 図-3 に示すようなダンベル型試験体を製作した。

2.3 試験体の養生方法

試験体は打込み後 1 日間湿潤養生した後, 蒸気養生を実施した。温度上昇速度は 1 時間当たり 15°C とし 90°C まで上昇させ, 最高温度到達後 24 時間保持した。その後養生機の温度を除々に室内温度まで下げた後に養生室で湿潤養生を行い, 打込み後 7 日目に載荷試験を行った。

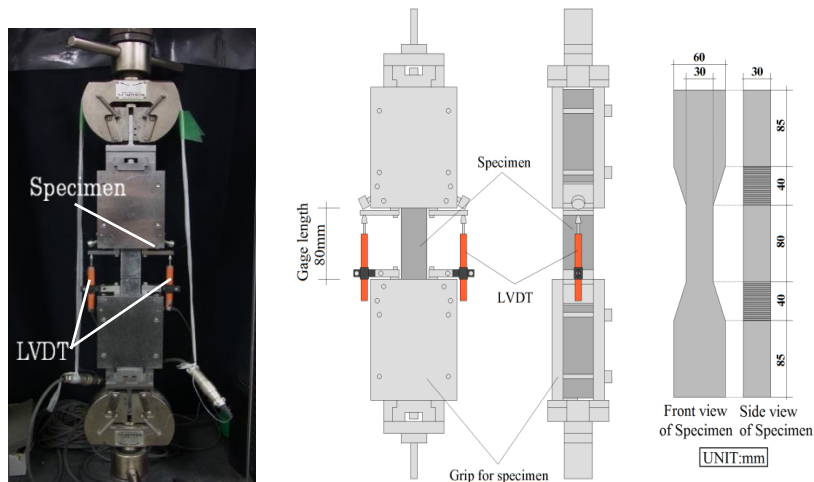


図-3 一軸引張試験装置と試験体の寸法⁷⁾

2.4 引張強度試験

本研究は、繊維混入の割合を含む調合の影響を検討するための第一段階の研究であることから、一軸引張試験の試験方法及び関連装置については、今回は土木学会(2007)⁷⁾の推奨試験体を用いて引張試験を行った。この試験体形状に対してここで用いるマクロ繊維は長く(30mm)、繊維の配向性など考慮すべき点はあるが、この点は今後の検討課題としたい。一軸引張試験装置と試験体の寸法を図-3に示す。引張力が十分に伝達するように、試験体の両面を厚さ10mmの鉄板で挟込み、ボルトで締め付けた。一軸引張試験には最大容量30kNの載荷装置を用い、試験体の両端部の支持条件を固定とした。載荷時の変位は、試験体の両側にその材軸と平行に設置された2本の高感度変位計を用い、検長区間を80mmと設定して計測した。なお、載荷速度0.5mm/minの変位制御で載荷試験を行った。

3. ひずみ軟化状態とパラメータ

通常のFRCCの軟化挙動とHPFRCCのひずみ硬化現象は図-1のように示される。HPFRCCの引張強度 σ_{pc} は最大荷重時の公称応力を示す。HPFRCCの定義では、初期ひび割れ発生応力 σ_{cc} を超え、引張強度が σ_{pc} まで展開するひずみ硬化を示す。この時、ダクティリティと高いエネルギー吸収を得るための最も重要なファクターが複数ひび割れの発生の有無である。ひずみ硬化状態の定義としては、本研究ではNaaman²⁾により提案された式(1)を使用した。

$$\sigma_{pc} \geq \sigma_{cc} \quad (1)$$

最大荷重時のひずみ ϵ_{pc} は σ_{pc} 時のひずみ値で定義される。本研究では、繊維なし(P)、マイクロ繊維1%(OL1)、マクロ繊維1.5%(H1.5)、ハイブリッド繊維(OL1H1.5)シリーズに対して水結合材比の変化による引張特性の検討を行

