

論文 実機プラントによって製造したひずみ硬化型セメント複合材料の性能評価

金 映徳*1・金 圭庸*2・李 昇勳*3・金 武漢*4

要旨:本研究では大量生産による繊維補強セメント複合材料の材料的性能と品質変化を検討するため、生コン用の実機プラントによってひずみ硬化型セメント複合材料（以下、SHCC）を製造し、実験室レベルで製造したSHCCの性能としフレッシュ性状および一軸直接引張によるひずみ硬化特性などの力学的性能を比較した。実験の結果、実機プラントによって製造した場合、実験室レベルの少量練混ぜに比べ練混ぜ時間が長くても繊維の分散が不十分であり、ひずみ硬化性能が低くなる傾向が見られる。SHCCの大量生産時には練混ぜ効率、マトリクスの粘性、繊維の分散などが材料性能の低下要因であると判断される。

キーワード: ひずみ硬化型セメント複合材料, SHCC, 実機プラント, 製造方法, 性能評価

1. はじめに

ひずみ硬化型セメント複合材料（Strain Hardening Cement-based Composites, 以下 SHCC）は曲げモーメント作用下あるいは引張力作用下において、ひび割れ発生後も応力の低下が無くみかけのひずみの増加に伴って応力が増加するひずみ硬化特性と、複数の微細ひび割れが分散するマルチブルクラック特性を示す材料である。このような材料は、一般的なコンクリートの脆性的な性質を克服していることから、コンクリート系構造要素の構造性能や耐久性の大幅な向上が期待できる^{1),2),3)}。

一方、SHCCの材料的構成は粘度があるマトリクスで多量の繊維が混入した状態であり、マトリクスの粘度と繊維の均質な分散、打ち込み時の流動性などがひずみ硬化性能に大きく影響を及ぼす。これによりSHCCを実部材に適用するには使用材料および割合だけではなく、製造段階で発生する材料の不均質または流動性の不足に起因する打ち込み欠陥によって目標性能に至らない場合も考えられる。したがってSHCCを建設生産現場へ大量に適用する場合には生コンプラントでの生産精度と材料的目標性能について検討する必要がある^{4),5)}。

本研究はSHCCの現場適用性を検討するため、生コン用の実機プラントの大量生産によって製造したSHCCと実験室レベルで少量製造したSHCCとのフレッシュ性状と圧縮強度、曲げ強度および一軸直接引張によるひずみ硬化特性などの力学的性能を相互比較したものである。

2. 実験概要および方法

2.1 使用材料

表-1は各材料の基礎物性を示したものである。結合

表-1 使用材料の物理的性質

使用材料	物理的性質
セメント	1種普通ポルトランドセメント (密度 3.17g/cm ³ , 比表面積 3,230cm ² /g)
FA	密度 2.13g/cm ³ , 比表面積 3,400cm ² /g
LSP	密度 2.70g/cm ³ , 比表面積 6,400cm ² /g
細骨材	7号珪砂, 粒度 0.1~0.3mm, 表乾密度 2.64g/cm ³ , 吸水率 0.38%
混和剤	PC系SP剤, HPMC系増粘剤, AE剤
繊維	PVA 密度 1.31g/cm ³ , 長さ 12mm, 直径 40μm, 引張強度 1600MPa
	PE 密度 0.95g/cm ³ , 長さ 12, 15mm, 直径 12μm, 引張強度 2700MPa

材として1種普通ポルトランドセメントと混和材として石灰石微粉末(以下、LSP)およびフライアッシュ(以下、FA)を使用し、細骨材は7号珪砂を使用した。また混和剤としてはポリカルボン酸系高性能減水剤(以下、SP)とヒドロキシプロピルメチルセルロース系増粘剤(以下、HPMC)および天然じょうし系空気量調整剤(以下、AE)を使用し、繊維はK社のポリビニルアルコール(以下、PVA)繊維およびD社のポリエチレン(以下、PE)繊維を使用した。

