論文　低品位細骨材を用いたコンクリートのフライアッシュによる性能改善効果に関する実験研究

石川　嘉崇[*1]・大島　一男[*2]

要旨：コンクリートに適量のフライアッシュを混合して用いると，単位水量等が低減できワーカビリティーや流動性が改善されることが知られている。一方，近年では，骨材資源の枯渇化に伴う骨材の品質低下等による，単位水量の増大，ワーカビリティーの低下，強度低下等の問題が指摘されている。従って，本報では，低品位骨材（細骨材）を試験的に製造し，それを使用したコンクリートのフライアッシュによる性能改善効果について，コンクリートのフレッシュ性状および硬化コンクリートの強度性状を，天然骨材の性状等と比較することにより検討・考察した。

キーワード：フライアッシュ，細骨材，砕砂，骨材の粒度分布，コンクリートの性能

1.　はじめに

石炭火力発電所より排出されるフライアッシュ（以下，ＦＡ）は，「再生資源の利用促進に関する法律」における指定副産物として有効利用が義務付けられており，現在約82%が有効利用されているが，今後とも排出量は増加することが予測されている[1)]。ＦＡの有効利用については，セメント製造原料等の分野への利用が大部分であるが，セメントの需要が減少していることから，今後，ＦＡを大量使用するためには，ＦＡを混和材としてコンクリートに用いる方法の拡大を図らなければならないと考えられる。

一方，近年では，骨材資源の枯渇化に伴い，良質な細骨材の採取が困難な状況にあるとの報告がある。そのため，骨材の品質低下等による，コンクリートのフレッシュ時の性能低下，単位水量の増大，硬化コンクリートの強度低下等の問題が指摘されている[2)]。また，平成９年に改定されたＪＡＳＳ5 単位水量の条項では，骨材事情などにより認められていた特例（単位水量185kg/m^{3}以下が困難な場合の上限値200kg/m^3）が削除され，例外なしの185kg/m^{3}と規定された[3)]。既往の研究によれば，一般的にコンクリートに適量のＦＡを混和材として用いると，単位水量等が低減できコンクリートのワーカビリティーや流動性が改善されることが知られている[4)]。そこで，本報では，低品位細骨材を製造し，それを使用したコンクリートのＦＡによる性能改善効果について，ＦＡの添加量を変化させて，コンクリートのフレッシュ性状および硬化コンクリートの強度性状を，天然骨材等を使用したコンクリートの性状と比較することにより検討を行った。

2.　実験概要

2.1　使用材料

セメントは，密度 3.16g/cm^3，比表面積3,300cm^2/g の普通ポルトランドセメントを使用した。ＦＡは，**表－１**に示す電源開発㈱竹原火力発電所３号機産ＪＩＳⅡ種品を使用した。

粗骨材は青梅産砕石 20－05 を使用した。　細骨材は天然砂（以下，ＮＳ）として大井川産の川砂を，通常砕砂（以下，ＡＳ）としてロッドミル製造砕砂を用いた。また，ＡＳと原材料は同様であるが，コーンクラッシャを用いて，**図－２**に示すとおり，微粒分が少なく粒度が粗い砕砂（ＦＭ＝3.40，粒形判定実績率＝52.9）を試験的に製造し，本報ではこの骨材を「低品位細骨材」（以下，ＬＳ）と定義し用いた。骨材の物性値を**表－２**に，まとめて示す。

*1 電源開発㈱　茅ケ崎研究所　材料研究室　工修　（正会員）
*2 ㈱電発ｺｰﾙ・ﾃｯｸｱﾝﾄﾞﾏﾘｰﾝ　技術本部　資源事業部

表－１　ＦＡの品質

	密度 (g/cm³)	比表面積 (cm²/g)	強熱減量 (%)	MB 吸着量 (mg/g)	化学成分(%)							
					SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	Na_2O	K_2O
ＦＡ	2.26	3950	1.2	0.41	58.5	30.0	3.8	0.9	0.7	0.0	0.3	0.2
JIS A 6201	1.95 以上	2500 以上	5.0 以下	—	45.0 以上	—	—	—	—	—	—	—

