

運輸省港湾技術研究所

港湾技術研究所 報告

REPORT OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH
INSTITUTE
MINISTRY OF TRANSPORT

VOL. 35 NO. 4 Dec. 1996

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN



港湾技術研究報告 (REPORT OF P. H. R. I.)

第35巻 第4号 (Vol. 35, No. 4), 1996年12月 (Dec 1996)

目 次 (CONTENTS)

1. 久里浜湾における長期検潮記録解析
……………永井 紀彦・菅原 一晃・渡邊 弘・川口 浩二…………… 3
(Long Term Observation of the Mean Tide Level and Long Waves at the
Kurihama-Bay
…………… Toshihiko NAGAI, Kazuteru SUGAHARA, Hiroshi WATANABE,
Koji KAWAGUCHI)
2. 防波堤ケーソンの自動設置システムの開発 (第一報) —引船方式の水理模型
実験による検討—
……………米山 治男・白石 悟・名里 健吾・高橋 英俊……………37
(Development of Automatic Installation System of Breakwater Caisson (1st Report)
— Evaluation of Tugboat Support System by Hydraulic Model Experiments —
…………… Haruo YONEYAMA, Satoru SHIRAISHI, Kengo NAZATO,
Hidetoshi TAKAHASHI)
3. 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港湾・海洋構造物
への適用性に関する研究
……………濱田 秀則・福手 勤・石井 光裕……………75
(A Study on An Application of Classified Fly Ash Mixed Concrete to
Port & Harbour Structures or Marine Structures
…………… Hidenori HAMADA, Tsutomu FUKUTE, Mitsuhiko ISHII)

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 港湾・海洋構造物への適用性に関する研究

濱田 秀則^{*1}・福手 勤^{*2}・石井 光裕^{*3}

要 旨

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様々な国において実施されている。一方、我が国においても今後石炭火力発電においてフライアッシュが大量に発生することが予想されている。フライアッシュから微粒分のみを抽出し全体としての品質の安定性の向上を目指した試みの一つが分級であり、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いる。すなわち、分級フライアッシュを用いたコンクリートの耐海水性ならびに内部鉄筋の防食性を、他のコンクリートと比較して定量的に把握することを目的としている。

本研究より得られた主要な結論を以下に要約する。

- 1) 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乾湿繰返しおよび温度変化の繰返しに対する抵抗性が向上する。
- 2) 分級フライアッシュを混入することにより、圧縮強度の低下率を抑制することができる。
- 3) 分級フライアッシュを混入することにより、引張強度の低下率を抑制することができる。
- 4) 分級フライアッシュを混入することにより、コンクリート中の塩化物イオンの拡散を抑制できる。
- 5) 分級フライアッシュを混入することにより、コンクリートの電気抵抗を小さくすることができる。
- 6) 分級フライアッシュを混入したコンクリートの場合でも、水結合材比を小さくする方が内部鉄筋の防食上有利である。
- 7) 今後海洋環境下において建設、供用される港湾・海洋構造物へ、分級フライアッシュを適用していくことは十分可能である。

キーワード：フライアッシュ、分級、分級フライアッシュ、副産物、省資源、耐海水性、鉄筋防食性

^{*1} 構造物 主任研究官

^{*2} 構造物 材料研究室 室長

^{*3} テクノ・リソース㈱ (高松市屋島西町)

A Study on An Application of Classified Fly Ash Mixed Concrete to Port & Harbour Structures or Marine Structures

Hidenori Hamada ^{*1}, Tsutomu Fukute ^{*2}, Mitsuhiro Ishii ^{*3}

Abstract

Fly ash from coal-burning plants is used in concrete primarily because of its pozzolanic and cementitious properties. The classified fly ash, studied in this research, is produced by air classification of its conventional fly ash to the classes having the maximum particle diameter of 20 microns. The main objects of this study is to detail effects of the classified fly ash addition in concrete in producing high quality and highly durable concrete under marine environments. This report gives an experimental results on the durability of concrete against sea-water attack and chloride attack under marine environments.

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

^{*1} Senior Research Engineer, Structural Engineering Division

^{*2} Chief, Material Laboratory, Structural Engineering Division

^{*3} Techno-resource Company, Incorporated, Takamatsu, Japan, 760

目 次

要 旨

1. 序 論	79
2. 分級フライアッシュの概要	79
2. 1 分級フライアッシュの基礎物性	79
2. 2 分級フライアッシュを用いたコンクリートの各種物性	82
2. 3 分級フライアッシュの効果に関する考察実験	83
3. 分級フライアッシュを用いたコンクリートの耐海水性	84
3. 1 序 節	84
3. 2 実験の概要	85
3. 3 実験の結果および考察	86
4. 分級フライアッシュを用いたコンクリートの内部鉄筋の防食性	92
4. 1 序 節	92
4. 2 実験の概要	93
4. 3 実験の結果および考察	94
5. 結 論	99
参考文献	100

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様々な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、コンクリートの硬化時の発熱抑制を目的として、主にダムのような大型構造物の建設にフライアッシュを使用してきた。しかし、近年、海外炭の多用による石炭銘柄の多様化、石炭燃焼時の燃焼温度、酸素濃度の変化によりフライアッシュの品質の変動が大きくなってきており、コンクリート用混和材としての使用に問題点が生じつつあ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。図-1に石炭火力発電設備および石炭灰発生量の推移を示す。石炭火力発電設備は、1990年度末で1240万kWであるが、2000年度末には2960万kW、2010年度末には4000万kWの設備が必要とされている[3]。一方、1990年度の電気事業における石炭消費量は約2720万トン、石炭灰発生量は約400万トンとなっており、この割合で推移すれば、発生する石炭灰は2000年度末には950万トン、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]。

このように今後石炭火力発電において大量に発生することが予想される石炭灰の大部分であるフライアッシュ

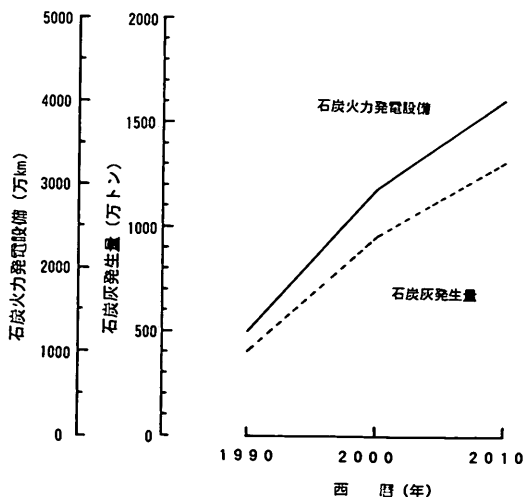


図-1 石炭火力発電設備および石炭灰発生量の推移

をコンクリート分野で品質の良い混和材として恒常的に利用していくためには、その品質を常時一定レベル以上に確保することが必要である。このため、厳しい品質管理あるいは品質を保証する手法の確立が望まれている。品質変動が大きくなったフライアッシュから微粒分のみを抽出し全体としての品質の安定性の向上を目指した試みの一つが分級であり、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いる。すなわち、分級フライアッシュを用いたコンクリートの耐海水性ならびに内部鉄筋の防食性を、他のコンクリートと比較して定量的に把握することを目的としている。

コンクリートの耐海水性試験については、供試体の海洋環境暴露試験と乾湿繰返し劣化促進試験を実施し、圧縮強度試験等を実施した。また、内部鉄筋の防食性についても供試体の海洋環境暴露試験と乾湿繰返し腐食促進試験を実施し内部鉄筋の電気化学的計測を中心とした評価試験を実施した。

本文は、それらの実験結果を取りまとめ、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を論じるものである。

2. 分級フライアッシュの概要

2.1 分級フライアッシュの基礎物性

フライアッシュは、ミクロンオーダーの粒径を持つものが多くかつこれらはほとんどが球形粒子である、という特徴を有している。分級フライアッシュとは、元のフライアッシュの粒子群の中から、粒子そのものを破壊することなく微粒分のみを抽出したものである。

本研究において用いたフライアッシュは、四国電力㈱の西条発電所の電気集塵機より採取したものである。

(1) フライアッシュの分級方法

分級とは、流体中を重力、遠心力または慣性力で運動する粉体粒子において粒子径により移動速度に差が生じることを利用して粉体粒子をその大きさで分別することである。流体として気体（主として空気）を用いる「乾式分級」と、液体（主として水）を用いる「湿式分級」とがある。乾式分級法の中でも、どのような力を利用するかにより、「重力分級法」、「慣性分級法」、「自由渦遠心分級法」および「強制渦遠心分級法」に分類される。本研究においては、「強制渦遠心分級法」を用いた。図-2に強制渦遠心分級法を用いた場合の微粒収率と微

表-1 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
FA20	2.38	5760	6.0
FA10	2.47	8100	3.3
FA 5	2.51	12400	2.2

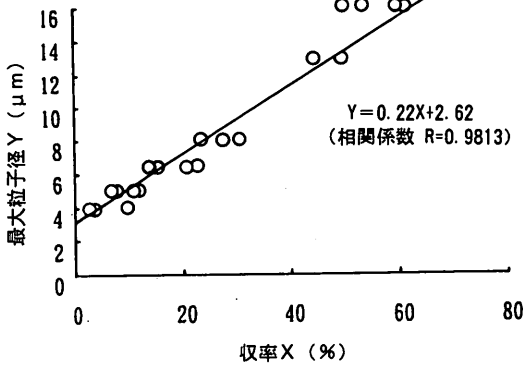


図-2 強制渦遠心分級における微粉収率と微粉最大粒径の関係の一例

粉最大粒径との関係の一例を示す。この図よりわかるとおり、微粉収率は得られる微粉の粒径（この場合は最大粒径）により概ね決定され、最大粒径が20μmの場合は70%程度、10μmの場合は30%程度、5μmの場合は10%程度である。

(2) 分級フライアッシュの物理的特性

表-1に、未分級フライアッシュおよび分級フライアッシュ（FA20、FA10、FA5）の比重、比表面積、平均粒径の一般的な値を示す。ここで、分級フライアッシュを示す記号「FA20」は最大粒径がほぼ20μmのもの、「FA10」は最大粒径がほぼ10μmのもの、および「FA5」は最大粒径がほぼ5μmのものを示している。また、以後簡便のため未分級フライアッシュを「原粉」と称することにす。この表よりわかるとおり、フライア

ッシュの最大粒径が小さくなるほど比重は大きくなっていく。これは、粒子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、フライアッシュの最大粒径が小さくなるほど比表面積は大きくなる。

図-3に原粉および分級フライアッシュの粒度分布の一例を示す。FA20は原粉とFA10のほぼ中間程度の分布を示しており、FA10とFA5ではさほど大きな相違はない。また、写真-1～写真-3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。このことは、粒子群の円形度係数という指標により実証されている[5]。すなわち、原粉よりも分級フライアッシュの方が球形に近い粒子の占める割合が大きくなる。

