

論文 環境負荷低減型セメントを用いたコンクリートの強度発現および実機での製造に関する実験的検討

濱崎 仁^{*1}・棚野 博之^{*2}・木村 正尚^{*3}・長塩 靖祐^{*4}

要旨：都市ゴミ焼却灰および下水汚泥等を主原料とした環境負荷低減型セメントは、鉱物組成や粉末度、塩化物量などが普通ポルトランドセメントと異なる。本研究では、2 年までの長期材齢および養生温度が異なる場合の強度発現に関する実験、実機プラントによる製造および試験施工を行った。普通ポルトランドセメントと比較した場合、長期の強度増進は小さくなるが、5℃～35℃の範囲での養生温度が強度発現性状に及ぼす影響は同等であることが確認された。試験施工については、製造、打設ともに問題はなく、品質の変動も小さいことが確認された。

キーワード：環境負荷低減型セメント、強度発現、温度補正、試験施工、品質変動

1. はじめに

近年、環境負荷低減を目的とし、都市ゴミ焼却灰および下水汚泥等を主原料とした環境負荷低減型セメント（以下、EC）が開発され、平成12年5月にTR R 0002 エコセメントとして公表されている。しかしながら、鉱物組成や粉末度などが普通ポルトランドセメント（以下、OPC）と異なる点があることから、筆者らはこれまでの研究において、調合、強度発現、乾燥収縮、中性化、鉄筋腐食等に関する諸特性を明らかにしてきた^{1),2),3),4)}。

一方、構造物への適用にあたっては、これまでの検討に加えて、強度の長期的性状や温度補正の問題、製造、運搬、打設などに関する検討

も必要となる。本研究においては、材齢2年までの長期強度発現、養生温度が異なる場合の強度発現に関する実験、実機プラントによるコンクリートの製造、試験施工を行い、鉄筋コンクリート構造物への適用の可能性を検討した。

2. 実験概要

2.1 実験の要因と水準

本研究では、3 シリーズの実験を行った。シリーズ1は、長期強度発現の把握、シリーズ2は、養生温度による強度発現性状の違いを把握することを目的とし、シリーズ3は、実機プラントでの製造、試験施工に関する実験である。

表－1に各シリーズの実験要因、水準を示す。

表－1 実験の要因と水準

シリーズ1（長期強度発現）		シリーズ2（養生温度）		シリーズ3（試験施工）	
要因	水準	要因	水準	要因	水準
セメント種類	EC（3種類）、OPC	セメント種類	EC、OPC	出荷ロット	アジテート車台数
W/C	40%、50%、60%	W/C	40%、50%、60%	採取場所	出荷時、荷卸し、筒先
養生方法	標準、気中、屋外暴露	養生方法	水中、封かん、気中、模擬柱（コア）	養生方法	標準、現場水中、現場封かん、気中

*1 独立行政法人建築研究所 材料研究グループ 工修（正会員）

*2 国土交通省国土技術政策総合研究所 建築研究部 工博（正会員）

*3 日立セメント(株) 取締役研究開発部長 工修（正会員）

*4 太平洋セメント(株) 中央研究所 第一研究部

2.2 使用材料

各実験シリーズの使用材料を表－2に示す。セメントは、シリーズ1においては、塩化物イオン量の目標値を300ppm, 500ppm, 700ppmとした3種類のEC (EC3, EC5, EC7と略す) および3社混合のOPCを用いた。シリーズ2, シリーズ3は、EC5を用いた。表－3にセメントの化学成分, 表－4に物理特性および鉱物組成を示す。なお, 本実験に使用したECは, アルカリ量と塩化物量の比を調整し, クリンカー焼成中にアルカリ金属塩化物を揮発させており, 鉱物中にカルシウムクロロアルミネートは存在しないかあるいは極めて微量である⁵⁾。

2.3 調合

表－5から表－7に各シリーズの調合を示す。調合は, スランプ $18\pm1.5\text{cm}$, 空気量 $4.5\pm1.5\%$ を目標とし, 使用材料, 温度等が異なるため, シリーズ別に定めた。

