

曲げ試験を用いた高靱性複合材料ECCの引張力学性能管理に関する実験的検討

Experimental Investigation for ECC Tensile Property Quality Control Using a Flexural Test

閑 田 徹 志 金久保 利 之¹⁾
永 井 覚 丸 田 誠

要 約

ひずみ硬化型の高靱性セメント系複合材料である 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少なく、実用化へ向けての大きな課題と考えられる。本研究では、全 15 バッチの実機練り混ぜ実験を実施し、フレッシュ試験および力学試験を実施した。その結果、本研究で対象とした調合による ECC は、高いフレッシュ性能および力学性能を安定して実現できることが明らかとなった。また、力学性能については、圧縮および引張性能の信頼性について検討し、構造設計に供する材料基準性能値に関する貴重な知見を得るとともに、実際の製造における曲げ試験を用いた引張性能管理方法について検討したのでここに報告する。

目 次

- I. はじめに
- II. 実験計画
- III. 曲げ試験による引張性能の推定方法
- IV. 実験結果
- V. 考 察
- VI. おわりに

I. 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 については、これまで多くの研究成果が国内外で発表されているが、それらの研究は実験室レベルにとどまり、実際のプラントにおける ECC の製造技術についてはこれまで検討例が非常に少ない。また、この製造技術に関連し、ECC 部材を設計するにあたり不可欠な材料基準性能値、例えば設計基準圧縮強度や設計基準引張強度をどのように設定し、実際の製造でいかに材料管理を行うかについてはこれまで詳細な検討がなされていないのが現状である。これらの問題は実用化への大きな課題となっており、早急に解決を図る必要がある。

上記のような背景のもと、本研究では高性能ポリマー繊維 PVA による自己充てん型 ECC を対象として実大製造実験を実施し、これら実験から実機プラントにおける ECC のフレッシュ性能および力学性能が高い信頼性で確保でき、かつ簡便な試験により引張性能の品質

管理が可能であることを示す。圧縮および引張性能について統計的な検討を加え、実際の ECC 部材の構造設計に不可欠な設計基準性能値の設定に関して得られた知見を報告する。特に、引張性能については 2 種類の引張試験を実施し、それぞれの試験の特性について論じ、これと比較することで曲げ試験による部材製造時の引張性能の品質管理方法の適用性について報告する。

II. 実験計画

1. 実験の目的と要因

ECC の製造に関し、実機レベルの練混ぜについて報告した例として文献 2) があるが、ここでは、プレキャスト工場による実機製造実験をより大きな規模で実施し、実際の製造における品質確保に関する知見を得ることを目的とする。

実験要因と水準を Table 1 に、また各要因の水準の組合せを Table 2 に示す。実験は、1m³若しくは 0.5m³容量のオムニミキサーを備える二つのプレキャスト工場で実施し、それぞれ 0.8m³および 0.4m³/バッチを Table 2 にあるように計 15 バッチ練混ぜ、フレッシュ性能および力学性能試験を実施する。実験では、セメント種類、製造時の環境温度(工場内室温)、プレキャスト工場を変化させて練り混ぜ製造を実施する。セメント種類としては、普通ポルトランドセメント(以下 OPC)および中熱ポルトランドセメント(以下 MPC)の 2 種類を採用する。中心となるのは OPC であるが、夏季高温時における流動性の低下へ対応するため、MPC についても検討を行う。環境温度は、製造時期による品質の影響を把握するための実験要因である。この要因の水準を実現するため、春季(5月, 17~20℃)および冬季(11月, 9~16℃)の温度で実験を 2 回に分けて実施する。使用する工場は、先に述べたようにオムニミキサーを備えるそれぞれ関東地方と東海地方に位置する二つであり(以下工場 1 および工場 2 と

1) 筑波大学 機能工学系

キーワード: 繊維補強, 引張, プレキャスト, 高靱性

Table 1 Experimental Parameter

Experimental parameter	Level
Cement type	Ordinary Portland cement Moderate-heat Portland cement
Ambient temperature	Spring (17-20 deg.) Winter (9-16 deg.)
Manufacturer	Plant#1 Plant#2

Table 2 Combination of Experimental Parameter

Exp. Parameter			Mix	Testing item					
Plant	Ambient temp.	Cement type		Fresh test	Comp. test	TC test	TP test	Flexura test	
P1	Spring	OPC	P1N1	done	-	done	done	-	
			P1N2	done	done	done	-	-	
			P1N3	done	done	done	-	-	
			P1N4	done	done	done	-	-	
			P1N5	done	done	done	-	-	
		MPC	P1M1	done	done	done	-	-	
			P1M2	done	done	done	-	-	
		Winter	OPC	P1N6	done	done	done	done	done
				P1N7	done	done	done	done	done
			MPC	P1M3	done	done	done	done	done
P1M4	done			done	done	done	done		
P2	Spring	OPC	P2N1	done	done	done	-	-	
		MPC	P2M1	done	done	done	-	-	
			P2M2	done	done	done	done	done	
			P2M3	done	done	done	done	done	
			P2M4	done	done	done	done	done	

称する), 主要な材料であるセメント, 骨材, フライアッシュはそれぞれの工場でロットや製造メーカーが異なる。セメントについては, 同一メーカー品であるが, 工場の立地の違いからロットが大きく異なることが考えられる。フライアッシュは, JIS2種の範囲のもので工場常備品を使用した, 出荷する火力発電所が異なるためその性質はかなり相違していることが予想される。また, 骨材についても産地が異なっていることがわかっている。さらに, 空気量については, 製造時に管理可能な範囲を把握しフレッシュ性能や力学性能への影響を明らかにするため, 調査上の目標空気量を10%に設定するが, 空気量のばらつきの影響を把握するため, 練りあがり空気量が6%から14%の間となるようにAE剤の量で調整することとする。

