

エコセメントを用いた環境配慮型 CFT 造に関する研究

Study on Environment-Conscious CFT Using Ecocement

住 学*

Manabu Sumi

要旨

(社)新都市ハウジング協会 CFT 造施工技術研究会を中心とした研究グループでは、共同技術開発コンソーシアムを発足させ、エコセメントを用いたコンクリートに関する各種要素実験や CFT 柱を用いた実大施工実験を実施し、施工性や強度特性、耐久性などに関する技術的データの収集を進めてきた。本報告ではコンソーシアムでの開発成果のうち、鋼管（鋼材）の腐食特性、ならびに CFT 柱の実大施工実験について報告する。

キーワード：環境 エコセメント CFT 鋼材腐食 実大施工実験 構造体コンクリート強度

1. はじめに

循環型社会の構築に向けた取り組みのひとつとして、廃棄物を利用した環境配慮型セメントの利用が注目されている。従来の環境配慮型セメントは、ポルトランドセメントにフライアッシュや高炉スラグといった粉末状の産業廃棄物を混合するものであったが、昨今の技術革新により、都市ごみ焼却灰や下水汚泥を原料としたエコセメント¹⁾が開発され、2002 年 7 月には JIS²⁾化もされており、今後の循環型社会の形成に大きく貢献するものと期待されている。

これまでの研究成果から、エコセメントは普通ポルトランドセメントとほぼ同等の性能を有することが明らかになっているものの、下記のような理由から建築分野での普及が拡大していないと考えられる。

(1) 廃棄物の原料に起因してセメント中の塩化物量が若干大きくなるため、単位セメント量の多い調査には適用が難しくなる。

(2) 長期強度の増進が小さい傾向にあるため、管理材齢を延長してもセメントを減量しにくい。

一方、高層建築物の柱を中心に普及が進んでいる「コンクリート充填鋼管造 (CFT 造)」における充填コンクリートは、鋼管に被覆された状態であるため、RC 造などに比べて飛来塩分など外部からの劣化要素の影響を受けにくく、乾燥なども起こりにくいと考えられている。したがって、耐久性能がポルトランドセメントよりも若干低いと考えられているエコセメントの有効利用先としては理想的な構造形式である。

このような背景から、(社)新都市ハウジング協会 CFT 造

施工技術研究会を中心とした研究グループでは、図 1 に示すように「環境配慮型セメントを用いたコンクリート充填鋼管造に関する施工技術の開発」と題して、22 社による共同技術開発コンソーシアムを立ち上げ、エコセメントを用いたコンクリート充填鋼管造に関する施工技術の開発に着手することとした。本報告では、コンソーシアムでの開発成果のうち、鋼管（鋼材）の腐食特性に関する検討、ならびに CFT 柱の実大施工実験について報告する。本開発の期間は平成 18 年度および 19 年度（平成 18 年 4 月～平成 20 年 3 月）の 2 ヶ年であり、実施にあたって国土交通省の「平成 18 年度ならびに 19 年度 住宅・建築関連先導技術開発助成事業」の助成を得て実施している。なお、本報告は、コンソーシアムの成果のひとつである文献^{3,4)}の一部を再構成したものである。

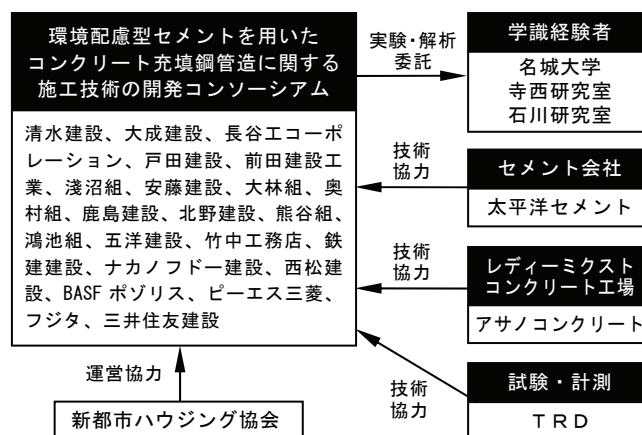


図 1 開発組織

* 技術研究所 建築技術研究部門

2. 開発目的ならびに概要

本開発では、エコセメントをCFT造に適用する上で必要な技術的データの収集を目的とした。

【施工性】 エコセメントを用いたコンクリートを、実際にCFT柱に充填施工した事例は皆無である。本開発では、高流動コンクリートの製造、ポンプ圧送、CFT造への充填施工などに関する一連の課題について、実務上問題がないことを実験等により明らかにした。

【構造体としての一体性】 CFT造において充填されたコンクリートが収縮すると、空隙の発生などにより構造体としての一体性を損なうだけでなく、内部ひずみの発生要因ともなる。こうした内部ひずみは、ダイアフラム周辺で大きくなる可能性が高いと考えられ、CFT造特有の現象であるダイアフラム近傍における構造体コンクリート強度の低下(図2)と密接に関係していると推察される。本開発では充填コンクリートの収縮とそれに伴う構造体コンクリート強度低下のメカニズムについて、内部ひずみの測定と解析により明らかにすることを試みた。

下記に実施した各種検討項目について示す。図3に本開発の年度ごとの概要を示す。

- ①エコセメントを用いた高強度・高流動コンクリートの実機試験ならびにポンプ圧送実験
- ②エコセメントを用いた高強度・高流動コンクリートによる鋼管(鋼材)腐食特性に関する検討
- ③エコセメントを用いたCFT造の解析的検討
- ④ダイアフラム近傍のひずみ測定方法の検証(予備実験)
- ⑤CFT柱を用いた実大施工実験
- ⑥実大CFT柱内ひずみ分布の解析的検討

本報告では、前述の②エコセメントを用いた高強度・高流動コンクリートによる鋼管(鋼材)の腐食特性に関する検討、ならびに⑤CFT柱を用いた実大施工実験について報告する。

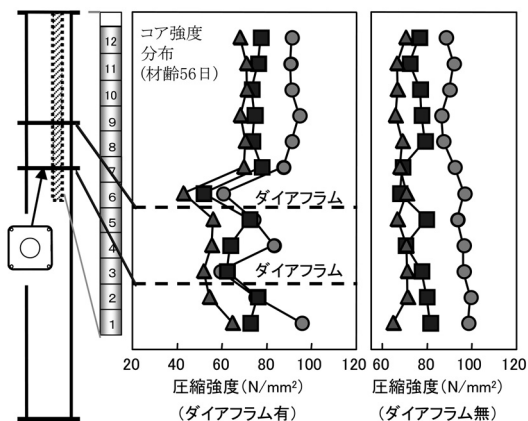


図2 ダイアフラム近傍における構造体コンクリートの強度低下の一例⁵⁾

3. 鋼管(鋼材)の腐食特性に関する検討

3.1 実験概要ならびに試験方法

ここでは、普通エコセメントを用いた高強度・高流動コンクリートを鋼管内に充填した場合に、鋼管を腐食させる可能性について検討することとした。ただし、鋼管を模擬した供試体で腐食に対する内側のコンクリートの影響のみを評価する試験を行うことは困難であるため、今回の試験では、日本コンクリート工学協会(以下、JCI)の「塩分を含んだコンクリート中における補強用棒鋼の促進腐食試験方法—オートクレーブ法—」(JCI-SC2)⁶⁾に準拠して鋼材(みがき棒鋼φ13mm)の腐食促進試験を行い、他のコンクリートとの相対評価によって普通エコセメント(以下、ECO)を用いた高強度・高流動コンクリートの腐食性を検討することとした。棒鋼入り供試体の形状を図4および写真1に示す。かぶり厚さは10mmおよび20mmの2種類とした。使用材料と調合を表1に示す。コンクリートの水セメント比は、CFT造に適用する高流動コンクリートを想定した35%、および比較用の50%とした。普通ポルトランドセメント(以下、OPC)を用いたコンクリートの全塩化物イオン量は、日本建築学会建築工事標準仕様書「JASS5 鉄筋コンクリート工事」(以下、JASS5)⁷⁾に示される塩化物イオン量の上限0.3kg/m³で製造されたコンクリートが、塩化物により0.9kg/m³分浸透された場合を想定し、鋼材の腐食開始の限界といわれている1.2kg/m³に調整した。一方、ECOを用いたものの全塩化物イオン量は、JASS5に示される塩化物イオン量の緩和規定(0.30→0.60kg/m³)を適用した調合が、OPCの調合と同様の条件で塩化物に浸透された場合(0.9kg/m³分浸透された場合)を想定し、1.5kg/m³に調整した。試験体は、材齢7日でオートクレーブ養生槽内に設置し、80℃/h以下で180℃まで上昇させ、8時間保持した後、室内温度まで自然放冷とした。これを1サイクルとして、サイクル間に20℃の水中に浸漬させ、2サイクル繰り返した。オートクレーブ終了後、供試体から鋼材を取り出し、上下

