

論文 フライアッシュを用いたコンクリートのフレッシュ性状および耐久性の系統的实验

松崎 裕亮^{*1}・下村 匠^{*2}・田中 泰司^{*3}・安保 知紀^{*4}

要旨: フライアッシュによるアルカリ骨材反応抑制を考え、2種類のフライアッシュを用いてアルカリ骨材反応抑制効果確認試験、耐久性確認試験、フレッシュ性状確認試験を行った。フライアッシュの添加によりアルカリ骨材反応は抑制できることが確認された。塩化物イオン抵抗性、凍結融解抵抗性は普通コンクリートと遜色ない結果が得られた。収縮ひび割れ抵抗性は、普通コンクリートより低下する場合がある。フレッシュ性状はフライアッシュの添加およびフライアッシュ用 AE 剤を用いることで、スランプ保持性能、空気量保持性能の向上が見られた。

キーワード: フライアッシュ、アルカリ骨材反応、耐久性、収縮ひび割れ、フレッシュ性状

1. はじめに

アルカリ骨材反応によるコンクリートの膨張は、構造物の美観を損ねるひび割れを発生させるだけでなく、そりやたわみを生じさせ、場合によっては、コンクリート中の鉄筋を破断させる¹⁾ ことにより、構造物の性能に影響を及ぼすことが明らかにされている。現在では、アルカリ骨材反応に対して、予防、進行制御、補修補強など対策を講じることが重要な課題となっている。

これから建設される構造物の場合、アルカリ骨材反応対策として最も効果的であるのは、アルカリ反応性骨材を使用しないことである。しかし、現実の骨材事情を考えると、地域によっては、アルカリ骨材反応を全く生じない骨材を選定・指定することは難しい場合がある。そこでそのような場合の対策のひとつとして、混和材にフライアッシュを使用し、アルカリ骨材反応を抑制することが有効と考えられる。しかし、フライアッシュ使用により、アルカリ骨材反応抑制効果だけでなく、フレッシュ性状、耐久性、ひび割れ抵抗性などコンクリートの諸特性も多少影響を受ける可能性がある。

そこで本研究では、使用材料、配合は限られた範囲であるが、実際に著者らの近辺で調達可能な骨材やフライアッシュを組み合わせ、フライアッシュ使用コンクリートのアルカリ骨材反応抑制効果をはじめとして、塩化物イオン拡散係数、凍結融解抵抗性の耐久性に関わる特性、収縮ひび割れ抵抗性、フレッシュ性状について系統的に実験検討を行った。

2. 実験概要および使用材料

まず化学法により無害でないと判定された骨材を用

い、モルタルバー法およびデンマーク法にてフライアッシュ添加によるアルカリ骨材反応抑制効果の確認を行った。次に電気泳動法による塩化物イオンの実効拡散係数の測定試験、凍結融解試験を行い、耐久性に関わる諸特性を確認した。また一軸拘束試験により収縮ひび割れ抵抗性の確認を行った。1種類のフライアッシュについては、フレッシュ性状の検討も行った。

本実験に用いた骨材以外の材料を表-1に示す。フライアッシュは産地の異なるOおよびJCの2種類とした。耐久性試験およびひび割れ抵抗性試験では比較用として高炉スラグ微粉末も用いた。

表-1 骨材以外の使用材料

種類	記号	備考
フライアッシュ	O	I種相当 密度2.41g/cm ³ 比表面積5520cm ² /g
	JC	II種 密度2.31g/cm ³ 比表面積4200cm ² /g
高炉スラグ微粉末	BB	密度2.88g/cm ³ 比表面積4100cm ² /g
OPC	C	密度3.16g/cm ³ 比表面積3280cm ² /g
AE減水剤		リグニンスルホン酸化合物とポリオール複合体
AE剤		L1 普通コンクリート用
		L2 FAコンクリート用

3. アルカリ骨材反応抑制効果確認試験概要

3.1 使用骨材および供試体概要

本実験の使用骨材を表-2に示す。全ての骨材でモルタルバー法を実施した。Dsc, Dg25はデンマーク法に用いた。モルタルバー法の供試体寸法は40×40×160mm、デンマーク法の供試体寸法は100×100×200mmである。化学法によって無害と判定された骨材では、フライアッ