2. 調 合

本研究で用いる調合についてTable 3に示す。この表のうちN調合は文献2)に準拠しており, M調合はN調合のセメントを中層熟で置き換えたものである。これらでは, 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CSA系の膨張材と低級アルコール系の収縮低減剤を混和してある。また, 流動性と繊維分散性を両立させるため, バイオサッカライド系の増粘剤を添加する。使用する繊維はPVAで, 長さ12mm, 径0.04mm, 引張強度1690 MPa, 弾性係数40600 MPaである。

3. 試験項目

Table 4は試験項目の一覧である。この表にあるように, 試験はフレッシュ性能試験, 圧縮試験, 一軸引張試験(以下, 引張試験と称する), および曲げ試験からなる。前者二つはJISに定められた標準試験に準拠するが, 引張試験は標準方法がないため, 既提案の方法から2種類選定して実施する。また, 曲げ試験については, 標準

Table 3 Mix Proportion

Mix	Water by binder ratio	Unit water (kg/m ³)	Sand by binder ratio	Anti-shrinkage agent (kg/m ³)	Fiber volume fraction (%)	Air content (%)
Mix-N	0.46	364	0.64	15	2	10
Mix-M	0.46	364	0.65	15	2	10

1) Fly ash is added by 0.3 of binder weight

2) Expansive agent replaces sand weight by 10%.

Table 4 Testing Item

Test	Property	Testing method
Fresh test	Fresh temperature	-
	Specific gravity	JIS A 1116
	Air content	JIS A 1128
	Slump	JIS A 1101
	Slump flow	JIS A 1150
Compression test	Compressive strength	JIS A 1108
	Elastic modulus	JIS A 1149
Tensile test	Tensile strength and strain capacity	Tensile-coupon (TC)
	Tensile strength and strain capacity	Tensile-prism (TP)
Flexural test	Flexural strength and curvature capacity	Modified JSCE-G552-1999

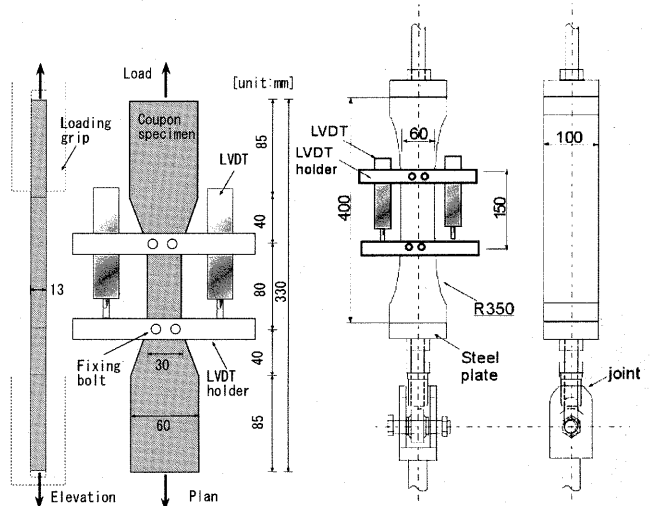


Fig. 1 Tensile Coupon Test Fig. 2 Tensile Prism Test

的な方法を改良して用いる。フレッシュ試験は練り上がり直後に行い, また, 圧縮供試体および引張供試体は, 練り上がり後に蒸気養生(最高温度35℃, 8時間)を経て, その後20℃封かんで養生し材齢28日で試験に供する。

2種類の引張試験はそれぞれ特徴がある。Table 4のTC引張試験³⁾とは, Fig. 1に示す板状の供試体をピン-固定の境界条件で試験するもので, 空気圧による把持治具により供試体を直接固定して引張载荷する。この方法は, 比較的容易に試験実施ができ, 限られた時間内に多数の供試体の試験が可能で, これまで多くの試験結果の蓄積がある。しかし, 供試体の固定時に载荷軸と供試体の中心軸を精密に一致させることが必ずしも容易でなく, 供試体間の試験結果のばらつきが比較的大きいことがこれまでの経験からわかっている。また, 供試体の断面が板状で小さいことから, 繊維配向が2次元に

近い状態へと移行し易いことが想定され、引張性能を過大に評価する傾向が指摘されている。

TC 引張試験の短所を改善すべく提案されたのが、Table 4 の TP 引張試験⁴⁾である。Fig. 2 からわかるように、この試験ではより大きな $60 \times 100 \text{ mm}$ の断面を有する供試体を用いて、繊維配向の影響を排除することを意図してあり（詳細は文献 4 参照）、より高い精度で構造体中の ECC の引張性能を再現することが可能と考えられる。この試験は、TC 試験と同じくピン-固定の境界条件を採っているが、供試体に接着したプレートにねじ固定した鋼棒を油圧荷重試験機で直接把持する方式とし、荷重軸の偏心が生じにくい方法としている。しかし、TP 試験は、供試体が TC 試験の場合よりも大きく、供試体のセットアップなど試験実施に時間を要することから、例えば実際の ECC 部材の製造および施工に伴う品質管理試験として用いることには無理がある。本研究では、これら特徴の異なる二つの引張試験により得られた結果を用いて簡単な統計処理を行い、実際の部材製造時に確保可能な ECC 引張性能を把握することを目指す。

本研究では、これらの引張試験結果から、引張性能を引張強度と終局引張ひずみの二つの特性値で表すこととした。引張強度は試験における最大応力値で、終局ひずみはひずみの伸びに対して応力が連続的に減少する直前の点で表す。各バッチとも 5 体以上の供試体の試験を実施し、最大値と最小値を除いた最低 3 体のデータで分析を実施することを原則とした。