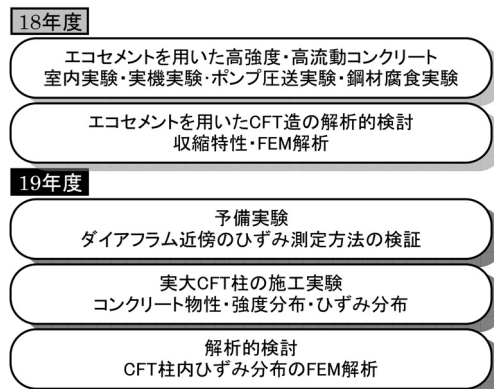


図3 開発概要(各年度)

15mm を取り除いて、画像処理により腐食面積を求め、腐食面積率（腐食面積／棒鋼表面積×100）を算出した。また、クエン酸ニアンモニウム 10% 水溶液で錆を除去した後、質量減少率を算出した。

3.2 実験結果

フレッシュコンクリート中の塩化物イオン量の測定結果を表 2 に示す。塩化物イオン量は JIS A 1144（電位差滴定法）⁸⁾ に準拠して測定を行った。OPC による調合の塩化物イオン量は設定値に近い 1.2kg/m³であったものの、ECO による調合の塩化物イオン量は設定値の 1.5kg/m³より若干少なく 1.4kg/m³程度であった。これは、ECO はフレッシュコンクリート中に溶け出す塩化物イオン量以外にセメント中に固定化する塩化物イオン量が存在するためであると考えられる。

腐食促進試験の結果を図 5 および図 6 に示す。同一水セメント比で比較すると、OPC よりも ECO の方が腐食面積率、質量減少率ともに大きかった。これは、コンクリートの設定塩化物イオン量の違いが影響したものと考えられる。水セメント比に着目すると、水セメント比 35% の方が水セメント比 50% よりも腐食面積率、質量減少率ともに小さく、水セメント比の低減による腐食抵抗性が認められた。かぶり

り厚さに着目すると、水セメント比 50% では腐食がかなり進行していることもあり、かぶり厚さが大きい方が腐食面積率、質量減少率ともに大きくなる逆転現象が起きていたが、水セメント比 35% では、かぶり厚さ 20mm の方が 10mm よりも腐食面積率、質量減少率ともに小さくなり、かぶり厚さの増大による腐食抵抗性が認められた。

今回の実験の全体的な傾向を把握するために ECO35 と OPC50 を比較すると、ECO35 のほうが腐食面積率、質量減少率ともに小さくなったことがわかる。この結果は、単位セメント量が大きく、内在する塩化物イオン量が大きかったとしても、組織が緻密であれば水分の移動速度などが緩やかになり、腐食速度も緩やかになることを示唆していると考えられた。したがって、塩化物イオン量が OPC よりも多い ECO を用いた場合でも、水セメント比が小さければ、一般的な水セメント比 50% のコンクリートと同等以上の鋼材の腐食に対する抵抗性を有していると考えられる。

表 1 使用材料と調合

調合	W/C (%)	S/a (%)	単位量 (kg/m ³)					
			W	C	NaCl	S	G1	G2
EC050	50.0	47.0	170	340	2.228	831	571	376
OPC50	50.0	47.0	170	340	1.849	831	571	376
EC035	35.0	52.0	170	486	2.123	878	494	325
OPC35	35.0	52.0	170	486	1.793	877	493	325

W/C50%:スランプ 18cm, W/C35%:スランプフロー50cm

- セメント：普通エコセメント（密度 3.17g/cm³, Cl⁻435ppm）
普通ポルトランドセメント（密度 3.16g/cm³, Cl⁻230ppm）
- 骨材：S 河東産山砂（表乾密度 2.61g/cm³）
G1 富谷産砕石 2010（表乾密度 2.65g/cm³）
G2 富谷産砕石 1005（表乾密度 2.62g/cm³）
- 水：上水道水（佐倉市）
- 混和剤：ポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤

表 2 塩化物イオン量測定結果

調合	単位セメント量 (kg/m ³)	設定塩化物イオン量 (kg/m ³)			測定値塩化物イオン量 (kg/m ³)
		セメント由来 (kg/m ³)	添加 NaCl (kg/m ³)	合計 (kg/m ³)	
EC050	340	0.148	1.352	1.5	1.39
OPC50	340	0.078	1.122	1.2	1.22
EC035	486	0.212	1.288	1.5	1.39
OPC35	486	0.112	1.088	1.2	1.17

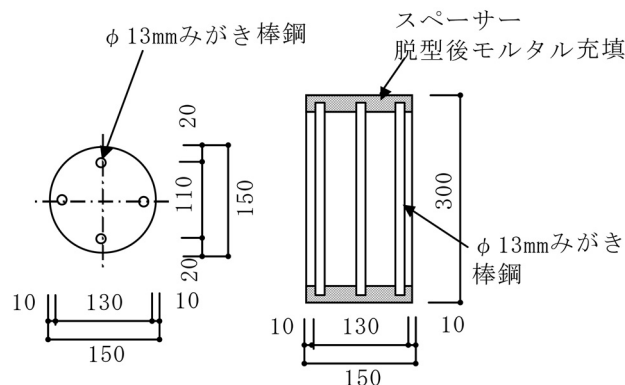


図 4 棒鋼入り供試体の概要

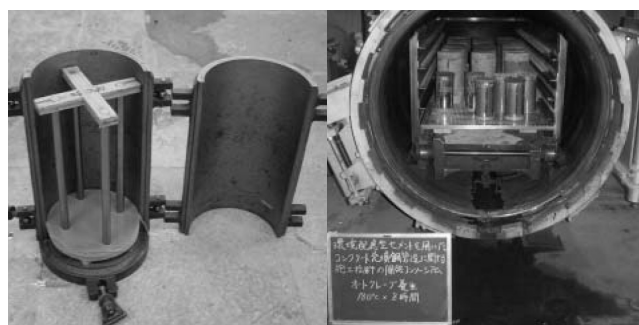


写真 1 棒鋼入り供試体型枠とオートクレーブ養生槽

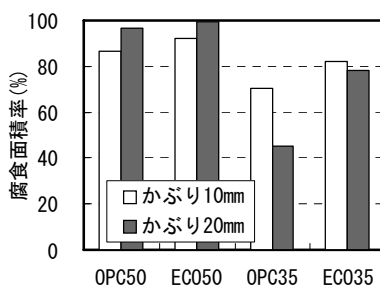


図 5 腐食面積率

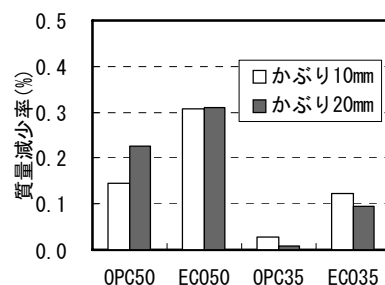


図 6 質量減少率

4. GFT 柱を用いた実大施工実験

4.1 実大施工実験概要

表3に実験要因を示す。セメントはECOと比較用にOPC、中庸熟ポルトランドセメント（以下、MPC）を用いた。フレッシュコンクリートの条件は、ブリーディングの多少とし、「多い、少ない、非常に少ない」とした。施工性ならびにダイアフラムの影響を考慮するため、ダイアフラム間隔・開口率および打込み方法を要因とした。施工実験状況を写真2に示す。表4、5にフレッシュコンクリートならびに硬化コンクリートの試験項目および試験方法を示す。また、図7に試験体形状を示す。鋼管は□600mmで板厚16mmの冷間成形角型鋼管（BCP325）を用いた。柱試験体はAタイプを基準に、ダイアフラム極小間隔を加えたBタイプ、3層分の高さのCタイプ、ダイアフラムなしDタイプの4種類である。ダイアフラム部は梁貫通型とし、ゴムシートを挟んで柱鋼管とボルト締めとした。圧入口はφ135mmとし、高さ500mmの位置にシャッターバルブとともに設けた。表6にコンクリートの使用材料と調合を示す。調合は、所要の性状を事前に実施した試験練りにより確認し、ECOを用いたもの2種、OPCを用いたもの1種、MPCを用いたもの1種の計4種類とした。全ての調合においてスランプフロー



写真2 実大施工実験状況

60cm、空気量3.0%とした。コンクリートの製造は、東京都港区のレディーミクスト工場で行い、施工実験場所までトラックアジテータ車（運搬時間45～60分）で運搬した。コンクリートの打込みは、ピストン型のコンクリートポンプ車（最大吐出圧8.3MPa）を用い、落とし込み時にはポンプ車のフレキシブルホースを直接鋼管内に差し込んだ。打上がり速度は、0.5m/分となるように、柱頭部のレーザー距離計と時間計測によりポンプ車のストロークを調整した。また、圧入時には圧入圧力が鋼管降伏強度を超えることのないように圧力計により管理した。