2.2 実験計画および割合

表-2は本研究の実験計画を示したものである。本研究では実機プラントで大量に製造したSHCCのフレッシュ性状および力学的特性を評価するために、PVAとPE繊維を用いた各々2種類のSHCCを1.7m³製造し実験室レベルで製造したSHCCの実験結果と比較した。

表-3は本研究で使用したSHCCの割合を示したもの

*1 大韓民国 忠南大学校 大学院 建築工学科 建築研究所 工博 (正会員)

*2 大韓民国 忠南大学校 建築工学科 助教授 工博 (正会員)

*3 三星物産(株) 建設部門 部長 (正会員)

*4 大韓民国 忠南大学校 建築工学科 教授 工博 (正会員)

表-2 実験計画

区分	練混ぜ方法 ¹⁾	マトリックス調合 ²⁾				繊維		目標空気量 (%)	評価項目
		W/B	FA/B	LSP/B	S/B ³⁾	種類	混入率 (Vol.%)		
PVA2.0(12mm) W/B0.45-S/B0.7	Lab (0.03m ³)	0.45	0.0	0.3	0.7	PVA	2.0	8±2	<ul style="list-style-type: none"> ■ 空気量 (%) ■ モルタルフロー(mm) ■ 圧縮強度(MPa) ■ 曲げ応力(MPa)-たわみ(mm) ■ 引張応力(MPa)-ひずみ(%)
PVA2.0(12mm) W/B0.45-S/B1.0					1.0				
PE1.5(15mm) W/B0.45-S/B0.8	BP (1.7m ³)		0.1	0.0	0.8	PE	1.5		
PE2.0(12mm) W/B0.45-S/B0.5					0.5		2.0		

1) Lab : 実験室の小型ミキサによる製造, BP : 実機プラントによる大量製造, 2) 結合材(B)に対する重量比, 3) S : 細骨材

表-3 SHCC の調合

区分	単 位 量 (kg/m ³)					
	W	C	FA	LSP	S	Fiber
PVA2.0(12mm) W/B0.45-S/B0.7	378	588	0	252	588	26.2
PVA2.0(12mm) W/B0.45-S/B1.0	341	531	0	227	758	26.2
PE1.5(15mm) W/B0.45-S/B0.8	368	737	82	0	655	14.3
PE2.0(12mm) W/B0.45-S/B0.5	409	818	91	0	455	19.0

である。PVA-SHCC は長さ 12mm の PVA 繊維を用い、混入率 2.0Vol.%, S/B0.7 および 1.0, 混和材料として LSP を結合材の 30%置換した。一方、PE-SHCC は 12mm および 15mm の PE 繊維を用いて各々 2.0 および 1.5%混入し、混和材料として FA を結合材の 10%置換した。

一方、本研究では分体系マトリックスの流動性を SP 剤で調節し、マトリックスと繊維の分散はマトリックスの粘性を維持しながらエアバブル効果によって繊維を分散するため AE 剤の量を調節した。しかし繊維の混入によって連行する空気量が多く力学的特性に影響を及ぼす場合もあり、本研究では目標空気量を 6~10%に設定した。

2.3 練混ぜおよび試験体の作製

実験室レベルで作製した SHCC の試験体は容量 1000 の 2-Shaft 式ミキサを使用し、回転翼の隔たりが狭く、回転速度は 40 回/分である。

実機プラントによって大量に作製した SHCC の試験体は容量 3.5m² の 2-Shaft 式ミキサを使用し、実機プラントのミキサは回転翼の隔たりが広く、回転速度は 27 回/分である。

図-1 は実験室と実機プラントでの練混ぜ方法および材料投入の手順を示し、写真-1 は実機プラントでの生産全景を示したものである。実機プラントの生産においては、練混ぜ過程を目視で確認しながら材料を投入し大量の繊維が十分分散されるように練混ぜ時間を調節した。

