

論文 フライアッシュ少量混合普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートの性能に関する研究

吉田 潤平*1・堺 孝司*2・武知 隆男*3・石井 光裕*4

要旨: 本研究はフライアッシュを少量混合成分として用いたコンクリートのフレッシュ性状, 強度特性, 耐久性および環境性能についての検討を行った。その結果, フライアッシュを少量混合すると, AE 減水剤の使用量を低減することができること, 材齢 91 日でフライアッシュ無混入の場合と同程度の圧縮強度を得ることができるが, 使用するフライアッシュによって強度発現に比較的ばらつきが生じること, および, フライアッシュを混合すると単位圧縮強度当たりの CO₂ 排出量で表す環境性能が材齢とともに大きくなること, 等が明らかとなった。

キーワード: セメント少量混合, フライアッシュ, 圧縮強度, 長さ変化率, 中性化深さ, 環境性能

1. はじめに

現在, 日本では, ポルトランドセメントに少量混合成分として, 5%以下の混和材の利用が認められている。混和材としては, 高炉スラグ, シリカ質混合材, フライアッシュ I 種または II 種, および石灰石が考慮されている。実際には, フライアッシュはほとんど用いられていないようである。しかし, 今後も大量に発生するフライアッシュの安定的な処理・利用は電力会社にとって極めて重要な課題であり, セメントで未だ実用化されていないフライアッシュの少量混合成分としての利用に向けた種々の検討が必要となっている。また, 2009 年 11 月に行われた, JIS 規格の改正に伴い, 少量混合成分の利用は, 普通ポルトランドセメントだけでなく, 早強ポルトランドセメントおよび超早強ポルトランドセメントへの利用も認められ, 利用の幅が広がった。フライアッシュの合理的な利用の 1 つの方法とである少量混合成分としての可能性を検討することは, 環境問題も含めた今後の混和材利用のあり方を考える上で有益である。

以上のような背景を考慮して, 本研究では, まず基本的な普通ポルトランドセメントにフライアッシュを少量混合したコンクリートの強度および耐久性について広範な検討を行った。フライアッシュ利用による性能を向上させる目的で, フライアッシュのセメント置換および細骨材置換の組み合わせ効果についても検討した。近年, 環境問題もその重要性を増してきており, 大きな環境負荷を生み出しているコンクリート分野においても, 今後は環境負荷低減を図っていく必要がある。著者らもこれまで, コンクリートの環境性能についての定量的な評価を行ってきた¹⁾。このような観点から, 本研究において

表-1 材料の種類および品質

材料(記号)	種類	品質
セメント(C)	研究用セメント	密度3.16g/cm ³ 比表面積3480cm ² /g
	普通ポルトランドセメント	密度3.16g/cm ³ 比表面積3330cm ² /g
細骨材(S)	砕砂(砂岩)	表乾密度2.55g/cm ³
		吸水率2.22%
		粗粒率5.3
		微粒分量2.7%
粗骨材(1505)	碎石(砂岩)	表乾密度2.59g/cm ³
		吸水率1.97%
		粗粒率6.21
粗骨材(2010)	碎石(砂岩)	表乾密度2.59g/cm ³
		吸水率1.96%
		粗粒率7.08
混和剤	AE減水剤	ポリカルボン酸 エーテル系化合物
	AE剤	高アルキルカルボン酸系 陰イオン界面活性剤

表-2 フライアッシュの品質

種類	ロット番号	密度 (g/cm ³)	比表面積 (cm ² /g)	強熱減量 (%)	フロー値比 (%)	活性度指数 (%)	
						材齢28日	材齢91日
I 種	1	2.49	5500	1.7	111	91	105
	2	2.43	5410	2.1	109	90	108
	3	2.40	5220	1.8	111	91	106
II 種	1	2.33	4070	1.7	106	85	98
	2	2.30	4160	2.1	106	85	100
	3	2.27	4260	2.2	108	86	96

もコンクリートの CO₂ 排出量についての検討を行った。

2. 実験概要

2.1 使用材料

*1 香川大学大学院 工学研究科 安全システム建設工学専攻 (正会員)

*2 香川大学 工学部 安全システム建設工学科 工博 (正会員)

*3 四国電力(株) 土木建築部 (正会員)

