

論文 エコセメントコンクリートの流動化効果に関する実験的研究

金子 樹^{*1}・守屋 健一^{*1}・嵩 英雄^{*2}

要旨：エコセメントを用いたコンクリートは、一般のコンクリートより単位水量が増加し、スランプの経時変化も大きくなる傾向がある。本研究は、エコセメントコンクリートにおよぼす流動化剤の流動化効果について流動化剤添加量を変えて試験し、添加後のスランプ増大量、諸性質について普通ポルトランドセメントと比較し、同等の流動化効果が得られることを明らかにしたものである。

キーワード：エコセメント、流動化剤、スランプ、圧縮強度、乾燥収縮、中性化、経時変化

1. はじめに

エコセメントは都市ごみ焼却灰等の廃棄物を主原料としたセメントであり、2002年にJIS R 5214「エコセメント」が制定され、JIS A 5308「レディーミクストコンクリート」のセメントの規定にも2003年の改正で取り入れられた。しかし、エコセメントを用いたコンクリートの圧縮強度^{1) 2)}、乾燥収縮^{3) 4)}、中性化⁴⁾などの基本物性に関する研究報告は多くあるが、施工に係わる研究⁵⁾や施工実績が少なく、日本建築学会の建築工事標準仕様書 JASS 5（鉄筋コンクリート工事）にはまだ規定されておらず、建設省告示 1446号「指定材料の規準を定める件」からも除外されている。

筆者らは先報⁶⁾で、エコセメントコンクリートの単位水量、スランプロスが大きくなることを明らかにした。本研究では、エコセメントにおいて単位水量が少なく、打設現場で添加しワーカビリティを増大させる流動化コンクリートへの適用を検討するため、ポリカルボン酸系流動化剤を用いて2シリーズの実験を行なった。

加量を変化させ、流動化後のスランプ増大量、諸性質を明らかにすることを目的とした。実験はベーススランプを15cmとしたコンクリートに流動化剤を添加して行った。

表-1に実験の要因と水準を示す。セメントは普通ポルトランドセメント（以下NCと略記）とECの2水準とし、スランプは流動化を行うベースコンクリートの15cmと軟練りコンクリートの18cm、21cmの3水準とした。流動化剤の添加量はNCではセメント質量×0.12%、0.15%、0.18%、0.21%、ECでは0.09%、0.12%、0.15%、0.18%の各4水準とした。

2.2 使用材料

セメントはNC（密度 3.16g/cm³、比表面積 3310cm²/g）とEC（密度 3.17g/cm³、比表面積 4220cm²/g）を使用した。骨材は大井川産川砂（絶乾密度 2.59 g/cm³、吸水率 1.46%、粗粒率 2.70）と両神産硬質砂岩碎石 2005（絶乾密度 2.69g/cm³、吸水率 0.78%、実積率 60.5%）を使用した。化学混和剤はリグニンスルホン酸系 AE 減水剤とアルキルエーテル系 AE 助剤を、流動化剤にはポ

2. 実験 1：添加量による流動化効果

2.1 実験の目的および概要

実験 1 ではエコセメント（以下 EC と略記）を用いたコンクリートに流動化剤の添加による単位水量の抑制および添

表-1 実験 1 の要因と水準

要因	水準
セメント	普通ポルトランドセメント (NC)
	普通エコセメント (EC)
スランプ	ベースコンクリート：15cm
	軟練りコンクリート：18cm, 21cm
流動化剤添加量	C×0.09%, 0.12%, 0.15%, 0.18%, 0.21%

*1 工学院大学大学院 工学研究科建築学専攻修士課程（正会員）

*2 工学院大学 建築都市デザイン学科教授 博士（工学）（正会員）

リカルボン酸系の高性能減水剤を主成分とした粉末型のものを用いた。

2.3 コンクリートの計画調査

目標スランプは流動化前のベースコンクリートで 15cm, 軟練りコンクリートで 18, 21±1.0cm とし, 空気量はポリカルボン酸系の流動化剤を用いると流動化後に増加することから目標空気量 4.0±1.0% とし, AE 減水剤には AE 助剤を, 流動化剤には消泡剤を併用して調整した。