実験室で作製した SHCC は練混ぜ後型枠に打ち込んで試験体を作製し、実機プラントによって作製した SHCC はアジテータトラックに運搬し型枠に打ち込んで試験体を作製した。試験体は圧縮試験用の寸法 $\Phi 100 \times 200$ mm, 曲げ試験用の寸法 $100 \times 100 \times 400$ mm および引張試験用の厚さ 20mm のダンベル形薄板試験体を作製し、材齢 3 日まで気中養生後脱型し 25 日間水中養生した。

2.4 試験方法

製造方法による工学的特性を比較するため、フレッシュ特性としてモルタルフローは KS F 2476「ポリマーセ

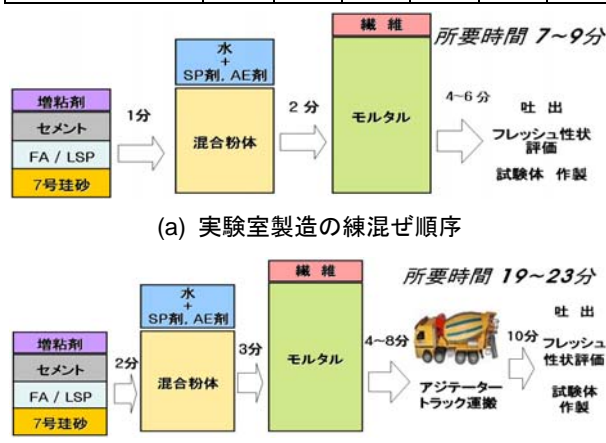


図-1 SHCC の練混ぜ順序

メントモルタルの試験方法」に準じて測定し、空気量はモルタル用空気量測定器を使用し測定した。

また圧縮強度は KS F 2405「コンクリートの圧縮強度試験方法」に準じ、曲げ強度は写真-2 のように KS F 2408「コンクリートの曲げ強度試験方法」に準じて3点曲げ試験を行なった。また引張性能は図-2 のようなダンベル形薄板試験体を作製し、一軸直接引張試験装置によって、0.15mm/分の速度と載荷し引張応力とひずみを評価した。

3. 実験結果および考察

3.1 練混ぜおよびフレッシュ性状

実機プラントにおける SHCC の乾練混ぜ時間は



(a) 実機プラントの全景 (b) 練混ぜ性状の観察



(c) 運搬および吐出 (d) 部材への打込み

写真-1 実機プラントでの生産全景

粉体材料と珪砂の均質な混合のため2分、練混ぜ水と混和剤の投入後3分、マトリクスの十分な粘性と流動性が目視で確認した上繊維を投入した。ただ、実機プラントの内部で練り混ぜているモルタルの粘性、流動性および繊維の分散程度を定量的に評価することは難しく、実機プラントで研究者の目視評価項目とし粉体材料および繊維の塊有り無しなどを確認しながら練混ぜの時間を調節しました。直径 $40\mu\text{m}$ の厚い PVA 繊維の場合は繊維の分散時間が4~6分で短く、直径 $12\mu\text{m}$ の薄い PE 繊維の場合は6~8分で長くなった。

実機プラントによる SHCC の生産時間が実験室生産時間より相当長くなった。これは実機プラントのミキサの場合、少量の実験用ミキサに比べ羽の間隔が広いこと、セメントおよび混和材料など粉体の塊りを分散する時間が掛かり、回転速度が遅くて繊維の分散効率も低いことだと考えられる。

表-4 は SHCC の調合および練混ぜ方法による混和剤の投入量を示したものであり、実機プラントにおいては空気量のばらつきが大きく AE 剤の投入量を分割投入した。PVA 繊維を用いた SHCC の実機プラント製造においては実験室製造時と同じ量の混和剤を使用した。