シリーズ2においては, 練上がり温度が養生温度とほぼ等しくなるように使用材料の温度をあらかじめ調整し, 温度条件による目標スランプを得るための単位水量の増減を確認した。

20℃を基準として考えた場合, 5℃においては, EC, OPCともに 5kg/m^3 の減小, 35℃においては, ECの水セメント比50%, 60%が 8kg/m^3 , OPCが 4kg/m^3 の増加であった。ECの水セメン

表－2 使用材料

シリーズ1	粗骨材	岩瀬産硬質砂岩碎石(FM=6.43)
	細骨材	鬼怒川産川砂(FM=2.52)
	混和剤	リグニンスルホン酸系 AE 減水剤
シリーズ2	粗骨材	岩瀬産硬質砂岩碎石(FM=6.80)
	細骨材	大井川産川砂(FM=2.97)
	混和剤	リグニンスルホン酸系 AE 減水剤 ポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤
シリーズ3	粗骨材	新治産碎石(FM=6.75)
	細骨材	麻生産中目砂(FM=2.61), 新治産砕砂(FM=2.80)を7:3混合
	混和剤	リグニンスルホン酸系 AE 減水剤

表－3 セメントの化学成分

セメント	化 学 成 分 (%)														
	Ig.loss	Insol.	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO	Cl	f.CaO
EC3	1.27	0.16	17.60	7.48	4.05	61.12	1.80	3.74	0.36	0.02	0.68	1.29	0.07	0.015	0.3
EC5	1.22	0.17	16.96	7.96	4.20	60.92	1.87	3.82	0.16	0.01	0.74	1.32	0.08	0.054	0.4
EC7	1.13	0.11	16.86	7.88	4.27	61.50	1.85	3.79	0.13	0.01	0.72	1.33	0.08	0.086	0.5
OPC	1.46	0.09	21.57	5.45	2.54	64.00	1.72	1.97	0.31	0.41	0.33	0.12	0.15	0.004	0.7

ト比40%においては, 単位水量の上限値である 185kg/m^3 を満足することが出来なかったため, 高性能 AE 減水剤により調整した。その他の調合においては, AE 減水剤の使用により単位水量の上限値を満足することが確認された。

シリーズ3の調合は, JASS5⁶⁾の考え方に基づき, 設計基準強度 24N/mm^2 に, 強度の割増し 3N/mm^2 , 温度補正 3N/mm^2 を加えた調合強度

表－4 物理特性および鉱物組成

セメント	密度 (g/cm^3)	比表面積 (cm^2/g)	鉱物組成(%)			
			C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
EC3	3.17	4,500	48.0	14.0	13.0	12.0
EC5	3.17	4,650	49.0	12.0	14.0	13.0
EC7	3.18	4,360	52.0	9.0	14.0	13.0
OPC	3.16	3,375	51.0	24.0	10.0	8.0

表－5 調合表 (シリーズ1)

セメント	W/C (%)	S/a (%)	単位量(kg/m^3)				混和剤 (C×%)
			W	C	S	G	
EC3	40	35	200	500	543	1032	0.25
EC5	50	44	184	368	775	968	0.25
EC7	60	46	182	303	813	968	0.25
OPC	40	38	184	460	614	1032	0.25
	50	45	180	360	769	968	0.25
	60	46	180	300	818	968	0.25

表－6 調合表 (シリーズ2)

温度 (℃)	セメント	W/C※ (%)	S/a (%)	単位量(kg/m^3)				混和剤 (C×%)
				W	C	S	G	
5	EC	40	45	182	435	735	910	0.25
		50	49	170	340	853	910	0.25
		60	50	165	275	920	910	0.25
	OPC	50	48	165	330	865	925	0.25
20	EC	40	45	185	463	721	910	0.3125
		50	49	175	350	839	910	0.25
		60	50	170	283	906	910	0.25
	OPC	50	48	170	340	844	925	0.25
35	EC	40	46	178	445	754	910	0.90***
		50	48	183	366	805	910	0.25
		60	50	178	297	874	910	0.25
	OPC	50	48	174	348	827	925	0.25