*4 (株)四国総合研究所 土木技術部 博(工) (正会員)

表-3 コンクリートの配合

配合記号	フライアッシュの種類	フライアッシュ混合率 FA	細骨材率 s/a (%)	水 W	セメント C	フライアッシュ			細骨材 S	粗骨材 G	AE減水剤 (原液)	AE剤 (100倍液)	スランブ (cm)	空気量 (%)
						セメント 質量置換 FAc	細骨材 補充分 FAs	合計 FA						
						(kg/m ³)								
M		0	45	175	318	0	0	0	773	961	0.40	0.0000	11.0	5.6
R		0	45	175	318	0	0	0	773	961	0.40	0.0000	9.4	5.4
R-1-II-2.5	II種	2.5	45	175	310	8	0	8	773	958	0.40	0.0003	9.5	6.0
R-1-II-5		5	45	175	302	16	0	16	770	958	0.30	0.0003	9.5	5.4
R-1-II-10		10	45	175	302	16	16	32	752	958	0.25	0.0009	10.8	5.6
R-1-II-15		15	45	175	302	16	32	48	734	958	0.35	0.0018	10.7	5.1
R-1-I-2.5	I種	2.5	45	175	310	8	0	8	773	961	0.40	0.0003	10.1	5.9
R-1-I-5		5	45	175	302	16	0	16	770	958	0.30	0.0000	9.1	5.1
R-1-I-10		10	45	175	302	16	16	32	752	958	0.25	0.0006	9.4	4.2
R-1-I-15		15	45	175	302	16	32	48	737	958	0.30	0.0018	11.0	4.5
R-2-II-2.5	II種	2.5	45	175	310	8	0	8	773	958	0.40	0.0003	9.4	5.5
R-2-II-5		5	45	175	302	16	0	16	770	958	0.30	0.0003	9.0	4.8
R-2-II-10		10	45	175	302	16	16	32	752	958	0.30	0.0009	9.9	4.6
R-2-I-2.5	I種	2.5	45	175	310	8	0	8	773	961	0.50	0.0003	10.2	5.4
R-2-I-5		5	45	175	302	16	0	16	770	958	0.40	0.0000	9.8	4.3
R-2-I-10		10	45	175	302	16	16	32	752	958	0.35	0.0006	10.3	4.6
R-3-II-2.5	II種	2.5	45	175	310	8	0	8	773	958	0.50	0.0003	10.8	5.1
R-3-II-5		5	45	175	302	16	0	16	770	958	0.40	0.0003	10.0	4.7
R-3-II-10		10	45	175	302	16	16	32	752	958	0.35	0.0009	9.8	4.3
R-3-I-2.5	I種	2.5	45	175	310	8	0	8	773	961	0.40	0.0003	9.5	5.1
R-3-I-5		5	45	175	302	16	0	16	770	958	0.40	0.0003	10.3	5.1
R-3-I-10		10	45	175	302	16	16	32	752	958	0.35	0.0006	10.5	4.1

表-4 各配合における試験項目

配合記号	フライアッシュの種類	フライアッシュ混合率 (%)	試験項目			
			圧縮強度	長さ変化	促進中性化	凍結融解
M		0	○	○	○	○
R		0	○	○	○	○
R-1-II-2.5	II種	2.5	○	—	—	—
R-1-II-5		5	○	○	○	○
R-1-II-10		10	○	○	○	○
R-1-II-15		15	○	—	—	○
R-1-I-2.5	I種	2.5	○	—	—	—
R-1-I-5		5	○	○	○	○
R-1-I-10		10	○	○	○	○
R-1-I-15		15	○	—	—	○
R-2-II-2.5	II種	2.5	○	—	—	—
R-2-II-5		5	○	—	—	—
R-2-II-10		10	○	—	—	—
R-2-I-2.5	I種	2.5	○	—	—	—
R-2-I-5		5	○	—	—	—
R-2-I-10		10	○	—	—	—
R-3-II-2.5	II種	2.5	○	—	—	—
R-3-II-5		5	○	—	—	—
R-3-II-10		10	○	—	—	—
R-3-I-2.5	I種	2.5	○	—	—	—
R-3-I-5		5	○	—	—	—
R-3-I-10		10	○	—	—	—