水セメント比は 55% とし, 単位水量は試し練りにより 10 分間静置したスランプが目標となるように設定した。EC はスランプ 15~21cm の範囲で NC と同等とするために 5~7kg/m³ 増加した。

骨材量は流動化コンクリート施工指針・同解説⁷⁾を基に, 細骨材率をスランプ 18cm で粗骨材かさ容積が NC では 0.58m³/m³, EC では 0.59m³/m³ の時の値で一定とした。なお, EC は

比表面積が大きく練上がりの粘性が大きいため, 単位水量, 粗骨材かさ容積は大きくなった。

AE 減水剤添加量は NC でセメント質量×0.25%, EC では 0.30% とした。

2.4 コンクリートの練混ぜ

コンクリートは温度 20±2℃, 湿度 60±5% の恒温恒湿室で, 温度 20℃ に調節した材料を用い, 容量 55L の強制水平パン型ミキサーで 45L 練り混ぜた。練り混ぜ方法はモルタルを練り混ぜた後に粗骨材を投入し, 90 秒間練り混ぜた。練り上がり後 10 分間静置し, フレッシュコンクリート試験および供試体作製を行った。流動化するものは, その後別の 55L 強制水平パン型ミキサーに 35L 移し, 流動化剤を添加して 90 秒間練り混ぜ, 排出して再びフレッシュコンクリート試

表-2 コンクリートの計画調査

記号	目標スランプ (cm)	目標空気量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	粗骨材 かさ容積 (m ³ /m ³)	単位量(kg/m ³)			
						W	C	S	G
NC21	21	4.0	55	48.6	0.575	180	327	865	946
NC18	18				0.580	176	320	873	955
*BN15	15				0.584	173	315	879	961
EC21	21	4.0	55	47.0	0.583	187	340	823	959
EC18	18				0.590	182	331	832	971
*BE15	15				0.595	178	324	840	980

*B は流動化のベースコンクリート

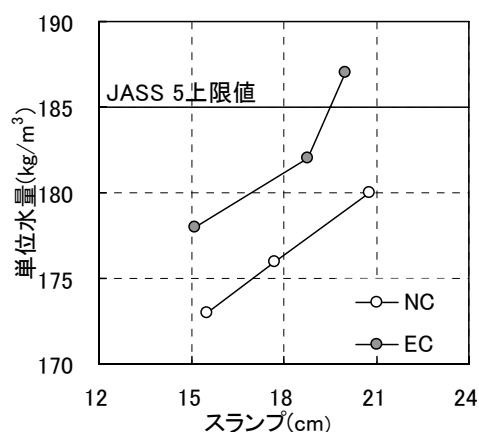


図-1 スランプと単位水量

表-3 フレッシュコンクリートおよび硬化コンクリート試験結果

記号	添加量 (c×%)		フレッシュコンクリート試験結果				硬化コンクリート試験結果					
			スランプ (cm)		空気量 (%)		圧縮強度 (N/mm ²)		乾燥収縮 (乾燥材齢 91 日)		中性化深さ (mm)	
	流動化 剤	消泡剤	流動 化前	流動 化後	流動 化前	流動 化後	7 日	28 日	長さ変化率 (×10 ⁻⁶)	質量減少率 (%)	促進 28 日	促進 56 日
NC21	—	—	20.8	—	4.9	—	26.4	35.7	713	2.72	7.9	10.0
NC18	—	—	17.7	—	4.5	—	26.9	36.7	700	2.65	7.5	9.6
BN15	—	—	15.5	—	4.0	—	27.2	38.1	756	2.66	8.2	10.6
FN15(0.12)	0.12	0.032	15.2	18.8	3.8	4.2	27.9	38.2	704	2.46	9.0	11.9
FN15(0.15)	0.15	0.040	15.1	19.5	4.4	4.1	27.4	38.2	700	2.46	7.6	10.8
FN15(0.18)	0.18	0.048	15.7	20.5	4.5	4.2	30.0	39.9	691	2.38	8.0	10.3
FN15(0.21)	0.21	0.055	15.8	20.9	3.9	3.0	28.7	39.2	651	2.43	7.6	10.8
EC21	—	—	20.0	—	3.8	—	26.3	33.6	554	3.09	10.9	15.7
EC18	—	—	18.8	—	4.4	—	25.1	32.6	520	2.92	10.8	15.7
BE15	—	—	15.1	—	4.0	—	25.6	32.6	553	2.95	10.0	15.7
FE15(0.09)	0.09	0.024	16.0	19.6	4.4	4.9	23.3	30.2	589	3.13	13.4	17.4
FE15(0.12)	0.12	0.032	16.0	20.3	4.1	4.5	24.0	32.0	575	2.92	12.4	16.2
FE15(0.15)	0.15	0.026	16.0	21.5	4.5	4.8	24.6	31.9	528	2.84	11.5	16.2
FE15(0.18)	0.18	0.032	16.0	21.3	4.3	4.1	25.2	33.9	531	2.63	12.5	15.4