*1 長岡技術科学大学大学院 工学研究科修士課程建設工学専攻 (正会員)

*2 長岡技術科学大学 工学部環境・建設系 准教授 工博 (正会員)

*3 長岡技術科学大学 工学部環境・建設系 助教 工博 (正会員)

*4 東日本旅客鉄道(株) 建設工事部構造技術センター 工修 (正会員)

シュを添加せずにモルタルバー法を行った。無害でないと判定された骨材では、フライアッシュを添加しない場合と、O および JC フライアッシュをセメントに対して体積割合で 10, 20, 30% 置換した場合にてモルタルバー法を行った。NaOH 水溶液はセメントの全アルカリ量が 1.2% となるように調整した。デンマーク法では、O フライアッシュを使用し、重量置換率 0, 10, 20% の 3 水準として試験を行った。

3.2 試験方法

モルタルバー法は配合および養生条件以外は JIS A 1146 に準拠した。打設 24 時間後に脱型し、基長を測定した。温度 40 度、湿度 90% の恒温恒湿槽にて供試体を湿布で包み、水を張ったタッパ内に横置きした。

デンマーク法は、打設 24 時間後に脱型し、基長を測定後、温度 50℃ の飽和 NaCl 水溶液中に浸漬した。長さ変化はコンタクトゲージにより測定した。3 ヶ月材齢にて膨張率が 1000 μ 未満で無害、1000~4000 μ で不明、4000 μ 以上で無害でないと判断される。

3.3 試験結果および考察

図-1 に無害骨材を用いた場合のモルタルバー法による膨張履歴を、図-2 にフライアッシュを添加した場合の膨張履歴を示す。共にこれ以上の試験結果の変動が見られなかったため試験材齢 24 週で試験を終えた。無害、無害でないに関わらず全ての骨材において 6 ヶ月後の膨張率が 1000 μ 以上を示すものは無かった。化学法により無害でないと判定された骨材も、今回の実験条件で

表-2 ASR 抑制効果確認試験使用骨材

産地	呼び名	種類	粒度	化学法
I	Iss	細骨材	細砂	無害でない
D	Dss	細骨材	細砂	無害
	Dsc※	細骨材	粗砂	無害でない
	Dg25※	粗骨材	25mm	無害でない
N	Nss	細骨材	細砂	無害
	Ng25	粗骨材	25mm	無害でない
T	Tss	細骨材	細砂	無害
	Tsc	細骨材	粗砂	無害
	Tg25	粗骨材	25mm	無害