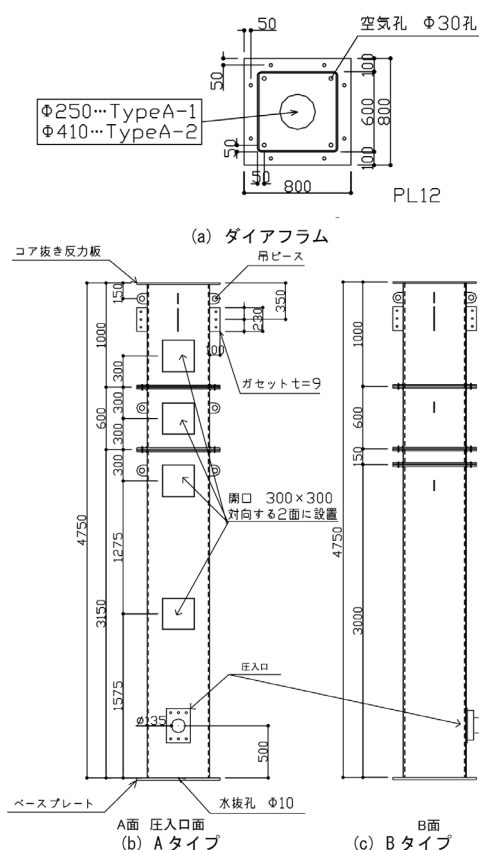


図7 試験体形状の一例

表3 実大施工実験要因

柱試験体 No.	柱試験体 Type	高さ (mm)	試験体・施工条件													
			ダイアフラム間隔 (mm)	開口率	打込み方法	ブリーディング	調合	W/C (%)	混和剤	共通事項						
No. 1	A-1	4,750	600	15%	圧入	少	ECO35	35.0	高性能 AE 減水剤	・スランプフロー60cm ・空気量3.0% ・単位水量170kg/m ³						
No. 2			600	15%			OPC35									
No. 3	D		DF無し	100%			ECO35									
No. 4	B		600+150	15%			OPC35									
No. 5	A-2		600	40%			ECO35									
No. 6			600	40%			OPC35									
No. 7	D		DF無し	100%			OPC35									
No. 8	A-1		600	15%			多				極少	ECO35R	28.0	高性能 AE 減水剤 + 減水剤(超遅延剤)		
No. 9												ECO35			35.0	高性能 AE 減水剤
No. 10												ECO35				
No. 11	C		12,250			少	ECO35									

4.2 フレッシュ性状、圧縮強度

4.2.1 フレッシュコンクリート

荷卸し時のフレッシュコンクリートは、概ね目標値を満足し、良好な流動性が確保されていた。荷卸し時のスランブフローと空気量を図 8、9 に示す。荷卸し時のスランブフロー、空気量は全ての調合において許容値を満足し、運搬車両によって大きく変動することなく安定した状態であった。出荷から荷卸しまでの輸送時間は 30～60 分程度、スランブフローロスは最大で 6.5cm であった。

4.2.2 塩化物量

エコセメントを用いた調合を中心に JASS 5T-502 のモール法により塩化物量を測定した。測定値は 0.172～0.207kg/m³ であり、いずれも 0.30kg/m³ を下回った。EC035 の 1 台目及び 6 台目の塩化物量の経時変化を図 10 に示す。過去に実施した実験³⁾では、練り上がりから 60 分程度まで

の間に測定値が増加する傾向が確認されたが、今回の実験でも経過時間に伴う増加が認められた。また、EC035 について、JIS A 1154 に準じて全塩化物イオン濃度を測定したところ 0.007% (質量比) となった。これを調合上の塩化物量に換算すると 0.165kg/m³ となり、モール法による測定値と概ね近似した。さらに、エコセメントの塩化物イオン濃度を測定し、調合上の塩化物量を算定すると 0.170kg/m³ となり、これもモール法による測定値とほぼ合致した。

4.2.3 圧縮強度

標準養生および簡易断熱養生した供試体の圧縮強度試験結果 (全車平均値) を図 11 に示す。OPC35 と EC035 を比較すると 2～3N/mm² 程度 EC035 の方が高い結果となった。EC035 と EC035R の標準養生では、EC035R の方が 6N/mm² 程度高い結果となった。なお、運搬車両の違いによる強度発現の差異は認められなかった。

表 4 フレッシュコンクリートの試験項目と試験方法

試験項目	試験方法
スランブフロー	
50cm フロー到達時間	JIS A 1150 (出荷・荷卸し・筒先)
フローの流動停止時間	
空気量	JIS A 1128 (出荷・荷卸し・筒先)
コンクリート温度	JIS A 1156
塩化物量	JASS 5 T-502 (エコセメントのみ)
ブリーディング量	JIS A 1123 (屋外条件で測定)
沈降量	(社) 新都市ハウジング協会「CFT 造技術基準・同解説」の運用及び計算例等の方法 (φ150×300mm 型枠、屋内で測定)
凝結	JIS A 1147 (屋外条件で測定)
自己収縮	JCI 超流動コンクリート研究委員会(案)
柱頭沈降量	接触型変位計 (柱頭で測定)
打ち上がり高さ	レーザー距離計
圧入口圧力	圧力計 (2MPa)

表 5 硬化コンクリートの試験項目と試験方法

試験項目	試験方法
コンクリートひずみ	埋込み型ひずみゲージ
標準養生圧縮強度	JIS A 1108 (材齢 28 日、出荷・荷卸し)
簡易断熱養生圧縮強度	
コア供試体圧縮強度	
ヤング係数	JIS A 1149 (材齢 28, 91 日) 標準養生供試体・コア供試体
超音波伝播速度	建築学会 (案) (コア供試体)
塩化物量	JIS A 1154 (エコセメントのみ)

表 6 コンクリートの使用材料と調合

調合 No.	W/C (%)	単位量 (kg/m ³)				混和剤 使用量 (C×%)	遅延剤 使用量 (C×%)
		W	C	S	G		
EC035	35.0	170	486	822	891	1.40	—
OPC35	35.0	170	486	822	891	1.35	—
EC035R	35.0	170	486	822	891	1.35+0.05	0.40
MPC28	28.0	170	608	724	891	1.30	—

- セメント：普通エコセメント (密度 3.17g/cm³)
普通ポルトランドセメント (密度 3.16g/cm³)
中庸熱ポルトランドセメント (密度 3.21g/cm³)
- 骨材：S 鳥形山産石灰系砕砂 (表乾密度 2.62g/cm³, 吸水率 1.64%)
市原産天然砂 (表乾密度 2.58g/cm³, 吸水率 2.24%)
混合比率 砕砂：天然砂=50:50 (質量比)
G1 我郎産石灰系砕砂 2005 (表乾密度 2.70g/cm³, 吸水率 0.48%)
- 水：上水道水 (東京都)
- 混和剤：ポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤
リグニンスルホン酸系超遅延性減水剤

4.3 凝結、沈降量および自己収縮

ダイアフラムの有無や開口部の寸法、および圧入・落し込みなどの打込み方法が柱頭部の沈降量に与える影響を検討するため、ブリーディング量、凝結時間、φ150×300mm 型枠を使用しての沈降量、試験体の柱頭部での沈降量、ならびに、自己収縮を測定した。

4.3.1 凝結、ブリーディング

ブリーディング試験では、気温が 30℃ を超える屋外環境のため、いずれの調合でもブリーディングの発生は認められなかった。一方、凝結時間は、EC035R > EC035 > OPC35 > MPC28 の順に遅延し、室内試験練りと同様であった。なお、凝結の最も早い MPC28 の始発が 4 時間 15 分であるのに対し、超遅延剤を併用した EC035R は 8 時間 15 分であった。