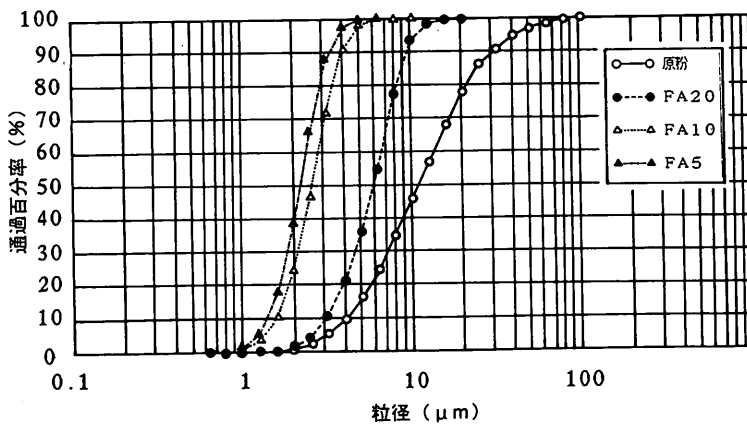


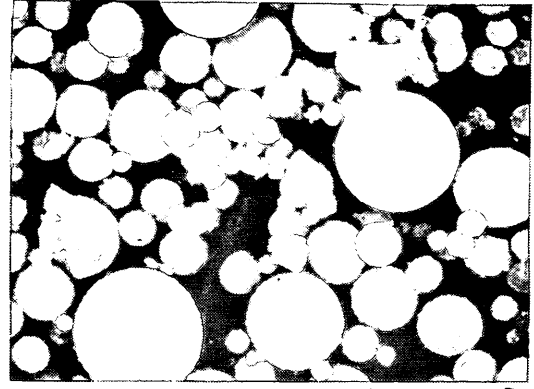
図-3 原粉および分級フライアッシュの粒度分布の一例



10 micron

原粉

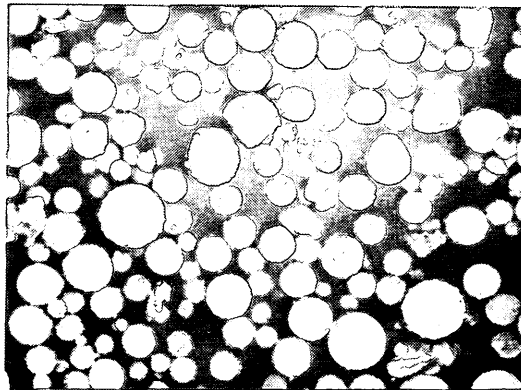
写真—1 未分級フライアッシュ（原粉）の粒子形状



10 micron

FA20

写真—2 分級フライアッシュ（FA20）の粒子形状



10 micron

FA10

写真—3 分級フライアッシュ（FA10）の粒子形状

(3) 分級フライアッシュの化学的性質

表—2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。原粉に比べて分級フライアッシュの方がSiO₂が少なく Al₂O₃が多いという傾向が認められるが、その相違はさほど大きなものではない。これより、後章で述べる分級フライアッシュを用いたコンクリートにおいて生じる各種の効果は化学的性質より生じるものではなく、物理的特性より生じるものであることが推察される。

(4) 原粉および分級フライアッシュの品質変動

原粉および分級フライアッシュの品質変動の一例とし

表—2 原粉および分級フライアッシュの化学分析結果

	化学成分 (%)								
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	lgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	強熱減量
原粉	61.2	21.4	5.7	4.0	1.4	0.97	0.92	0.6	2.1
FA20	57.8	23.0	6.1	3.0	1.1	0.82	0.90	0.8	2.0
FA10	56.5	24.0	6.0	2.2	1.0	0.83	0.95	1.0	1.6
FA 5	55.4	23.9	6.2	2.0	0.9	0.83	0.81	1.2	1.3

て、図-4に比重の月別変動の一例を示す[1]。図より明らかとなっており、原粉よりもFA20の方が比重のバラつきは小さく、FA20よりもFA10の方がさらにバラつきは小さくなっている。また、図-5にブレン比表面積の月別変動の一例を示す[1]。図より明らかとなっており、原粉では最大で約1000cm²/gのバラつきが生じているが、FA20およびFA10の場合はほとんど一定である。

比重およびブレン比表面積を例に取ったが、原粉に比べてFA20、FA10は品質変動が大幅に小さくなっており、コンクリート混和材として使用する場合の品質管理が極めてやり易くなっていることが明らかである。

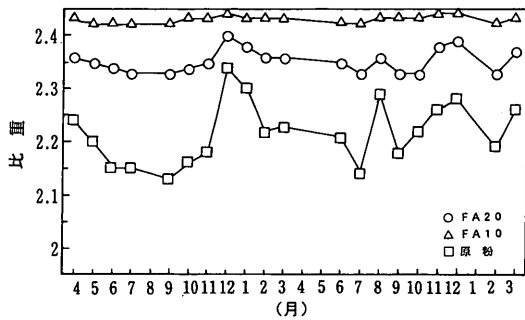


図-4 比重の月別変動の一例

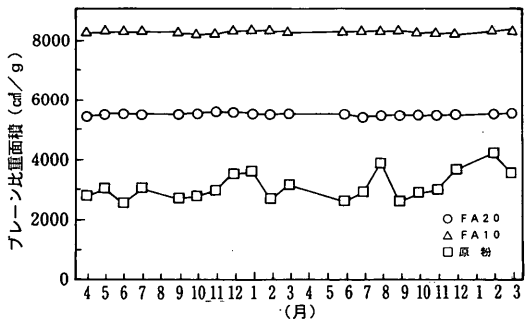


図-5 ブレン比表面積の月別変動の一例

2.2 分級フライアッシュを用いたコンクリートの各種物性

これまでに実施されてきた既往の研究[1][6]より、以下のような知見が得られている。

(1) フレッシュコンクリートの性質

- ① 材料分離抵抗性に優れている、すなわちブリーディング率が小さい。
- ② 普通コンクリートに比べて凝結時間は増大する。
- ③ 流動性が優れている。すなわち、同一のワーカビ

リティーを得るために必要な単位水量を少なくすることができる。

(2) 硬化コンクリートの性質

- ① フライアッシュを用いることにより生じる強度発現の遅延をある程度改善できる。
- ② フライアッシュを用いることにより生じる弾塑性状発現の遅延をある程度改善できる。
- ③ 乾燥収縮量は小さくなる。
- ④ クリーブ係数は小さくなる。
- ⑤ 凍結融解抵抗性は幾分向上する。
- ⑥ アルカリ骨材反応抑制効果は向上する。

上記①の強度発現に関して、普通コンクリート、原粉を用いたコンクリート、および分級フライアッシュ (FA20) を用いたコンクリートの強度発現性状の一例を示す[6]。この場合、コンクリートの水結合材比は統一されている。図よりわかるとおり、普通コンクリートに比べて、原粉およびFA20を用いたコンクリートの方が強度発現は遅くかつ強度自体が小さい。特に、フライアッシュの置換率が30%の場合の方が、15%の場合よりもその傾向が顕著である。

FA20を用いかつ置換率が15%の場合、材齢3ヶ月において普通コンクリートよりも高い圧縮強度を示し、以後の材齢においてもその傾向は続く。原粉を用いかつ置換率が15%の場合、材齢1年において普通コンクリートと同等の圧縮強度を示すようになる。

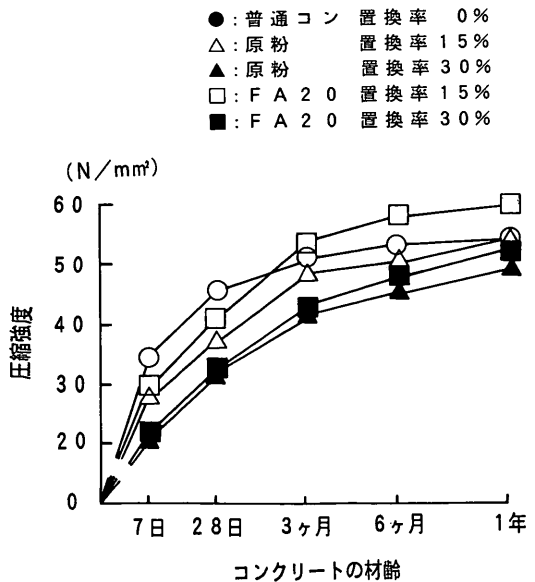


図-6 圧縮強度の発現性状の一例

フライアッシュを用いた場合、同等の水セメント比の普通コンクリートに比べると圧縮強度は小さくなるが、水結合材比を小さくすることにより、設計基準強度をクリアすることは十分可能である。また、分級フライアッシュを用いることにより、強度発現の遅延を改善することができる。

2.3 分級フライアッシュの効果に関する考察実験

2.1項で述べたとおり、原粉と分級フライアッシュとは化学成分に大きな相違はなく物理的特性が大きく異なっている。また、分級フライアッシュを混入することにより、フレッシュ時のコンクリートおよび硬化後のコンクリートにおいて種々のメリットが発生する。これらのメリットは分級フライアッシュの物理的特性に起因するものであることが推察される。著者の一人は、セメント、フライアッシュおよび砂の混合粉体の空隙率をパラメーターとした場合のモルタルのフローおよびモルタルの圧縮強度を実験的に調べている[6]。本項においては、その実験の概要および結果を述べ、分級フライアッシュを用いることにより発生する種々のメリットの要因について考察する。

(1) 考察実験に使用した材料およびモルタルの配合

実験に使用した材料は表-3に示すとおりであり、モルタルの配合は表-4に示すとおりである。

表-3 考察実験に用いたモルタル用材料

	比重	平均粒径 (μm)	比表面積 (cm^2/g)
原粉	2.40	14.2	4240
FA20	2.42	5.1	5540
FA10	2.53	2.4	8970
セメント	3.15	14.0	3230
細骨材	2.63	220	

セメント：普通ポルトランドセメント
細骨材：豊浦標準砂

(2) 混合粉体の練混ぜ方法および粉体空隙率の定義

粉体の練混ぜには小型モルタルミキサーを使用した。セメント、フライアッシュおよび砂を練り鉢に投入し、ミキサーを低速で30秒間運転し一旦停止させた。停止状態で底部の試料をかき混ぜた後さらに高速で60秒間運転した。その後、混合試料を1mmふるいにかけてながら試験管に詰め、石山式比容積試験器にて3000回のタッピングを行った。タッピングした後の試料の質量、容積を測定し次式により混合粉体の空隙率を算出した。

混合粉体の空隙率 (%)

$$= \left(\frac{\text{[見掛けの容積]} - \left[\frac{\text{セメントの質量}}{\text{セメントの比重}} \right] - \left[\frac{\text{砂の質量}}{\text{砂の比重}} \right] - \left[\frac{\text{混和材の質量}}{\text{混和材の比重}} \right]}{\text{[見掛けの容積]} \times 100} \right)$$