曲げ試験は、Table 4 に示すように、土木学会の JSCE-G552-1999 を改良した方法を用いる。Fig. 3 は試験方法の概要で、 $100 \times 100 \times 400 \text{ mm}$ の供試体を用い、3 等分点荷重により試験を行う。試験では、JSCE-G552-1999 に規定される供試体の垂直変位の代わりに、中央の曲げ区間幅 100 mm のひずみを断面の 2 箇所で計測して、そのひずみ分布から曲率を算定し荷重との関係を記録することとする。

III. 曲げ試験による引張性能の推定方法

本研究では、曲げ試験を部材製造時の引張性能の品質管理に用いることを目指し、曲げ試験結果による引張性能の推定方法について検討する。ここで採用する推定方法は、文献 5) により提案されたもので、以下の式により曲げ試験から得られたモーメント-曲率曲線の最大モーメントに対応する点の値から終局引張ひずみ ϵ_u と引張強度 $\sigma_{\max}$ を推定しようとするものである。

$$\sigma_{\max} = \alpha_s \times \frac{E \cdot \phi_u \cdot D \cdot x_{n1}^2}{2 \cdot (1 - x_{n1})} \quad (1)$$

$$\epsilon_u = \alpha_e \times \phi_u \cdot D \cdot (1 - x_{n1}) \quad (2)$$

ここに D = 断面のせい (mm)、 E = ECC の弾性係数 (N/mm^2)、 ϕ_u = 試験から求めた最大モーメント時の曲率、 α_s および α_e = それぞれ強度および終局ひずみの換算係数である。 x_{n1} は計測された荷重と曲率の関係より求められる方程式の解で、次の (3) および (4) 式を解くことにより求められる。(3) 式中の $m_{\max}$ は試験から求めた最大モーメントである。

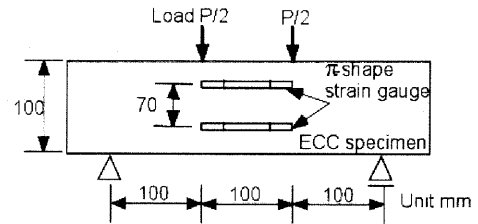


Fig. 3 Flexural Test

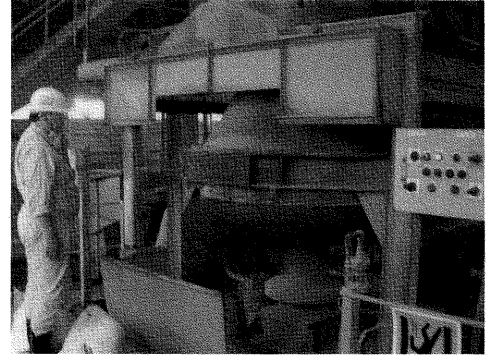


Photo 1 Example of Omuni-Mixer

$$m^* \equiv \frac{m_{\max}}{E \cdot \phi_u \cdot D} = \frac{x_{n1}^3}{3} + \frac{x_{n1}^2(1 - x_{n1})}{4} \quad (3)$$

$$x_{n1}^3 + 3x_{n1}^2 - 12m^* = 0 \quad (4)$$

(1)～(4)式による推定は、Fig. 4 に表すひずみと応力の分布が曲げ供試体断面に生じているとの仮定に基づき導出されている⁴⁾。即ち、圧縮応力は三角形分布、引張応力は一様分布にモデル化してある。このような引張ひずみ分布とするために、ECC の応力-ひずみ曲線は完全弾塑性型の挙動をすることを仮定している。

ここで、 α_s および α_e の値は、対象とする材料の特性、曲げ試験の寸法および荷重条件に依存して変化することに注意が必要である。この依存性は、引張性能が本質的には材料特性と考えることができるのに対し、曲げ性能が荷重条件や供試体の寸法に大きな影響を受ける構造性能であることに依存する⁶⁾。したがって、曲げ試験結果をもとにした引張性能の推定は、対象とする材料および曲げ試験の条件を限定した上で行うことが必要であり、これら条件に応じて α_s および α_e の値が変化することになる。現状では、 α_s および α_e の値を理論的に導くことができる技術レベルになく、実験定数的に扱うことが現実的である。本研究では、これらの値について、曲げ試験結果と引張試験結果を比較することで明らかにすることを目指す。

IV. 実験結果

1. 練混ぜおよびフレッシュ性状

実験における練混ぜは Photo 1 に示すオムニミキサーを用いて行い、Table 5 に表すフレッシュ性能を得た。同表にあるように、空気量は当初の想定管理範囲である 6% から 14% に分布した。スランブフローは概ね 500 mm 以上を確保して非常に良好な流動性を発揮し、目視による繊維分散性の確認においても問題なく製造を行うことが

Table 5 Fresh Property

Mix	Mixing vol. (m ³)	Fresh temp. (deg C)	Specific gravity (kg/m ³)	Air cont. (%)	Slump (cm)	Slump flow (cm)
P1N1	0.5	28.0	1870	6.0	23.5	49.5
P1N2	0.5	31.7	1793	10.5	25.5	55.0
P1N3	0.8	31.8	1752	12.0	25.0	55.0
P1N4	0.8	30.9	1789	11.0	24.5	51.5
P1N5	0.8	28.0	1890	6.0	-	54.0
P1M1	0.8	31.6	1868	7.8	25.0	55.0
P1M2	0.8	32.0	1772	12.0	-	45.5
P1N6	0.8	28.0	1788	13.5	25.0	45.5
P1N7	0.8	32.0	1866	8.8	26.5	53.0
P1M3	0.8	30.0	1808	14.0	27.0	57.0
P1M4	0.8	31.0	1824	10.5	27.5	56.0
P2N1	0.4	23.9	1845	9.1	22.0	39.0
P2M1	0.4	23.5	1783	10.5	25.0	49.5
P2M2	0.4	25.1	1757	12.9	25.0	51.0
P2M3	0.4	25.9	1767	12.5	25.0	51.0

