

新潟県で調達可能な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及び硬化諸物性の系統的实验

コンクリート研究室 松崎 裕亮
指導教員 下村匠

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及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。

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、電気泳動法による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。実験結果に基づき、高架橋などの陸上の一般的な構造物に適用する場合を想定して、フライアッシュ使用コンクリートの性能の総合的な評価を試みた。

2. 実験概要および使用材料

耐久性及びアルカリ骨材反応抑制効果試験では、産地、種類の異なる2種類のフライアッシュを用いた。まず化学法により無害でないと判定された骨材を用い、モルタルバー法及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。次にフライアッシュコンクリートの促進中性化試験、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。フレッシュ性状の検討では、6種類のフライアッシュを用いた。

耐久性及びアルカリ骨材反応抑制効果試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及び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
セメント	C	密度3.16g/cm ³ 比表面積3280cm ² /g
高性能AE減水剤		ポリカルボン酸エーテル系化合物と分子内架橋ポリマーの複合体
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 使用骨材及び供試体概要

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。また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、O及びJCフライアッシュをセメントに対して体積割合で10~30%置換してモルタルバー

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及び養生条件以外は 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濡れウエスで包み、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°C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法にて行い、3 ヶ月後の膨張量を測定した。3 ヶ月材齢にて膨張率が 0.1%未満が無害、0.1~0.4%が不明、0.4%以上が無害でないと判断される。

3.3 試験結果

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。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 0.1%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 FA 無混和の膨張量を 1 とした場合の相対膨

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

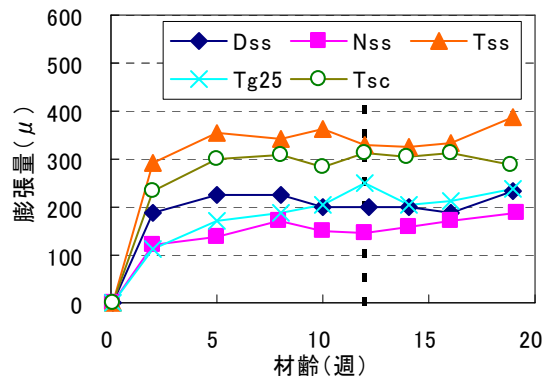


図-1 無害骨材を用いた場合のモルタルバー法による膨張履歴

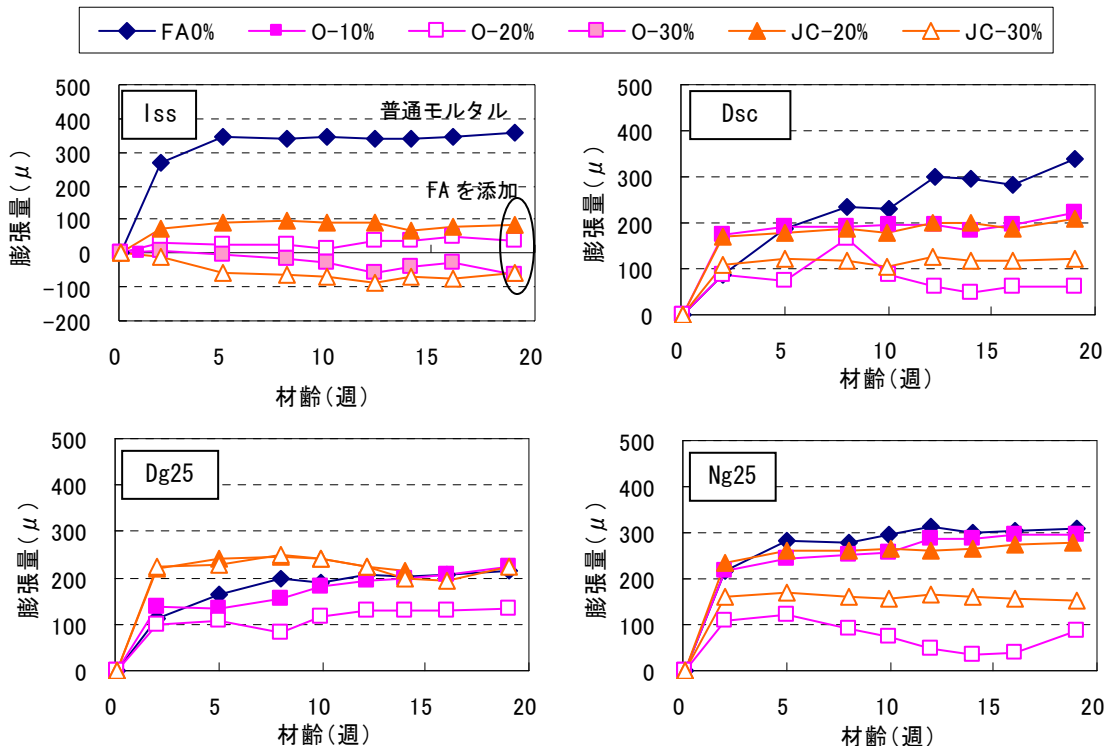


図-2 フライアッシュを添加した場合のモルタルバー法による膨張履歴

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大き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、Oフライアッシュのほうが小さい置換率でより高い膨張抑制効果が得られた。Oフライアッシュは、JCフライアッシュよりも比表面積が大きい。このため、よりポズラン反応が活性化し、水酸化カルシウムが消費された結果、アルカリ骨材反応による膨張が抑制されたと考えられる。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 使用材料及び供試体概要