(3) 粉体時の空隙率とモルタルフローの関係

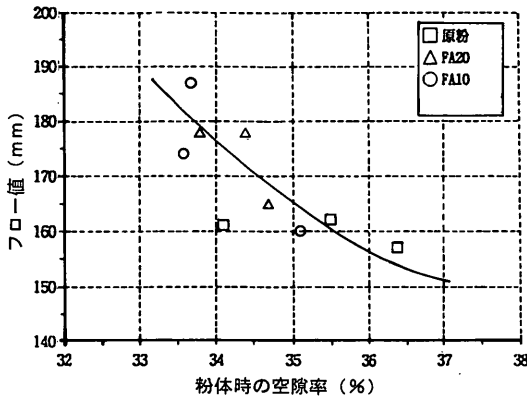
図-7に粉体時の空隙率とモルタルフローの関係を示す。この図よりわかるとおり、粉体時の空隙率が小さいほどフロー値は大きくなるという傾向がある。すなわち、粉体時の空隙率が小さいほど流動性のよいモルタルが得られると言える。なお、図よりわかるとおり、粉体時の空隙率を小さくする方法の一つとして、分級フライアッシュ (FA10, FA20) の使用を位置づけることもできる。

(4) 粉体時の空隙率と圧縮強度の関係

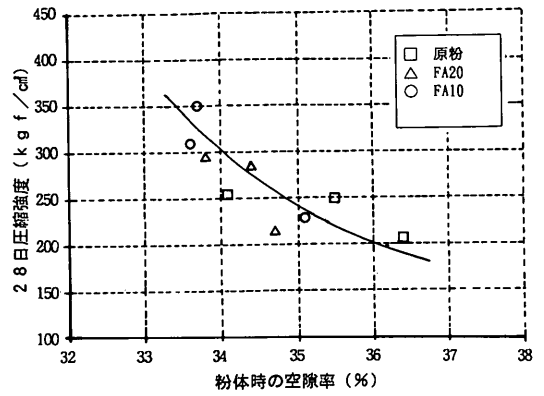
図-8～図-10は粉体時の空隙率とモルタルの圧縮強度の関係を示している。これらの図よりわかるとおり、粉体時の空隙率が小さいほど圧縮強度は大きくなる傾向がある。また、材齢が進んだ場合 (材齢91日) でもこの傾向が認められる。

表-4 考察実験に用いたモルタルの配合

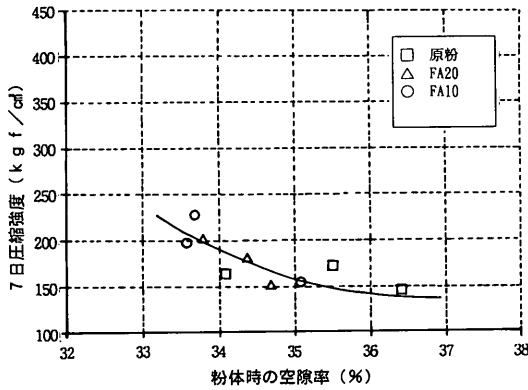
	添加量 (容積%)	砂 (g)	セメント (g)	フライアッシュ (g)	水 (g)
原粉	10	4040	1210	108.9	1028
	20			242.9	
	30			416.4	
FA20	10	4040	1210	103.3	1028
	20			232.3	
	30			398.3	
FA10	10	4040	1210	102.3	1028
	20			230.4	
	30			394.2	



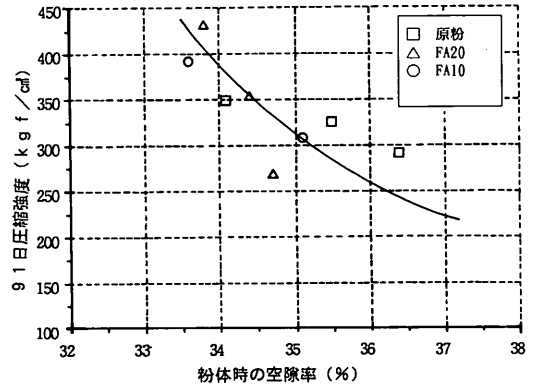
図—7 粉体時の空隙率とモルタルフローの関係



図—9 粉体時の空隙率とモルタル圧縮強度の関係 (材齢28日)



図—8 粉体時の空隙率とモルタル圧縮強度の関係 (材齢7日)



図—10 粉体時の空隙率とモルタル圧縮強度の関係 (材齢91日)

(5) 分級フライアッシュの効果に関する一考察

図—7～図—10に示されるとおり、粉体時の空隙率がモルタルのフローおよび圧縮強度を決定する一つのパラメーターである。このことより考察して、

『水を加える前の粉体の状態において最も密に詰まるような粒径、粒度分布であれば加水後のフレッシュ状態において最もよい流動性が得られ、また硬化後においては最も大きな圧縮強度を得ることができる』ものと考えられる。分級フライアッシュを添加することによりフレッシュコンクリートおよび硬化コンクリートにおいて様々なメリットが生じる原因の一つはこの点にあるものと推察される。

3. 分級フライアッシュを用いたコンクリートの耐海水性

3.1 序節

コンクリートの耐海水性という場合、一般的には海水がセメント硬化体に及ぼす化学的作用に対する抵抗性を指す。海水が及ぼす化学的作用として、海水中に存在する硫酸塩とクリンカー鉱物中の C_3A との反応によるエトリンガイトの生成、およびその際に生じる膨張圧による劣化が支配的であると考えられている[7]。エトリンガイトの生成による膨張破壊は比較的高濃度の硫酸塩環境下においては既に確認されている[8][9]。一方、海水中の硫酸イオン濃度はさほど大きくないため、海洋環境下におけるこの種の劣化作用を受けたコンクリートの終局状態については未だ明確にはなっていない。しかし、

海洋環境下でコンクリート構造物を建設する場合、使用するコンクリートが十分な耐海水性を有することを確認しておくことは最低限必要とされることである。本研究においては、分級フライアッシュを混入したコンクリートの耐海水性を実験的に検討した。本章においてはその実験の概要、結果および考察を取りまとめる。

3.2 実験の概要

(1) 供試体製作に使用した材料

セメントは普通ポルトランドセメントを使用した。その比重は3.16、比表面積は3293cm²/gである。細骨材として徳島県鳴門産の砕砂（比重2.58、吸水率2.52%、粗粒率2.83）、粗骨材として同地産の砕石（比重2.61、吸水率1.77%、粗粒率6.83、最大寸法20mm）を使用した。練混ぜ水として水道水を使用した。使用したフライアッシュの原粉は、比重が2.24、比表面積が4250cm²/gであり、JIS A 6201「フライアッシュ」に適合したものである。このフライアッシュを強制渦遠心分級法により分級し、FA20（最大粒径20μm、比重2.38、比表面積5760cm²/g）およびFA10（最大粒径10μm、比重2.47、比表面積8100cm²/g）の2種類の分級フライアッシュを得た。コンクリートの練混ぜ時の混和剤としてAE減水剤およびAE助剤を使用した。

(2) 供試体製作の要因と水準

表-5に供試体製作の要因と水準を示す。要因として、フライアッシュの置換率（0%、20%、30%）、フライアッシュの最大粒径（原粉、20μm、10μm）、およびコンクリートの水結合材比（45%、55%、65%）を取り上げた。これらの要因と水準を組み合わせると表-6に示すように8種類の異なる供試体を作成した。この表よりわかるとおり、フライアッシュの置換率の影響を検討する場合は、No.4とNo.7（FA20の場合）、およびNo.5

表-5 供試体製作の要因と水準

要因	水準
フライアッシュの置換率	0%, 20%, 30%
フライアッシュの最大粒径	原粉, 20 μ m, 10 μ m
コンクリートの水結合材比	45%, 55%, 65%

表-6 供試体製作の要因の組み合わせ

配合番号	フライアッシュ		水結合材比 (%)
	最大粒径 (μ m)	置換率 (%)	
1	—	0	55
2	20	20	45
3	10	20	55
4	20	20	55
5	原粉	20	55
6	20	20	65
7	20	30	55
8	原粉	30	55

とNo.8（原粉の場合）を比較すればよい。また、フライアッシュの有無の影響および最大粒径の影響を検討する場合は、No.1（普通コンクリート）、No.3（10μm）、No.4（20μm）およびNo.5（原粉）を比較すればよく、水結合材比の影響を検討する場合はNo.2（45%）、No.4（55%）およびNo.6（65%）を比較すればよい。

(3) コンクリートの配合

表-7にコンクリートの配合を示す。これらの配合を

表-7 コンクリートの配合

配合番号	水結合材比 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)					
			水	セメント	フライアッシュ	細骨材	AE減水剤	AE助剤
1	55	45.5	180	327	0	963	0.818	19.6
2	45	38.5	175	311	78	1049	0.973	132.3
3	55	43.5	174	253	63	1002	0.790	126.4
4	55	43.6	171	245	62	1007	0.778	93.3
5	55	43.0	175	254	65	1005	0.795	63.6
6	65	45.5	175	215	54	987	0.673	75.3
7	55	41.5	169	215	92	1044	0.768	165.8
8	55	41.0	173	221	94	1039	0.788	88.2

(AE助剤のみ単位はcm³)

決定する際には、スランプ 8 ± 1 cm, 空気量 $4 \pm 0.5\%$ という配合条件を設定し、試し練りを経て最適な配合を選定した。なお、試験に用いた供試体は $\phi 10 \times 20$ cm の円柱供試体である。

(4) 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浸せきされており、感潮部では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ものの、海水飛沫の影響はほとんど受けない。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。

(5) 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劣化促進試験方法[10]を基本としている。図-11に西林の示す方法と本研究において用いた促進方法を示す。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(合計400日)まで行う、としている。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試験の相違点は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。乾湿繰返しのサイクル数が少ないために、本実験で用いた方法の方が西林の方法より促進効率は幾分劣る可能性がある。

(6) 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。

(7) 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、載荷面を平滑にした。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。

(8) 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。

(9) 静弾性係数試験の方法

静弾性係数試験を行う際には、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、載荷面を平滑にした。試験はコンプレッションメーターを用いて実施した。弾性係数の算出には、圧縮強度の3分の1の応力とその時のひずみの値を用いた。

(10) 動弾性係数試験の方法

動弾性係数試験は、JIS A 1127「共鳴振動によるコンクリートの動弾性係数、動せん断弾性係数及び動ポアソン比試験方法」に準拠する測定装置を用い、縦振動法により行った。

(11) 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1cm部分および供試体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。このモルタル塊を粒径が2.5~5mmになるように整粒した後、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。細孔径分布の測定には水銀圧入式ポロシメーターを使用し、細孔半径0.0035~120 μ mまでの細孔量および細孔量割合を測定した。