験を行なった。

2.5 試験項目および試験方法

試験項目はフレッシュコンクリート試験として流動化コンクリートは流動化前後にスランプ (JIS A 1101), 空気量 (JIS A 1128), 単位容積質量, 練上がり温度の測定をした。硬化コンクリート試験は圧縮強度 (JIS A 1108, $\phi 10 \times 20\text{cm}$), 乾燥収縮 (JIS A 1129-3, $10 \times 10 \times 40\text{cm}$), 促進中性化 (JIS A 1153, $\phi 10 \times 20\text{cm}$) 試験をした。

2.6 ベースおよび軟練りコンクリート試験結果

表-3 にフレッシュコンクリートおよび硬化コンクリートの試験結果を, 図-1 にスランプと単位水量の関係をそれぞれ示す。

EC でスランプ 21cm を得るには JASS 5 の上限値である 185kg/m^3 を超える単位水量となった。

圧縮強度は EC では NC より材齢 7 日では平均で 1.2N/mm^2 , 28 日で 7.3N/mm^2 小さくなった。

乾燥収縮は EC では NC に比べ長さ変化率は小さく, 升井ら³⁾の報告と同様となった。また, EC の質量減少率は長さ変化率が小さいにもかかわらず NC よりも大きく, 濱崎ら⁴⁾の報告と同様となった。また, 普通コンクリートではスランプ 15cm のベースコンクリートの乾燥収縮が大きくなっているが, 流動化のベースコンクリートとする本実験の調合方針から, 一般の 15cm コンクリートよりも細骨材率が小さくなっているためであると考えられる。

中性化深さは NC に比べ EC の方が 1.5 倍程度大きくなった。後述する図-6 より EC の中性化は NC よりも大きい, これは EC の圧縮強度が小さいためと考えられ, 圧縮強度の逆数と中性化速度係数の関係がセメントの種類に関係なく直線回帰できることから, EC でも圧縮強度が同等であれば中性化深さは NC と同等であると考えられる。