表-3 に耐久性及びひび割れ抵抗性試験に使用した骨材の物性を示す。アルカリ骨材反応に対して無害の骨材である。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。促進中性化試験及び凍結融解試験では、寸法が 100×100×400mm の角柱供試体を用いた。電気泳動法には、φ100×50mm に成形した試験体を用いた。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、作製した。自由収縮供試体は 100×100×

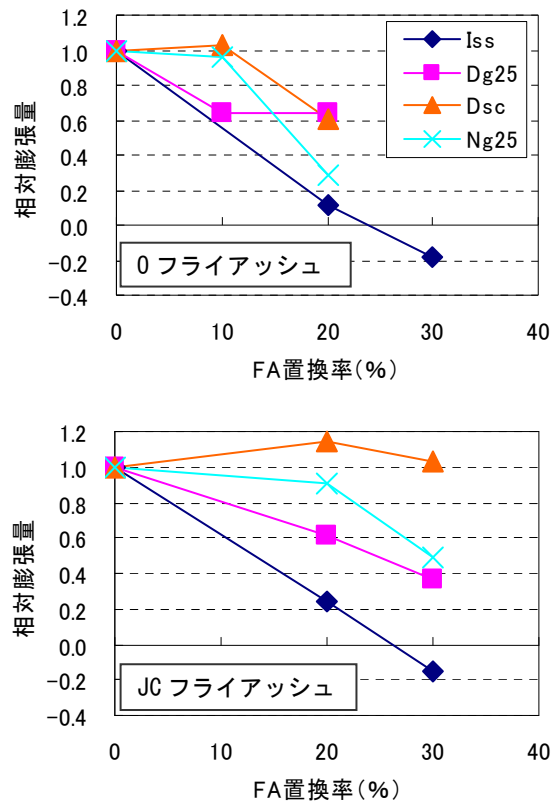


図-3 膨張比と FA 置換率の関係

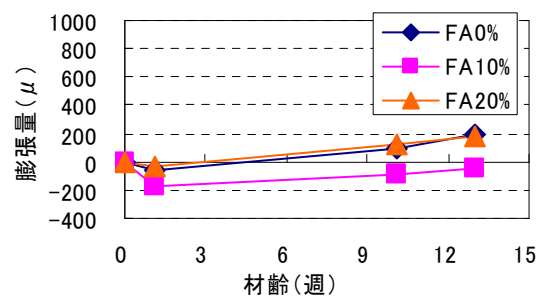


図-4 デンマーク法による膨張履歴

表-3 耐久性確認試験使用骨材

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

表-4 耐久性確認試験示方配合

No.	混和剤	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	0	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

400mm とし、埋め込み型ひずみ計を用いて測定した。

4.2 試験方法

促進中性化試験は、JIS A 1153 に準拠して行った。材齢 4 週まで温度 20℃で水中養生を行った。材齢 8 週までは、湿度 60%、温度 20℃で養生を行った。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℃で水中養生を行った。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 は湿潤封かん状態で保管し、材齢 13 週から試験開始した。凍結融解試験は、JIS A 1148 に準拠して行った。材齢 4 週まで温度 20℃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℃、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、拘束鋼材脱型時及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、表-5 に実効拡散係数を示す。28 日間水中養生を行った D1 及び O-D2 は同程度の拡散係数が得られた。材齢 13 週まで湿潤養生を行った O-D3、JC-D3 も同程度の拡散係数となり、材齢 10 週で試験を行った供試体よりも小さくなった。通常、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 日間が必要とされている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)促進中性化試験