3.3 実験の結果および考察

(1) 供試体の表面の状況

海洋環境に暴露された供試体の表面には以下のような

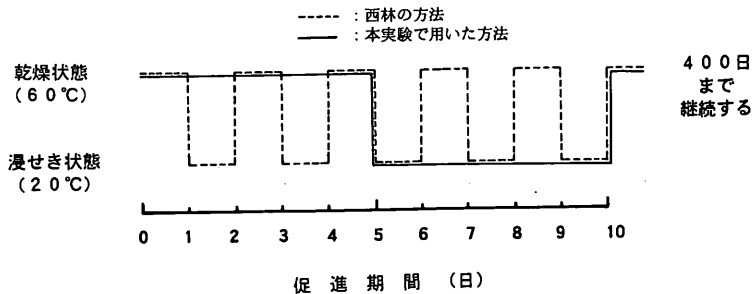


図-11 劣化促進試験の方法

特徴があった。海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、コンクリート表面の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。すなわち、微視的にはコンクリート表面のペーストの剥離が生じていた。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、配合条件により程度の差はあるが、コンクリート表面のペーストが剥離するという劣化が生じた。写真-4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5（原粉、置換率20%）の供試体の劣化がそれに次いで進んでいた。配合4（FA20、置換率20%）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5に比べるとその程度は軽微であった。一方、配合7（FA20、置換率30%）の供試体ではそのような劣化はほと

んど認められなかった。これより、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乾湿繰返しおよび温度変動の繰返しに対する抵抗性が優れていると言える。

(2) 圧縮強度

表-8に圧縮強度の試験結果の一覧を、図-12にそれを図示したものを示す。初期値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。表中の括弧内の数値は各配合の初期値に対する比率をパーセントで表示したものである。

初期値について配合1（普通コンクリート）、配合4（FA20）および配合5（原粉）を比較してみると、フライアッシュを混入したコンクリートは普通コンクリートに比べて強度発現は遅くなっているものの、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圧縮強度は大きくなっており、分級フライアッシュを用いることにより強度発現の遅延が改善されていることがわかる。

配合3（FA10）と配合4（FA20）を比較してみると、

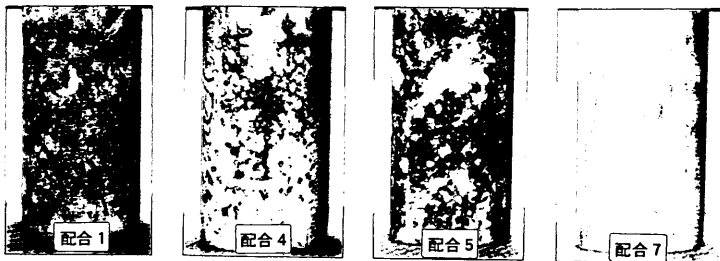


写真-4 耐海水性劣化促進試験後の供試体の表面の状況の一例

表-8 圧縮強度試験結果

配合 番号	圧縮強度 (N/mm ²)					
	初期値	水中養生 (2年)	海洋環境曝露 (2年)			乾湿繰返し 40サイクル
			海中部	感潮部	陸上部	
1	43.6(100)	56.3(129)	53.9(124)	51.3(118)	45.8(105)	25.4(58)
2	49.0(100)	65.6(134)	60.0(122)	66.0(135)	60.6(124)	36.6(75)
3	41.7(100)	58.8(141)	60.8(146)	59.2(142)	49.8(119)	38.7(93)
4	40.3(100)	52.2(128)	54.5(133)	52.2(128)	49.9(122)	37.3(91)
5	35.2(100)	51.4(146)	50.4(143)	46.5(132)	44.6(127)	31.9(90)
6	28.2(100)	41.4(147)	45.7(162)	40.9(145)	36.5(129)	31.9(113)
7	31.8(100)	52.6(165)	50.6(159)	45.4(143)	41.3(130)	31.9(100)
8	31.9(100)	53.0(166)	51.6(162)	47.3(148)	42.7(133)	34.5(108)
平均	37.8(100)	53.9(143)	53.4(142)	51.1(135)	46.4(123)	33.5(89)

() 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である。

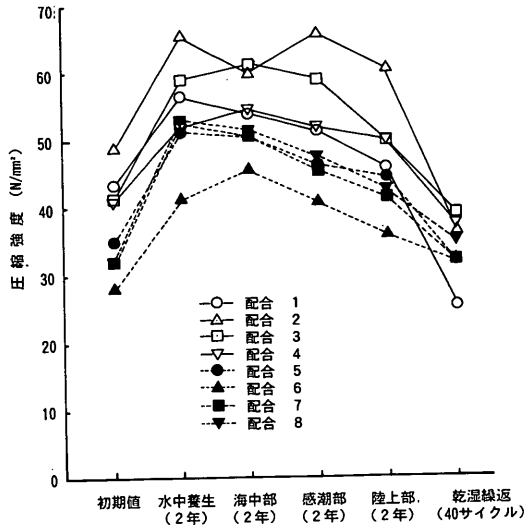


図-12 圧縮強度試験結果

わずかに配合3の方が圧縮強度は大きくなっている。すなわち、最大粒径が小さい方が圧縮強度は大きい。

配合2 (W/B=45%)と配合4 (W/B=55%)と配合6 (W/B=65%)を比較してみると、その強度は大きい方より、配合2、配合4そして配合6となっており、水結合材比が小さいほど圧縮強度は大きくなっている。

また、配合4 (置換率20%)と配合7 (置換率30%)を比較してみると、配合4の方が圧縮強度は大きくなっており、分級フライアッシュの置換率が大きい方が圧縮強度は小さくなっている。

海洋環境に暴露した場合は、いずれの暴露条件の場合も圧縮強度は増大している。感潮部に20年間暴露された後のコンクリートの強度に関する報告があるが[11]、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、すなわち暴露開始後5年程度ま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くなっている。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ていない。

乾湿繰返し劣化促進試験の場合、初期値と同程度あるいは配合によっては低下しているものもある。この強度低下には高温乾燥が最も大きな影響を及ぼしているものと思われる。以下に各配合間の比較を述べる。

配合1 (普通コンクリート)と配合4 (FA20)と配合5 (原粉)を比較してみると、強度自体とその低下率

ともに配合1が最も小さい。配合4と配合5で強度の低下率はほぼ同じであるが、強度自体は配合4の方が約5 N/mm²大きい。

配合3 (FA10)と配合4 (FA20)を比較してみると、強度自体および低下率ともに配合3の方が若干小さいがその差は極めて小さく、最大粒径の影響は認められない。

配合2 (W/B=45%)と配合4 (W/B=55%)と配合6 (W/B=65%)を比較してみると、水結合材比が小さいほど強度の低下率は大きくなっている。この点については、今後のさらなる実験と配合設計上の注意が必要であると思われる。

配合4 (置換率20%)と配合7 (置換率30%)を比較してみると、強度自体は配合4の方が約5N/mm²大きくなっている。しかし、強度の低下率は配合7の方が10%ほど大きくなっている。これより、分級フライアッシュの置換率の影響は明確ではない。

(3) 引張強度

表-9に引張強度の試験結果の一覧を、図-13にそれを図示したものを示す。

初期値について配合1 (普通コンクリート)、配合4 (FA20)および配合5 (原粉)を比較してみると、配合1の引張強度が最も大きく、次いで配合5、そして配合4が最小となっている。これより、フライアッシュを混入することにより引張強度の発現が遅れていること、分級フライアッシュによる強度発現遅延の改善効果は認められないことがわかる。

配合4 (置換率20%)と配合7 (置換率30%)を比較してみると、配合4の方がわずかに強度が大きいとその差は極めて小さく、置換率の影響は明確ではない。

海洋環境暴露の場合、大半の供試体において初期値を上回っているが、陸上部の場合に初期値を下回る配合もある。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る傾向にある。

陸上部に暴露した供試体について、配合1 (普通コンクリート)と配合4 (FA20)と配合5 (原粉)を比較してみると、強度自体は配合1と配合4が同等で、配合5がそれより小さくなっている。強度の低下率では配合4のみ低下しておらず、配合1で10%の低下率、配合5で22%の低下率であった。これより、分級フライアッシュを使用することにより引張強度自体の低下率を抑制できることがわかる。

配合4 (置換率20%)と配合7 (置換率30%)を比較してみると、配合4の方が配合7よりも引張強度および低下率ともに大きいとその差は極めて小さく、置換率の影響は明確ではない。

表-9 引張強度試験結果

配合番号	引張強度 (N/mm ²)					
	初期値	水中養生 (2年)	海洋環境曝露 (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)
4	3.0(100)	3.9(130)	4.1(137)	3.1(104)	3.4(114)	2.3(76)
5	3.6(100)	3.7(103)	4.1(114)	3.4(94)	2.8(78)	2.0(56)
7	2.8(100)	3.6(130)	4.2(152)	3.4(123)	3.1(112)	2.6(93)
8	2.8(100)	4.1(145)	3.8(135)	3.8(135)	3.3(117)	2.4(85)
平均	3.2(100)	3.8(109)	4.0(125)	3.5(109)	3.2(100)	2.3(72)

() 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である。

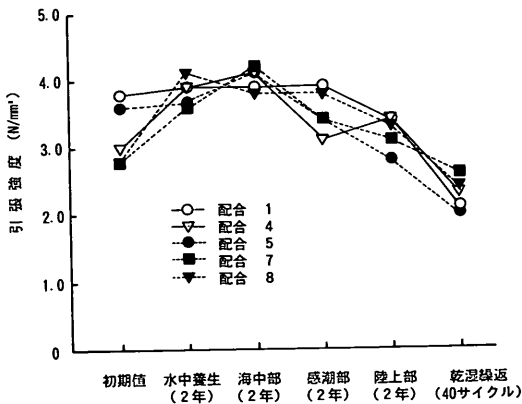


図-13 引張強度試験結果

乾湿繰返し劣化促進試験の場合、全ての配合において初期値を下回っており、その低下率は圧縮強度の場合の低下率よりも大きい。この引張強度の低下も圧縮強度の低下と同様に高温乾燥の影響を受けているものと思われる。配合1（普通コンクリート）と配合4（FA20）と配合5（原粉）を比較してみると、配合4が強度自体は最も大きく、その低下率は最も小さくなっている。

また、配合4（置換率20%）と配合7（置換率30%）を比較してみると、配合7の方が配合4よりも引張強度自体は大きく、その低下率は小さくなっており、置換率を大きくすることの効果が見られる。