Table 6 Mechanical Property

Mix	Comp. Test		TC test		TP test		Flexural test	
	Comp. strength (MPa)	Elastic modulus (GPa)	Ultimate tensile strain (%)	Tensile strength (MPa)	Ultimate tensile strain (%)	Tensile strength (MPa)	Ultimate curvature (10 ⁻⁴ /mm)	Modulus of rupture (MPa)
P1N1	-	-	2.90	5.14	1.18	2.76	-	-
P1N2	31.5	14.2	3.00	4.57	-	-	-	-
P1N3	27.5	12.7	3.08	4.06	-	-	-	-
P1N4	33.4	15.2	2.49	4.89	-	-	-	-
P1N5	37.4	16.7	2.45	5.19	-	-	-	-
P1M1	31.5	15.0	1.96	4.00	-	-	-	-
P1M2	27.9	13.9	3.29	3.93	-	-	-	-
P1N6	31.6	14.3	3.17	3.95	1.65	3.63	319	13.6
P1N7	36.6	17.2	2.55	4.51	1.60	3.56	249	14.1
P1M3	30.4	14.4	2.51	3.40	1.98	3.69	297	13.0
P1M4	32.0	15.2	3.80	4.01	2.10	3.60	344	13.8
P2N1	28.1	14.3	2.05	4.34	-	-	-	-
P2M1	24.7	12.3	3.68	3.93	-	-	-	-
P2M2	24.0	12.3	3.96	4.00	2.22	3.94	370	12.0
P2M3	24.6	12.6	4.34	3.96	2.59	3.27	382	13.5

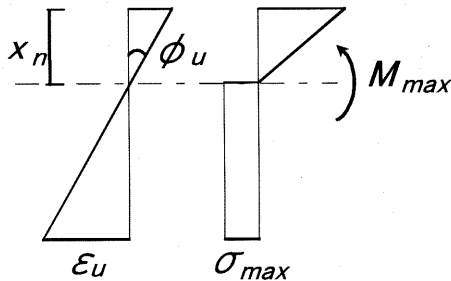
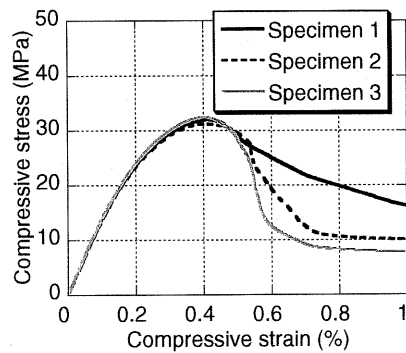
Fig. 4 Assumption of Strain Distribution in Flexural Specimen Section
(left: strain distribution, right: stress distribution)

Fig. 5 Compressive Stress-Strain



Photo 2 Slump Flow of ECC

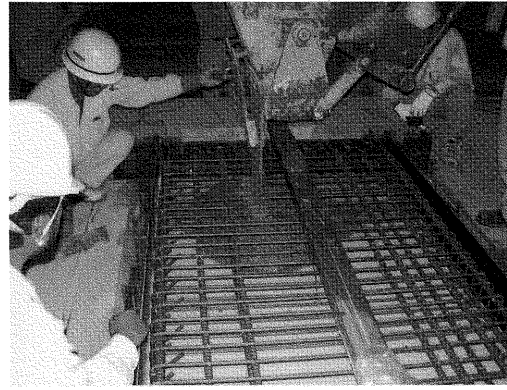


Photo 3 Casting ECC in Form Work

できた。Photo 2 はスランプフロー試験状況の例であり、大きなフロー値となっていることが見て取れる。また、Photo 3 は型枠への充てん状況で、パイププレートによる振動なしに型枠中を充てんしていく状況が分かる。また、空気量の違いによる流動性の変化は認められなかったことから、本実験の範囲のようにある程度大きく空気量が変動しても少なくとも流動性および繊維分散性への影響は少ないと言える。

練り混ぜ時の外気温およびセメント種類については、本研究の範囲ではこれら要因の影響が小さい結果となった。これは、冬季に使用した練り混ぜ水の温度を 30℃程度まで温めて使用したことの影

響が大きいと考えられ、結果として練り混ぜ後のフレッシュ温度は春季と冬季で大差ないものとなった。このため、流動性および繊維分散性についてもほとんど両者の違いは確認できなかった。本実験のように、練混ぜ水の温度を調整し、練上がり温度を制御すれば安定したフレッシュ性状および硬化後の性状が得られることが確認された。しかし、本実験では検討を行わなかった外気温が 30℃を超えるような夏季の条件では、N 調合の流動性が低下することが予想され、この場合には M 調合が有利となる可能性がある。

製造するプレキャスト工場についてはフレッシュ性状への影響が比較的大きい結果となった。工場 2 の N 調合については、Table 5 に

Table 7 Effect of Experimental Parameter

Property		Ambient temp.		Cement type		Manufacturer	
		Spring	Winter	Mix-N	Mix-M	P1	P2
Compressive strength	(MPa)	32.4	34.1	33.0	30.4	33.0	24.4
Elastic modulus	(GPa)	14.7	15.8	15.1	14.6	15.1	12.4
Ultimate tensile strain (TC test)	(%)	2.88	2.86	2.88	2.93	2.88	3.99
Tensile strength (TC test)	(MPa)	4.57	4.23	4.49	3.81	4.49	3.96

あるように、スランプフローが500mm以下となり、ほかのバッチと比較して流動性に大きく劣る結果となった。M調合については、工場2でもフレッシュ性状が工場1と比較して大きく異なることはなく、現状ではN調合の流動性低下の原因は特定されていないが、通常のコンクリートと同様に、工場間の変動はECCでも大きく、事前の試練りは不可欠と考えられる。