表-1 および表-2 に、本研究で使用したコンクリートの材料の種類および品質を示す。

2.2 コンクリートの製造および配合

コンクリートの製造は、温度 20℃の試験室で、容量 100 リットルの強制二軸ミキサを用いて行った。練混ぜは、最初にセメント、フライアッシュ、細骨材、粗骨材を 60 秒間空練りし、次に水と混和剤を加えて 120 秒間行った。

使用するフライアッシュは四国電力産の JIS I 種および II 種とし、混合率は 2.5, 5, 10, 15% とした。ただし、10, 15% の場合については、5% 分をセメント置換し、残りの 5, 10% 分は細骨材補充分と考えることとした。また、圧縮強度については、フライアッシュの製造時期の異なる 3 ロットの品質の違いについても検討した。フ

ライアッシュを少量混合するセメントについては、市販品には既に少量混合成分が含まれているため、セメント協会が販売している研究用セメントを用いた（配合 R）。また、比較用として市販の普通ポルトランドセメント（3 社等量混合）についても試験を行った（配合 M）。

水結合材比を 55%，細骨材率を 45%，単位水量を 175kg/m³ で一定とした。また、スランブおよび空気量については、目標スランブを 10.0±1.0cm，目標空気量を 4.5±1.0% とし、これらの調整は、高性能 AE 減水剤および AE 剤で行った。本研究のコンクリートの配合を表-3 に示す。

2.3 試験項目および方法

表-4 に各配合における試験項目を示す。

(1) スランブおよび空気量

スランブ試験は、JIS A 1101 に、空気量試験は、JIS A 1128 に準拠して行った。

(2) 圧縮強度

圧縮強度試験は、供試体を作成後 1 日で脱型し、所定の期間まで 20℃水中養生を行い、JIS A 1108 に準拠して行った。

(3) 長さ変化

長さ変化試験は、10×10×40cm の供試体を用い、ダイヤルゲージ方法で、JISA1129 に準拠して行った。

(4) 促進中性化

促進中性化試験は、JISA1153 に準拠して行った。供試体は 10×10×40cm を用い、前養生として、まず、4 週間 20℃水中養生を行い、その後、温度 20℃、相対湿度 60% の恒温恒湿室で 4 週間静置した。中性化深さの測定は所定の材齢で供試体の長さ方向と直角に割裂し、