2.2　コンクリートの調合と製造

コンクリートの調合は，建築用生コンを対象に目標スランプ 18±1.5cm，目標空気量 4.5±1.0%とした。また，ＦＡの細骨材容積に対する代替率（以下，ＦＡ代替率）は，0,5,10,15,20%の４条件を設定した。調合は，日本建築学会「コンクリートの調合設計指針・同解説」[5)]のＡＥ減水剤を用いる場合の調合を参考に基本となる細骨材率，単位水量等を選定した。ＮＳ，ＡＳ，ＬＳの３種の細骨材を用いたコンクリートにおいて，各細骨材の粗粒率（ＦＭ）を考慮して，細骨材率（s/a）を調整し，ＦＡ代替率 0%で単位水量を増減させた。試験結果を**図－４**に示し，単位水量とスランプの関係式を**表－３**に整理した。

表－３より，各細骨材による目標スランプ 18cm の場合，単位水量は，ＮＳが 175kg/m³，ＡＳが 184kg/m³，ＬＳが 198kg/m³ となった。（ＮＳを用いた場合の単位水量を 100%とすると，ＡＳで 5%増加，ＬＳ13%増加となる。）ＦＡ代替率 5～20%の場合については，ＦＡ代替率 0%の細骨材率，単位水量を基本とし，目標スランプおよび空気量が得られるように，単位水量を決定した。以上の調合試験結果から得られた，コンクリートの調合表を**表－４**に示す。

コンクリートの練混ぜには，容量 100Ｌのパン型強制練りミキサーを使用し，粗骨材，細骨材，ＦＡを投入し，その後水を加え３分間練混ぜを行った。なお，コンクリートの練上がり温度は 20±3℃とした。

2.3　実験項目と方法

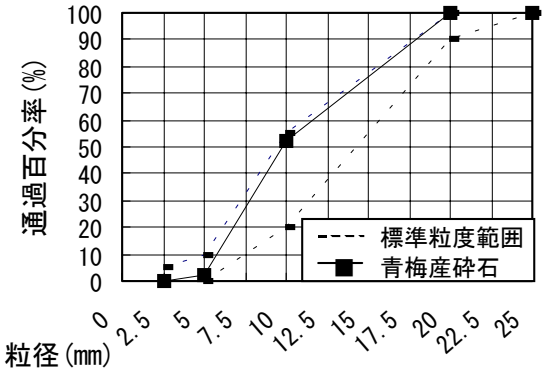
(1)　スランプおよび空気量試験

練混ぜ後，直ちにスランプ試験を(JIS A 1101)および空気量試験(JIS A 1128)を行った。

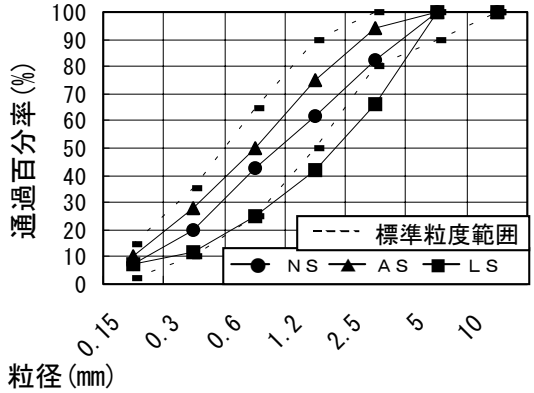
表－２　骨材の物性

種別		絶乾密度 (g/cm³)	吸水率 (%)	単位容積質量 (kg/l)	ＦＭ	実積率 (%)	粒形判定実積率 (%)	洗い損失 (%) 1)
粗骨材		2.66	0.63	1.55	—	58.7	—	0.35
細骨材	NS	2.62	1.07	1.80	2.89	69.4	60.5	1.74
	AS	2.59	0.90	1.70	2.45	66.2	55.2	2.49
	LS	2.60	0.80	1.69	3.40	65.5	52.9	1.52
JIS A 5005 (砕砂)		2.5 以上	3.0 以下	—	—	—	53 以上	7.0 以下