2. 力学性能

Table 6 は材料試験結果の一覧で、圧縮試験から得られた圧縮強度と弾性係数の平均が示してある。これら圧縮試験データは、3本の供試体の平均である。Fig. 5には圧縮試験で得られた応力-ひずみ曲線の例(P1N6)を示す。Table 6によれば、圧縮強度は24.0~37.4 MPa、弾性係数は12.3~17.2 GPaの範囲に分布しており、比較的バッチ間の変動が大きい。また、Fig. 5からは、圧縮応力がピークに達した後もひずみの伸びに対する応力の低減が通常のコンクリートに比べて緩やかで、高い靱性を示唆する挙動がわかる。

Fig. 6, Fig. 7は、それぞれTC試験、TP試験による引張応力-ひずみ試験結果の一例である(P1N6)。両試験の結果とも、ひずみが大きく進展しながら応力が漸増する擬似ひずみ硬化型の引張挙動を明確に示していることがわかる。Table 6にはバッチごとの引張試験特性値の平均をまとめて示した。全体として、TC試験による値の方がTP試験の場合と比較して大きな特性値を示す傾向が見て取れる。

Fig. 8は曲げ試験の結果であり、曲げ応力と曲率の関係で示してある。この図から、曲げ試験においても、初期の弾性的な挙動の範囲から、初期ひび割れによる剛性の低下を経て、大きな曲率まで荷重抵抗を維持しており、いわゆるたわみ硬化性の挙動となっていることがわかる。

V. 考察

1. 環境温度、セメント種類、およびプレキャスト工場の影響

Table 7は、力学性能に与える環境温度、セメント種類、プレキャスト工場の影響をそれぞれ表したものである。表中の力学特性値は、それぞれの要因に該当する供試体のデータを全平均した値で示した。Table 7からわかるように、環境温度の影響は小さく、本研究による温度範囲程度で練上り温度を制御する条件では安定した力学性能を発揮するといえる。

セメント種類の影響については、Table 7からOPCによるN調合の方が圧縮および引張とも強度は10~15%程度M調合よりも高いことがわかる。これは、MPCがOPCと比較して水和速度が遅いことに起因すると考えられ妥当な結果といえる。しかし、終局引張ひずみに与えるセメント種類の影響は本研究の範囲では小さいことがわか

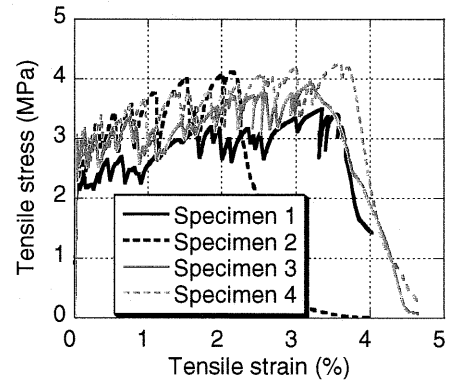


Fig. 6 Tensile Stress-Strain Profile in TC Test

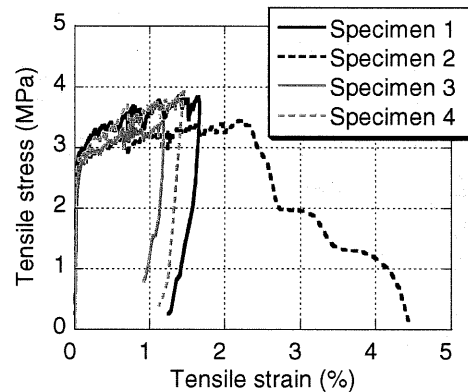


Fig. 7 Tensile Stress-Strain Profile in TP Test

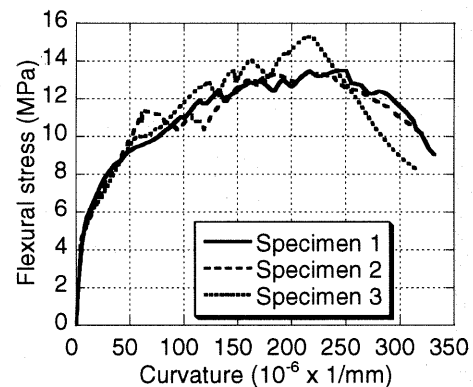


Fig. 8 Flexural Test Result

る。

プレキャスト工場が力学性能に与える影響は比較的大きいことがTable 7からわかる。P1工場と比較してP2工場のECCは圧縮強度、弾性係数、引張り強度がそれぞれ20~30%小さい。これらのことからモルタルマトリクスの破壊靱性がP2工場では小さくなると考えられ、終局ひずみはP2工場の方が大きくなる実験結果には妥当性がある。これら工場間の差異の原因は本実験の範囲では明らかでないが、使用したフライアッシュの反応活性度の違いが要因のひとつとも考えられる。

2. 空気量のばらつきの影響

(1) 圧縮性能に与える空気量の影響

Fig. 9およびFig. 10は、空気量の変動が圧縮性能に及ぼす影響をN調合およびM調合についてそれぞれ示したものである。両図と

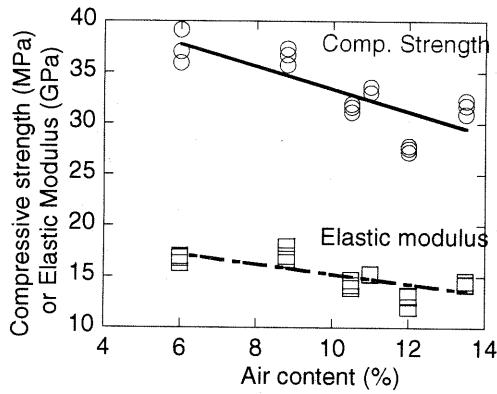


Fig. 9 Effect of Air Content on Compressive Strength (Mix-N)