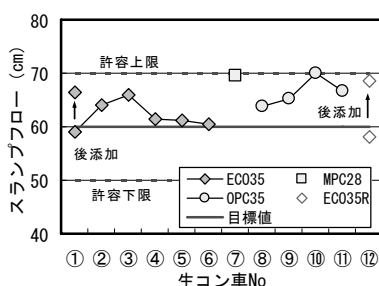


図 8 スランブフロー

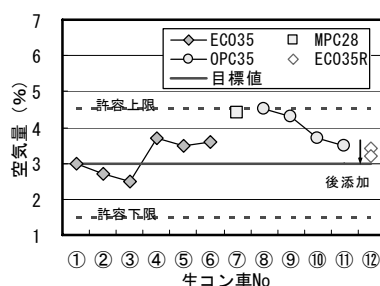


図 9 空気量

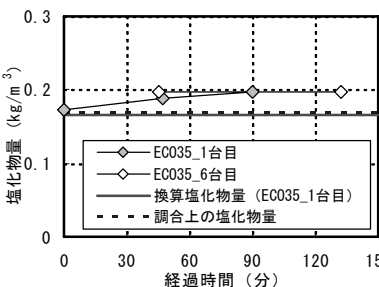


図 10 塩化物含有量の経時変化

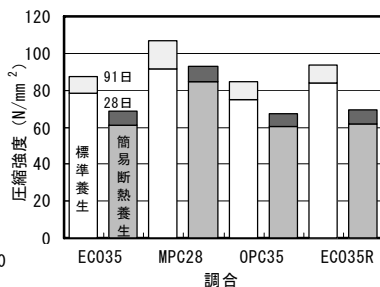


図 11 圧縮強度

4.3.2 沈降量

沈降量の測定結果を表7に示す。φ150×300mm型枠での沈降量は、いずれの調査も新都市ハウジングで規定される2mm以下であった。また、凝結の遅い調査ほど沈降量は大きな値を示す傾向にあるものの、EC035RとEC035では、凝結時間が大きく異なるにもかかわらず、沈降量は1.3mmとほぼ同等であった。柱頭部で測定した沈降量は、EC035R>EC035 > OPC35 > MPC28の順(図12)であり、沈降量の大小は凝結時間に依存する傾向がある。図13には経過時間と沈降量の関係の一例を示す。凝結の遅いEC035は、OPC35よりも沈降が収束するまでの時間が長く、沈降量も大きくなったと考えられる。図14にはダイアフラムの開口率と沈降量の関係を示す。EC035ではダイアフラムなしの柱(=開口率100%)の沈降量が、ダイアフラム有りの柱の約1.5倍であり、その影響が認められたが、開口率40%と15%との沈降量に大きな差異は認められなかった。一方、OPC35ではダイアフラムの有無や、開口率が沈降量に与える影響は認められなかった。本実験の範囲では、柱頭部の沈降量に対するダイアフラムの影響は、凝結の遅延する調査ほど顕著であること、開口率の大きさよりもダイアフラムの有無が支配的であることが推察された。ダイアフラムの枚数の影響は(図15)本実験の範囲では認められなかった。

4.3.3 自己収縮

自己収縮量の測定結果を図16に示す。EC035、EC035Rとともに、OPC35と比較して自己収縮が大きくなる傾向にあったが、その差はEC035で比較すると50μ程度であり有意差は認められなかった。一方MPC28は、最も富調査であり、OPC35の約2倍の自己収縮量であった。

表7 沈降量の測定結果

調査	ダイアフラム		打込み方法	沈降量(mm)	
	開口率	枚数		φ150×300	柱頭部
EC035	100%	なし	圧入	1.30	3.37
	15%	2枚	圧入		2.33
	15%	2枚	落とし込み		2.40
	40%	2枚	圧入		2.01
EC035R	15%	2枚	圧入	1.32	2.73
OPC35	100%	なし	圧入	0.29	0.36
	15%	2枚	圧入		0.37
	15%	3枚	圧入		0.46
	40%	2枚	圧入		0.34
MPC28	15%	2枚	圧入	0.41	0.33

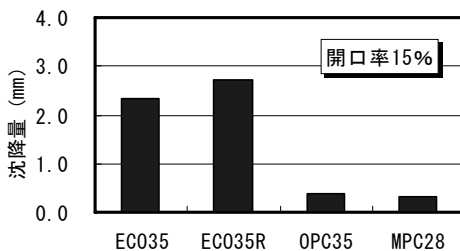


図12 調査と沈降量の関係

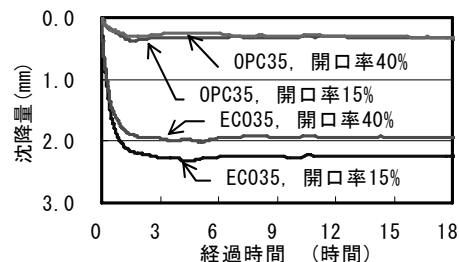


図13 経過時間と沈降量の関係

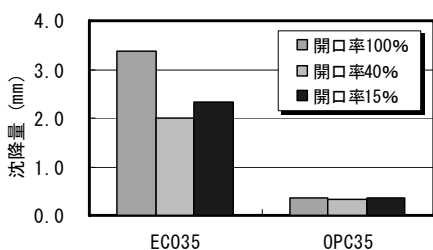


図14 ダイアフラム開口率と沈降量の関係

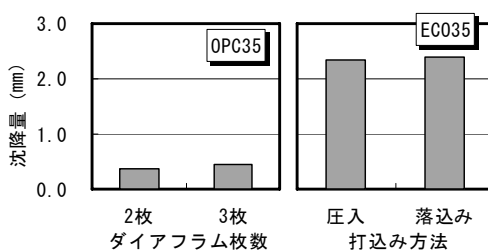


図15 ダイアフラム枚数、打込み方法と沈降量の関係

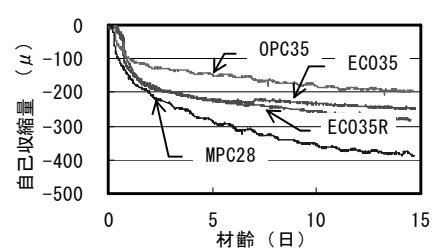


図16 自己収縮試験結果

4.4 実大CFT柱内のひずみ測定ならびにコア供試体採取位置

4.4.1 ひずみ測定位置

CFT柱のダイアフラム近傍で発生する圧縮強度のバラツキの原因を検討するために、CFT柱内のコンクリートひずみの測定とコア供試体強度の測定(材齢91日)を行った。ひずみの測定には、予備実験により凝結の終結以降、ある程度のひずみ測定が可能と判断された埋込型の軟質ひずみゲージ(一部、硬質ゲージも併用)を用いた。ひずみゲージはコンクリート中にユニットにして設置した。図17にゲージユニットを、写真3にCFT柱内への吊込み状況を示す。図18には、埋め込んだゲージの配置図を示す。基本的な測定位置は、高さ方向ではダイアフラムの近傍とそれ以外の一般的な鋼管部に、水平位置では柱の中心部と、ダイアフラムの開口辺縁部分、および柱外周部とした。

4.4.2 コア採取位置

材齢91日において各々の模擬柱から、コア供試体を採取し、圧縮強度・ヤング係数を測定した。図19にコア供試体の抜き取り位置を示す。なお、No.11柱試験体についてのみ柱試験体中間の高さから採取したコア供試体についても実施した。また、全てのコア供試体について超音波伝播速度法による試験を行い、圧縮強度試験結果と対応させ、ダイアフラム近傍から採取したコア供試体など、強度低下を示している供試体を見出す手法として、有効であるか否かを検討した。コアは柱頭部より縦抜きとした。抜き取った後は、所定の箇所でカットし、両端を研磨仕上げとした。コアはダイアフラム近傍で分断することなく、一体で抜き取ることができた。圧縮試験までの間は気中養生とした。

4.5 圧縮強度試験結果

4.5.1 採取位置による強度分布

図20に示すように、柱No. 11を除き、柱下部の圧縮強度が高くなる傾向が認められる。これは、主に圧密によるものと考えられる。セメント種類によらず同様であった。

4.5.2 ダイアフラムの影響

ダイアフラムのある柱試験体9本中、ダイアフラム近傍で強度低下の認められる柱試験体は7本 (No. 1, 2, 4, 5, 6, 8, 9) あった。強度低下の認められない柱No. 10 (EC035)は落し込みによる充填であり、充填方法の違いによる可能性がある。

4.5.3 採取位置による差異

柱No. 2と8 (開口率 15%) および柱No. 5と6 (開口率 40%) において、異なる位置からコアを抜き取り、位置による圧縮強度への影響の差異を観察した。柱No. 2において

はコアAとコアBでは、コアBの方がダイアフラム近傍での強度の変動が小さい。柱No. 8においては、よりその傾向は顕著であり、コアAのダイアフラム近傍での強度低下が大きい。この要因については、凝結が遅れにより、ダイアフラムによる強度への影響が大きく、コアBはこの影響が小さかったものと思われる。柱No. 5と6におけるコアAとコアCの間には、傾向に大きな差異は認められなかった。

4.5.4 ヤング係数

図21に圧縮強度とヤング係数の関係を示す。全体的な傾向として、ダイアフラムの直上から採取したコア供試験体のヤング係数は、ダイアフラム直下や柱試験体下方から採取したコア供試験体よりも小さな値を示す傾向にあった。今回の試験結果を、1999年版日本建築学会「鉄筋コンクリート構造計算基準・同解説」⁹⁾に採用されている「NewRC式」推定値と比較すると、ダイアフラム直上のヤング係数は推