(注)　1)JIS A 1103 による。



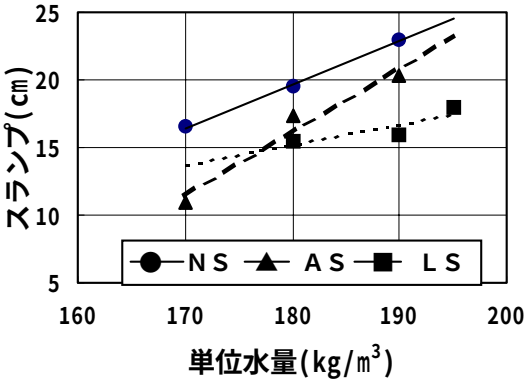
図－１　粗骨材の粒度分布



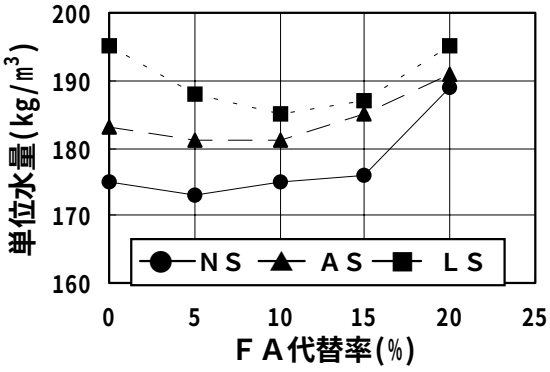
図－２　細骨材の粒度分布

表－３　単位水量とスランプの関係

細骨材の種類	関係式 ｽﾗﾝﾌﾟ(S) S=A×単位水量-B		相関係数	ｽﾗﾝﾌﾟ 18cm の単位水量 (kg/m³)
	A	B		
NS	0.325	38.83	0.9990	184(105%)
AS	0.470	68.43	0.9789	175(100%)
LS	0.150	22.75	0.8602	198(113%)



図－４　単位水量とスランプの関係



図－５　ＦＡ代替率と単位水量の関係

表－４　コンクリート調合表

細骨材の種類	調合番号	水ｾﾒﾝﾄ比 W/C (%)	水粉体比 W/(C+FA) (%)	ＦＡ代替率 (v%)	細骨材率 s/a (%)	単位量(kg/m³) 水 W	ｾﾒﾝﾄ C	混和材 FA	細骨材 S	粗骨材 5号	粗骨材 6号	混和剤 AE減水剤	混和剤 AE剤
ＮＳ	NS-Ｆ-0	58.3	—	0.0	46.0	175	300	0	826	492	492	3.0	0.060
	NS-Ｆ-5	57.7	51.4	5.0	46.0	173	300	36	787	493	493	3.0	0.084
	NS-Ｆ-10	58.3	46.9	10.0	47.0	175	300	73	759	483	483	3.0	0.099
	NS-Ｆ-15	58.7	43.2	15.0	46.0	176	300	107	701	491	491	3.0	0.144
	NS-Ｆ-20	63.0	42.4	20.0	48.0	189	300	146	675	464	464	3.0	0.180
ＡＳ	AS-Ｆ-0	61.0	—	0.0	45.0	183	300	0	789	495	495	3.0	0.015
	AS-Ｆ-5	60.3	54.0	5.0	45.0	181	300	35	752	497	497	3.0	0.015
	AS-Ｆ-10	60.3	49.1	10.0	45.0	181	300	69	712	497	497	3.0	0.051
	AS-Ｆ-15	61.7	45.9	15.0	45.0	185	300	103	669	494	494	3.0	0.051
	AS-Ｆ-20	63.7	43.5	20.0	46.0	191	300	139	638	481	481	3.0	0.081
ＬＳ	LS-Ｆ-0	65.0	—	0.0	50.0	195	300	0	865	442	442	3.0	0.024
	LS-Ｆ-5	62.7	55.6	5.0	50.0	188	300	38	830	447	447	3.0	0.042
	LS-Ｆ-10	61.7	49.3	10.0	49.0	185	300	75	774	458	458	3.0	0.060
	LS-Ｆ-15	62.3	45.2	15.0	50.0	187	300	114	749	448	448	3.0	0.090
	LS-Ｆ-20	65.0	43.3	20.0	50.0	195	300	150	692	442	442	3.0	0.120

