

混和材として分級フライアッシュを用いたコンクリートの基礎物性および海洋環境下における耐久性

濱田, 秀則
運輸省港湾技術研究所構造部

福手, 勤
運輸省港湾技術研究所構造部材料研究室

石井, 光裕
テクノ・リソース(株)

<https://hdl.handle.net/2324/4488100>

出版情報 : 土木学会論文集. 571 (V-36), pp.69-78, 1997-08-20. 土木学会
バージョン :
権利関係 :



混和材として分級フライアッシュを用いた コンクリートの基礎物性および 海洋環境下における耐久性

濱田秀則¹・福手勤²・石井光裕³

¹正会員 工修 運輸省港湾技術研究所 構造部 (〒239 横須賀市長瀬3丁目1番1号)

²正会員 工博 運輸省港湾技術研究所 構造部 材料研究室

³正会員 工博 テクノ・リソース㈱ (〒761-01 高松市屋島西町2109番地-8)

フライアッシュはこれまでにコンクリート用混和材として使用されてきた。しかし、近年その品質変動が大きくなったため、その利用が減少している。本研究において対象とした分級フライアッシュとは、フライアッシュの原粉から粒径の小さい粒子(最大粒径が $20\mu\text{m}$)のみを取り出したものである。本研究は、この分級フライアッシュを港湾構造物をはじめ海洋環境下において建設される構造物へ適用していくための基礎的データを得ることを目的としている。一連の実験結果より、分級フライアッシュを用いたコンクリートは、フレッシュ時の性状および硬化後の性状が優れており、港湾・海洋構造物へ適用していくことが十分可能であることが明らかとなった。

Key Words : fly ash, classification, classified fly ash, by-product, sea-water resistance, corrosion prevention of steel

1. 序論

フライアッシュあるいは高炉スラグ微粉末といった鉱物質混和材をコンクリートに使用していくことは多くの国において実施されている。我が国においてもこれまでに、主にダムのような大型構造物の建設においてマスコンクリートを用いる際にフライアッシュを使用してきた。また、近年では高強度コンクリートを製作する際にもフライアッシュが使用されている。しかし、近年種々の要因により発電所より得られるフライアッシュの品質の変動が大きくなってきているために、コンクリート用混和材としてのフライアッシュの使用に問題点が生じていることが指摘されている^{1)・2)}。

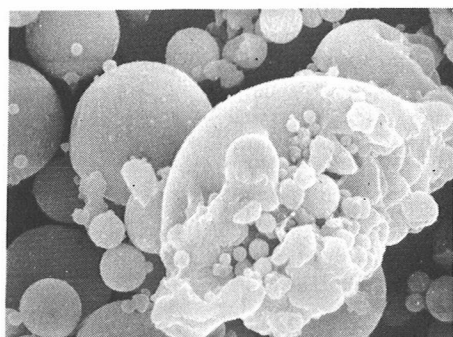
一方、我が国では過去の二度にわたる石油危機の経験から、電気事業において石油代替電源の開発を積極的に進め電源の多様化を図ってきている。そのために石炭火力発電は2010年度末には4000万kWの設備が必要になると試算されている³⁾。それに伴い、

発生する石炭灰は2010年度末には約1300万トンに達するものと予想されている⁴⁾。

フライアッシュをコンクリート用混和材として安定的に使用していくためには、品質を向上させるための対策が必要である。なぜなら、コンクリート製造における配合設計の信頼性を確保するためには、使用するフライアッシュの化学的性質および物理的性状が安定していることが不可欠であるからである。

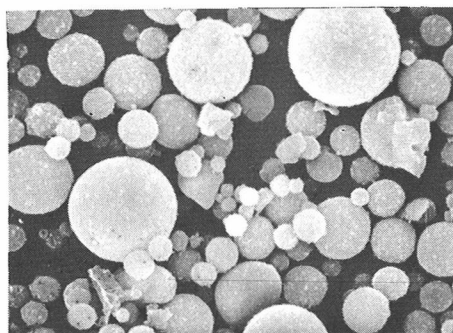
各種の性質の変動等が大きくなり、品質が低下したフライアッシュの品質を向上させる一つの方法が分級であり、分級により得られたフライアッシュが分級フライアッシュである。本研究は、この分級フライアッシュを港湾構造物をはじめ海洋環境下において建設される構造物へ適用していくための基礎データを得ることを目的として実施したものである。

まず、分級フライアッシュの基礎的物性を明らかにし、分級フライアッシュを用いたコンクリートの基礎的性状を把握した。次いで、分級フライアッシュを用いたコンクリートの耐海水性および鉄筋防食性能を実験的に検討した。本文は一連の検討結果を



10 micron

写真-1 原粉の粒子形状



10 micron

写真-2 分級フライアッシュ (FA20) の粒子形状

とりまとめ、分級フライアッシュを用いたコンクリートの港湾・海洋構造物への適用性について考察するものである。

2. 分級フライアッシュの基礎物性

(1) 概要

本実験においては、四国電力㈱・西条発電所の電気集塵機において採取したフライアッシュを使用した。本実験において使用した分級フライアッシュは「強制渦遠心分級法」により分級したものであり、元のフライアッシュ粒子を破壊せず細かい粒子のみを集めたものである。分級方法を調節することにより得られる分級フライアッシュの最大粒径を調節することが可能であり、本実験においては、分級フライアッシュの最大粒径を $20\mu\text{m}$ とした。また、微粉の収率と最大粒径との間にはほぼ線形の関係があることがわかっており⁵⁾、最大粒径が $20\mu\text{m}$ の場合の収率は50～70%程度である。この値は経済効率的に