(4) 静弾性係数

表-10に静弾性係数の試験結果の一覧を、図-14にそれを図示したものを示す。

初期値を見てみると、配合7（FA20、置換率30%）

表-10 静弾性係数試験結果

配合番号	静弾性係数 (×10 ⁵ kgf/cmm ²)					
	初期値	水中養生 (2年)	海洋環境曝露 (2年)			乾湿繰返し 40サイクル
			海中部	感潮部	陸上部	
1	2.90(100)	2.96(99)	3.09(107)	2.85(98)	2.45(84)	1.19(41)
2	3.19(100)	3.42(107)	3.14(98)	3.11(97)	2.78(87)	1.05(33)
3	2.92(100)	3.18(109)	3.22(110)	3.33(114)	2.46(84)	1.27(43)
4	2.94(100)	3.26(111)	3.32(113)	2.56(87)	2.13(72)	1.10(37)
5	2.91(100)	3.12(107)	3.09(106)	2.64(91)	2.73(94)	1.21(41)
6	2.76(100)	2.36(86)	3.18(115)	2.15(78)	1.49(54)	1.24(45)
7	2.46(100)	3.36(137)	3.01(122)	2.90(118)	2.11(86)	1.05(43)
8	2.80(100)	3.18(114)	3.43(123)	2.65(95)	2.14(76)	1.21(43)
平均	2.86(100)	3.09(108)	3.19(112)	2.77(97)	2.29(80)	1.17(41)

() 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である。

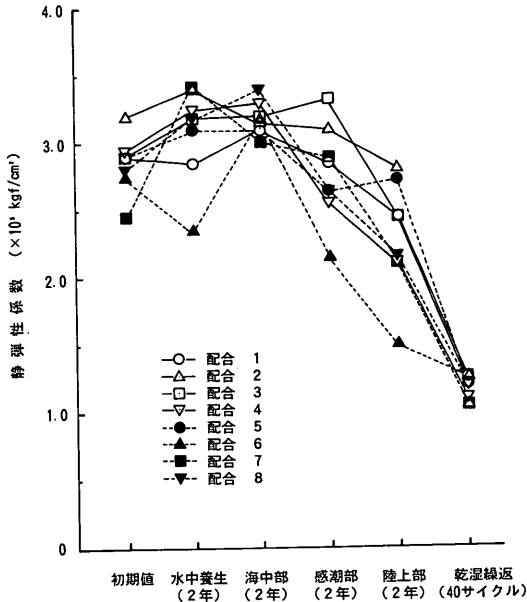


図-14 静弾性係数試験結果

が他の配合に比べて幾分値が小さいが、全体的に見て水結合材比が同一であればフライアッシュの混入の有無などにかかわらず、弾性係数はほぼ同一となっている。

海洋環境暴露の場合、海中部ではほとんどの配合において初期値を上回っている。感潮部の場合、いくつかの配合において初期値を下回る供試体があり、陸上部では全ての配合において初期値を下回る結果となっている。これより、コンクリートが乾燥状態にある時間が静弾性係数の経時変化に影響を及ぼしているものと考えられ、乾燥時間が長くなるほど弾性係数の低下が大きくなるものと思われる。また、感潮部および陸上部の場合、配合6 (W/B=65%) の低下率が最も大きくなっているが、これは水結合材比が大きいためその原因と考えられる。すなわち、乾燥によりコンクリート中から失われる水分が他のコンクリートより多かったことにより弾性係数の低下も大きくなったものと考えられる。

配合間の差が最も大きく出ている陸上部について、配合1 (普通コンクリート) と配合4 (FA20) と配合5 (原粉) を比較してみると、配合4が弾性係数値が最小であり、低下率も最も大きい。配合1と配合5は弾性係数値と低下率ともにほぼ同程度である。

配合4 (置換率20%) と配合7 (置換率30%) を比較してみると、弾性係数値自体は配合4の方が大きい、低下率は配合7の方が小さい。

また、配合2 (W/B=45%) と配合4 (W/B=55%) と配合6 (W/B=45%) を比較してみると、配合6の低下率が最大、配合4がそれに次いで大きく、配合2の低下率が最も小さい。これより、水結合材比が小さい方が弾性係数の低下率は小さくなる傾向があると言える。

乾湿繰返し劣化促進試験の場合、いずれの配合においても50%以上の大幅な低下を示している。これは、圧縮強度および引張強度の場合と同様に高温乾燥が最も大きな影響を及ぼしているものと考えられる。しかし、乾湿繰返し終了後は各配合間でさほど大きな差は認められなかった。

(5) 動弾性係数

表-11に動弾性係数の試験結果の一覧を、図-15にそれを図示したものを示す。本試験は乾湿繰返し劣化促進試験の供試体においてのみ実施した。表中の耐海水性指数は西林により提案されているものである[10]。初期値について、配合1 (普通コンクリート)、配合4 (FA20、置換率20%) および配合5 (原粉、置換率20%) を比較してみると、配合4が動弾性係数が最も大きく、次いで配合5、そして配合1が最も小さくなっている。すなわち、分級フライアッシュを混入することにより動弾性係数は大きくなっている。

配合1 (普通コンクリート) と配合4 (FA20) と配合5 (原粉) を比較してみると、動弾性係数値自体は配合4が最大、次いで配合5、そして配合1が最小となっている。一方、動弾性係数の低下率は配合1と配合4が同程度で配合5が最小となっている。これより、分級フライアッシュを混入することにより、動弾性係数自体は

表-11 動弾性係数試験結果

配合番号	動弾性係数 (×10 ⁵ kgf/cm ²)		耐海水性指数*
	初期値	乾湿繰返し40サイクル	
1	3.03(100)	2.59(86)	86
2	3.54(100)	3.66(103)	103
3	3.65(100)	3.00(82)	82
4	3.62(100)	3.08(85)	85
5	3.27(100)	3.04(93)	93
6	3.01(100)	2.84(94)	94
7	3.32(100)	2.84(86)	86
8	3.64(100)	3.51(96)	96
平均	3.39(100)	3.07(91)	91

() 内の数値は初期値に対する比率をパーセント表示
* : 耐海水性指数は西林の提案による

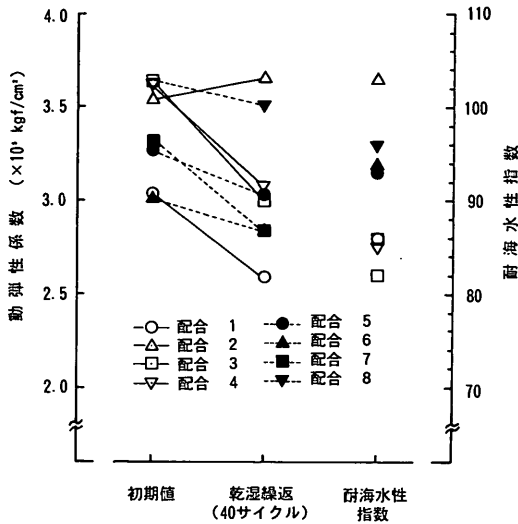


図-15 動弾性係数試験結果

大きくなるが、低下率は他の配合とほぼ同等である。

配合 4 (置換率20%) と配合 7 (置換率30%) を比較してみると、動弾性係数値自体は配合 4 の方が大きい、低下率は配合 4 と配合 7 でほぼ等しくなっており、置換率の影響は明確ではない。

また、配合 2 (W/B=45%) と配合 4 (W/B=55%) と配合 6 (W/B=65%) を比較してみると、動弾性係数値自体は水結合材比が小さいほど大きくなっており、水結合材比の効果が明確である。一方、低下率は配合 6 の方が配合 4 よりもむしろ小さくなっており、この点に関し

ては水結合材比の効果は明確ではない。

(6) 静弾性係数と動弾性係数の比較

表-10および表-11に示される両弾性係数の結果を比較してわかるとおり、乾湿繰返し劣化促進試験後に測定した弾性係数の値は両者でかなり異なるものとなった。すなわち、平均値で比較してみると静弾性係数が動弾性係数の38%にとどまった。通常、同一のコンクリートを計測した場合、動弾性係数の方が静弾性係数より大きくなり、その比率は大体1.1~1.4であるとされている[12]。本実験結果は静弾性係数が動弾性係数に比べて一般的傾向よりかなり小さくなった。

この理由は明確ではないが、乾湿繰返しにより生じたコンクリートの弾性性状の変化が動弾性係数試験の結果に十分に反映されていないものと考えられる。これより、実際のコンクリートの弾性係数は動弾性係数試験より求めた値よりかなり下回ることもあるものと考えられる。また、今回のように、コンクリートがかなりの時間高温乾燥状態に置かれる場合、圧縮強度と弾性係数の関係が通常のコンクリートと大きく異なってくるものと考えられる。この点が、コンクリートの耐海水性促進試験として本研究で採用したような乾湿繰返し法を用いる場合の問題点であるとも言える。

(7) 細孔径分布の結果に基づく分級フライアッシュの効果に関する考察

細孔径分布試験は、乾湿繰返し劣化促進試験終了後の配合 1 (普通コンクリート)、配合 4 (FA20、置換率20%)、配合 5 (原粉、置換率20%) および配合 7 (FA20、置換率30%) について実施した。図-16および図-17は

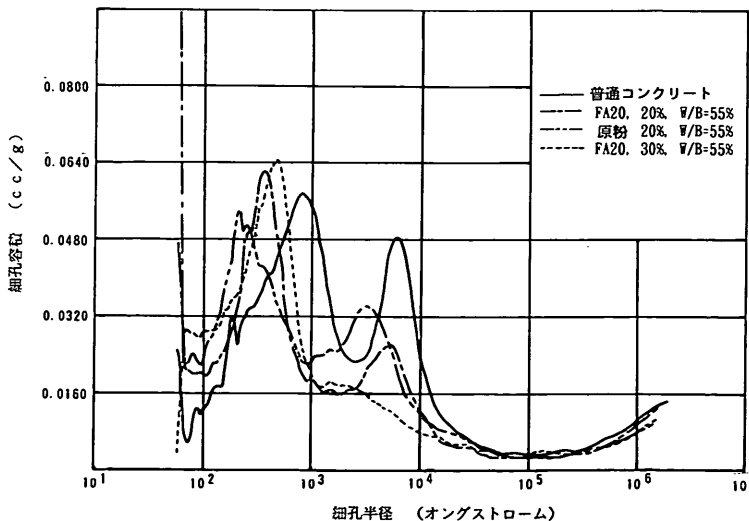


図-16 細孔径分布 (コンクリートの表層部分)

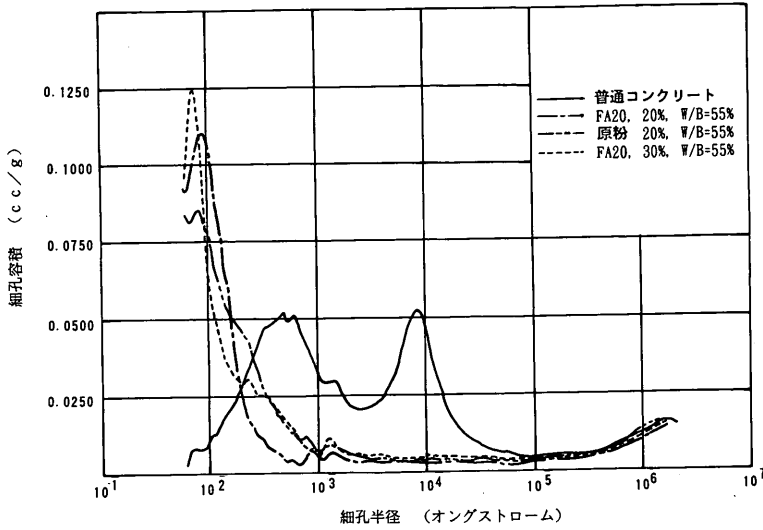


図-17 細孔径分布 (コンクリートの内部, 約4 cm)