一方、15mm の PE 繊維を用いた SHCC の実機プラント製造においては、12mmPE-SHCC の混入率 2.0%より少

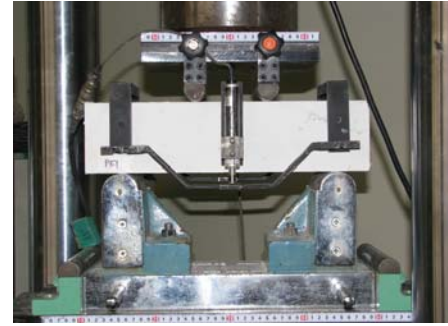
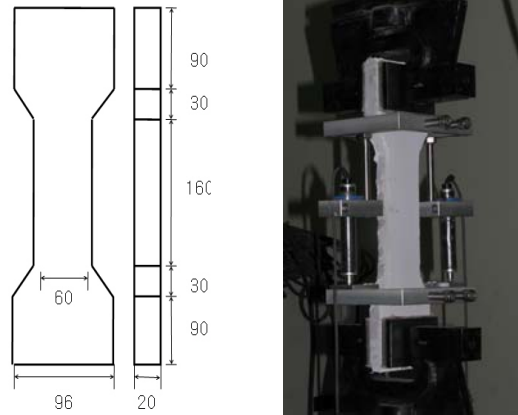


写真-2 曲げ試験装置の外観



(a) 試験体の形状 (b) 引張試験全景

図-2 一軸直接引張試験の概要

表-4 練混ぜ方法による混和剤投入量

SHCC の調合	練混ぜ方法	SP 剤 (Binder wt. %)	AE 剤 (Binder wt. %)	増粘剤 (Water wt. %)
PVA2.0(12mm) W/B0.45-S/B0.7	Lab	2.5	0.10	1.2
	BP	2.5	0.09	1.2
PVA2.0(12mm) W/B0.45-S/B1.0	Lab	2.5	0.10	1.2
	BP	2.5	0.08	1.2
PE1.5(15mm) W/B0.45-S/B0.8	Lab	2.5	0.11	1.0
	BP ¹⁾	3.0	0.20	1.2
PE2.0(12mm) W/B0.45-S/B0.5	Lab	2.0	0.09	0.9
	BP	2.0	0.20	0.9

1) 実機プラントにおいて PE15mm 繊維の分散のため SP 剤と増粘剤を追加した。

表-5 モルタルフロー測定事例

種類	PVA2.0(12mm) W/B0.45-S/B0.7	PE2.0(12mm) W/B0.45-S/B0.5
Lab		
BP		

ない 1.5%でも実験室製造時より繊維の分散性が不十分であり高性能減水剤と増粘剤の使用量が多くなった。

表-5 はモルタルフロー測定事例を、図-3 は SHCC の調合別練混ぜ方法によるモルタルフローと空気量を示したものである。SHCC の流動性においては同じ量の混和剤を使用しても実機プラント製造時のモルタルフローが実験室製造時より 2~4cm 程度低くなった。

ただ PE1.5(15mm)-W/B0.45-S/B0.8 の実機プラント製造においては、実験室製造時の混和剤使用量より多く使用した結果、モルタルフローは多少増加した。しかしマトリクスの粘度が低く、繊維の塊(Fiber-ball)が目視で観察されるなど材料的均質性が不十分であり硬化後の力学的性質に影響を及ぼすと判断された。

PVA-SHCC の実機プラント製造時の空気量は実験室製造時より大幅に増加し、S/B 0.7 では 8%から 17%、S/B 1.0 では 7%から 20%になった。しかし実機プラント製造時 AE 剤量を実験室製造時よりやや減少しても空気量が多くなった原因は明確ではない。

また PE-SHCC の実機プラント製造時、AE 剤量の実験室製造時より約 2 倍使用した実機プラント製造時の空気量は 8%、実験室製造時の空気量は 9%であった。実機プラント製造時 AE 剤量が多く使われたのは FA の品質差に起因すると考えられる。