※ : 下線の水準は模擬部材によるコア強度試験を実施

*** : 高性能 AE 減水剤使用

表－7 調合表 (シリーズ3)

セメント	W/C (%)	S/a (%)	単位量(kg/m^3)				混和剤 (C×%)
			W	C	S	G	
EC	45	43	182	404	724	994	0.75

30N/mm²を満足するため、これまでに得られた実験結果^{1),2)}より水セメント比を45%とした。

2.4 試験項目および試験体

試験項目は、シリーズ1においては、圧縮強度試験、シリーズ2においては、スランプ試験、空気量試験、模擬柱試験体による内部温度の測定、および圧縮強度試験を行った。シリーズ3においては、ブリーディング試験、スランプ試験、空気量試験および圧縮強度試験を行った。

実験に用いた試験体は、圧縮強度試験は、φ100×200(mm)の円柱供試体、模擬柱試験体は、W×D×H=600×600×800(mm)の鋼製型枠を用い、試験体の上、中、下部より、φ100mmのコアを各1本ずつ採取した。各試験の試験体数は3体とした。

3. 実験結果および考察

3.1 長期強度発現

図-1に材齢28日以降2年までの標準養生試験体のセメント種類別の強度発現を示す。ECについては、塩化物量の相違により鉱物組成に違いがあるものの、長期材齢における明瞭な傾向は確認されなかったため EC5 についての結果のみを示している。EC の場合、OPC と比較すると材齢91日以後の強度増進が小さい。また、この傾向は水セメント比が大きいほど顕著である。EC の場合、C₂S などの長期強度の発現に寄与する成分が比較的少ないこと、また、ブレン値も高いことから、相対的に初期材齢において強度が発現していると考えられる。

図-2および図-3に気中養生、屋外暴露を行った試験体の強度発現を示す。図-4に水セメント比50%の養生方法別の強度発現を示す。なお、気中養生、屋外暴露の試験体は、水中浸漬を行わず気乾状態のままで試験を行っているため、含水状態による影響を含んでいる。

気中養生を行ったものは、EC、OPCともに材齢91日以降強度が低下している。ここでの気中養生とは、材齢28日まで標準養生を行った後、20℃、60%RHの恒温恒湿室中に放置したもので

ある。既往の研究⁷⁾にも見られるとおり、水中から気中に放置した後しばらくは乾燥収縮による内部摩擦などにより見かけ上強度が増加し、その後の内部摩擦の緩和と収縮応力により強度が低下したものと考えられる。

屋外暴露は標準養生28日以降、屋外に放置したものであるが、屋外暴露の場合、乾燥による見かけの強度増加と降雨などによる水分供給の両方の影響を受けることになり、材齢による強