※デンマーク法に使用

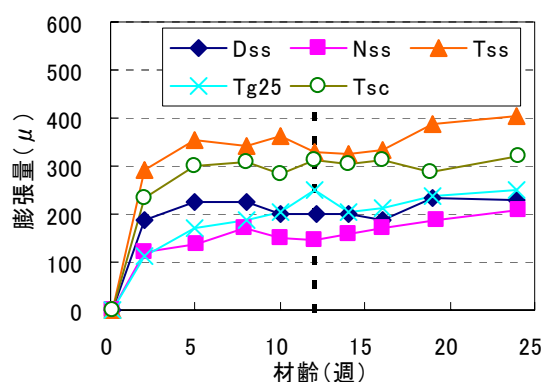


図-1 無害骨材を用いた場合のモルタルバー法による膨張履歴

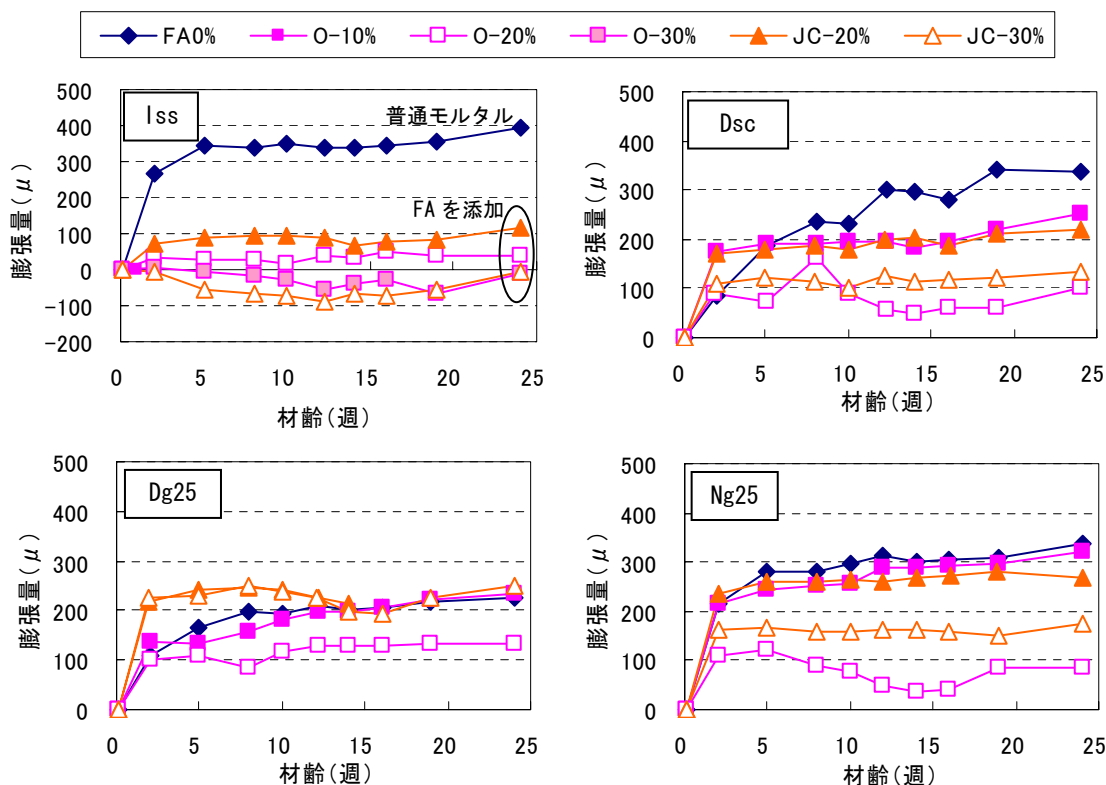


図-2 フライアッシュを添加した場合のモルタルバー法による膨張履歴

は無害判定となる。無害でない骨材では、フライアッシュを添加したことによって膨張量を抑制することができた。このとき、フライアッシュを多く添加したほうが、より高い膨張抑制効果が見られた。

図-3に試験材齢24週の結果を対象として、FA無混和の膨張量を1とした場合の相対膨張量とフライアッシュ置換率の関係を示す。この図からもフライアッシュ置換率が高いほど膨張量が抑えられている傾向が分かる。また骨材によるばらつきはあるものの、JCフライアッシュよりも比表面積が大きいOフライアッシュの方が小さい置換率でより高い膨張抑制効果が得られた。骨材別に膨張抑制効果を見るとIss, Dg25, Ng25では、O, JCフライアッシュともに置換率の増加と共にほぼ直線的に膨張が抑えられているのに対し、DscではJCフライアッシュを用いた場合、抑制効果は得られなかった。またOフライアッシュを用いた場合でも置換率によっては、抑制効果が得られなかった。このようにフライアッシュの種類によっては膨張抑制効果が得られないことがあり、対象骨材に対して効果のあるフライアッシュを適切に選定することが肝要である、といえる。

図-4にデンマーク法による膨張履歴を示す。膨張率はいずれも0.1%以下であり、無害と判定された。フライアッシュ10%置換時には膨張抑制効果が見られたが、20%置換時には抑制効果は見られなかった。この要因としては、試験値のばらつきのほかに、骨材のペシマム量の影響が考えられる。

4. 耐久性および収縮ひび割れ抵抗性確認試験

4.1 使用材料および供試体概要

表-3に耐久性およびひび割れ抵抗性試験に使用した骨材の物性を示す。化学法によりアルカリ骨材反応に対して無害の判定が出ている。コンクリートの示方配合を表-4に示す。電気泳動法、凍結融解試験、一軸拘束試験の全てを表に示す配合で行ったが、ここに示すスランプ値、空気量は、電気泳動法、凍結融解試験の供試体のものである。フライアッシュの置換率はセメントに対して重量比で10、20%とした。また比較として高炉スラグ微粉末をセメントに対して重量比で50%置換した供試体も作製した。