細孔径分布を示している。

図-16は各供試体の表層部分 (コンクリート表面より約1cmの深さ) より採取した試料の細孔径分布を示している。この図より明確な傾向を読み取ることができる。まず、フライアッシュを混入したコンクリートに比べて普通コンクリートの細孔径分布は全体的に右側にある。すなわち、細孔径が全体的に大きい。一方、原粉を使用したコンクリートとFA20を使用したコンクリートを比較してみると、細孔径が $10^3 \sim 10^4$ Åの範囲で、原粉を使用したコンクリートの方が細孔容積が大きくなっている。また、FA20を使用したコンクリートで、置換率20%と置換率30%を比較してみると、細孔径が $10^3 \sim 10^4$ Åの範囲で置換率30%の方が細孔容積は小さくなっている。すなわち、分級フライアッシュを用いることにより、コンクリートの細孔構造が緻密になっていると言える。

図-17は各供試体の中央部分 (コンクリート表面より約4cmの深さ) 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、フライアッシュを混入したコンクリートに比べて、普通コンクリートの細孔径分布は大きく右側にずれており、細孔構造が大きく異なることが明らかである。一方、フライアッシュを混入したコンクリートの場合、原粉の場合と分級フライアッシュの場合で顕著な差は認められない。また、分級フライアッシュの置換率の影響も明確ではない。

図-16と図-17を比較してみると、フライアッシュを混入したコンクリートの場合、乾湿繰返し劣化促進試験

を受けることにより供試体表層部分の細孔径が増大していることがわかる。すなわち、コンクリートの細孔構造が変化していることが推察される。しかし、普通コンクリートの場合には細孔構造に大きな変化は見られない。

本章においてこれまでに述べてきたように、分級フライアッシュを混入することにより、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よりも優れた耐海水性を発揮させることができる。これは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細孔構造が普通コンクリートに比べて緻密な構造となっていることが大きな原因の一つであると考えられる。

4. 分級フライアッシュを用いたコンクリートの内部鉄筋の防食性

4.1 序節

海洋環境下にあるコンクリート構造物の耐久性を支配する最も重要な要因の一つはコンクリート中の鉄筋の防食性である。内部鉄筋の腐食に起因する劣化、いわゆる塩害はコンクリート中へ浸透する塩化物イオンがその原因であり、塩化物イオンの浸透、拡散の抑制に優れたコンクリートを用いることがその防止対策の第一歩となる。本研究においては、3章において述べた耐海水性に関する実験と同様に、普通コンクリートおよびフライアッシュの原粉を用いたコンクリートとの比較を通して分級フライアッシュの混入が内部鉄筋の防食性に及ぼす効果を実験的に検討した。実験はコンクリート中への塩化物イ

オンの浸透，拡散に関するものと，電気化学的手法を用いた内部鉄筋の腐食に関するものから構成されている。本章ではその実験の概要，結果および考察を取りまとめる。

4.2 実験の概要

(1) 使用材料

供試体の製作に使用した材料は3章で述べたものと同一である。

(2) 供試体製作の要因と水準

供試体製作時の要因と水準は3章で述べたものと同様である。すなわち，取り上げた要因はフライアッシュの置換率（0%，20%，30%），フライアッシュの最大粒径（原粉，10 μ m，20 μ m），および水結合材比（45%，55%，65%）である。また，これらの要因の組み合わせも3章において述べたものと同様である。すなわち，表-6に示すような8種類の異なる供試体を作成した。

(3) コンクリートの配合および供試体の概要

コンクリートの配合も3章の表-7に示すものと同様である。実験に用いた供試体の外形は ϕ 10 \times 20cmの円柱供試体であり，供試体中央部に十分に錆を落とした状態の ϕ 13mm，長さ100mmの丸鋼を埋設した。埋設した丸鋼には電気化学的計測を行うためのリード線を予め接続している。また，海水がコンクリートに浸透する面を供試体の側面に限定するために供試体の上下面はエポキシ樹脂によりシールした。

(4) 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および飛沫部シミュレーション環境に設置した。海中部では供試体は常時海水中に没しており，飛沫部では供試体は1日に2回，1回につき3時間の海水スプレーにさらされる。また，標準養生として15~25 $^{\circ}$ Cの水道水中での養生も実施した。

(5) 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日間の高温海水浸せき（60 \pm 5 $^{\circ}$ C）と4日間の気中乾燥（15 \pm 5 $^{\circ}$ C）を繰り返すものであり，20サイクルまで実施した。

(6) 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，酸可溶性塩化物イオン含有量試験および水溶性塩化物イオン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。酸可溶性塩化物イオン含有量試験における塩化物イオンの抽出には高温に加熱した2N（規定濃度）の硝酸を使用した。また，水溶性塩化物イオン含有量試験における塩化物イオンの抽出には50 $^{\circ}$ Cの温水を使用した。なお，抽出した塩化物イオンの滴定は吸光光度法によった。

(7) 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-18に示す。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。

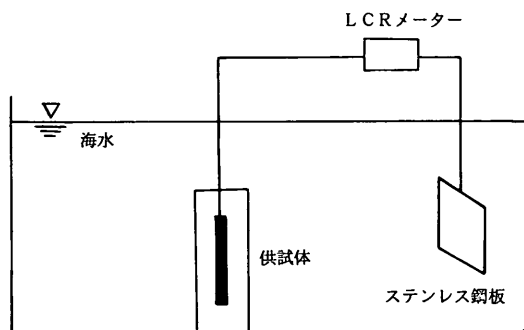


図-18 コンクリートの電気抵抗の測定方法

(8) 動電位分極曲線の測定方法および不動態のグレイドの判定方法

図-19に動電位分極曲線の測定システムを示す。図に示すとおり，供試体を海水中に浸せきした状態で三電極方式により測定を行った。参照電極として銀-塩化銀電極を，また対極としてステンレス鋼板を使用した。分極は動電位方式により行い，鉄筋の自然電極電位を起点とし，参照電極に対して+1000mVと-1000mVの間を掃引速度40mV/分で掃引した。本測定により得られる分極曲線（電位-電流曲線）の一例を図-20に示す。この分極曲線より鉄筋の表面の不動態の状態を6ランクに判定したものが不動態のグレイドである[13]。この不動態のグレイドの判定基準を図-21に示す。E +200mV（E：自然電極電位）と+600mVの間で分極曲線がどの領域を通過するかによりグレイドの判定を行うものである。一般には，グレイド5が最も不動態の状態が良いと判定され，グレイド0ではほとんど不動態は存在しないと判定される。その間は数字の大きい方が不動態の状態は良いと判定される。

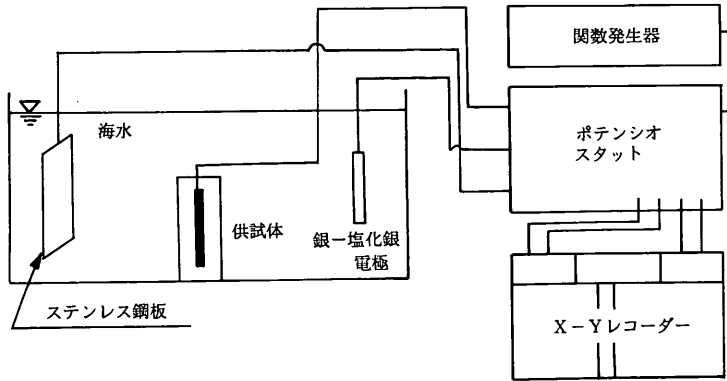


図-19 電気化学的計測の測定システム

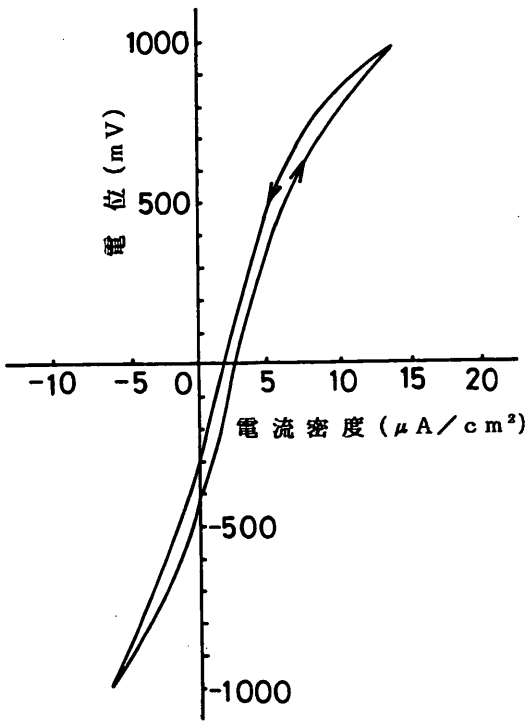


図-20 動電位分極曲線の一例

(9) 定電位ステップ法の測定方法

本測定は(8)で述べた動電位分極曲線の測定システムと同様である。本測定においては鉄筋の電位を参照電極に対して-1000mVに保持して、その時に鉄筋と対極(ステンレス鋼板)の間を流れる電流を経時的に測定した。本測定により得られる時間-電流曲線の一例を図-22に示す。本図よりわかるとおり、電流は時間の経過とともに徐々に減少していき次第に一定値に

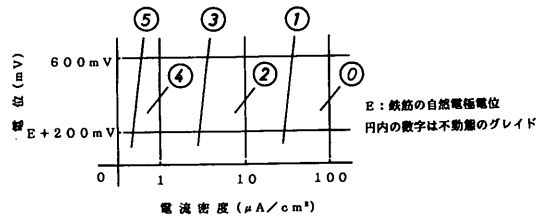


図-21 不動態のグライドの判定基準

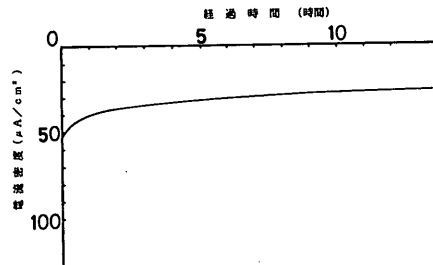


図-22 定電位ステップ法の測定結果の一例

収束していく。この電流の値は鉄筋への酸素の供給量に支配される[14]。すなわち、鉄筋に供給される酸素の量が多い程、流れる電流量が大きくなる。

前項(8)で述べた動電位分極曲線は鉄筋の不動態の状態を電気化学的に判定するのに対して、この定電位ステップ法は鉄筋への酸素の供給の難易を電気化学的に判定するものである。