(注)　1)ＡＥ減水剤は変性リグニンスルホン酸系の標準形（Ｉ種），ＡＥ剤は高アルキルカルボン酸系のフライアッシュ用ＡＥ剤を使用した。使用量は単位(kg/m³)を示す。2) 空気量は 4.5±1.0%を標準とした。3) 各調合でのスランプ，空気量の測定結果は，スランプが 17.5～19.0cm，空気量は 4.0～5.5%の範囲となった。

(2)　ブリーディング試験

ブリーディング試験は，φ25×28.5cm の円筒容器を用いて，JIS A 1123 「コンクリートのブリーディング試験方法」に準拠して行った。

(3)　凝結硬化時間

凝結硬化時間は、φ18×14cm の金属製円筒容器を用いて，JIS A 6204 附属書１「コンクリートの凝結時間試験方法」に準拠して，プロテクター貫入試験機により行った。

(4)　圧縮強度試験

圧縮強度試験は，φ10×20cm の円柱供試体を用いて，全ての調合のコンクリートについて材齢 7 日，28 日および 91 日で JIS A 1108「コンクリートの圧縮強度試験方法」に準拠して行った。

3.　実験結果および考察

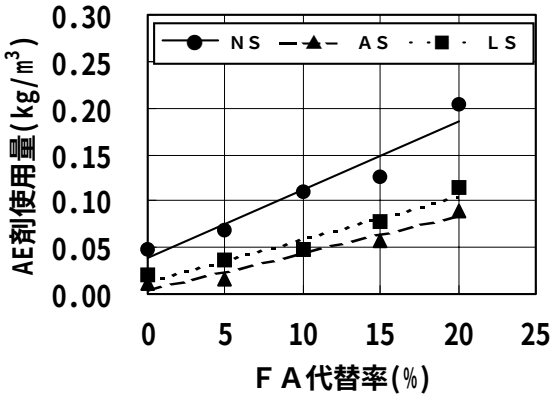
3.1　ＦＡ代替率と単位水量の関係量

ＦＡ代替率と単位水量の関係を**図－５**に示す。ＦＡ代替率により所定のスランプ（18cm）を得るための単位水量は変化し，いずれの細骨材もＦＡ代替率を 5～10%程度とした場合が最も単位水量が小さくなる傾向を示している。ＬＳを使用した場合が最もその変化量が大きく，ＦＡ代替率＝0%を基準にすると，単位水量は 10kg/m³程度少なくなった。ＮＳおよびＡＳを使

用した場合の単位水量は，2kg/m³程度の減少であり，ＦＡ代替率を15%～20%とすると単位水量は増加する傾向にあることがわかる。

3.2　ＦＡ代替率とＡＥ剤使用量の関係

ＦＡ代替率とＡＥ剤使用量の関係を**図－６**に示す。



図－６　ＦＡ代替率とＡＥ剤使用量の関係

図－６より，ＡＥ剤使用量は，ＦＡ代替率の増加によりほぼ直線的に増加し，最も多くＡＥ剤を使用する細骨材はＮＳであり，ＡＳおよびＬＳと比較して２倍程度となる。

3.3　スランプおよび空気量の経時変化

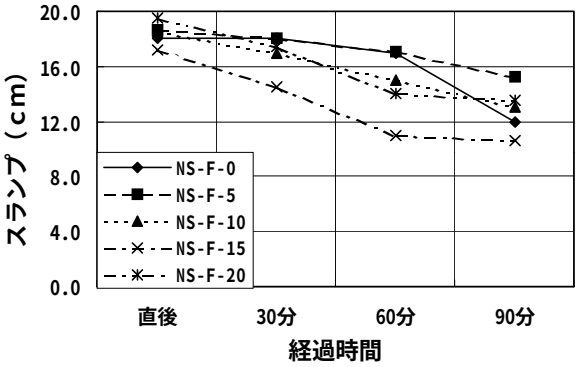
スランプの経時変化は**図－７**～**図－９**に示すように，細骨材の種類により異なり，以下のような特徴がある。