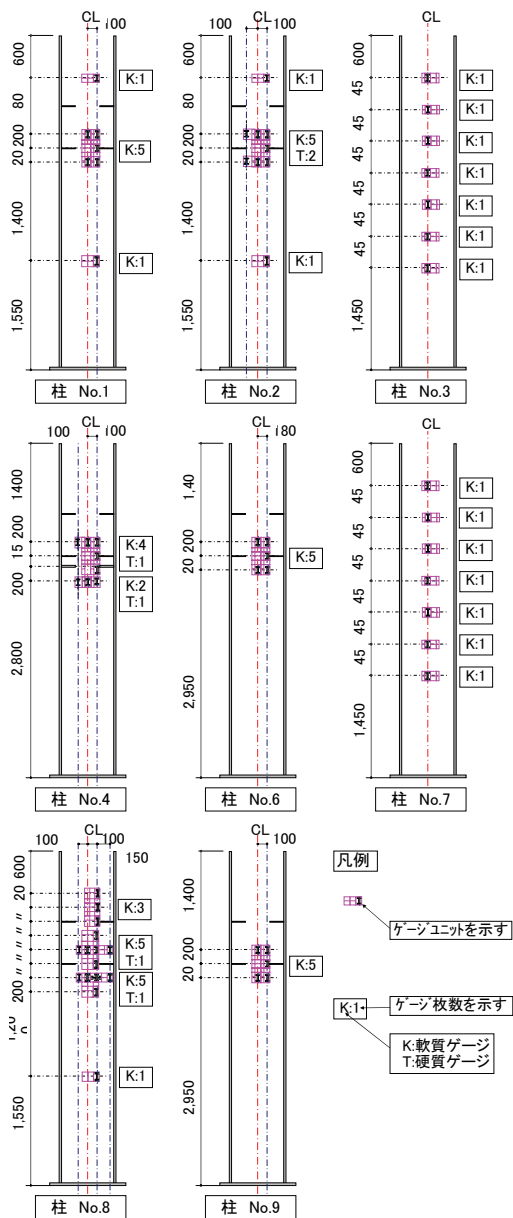


図 18 埋込型ひずみゲージ配置図

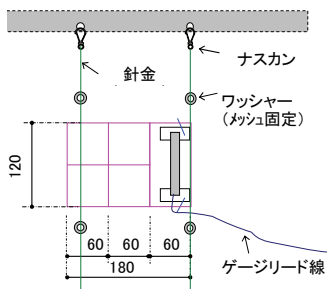


図 17 ゲージユニット



写真 3 柱内吊込み状

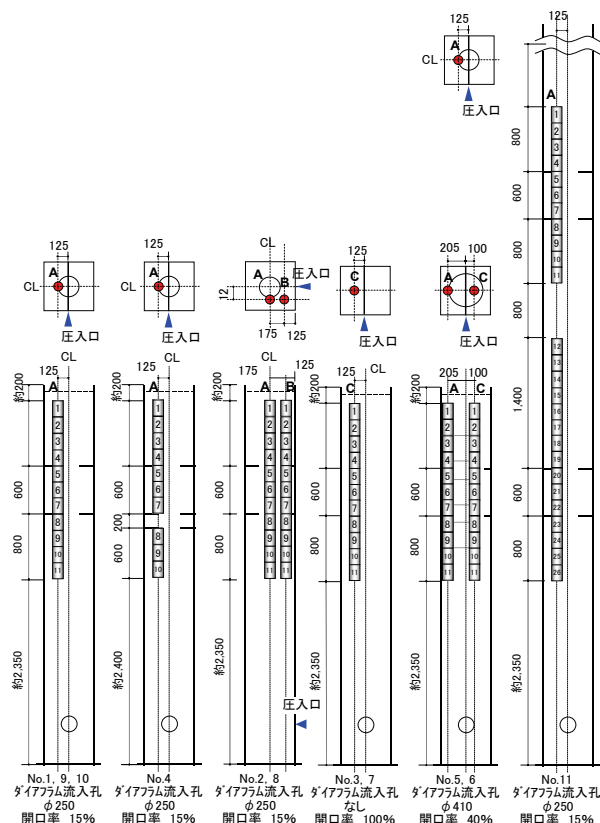


図 19 コア採取位置

定値よりも10~15%程度、ダイアフラム直下は5~10%程度小さな値を示した。普通エコセメントを使用した高流動・高強度コンクリートも、概ね「NewRC式」によってヤング係数を推定することが可能である。

4.5.5 超音波伝播速度

音速と圧縮強度の関係を図22に示す。本実験の範囲では、測定値は圧縮強度の範囲に比べ小幅なものであり、超音波伝播速度により、強度低下しているコア供試体を見出すことは難しいと考えられる。

4.6 構造体コンクリート強度補正値の分析

ここでは、以下の指標を用いて検討する。

- 平均 $_{28}S_{91}$ ：柱試験体ごとの材齢91日平均コア強度と材齢28日標準養生円柱供試体強度の差
- 最大 $_{28}S_{91}$ ：柱試験体ごとの材齢91日最低コア強度と材齢28日標準養生円柱供試体強度の差¹⁰⁾
- 変動係数：柱試験体ごとの材齢91日コア強度変動係数
- ダイアフラム（以下、DF）影響係数：当該柱試験体の変動係数を、同じ種類のセメントを用いたDFのない模擬CFT柱の変動係数で除した数値⁵⁾
- DFによる強度低下率：平均コア強度に対するDF近傍の強度低下率（1-DF近傍の最低コア強度/平均コア強度）

4.6.1 普通エコセメントのS値

表8に各指標の算定結果を示す。また、図23に普通エコセメントを用いたコンクリートの最大 $_{28}S_{91}$ 、平均 $_{28}S_{91}$ 、簡易断熱養生供試体強度による $_{28}S'_{91}$ 、および過去に実施した夏期実機試験³⁾において同調合で作製した模擬柱部材（□1m×1m）から求めた $_{28}S_{91}$ と同実験での $_{28}S'_{91}$ を示す。凝結遅延剤を添加した柱No. 8を除いて、柱試験体におけるS値は、最大 $_{28}S_{91}$ を含めて、模擬柱部材から採取したコア強度による $_{28}S_{91}$ とほぼ同等あるいは小さい結果であった。よって、普通エコセメントのS値は、他のセメント同様、模擬柱部材から求めたS値が適用可能であると考えられる。一方、 $_{28}S'_{91}$ は、最大 $_{28}S_{91}$ 、平均 $_{28}S_{91}$ と同程度あるいは若干大きい値であり、簡易断熱養生供試体強度が構造体コンクリート強度の代替指標として品質管理上有効と確認できた。平均 $_{28}S_{91}$ は、夏期実績値³⁾の $_{28}S_{91}$ より小さい傾向であった。これは、模擬柱部材中心の最高温度79.6℃に対し、今回の柱試験体中心付近の最高温度が62.2~65.1℃の範囲であり、高温履歴による強度への影響が小さかったことも考えられる。

4.6.2 DF有無の影響

図24にDF近傍で強度低下傾向の認められた柱試験体およびDFのない柱試験体における強度低下率を示す。強度低下率は、柱No. 8（EC035R）で最も大きく、10%を超える値を示した。このことから、凝結遅延剤は、DFによる強度低下

に影響を与えることが推察された。DFによる強度低下率の平均は6.7%であり、DFのない柱試験体における強度低下率（1-最低コア強度/平均コア強度）の平均は5.6%であった。よって、今回の実験では、DFによる強度低下傾向は認められたものの、DFの有無による影響は小さい結果であった。また、セメント種類の影響では、同一条件である柱No. 1と2、および5と6を比較すると、いずれも普通ポルトランドセメントに比べ、普通エコセメントを用いた場合に強度低下率が大きい傾向であった。