った。引張特性として σ_{pc} 、 ϵ_{pc} 、エネルギー吸収量 g を調査した。ここで、エネルギー吸収量 g は、最大荷重時のひずみ ϵ_{pc} までの試験体の単位体積における消費エネルギー量(kJ/m^3)である。 σ_{pc} 以降の軟化に関しては考慮していない。エネルギー吸収量 g の計算方法を以下の式(2)に示す。

$$g = \int_0^{\epsilon_{pc}} \sigma(\epsilon) d\epsilon \quad (2)$$

4. 実験結果及び考察

4.1 実験結果概略

図-4に全シリーズの引張応力とひずみの関係を示す。ここで、図中にある右上の数字は順に、シリーズ名、 σ_{pc} 、 ϵ_{pc} を示しており、太線は平均である。Pシリーズでは最大引張強度時に脆性的に破断した。しかし、OL1シリーズは σ_{pc} 以降において脆性破壊を起こさず軟化挙動を示すことが確認された。また、H1.5-20シリーズ以外のH1.5シリーズは、初期ひび割れが発生した後にその応力レベルを保持しながらひずみも進展する現象が確認された。特に、ハイブリッド繊維を混入したOL1H1.5シリーズの場合には、初期ひび割れが発生した後においてH1.5シリーズよりも強度が増大し、ひずみと共に応力も増大するひずみ硬化現象が確認された。

4.2 ひび割れ状態

全てのひび割れは試験後試験体の検長区間80mm内で確認された。実験から確認されたひび割れ形状と間隔の例を写真-2に示す。この時、ひび割れが見やすいように試験体の表面に水をかけて撮影した。繊維無混入のPシリーズは、最大荷重に到達するのと同時に二つに破断した。OL1シリーズは繊維がひび割れ部に架橋したため、破壊後も破断には至らなかったが、微細ひび割れが分散する複数ひび割れは確認されなかった。H1.5シリーズは試験体の表面に複数ひび割れが確認された。更にOL1H1.5シリーズの場合でも試験体の表面に複数ひび