(1)ＮＳの場合，ＦＡ代替率によるスランプロスの差があり，ＦＡ代替率が大きいほどスランプロスが大きい傾向を示している。

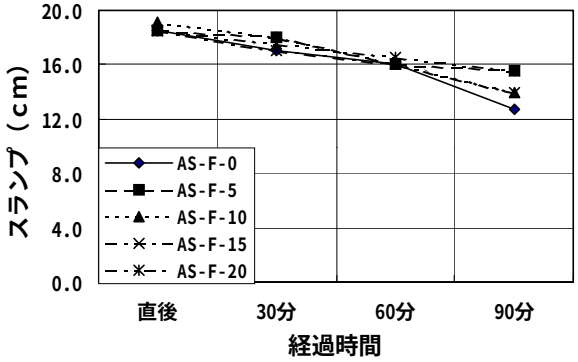
(2)ＡＳの場合，ＦＡ代替率によるスランプロスの差はほとんどなく，1～2㎝ の差が生じている程度である。

(3)ＬＳの場合，ＦＡ代替率によりスランプロスの差があり，ＦＡ代替率の増加に伴いスランプロスも増加する傾向にあった。

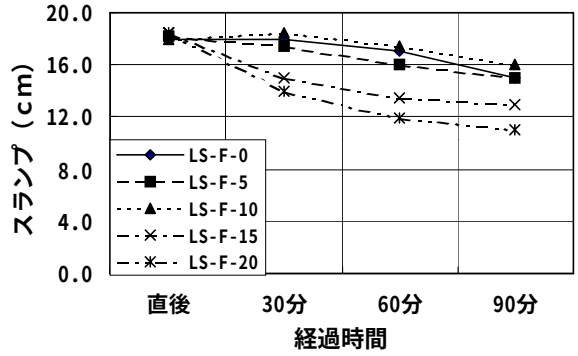
(4)以上の結果から，ＦＡ代替率の増加にともなうスランプロスが，ＡＳに比べてＮＳとＬＳの場合に大きくなる傾向が見られた。この原因については，凝結硬化速度およびブリーディング率の関連も含めて，今後の検討課題とし



図－７　スランプと経時変化（ＮＳ）



図－８　スランプと経時変化（ＡＳ）



図－９　スランプと経時変化（ＬＳ）

たい。以上の結果を総合すると，ＦＡ代替によるスランプロスの抑制効果は，ほとんど得られないといえる。

(5)空気量のロスは，細骨材の種類およびＦＡ代替率による差がほとんどなく，30 分で 0.4～0.6%,60 分で 0.7～0.9%,90 分で 0.9～1.1%程度であった。ＦＡ代替率の増加により，空気量のロスが大きくなるような悪影響はなく，空気量の減少はほぼ同一であった。

3.4　ＦＡ代替率と凝結硬化速度の関係

ＦＡ代替率と凝結始発・終結時間の関係を**図－１０，図－１１**に示す。

始発時間（貫入抵抗値：3.5N/mm²）および終結時間（貫入抵抗値：28.0N/mm²）は，細骨材の種類により異なるが，ＦＡ代替率の増加により速くなる傾向を示している。これは，ＦＡ代替率の増加により水粉体比「W／（C＋FA）」が小さくなったためと考えられる。

3.5　ＦＡ代替率とブリーディング率の関係

ＦＡ代替率とブリーディング率の関係を**図－１２**に示す。**図－１２**より，ブリーディング率はＦＡ代替率により異なり，細骨材の種類により以下の特徴がある。

(1) ＮＳの場合，ブリーディング率は3～5%程度であり，ＦＡ代替率が 5～10%程度においてブリーディング率が最も多い。また，ＦＡ代替率が 15～20%の範囲ではブリーディング率が3%程度で小さくなる。