2.7 流動化コンクリート試験結果

(1) スランプ増大量

図-2 (a) に流動化剤添加量とスランプ, スランプ増大量の関係を示す。スランプ増大量は添加量が増加するに伴い直線的に増加したが,

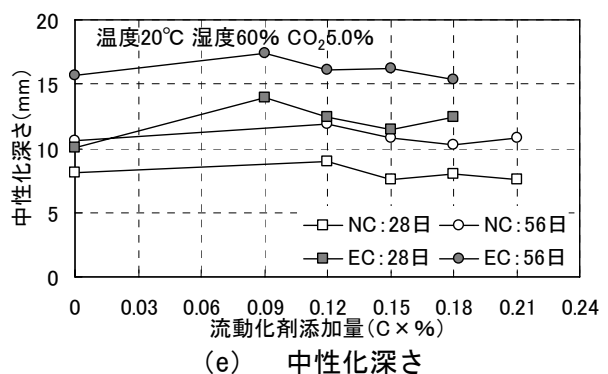
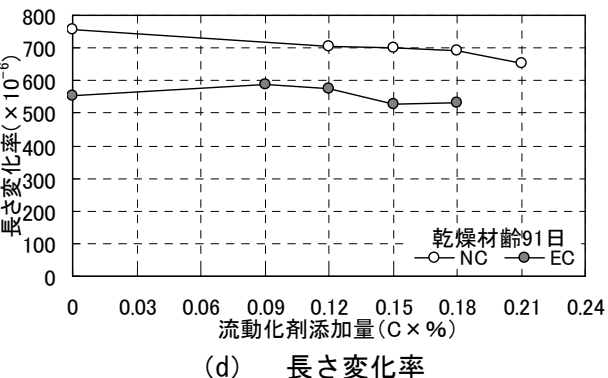
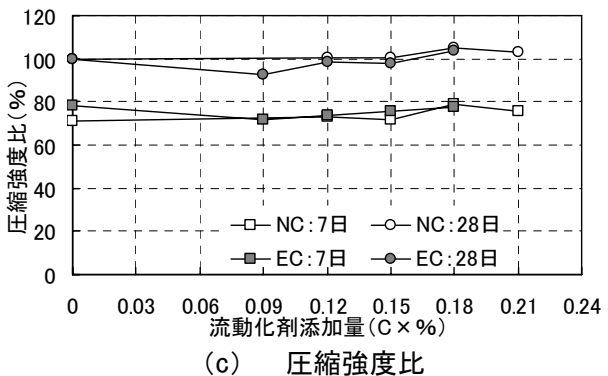
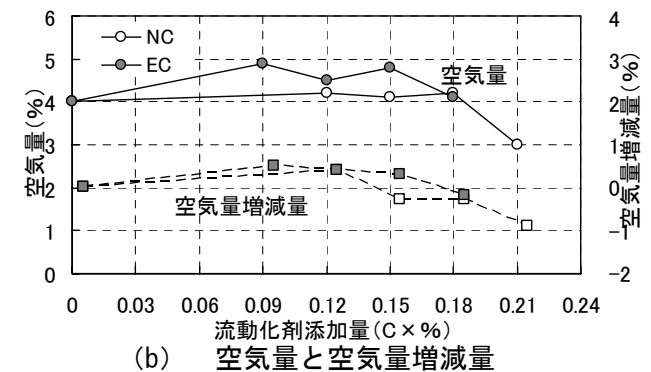
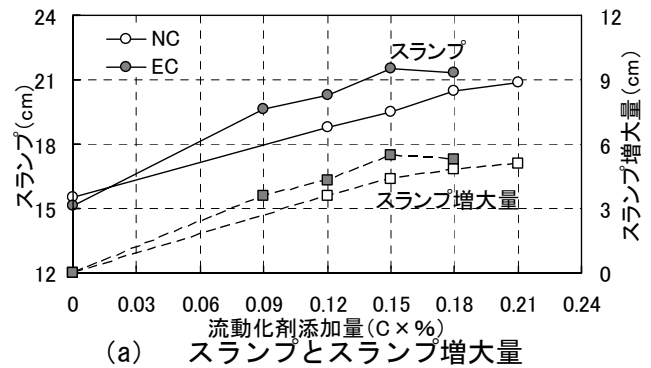