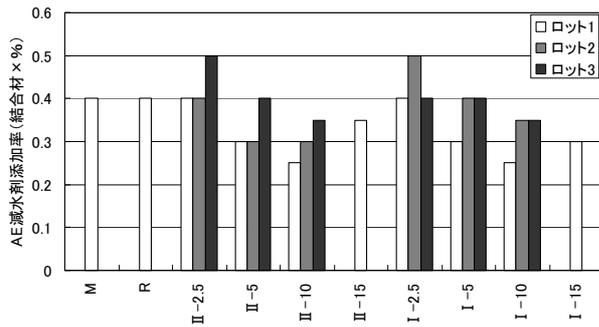


図-1 AE減水剤添加率

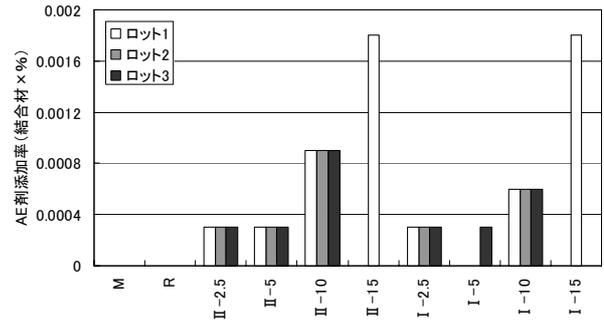


図-2 AE剤添加率

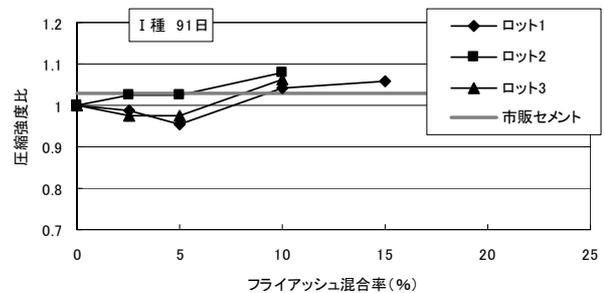
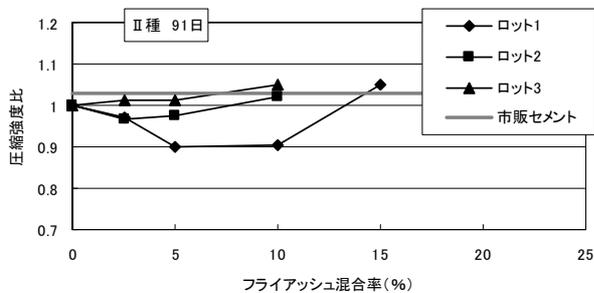
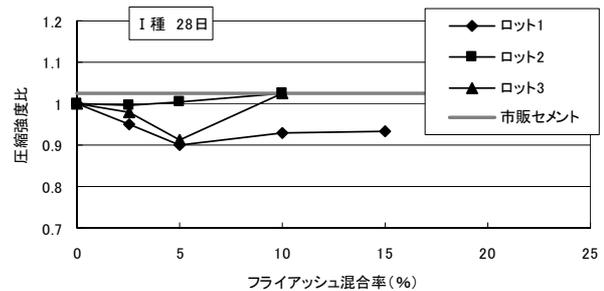
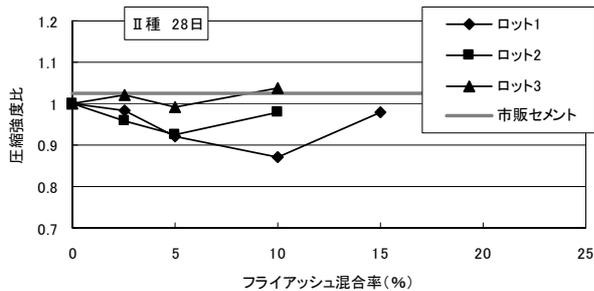
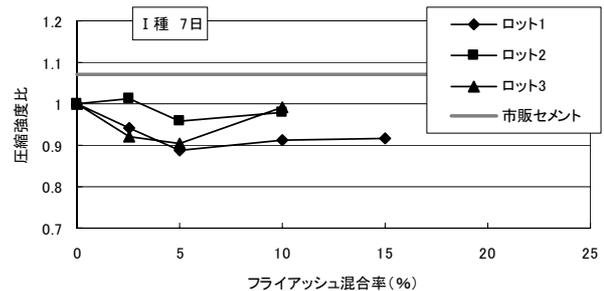
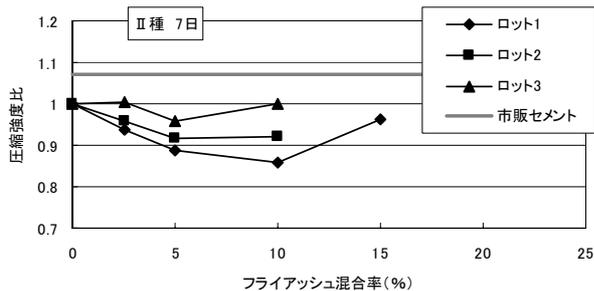


図-3 圧縮強度比

直ちにその割裂面に1%フェノールフタレイン溶液を噴霧後、表面から赤紫色に呈色した部分までの距離を1側面につき5箇所、計10箇所計測し、その平均を中性化深さとした。

(5) 凍結融解

凍結融解試験は、JIS A 1148 に準拠して行った。10×10×40cmの角柱供試体を作成した後1日で脱型し、4週間20℃水中養生を行った。その後、試験装置に供試体を入れ、1日に凍結融解を6サイクル行い、36サイクルを超えない間隔で300サイクルまで測定した。

3. 実験結果および考察

3.1 フレッシュコンクリート

(1) スランプおよび空気量

スランプおよび空気量試験の結果を表-3に示す。

(2) AE減水剤添加率およびAE剤添加率

図-1および図-2に、AE減水剤添加率およびAE剤添加率を示す。一部を除いて、フライアッシュ置換率の増加に伴い、AE減水剤量は減少している。これは、フライアッシュのボールベアリング効果により流動性が向上したと考えられる。また、フライアッシュのロットによるAE減水剤添加率の差は0.1%程度であった。