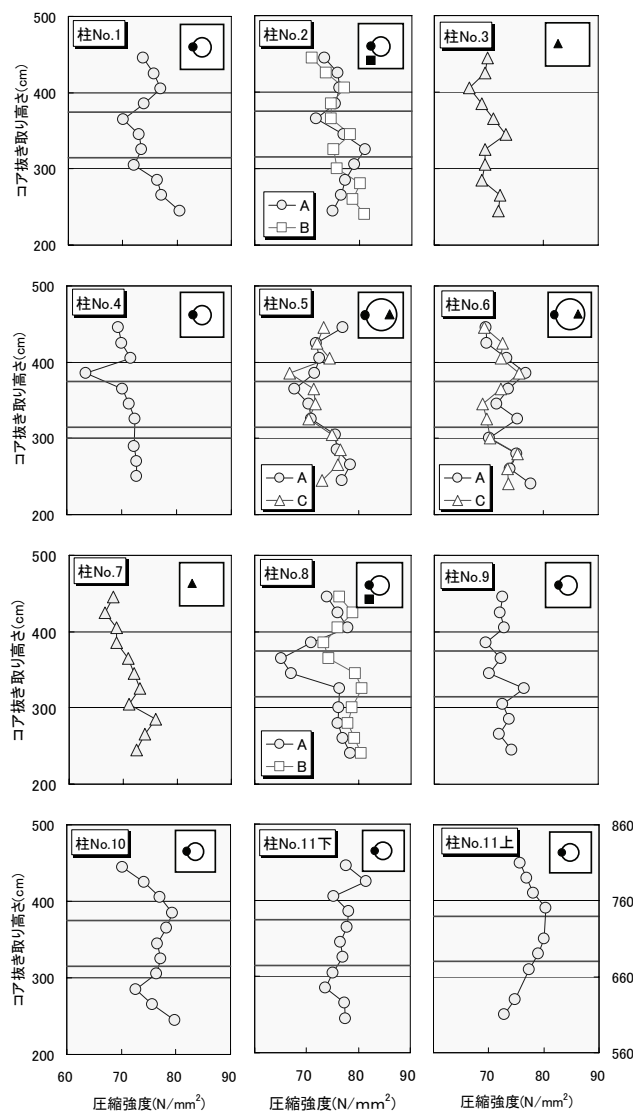


図 20 コア供試体圧縮強度

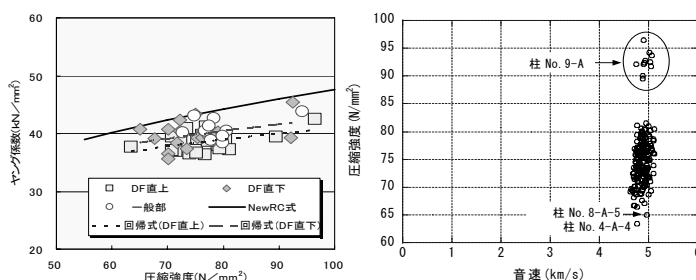


図 21 ヤング係数と圧縮強度

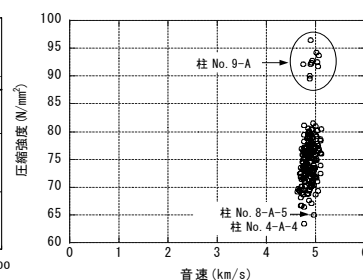


図 22 圧縮強度と伝播速度

4.6.3 凝結時間の影響

図25に凝結の始発時間とDF影響係数の関係を示す。今回、凝結時間はセメントの種類に対応しており、OPC35<ECO35<ECO35Rの順に凝結時間が遅く、凝結時間が遅くなるとDF影響係数が大きくなる傾向が認められた。

4.6.4 DF開口率の影響

図26にDF開口率とコア強度の変動係数の関係を示す。コア強度の変動係数は、凝結遅延させたECO35Rを除き、2.0~5.0%程度の範囲に分布しており、DF開口率の影響が小さい傾向が認められた。また、今回の実験結果では、変動係数はECO35Rの6.0%が最も大きな値であり、CFT造技術指針¹¹⁾に規定されているDF開口率15%以上の範囲では、構造体コンクリート強度の変動は小さな範囲に収まることが確認できた。

4.6.5 打込み方法の影響

図27に圧入充填した柱No.1と落とし込み充填した柱No.10の各指標値を示す。最大₂₈S₉₁および平均₂₈S₉₁の値は若干差

表 8 強度補正值等算出結果

柱No.	最大 ₂₈ S ₉₁ (N/mm ²)	平均 ₂₈ S ₉₁ (N/mm ²)	変動係数 (%)	DF影響係数	強度低下率 (%)
No.1	8.7	3.9	3.9	1.44	6.4
No.2	3.0	-1.4	3.3	0.85	5.8
No.3	6.5	4.2	2.7	1.00	5.0
No.4	11.4	0.7	4.0	1.03	10.2
No.5	6.4	1.4	4.6	1.70	7.8
No.6	4.1	1.6	3.9	1.00	4.5
No.7	10.7	10.2	3.9	1.00	6.2
No.8	19.2	6.5	6.0	2.22	12.2
No.9	-1.1	1.9	2.1	—	3.2
No.10	7.5	1.6	3.8	1.41	—
No.11	4.7	0.0	2.9	1.07	—

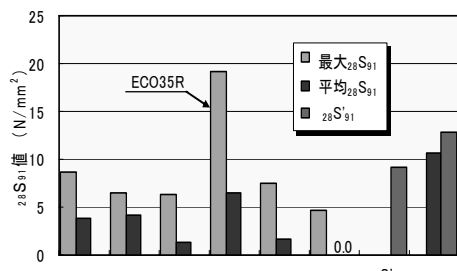


図 23 ₂₈S₉₁の比較 (ECO35, ECO35R)

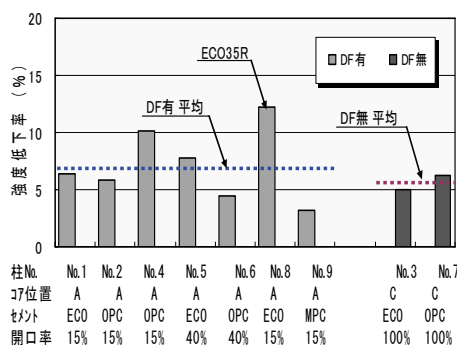


図 24 DFによる強度低下率

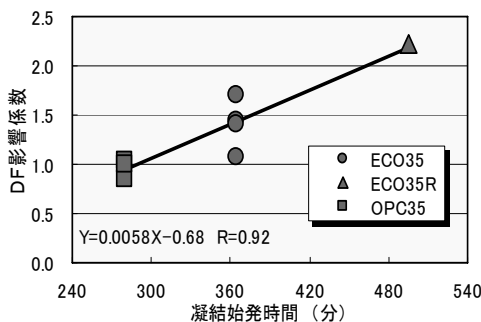


図 25 凝結の始発時間とDF影響係数

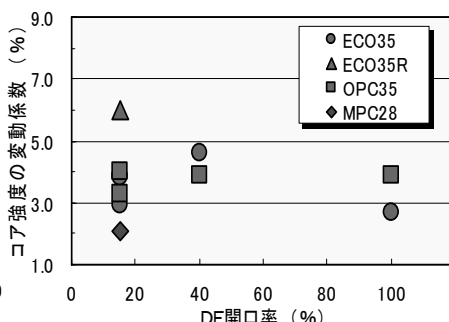


図 26 DF開口率の影響

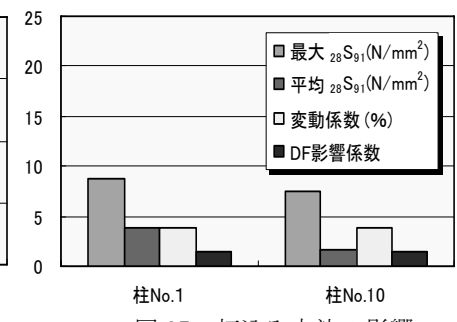


図 27 打込み方法の影響

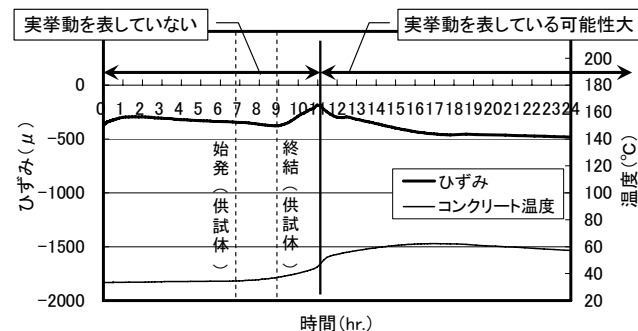


図 28 軟質ゲージのひずみ測定結果 (柱 No.8)

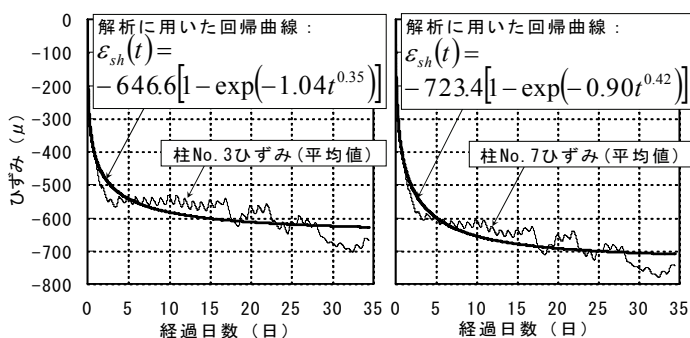


図 29 柱 No.3,7のひずみ履歴 (各高さの平均値)

4.7.2 ひずみ分布

いずれの CFT 柱試験体のひずみ履歴も、凝結の終結後 1 ~ 2 週間ではほぼ一定の値を示したため、測定した最後のデータ（経過日数約 35 日）を最終ひずみとした。図 30 に、CFT 柱試験体内のコンクリートの最終ひずみ分布を示す。DF の無い柱 No. 3, 7 のひずみは、高さによらずほぼ同じ値となった。それに対し、DF を有する CFT 柱試験体のひずみは、DF の上下・近傍で顕著な違いが認められた。特に、柱 No. 1, 8 の DF 位置 (H:3150mm) では 1000 μ 程度の大きな引張ひずみが生じており、ひび割れ発生の可能性が推察された。