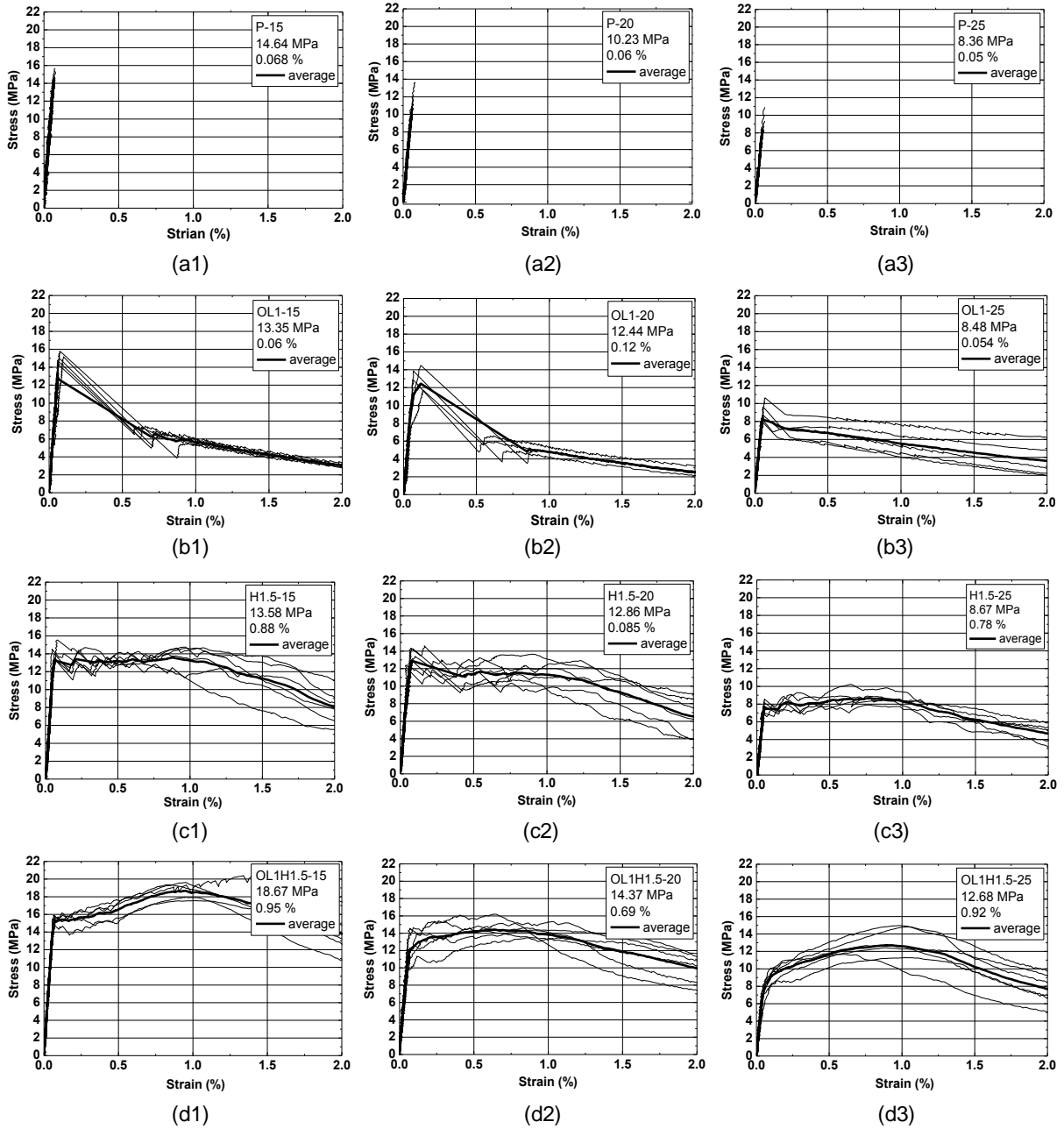


図-4 引張応力-ひずみ関係

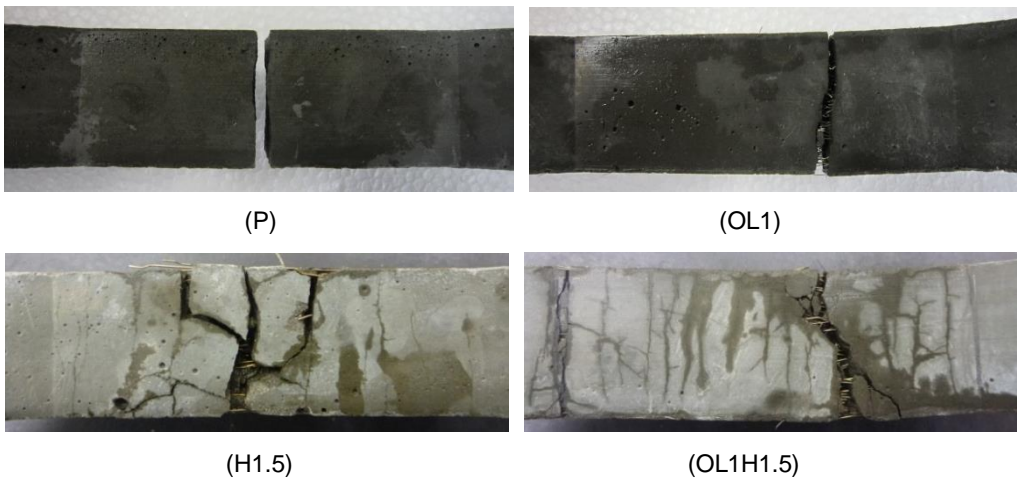


写真-2 試験後の試験体のひび割れ形状と間隔

割れが確認され、微細ひび割れの本数も H1.5 シリーズより多く、細かい間隔を示した。これは、マイクロ繊維とマクロ繊維の組合せの相乗効果だと考えられる。

4.3 水結合材比の違いによる引張特性の変化

(1) 引張強度及び最大荷重時の引張ひずみ

P シリーズ :