AE剤添加率は、フライアッシュの混合率の増加に伴い増加している。これは、フライアッシュ中に含まれる未

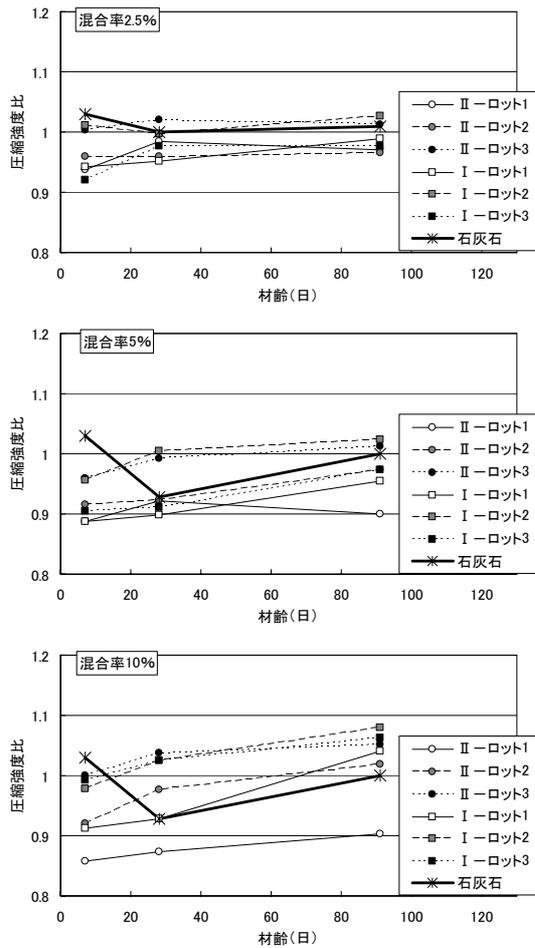


図-4 圧縮強度比の材齢変化

燃炭素がAE剤を吸着する性質を有することによりAE剤添加率が増加したと考えられる。フライアッシュのロットによる差はほとんど見られなかった。

3.2 硬化コンクリート

(1) 圧縮強度

図-3に、圧縮強度比（各圧縮強度をフライアッシュ無混入の場合の圧縮強度で除したもの）を示す。圧縮強度比はフライアッシュの種類に関わらず、全体として材齢に伴い増加している。材齢7日では、いずれの種類および混合率においても、圧縮強度比は1以下となり、フライアッシュが無混入の場合に比べて圧縮強度は低下している。材齢91日では、II種・ロット1を除いて0.95以上の圧縮強度比を得ることができた。また、I種の混合率10、15%の場合は圧縮強度比が全て1を超えた。フライアッシュのポズラン効果の結果と考えられる。しかしながら、比較的ばらつきが認められる。

図-3には、市販セメントを用いた場合の圧縮強度をフライアッシュ無混入の場合の圧縮強度で除した強度比も示している。各材齢において、その強度比は1を超えている。市販セメントは弱材齢での強度発現が大きい。この結果についての合理的な説明はできないが、I種・材齢