(10) 動電位分極曲線と定電位ステップ法の総合評価
筆者等は前述の動電位分極曲線の計測結果と定電位ステップ法の計測結果を総合的に評価する考え方を提案している[14]。その考え方を以下に述べる。通常、鉄筋表面の不動態が完全な状態にあるかもしくは鉄筋表面への

酸素の供給が全くないかのいずれか一方の条件が満足されれば鉄筋の発錆は理論上等となる。したがって、鉄筋表面の不動態の状態を示す不動態のグレードと鉄筋表面への酸素の供給の難易を示す定電位ステップ法の測定結果の双方を加味した評価により鉄筋の腐食の潜在性を判定できるものと考えた。また、その総合評価の手法は両者の「積」の形式とすることが妥当であると考えた。

不動態のグレードは動電位分極曲線より得られたデータのランク分けをしたものであるが、それと統一する意味で定電位ステップ法において得られた電流密度の場合も表-12に示すようなランク分けを行った。表よりわかるとおり、評価は5段階に分類しており、評価値「5」が最も酸素の供給が少なく、したがって鉄筋の防食上有利であると判定される。そして、この定電位ステップ法の評価値と不動態のグレードの積を総合評価値とした。すなわち、総合評価値が大きいほど鉄筋の腐食の潜在性は低いと判断されることになる。

表-12 定電位ステップ法により得られた電流密度の評価

電流密度 ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	評価
0~0.5	5
0.5~1.0	4
1.0~5.0	3
5.0~10.0	2
10.0~	1

(11) コンクリート中の鉄筋の腐食状況の観察

電気化学的計測を終了した供試体を割裂し内部の鉄筋を取り出した。その後、目視により鉄筋の表面の状況を観察した。

4.3 実験の結果および考察

(1) コンクリート中の塩化物イオン含有量

表-13に海中部および飛沫部に2年間暴露した後のコンクリート中の塩化物含有量の試験結果を示す。表よりわかるとおり、全体的な傾向として以下のことが明確である。

- ① 酸可溶性塩化物イオン含有量に比べて水溶性塩化物イオン含有量の方がその値は小さい。
- ② コンクリート表面からの距離が4 cmの方が1 cmに比べて塩化物イオン含有量は少ない。
- ③ 飛沫部に暴露されたコンクリートに比べて、海中部に暴露されたコンクリートの方が塩化物イオン含有量

表-13 コンクリート中の塩化物含有量

配合番号	塩化物イオン含有率 (%)							
	海中部				飛沫部			
	酸可溶性		水溶性		酸可溶性		水溶性	
	1cm*	4cm*	1cm*	4cm*	1cm*	4cm*	1cm*	4cm*
1	0.31	0.18	0.18	0.09	0.42	0.18	0.28	0.09
2	0.35	0.01	0.18	0.01	0.54	0.02	0.36	0.01
3	0.36	0.01	0.27	0.01	0.51	0.03	0.37	0.01
4	0.36	0.02	0.25	0.01	0.50	0.04	0.40	0.02
5	0.34	0.06	0.24	0.03	0.48	0.06	0.37	0.03
6	0.32	0.13	0.26	0.07	0.43	0.14	0.34	0.08
7	0.31	0.02	0.23	0.01	0.49	0.03	0.32	0.01
8	0.33	0.03	0.22	0.01	0.44	0.05	0.34	0.03
平均	0.34	0.06	0.23	0.03	0.48	0.07	0.35	0.04

(Cl⁻ v.s. コンクリート)
* コンクリート表面からの深さ

が少ない。

図-23および図-24に、海中部および飛沫部に暴露した場合の配合1（普通コンクリート）、配合4（FA20）および配合5（原粉）の塩化物含有量を示す。海中部に暴露された場合も飛沫部に暴露された場合も傾向は全く同じである。すなわち、コンクリート表面からの深さが1 cm程度の比較的浅い場合はフライアッシュを混

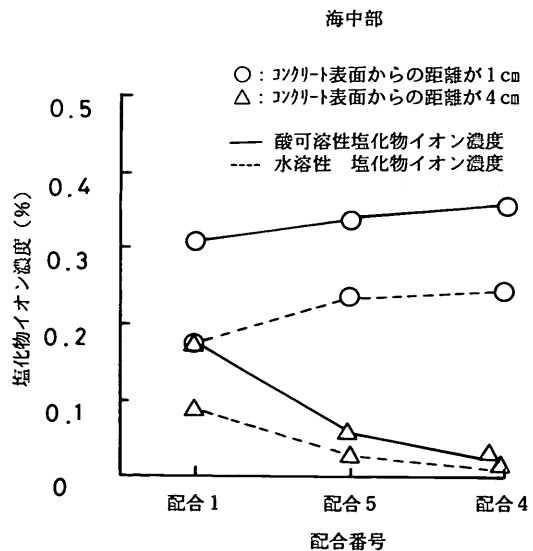


図-23 コンクリート中の塩化物含有量 (海中部暴露)

飛沫部

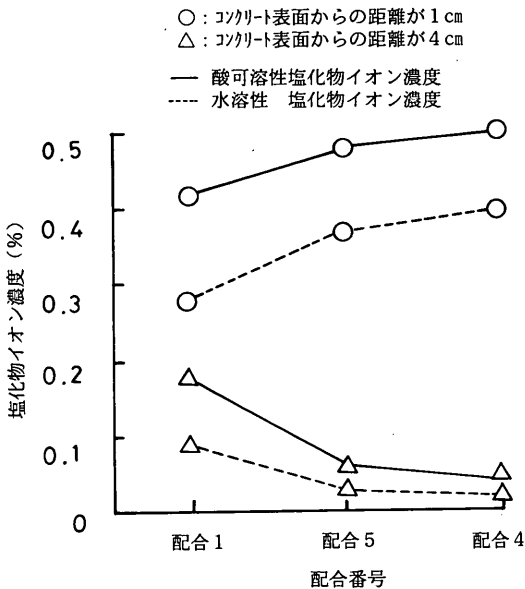


図-24 コンクリート中の塩化物含有量 (飛沫部暴露)

入したコンクリート (配合4, 配合5) の方が普通コンクリート (配合1) に比べて塩化物含有量が大きくなっている。しかし、コンクリート表面からの深さが4 cm 程度の深い場合は普通コンクリート (配合1) に比べてフライアッシュを混入したコンクリート (配合4, 配合5) の方が塩化物含有量が小さくなる。分級フライアッシュに限らず鉱物質混和材を使用したコンクリートの場合、コンクリート表層部分は普通コンクリートに比べて塩化物イオン含有量が多くなるということは既に報告されている[17]。この理由については現時点では明確にはされていない。

また、配合4 (FA20) と配合5 (原粉) を比較してみると、配合4の方が配合5よりも塩化物含有量は少なくなっている。これより、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中における塩化物イオンの拡散が抑制され、内部鉄筋の防食上有利であると言える。

(2) コンクリートの電気抵抗

表-14にコンクリートの電気抵抗計測結果を、図-25にそれを図示したものを示す。全体的傾向を見てみると、暴露環境の影響が非常に大きいことが理解され、環境の相違によりコンクリートの抵抗は約1000オームの相違がある。これ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、含水率の大きいコンクリートほど電気抵抗は小さくなっている。

表-14 コンクリートの電気抵抗測定結果

配合番号	コンクリート抵抗 (Ω)			
	水中養生 (2年)	海中部 (2年)	飛沫部 (2年)	乾湿繰返し 20サイクル
1	409	544	896	574
2	1922	2246	3148	1847
3	1442	1778	3057	1720
4	1204	1518	2636	1665
5	1005	1263	1745	1477
6	871	1155	2064	1728
7	2080	2412	3889	3559
8	1743	2077	2826	2385
平均	1335	1624	2533	1869

- 配合 1 ●-配合 5
- △-配合 2 ▲-配合 6
- 配合 3 ■-配合 7
- ▽-配合 4 ▼-配合 8

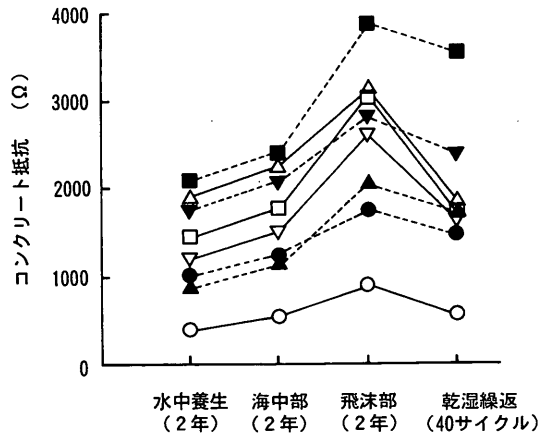


図-25 コンクリートの電気抵抗

配合1 (普通コンクリート)、配合5 (原粉) および配合4 (FA20) を比較してみると、いずれの暴露条件の場合も配合4の電気抵抗が最大であり、次いで配合5、そして配合1が最小となっている。これより、分級フライアッシュを混入することにより電気抵抗は小さくなっている。

海中部に暴露した供試体について、配合2 (W/B=45%) と配合4 (W/B=55%) と配合6 (W/B=65%) を比較してみると、配合2が最も大きな電気抵抗を示しており、次いで配合4、そして配合6が最小となっている。これより、水結合材比が小さいほど電気抵抗は小さくなると言える。

また、配合4（置換率20%）と配合7（置換率30%）を比較してみると、配合7の方が配合4よりも電気抵抗は大きくなっている。これより、分級フライアッシュの置換率がコンクリートの電気抵抗に影響を及ぼしているものと考えられ、置換率が大きいほど電気抵抗は大きくなるものと思われる。

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。以上の結果より、分級フライアッシュの混入により密実なコンクリートが得られており、内部鉄筋の防食に関して有利であると判断される。

(3) 不動態のグレード

表-15に動電位分極曲線より判定した不動態のグレードを示す。なお、表中の値は3個のデータの平均値である。全体的な傾向を見ると、いずれの暴露条件の場合も平均値は4.5以上であり、総じて鉄筋表面の不動態の状態はよいと判断される。

配合1（普通コンクリート）、配合5（原粉）および配合4（FA20）を比較してみると、いずれの場合も配合4と配合5の方が配合1に比べて不動態のグレードは大きな値となっており、不動態の状態がよいと判定される。配合4と配合5を比較してみると、飛沫部および乾湿繰返しの場合、配合4の方が不動態のグレードは大きくなっているが、海中部の場合は配合5の方が不動態のグレードは大きくなっており、分級フライアッシュの効果は明確になっているとはいえない。

海中部に暴露した供試体について、配合2（W/B=45%）と配合4（W/B=55%）と配合6（W/B=65%）を比

較してみると、いずれの場合もグレードが4.3で等しくなっており、水結材比の影響は明確ではない。

また、配合4（置換率20%）と配合7（置換率30%）を比較してみると、配合7の方がグレードが若干大きくなっている。しかし、その差はわずかであり、置換率が不動態のグレードに及ぼす影響が明確であるとはいえない。