図-4(a1)~(a3)に示す引張試験結果のように、P シリーズでは水結合材比が低いものから順に σ_{pc} が 14.64MPa, 10.23MPa, 8.36MPa と低下することが確認され、水結合材比の増加がマトリックスの σ_{pc} の低下に大きな影響を与えることが確認された。また、 σ_{pc} 以降の軟化挙動は、マトリックスの強度が低い場合にも発生せず、脆性的に破壊した。 ϵ_{pc} については、水結合材比の違いによる大きな変化は確認されなかった。

OL1 シリーズ :

OL1 シリーズの引張試験結果を図-4(b1)~(b3)に示す。図-5 に示すように OL1 シリーズの σ_{pc} は P シリーズの結果と殆ど同じ値を示し、マイクロ繊維 1%を混入しても σ_{pc} への影響は見られなかった。しかし、図-4(b1)~(b3)に示したように、 σ_{pc} 以降の力学的挙動としては、 σ_{pc} に到達するのと同時に脆性的に破断するのではなく、軟化挙動を示すことが確認された。この結果から、マイクロ繊維 1%を混入することでも脆性破壊の防止ができると考えられる。しかしながら、Naaman ら⁸⁾と Rossi⁹⁾によると、ストレート繊維のみを混入してひずみ硬化を得るためには繊維の量が 5%~8%程度必要であり、それ以下の場合にはひずみ硬化はないとされている。本実験においても、図-6 に示すように ϵ_{pc} は P シリーズと大きな差はなかった。

H1.5 シリーズ :

H1.5 シリーズの引張試験結果を図-4(c1)~(c3)に示す。このシリーズでも図-5 に示したように、水結合材比が高くなると引張強度が低下することが確認された。 σ_{pc} 以降の挙動としては、図-4(c1)と(c3)の H1.5-15 と H1.5-25 シリーズで、 σ_{cc} 以降にひずみ硬化現象が確認された。これらの 2 シリーズの ϵ_{pc} は、図-6 のようにそれぞれ 0.88%と 0.78%を示し、P, OL1 シリーズの両方と比較すると最大強度の変化は小さかったが、ひずみは 14 倍程度高くなったことが確認された。H1.5-15 の場合、 σ_{cc} が 13.58 で他のシリーズより高く、両端に導入されたフックによって繊維とマトリックスに機械的な付着が発現し、ひずみ硬化が生じたものと考えられる。H1.5-25 の場合、 σ_{cc} が H1.5-15 や H1.5-20 より 4MPa~5MPa 程度低く、ひずみ硬化現象が起り易かったと考えられる。しかし、H1.5-20 シリーズの場合、 σ_{cc} が H1.5-15 より低く、 σ_{cc} 以降のひずみ硬化には十分なマトリックス強度ではなかったため、ひず