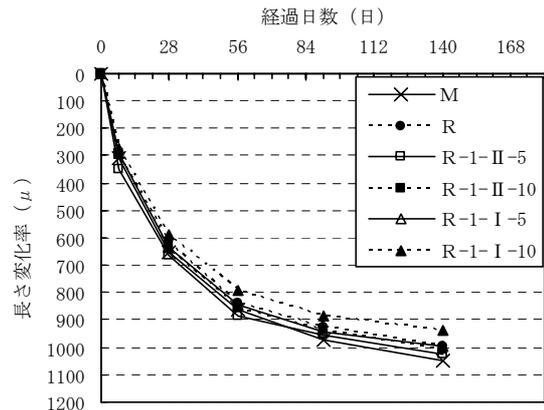


図-5 長さ変化

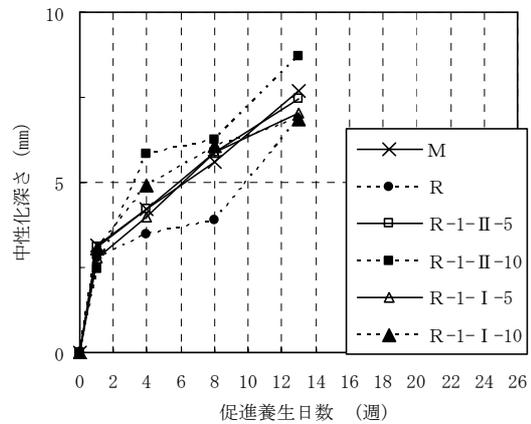


図-6 中性化深さ

91日では、フライアッシュ混合率が10および15%の場合の圧縮強度比が市販セメントの場合を上回る結果となっている。

図-4に、圧縮強度比の材齢変化を示す。また、同図には、既往の研究²⁾の石灰石微粉末を少量混合した場合のモルタル試験の結果も合わせて示した。石灰石微粉末を2.5および5%混合しているものは、7日強度は増加しているが、材齢28日では混合率5%場合その強度比が大きく減少し、その後再び増加している。これに対して、フライアッシュを混合した場合、初期強度は小さくなるが、材齢に伴い確実な強度増加が見られる。フライアッシュ混合率10%の場合、石灰石微粉末混合率5%の場合と比べると、フライアッシュ細骨材補充分のポズラン反応の効果により材齢とともに確実に強度が増加している。

(2) 長さ変化

図-5に、長さ変化試験の結果を示す。フライアッシュの混合率が増加すると、長さ変化率が減少する傾向がある。II種よりもI種のほうがその効果は大きい。また、フライアッシュI種を用いた場合、II種を用いた場合と比べて長さ変化率は小さくなった。これは、比表面積が大きく反応性が高いI種の方が、充填効果およびポズラン反応による組織の緻密化・膨張等によると思われるが、

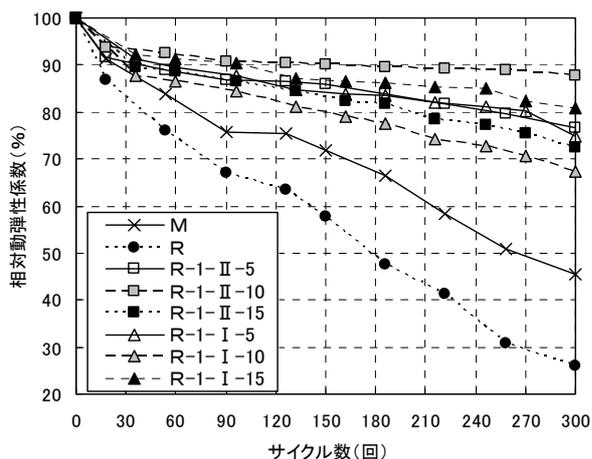


図-7 凍結融解

表-5 CO₂ 排出原単位

材料名	CO ₂ 排出原単位
	kg-CO ₂ /t
ポルトランドセメント	767
天然粗骨材 砕石	2.9
天然細骨材 砕砂	3.7
フライアッシュ	0*
石灰石微粉末	16.1
AE減水剤	121

* フライアッシュの環境負荷は電力に含まれるものとする

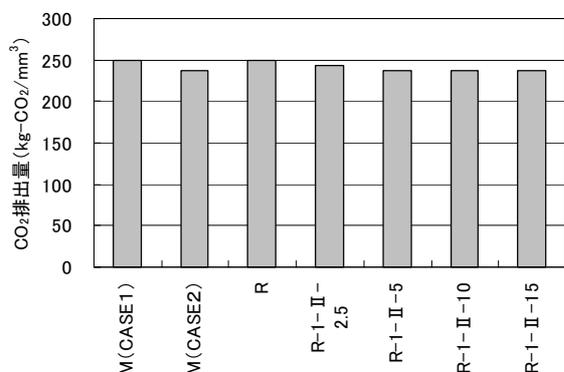


図-8 CO₂ 排出量

これらについては今後より詳細な検討が必要である。なお、市販セメントを用いた場合の長さ変化率は、最も大きな結果となった。

本研究では、すべての配合において材齢91日で長さ変化率が850 μ を、材齢140日では長さ変化率が900 μ を超えており、全体的に大きい値となった。これは、本研究では粗骨材に砂岩を用いており、それに起因していると考えられる。