(2) ＬＳの場合，ＦＡ代替率を多くすると，ブリーディング率は小さくなる傾向にある。ＦＡ代替率が20%で，ブリーディング率は3%程度である。

(3) ＡＳの場合は同様に，ＦＡ代替率の増加によりブリーディング率が減少する傾向にある。

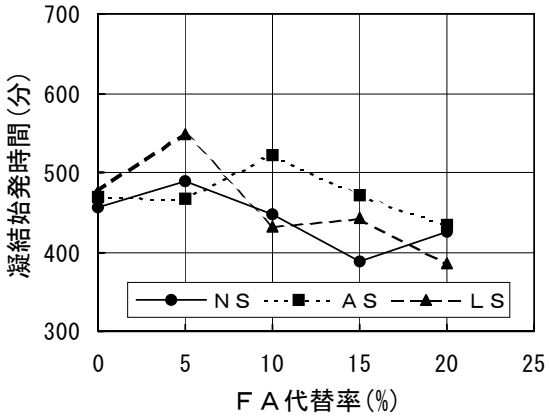
3.6　ＦＡ代替率と圧縮強度の関係

ＦＡ代替率と各材齢（3 日，7 日，28 日，91 日）における圧縮強度の関係を**図－１３～図－１５**に示す。

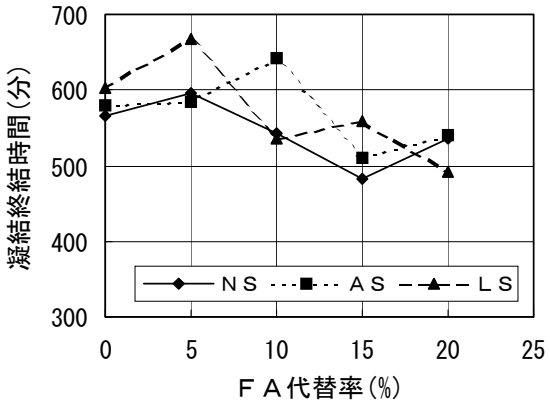
圧縮強度発現は、**図－１３～図－１５**に示すように，骨材種類及びＦＡ代替率により異なる。

(1) ＮＳの場合，各材齢の圧縮強度は，ＦＡ代替率が10%程度までは0%のものに比較して増加するが，それを超えると減少する。

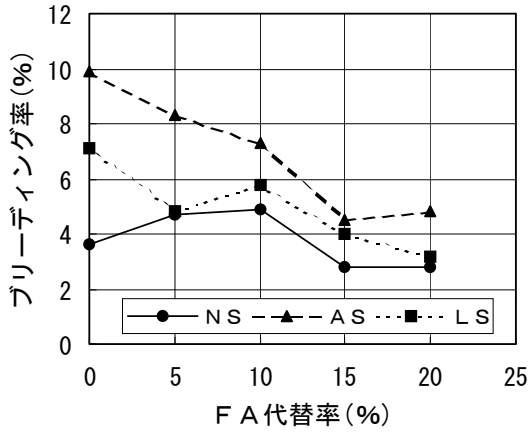
(2) ＡＳの場合，若材齢の圧縮強度は，ＦＡ代替率が10%程度までは0%のものに比較して増加するが，それを超えると減少する。また，28 日材齢以上では，ＦＡ代替率の増加とともに圧縮強度は増加する。