表-1 原粉および分級フライアッシュの化学成分

	化学成分 (%)							
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃
原粉	61.2	21.4	5.7	4.0	1.4	0.97	0.92	0.6
分級フライアッシュ	57.8	23.0	6.1	3.0	1.1	0.82	0.90	0.8

表-2 原粉および分級フライアッシュの物理的特性

	比重	比表面積 (cm ² /g)	平均粒径 (μm)
原粉	2.24	4250	17.6
分級フライアッシュ	2.38	5760	6.0

もほぼ満足できる範囲と思われる。以後、本文においては、未分級フライアッシュを「原粉」と称することにする。本研究で使用した原粉は、JIS A 6201「フライアッシュ」に適合したものである。写真-1および写真-2に、顕微鏡で撮影した原粉および分級フライアッシュの粒子の形状を示す。これらの写真に示されるとおり、フライアッシュの粒子は概ね球状であるが、粒径が小さくなるほど形が整ってくる傾向がある。すなわち、分級フライアッシュの粒子の方が原粉の粒子よりも円形に近い形状をしている。

(2) 化学的組成

表-1に原粉および分級フライアッシュの化学分析結果を示す。原粉と分級フライアッシュとで化学成分に若干の相違があるものの顕著な差は認められず、両者で化学組成に大きな相違はないと言える。

(3) 物理的性質

表-2に原粉および分級フライアッシュの物理的性質の一例を示す。表よりわかるとおり、両者で物理的性質が大きく異なる。分級フライアッシュの方が原粉よりも比重は大きい。これは、粒子群の締め固め程度が粒径が小さくなるほど大きくなるためであり、いわば見掛けの比重を計測しているためである。また、分級フライアッシュの方が原粉に比べて径の小さな粒子が多いために比表面積がかなり大きい。分級フライアッシュを用いたコンクリートと原粉を用いたコンクリートの性状の相違は主に上述した両者の物理的性質の相違が原因となっているものと推察される。

(4) 品質変動

前述したように、近年種々の要因によりフライア

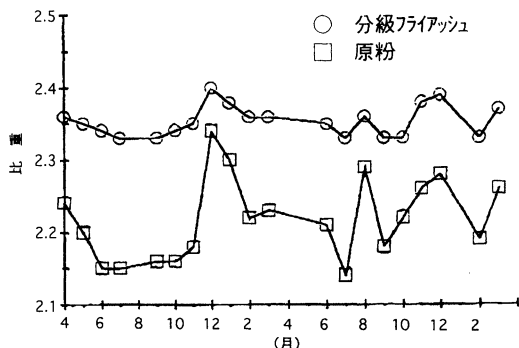


図-1 比重の月別変動の一例

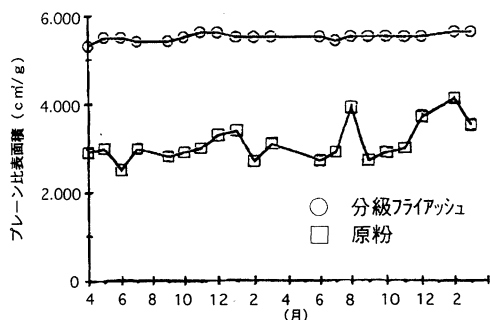


図-2 比表面積の月別変動の一例

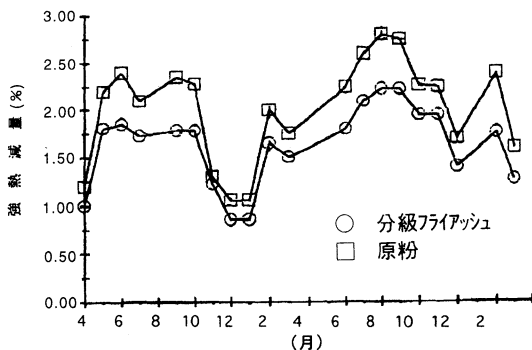


図-3 強熱減量の月別変動の一例

表-3 比重, 強熱減量, 比表面積の標準偏差

		比重	強熱減量 (%)	比表面積 (cm²/g)
原粉	データ数	20	20	20
	最大値	2.34	2.79	4200
	最小値	2.13	1.02	2530
	平均値	2.22	2.01	3090
	標準偏差	0.059	0.556	478
分級 フライアッシュ	データ数	20	20	20
	最大値	2.40	2.19	5600
	最小値	2.33	0.88	5420
	平均値	2.35	1.63	5510
	標準偏差	0.022	0.400	42

表-4 目標スランプおよび目標空気量

目標スランプ (mm)	目標空気量 (%)	設定水結合材比 (%)
80±10	4±0.5	50

変動がかなり小さいことがわかる。このように分級フライアッシュの品質変動が小さいことを考えると、分級フライアッシュの方が混和材としての品質はすぐれていることは明らかである。