【ダイアフラム開口率の影響】 EC035 の柱 No. 1, 3 をみると、DF 開口率の違い (15%, 100%) により、ひずみ分布に顕著な違いが見られた。ひずみは概ね圧縮側となったが、上述したように、柱 No. 1 (開口率 15%) の DF 位置 (H:3150mm) で引張側のひずみ (+953 μ) が認められた。一方、OPC35 の柱 No. 2, 6, 7 では、ひずみは全て圧縮側となった。DF 開口率の違い (15%, 40%, 100%) によるひずみ分布に顕著な違いは見られなかったが、DF 位置のひずみ (H:3150mm) は開口率が小さくなる程小さい値を示した。

【ダイアフラム枚数の影響】 DF 枚数 (柱 No. 2: 2 枚, No. 4: 3 枚) によって、ひずみ分布に顕著な違いは認められなかった (全て圧縮側)。

【コンクリートの調合の影響】 柱形状が同一で、EC035 と EC035R の柱 No. 1 と No. 8 のひずみ分布を比較すると、ほぼ同じであることがわかる。また、OPC35 と MPC28 の柱 No. 2 と No. 9 を比較してもほぼ同じであった。しかし、柱 No. 1, 8 のひずみ分布と、柱 No. 2, 9 のひずみ分布とを比較すると、DF 位置 (H:3150mm) のひずみに顕著な違いが見られた。柱 No. 1, 8 のひずみは引張側 (+953 μ , +1159 μ)、柱 No. 2, 9 のひずみは圧縮側 (-97 μ , -333 μ) となった。この違いはコンクリートの収縮性状の違いによるものと推察される。

4.7.3 結果の分析

前述のように、DF の有無によりひずみ分布が大きく異なることがわかった。そこで、ひずみとコンクリートの物性、ならびにひずみとコア強度について検討した。

【コンクリートの諸物性とひずみの関係】 DF を有する柱試験体内、同一形状の柱 No. 1, 2, 8, 9 を対象に検討した。図 31 に、ひずみと関係が深いと考えられるコンクリートの凝結時間・自己収縮ひずみ・沈降量と、DF の有無によって生じるひずみの差 ($\Delta \epsilon_{DF}$ = DF 位置のひずみ量 - DF 上下のひずみ量の平均値) との関係を示す。同図より、凝結時間や沈降量は、 $\Delta \epsilon_{DF}$ に影響を与えていると考えられる。しかし、自己収縮ひずみについては相関が認められなかった。

【ひずみとコア強度の関係】 同様に、同一形状の柱 No. 1, 2, 8, 9 を対象に検討した。図 32 に、 $\Delta \epsilon_{DF}$ と、最大 $_{28}S_{91}$ ・ コア強度の変動係数・DF 影響係数・DF による強度低下率との関係を示す。同図より、 $\Delta \epsilon_{DF}$ が大きい程、コア強度に与える影響は大きくなることがわかる。今回の実験では、DF 位置におけるコアを採取することができなかつたため、直接的にひずみ量とコア強度を比較することはできなかったが、DF を有する CFT 柱の場合、DF の上下・近傍では大きなひずみ差が生じ、それがコア強度の分布に影響を与えることが推察された。

5. 実験結果の概要

廃棄物を利用した環境配慮型セメントの適用対象拡大を目的として、エコセメントを用いたコンクリートを CFT 造の充填コンクリートとして採用する上での技術的課題について検討を行った。本開発での成果を以下に示す。

5.1 施工品質について

一般的に、CFT 造の各種性能を確保する上で必要となる主な施工品質の目標としては、以下の二点が考えられる。

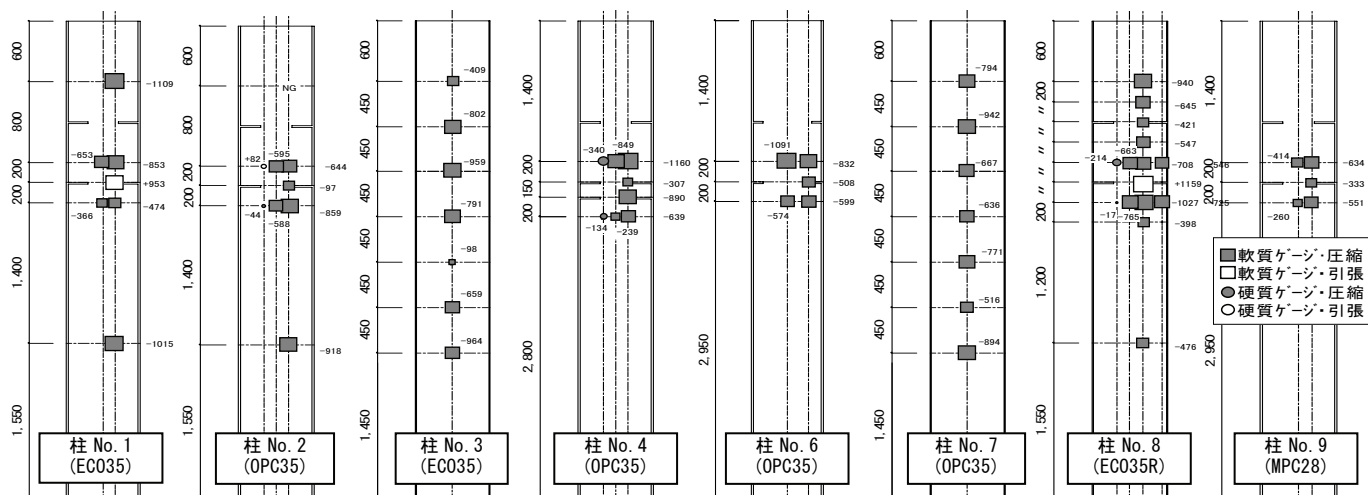


図 30 CFT 柱試験体内コンクリートの最終ひずみ分布

- ・鋼管内にコンクリートを密実に充填させること
 - ・硬化後の充填コンクリートが所定の性能を発揮すること
- これらについては、エコセメントを用いた場合でも従来から使用されているセメントを用いた場合と同様に、必要な性状を確保することができ、実務上問題なくCFT造に適用可能であることが確認できた。また、関連する実用上有益な各種数値データの蓄積が実現できた。

5.2 耐久性能について

エコセメントでは、原料となっている廃棄物に起因してセメント中の塩化物イオン量が若干大きくなる。加えて、CFT造で採用される高流動コンクリートでは単位セメント量が多くなるため、耐久性能に及ぼす影響が更に大きくなる懸念される。本開発ではこれらを検討するために、コンクリート中の塩化物イオン量と鋼材に対する腐食抵抗性について、相対的な比較検討を行った。その結果、エコセメントを用いた場合の塩化物イオン量の実用的な評価方法を提示するとともに、通常の充填コンクリートの調合であれば、一般的なコンクリートと同等以上の腐食抵抗性の確保が可能であることを確認した。

5.3 構造体としての一体性について

CFT造特有の現象として、ダイアフラム近傍における構造体コンクリート強度の低下が報告されている⁵⁾。以前より、充填コンクリートの収縮等に伴う内部ひずみがダイアフラムの拘束により局部的に集中することが一因であると考へており、この点を明らかにするため、本開発では実大施工実験を実施し、ダイアフラム近傍におけるコンクリートの充填直後からのひずみ挙動の追跡を試みた。加えて、

これらの結果と実際の構造体コンクリート強度(コア強度)との関係から、ダイアフラム近傍における強度低下メカニズムについて考察を行った。

5.3.1 収縮特性

収縮現象と関係が深い凝結時間について、凝結が遅いものほどダイアフラム近傍でひずみが集中し、コア強度もばらつく傾向が見られた。初期の収縮現象がダイアフラム近傍での構造体コンクリート強度低下に影響を与えていることを示唆する現象であると評価される。

5.3.2 ダイアフラム詳細

ダイアフラム開口率とひずみとの関係では、計測結果およびコア強度からは有意な関係性は認められなかった。本実験では一般的な開口率を対象としており、この範囲では影響は小さいものと判断できるが、更に極端な条件下では何らかの影響が現れる可能性も考えられる。一方、ダイアフラム近傍でひび割れ発生が推測されるレベルの大きなひずみが検出されたのに対し、採取コアの外観や圧縮強度、超音波伝播速度からは過度な損傷を示唆する結果が得られておらず、今回着目した収縮等に伴う内部ひずみの影響をもって、全ての現象を説明するには至らなかった。また、本実験で得られたコア強度のばらつきの程度は、既往のデータに比べ総じて小さなものであった。類似の結果は、本実験と同様にコア強度試験時の材齢が91日と長期材齢のときに見られ⁵⁾、材齢経過に伴い構造体コンクリート強度のばらつきが減少したという事象と併せて報告されている。このような現象の理由としては、コンクリートの自己修復機能が想起され、今回初期に大きなひずみが生じたにもかかわらず、硬化後の物性への影響が顕著でなかったことの説明とも符合する。