これより実機プラントによる大量の SHCC 製造におい

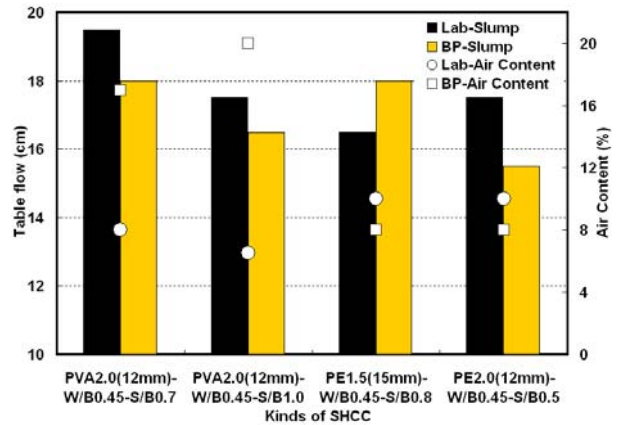


図-3 SHCC の調合および製造方法によるフレッシュ性状

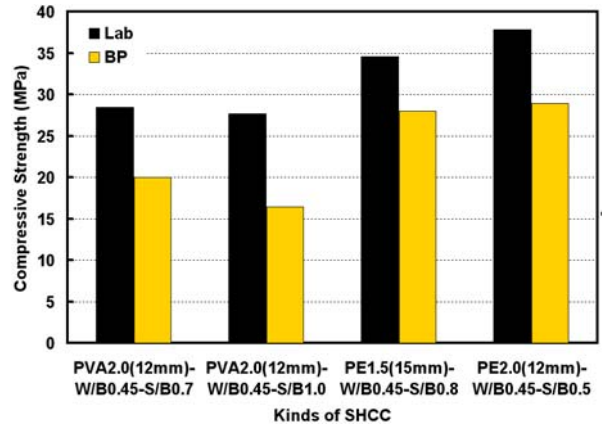
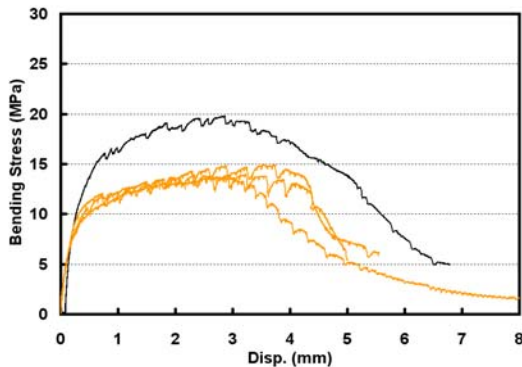
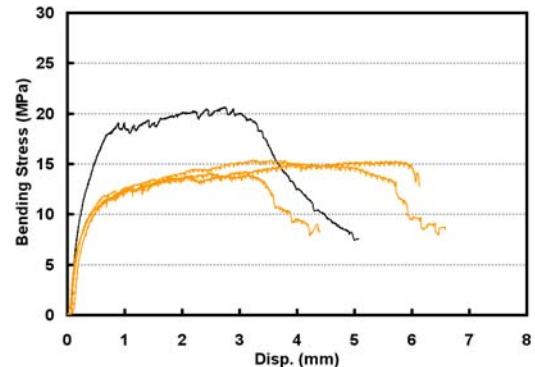


