

論文 高靱性繊維補強セメント複合材料の施工性および耐久性に関する実験的検討

閑田徹志^{*1}・永井寛^{*2}・丸田誠^{*3}

要旨：ひずみ硬化型の高靱性セメント系複合材料である ECC では、単位水量が多いことに起因する乾燥収縮ひび割れ、および繊維分散を確保するための高粘度と施工時の良好な流動性の両立が問題となっている。また、ECC の研究は試験室での検討に止まり、実機プラントでの製造については報告がなく、実用化へ向けての大きな課題と考えられる。本研究では、乾燥収縮ひび割れの低減、施工時の流動性の確保、および実機プラントでの性能確保を目指して3つの実験を実施した。実験の結果、ECC は上記の課題をクリアし、実際の部材製造にほぼ問題がない実用化レベルに達していることが明らかとなった。

キーワード：繊維補強、短繊維、靱性、乾燥収縮、耐久性、流動性

1. はじめに

ひずみ硬化型高靱性セメント系複合材料である ECC(Engineered Cementitious Composite)は、高性能ポリマー繊維とモルタルマトリックスの複合効果によって、最大で数パーセントに達する引張ひずみ能力を有する新しい材料である。本材料を耐震部材や補修工法などへ適用することで、これまでにない高い構造部材性能の実現が期待されている¹⁾。

しかし、ECC の実用性については、これまで普遍的な見解を得るに至っておらず、特に乾燥収縮ひび割れおよび施工時の流動性の確保は一般的な普及へ向けて早急に解明すべき課題である。乾燥収縮ひび割れは、ECC の調合が単位水量の非常に多いものとならざるを得ないことに起因しており、単位水量が多いことを前提に解決を図る必要がある。また、ECC の流動性に関しては、繊維分散のための高い粘度と良好な流動性の両立が必要となる。さらには、実際のプラントにおける ECC の製造についてもこれまで検討がなく、実用化への課題となっている。

上記の背景のもと、本研究では高性能ポリマー繊維 PVA による ECC を対象として、収縮抑

制検討実験、流動性向上検討実験、および実大施工実験の3つの実験を実施し、これら実験から、ECC の製造が実用化レベルで可能であり、実部材への適用準備が整っていることを示す。

2. 実験概要

2.1 収縮抑制検討実験

(1) 実験の目的と要因

ECC の調合では、単位水量が通常のコンクリートと比較して2倍程度であり、乾燥収縮によるひび割れの発生が懸念されてきた。筆者らの経験によれば単位水量 300kg/m^3 以下では ECC は実現困難だが、これは ECC が粒径の細かい骨材を使用し、非常に富調合のモルタルを基本としていることによる。収縮抑制検討実験では、大きな単位水量を前提に、乾燥収縮を低減することを目的として実験を実施する。本実験の調合は、膨張材と収縮低減剤を組み合わせ²⁾、大きな単位水量でも収縮が低減可能なものとする。

表-1は、本実験の要因と水準をまとめたものである。実験要因は、単位水量、収縮低減剤の種類、および養生方法で、膨張材量は一定とした。単位水量は、乾燥収縮に大きな影響を与え

*1 鹿島建設(株) 技術研究所 建築生産グループ 上席研究員 Ph.D.(正会員)

*2 鹿島建設(株) 技術研究所 建築構造グループ 主任研究員 工修(正会員)

*3 鹿島建設(株) 技術研究所 建築構造グループ 上席研究員 博士(工学)(正会員)

るため、良好なフレッシュ性状と力学性状を実現する範囲で 360～400kg/m³ の 3 水準に変化させる。また、収縮低減剤種類の影響を把握するため、低級アルコール系から 2 種類を選択した。養生方法は、ECC がプレキャスト部材での供給となる可能性が高いことから、常温 20℃に加え蒸気養生（最高温度 35℃、8 時間）も検討する。

表-2はこれら実験要因の組合せで、全 5 種類の ECC を練混ぜる。また、比較のため、通常のコンクリートも一部実験に加える。

(2) 試験項目および調査

表-2に試験項目を示すが、収縮抑制実験では膨張材が収縮性状に与える影響を把握するため、拘束膨張収縮試験 B 法(JIS A 6202)を行う。また、これと比較して、長さ変化試験(JIS A 1129)も併せて実施する。