図-7 に促進中性化試験による中性化深さの経時変化を示す。試験は 26 週まで実施される予定であり、現在 13 週目まで終了している。フライアッシュの添加に

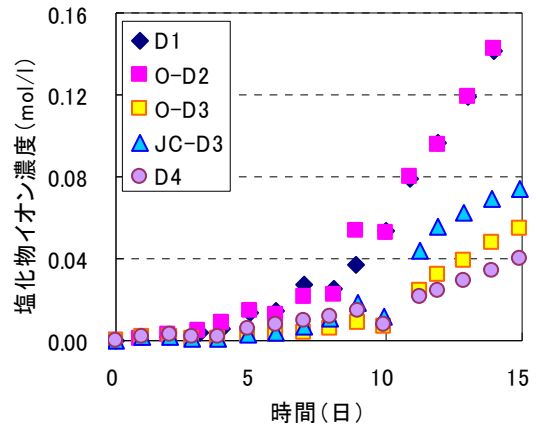


図-5 塩化物イオン濃度の経時変化

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

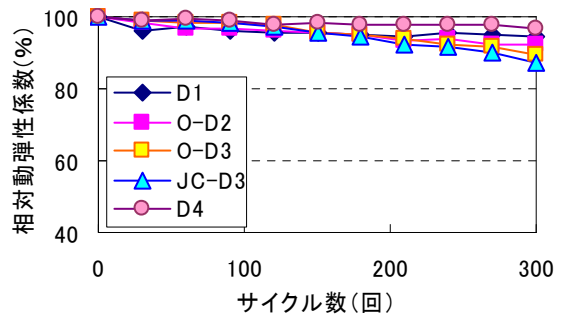


図-6 凍結融解試験による経時変化

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

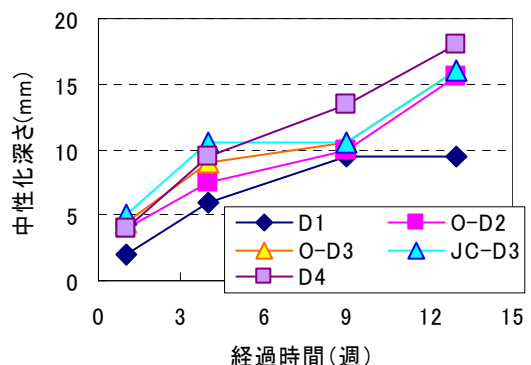


図-7 中性化深さの経時変化

より、普通コンクリートよりも中性化深さは大きくなった。フライアッシュの種類や置換率の影響は、ほとんど無かった。

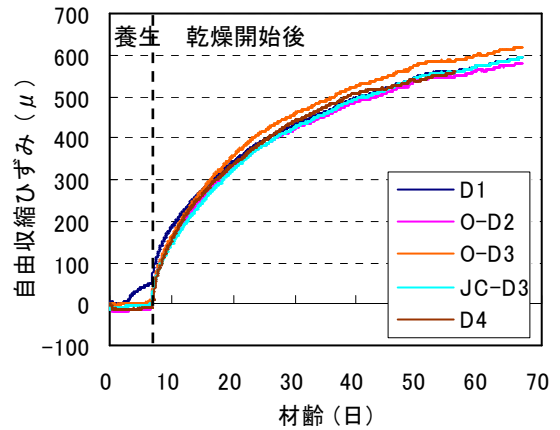
(4)収縮特性及び収縮ひび割れ抵抗性

図-8に自由収縮ひずみ及び一軸拘束供試体の拘束応力の経時変化を示す。図-9に一軸拘束供試体の応力-有効ひずみ関係を示す。表-7に各種試験結果を示す。

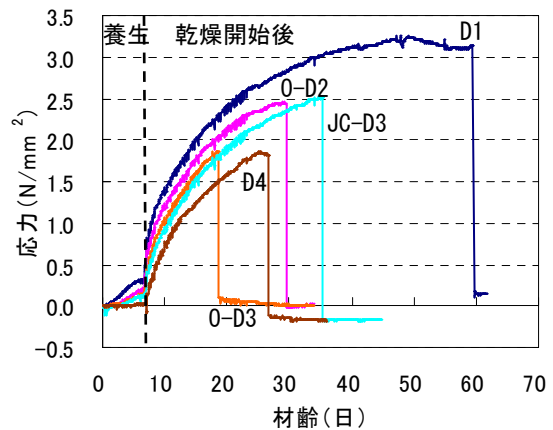
一般的にフライアッシュを添加するとコンクリートの自己収縮は小さくなるといわれている³⁾。本実験においてもD1配合では自己収縮が多少見られるが、フライアッシュを添加した場合には自己収縮がほぼ生じなくなることが確認できる。しかし、乾燥開始後の自己収縮と乾燥収縮をあわせた全自由収縮ひずみには、粉体による差はほとんど見られなかった。本試験では、全ての配合の単位水量を一定としているため、粉体による乾燥収縮の差が出なかったと考えられる。

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は、D1が最も大きくなり、D4が最も小さくなった。フライアッシュ及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、ひび割れが発生した。

図-9の一軸拘束供試体の応力-有効ひずみ関係の傾きは、そのコンクリートの静弾性係数および試験期間中におけるその増進、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。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図-9で表される性質の違いに起因するものと考えられる。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性質である。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普通コンクリートよりも早くひび割れが発生している。これは、引張強度が普通コンクリートよりも小さいためである。すなわち、フライアッ