表-4 耐久性確認試験示方配合

No.	混和材 の種類	W/ (C+F) (%)	置換率 F/(C+F) (%)	示方配合 (kg/m ³)							SL (cm)	Air (%)	28日 圧縮強度 (N/mm ²)
				W	C	F	S	G	AE 減水剤	AE剤			
D1	—	50	0	163	326	—	729	1110	0.82	0.015	11.5	5.2	34.9
O-D2	O	50	10	163	294	33	726	1104	0.73	0.044	10.0	4.5	31.7
O-D3	O	50	20	163	261	65	723	1099	0.65	0.078	8.5	4.4	31.7
JC-D3	JC	50	20	163	261	65	721	1097	0.65	0.026	7.5	4.6	32.7
D4	BB	50	50	163	163	163	725	1102	0.41	0.016	8.0	4.2	32.5

備考)Fはフライアッシュを示す。ただし配合D4においては高炉スラグ微粉末を示す。

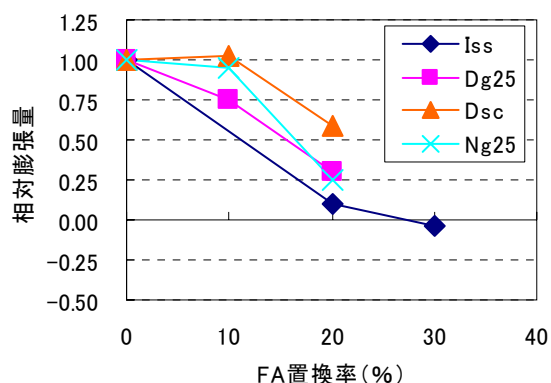


図-3 膨張比とFA置換率の関係

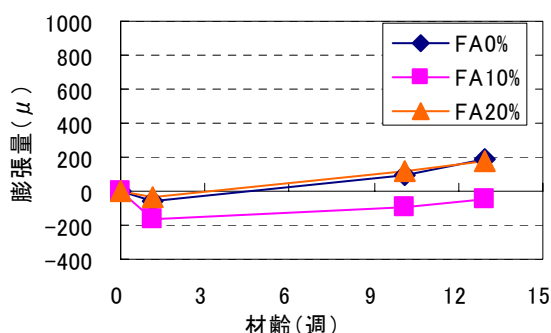
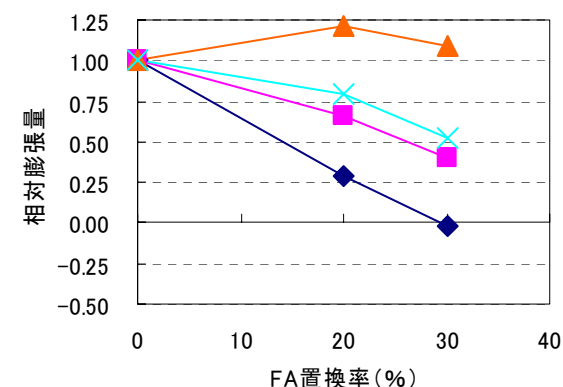


図-4 デンマーク法による膨張履歴

表-3 耐久性確認試験使用骨材

種類	品質
細骨材 (砕砂)	表乾密度2.60g/cm ³ 吸水率1.76% 粗粒率2.58
粗骨材 (砕石)	最大寸法20mm 表乾密度2.72g/cm ³ 吸水率1.22% 実積率64.7%

電気泳動法には、 $\phi 100 \times 50\text{mm}$ に成形した試験体を用いた。凍結融解試験では、寸法が $100 \times 100 \times 400\text{mm}$ の角柱供試体を用いた。ひび割れ抵抗性試験の一軸拘束供試体は JIS A 1151 に記されている拘束型枠を使用した。自由収縮供試体は $100 \times 100 \times 400\text{mm}$ とし、試験体中央に埋込み型ひずみ計を設置し、ひずみを測定した。圧縮試験、静弾性係数、割裂試験に用いた試験体は、 $\phi 100 \times 200\text{mm}$ とした。