3. コンクリートのフレッシュ性状および強度発現性状

(1) 実験の概要

分級フライアッシュを使用したコンクリートの配合上のメリット、フレッシュ時の性状、および圧縮強度の発現性状を実験的に検討した。配合上のメリットとして、同等のワーカビリティを得るために必要な単位水量を比較した。フレッシュ時の性状としてブリージング率を実験的に検討した。また、材齢1年までの圧縮強度の発現性状を検討した。

実験に使用した材料は、セメントが普通ポルトランドセメント（比表面積3240cm²/g, 比重3.16）、細骨材が川砂と山砂の混合砂（比重2.62, 吸水率2.30%, 粗粒率2.84）、粗骨材が碎石（比重2.64, 吸水率0.78%, 粗粒率6.77, 最大寸法20mm）である。練混ぜ水として水道水を使用した。混和剤としてAE減水剤およびAE助剤を使用した。使用したフライアッシュの原粉は比重が2.28, 比表面積が3310cm²/g, 強熱減量が2.2%である。また、分級フライアッシュの比重は2.40, 比表面積は5960cm²/g, 強熱減量は3.2%である。以上の材料を用いて表-4に示すような目標のスランプと空気量を得るために、試練りを行い配合を決定した。なお、スランプの実測値は6.7~8.8cmであった。

ッシュの品質変動が大きくなってきており、そのためにフライアッシュの使用が難しくなっている。フライアッシュを分級することの目的の一つは、品質変動を小さくすることである。図-1~図-3は、原粉およびその原粉を分級して得た分級フライアッシュの比重、強熱減量および比表面積の月別変動の一例を示している。また、表-3はそれらの20個のデータの標準偏差を求めた結果を示している。これより、分級フライアッシュの方が原粉よりも品質の

表-5 試練りより決定したコンクリートの配合

配合 番号	フライアッシュ		水結合材比 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)						
	種類	置換率 (%)			水	セメント	フライアッシュ	細骨材	粗骨材	AE 減水剤	AE 助剤
1	ー	0	50	45.0	165	330	0	815	1003	0.825	13.2
2	原粉	15	50	44.5	157	267	47	815	1022	0.785	18.8
3	原粉	30	50	43.5	153	214	92	796	1043	0.765	36.7
4	分級フライアッシュ	15	50	44.0	156	265	47	807	1038	0.780	34.7
5	分級フライアッシュ	30	50	43.0	153	214	92	789	1056	0.765	85.7

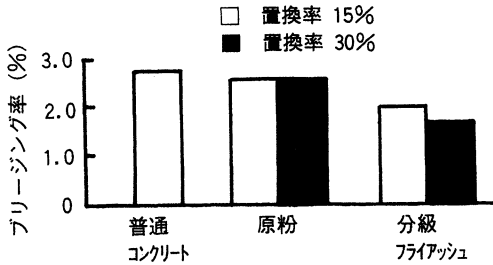
(AE助剤のみ単位はcm³)

図-4 フレッシュコンクリートのブリーディング率

(2) 単位水量の低減

表-5に試練りより得られた配合を示す。配合表よりわかるとおり、水結合材比を50%に統一し、原粉および分級フライアッシュのセメントに対する置換率を15%と30%の2水準に設定している。原粉あるいは分級フライアッシュを使用したコンクリートの配合は、普通コンクリートの場合に比べて単位水量が約10kg程度低減されている。すなわち、フライアッシュを使用することにより同一のワーカビリティを得るために必要な水量が低減できることがわかる。この単位水量の低減により乾燥収縮の低減あるいは耐久性の向上といったメリットが期待される。

(3) ブリーディング

図-4にフレッシュコンクリートのブリーディング率を示す。図より明らかなように、分級フライアッシュを用いた場合のブリーディング率は普通コンクリートあるいは原粉を使用したコンクリートのブリーディング率よりも小さい。また、分級フライアッシュの置換率が15%よりも30%の方がブリーディング率は小さい。これは、分級フライアッシュの粒子が原粉より微粒でありかつ円形に近いこと、ならびに分級フライアッシュを用いたコンクリートの方が普通コンクリートに比べて単位水量が小さいことに起因すると考えられる。したがって、分級フライアッシュを用いることにより、フレッシュコンクリートの材料分離抵抗性を向上させることができるものと考えられ、このことがコンクリートの耐久性向

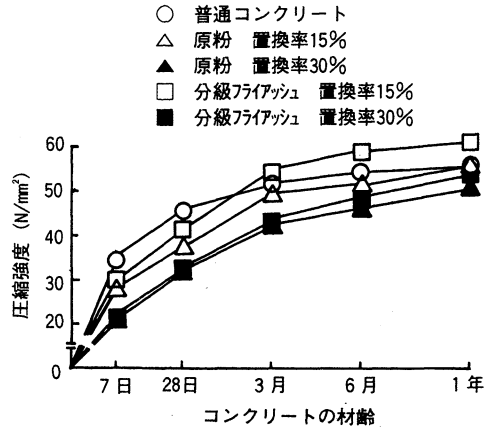


図-5 圧縮強度の発現性状

上にもつながることが期待される。

(4) 圧縮強度の発現性状

一般的には、フライアッシュを用いたコンクリートの場合、普通コンクリートに比べて凝結の開始および終結が遅くなることが知られている。また、普通コンクリートに比べて強度発現が遅くなるために、品質管理が難しいという欠点も指摘されている。図-5に材齢1年まで水中養生を行ったコンクリートの圧縮強度の発現状況を示す。原粉および分級フライアッシュを使用したコンクリートについて、置換率が15%と30%を比較してみると、30%の方が明らかに圧縮強度は小さく、材齢1年においても15%の場合に比べてわずかではあるが圧縮強度は小さい。