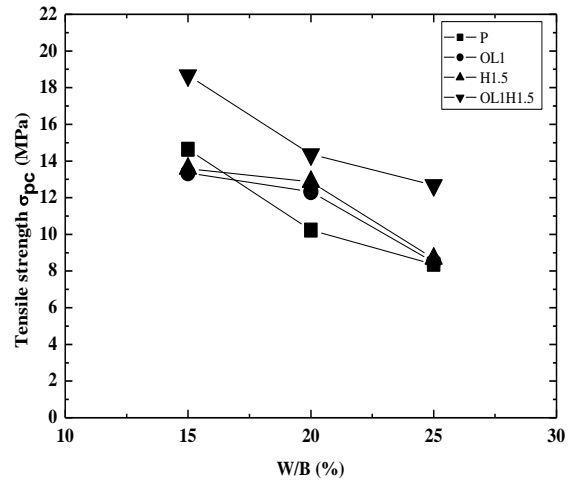


図-5 W/B と引張強度の関係

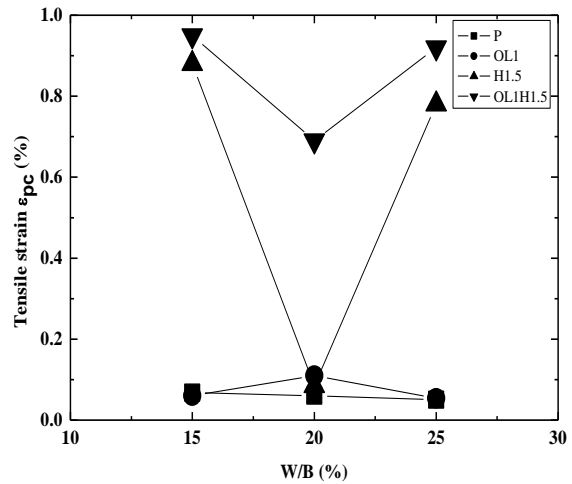


図-6 W/B と引張ひずみの関係

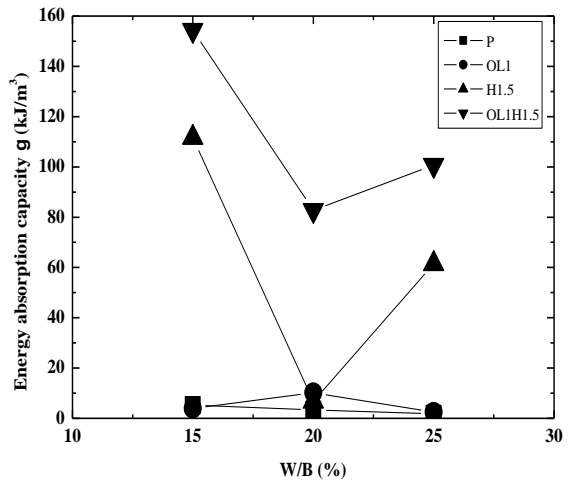


図-7 W/B によるエネルギー吸収量

み軟化挙動を示したものと考えられる。すなわち、ひび割れを抑制するための繊維との付着が弱くて繊維が十分働かなかったことが一因だと考えられる。以上の結果から、ひずみ硬化現象を誘導するためには水結合材比の選定は重要な要素だと考えられる。

OL1H1.5 :

OL1H1.5 シリーズの引張試験結果を図-4(d1)～(d3)に示す。図-5 より、このシリーズも他のシリーズと同様に水結合材比が σ_{pc} に影響を及ぼすことが確認された。また、 σ_{cc} と σ_{pc} の間に大きな差が確認され、同じ水結合材比で比較してみると他のシリーズよりも明確に優れたひずみ硬化現象を示した。その理由として、図-2 に示した概念図のように、マイクロ繊維がマイクロレベルの剛性、強度およびひび割れ抑制力を増大し、マクロ繊維が上述の H1.5 シリーズの場合よりも一層効果的にマクロレベルのひび割れを抑制するマルチレベル補強機構が働いて引張性能が大きく向上されたためと考えられる。これらの結果より、水結合材比を更に低下することによって更に高い σ_{pc} を得る可能性もあると考えられる。しかしながらもう一方の ϵ_{pc} は、図-6 に示したように OL1H1.5-15 と OL1H1.5-25 の場合、それぞれ 0.95% と 0.92% を示した。一方で、OL1H1.5-20 の場合は 0.64% であった。すなわち、この結果からは水結合材比の低下が ϵ_{pc} に及ぼす影響は単純な関係としては確認できず、マルチレベル補強機構の一層の解明が必要であることが明らかとなった。