4.2 試験方法

電気泳動法は、養生方法以外を JSCE-G 571 に準拠して行った。材齢 4 週まで温度 20°C で水中養生を行った。試験装置数の関係で 3 体までしか同時に試験を行えないため、D1、O-D2、D4 は封かん状態で保管した後、材齢 10 週から試験開始した。O-D3、JC-D3 は湿布で包んで湿潤状態に保ち、材齢 13 週から試験開始した。凍結融解試験は、JIS A 1148 の A 法に準拠して行った。材齢 4 週まで温度 20°C で水中養生を行い、試験を開始した。一軸拘束試験は、JIS A 1151 に準拠して行った。打設直後から温度 20°C 、湿度 60% の恒温恒湿室内で封かん養生を行った。材齢 7 日で封かんを解き、試験開始した。測定項目は拘束鋼材ひずみ、自由収縮ひずみ、拘束鋼材脱型時および供試体ひび割れ時の圧縮強度、静弾性係数、割裂強度である。

4.3 試験結果

(1)電気泳動法

図-5 に電気泳動法による塩化物イオン濃度の経時変化を示す。高炉スラグ微粉末を用いた D4 が最も物質移動抵抗性が高く、材齢 13 週まで湿潤養生を行った O-D3、JC-D3 がそれに続いた。電気泳動試験結果から求めた実効拡散係数を表-5 に示す。フライアッシュコンクリートで最も拡散係数が大きい O-D2 でも普通コンクリート D1 と同程度となった。フライアッシュコンクリートの塩化物イオン浸透抵抗性を適切に評価するためには養生日数が 91 日間必要とされている²⁾。本試験では、十分な養生を行うことによってフライアッシュコンクリートでも普通コンクリートと同等の塩分浸透抵抗性が得られることが確認できた。

(2)凍結融解試験

図-6 に凍結融解試験による相対動弾性係数および質量減少率の経時変化を、表-6 に凍結融解試験結果を示す。フライアッシュ置換率が大きくなるに連れて相対動弾性係数は減少し、質量減少率は大きくなっているが、いずれの配合においても 300 サイクル終了時の相対弾性係数は 80% 以上と高い凍結融解抵抗性が見られた。FA コンクリートは AE コンクリートとして十分な養生を行えば、普通コンクリートと同等の凍結融解抵抗性が得られる³⁾ とされている。FA コンクリート用 AE 剤を用い

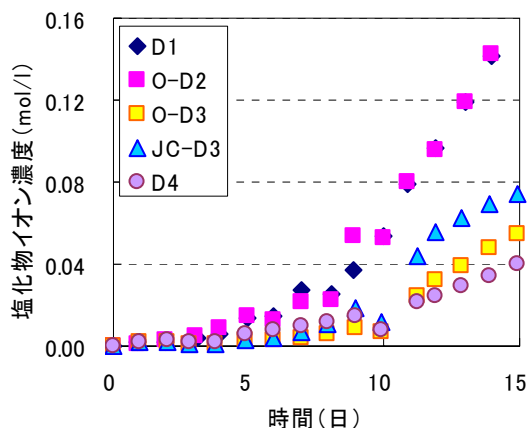


図-5 塩化物イオン濃度の経時変化

表-5 電気泳動法による実効拡散係数

No.	実効拡散係数 (cm^2/sec)	試験材齢 (週)
D1	3.60E-08	10
O-D2	3.68E-08	10
O-D3	1.27E-08	13
JC-D3	1.31E-08	13
D4	8.06E-09	10