また、収縮ひび割れへの抵抗性を把握するため、内部鉄筋による拘束を施した図-1に示す拘束ひび割れ試験を行なう。この試験は、自己収縮応力試験として提案されているもの³⁾を乾燥条件下で行うものである。この実験では埋め込みゲージによる自由膨張収縮の測定も同時に行う。対象調査は表-2中の W385 およびコンクリートとする。コンクリートは、水セメント比 58%、単位水量 185kg/m³ の建築工事用の調査である(20℃封かん 4 週強度 36N/mm²)。これらの試験における試験体数は各 3 体とする。

表-3に ECC 調査の概要を示す。各調査で水結合材比を 46%前後でほぼ一定とし、結合材はセメントのほか質量比で 0.3 相当の JIS II 種フライアッシュを用いる。収縮低減剤は、ASR1 については 20kg/m³ を標準とし、ASR2 は収縮低減効果が ASR1 よりも高いことが予備実験より判明したため 10kg/m³ とした。空気量は AE 剤で調整し、当初 6%程度を標準としたが、単位水量を低減するにつれフレッシュ時の粘性が非常に高くなったためこれを低減すべく単位水量 360kg/m³ では 10%とした。膨張材は細骨材のおよそ 10%を置換し 60kg/m³ を全調査共通で混和する。また、繊維の分散性および材料分離抵抗

表-1 収縮抑制実験の概要

実験要因	水準数	水準
単位水量	3	400, 385, 360 kg/m ³
収縮低減剤種類	2	ASR1, ASR2
養生方法	2	20℃, 蒸気

表-2 実験の要因組合せと試験項目

試験体	単位 水量 (kg/m ³)	収縮 低減剤 種類	養生 方法	試験項目		
				拘束膨張 収縮B法	長さ 変化	拘束 ひび割れ
W400	400	ASR1	20℃	○	○	-
W385	385	ASR1	20℃	○	○	○
W360	360	ASR1	20℃	○	○	-
W360Ad	360	ASR2	20℃	○	-	-
W385S	385	ASR1	蒸気	○	-	-
コンクリート	185	-	20℃	-	-	○

表-3 調査の概要

調査 種類	水結合 材比	単位 水量 (kg/m ³)	細骨材 結合材 比	収縮 低減剤 添加量 (kg/m ³)	繊維混 入体積 比(%)	空気 量(%)
W400	46	400	0.6	20	2	6
W385	46	385	0.8	20	2	6
W360	47	360	0.9	20	2	10
W360Ad	45	360	0.8	10	2	10

1)結合材中のフライアッシュの重量比は0.3一定

2)膨張材は細骨材重量の10%程度を置換

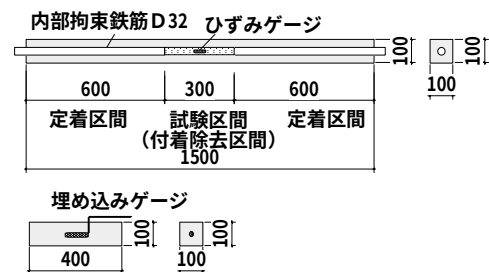


図-1 拘束ひび割れ試験

性を高めるため、全調査共通でセルロース系の増粘剤を 2kg/m³ 加える。使用繊維は PVA で、長さ 12mm、径 0.04mm、引張強度 1690N/mm²、弾性係数 40600N/mm² である。表-4に各試験の養生条件をまとめて示す。

2.2 流動性向上検討実験

(1) 実験の目的と実験要因

前章で述べたように、ECC に対する懸念のひとつは施工性にある。これは、アスペクト比の高い繊維をマトリクス中に分散させるため、フレッシュ時のマトリクスの粘性をある程度高い

レベルで確保しなければならないことに起因する。しかし、粘度を上げることで降伏値も付随して上昇する傾向があり、流動性の確保が難しいという問題があった。ここでは、低い粘度で繊維分散および材料分離抵抗性を確保し、降伏値を同時に下げることにより流動性を確保することを目的として実験を行なう。

表-5に示すように、実験の要因は増粘剤、セメント、フライアッシュの3種類とする。増粘剤は、収縮低減実験で使用したセルロース系、および強いチクソ性を示すバイオサッカライド系とする。セメントは、普通ポルトランドセメント(OPC)のほか、粘性を低減する傾向のある低熱ポルトランドセメント(LPC)を用いる。また、フライアッシュの性能がフレッシュ性状に与える影響も大きいいため、収縮低減実験で用いたFA1の他、FA2について検討する。FA1は強熱減量が0.2%と良質な国内炭による製品、またFA2は国外炭による強熱減量1.6%のものである。本実験では、表-5の要因を組み合わせた表-6に示す全5種類の調合について検討する。