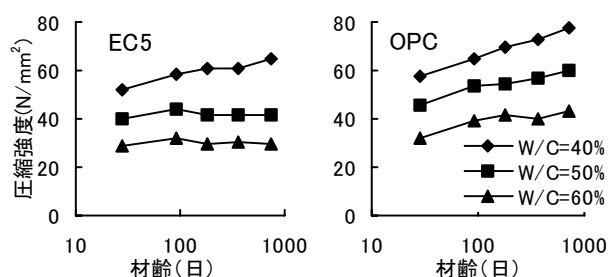


図-1 EC と OPC の強度発現の比較（標準養生）

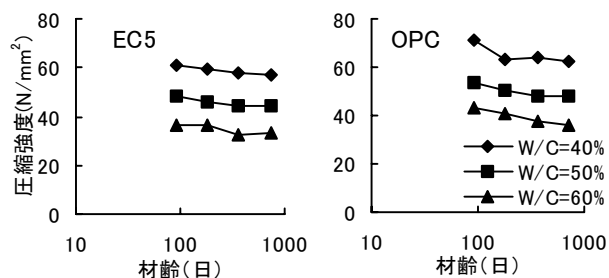


図-2 EC と OPC の強度発現の比較（気中養生）

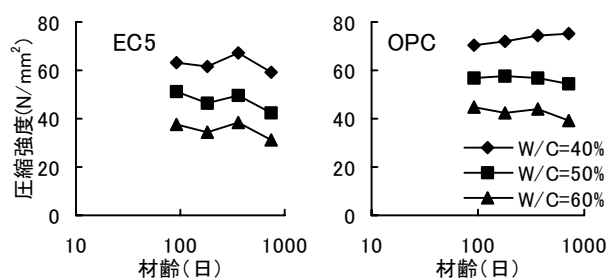


図-3 EC と OPC の強度発現の比較（屋外暴露）

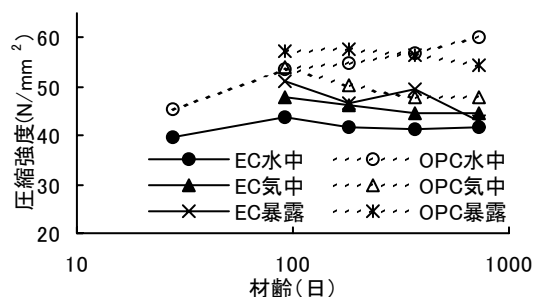


図-4 養生方法別の強度発現（W/C=50%）

度のばらつきも大きくなったものと考えられる。

養生方法別に見た場合、EC においては標準養生が最も強度が小さい。EC は、長期の強度増進が小さいことから、乾燥による見かけの強度増加が上回っているものと思われる。OPC については、水和の進行による強度増進によって長期材齢において標準養生の強度が大きくなったものと考えられる。

3.2 強度発現におよぼす養生温度の影響

図-5 に模擬柱試験体の中心部温度の経時変化を示す。加水直後は EC の温度が高くなり、温度のピークが現れる時期は OPC の方が早い。ピーク時における温度は同一水セメント比の場合、ほぼ同程度である。EC はエトリンガイトが比較的多く生成されること、ブレン値が大きいことなどから加水直後の反応が大きい、カルシウムシリケート相が少ないことから、数時間後からのエーライトの水和反応はやや遅い傾向にあると思われる。35℃環境の W/C=40% 調合については、高性能 AE 減水剤の使用により、水和進行が遅くなっているものと思われる。

図-6 に養生温度、養生方法の異なる試験体の強度発現を示す。養生温度による影響は、材齢 3 日では大きく、材齢 7 日においては、5℃と 20℃の強度差は小さくなる。材齢 28 日においては、封かん養生、水中養生の場合の養生温度に

よる強度差は小さくなる。模擬柱試験体の場合、35℃の強度が低下しており、練上がり温度が高いこと、試験体内部の温度が 60℃を超えることなども影響したものと考えられる。

図-7 に材齢 28 日において各温度の水中養生を基準とした場合の封かん養生、模擬柱試験体の強度差を示す。封かん養生と水中養生の強度差は、温度によらず同程度であり、最大で約 6N/mm² である。

模擬柱試験体は、コア採取時のマイクロクラックや骨材の緩みなども含まれるため、水中養生との強度差は大きくなる。また、35℃の場合に特に大きく低下し、その差は 10N/mm² を上回る。EC と OPC は同様の傾向を示し、その強度差も同程度である。