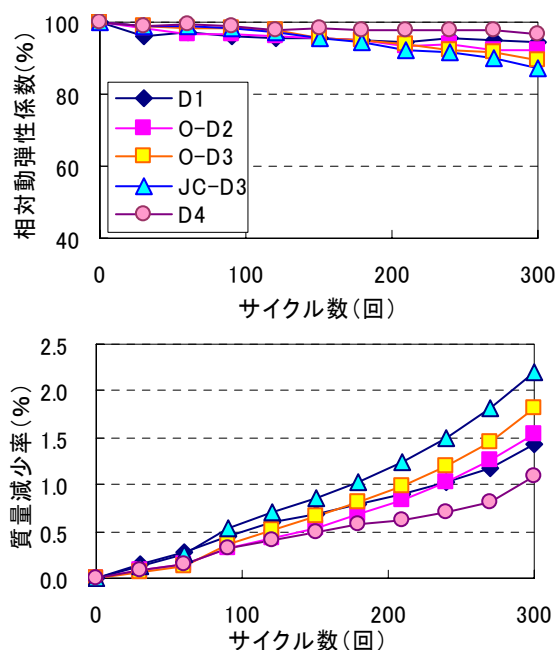


図-6 凍結融解試験による経時変化

表-6 凍結融解試験結果

No.	300サイクル時の 相対弾性係数 (%)	300サイクル時の 質量減少率 (%)
D1	94.3	1.43
O-D2	92.1	1.53
O-D3	89.5	1.81
JC-D3	87.3	2.20
D4	96.5	1.08

所定の空気量が保持できた今回の配合では、28 日水中養生をおこなうことで、普通コンクリートと遜色ない凍結融解抵抗性が得られた。

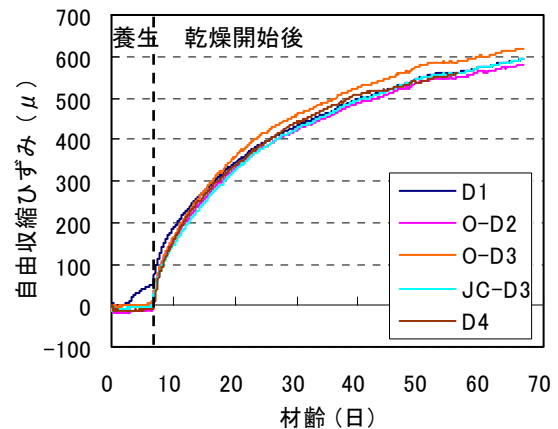
(3)収縮特性および収縮ひび割れ抵抗性

図-7 (a)に自由収縮供試体のひずみの経時変化を、図-7 (b)に、一軸拘束供試体の拘束鋼材のひずみより算出した、収縮が外的に拘束された際にコンクリートに導入される応力の経時変化をそれぞれ示す。

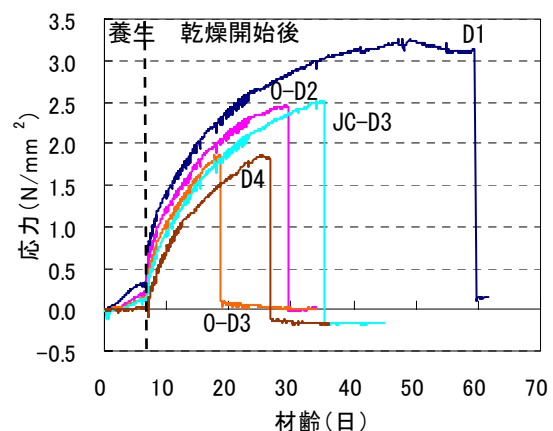
フライアッシュを添加するとコンクリートの自己収縮は小さくなるといわれている³⁾。図-7 (a)によると、本実験においても普通コンクリートの D1 配合では脱枠前の自己収縮が多少見られるが、フライアッシュを添加した場合には生じていない。しかし、乾燥開始後の自己収縮と乾燥収縮をあわせた全収縮ひずみには、配合による差はほとんど見られなかった。

図-7 (b)によると、収縮が拘束された際に導入される応力は、普通コンクリート D1 が最も大きくなった。フライアッシュおよび高炉スラグ微粉末を添加したコンクリートはいずれも普通コンクリートよりも応力が低減されたが、ひび割れが早く発生した。