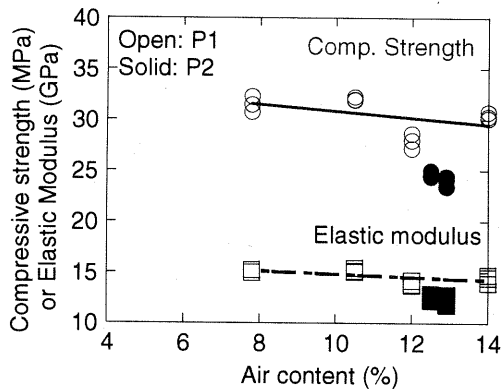


Fig. 10 Effect of Air Content on Compressive Strength (Mix-M)

も、空気量が増加するに従い圧縮強度が減少する傾向を表しているが、その割合は N 調合で空気 1% に対して 1 MPa、M 調合で同じく 0.3 MPa 程度で、空気量 10% を例にとれば空気量 1% に対して圧縮強度が 1~3% 程度変動することを示している。これは、コンクリートで一般に言われている 5% に対して半分程度以下と低い。

上記を勘案すれば、設計基準圧縮強度を確保するための品質管理について、ECC の場合にはコンクリートと比較してより緩やかな空気量の範囲を許容することも可能と考えられる。これは、空気を含むペースト分の割合が ECC 調合の場合にはコンクリートと比較して体積比で 2 倍程度であるためと考えられ、空気量の変動に対して ECC の方がより鈍感な反応を示すためと考えられる。

また、今回の実験における $10 \pm 4\%$ の範囲で練り混ぜ時の空気量を管理した場合、日本建築学会 JASS 5 と同じ期待値から標準偏差の 1.73 倍を差し引くことで得られる、4% の不良率を許容した最小限界値は N 調合で 27 MPa、M 調合 27.5 MPa を確保可能であり、これらの値を設計基準圧縮強度として ECC 部材設計に供することが可能と考えられる。

また、弾性係数の変動は、空気量の増減 1% に対して N 調合で 1~2% 程度であり、圧縮強度に対する影響よりもさらに小さいことが Fig. 9 および Fig. 10 からわかる。

(2) 引張性能に与える空気量の影響

Fig. 11 および Fig. 12 は、TC 試験における結果から、終局引張ひずみと引張強度に及ぼす空気量の影響を示したものである。Fig. 11 から空気量が増えるほど終局引張ひずみが増加する傾向があり、

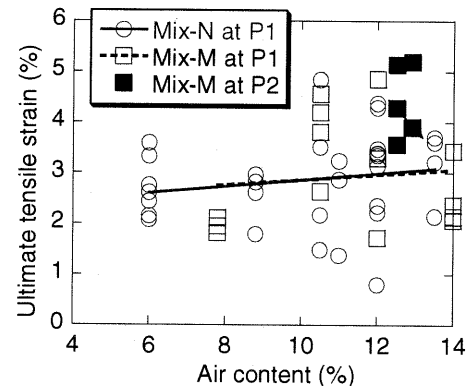


Fig. 11 Effect of Air Content on Ultimate Strain Capacity

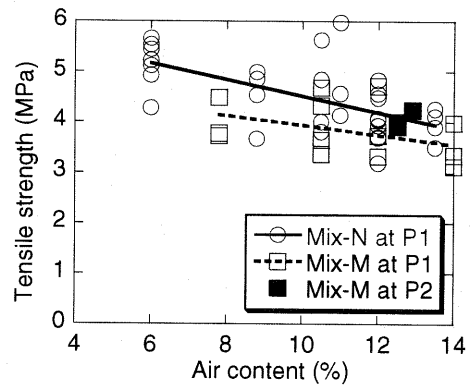


Fig. 12 Effect of Air Content on Tensile Strength

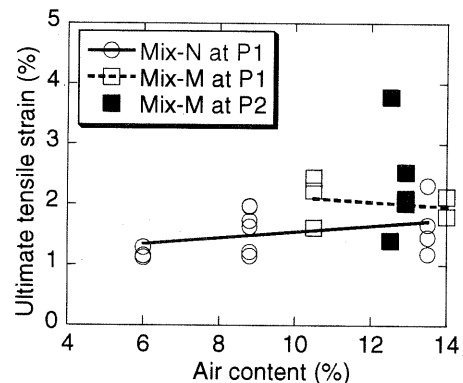


Fig. 13 Effect of Air Content on Ultimate Strain Capacity (TP Test)

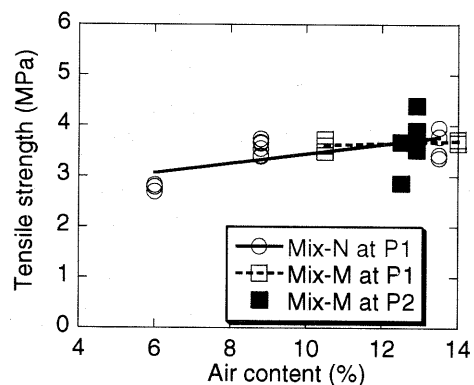


Fig. 14 Effect of Air Content on Tensile Strength (TP Test)

また Fig. 12 から引張強度は減少する傾向が見て取れる。しかし、終局引張ひずみは供試体間のばらつきが変動係数 (COV) にして 30% 以上と大きく、さらには空気量との相関は相関係数 R で 0.2 以下と弱いため、空気量の影響は無視できる程度と言える。これに対して、引張強度では変動係数は 15% 程度とひずみと比較して小さくなっており、空気量との相関係数も 0.4~0.6 であり、空気量の影響をやや受けることがわかる。