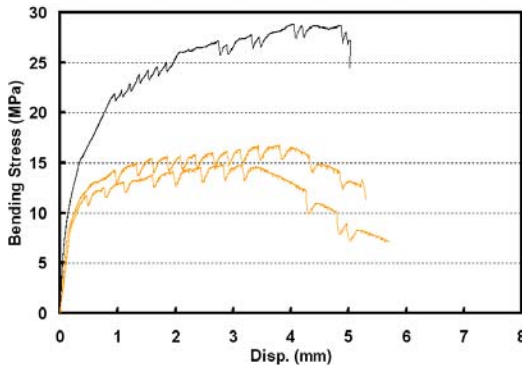
図-4 SHCC の調合および製造方法による圧縮強度



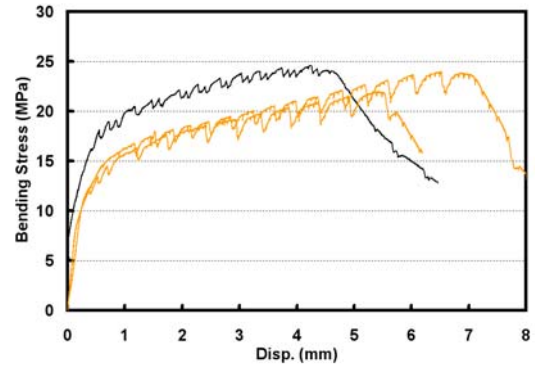
(a) PVA2.0(12mm)-W/B 0.45-S/B 0.7



(b) PVA2.0(12mm)-W/B 0.45-S/B 1.0



(c) PE1.5(15mm)-W/B 0.45-S/B 0.8



(d) PE2.0(12mm)-W/B 0.45-S/B 0.5

図-5 SHCC の調合および製造方法による曲げ応力-ひずみ性状

ては実験室製造レベルと比べ小型と大型ミキサの効率、長い繊維を使った場合の材料的均質性、空気量の制御などが SHCC の性能に影響を及ぼすと考えられる。

3.2 圧縮強度

図-4 は SHCC の調合および製造方法による圧縮強度の評価結果を示したものである。いずれも実験室で製造した試験体に比べ実機プラントで製造した試験体の圧縮強度が低くなった。

PVA-SHCC は実験室で製造した試験体の場合、S/B に関わらず圧縮強度が類似な水準であったが、実機プラントで製造した試験体の圧縮強度は実験室で製造した試験体に比べて S/B 0.7 試験体は約 32%、S/B 1.0 試験体は約 43%程度と低くなった。また PE-SHCC の場合も実機プラントで製造した試験体の方が約 20%位低かったが PVA-SHCC より大幅ではなかった。これは PVA-SHCC の場合、実験室と実機プラントでの空気量の差が大きかったのが重要な原因になったと考えられる。

一方、実験室の場合には同一の W/B0.45 において PVA-SHCC の空気量が各々7~8%で圧縮強度が 28MPa、PE-SHCC の空気量が 10%程度で圧縮強度が 35MPa 位であり、PE-SHCC の圧縮強度がより高く発現された。これは、PE-SHCC の方は混和材として FA を使用してポゾラン反応が起こって強度がより大きくなると考えられる。

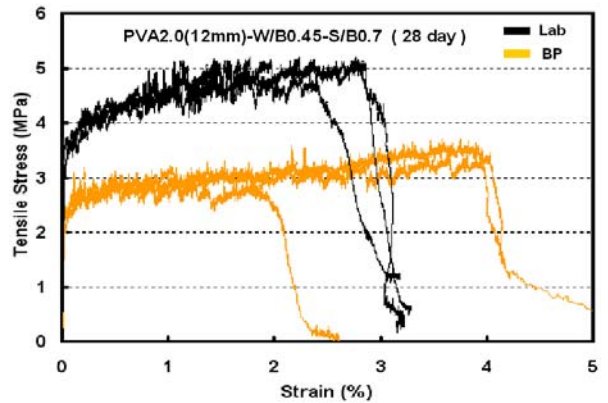
3.3 曲げ特性

図-5 は SHCC の調合および製造方法による曲げ応力-たわみ曲線を示したものである。いずれも曲げ強度は実験室で製造した SHCC の方が高く現れた。PVA-SHCC においては S/B に関わらず曲げ強度が類似な水準であり、実験室で製造した場合は 20MPa、たわみは約 3mm であった。また実機プラントによって製造した場合は曲げ強度が 15MPa と低くなって、S/B 0.7 のたわみは実験室レベルとほぼ同じで S/B 1.0 の方は若干大きくなった。