図-8 に材齢 28 日における 20℃水中養生試

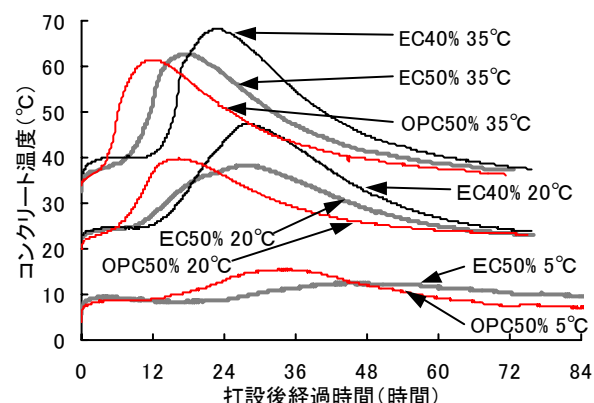


図-5 模擬柱試験体の内部温度の経時変化

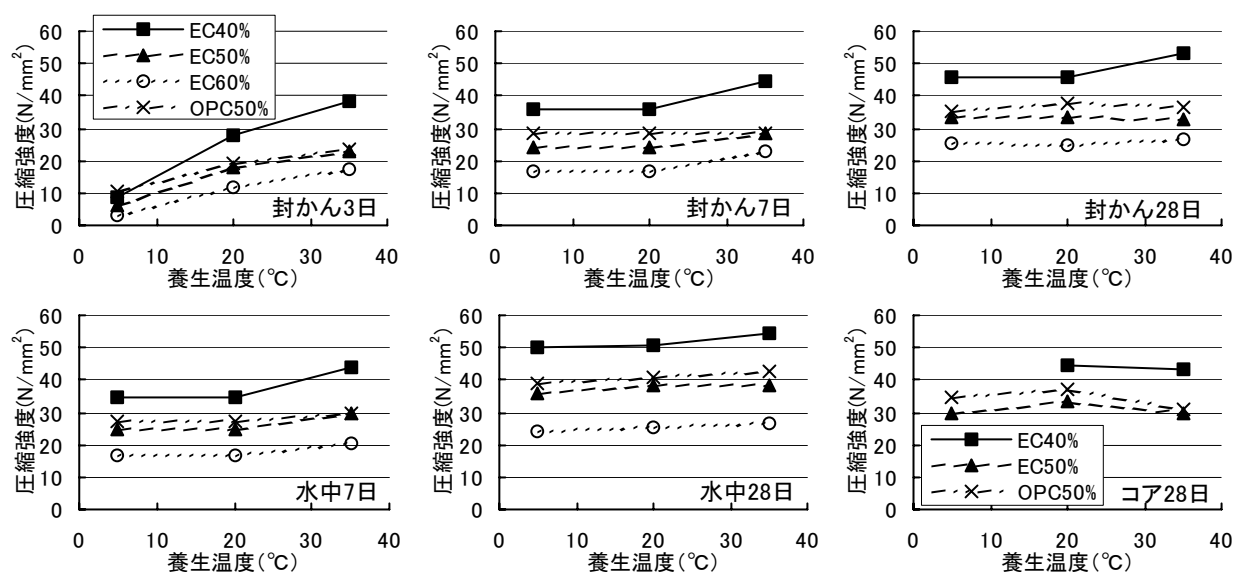
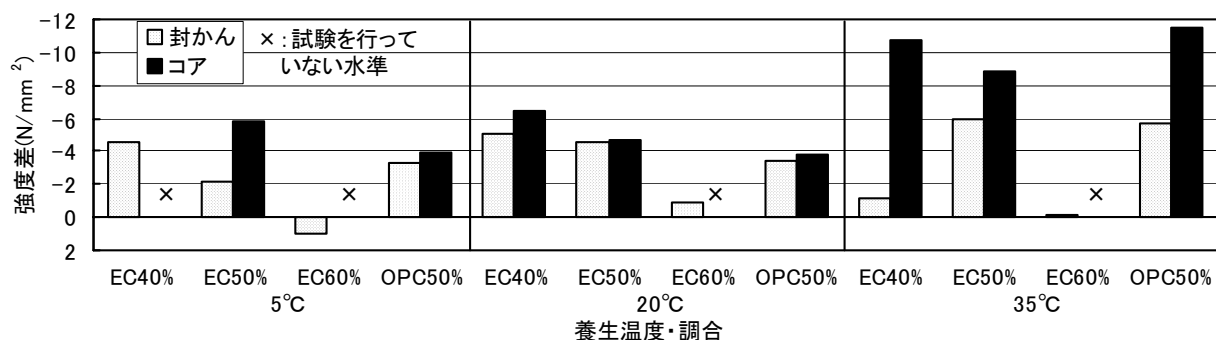


図-6 養生方法、材齢別の強度発現



図－７ 養生方法による強度差（各温度の水中養生を基準とした場合）

験体との強度差を示す。5°Cの場合、EC、OPCともに強度差は 3N/mm^2 以内の低下である。35°Cの場合、ECのW/C40%が約 4N/mm^2 大きくなり、他は 2N/mm^2 以内で大きくなる。養生温度5°Cにおいて、強度管理材齢を28日とした場合のOPCにおける温度補正值に 6N/mm^2 を採用すること⁶⁾を考慮すると、ECの温度による強度の補正はOPCと同様に考えても問題ないと思われる。