図-8 に一軸拘束供試体の応力-有効ひずみ関係を示す。表-7 に強度試験結果やひび割れ時の応力などをまとめて示す。図-8 の有効ひずみとは一軸拘束供試体のひずみと自由収縮供試体のひずみの差である。応力-有効ひずみ関係の傾き（有効弾性係数）は、そのコンクリートの静弾性係数、試験期間中における水和による剛性の増大、クリープによる応力緩和の所産である。またひび割れ時の応力は、そのコンクリートの引張強度に、持続荷重の影響、乾燥による内部拘束の影響が加わったものである⁴⁾。今回の実験では、自由収縮性状に差がほとんどなかったため、ひび割れ抵抗性の違いは、有効弾性係数あるいはひび割れ応力の違いに起因すると考えられる。図-8 によると、フライアッシュを使用したコンクリートは、応力-有効ひずみ関係の傾きが普通コンクリートに比べてやや小さくなっている。この原因は、静弾性係数が小さいからなのか、クリープが大きいからなのか判別しがたいが、収縮応力が緩和されるのでひび割れ抵抗性に有利に働くはずである。しかし最終的に、フライアッシュコンクリートはいずれも早くひび割れ



(a) 自由収縮ひずみ



(b) 応力

図-7 供試体ひずみの経時変化

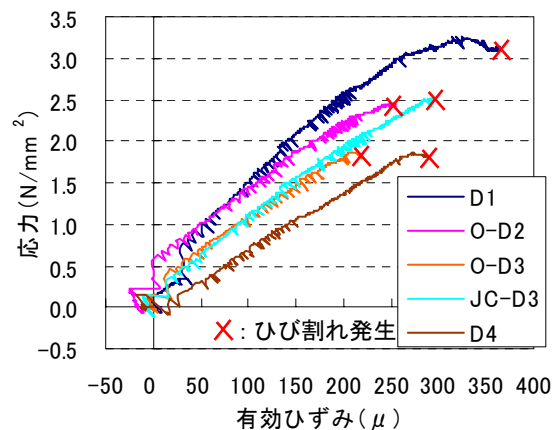


図-8 応力-有効ひずみ関係

表-7 一軸拘束試験結果

No.	破断材齢 (日)	圧縮強度 (N/mm ²)			弾性係数 (N/mm ²)			割裂強度 (N/mm ²)		ひび割れ 応力 (N/mm ²)	ひび割れ 有効ひずみ (μ)	SL (cm)	Air (%)
		7日	28日	破断時	7日	28日	破断時	7日	破断時				
D1	60	31.6	34.9	38.9	28864	34752	28575	2.15	2.52	2.97	316	7.0	4.0
O-D2	23	24.3	31.7	30.7	31056	30516	40509	1.83	2.95	2.43	233	10.5	5.7
O-D3	12	19.1	31.7	24.7	27299	30862	30466	1.32	2.05	1.69	199	17.5	5.8
JC-D3	29	23.5	32.7	34.7	29164	31884	35569	1.70	2.27	2.66	262	8.0	4.6
D4	20	19.3	32.5	29.5	26122	28181	28797	1.71	2.04	1.93	280	8.5	5.1

表－８ フレッシュ性状確認試験使用骨材

種類	品質
細骨材 (砕砂)	表乾密度2.64g/cm ³ 吸水率2.12% 粗粒率2.95
粗骨材 (川砂利)	最大寸法25mm 表乾密度2.72g/cm ³ 吸水率1.22% 実積率64.7%

が発生している。これは、初期の引張強度が普通コンクリートよりも小さいためと考えられる。つまり、フライアッシュの添加による応力緩和特性の改善は認められるものの、それ以上に引張強度発現性を低下させたことがひび割れ抵抗性を低下させたと考えられる。

5. フレッシュ性状確認試験

5.1 使用材料および供試体概要

表－８に使用骨材を示す。化学法によりアルカリ骨材反応に対して無害の判定が出ている。混和剤は、高性能AE減水剤、普通コンクリート用AE剤(L1)およびフライアッシュ用AE剤(L2)を用いた。

5.2 配合および試験方法

基本配合(N)の水セメント比を50%重量比とし、他の配合ではJCフライアッシュをセメントに対して体積割合で15, 30%置換した。スランプ値12±2cm, 空気量4.5±1.5%となるように、単位水量でスランプ値を、AE剤添加率で空気量を調整し、配合を決定した。表－９に設定したフレッシュ性状が得られた示方配合を示す。