Fig. 13 と Fig. 14 には TP 試験による結果をまとめている。Fig. 13 の終局引張ひずみについては、TC 試験と同様に空気量との相関が低く、影響は少ないことがわかる。また、Fig. 14 の引張強度では、空気量と相関があるが、この試験法の場合は空気量の増加に対して正の相関があり TP 試験の結果と反対の結果となった。この原因は不明であるが、相関がやや弱いこともあり、引張強度に及ぼす空気量の影響は無視できる程度であるということもできる。

(3) 引張性能の信頼区間下限値

Fig. 15 には、TC 試験および TP 試験における引張性能の統計値を示した。図中のデータから、終局ひずみおよび引張強度とも平均値では TC 試験の方が TP 試験の場合よりも大きく、ひずみで 1.5 倍、強度で 1.3 倍程度の値を示していることがわかる。これは、TC 試験の供試体の方が小さい断面を有しており、寸法効果が現れるとともに、先に述べた繊維配向性の影響が考えられる。また、Fig. 15 からは標準偏差についても TC 試験の方が大きいことがわかる。この結果は、TC 試験では空気圧によるグリップで直接供試体を把持するが、その際に供試体の偏心を排除することが必ずしも容易ではないのに対して、TP 試験では位置決めが精密に行えることが原因と考えられる。

(4) 材料引張性能の設計基準値

Fig. 16 および Fig. 17 は ECC 部材内での挙動に近いと想定される TP 試験による結果をまとめたものであり、これらの図から構造設計に使用する特性値である設計基準引張強度および設計基準終局引張ひずみを設定することができる。Fig. 16 は終局引張ひずみについて示しており、工場 1 における N 調査と M 調査、および工場 2 での M 調査の合計 3 調査について、4% 不良率を許容した最小限界値を表している。この図から、各調査とも概ね 1% 程度を最小限界値として取れることが考えられる。また、Fig. 17 は同じく引張強度について表したもので、概ね 3 MPa 程度が各調査とも最小限界値となっている。最小限界値は、保証可能な材料性能を表すと考えられるから、本研究で対象とした ECC の場合、終局引張ひずみで 1%、引張強度で 3 MPa 程度が設計基準値として設定可能といえる。

(5) 材料引張性能の品質管理

上記のような設計引張基準値を材料性能として満たしていることを部材製造時に確認し管理する方法としては、現状では二つの選択があると考えられる。第一は、TC 試験を用いる方法である。実際に、今回の実験では、TC 試験の場合 1 時間あたり 6 本程度の試験が可能で、TP 試験においては 1 日に 6 本が限界であった。これらのことから、大きな労力を要する TP 試験を品質管理に用いることは適当でなく、材料特性の概略を比較的容易に把握することに特徴がある TC 試験を採用し、試験の平均値がある下限値を下回らないように確認することでこの品質管理を行うことが考えら

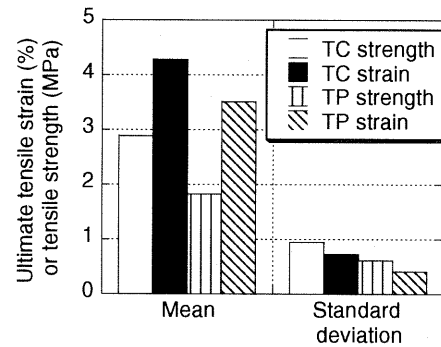


Fig. 15 Statistical Comparison of Tensile Property

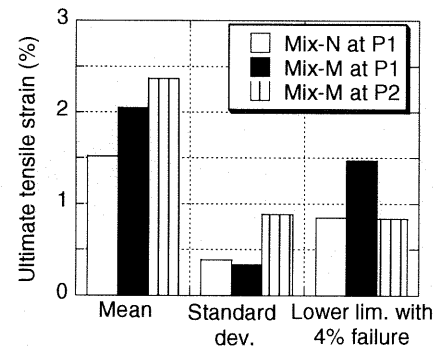


Fig. 16 Confidential Lower Limit of Ultimate Tensile Strain

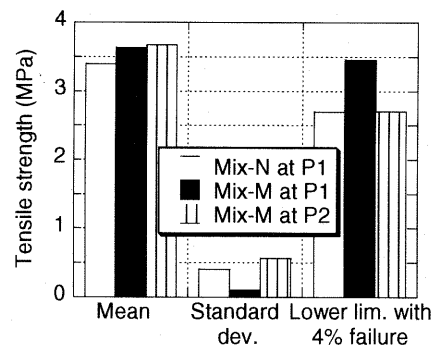


Fig. 17 Confidential Lower Limit of Tensile Strength

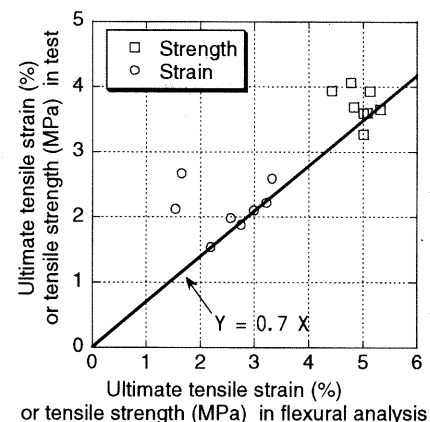


Fig. 18 Applicability of Flexural Analysis in Tensile Property Estimation

れる。ただし、この品質管理方法では、本研究で明らかになった TP 試験との比較における平均値と標準偏差の相違を勘案し、適切な管理範囲を定める必要がある。また、TP 試験に比較すればより簡便とはいえ、TC 試験を実施するには供試体把持装置など特殊な装置が必要で、この方法を引張性能の品質管理試験として広く普及することは必ずしも容易ではないと考えられる。