(2) エネルギー吸収量 g

各シリーズ別のエネルギー吸収量 g を図-7 に示す。 g 評価には σ_{pc} 以降のひずみ軟化部分を考慮していなかったため、ひずみ硬化現象の有無によって大きな差があることが確認された。ひずみ硬化現象が起らなかったシリーズは $1.8\text{kJ/m}^3 \sim 10.2\text{kJ/m}^3$ 程度の値を示したが、ひずみ硬化があったシリーズは $61.5\text{kJ/m}^3 \sim 154.4\text{kJ/m}^3$ 程度と、より高い値を示した。特に、OL1H1.5 シリーズは、 g の値についても他のシリーズより高い値を示した。水結合材比の影響は、15% と 25% では大きな差が確認されたが 20% と 25% の間では逆に 25% の方が高い g の値を示した。その理由は、H1.5-25 では 25% の場合のみでひずみ硬化が発生したこと、OL1H1.5 シリーズにおいてはひずみ硬化現象がすべての場合に発生したが、その水結合材比 20% の場合の ϵ_{pc} が 25% の場合の 2/3 程度と低かったことが原因であったと考えられる。従って、高い g の値を得るためにもひずみ硬化現象の誘導が重要であり、より大きな ϵ_{pc} を得るためには水結合材比の適切な選択が必要だと考えられる。

5. まとめ

本研究では、マトリックスの強度が UHP-HFRCC の引張性能に与える影響を、一連の実験的検討により明らかにした。本研究で得られた知見を以下にまとめる。

- 1) ハイブリッド繊維補強はセメント系複合材料の引張性能の向上に効果のあることが確認できた。
- 2) 水結合材比は σ_{pc} の値に大きな影響があった。また、ひずみ硬化現象を誘導するためには水結合材比の適切な選択が重要であると考えられる。
- 3) エネルギー吸収量 g は、ひずみ硬化現象が起こったシリーズで大きい値を示した。また、本研究の範囲内では、水結合材比が最も低いシリーズで、より高い g の値を得ることが確認された。

参考文献

- 1) Behloul, M., Bernier, G., and Cheyrez, M.: Tensile Behavior of Reactive Power Concrete(RPC), Proceedings of the 4th International Symposium on Utilization of HSC/HPC, BHP'96, pp.1375-1381, 1996
- 2) Naaman, A.E.: Tensile strain-hardening FRC composites: historical evolution since the 1960's. In: Gross C.U.(ed.), Proceedings of international workshop on advanced construction materials. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, pp.191-202, 2007
- 3) Wille, K., Kim, D.J., and Naaman, A.E.: Strain Hardening UHP-FRC with Low Fiber Contents, Materials & Structures, Vol.44, No.3, pp.583-598, 2011
- 4) Kwon, S., Nishiwaki, T., Kikuta, T. and Mihashi, H.: Tensile Behavior of Ultra High Performance Hybrid Fiber Reinforced Cement-Based Composites, VIII International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures, FraMCoS-8, Toledo, Spain. 2013
- 5) Kawamata, A., Mihashi, H. and Fukuyama, H.: Properties of Hybrid Fiber Reinforced Cement-based Composites," Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.1, No3, pp.283-290, 2003
- 6) Kim, D, Naaman, A.E., and El-Tawil, S.: High Performance Fiber Reinforced Cement Composites with Innovative Slip Hardening Twisted Steel Fibers, Journal of Concrete Structures and Materials, Vol.3, No.2, pp.119-126, 2009
- 7) 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), 2007
- 8) Naaman, A.E. and Homrich, J.R.: Tensile Stress-Strain Properties of SIFCON, ACI Material Journal, Vol. 86, No.3, pp.244-251, 1989
- 9) Rossi, P., Arca, A., Parant, E., and Fakhri, P.: Bending and Compressive Behaviors of a New Cement Composites, Cement and Concrete Research, Vol. 35, No.1, pp.27-33, 2005