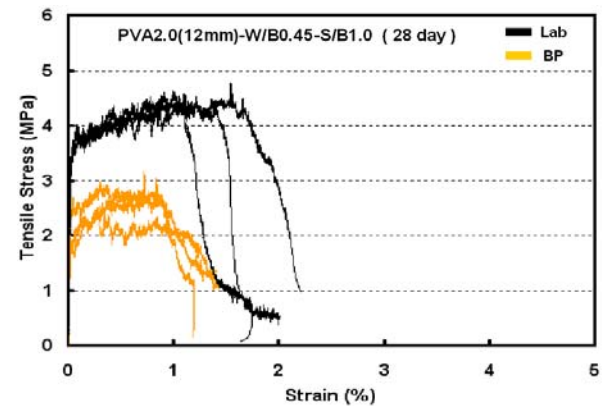
PE-SHCC においては、PE1.5 (15mm)-W/B 0.45-S/B 0.8 の場合、実験室で製造した SHCC の方は曲げ強度が 28MPa、たわみが約 5mm であった。実機プラントによって製造した場合、曲げ強度は 15MPa、たわみは約 3~4mm と低くなった。一方、PE2.0 (12mm)-W/B 0.45-S/B 0.5 の場合実験室で製造した SHCC の方は曲げ強度が 25MPa、たわみが約 4mm であった。実機プラントによって製造した場合、曲げ強度は 22~24MPa、たわみは約 5.5~7mm であった。これは長い繊維を使う SHCC の場合には、ミキサの種類によって練り混ぜの効率および材料の均質性が大きい影響を受けるためと考えられる。

3.4 一軸引張特性

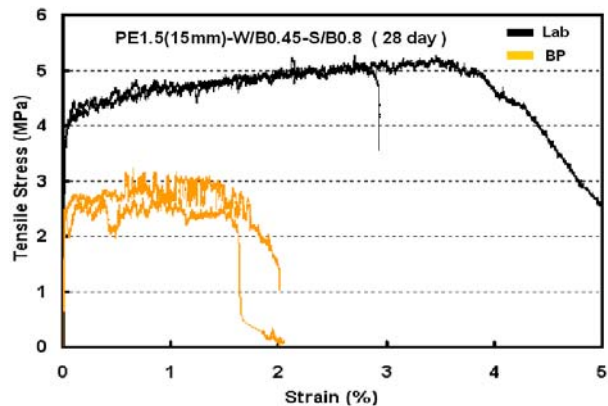
図-6 は SHCC の調合および製造方法による一軸引張性能を評価したものである。いずれも引張強度は実験室で製造した SHCC の方が高かったが、ひずみ硬化性能



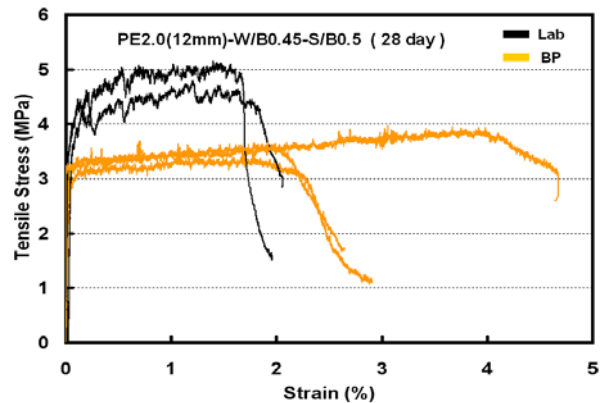
(a) PVA2.0(12mm)-W/B0.45-S/B0.7



(b) PVA2.0(12mm)-W/B0.45-S/B1.0



(c) PE1.5(15mm)-W/B0.45-S/B0.8



(d) PE2.0(12mm)-W/B0.45-S/B0.5

図-6 SHCC の調合および製造方法による引張応力-ひずみ性状

は様々である。PVA-SHCC においては S/B 0.7 の実験室レベルと実機プラントでは引張強度が各々約 5MPa, 約 3 MPa であり, ひずみ硬化性能は各々約 2.5%, 約 2~4%であった。また S/B 1.0 の場合は S/B 0.7 の場合より引張強度は若干低くなり実験室レベルと実機プラントでは引張強度が各々約 4.5MPa, 約 2.5 MPa であり, ひずみ硬化性能は各々約 1.0~1.5%, 約 0.8%で大幅に低くなった。