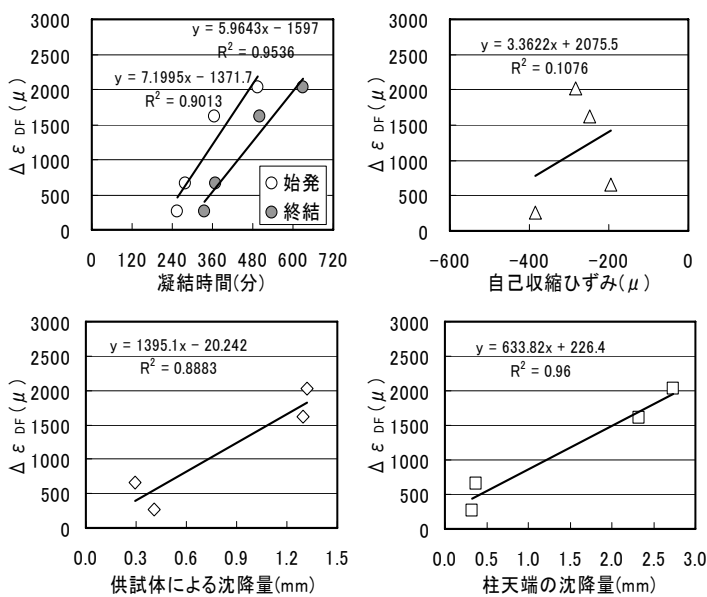


図 31 コンクリートの諸物性とひずみ差

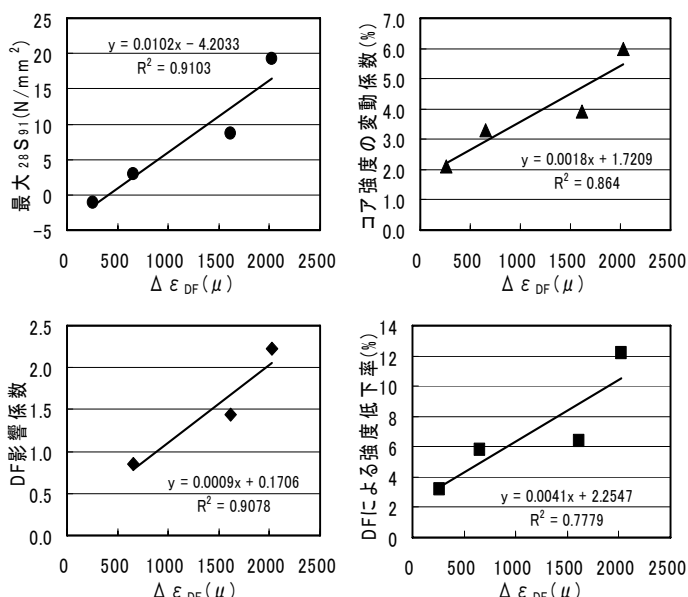


図 32 ひずみ差とコア強度

5.4 残された課題と今後の展望

5.4.1 材料特性のばらつきへの対応

本開発では平成18、19年度の2年間にわたって各種の材料・施工関連の実験を実施しているが、エコセメントを使ったコンクリートの性状を横断的に比較すると、例えば混和剤の添加量と沈降量との関係に再現性が見られないなど、セメント自体のばらつきに起因すると思われる事象が見られた。この理由としては、廃棄物を原材料としていることの宿命として化学成分の構成が生産ロットによって変動することに對し、現時点では製造量が少ないため、調整が難しいこと、製品化されて日が浅く改善策も未だ発展途上であること、などがあるものと推察される。CFT 造に用いる充填コンクリートではフレッシュ性状の安定が欠かせない条件であることから、実際に充填を行う直前に同一ロットのセメントを使った試し練りを行って調合を微調整するなど、品質管理面での対応を講じておく必要があると考える。

5.4.2 耐久性関連規定の緩和

CFT 造では飛来塩分など外部からの劣化要素の影響を受けにくく、乾燥に伴う内部での水分移動が生じにくいなど、部材構成上の理由に基づく耐久性の向上が期待できるが、本研究では具体的な効果に対する定量的な把握は行わなかった。今後は、CFT 造を対象とした耐久性関連規定の緩和まで視野に入れながら、関連データの蓄積・評価などを進めていきたいと考える。

5.4.3 合理的な調合設計手法の確立

本開発では、前述のとおりダイアフラム近傍における構造体コンクリート強度低下の影響因子を一部把握することができたが、ひずみ計測中のコア採取を避けたため、若材齢のコア強度が確認できなかったなど不十分な点も多く、構造体コンクリート強度の低下メカニズムを確立するまでには至らなかった。この点については、初期だけでなくある程度長期材齢の挙動も考慮に入れながら、今回の実験結果および既往データの詳細な分析・評価を中心に、引続き検討を行いたいと考える。更に、この結果を踏まえ、調合条件や部材の形状・寸法をパラメータとした構造体コンクリート強度補正值を提案し、合理的なCFT 造用充填コンクリートの調合設計手法の確立を目指したいと考えている。具体的には、例えば凝結時間に応じて強度補正值(Sd値¹¹⁾)を大きくする、凝結が遅れる要因となる①冬期施工、②混合セメントの使用、③遅延型混和剤の使用、④貧調合、などの場合以外はSd値の低減を認めるという方法もイメージできる。

6. まとめ

本開発の結果、エコセメントを使用したコンクリートをCFT 造用充填コンクリートとして適用していく上で必要となる知見を得ることができ、大きな実用上の成果が得られたものとする。また、凝結前後の収縮など初期の挙動が構造体コンクリート強度など硬化後の物性に及ぼす影響について考察を行っているが、この分野は従来あまり着目されていなかった領域で、既往の研究も少ない。その理由としては、例えば一般的なRC 構造物では収縮を拘束する鉄筋が部材内に十分分散されているため、そもそも問題となるような強度低下現象が生じないといったことがあると思われる。この点CFT 造では、①柱筒体部には収縮を拘束するものがない反面仕口部には強力な拘束材であるダイアフラムが存在し、ひずみの集中という面で非常に厳しい構造形式となっている、②充填性確保のためフレッシュ性状の保持性を高めた高流動コンクリートを採用するなど結果的に凝結が遅い材料を使うことが多い、など問題を顕在化させる条件が揃っており、当該分野の研究価値はその分高くなっていると言える。そのような視点に立てば、新しい研究分野を発掘し今後の発展に向けた契機を与えたということで、本研究は有意義なものであったと考える。

【謝辞】

本開発では、名城大学寺西研究室および石川研究室、アサノコンクリート(株)、太平洋セメント(株)、(有)TRD、(社)新都市ハウジング協会のご協力を得た。ここに記し、謝意を表します。

【参考文献】

- 1) 小野義徳、大森啓至、田熊靖久：都市ゴミ焼却灰から製造されるエコセメント、セメント・コンクリート、No.586、pp.1~8、1995.12
- 2) JIS R 5214「エコセメント」2003
- 3) 香田伸次、他：環境配慮型CFT 造に関する研究(その1~その10)、日本建築学会学術講演梗概集A-1、pp.1155~1174、2007.8
- 4) 梅本宗宏、他：環境配慮型CFT 造に関する研究(その11~その22)、日本建築学会学術講演梗概集A-1、pp.533~556、2008.9
- 5) 新都市ハウジング協会 CFT 造施工技術研究会：ダイアフラムが構造体コンクリート強度に与える影響を考慮したCFT 造用コンクリートの調合強度算定式の提案、日本建築学会技術報告集、Vol.19、pp.5~9、2004.6
- 6) 日本コンクリート工学協会：JCI 規準集(1977~2002年度)、2004.4
- 7) 日本建築学会：建築工事標準仕様書「JASS 5 鉄筋コンクリート工事」、2003
- 8) JIS A 1144「フレッシュコンクリート中の水の塩化物イオン濃度試験方法」2001
- 9) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説—許容応力度設計法—、1999.11
- 10) 梅本宗宏、他：CFT 柱の構造体コンクリート強度確認実験(その3 硬化コンクリートの試験結果)、日本建築学会大会学術講演梗概集A-1、pp.847~848、2002.8
- 11) 新都市ハウジング協会：コンクリート充填鋼管(CFT)造技術指針・同解説、2005
- 12) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建築物の収縮ひび割れ制御設計・施工指針(案)・同解説、2006.2