置換率が15%の場合について、原粉を使用した場合と分級フライアッシュを使用した場合を比較してみると、明らかに分級フライアッシュを使用した方が圧縮強度は大きい。しかも、材齢3ヶ月以降は普通コンクリートよりも高い強度を示している。したがって、材齢28日までは分級フライアッシュを用いた場合でも普通コンクリートよりも強度は小さいものの、それ以降の材齢においては普通コンクリートと同等以上の強度を得ることが可能となる。すなわち、分級フライアッシュを使用することにより強度発現性状が大きく改善できることが明らかである。

表-6 コンクリートの配合

配合 番号	フライアッシュ		W/B (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)						
	種類	置換率 (%)			水	セメント	フライアッシュ	細骨材	粗骨材	AE 減水剤	AE 助剤
1	—	0	55	45.5	180	327	0	795	963	0.818	19.6
2	原粉	20	55	43.0	175	254	65	751	1005	0.795	63.6
3	分級フライアッシュ	20	55	43.6	171	245	62	769	1007	0.778	93.3

(A E助剤のみ単位はcm³)

4. 海洋環境下におけるコンクリートの性状

(1) 実験の概要

分級フライアッシュを用いたコンクリートを港湾・海洋構造物など、海洋環境下における構造物に使用していくことを念頭に置き、コンクリート自身の耐海水性ならびに内部鉄筋の防食性を実験的に検討した。供試体による海洋環境暴露試験ならびに促進試験を実施した。コンクリートの強度の推移および細孔構造の変化を調べるによりコンクリート自身の耐海水性を考察した。また、コンクリート中の塩化物含有量、コンクリートの電気抵抗、および内部鉄筋の腐食状況を調べるにより内部鉄筋の防食性を考察した。

実験に使用した材料は、セメントが普通ポルトランドセメント（比表面積3293cm²/g, 比重3.16）、細骨材が砕砂（比重2.58, 吸水率2.52%, 粗粒率2.83）、粗骨材が砕石（比重2.61, 吸水率1.77%, 粗粒率6.83, 最大寸法20mm）である。練混ぜ水として水道水を使用した。混和剤としてAE減水剤およびAE助剤を使用した。使用したフライアッシュの原粉の比重は2.24, 比表面積は4250cm²/g, 強熱減量は2.1%である。また、分級フライアッシュの比重は2.38, 比表面積は5760cm²/g, 強熱減量は2.0%である。

表-6にコンクリートの配合を示す。スランプが8±1cm, 空気量4±0.5%という配合条件を設定し、試練りを経て最適な配合を選定した。また、前章での実験結果と経済性を考慮し分級フライアッシュの置換率を20%とした。耐海水性試験に用いた供試体はφ10×20cmの円柱供試体である。一方、内部鉄筋の防食性試験に用いた供試体はφ10×20cmの円柱供試体の中央部に、φ13mm, 長さ100mmの丸鋼を埋め込んだものである。埋め込んだ丸鋼には電気抵抗試験を行うためのリード線を予め接続した。

(2) 耐海水性試験の方法

a) 海洋環境暴露試験の方法

供試体は脱型後約50日間標準水中養生を行い、そ

の後港湾技術研究所の海水循環水槽内の海中部、感潮部および陸上部に設置した。海中部では供試体は常時海水中に没しており、感潮部においては1日に2回、海水浸せき（6時間）と気中乾燥（6時間）を繰り返す。陸上部では供試体は塩分を含んだ潮風にさらされている。上記の環境に供試体を2年間暴露した。また、標準養生として15～25℃の水道水中での養生も実施した。

b) 乾湿繰返しによる劣化促進試験の方法

本試験は西林の示す方法⁹⁾にほぼ準拠した。西林によると、20℃の海水浸せき24時間、60℃の高温乾燥24時間を1サイクルとし200サイクル（400日）まで行う、とされている。本研究においては材齢約50日より乾湿繰返し試験を開始し、10日を1サイクル（5日浸せき、5日乾燥）として40サイクル（合計400日）まで実施した。本試験における乾燥時の最高温度は60℃であり、昇温速度は約20℃/時間である。西林の示す方法と本法の相違は1サイクルの長さであり、促進試験の合計時間（400日）は同一である。

c) 供試体表面の状況の観察

目視により供試体の外観観察を行い、表面の変色状況、ペーストの剥離等の表面劣化の有無を確認した。

d) 圧縮強度試験の方法

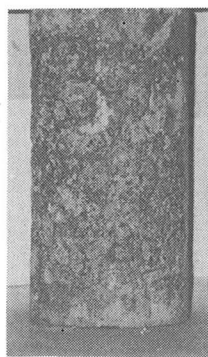
圧縮強度試験を行う際には劣化試験により生じた供試体の上下面の凹凸を十分に研磨した。試験はJIS A 1108「コンクリートの圧縮強度試験方法」に準拠して行った。