(a) 自由収縮ひずみ



(b) 応力

図-8 供試体ひずみの経時変化

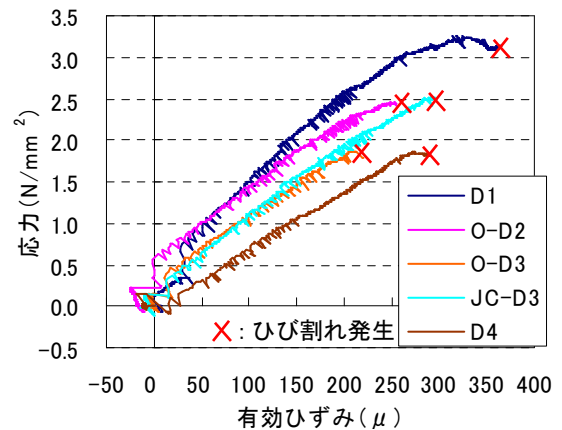


図-9 応力-有効ひずみ関係

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

シュによる応力緩和性状への寄与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原因であると考えられる。

5. フレッシュ性状確認試験

5.1 使用材料及び供試体概要

表-8に使用骨材を示す。アルカリ骨材反応に対して無害の骨材である。混和剤は、高性能 AE 減水剤、普通コンクリート用 AE 剤 (L1) 及びフライアッシュ用 AE 剤 (L2) を用いた。用いたフライアッシュは6種類であるが、ここには JC フライアッシュを添加した時の結果のみを示す。

5.2 配合及び試験方法

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。スランブ値 $12 \pm 2\text{cm}$ 、空気量 $4.5 \pm 1.5\%$ となるように、単位水量でスランブ値を、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。なお、スランブ及び空気量は、0, 30, 60, 90 分の経時変化を測定した。

5.3 試験結果

図-10に練り上がりからのスランブ及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。普通コンクリートに対して、フライアッシュの添加によりスランブの保持性能は向上していることが確認できる。またフライアッシュ用 AE 剤を用いることでよりスランブ保持性能が向上する結果となった。一方、空気量は、AE 剤によって保持性能が異なる結果となった。フライアッシュを添加した場合に、フライアッシュ用 AE 剤を用いることで、高い空気量保持性能を得ることが出来るが、逆に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

本研究で行った実験の範囲内で以下の結果を得た。

- (1) フライアッシュの添加により、アルカリ骨材反応抑制効果を得ることが出来るが、骨材とフライアッシュの組み合わせにより、抑制効果の程度は異なる。
- (2) フライアッシュの添加による普通コンクリートに対する塩化物イオン抵抗性、凍結融解抵抗性の変動は、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中性化、収縮ひび割れ抵抗性は普通コンクリートよりも低下する場合がある。

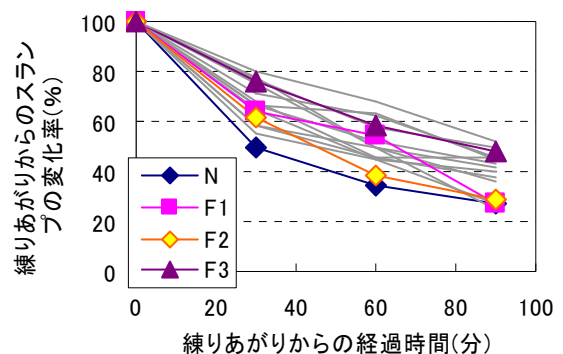
表-8 フレッシュ性状確認試験使用骨材

種類	品質
細骨材	表乾密度 $2.64\text{g}/\text{cm}^3$ 吸水率 2.12% 粗粒率 2.95
粗骨材	最大寸法 25mm 表乾密度 $2.72\text{g}/\text{cm}^3$ 吸水率 1.22% 実積率 64.7%

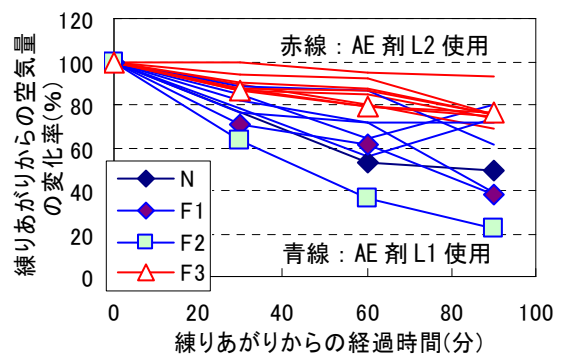
表-9 フレッシュ性状供試体配合

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) スランブ値



(b) 空気量

図-10 練り上がりからの経時変化

- (4) フライアッシュの添加及びフライアッシュ用 AE 剤の使用することでフレッシュ性状の向上が確認された。

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