図－１０　ＦＡ代替率と凝結始発時間



図－１１　ＦＡ代替率と凝結終結時間

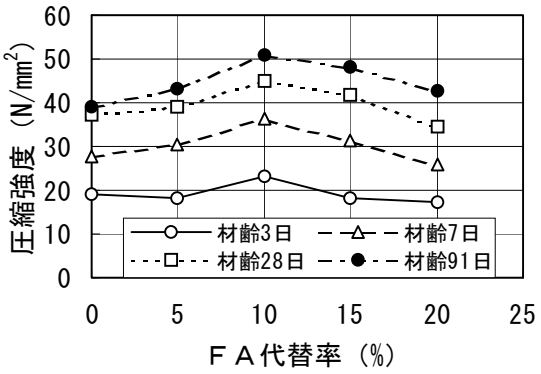


図－１２　ＦＡ代替率とブリーディング率

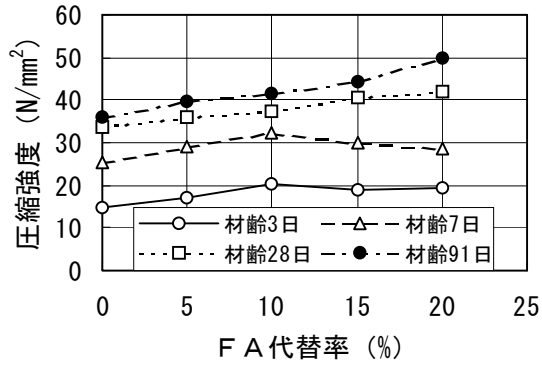
(3) ＬＳの場合，若材齢の圧縮強度は，ＦＡ代替率が15%程度までは0%のものに比較して増加するが，それを超えると減少する。また、28 日材齢以上では，ＦＡ代替率の増加とともに圧縮強度は増加する。

(4) 以上より，圧縮強度が最高となるＦＡ代替率は，材齢により異なるが10～15%程度である。また，同一スランプ（18cm）を確保して，単

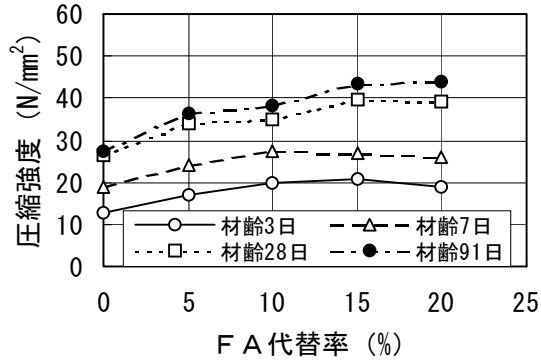
位セメント量を一定とし，ＦＡを混和材として用いる場合は，細骨材の種類にも影響されるが，ＦＡ代替率 15%程度であれば，若材齢を含めた，硬化コンクリートの強度を確保することが可能であるといえる。



図－１３　ＦＡ代替率と圧縮強度の関係（ＮＳ）



図－１４　ＦＡ代替率と圧縮強度の関係（ＡＳ）



図－１５　ＦＡ代替率と圧縮強度の関係（ＬＳ）

4.　まとめ

本実験研究のまとめを，以下に示す。

(1) ＦＡ代替率と単位水量の関係では，ＬＳを使用した場合が最も減少し，ＦＡ代替率 10%で単位水量は，ＦＡ無混入の場合に比べ，約 10kg/m³ 程度減少する。

(2) ＦＡ代替率とＡＥ剤使用量の関係では，ＡＥ剤使用量はＦＡ代替率の増加により多くなる傾向を示す。また，ＮＳを用いた場合が最も多く，ＡＳおよびＬＳの場合と比較して 2 倍程度であった。

(3) ＦＡ代替率とブリーディングの関係では，ＬＳの場合，ブリーディング率の増大が予想されるが，ＦＡ代替率の増加によりブリーディング率は小さくなり，ＦＡ代替率 15%程度で 3%前後のブリーディング率となる。

(4) ＦＡ代替率と圧縮強度の関係では，ＦＡの混入により，無混入のものより圧縮強度は増加するが，圧縮強度が最高となるＦＡ代替率が存在し，その値はＬＳでは，ＦＡ代替率 10～15%程度である。

総合的に見ると，単位水量が，コンクリートの硬化性能に及ぼす影響は大きいことから，ＡＥ剤の使用量は増えるものの，ＦＡ代替率 15%程度であれば，低品位細骨材を用いたコンクリートに対してコンクリートの性能が改善され，ＦＡの混入は有効と考えることができる。

参考文献

1)　（財）石炭灰総合利用センター：石炭灰全国実態調査報告書（平成 12 年度分），pp. 6, 2001. 3

2)　吉兼亨：生コンクリート工場における骨材対策の現状，コンクリート工学 Vol. 34, No. 7, pp. 81-87，1996. 7

3)　日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説ＪＡＳＳ5 鉄筋コンクリート工事, 1997 年版

4)　坂井知明ほか：フライアッシュを細骨材の一部と置換したコンクリートの諸特性，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 23, No. 2, pp. 109-114，2001. 6

5)　日本建築学会：コンクリートの調合設計指針・同解説，1999. 2