e) 引張強度試験の方法

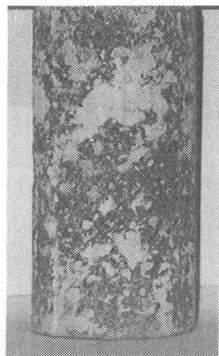
引張強度試験は、JIS A 1113「コンクリートの引張強度試験方法」に準拠して、割裂法により行った。

f) 細孔径分布試験の方法

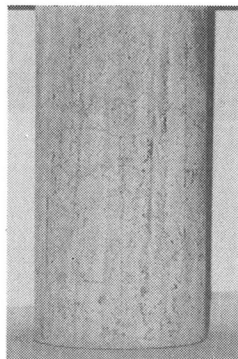
分析に用いた試料は供試体の表層から1cmの深さの部分および供試体の中央部分の二ヶ所から採取した。これらを手作業により破碎し、粗骨材の除去を行いモルタル部分のみを採取した。このモルタル塊を2.5～5mm粒径に整粒した後、アセトンに浸せきして付着水を除去し、さらに減圧乾燥した。水銀圧入式ポロシメーターを使用し、細孔半径が0.0035～



配合 1



配合 2



配合 3

写真-3 乾湿繰り返し劣化促進試験後の供試体の表面状況

120 μ m の範囲の細孔径分布を測定した。

(3) 内部鉄筋の防食性試験の方法

a) 海洋環境暴露試験の方法

供試体は脱型後約50日間標準水中養生を行い、その後港湾技術研究所の海水循環水槽内の海中中部および飛沫部シミュレーション環境に設置した。海中中部では供試体は常時海水中に没しており、飛沫部では1日に2回、1回につき3時間の海水のスプレーにさらされる。また、標準養生として15～25℃の水道水中での養生も実施した。

b) 乾湿繰返しによる腐食促進試験の方法

本試験において用いた乾湿繰返し腐食促進試験方法は1サイクルを7日（1週間）とするものであり、3日間の高湿海水浸せき（60±5℃）と4日間の気中乾燥（15±5℃）を20サイクルまで繰り返すものである。

c) コンクリート中の塩化物含有量試験の方法

塩化物含有量試験として、酸可溶性塩化物含有量試験を実施した。試験に供した試料は円柱供試体の表面（側面）からの深さが約1cmの部分および4cmの部分から採取した。これらのコンクリート塊を149 μ mのふるいを通過するように微粉碎したものを試験に供した。塩化物イオンの抽出には高温に加熱した2Nの硝酸を使用し、抽出した塩化物イオンの滴定は吸光光度法を用いた。塩化物含有量の表示方法は試料に対する塩化物イオン濃度とした。

d) コンクリートの電気抵抗試験の方法

コンクリートの電気抵抗の測定方法を図-6に示す。本図に示すとおり、供試体を海水に浸せきした状態で供試体中の埋設鉄筋と海水中のステンレス鋼板との間の電気抵抗を測定した。なお、抵抗の測定には市販のLCRメーターを使用した。LCRメーターの計測条件は「直列等価回路」,「周波数1kHz」である。厳密に言えば本計測による計測値は海水の抵

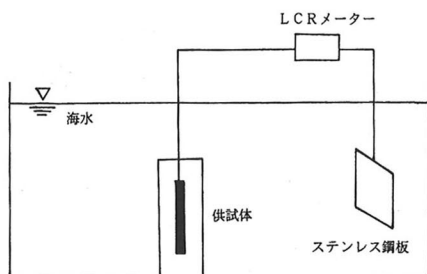


図-6 電気抵抗の計測システム

抗等も含んでいることになるが、計測値に占めるその比率は小さいと考え、計測値をコンクリートの抵抗値として取り扱った。

(4) 耐海水性試験の結果

a) 供試体の表面の状況

海中中部および感潮部に暴露された供試体の表面は総じて茶色を呈していたが、ペーストの剥離は生じていなかった。この特徴はフライアッシュの有無にかかわらず同一であった。一方、陸上部に暴露された供試体の表面は総じて白っぽく、表面のペーストがかなりザラついていた。この特徴もフライアッシュの有無にかかわらず同一であった。

乾湿繰返し劣化促進試験を実施した供試体では、配合により程度の差はあるが、表面のペーストが剥離するという劣化が生じた。写真-3に劣化促進試験を実施した後の供試体の例を示す。配合1（普通コンクリート）の供試体の劣化が最も進んでおり、配合2（原粉）の供試体の劣化がそれに次いで進んでいた。配合3（分級フライアッシュ）の供試体においても同様の劣化が見られたが、配合1および配合2に比べるとその程度は軽微であった。これより、

表-7 圧縮強度の試験結果

配合 番号	圧縮強度 (N/mm ²)					
	初期値	水中養生 (2年)	海洋環境暴露 (2年)			乾湿繰返し 40サイクル
			海中部	感潮部	陸上部	
1	44 (100)	56 (129)	54 (124)	51 (118)	46 (105)	25 (58)
2	35 (100)	51 (146)	50 (143)	47 (132)	45 (127)	32 (90)
3	41 (100)	52 (128)	55 (133)	52 (128)	50 (122)	37 (91)