品質管理の第二の方法は、曲げ試験を用いることであり、この方法がより現実的と考えられる。Fig. 18 は、終局引張ひずみと引張強度に関して、曲げ試験のデータから(1)～(4)式により解析した値を TP 試験の結果と比較したものである。この図から、本研究の ECC における終局引張ひずみおよび引張強度の両者について、換算係数 0.7 を乗じることにより、曲げ試験による解析値をもとに引張試験の結果を概ね安全側に評価可能であることが分かる。即ち、式(1)および(2)中にある換算係数 $\alpha_e = \alpha_s = 0.7$ とすることが可能である。試験実施の容易さと試験装置の普及度から言えば、この曲げによる品質管理方法が最も現実的とも考えられる。

Ⅲ章で述べたように、二つの換算係数を理論的に導くことは現状では容易でないが、その力学的背景について以下に簡単に述べる。終局引張ひずみに関する換算係数 α_e は、曲げによる複数ひび割れ現象が引張よりも容易に実現しやすいことを反映するものといえる。曲げ載荷により、初期ひび割れ時の荷重よりも曲げ終局時の荷重が上回り、この両者の間に多数の微細ひび割れ（複数ひび割れ）を伴って曲げ変位が増大するたわみ硬化について Fig. 8 に実例を示した。このたわみ硬化は、Fig. 6 や Fig. 7 に見られる引張におけるひずみ硬化と類似の現象ではあるが、たわみ硬化が実現する力学条件はひずみ硬化と比較して緩やかである。このことを端的に示す一例として、Naaman は圧縮強度が非常に大きいと仮定した場合に、たわみ硬化を生じるために必要な複合材料の引張強度は、マトリクスのひび割れ強度の 1/3 あればよいことを解析的に示している⁷⁾。引張載荷でひずみ硬化が生じるためには、少なくとも複合材料の引張強度はマトリクスのひび割れ強度以上なくてはならないから、この両者の違いは大きく、曲げでは引張よりも容易に複数ひび割れ現象が起こり易い。 α_e は、この曲げと引張における複数ひび割れ現象が生じる条件の違いを反映し、曲げから得られる終局ひずみの推定値を低減する意味付けを有するといえる。

また、引張強度の換算係数 α_s は、(1)～(4)式で仮定した完全弾塑性性による引張応力-ひずみ関係と実際との差異を反映していることが考えられる。一般に、ECC の応力-ひずみ関係は、Fig. 6 や Fig. 7 から類推されるように、初期ひび割れが生じた後に応力が漸増するバイリニアによる近似の方がより正確と考えられる。ここで用いた完全弾塑性モデルによる引張強度推定値は、バイリニアによる場合よりも大きくなる傾向が文献⁸⁾に示されており、この応力-ひずみ関係の仮定による誤差が α_s の一部を構成しているものと考えられる。

VI. おわりに

本研究では実機プラントにおける練混ぜ実験を中心とした検討の結果次のような結論を得た。

- a. 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ある。

- b. 本研究の範囲では、セメント種類および製造時の環境温度がフレッシュ性能および力学性能に及ぼす影響は小さいが、製造工場については、その選択の影響が比較的顕著である。
- c. 空気量の変動が圧縮強度に与える影響はコンクリートの場合よりも小さく、空気量 $10 \pm 4\%$ 程度の管理を行うことによって、今回の調合で設計基準圧縮強度 27 MPa 程度を確保できる。
- d. 空気量の変動が引張力学性能に与える影響は比較的小さい。
- e. 角柱供試体による引張試験結果は、板状供試体による結果と比較して、平均的には低い値を示すが、試験値のばらつきは小さく、下限信頼値では両者のその差は小さくなる。
- f. 構造体内での ECC の性能に近い値を示すと考えられる角柱供試体による引張試験の結果から、実機での ECC 製造においても終局引張ひずみ 1%、引張強度 3MPa 程度の性能を高い信頼性で確保可能である見通しを得た。
- g. ECC 部材製造時には、引張性能の品質管理を行うことが重要であるが、曲げ試験と解析を組み合わせることで引張試験を代替し、比較的簡易に品質管理を実施できる見通しを得た。

謝 辞

本研究を遂行するにあたり、日本コンクリート工学協会工靱性セメント複合材料の構造利用に関する研究委員会の岐阜大学六郷恵哲委員長をはじめ、各委員には大変貴重なご指導を賜った。ここに記して厚く謝意を表する。

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に関する技術の現状と将来，2002.1.
- 2) 閑田徹志，永井覚，丸田誠；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，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.25，No.1，(2003)，pp.1859-1864.
- 3) 閑田徹志，斉藤忠，坂田昇，平石剛紀；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報告集，Vol.23，No.1，(2001)，pp.475-480.
- 4) 清水克将，金久保利之，閑田徹志，永井覚；HPRCC の一軸引張および曲げ性状の及ぼす打設方向の影響，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.25，No.1，(2003)，pp.281-286.
- 5) 金久保利之他；DFRCC の引張性能評価-JCI 委員会による共通試験結果，高靱性セメント複合材料に関するシンポジウム論文集，(2003)，pp.101-112.
- 6) Li, V.C. and Wang, S; On High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites, 高靱性セメント複合材料に関するシンポジウム論文集，2003，pp.13-23.
- 7) Naaman, A.E.; Toughness, Ductility, Surface Energy and Deflection-Hardening FRC Composites, Proceedings of the JCI International Workshop on Ductile Fiber Reinforced Cementitious Composites (DFRCC), 2002, pp. 33-57.
- 8) 日本コンクリート工学協会，高靱性セメント複合材料の構造利用に関する委員会報告書，3 章，2004.