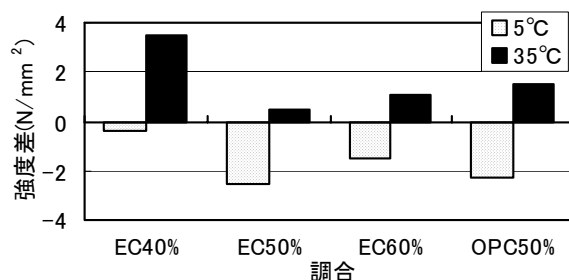
3.3 実機プラントによる製造、試験施工

実機プラントによる製造、試験施工として、茨城県新治村内のレディーミクストコンクリート工場において製造し、建築研究所シックハウス実験棟（茨城県つくば市）の基礎部分（ 156m^3 ）に打設した。アジテート車の台数は32台、打設日は平成13年3月30日である。

ポンプ圧送性、振動機による締め固め、打ち込み後の仕上げなどの現場における作業性も良好であった。

（１）フレッシュ試験

ブリーディング試験は、同一ロットに対して出荷時および筒先で試料を採取した。いずれの試料もブリーディング量が約 $0.1\text{cm}^3/\text{cm}^2$ 、ブリー



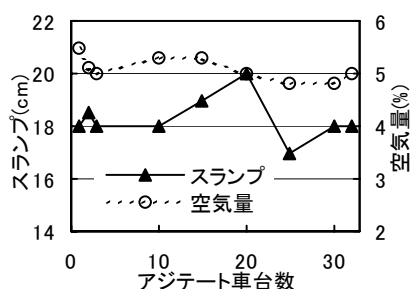
図－８ 温度による強度差

ーディング率が約0.2%であった。

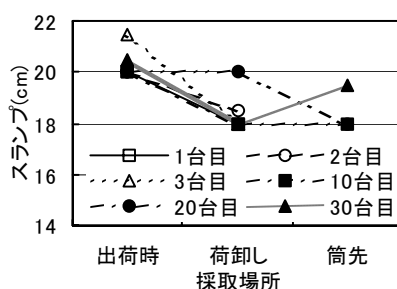
図－９に荷卸し地点でのスランプ、空気量の変動を示す。スランプはいずれも目標値を満足しており、平均値が18.3cm、標準偏差が0.83cm、最大値と最小値の差は2.5cmである。空気量もいずれも目標空気量を満足しており、平均値が5.1%、標準偏差が0.24%、最大値と最小値の差は0.7%である。スランプ、空気量ともにロット間の変動は小さく、特に問題はないと言える。

図－１０に試料採取場所によるスランプの変化を示す。プラントから現場打設までに要する時間は約30分であり、外気温は打設中を通じて約15°Cであった。スランプロスの平均は、出荷から荷卸しまでが1.9cm、荷卸しから筒先までが0.2cmであった。

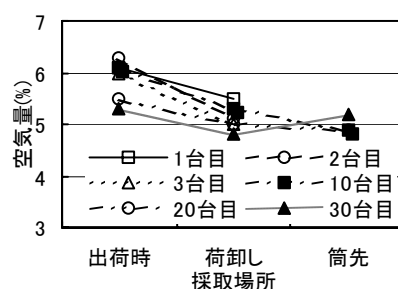
図－１１に試料採取場所による空気量の変化



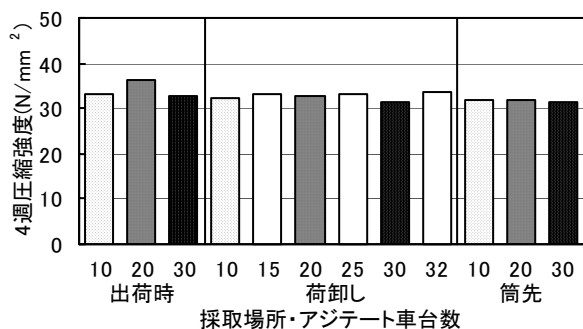
図－９ スランプ・空気量の変動



図－１０ スランプの変化



図－１１ 空気量の変化



図－１２ 採取場所，ロットによる圧縮強度

を示す。空気量のロスの平均は、出荷から荷卸しまでが 0.77%，荷卸しから筒先までが 0.03% であった。スランプ、空気量ともに 30 台目のものが筒先時点で大きくなっているが、その理由については明らかにできなかった。