() 内の数値は初期値に対する比率をパーセントで表示したもの

表-8 引張強度の試験結果

配合 番号	引張強度 (N/mm ²)					
	初期値	水中養生 (2年)	海洋環境暴露 (2年)			乾湿繰返し 40サイクル
			海中部	感潮部	陸上部	
1	3.8(100)	3.9(103)	3.9(103)	3.9(103)	3.4(90)	2.1(57)
2	3.6(100)	3.7(103)	4.1(114)	3.4(94)	2.8(78)	2.0(56)
3	3.0(100)	3.9(130)	4.1(137)	3.1(104)	3.4(114)	2.3(76)

() 内の数値は初期値に対する比率をパーセントで表示したもの

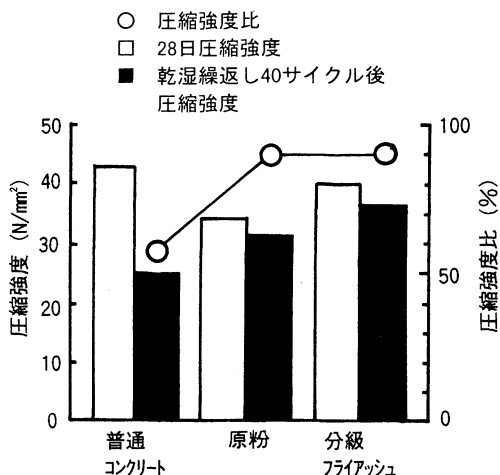


図-7 圧縮強度 (乾湿繰返し劣化促進試験)

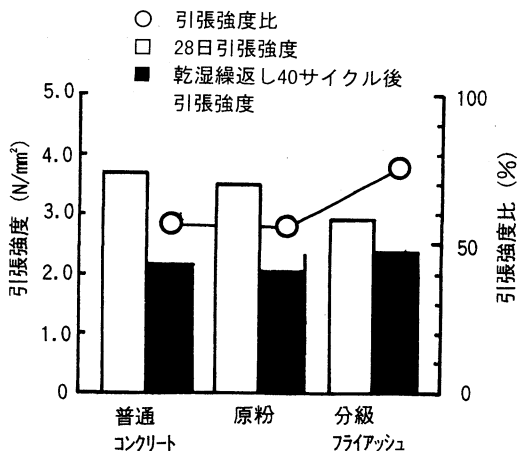


図-8 引張強度 (乾湿繰返し劣化促進試験)

分級フライアッシュを混入したコンクリートは他のコンクリートと比較して表層部の耐久性が向上しているものと考えられる。

b) 圧縮強度

表-7に圧縮強度の試験結果を示す。初期値とは暴露開始時すなわち材齢約50日における測定値である。海洋環境に暴露した場合、いずれの条件においても初期値に比べて強度は増大している。筆者の一部は感潮部に20年間暴露したコンクリートの強度の推移を報告しているが、本研究の結果とほぼ一致している。すなわち、海水の影響を受けるコンクリートの圧縮強度は暴露初期の段階では増大する傾向にある。本研究結果によると、その増大の割合は海中部において最も大きく、次いで感潮部であり、陸上部において最も小さい。いずれにしても、暴露期間が2年の範囲では顕著な圧縮強度の低下は生じなかった。

図-7に乾湿繰返し劣化促進試験の場合の結果を図示したものを示す。図よりわかるとおり、すべての配合において圧縮強度の低下が生じている。この強度低下の主因は高温乾燥によるものと考えられる。中でも普通コンクリートの強度の低下が著しい。原

粉を用いた場合と分級フライアッシュを用いた場合で低下率に相違はないが、圧縮強度自体は分級フライアッシュを用いた方が大きい。これより、フライアッシュを使用することにより圧縮強度の低下に対する抵抗性が向上していることがわかる。

c) 引張強度

表-8に引張強度の試験結果を示す。海洋環境に暴露した場合、感潮部および陸上部において初期値を下回っている場合がある。総合的に見て、海中部よりも感潮部、感潮部よりも陸上部の方が引張強度は小さくなっている。

図-8に乾湿繰返し劣化促進試験の場合の結果を図示したものを示す。図よりわかるとおり、全ての配合において引張強度の低下が生じている。しかし、分級フライアッシュを用いた場合が強度の低下率は最も小さく、かつ引張強度自体最も大きい。これより、フライアッシュを使用することにより引張強度の低下に対する抵抗性が向上していることがわかる。

d) 細孔径分布

図-9および図-10は乾湿繰返し劣化促進試験後のコンクリートの細孔径分布を示している。図-9は供試体表面より約4 cmの深さの部分、すなわち供試

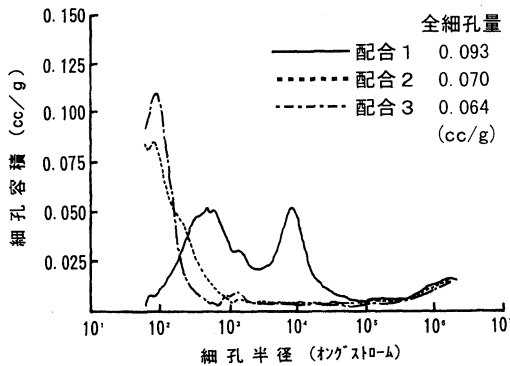


図-9 細孔径分布 (供試体内部)