図-2 流動化剤添加量と諸性質の関係

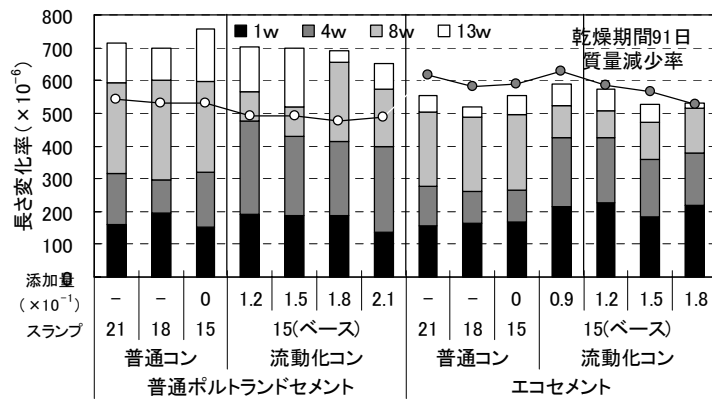


図-3 乾燥収縮試験結果

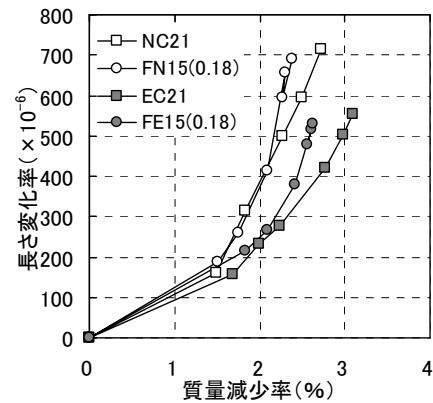


図-4 長さ変化率と質量減少率

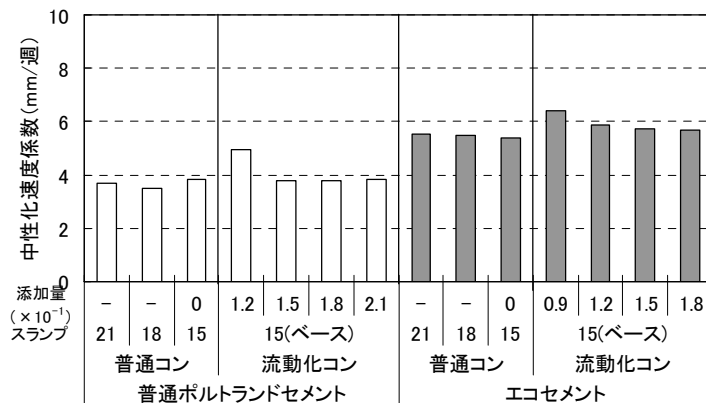


図-5 中性化速度係数

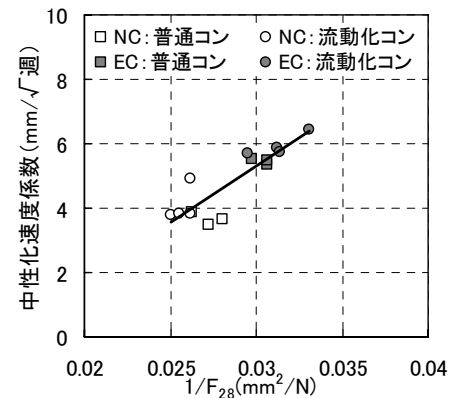


図-6 28日強度の逆数と中性化速度係数

スランプ 21cm で頭打ちとなった。これは本実験の調合で細骨材率が過少だったと考えられる。

EC のスランプ増大量は NC よりも大きく、嵩ら⁸⁾ はナフタリンスルホン酸塩系の高性能減水剤を遅延添加すると、粉末度の大きい超早強セメントではスランプの増大量が小さくなるとしている。しかし、EC は粉末度が大きいにも係わらず、スランプ増大量も大きくなった。この原因は使用した流動化剤、EC の影響であると考えられるが定かではない。

(2) 空気量

図-2 (b) に流動化剤添加量と空気量、空気量増減量の関係を示す。EC では流動化後の空気量が増加しているが消泡剤の添加量が NC よりも少なかったためであると考えられる。

(3) 圧縮強度

図-2 (c) に流動化剤添加量と圧縮強度比の関係を示す。添加量 0%，材齢 28 日圧縮強度を 100% として算出した圧縮強度比では、NC、EC

共に材齢 7 日で 28 日強度の 75～80%，28 日で EC の 0.09% 添加ではやや小さいが、ほぼ 100% と同等の強度増進となり、流動化剤の添加による強度増進に違いは見られなく、流動化剤を添加しても強度発現は同様であると評価できる。

(4) 乾燥収縮

図-2 (d) に流動化剤添加量と乾燥材齢 91 日の乾燥収縮の関係を、図-3 に乾燥収縮試験結果を、図-4 に長さ変化率と質量減少率の関係をそれぞれ示す。長さ変化率は EC の 0.09% 添加では増加したものの、EC、NC 共にベースコンクリートよりも流動化コンクリートは小さくなり、添加量の増加に伴い減少した。これは、流動化剤と共に添加した消泡剤の添加により気泡径に影響があった可能性も考えられる。