5.3 試験結果

図－９に練上がりから90分までのスランプおよび空気量の経時変化を示す。凡例以外の結果は、6種類の産地から得たフライアッシュを用いた結果である⁵⁾。フライアッシュの添加によりスランプの保持性能は向上している。またフライアッシュ用AE剤を用いることでさらにスランプ保持性能が向上している。一方、空気量は、AE剤によって異なる結果となった。フライアッシュコンクリートの場合には、フライアッシュ用AE剤を用いると高い空気量保持性能を得ることが出来るが、普通コンクリート用AE剤を用いると低下する場合がある。

6. 結論

(1) フライアッシュの添加によるアルカリ骨材反応抑制効果の程度は、骨材とフライアッシュの組み合わせにより異なる。

(2) 塩化物イオン侵入抵抗性、耐凍害性は、フライアッシュ混入による変化はほとんど見られなかった。

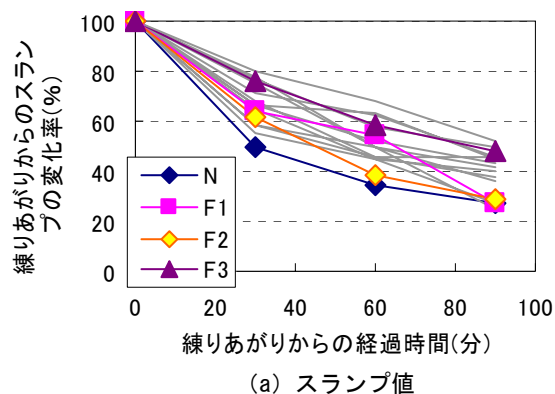
(3) フライアッシュの添加により収縮ひび割れ抵抗性が普通コンクリートよりも低下する場合がある。

(4) フライアッシュの添加およびフライアッシュ用AE剤の使用によるフレッシュ性状の改善が確認された。

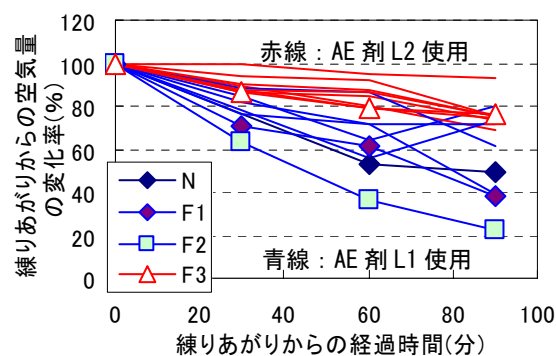
表－９ フレッシュ性状供試体配合

No.	F/ (C+F) (%)	単位量(kg/m ³)							備考
		W	C	FA	S	G	SP1	SP2	
N	0	147	293	0	751	1173	0.73	0.007	L1
F1	15	158	269	34	731	1142	0.67	0.032	L1
F2	30	160	224	69	728	1137	0.56	0.108	L1
F3	15	147	249	32	751	1173	0.62	0.120	L2

SP1:高性能AE減水剤 SP2:AE剤



(a) スランプ値



(b) 空気量

図－９ 練上がりからの経時変化

参考文献

- 1) 土木学会：アルカリ骨材反応対策小委員会報告書、コンクリートライブラリー124, 2005.9
- 2) 杉山隆文ほか：フライアッシュコンクリートの塩分浸透性の迅速評価に関する電気泳動法の検討, 土木学会論文集, No.511, V-56, pp191-203, 2002.8
- 3) 土木学会：フライアッシュを用いたコンクリートの施工指針(案), コンクリートライブラリー94, 1999.4
- 4) 青木優介, 下村 匠：乾燥収縮ひび割れ抵抗性評価のためのコンクリートの引張変形特性およびひび割れ発生条件に関する検討, 土木学会論文集, No.732, V-59, pp.135-148, 2003
- 5) 松崎裕亮, 下村 匠ほか：東北地方で生産された各種フライアッシュを用いたコンクリートのフレッシュ性状, 土木学会年次学術講演会講演概要集, Vol.62, No.2, 5-236, 2007