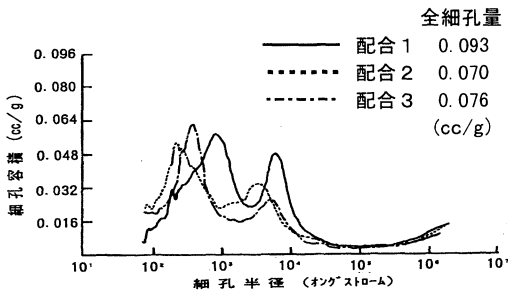


図-10 細孔径分布 (供試体表層部)

体内部より採取した試料の細孔径分布を示している。図より明らかなとおり、普通コンクリートの場合とフライアッシュを使用したコンクリートの場合とで細孔径分布が大きく異なる。すなわち、普通コンクリートの分布形状は原粉および分級フライアッシュを用いたコンクリートの分布形状よりも右側にシフトしている。すなわち、普通コンクリートの方が全体的に細孔径が大きい細孔が多いことを示している。分級フライアッシュを用いた場合と原粉を用いた場合を比較してみると、分級フライアッシュを用いた方が細孔径の小さい細孔が多いことがわかる。

一方、図-10はコンクリート表面より約1 cmの深さの部分、すなわち供試体の表層部より採取した試料の細孔径分布を示している。この図よりわかるとおり、普通コンクリートの場合の分布形状は原粉および分級フライアッシュを使用した場合に比べて右側にシフトしている。このことは普通コンクリートの方が全体的に細孔径が大きいことを示している。原粉を用いた場合は分級フライアッシュを用いた場合に比べて $10^3 \sim 10^4$ (Å)の細孔量が多くなっている。すなわち、分級フライアッシュを用いた場合が最も細孔径は小さい。

次に、図-9と図-10を比較してみると、フライアッシュを使用したコンクリートの場合、供試体の内部よりも表層部の細孔径が全体的に大きいことがわかる。このことより、乾湿繰返しを受けることによ

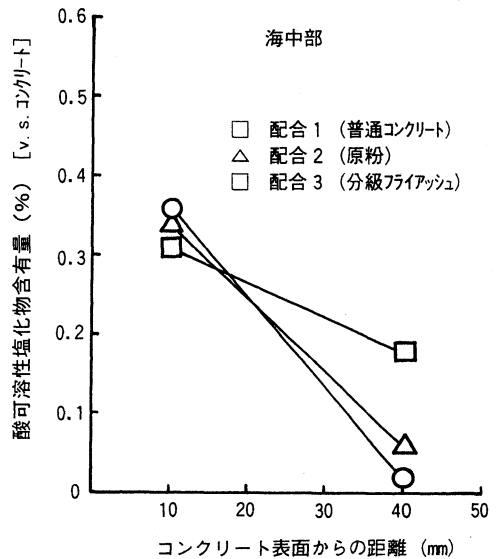


図-11 コンクリート中の塩化物含有量 (海中部)

り供試体表層部の細孔構造が変化していることが推察される。すなわち、供試体表層部分の細孔径が増大しているものと考えられる。写真-3に示したように、分級フライアッシュを混入することにより供試体表層部の耐久性が向上するが、この理由はコンクリートの細孔構造の相違が一つの要因であると考えられ、このことが優れた圧縮強度性状および引張強度性状とも関係しているものと考えられる。

(5) 内部鉄筋の防食性試験の結果

a) コンクリート中の塩化物イオン含有量

図-11および図-12に海中部および飛沫部に2年間暴露された後のコンクリート中の塩化物含有量を示す。飛沫部の方が海中部よりも塩化物含有量は多いものの、配合間の傾向は同じである。すなわち、コンクリート表面からの距離が10mmの場合はフライアッシュを混入した方が普通コンクリートに比べて塩化物含有量が大きい。しかし、コンクリート表面からの距離が40mmの場合、普通コンクリートに比べてフライアッシュを混入したコンクリートの方が塩化物含有量が小さい。

原粉を使用した場合と分級フライアッシュを使用した場合を比較してみると、コンクリート表面からの距離が40mmの場合、海中部の場合も飛沫部の場合も分級フライアッシュを使用した方が塩化物含有量は小さい。すなわち、分級フライアッシュを使用することにより塩化物イオンの浸透・拡散が抑制されていることが明らかである。

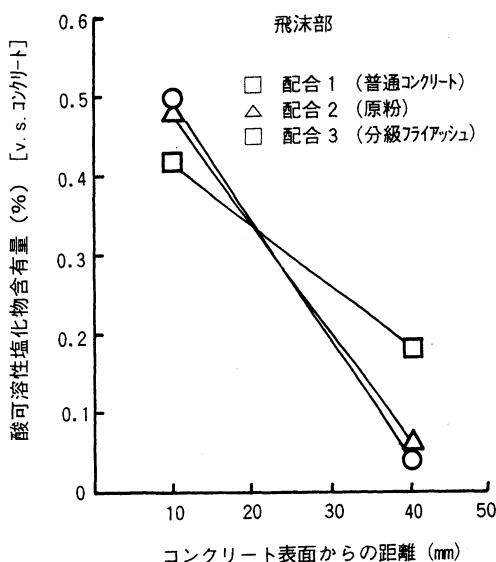


図-12 コンクリート中の塩化物含有量（飛沫部）

b) コンクリートの電気抵抗

図-13にコンクリートの電気抵抗計測結果を示す。全体的傾向として、暴露環境の影響が大きく、同一のコンクリートの場合でも最大で約1000オーム程度の相違がある。この相違はコンクリートの乾燥状態（含水率）が最も大きな要因となっているものと考えられる。