(2) 試験項目および調合

流動性向上実験では、流動性の把握と自己充てん性の付与を試みる。流動性は文献4の漏斗を用いた流下試験方法（以下V漏斗試験）およびスランプフロー試験で、自己充てん性は図-2の充てん装置を用いた間げき通過性充てん性試験⁴⁾（以下充てん性試験）により検討する。充てん性試験は、流動障害R1(D10鉄筋5本)およびR3(鉄筋なし)の2レベルについて行う。

また、調合は、表-3のW385をもとに空気量を10%としたものを標準とする。表-6の各調合は、標準調合からセメント、増粘剤、フライアッシュの種類を変更して練混ぜる。バイオサッカライド系増粘剤の添加量は試練りの結果0.45kg/m³で固定とした。

2.3 実大施工実験

ECCの製造に関して、実機レベルの練混ぜについて報告した例はない。今回、プレキャスト工場で実大施工実験を初めて実施し、実際の製

表-4 養生条件

試験種類	養生種類	脱型前養生	脱型材令(日)	脱型後養生	乾燥開始材令(日)	乾燥条件
拘束膨張収縮試験	20℃	20℃ 80%RH	1	20℃ 水中	7	20℃ 60%RH
	蒸気	*1)35℃ 蒸気養生	1	20℃ 封かん	7	20℃ 60%RH
長さ変化	20℃	20℃ 80%RH	1	20℃ 水中	7	20℃ 60%RH
拘束ひび割れ試験	20℃	20℃ 80%RH	1	20℃ 封かん	7	20℃ 60%RH

*1) 前置4時間、35℃まで2時間で昇温、その後8時間蒸気養生

表-5 流動性向上実験概要

実験要因	水準数	水準
増粘剤種類	2	セルロース系、バイオサッカライド系
セメント種類	2	普通ポルトランド(OPC)、低熱ポルトランド(LPC)
フライアッシュ種類	2	FA1、FA2

表-6 流動性向上検討実験の要因組合せ

調合	セメント種類	増粘剤	フライアッシュ	備考
標準	OPC	セルロース系	FA1	-
LPC	LPC	セルロース系	FA1	セメント種類の影響
BS	OPC	バイオサッカライド系	FA1	増粘剤の影響
LPC+BS	LPC	バイオサッカライド系	FA1	セメント種類+増粘剤種類の影響
LPC+BS+FA	LPC	バイオサッカライド系	FA2	フライアッシュの影響

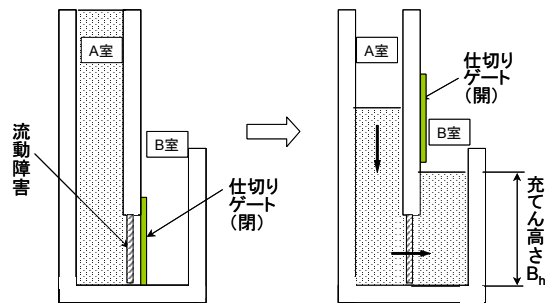


図-2 充てん性試験

造および施工が実用レベルで行えることを示す。

実験は、1m³容量のオムニミキサーを備えるプレキャスト工場で実施し、0.8m³/バッチを計3バッチ練混ぜ、耐震部材を想定した面部材の打設を行う。調合は表-6に示すBSである（ただし、フライアッシュは工場指定の製品を使用）。実験では、流動性向上実験で実施した自己充てん以外のフレッシュ試験、および材齢4週における圧縮および引張試験⁵⁾を行う。材料試験の供試体は、実際の部材製造時と同じく表-4の蒸気養生を行い、その後20℃封かん条件で養生する。さらに、練混ぜた材料を用い、最大で1.7%鉄筋比のかなり密な配筋を有する部材（高さ2400、幅1300、厚さ200mm）を打設し、充て

ん性とこて仕上げ性を確認する。

3. 実験結果および考察

3.1 収縮抑制検討実験の結果

図-3は、拘束膨張収縮試験および長さ変化試験の結果を単位水量の異なる3調合について示している。この図から分かるように、3つの調合とも類似の傾向を示し、長さ変化試験の方が収縮量が多いことがわかる。