PE-SHCC においては PE15mmSHCC の場合, 実験室レベルと実機プラントでは引張強度が各々約 5MPa, 約 3MPa であり, ひずみ硬化性能は各々約 3~3.5%, 約 1.3%であった。また PE12mmSHCC の引張強度は実験室レベルと実機プラントで各々5MPa, 3.5~4MPa であり, ひずみ硬化性能は約 1.7%, 2~4%であった。

これにより, 実験室で SHCC を製造した場合には PE15mm の長い繊維を用いた SHCC のひずみ硬化性能が優れたが, 実機プラントで製造した場合には長い繊維の分散が不十分でありひずみ硬化性能が大幅に低下した。

写真-3 は材料的不均質による欠陥の事例を示したものである。実機プラントによる SHCC の大量生産時には繊維が多量混入し, ミキサ効率の影響によって実部材で深刻な欠陥が発生する可能性もある。したがって繊維の長さや混入率, 練混ぜ方法と時間, マトリクスの粘度と流動性, 材料の構成などについて総合的に適切な考慮をしなければならない。

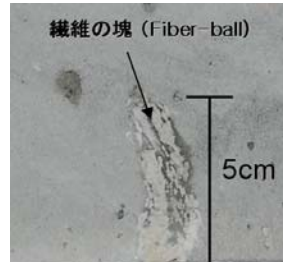
4. まとめ

生コン用の実機プラントと実験室で製造した SHCC の性能を評価した結果, 次のようである。

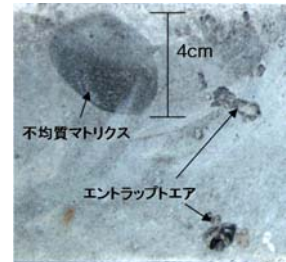
- (1) 多量の繊維を用いる SHCC の練混ぜにおいては同じ 2-Shaft 方式でも小型ミキサより大型ミキサの方が繊維の分散効率が低く練混ぜ時間が長くなり, 流動性が低くなった。
- (2) 実機プラントによって製造した SHCC はいずれの調合において実験室で製造した場合より材料的均質性が不十分であり力学的性能が約 20%以上低くなった。
- (3) SHCC の現場適用のためには繊維の長さや混入率, 練混ぜ方法と時間, マトリクスの粘度と流動性などについて総合的に考慮し適切な材料的均質性を確保しなければならない。
- (4) 実機プラント製造時に空気量の調節が非常に難しく



(a) 練混ぜ後の不均質な繊維の塊



(b) 繊維の塊による硬化後の欠陥事例



(c) 不均質マトリクスとエンラップトエア

写真-3 材料的不均質による欠陥の事例

て, 特に PVA-SHCC の場合は AE 剂量を実験室製造時よりやや減少しても空気量が多くなった原因は明確ではないが, 今後 SHCC の実機プラント生産時の品質管理のための研究が続ける必要である。

謝辞

本研究にご協力を頂いた東北大学の三橋博三先生と BRI の福山洋博士に感謝の意を表します。また, 本研究成果の一部は BK (Brain Korea) 21-2 段階事業と三星物産(株)建設部門のご支援を受けて得られたものでここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 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作る使う, 高靱性セメント複合材料の性能評価と構造利用研究委員会報告書, 2002.01
- 2) Naaman, A.E. and Reinhardt, H. W. : Characterization of High Performance Fiber Reinforced Cement Composites, HPRCC, High Performance Fiber Reinforced Cement Composites 2(HPRCC2), pp1-23, 1996
- 3) Li, V.C. : From Micromechanics to Structural Engineering - The Design of Cementitious Composites for Civil Engineering applications, Journal of Structural Mechanics and Earthquake Engineering, JSCE, No. 471/I-24, pp.1-12, 1993
- 4) Lim, Y. M. and Li, V. C. : Durable Repair of Aged Infrastructures Using Trapping Mechanism of Engineered Cementitious Composites, J. Cement and Concrete Composites, Vol. 19, No. 4, pp. 373-385, 1997
- 5) 小川敦久, 末森壽志, Victor C. Li : ビニロン繊維を用いた高靱性 FRC の流動性に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol. 23, No. 1, pp73-78, 2001