(3) 促進中性化

図-6に、促進中性化試験の結果を示す。フライアッシュを用いない場合が最も小さい値を示し、II種の混合率10%の場合が最も大きい値を示した。中性化深さは混合率の増加に伴い大きくなる傾向がある。混合率が5%

の場合、I種、II種ともに市販セメントを用いた場合に比べて同程度以下の中性化深さとなっており、5%程度のフライアッシュを用いたとしても中性化に対する抵抗性は特別な問題はないと言える。また、II種よりもI種を用いたほうが、組織構造の緻密化により中性化深さは小さくなる傾向が見られる。これは、既往の研究³⁾と概ね同じ結果である。

(4) 凍結融解

図-7に、凍結融解試験の結果を示す。相対動弾性係数は全体的に小さな値を示し、凍結融解に対する抵抗性が低い結果となった。特にフライアッシュを用いなかった場合において、相対動弾性係数が60%を下回る結果となった。これらについては、高性能AE減水剤だけで空気が確保できたためAE剤を用いなかった。これは、高性能AE減水剤による巻き込み空気が大きかったためと思われる。すなわち、本研究で用いた高性能AE減水剤がこれらの配合には適切でなかった可能性が高い。また、フライアッシュの種類および混合率の違いによる耐久性への影響は明確に現れなかった。

4. フライアッシュ利用による環境評価

4.1 算出方法

各コンクリートの圧縮強度とCO₂排出量との関係を見るために、コンクリート原材料の使用量に対応するCO₂排出量を算定した。CO₂排出原単位は、「コンクリート構造物の環境性能照査指針(試案)」⁴⁾から引用した。各材料のCO₂排出原単位を表-5に示す。AE剤については使用量が少量であるため、対象から除外した。なお、市販セメントを用いてCO₂排出量を算定する場合、全てをポルトランドセメントとして算出するケース(CASE1)と、市販セメントのうち5%分は石灰石微粉末を少量混合成分として使用していると仮定して算出するケース(CASE2)の2ケースを検討した。

4.2 CO₂ 排出量

図-8に各配合におけるCO₂排出量を示す。フライアッシュの混合率5%まではセメントと置換しているため、混合率の増加に伴いその分CO₂排出量は減少する。フライアッシュ混合率が10%および15%の場合、それぞれ5%および10%が細骨材として置換されるが、本研究で用いた細骨材のCO₂排出原単位がポルトランドセメントの原単位に比べて非常に小さいため、ほとんどCO₂排出量に影響がない。市販セメントに石灰石微粉末が5%混合されていると仮定した場合は、フライアッシュを5%混合した場合よりわずかに大きくなるが、ほぼ同程度のCO₂排出量となる。