軟練りコンクリートと比較すると NC では同等かやや小さくなったが、一方で EC では少量添加でやや大きくなるものの、流動化後スランプ 21cm の 0.15%，0.18% 添加では同程度となった。

質量減少率は NC, EC 共に流動化コンクリートでは小さくなった。

(6) 中性化

図-2 (e) に流動化剤添加量と中性化深さの関係を、図-5 に $C=A\sqrt{t}$ で近似した中性化速度係数を、図-6 に 28 日圧縮強度の逆数と中性化速度係数の関係をそれぞれ示す。中性化深さ、中性化速度係数で NC, EC とともにベースコンクリートよりもやや大きくなるが、添加量 0.15～0.21%では同程度となった。また、流動化コンクリートでも EC の圧縮強度が NC と同等であれば中性化も同等であると評価できる。

2.7 実験 1 のまとめ

EC の流動化剤によるスランプ増大量は NP よりも大きく、流動化剤を添加することで単位水量 185kg/m^3 以下でスランプ 21cm を得ることができる。また、添加量の影響は多少あるが流動化コンクリートの圧縮強度、乾燥収縮、中性化は同程度であった。しかし、EC に対する流動化剤の吸着挙動、分散機構や消泡剤による気泡への影響は今後の課題である。

3. 実験 2：流動化剤によるスランプ回復効果

3.1 実験の目的および概要

実験 2 では、スランプ低下したコンクリートの流動化剤によるスランプ回復効果および流動化コンクリートの経時変化によるスランプ、空気量のロス进行を明らかにすることを目的とした。

実験はベーススランプ 18cm のコンクリートを 12, 15cm までロスさせたものに流動化剤を添加し 21cm にしたコンクリートを静置し、フレッシュコンクリート試験を行った。

3.2 使用材料およびコンクリートの調合

使用材料は実験 1 と同様のものを使用した。コンクリートの調合を表-4 に示す。流動化剤添加量は NC, EC とともにスランプ 12→21cm でセメント質量×0.21%, 15→21cm で 0.18%とした。

3.3 試験方法

ベーススランプ 18cm のコンクリートを実験 1 の練り混ぜ方法と同様に 45L 練り混ぜ、静置により所定のスランプになったコンクリートを別のミキサーに全量移し、流動化剤を添加して 90 秒間練り混ぜ、排出、静置し 15 分毎にフレッシュコンクリート試験を行った。

表-4 コンクリートの計画調合とスランプ試験結果

記号	ベースコンクリートの計画調合								スランプ試験結果 (cm)							
	目標 スランプ (cm)	目標 空気量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)				流動化剤 添加量 (C×%)	流動化前		流動化後				
					W	C	S	G		練り上 がり時	添加前	0min	15min	30min	45min	60min
FN15-21	18	4.0	55	48.6	176	320	873	955	0.18	18.2	14.8	21.0	19.5	19.4	18.9	—
FN12-21									0.21	17.5	12.5	20.6	20.4	19.5	16.5	—
FE15-21	18	4.0	55	47.0	182	331	832	971	0.18	17.7	15.5	21.7	21.5	21.0	20.0	18.0
FE12-21									0.21	17.7	11.9	21.0	20.2	20.2	18.7	—