図-4は上記2つの試験の結果をまとめたものである。図-4には初期の最大膨張ひずみを示しており、拘束試験における膨張ひずみは、蒸気養生によるW385Sが小さいことを除けば、実験要因によらず300 μ 程度でほぼ一定であることが分かる。W385Sでは、脱型後が封かん養生であり膨張材の水和に不可欠な水分の供給が少なかったことが考えられる。また、長さ変化試験では拘束試験よりも膨張量が大きく拘束の影響を示唆しており、単位水量が大きいほど膨張量が多い傾向が見られる。

また、図-4には材齢6ヶ月における収縮ひずみの値を表しており、拘束試験の値は600~700 μ に分布し、実験要因に顕著な影響を受けないことが分かる。これと比較すると、長さ変化試験の結果は大きく、拘束により収縮が20~30%程度減少している。また、長さ変化試験では、単位水量が大きいほど収縮量も大きくなる傾向が見られる。図-4の拘束試験の収縮結果は、収縮による拘束応力の発生が実験要因によらずほぼ一定であることを意味し、本実験の範囲ではひび割れ抵抗性に与える実験要因の影響は顕著でないと言えることができる。

図-5は拘束ひび割れ試験体の鉄筋に設置したひずみゲージの値をもとに算定した拘束応力履歴の一例である。応力はECCとコンクリートでかなり発現履歴が異なっているが、コンクリートはECCよりも若干早い材齢でひび割れを生じていることが分かる。また、ひび割れが生じた後に注目すると、コンクリートの応力がほとんど0近くまで開放されているのに対して、

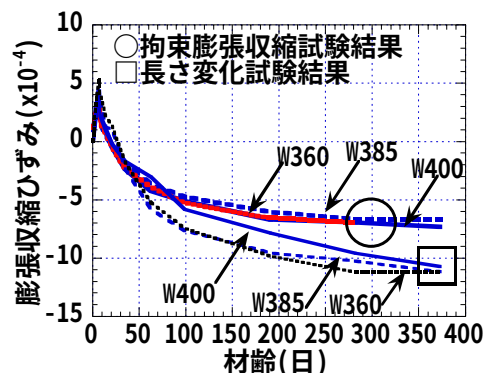


図-3 拘束膨張収縮および長さ変化試験結果

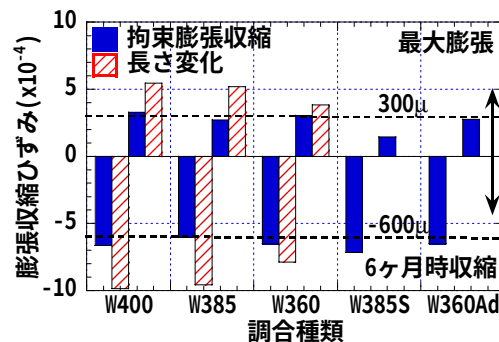


図-4 初期膨張および収縮量の比較

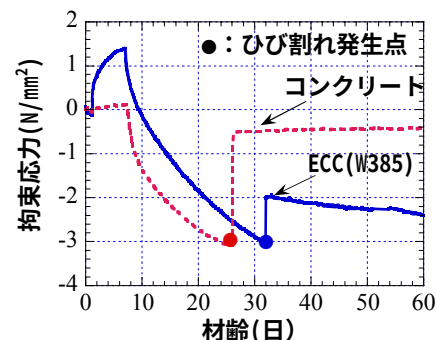


図-5 拘束ひび割れ実験の応力履歴

ECCでは2/3程度の応力が保存されている。これは、コンクリートではひび割れ開口が一気に拡大しひび割れ面で応力の伝達がほとんどないが、ECCでは繊維架橋によりひび割れを拘束し開口を抑制していることを表している。コンクリートの自由収縮ひずみをECCと比較して図-6に一例を示すが、材齢90日程度で650 μ と、一般的に言われている収縮ひずみのレベルであったことが分かる。表-7は、3体の試験結果を平均したもので、ECCの方がひび割れ材齢が若干長く、ひび割れ後のひび割れ幅も約1/5と小さいことから、ECCのひび割れ抵抗性がコンクリートと少なくとも同等か優れているレベルに

あると考えられる。ECC のひび割れ幅が 0.1mm 以下であることは、RC としたときの鉄筋腐食を遅延し、耐久性上有利である可能性が高い。以上の結果から、収縮低減剤と膨張材を組み合わせることで ECC の乾燥収縮ひび割れ抵抗性が問題ない水準となることが分かった。