4.3 単位圧縮強度当たりのCO₂ 排出量

図-9に単位圧縮強度当たりのCO₂排出量を示す。こ

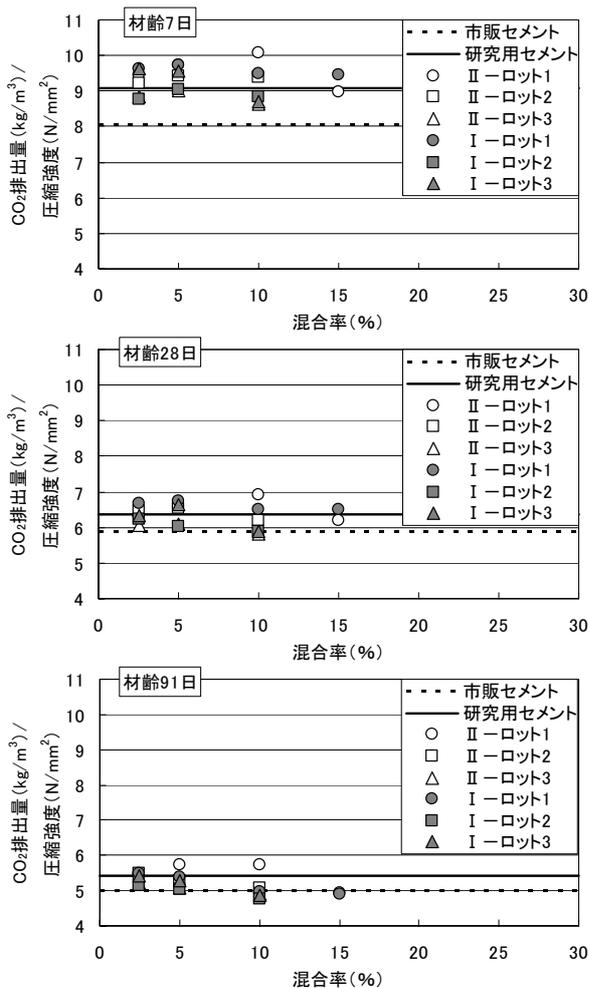


図-9 単位圧縮強度当たりのCO₂排出量（市販セメントは石灰石微粉末を5%混合していると仮定）

これは1N/mm²を得るために排出されるCO₂量であり、この値が小さいほど環境性能が大きいコンクリートを示す。材齢7日および材齢28日では、フライアッシュ無混入コンクリートの場合とフライアッシュ混入コンクリートを比べると、フライアッシュの種類およびロットによってばらつきはあるが、前者の単位圧縮強度当たりのCO₂排出量は後者のほぼ平均的な値となっている。しかし、材齢91日では、単位圧縮強度当たりのCO₂排出量は、II種・ロット1の場合を除いて、フライアッシュ無混入コンクリートの場合より小さくなっている。これは、フライアッシュを用いた場合、材齢の増加がコンクリートの環境性能を向上させることを意味する。

図-9には、石灰石微粉末が5%混合されていると仮定した場合の市販セメントを用いたコンクリートの単位圧縮強度当たりのCO₂排出量も示している。市販セメントを用いた場合の圧縮強度が、フライアッシュを用いた場合より大きくなったことに起因して、その環境性能は市販セメントを用いた場合のほうが優れた結果となった。市販セメントを用いた場合が、何故大きな強度発現があ

ったかについての理由は不明である。図-9から、フライアッシュI種で混合率が10%以上、かつ材齢が91日の場合、市販セメントを用いた場合と同等程度以上の環境性能が得られることが分かる。

5. まとめ

本研究の結果をまとめると、以下の通りである

- (1) フライアッシュを混合すると、混合率の増加に伴いAE減水剤の使用量は減少するが、AE剤使用量は増加する。
- (2) 少量混合に使用するフライアッシュによって強度発現に比較的ばらつきが発生する。
- (3) 圧縮強度比はフライアッシュの種類に関わらず、全体として材齢に伴い増加し、材齢7日では、いずれの種類および混合率においても、圧縮強度比は1以下となるが、材齢91日では、0.95以上の圧縮強度比が得られる。また、フライアッシュI種の混合率10、15%の場合は圧縮強度比が全て1を超える。
- (4) フライアッシュを少量混合したコンクリートは、無混入と比べて初期強度は小さくなるが、フライアッシュ細骨材補充分のポゾラン反応の効果により材齢に伴い確実に強度が増加する。
- (5) フライアッシュの混合率が増加すると、長さ変化率が減少する傾向があり、フライアッシュII種よりもI種のほうがその効果は大きい。また、フライアッシュI種を用いた場合、II種を用いた場合と比べて長さ変化率は小さくなった。
- (6) 中性化深さは、フライアッシュを用いない場合が最も小さい値を示し、フライアッシュII種の混合率10%の場合が最も大きい値を示す。また、中性化深さは混合率の増加に伴い大きくなる傾向がある。
- (7) セメントの少量混合成分としてフライアッシュを混合すると単位圧縮強度当たりのCO₂排出量で表す環境性能が材齢とともに大きくなる。

参考文献

- 1) 吉田潤平, 堺孝司, 石井光裕, 武知隆男: フライアッシュを用いたコンクリートの強度・細孔構造特性とCO₂削減効果に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, 2009
- 2) 下林清一, 岩淵俊次: セメントの強さに及ぼす石灰石微粉末の影響, セメント技術年報 Vol.33, 1979
- 3) 全洪珠, 嵩英雄: フライアッシュコンクリートの諸性質に及ぼすフライアッシュの種類および置換率の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.1, 2004
- 4) 土木学会: コンクリート構造物の環境性能照査指針(試案), コンクリートライブラリー125, 2005