普通コンクリートと原粉を使用したコンクリート、および分級フライアッシュを使用したコンクリートを比較してみると、いずれの暴露条件の場合も分級フライアッシュを使用したコンクリートの電気抵抗が最も大きく、次いで原粉を使用したコンクリート、そして普通コンクリートが最も小さい。一般的には、電気抵抗が大きいほどコンクリートは密実であり、防食上有利と判断される。したがって、分級フライアッシュを用いることにより内部鉄筋の防食性は向上するものと考えられる。

c) コンクリート中の鉄筋の腐食状況

暴露2年経過後ならびに促進サイクル20サイクル終了後のコンクリート中の鉄筋には顕著な腐食は生じていなかった。普通コンクリート中に埋設された鉄筋において腐食が発生していたが、軽微な点錆が生じているだけであった。2年の暴露期間および促進サイクルが20サイクルでは鉄筋に顕著な腐食を発生させる期間としては短いものと考えられる。

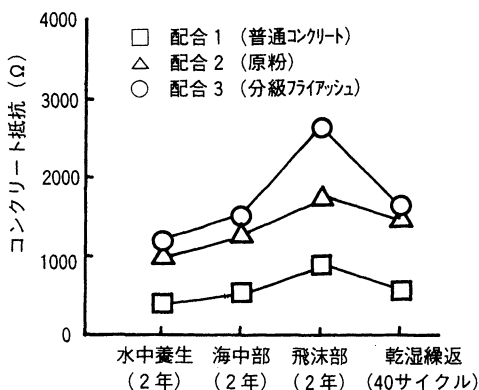


図-13 コンクリートの電気抵抗

5. 結論

上述した実験的研究より得られた結論を以下にまとめる。

1. 分級フライアッシュを用いることにより、同一のワーカビリティを得るための単位水量を低減することができる。
2. 分級フライアッシュを用いることにより、フレッシュコンクリートの材料分離抵抗性を向上させることができる。
3. 分級フライアッシュを用いたコンクリートの方が原粉を用いたコンクリートよりも強度発現性状がすぐれている。
4. 2年間の海洋環境暴露後においては、いずれの配合の場合でも強度は増大の傾向にあった。
5. 分級フライアッシュを混入することにより、コンクリートの表層部分の耐海水性が向上する。この耐海水性向上の主因はコンクリートの細孔構造が緻密であるためと考えられる。
6. 分級フライアッシュを用いることにより、コンクリートの遮塩性を向上させることができる。
7. 普通コンクリートおよび原粉を用いたコンクリートに比べて、分級フライアッシュを用いたコンクリートの電気抵抗が大きい。

総合的な結論として、

8. 分級フライアッシュを適切に用いることにより、高品質かつ高耐久性のコンクリートを製作することが可能である。したがって、分級フライアッシュを用いたコンクリートを港湾・海洋構造物へ適用していくことは十分可能である。

参考文献

- 1) 永岡建城：分級フライアッシュのセメントコンクリート混和材への利用，環境管理，Vol. 32, No. 5, 1996.
- 2) 長滝重義，大賀宏行，越智康介，中村武夫：フライアッシュの品質とその評価に関する研究，第7回コンクリート工学年次講演会論文集，pp. 197～200, 1985.
- 3) 資源エネルギー庁石炭部監修：コール・ノート1993年版，資源産業新聞社.
- 4) 環境技術協会・日本フライアッシュ協会：石炭灰ハンドブック追録，1992年12月.
- 5) 石井光裕：コンクリート混和材としての分級フライアッシュに関する研究，徳島大学学位論文，1994年3月.
- 6) 西林新蔵：コンクリートの耐海水性—その現状と将来—，セメント・コンクリート，No. 410, pp. 2～9, Apr. 1981.

(1996. 8. 29 受付)

FUNDAMENTAL CHARACTERISTICS AND DURABILITY UNDER MARINE ENVIRONMENT OF CONCRETE INCORPORATING CLASSIFIED FLY ASH

Hidehori HAMADA, Tsutomu FUKUTE and Mitsuhiro ISHII

The use of additional cementitious materials such as fly ash or ground granulated blast furnace slag in concrete construction is almost universal. Because, fly ash can reduce the heat of hydration and cracking at early ages caused by thermal stresses. Recent few years, the quality of fly ash is fluctuated due to several reasons. It is thought that stringent quality control or quality assurance program is required to insure reliable supplies of consistent fly ash. Background of the development of the classified fly ash is to improve the quality by removing coarse particles having irregular shapes in the conventional fly ash. The main object of this study is to detail effects of the classified fly ash addition in concrete in producing high quality and highly durable concrete. Test results of a series of studies show that the classified fly ash improves properties of both fresh and hardened concrete.