3.2 流動性向上検討実験の結果

図-7は、V 漏斗通過時間を比較したものである。図から標準の調合では通過時間が他と比較して長く、粘性が大きいことを表している。特に標準の 30 分経過後では、粘性が非常に高くなり、打設が配筋によっては困難となると想定されるほどであった。通過時間は LPC, BS, LPC+BS の順で短くなり粘度が低くなる傾向にあった。図-7中に自己充てん性ランク3（流動障害なし）の通過時間規定値を示すが、この値は分離抵抗性を確保する意味で設定されており、LPC+BS で若干下回る結果となったが、分離は観察されなかったことから、全ての調合でこの値をほぼ満足していると判断される。

図-8はスランプフローの試験結果のまとめで、全ての調合で 500mm 前後の値が練り上がり後と 30 分経過後に得られており、ランク R3 の基準値を満足するかそれに近い結果となった。

図-9は充てん高さ B_h (図-2) の比較である。図から、流動障害 R3 の場合には、バイオサッカライド系増粘剤を用いた BS, LPC+BS, LPC+BS+FA の 3 調合で、練り上がり直後および 30 分後ともランク 3 の基準値である 300mm を超えていることが分かる。以上をまとめると、バイオサッカライド系増粘剤を使用した場合に は粘度が抑制され、自己充てん性ランク 3 もしくはそれに非常に近い性能が付与されると考えられる。

3.3 実大施工実験の結果

本実験で練り混ぜた 3 バッチの結果を表-8 にまとめて示すが、スランプフロー値は 495～550mm、V 漏斗通過時間は 3～4 秒であり、図-7および図-8に示す試験室での値とほぼ同じレベルで流動性に富むフレッシュ性状となった。

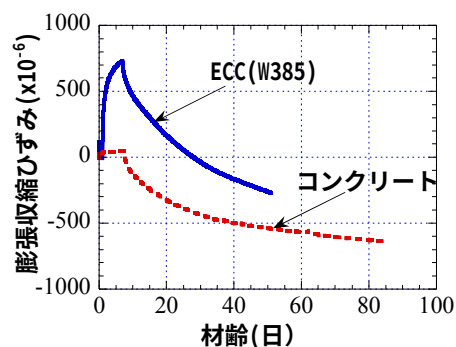


図-6 自由膨張収縮の結果

表-7 拘束ひび割れ実験の結果まとめ

	ECC	コンクリート
ひび割れ材齢 (日)	37.4	26.7
ひび割れ応力 (N/mm ²)	3.23	2.95
ひび割れ開口幅(材齢90日) (mm)	0.06	0.37

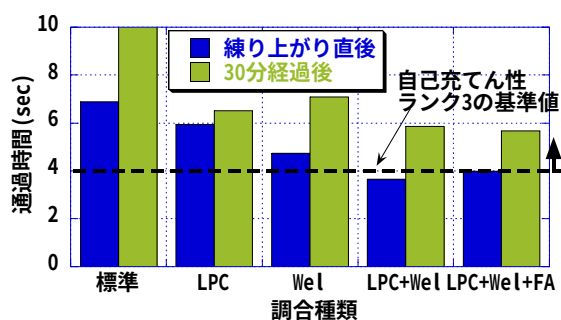


図-7 V 漏斗通過時間の比較

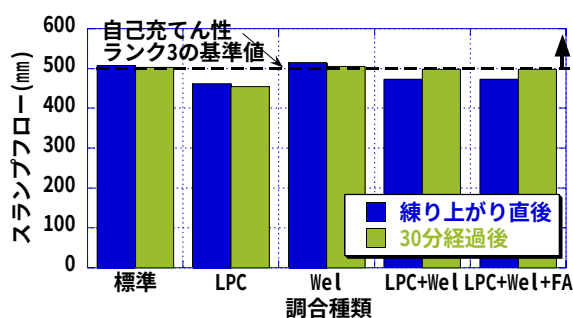


図-8 スランプフローの比較

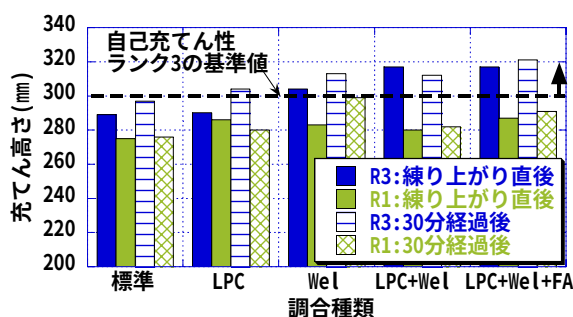


図-9 充てん高さの比較

図-10はスランプフロー試験結果の一例である。ただし、空気量については $10 \pm 2.5\%$ を目標として AE 剤を添加したが、最初のバッチで AE 剤の添加量が少な過ぎ目標よりも低い値となった。高い精度で空気量を管理するためにはさらに実績データを積み上げる必要がある。