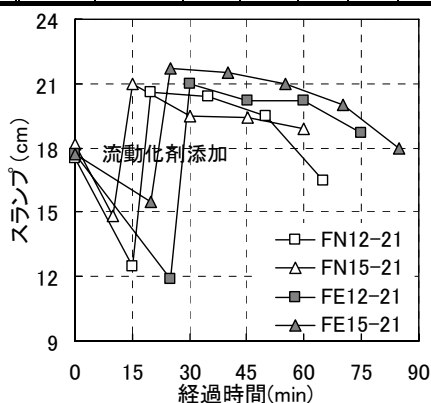


図-8 経過時間とスランプ

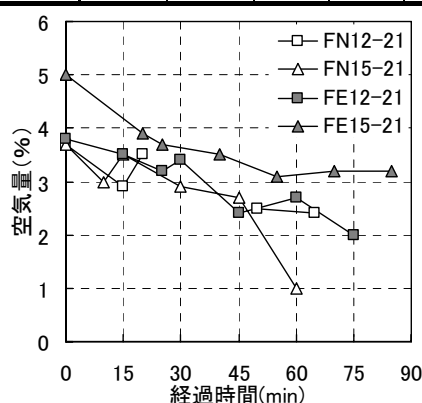


図-9 経過時間と空気量

3.4 実験結果および考察

表-4 にスランプ試験結果を、図-8 に経過時間とスランプの関係を、図-9 に経過時間と空気量の関係をそれぞれ示す。

流動化前のコンクリートの静置による経時変化のスランプロスは一時的に減少していたが⁶⁾とは異なり、ECの方が小さくなった。

スランプ回復後のスランプ、空気量のロスはNC、EC共に同程度であり、12→21cm、15→21cmでも静置時間45分でスランプは約3cmと同程度のロスであった。ナフタリンスルホン酸塩系の流動化剤を用いた池田ら⁹⁾は流動化コンクリートのスランプロスは普通コンクリートよりも大きいと報告しているが、本実験ではポリカルボン酸系の流動化剤を使用したため流動化コンクリートの方が小さくなったと考えられる。

3.5 実験2のまとめ

スランプ低下したコンクリートの流動化剤によるスランプ回復効果はNCとECは同程度であり、流動化後のスランプロスも同程度であった。

4. まとめ

本実験の結果より、エコセメントへの流動化効果についてまとめると以下ようになる。

- 1) 流動化剤の添加によるスランプ増大効果は普通ポルトランドセメントよりも大きい。
- 2) 流動化剤を用いてスランプ15cmから21cmとすることで単位水量を185kg/m³以下とすることが可能である。
- 3) 流動化剤の添加による圧縮強度、中性化、乾燥収縮の品質低下は見られなかった。
- 4) スランプ低下したコンクリートの流動化剤によるスランプ回復効果は普通ポルトランドセメントと同程度である。
- 5) 流動化効果、スランプ回復効果は普通ポルトランドセメントと同等である。

謝辞：本研究は、文部科学省学術フロンティア整備事業による工学院大学地震防災・環境共生研究センター（EEC）、日本建築学会エコセメン

ト研究小委員会（主査：梶田佳寛）の研究の一環として実施された。研究にあたり資料提供その他の便宜を図っていただいたライオン（株）化学品研究所各位にここに記し謝意を表します。

参考文献

- 1) 佐藤幸恵，梶田佳寛：エコセメントを用いるコンクリートの強度発現と混和材による長期強度の改善，コンクリート工学年次論文集，pp.47～52，2006.7
- 2) 金子樹ほか：エコセメントを用いたコンクリートの強度発現性に関する実験的研究，日本建築学構造系論文集，第615号，pp.1～6，2007.5
- 3) 升井博之ほか：エコセメントを使用したコンクリートの時間依存性ひずみに関する研究（その1），日本建築学会大会学術講演梗概集（関東）A-1，pp.263～264，2006.9
- 4) 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.687～691，2000
- 5) 棚木隆ほか：エコセメントを使用したコンクリートによるセメント製造施設の施工（その1，2），日本建築学会大会学術講演梗概集（近畿）A-1，pp.89～92，2005.9
- 6) 渡辺創一郎ほか：エコセメントを用いたコンクリートのフレッシュ性状に関する実験的研究，日本建築学会大会学術講演梗概集（関東）A-1，pp.253～254，2006.9
- 7) 日本建築学会：流動化コンクリート施工指針・同解説，5節，p.69，1989.9
- 8) 嵩英雄ほか：高性能減水剤の遅延添加による高流動コンクリートについて（第4報），日本建築学会大会学術講演梗概集（東海），pp.91～92，1976.10
- 9) 池田正志ほか：高性能減水剤の遅延添加による高流動コンクリートについて（第3報），日本建築学会大会学術講演梗概集（東海），pp.89～90，1976.10