（２）硬化後の試験

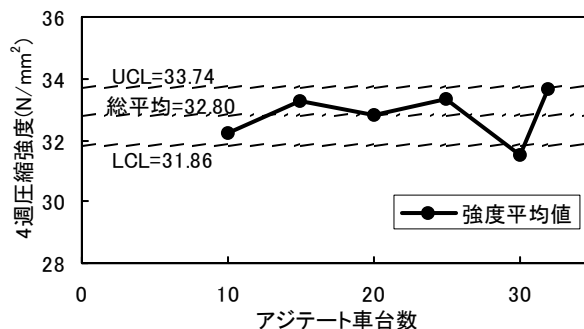
図－１２に試料採取場所，アジテート車台数ごとの 4 週圧縮強度を示す。強度はいずれも調合強度を満足している。また、全体の標準偏差（ $n=36$ ）は 1.37N/mm^2 であり、採取場所およびロット間のばらつきも少ない。

図－１３に荷卸し時点での各ロットの 4 週圧縮強度の変動を示す。30 台目において、各ロットの 3 体のばらつきを群内変動とした時の $\bar{X}$ -R 管理図における LCL（下方管理限界）を下回っている。ただし、これは群内変動が小さいことによるものであり、荷卸し時点での圧縮強度の標準偏差（ $n=18$ ）は、 0.87N/mm^2 であり、全体としてばらつきは少ないと言える。

4. まとめ

本報告をまとめると以下ようになる。

- (1) EC は、OPC と比較した場合の長期の強度増進が小さい。強度発現に及ぼす塩化物量の影響は確認されなかったが、コンクリート中の塩化物量を考慮する場合には EC5（塩化物イオン量の目標値 500ppm）程度以下に押さえることが望ましい。
- (2) 強度発現に及ぼす養生温度の影響および養生方法の影響は、EC、OPC と同程度であり、EC の強度の温度補正および養生方法による



図－１３ 圧縮強度の変動

補正は OPC と同様に考えることが出来る。

- (3) EC を用いたコンクリートを実機プラントによって製造した。フレッシュ性状、強度等のばらつきは小さく、現場での打設性についても問題はなかった。

参考文献

- 1) 濱崎仁ほか：環境負荷低減型セメントを用いたコンクリートの塩化物イオンの挙動および硬化後の諸物性，セメント・コンクリート論文集，No.54，pp.687-692，2001.2
- 2) 棚野博之ほか：環境負荷低減型セメントを使用したコンクリートの調合に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文報告集，vol.23，No.2，pp.13-18，2001.7
- 3) 棚野博之ほか：環境負荷低減型セメントを使用したコンクリートの基本性能に関する実験的研究（その 1～その 3），日本建築学会学術講演梗概集（関東），A-1 材料施工，pp.187-192，2001.9
- 4) 田中敏嗣ほか：環境負荷低減型セメントを用いたコンクリート中の鉄筋腐食に関する実験的研究（その 1～その 2），日本建築学会学術講演梗概集（関東），A-1 材料施工，pp.193-196，2001.9
- 5) 横山滋ほか：都市ゴミ焼却灰を主原料としたセメントクリンカーの生成に及ぼす Cl の影響，セメント・コンクリート論文集，No.53，2000.2
- 6) 日本建築学会：建築工事標準仕様書鉄筋コンクリート工事（JASS5），日本建築学会，1997.1
- 7) 椎名国雄：コンクリート円柱供試体の乾燥ひずみ力が強度性状におよぼす影響，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.3，pp.17-20，1981.7