また、部材の打設を行った結果、図-10から示唆される流動性に富むフレッシュ性状により問題なく施工が可能であった。こて仕上げに関しても左官の慣れは必要であるが、通常のコンクリートと同様に可能であることが分かった。

図-11は引張試験結果の一例であるが、これまで報告されている試験室での練混ぜの結果と同様に 3%程度の大きな引張ひずみに耐えることが示されている。また表-8には材料力学試験の結果をまとめて示すが（引張は 4~10 本、圧縮は 3 本の供試体の平均）、この表からも各バッチで ECC の特徴である大きな引張ひずみ抵抗が発揮されていることが分かる。

5. まとめ

本研究では実験の結果次のような結論を得た。

- (1)単位水量が多い ECC でも、混和材料の組合せにより収縮ひび割れ抵抗性を通常のコンクリートと同等以上に高めることが可能で、収縮ひび割れが発生した場合でも、ひび割れ幅を 0.1mm以下の微小な範囲に抑制できる。
- (2)バイオサッカライド系増粘剤を使用することにより、適度な材料分離抵抗性に加え自己充てん性を付与した ECC が力学性状を損なうことなく実現可能である。
- (3)実機プラントによる練混ぜであっても、力学性能および流動性の高い ECC を試験室と同様に実現することが可能で、空気量の管理を除き、部材製造にほぼ問題がない。

謝辞 本研究を遂行するにあたり太平洋セメント（株）富田六郎博士には貴重なご助言を頂戴した。また、（株）クラレには材料の提供を賜った。記して謝意を表する。

表-8 実大施工実験結果のまとめ

バッチ	フレッシュ			引張試験		圧縮試験	
	V漏斗通過時間(秒)	スランプフロー(mm)	空気量(%)	引張強度 σ_{cu} (MPa)	終局ひずみ ϵ_{cu} (%)	圧縮強度 σ_c (MPa)	弾性係数 E_c (GPa)
BS1	3.20	495	6.0	5.14	2.90	-	-
BS2	3.00	550	10.5	4.57	3.00	31.5	14.2
BS3	3.80	550	12.0	4.06	3.08	27.5	12.7

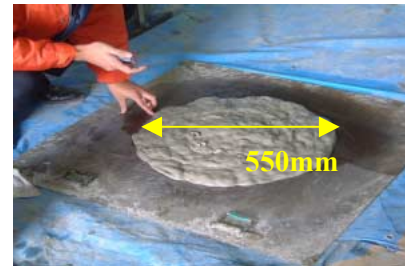


図-10 実大施工実験のスランプフロー

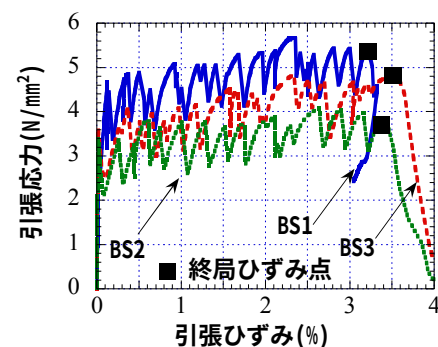


図-11 引張試験結果の一例

参考文献

- 1) コンクリート工学協会：高靱性セメント複合材料に関する技術の現状と将来，2002.1
- 2) 富田六郎他：収縮低減剤を用いたコンクリートの乾燥収縮およびひびわれに関する実験研究，第5回コンクリート工学年次講演会講演論文集，pp.181-184，1983
- 3) コンクリート工学協会：自己収縮研究委員会報告書，pp.199-201，1996.11
- 4) 土木学会：高流動コンクリート施工指針，pp.153-164，1998
- 5) 関田徹志他：PVA 繊維を用いた高靱性 FRC による吹付け補修材料の基礎的特性，コンクリート工学年次論文集，Vol.23，No.1，pp.475-480，2001