(4) 定電位ステップ法の測定結果

表-16に定電位ステップ法より得られた電流密度を、また図-26にそれを図示したものを示す。全体的な傾向を見ると、飛沫部暴露と乾湿繰返しの場合がほぼ同程度の電流密度、海中部暴露および水中養生の場合がそれに比べてかなり小さい電流密度となっている。これは、コンクリートの乾燥状態（含水率）の影響が最も大きな要因であると考えられる。すなわち、コンクリートの含水率が大きいほど電流密度は小さい、すなわち鉄筋への酸素の供給量が少ないものと思われる。

配合間の差が比較的顕著に表れている飛沫部暴露の供試体について、配合1（普通コンクリート）と配合4（FA20）と配合5（原粉）を比較してみると、配合1の電流密度が最も大きく、次いで配合5となり、配合4が最小となっている。これより、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酸素拡散性が小さくなっているものと考えられる。

配合2（W/B=45%）と配合4（W/B=55%）と配合6（W/B=65%）を比較してみると、配合2の電流密度が最も小さく、次いで配合4となり、配合6が最大となっている。これより、水結材比が小さいほどコンクリートの酸素拡散性も小さくなるものと考えられる。

表-15 不動態のグレード

配合番号	不動態のグレード			
	水中養生 (2年)	海中部 (2年)	飛沫部 (2年)	乾湿繰返し 20サイクル
1	3.5	3.7	5.0	4.0
2	5.0	4.3	4.7	4.0
3	5.0	5.0	5.0	5.0
4	4.5	4.3	5.0	5.0
5	4.7	4.7	4.7	4.3
6	4.0	4.3	4.7	5.0
7	5.0	5.0	5.0	5.0
8	4.0	5.0	4.3	4.0
平均	4.5	4.5	4.8	4.5

表-16 定電位ステップ法の測定結果

配合番号	電流密度 ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)			
	水中養生 (2年)	海中部 (2年)	飛沫部 (2年)	乾湿繰返し 20サイクル
1	0.12 (5)	1.02 (3)	9.99 (2)	16.98 (1)
2	0.21 (5)	2.57 (3)	4.20 (3)	0.75 (4)
3	0.20 (5)	0.18 (5)	4.10 (3)	4.20 (3)
4	0.20 (5)	1.20 (3)	4.82 (3)	5.79 (2)
5	0.23 (5)	1.51 (3)	6.35 (2)	3.32 (3)
6	0.22 (5)	0.34 (5)	5.96 (2)	6.52 (2)
7	0.30 (5)	0.70 (4)	3.80 (3)	2.16 (3)
8	0.93 (5)	1.28 (3)	4.44 (3)	2.17 (3)
平均	0.30	1.10	5.46	5.24

() 内の数値は評価値

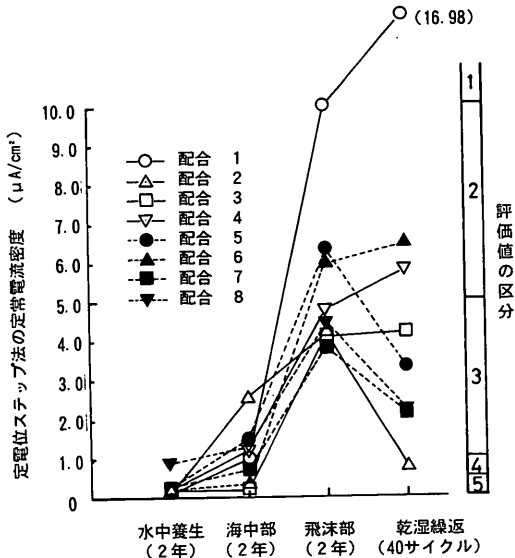


図-26 定電位ステップ法の測定結果

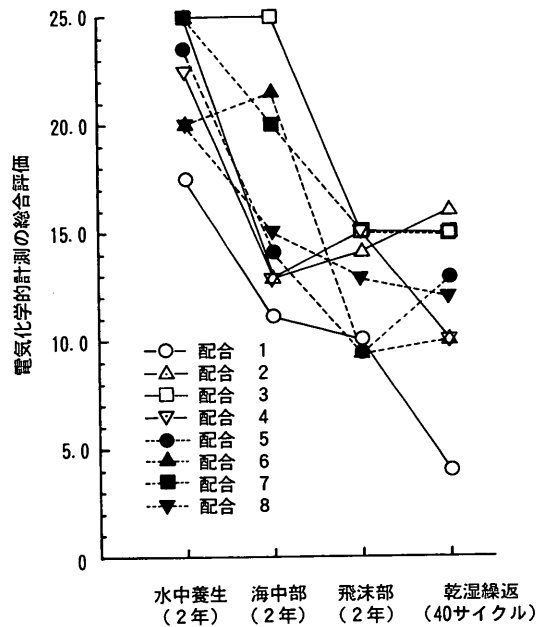


図-27 不動態のグレイドと定電位ステップ法の総合評価

また、配合4（置換率20%）と配合7（置換率30%）を比較してみると、配合7の方が電流密度が小さくなっている。これより、分級フライアッシュの置換率もコンクリートの酸素拡散性に影響を及ぼすものと考えられ、置換率が大きい方が酸素拡散性は幾分小さくなるものと考えられる。

(5) 不動態のグレイドと定電位ステップ法の総合評価

表-17に不動態のグレイドと定電位ステップ法の総合評価の結果を、また図-27にそれを図示したものを示す。

表-17 不動態のグレイドと定電位ステップ法の総合評価

配合番号	電気化学的計測の総合評価			
	水中養生 (2年)	海中部 (2年)	飛沫部 (2年)	乾湿繰返し 20サイクル
1	17.5	11.1	10.0	4.0
2	25.0	12.9	14.1	16.0
3	25.0	25.0	15.0	15.0
4	22.5	12.9	15.0	10.0
5	23.5	14.1	9.4	12.9
6	20.0	21.5	9.4	10.0
7	25.0	20.0	15.0	15.0
8	20.0	15.0	12.9	12.0
平均	22.3	16.6	12.6	11.9

各暴露環境を比較してみると、環境条件的に最も良い環境であると考えられる水中養生の場合、配合1から配合8までの平均値が22.3、海中部の場合16.6、飛沫部の場合12.6、そして乾湿繰返し腐食促進試験の場合が11.9となった。この傾向は、これまでに発表されている塩害環境の評価結果[15][16][17]とほぼ一致しており、この総合評価が概ね妥当な結果を示しているものと考えられる。

配合間の差が比較的明確に表れている乾湿繰返し試験後の供試体について、配合1（普通コンクリート）と配合4（FA20）と配合5（原粉）を比較してみると、配合1の総合評価値が最小であり、次いで配合4となり、配合5が最大となっている。これより、普通コンクリートとフライアッシュを混入したコンクリートの差は明確であるが、分級フライアッシュの効果は認められていない。

配合2（W/B=45%）と配合4（W/B=55%）と配合6（W/B=65%）を比較してみると、配合2の総合評価値が最大であり、配合4と配合6の評価値が等しくなっている。これより、基本的には水結合材比が小さい方が内部鉄筋の防食上有利であると考えられる。

また、配合4（置換率20%）と配合7（置換率30%）を比較してみると、配合7の評価値の方が大きくなっている。すなわち、分級フライアッシュの置換率が大きい

方が内部鉄筋の腐食の潜在性は低いようである。

(6) コンクリート中の鉄筋の腐食状況

各試験終了後に供試体から取り出した鉄筋の表面の状況は概ね良好であった。際だった腐食が発生している鉄筋は皆無であり、腐食が発生している場合でも微細な点錆が生じているだけであった。表-18に点錆が生じていた配合を示す。配合6 (FA20, 置換率20%, W/B=65%) および配合7 (FA20, 置換率30%, W/B=55%) において主に点錆が生じている。配合6の場合は他の配合に比べて水結合材比が大きめという特徴がある。一方、配合7の場合は他の配合に比べて分級フライアッシュの混入率が大きいという特徴がある。この配合上の相違が点錆発生の原因と推察されるが、発生している点錆が軽微であることを考えると、明確に言及することはできない。

一方、乾湿繰返し腐食促進試験後の供試体に点錆が見られた場合が多い。これは、乾湿繰返しに腐食促進効果があったためと考えられるが、内部鉄筋に腐食を生じさせるためには40サイクルの促進期間では短かかったとも考えられる。

実環境の場合も、暴露期間が2年というのは内部鉄筋の腐食状況に有意な差を生じさせるには十分ではなかったものと考えられる。

表-18 コンクリート中鉄筋の発錆状況

配合番号	水中養生 (2年)	海中部 (2年)	飛沫部 (2年)	乾湿繰返し 20サイクル
1				◎
2				
3				◎
4				
5				
6		◎	◎	◎
7	◎		◎	◎
8		◎		

◎：表面に微小な点錆が見られる

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。

コンクリートの耐海水性に関して、

- 2年間の海洋環境暴露後において、いずれの配合のコンクリートの場合でも圧縮強度は増大の傾向にあった。一方、弾性係数は、海中部暴露の場合は増大の傾向にあったが、感潮部および陸上部暴露の場合はわずかに低下する傾向であった。
- 乾湿繰返し劣化促進試験後において、強度は10~30%、弾性係数は50%以上の低下を示した。
- 乾湿繰返し劣化促進試験の結果より、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乾湿繰返しおよび温度変化の繰返しに対する抵抗性が向上することがわかった。
- 乾湿繰返し劣化促進試験の結果より、フライアッシュの使用の有無が圧縮強度およびその経時変化に最も大きな影響を及ぼすことがわかった。すなわち、フライアッシュを用いることにより、圧縮強度の低下率を抑制することができた。
- 分級フライアッシュを混入することにより引張強度の低下率を抑制できることがわかった。
- 分級フライアッシュの混入は、弾性係数およびその低下率に明確な効果を示さなかった。

内部鉄筋の防食性に関して

- コンクリートの表面近傍、この場合表面からの深さが約1 cm においては普通コンクリートより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大きかった。
- コンクリートの表面からの深さが約4 cm 以上の比較的内部の領域においては、フライアッシュを混入したコンクリートの方が普通コンクリートよりも塩化物含有量は小さかった。かつ、分級フライアッシュを混入したコンクリートの方が原粉を使用したコンクリートより塩化物含有量は小さかった。
- 分級フライアッシュを用いることにより、コンクリートの電気抵抗を小さくすることができた。
- コンクリート中の鉄筋の電気化学的性質によれば、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内部鉄筋の防食性は優れていた。

しかし、分級フライアッシュを混入したコンクリートと原粉を混入したコンクリートでその相違は明確には認められなかった。

11. 各種試験より総合的に考察して、分級フライアッシュを混入したコンクリートの場合でも水結合材比を小さくする方が内部鉄筋の防食上有利であると言える。

総合的結論として

12. 分級フライアッシュを混入したコンクリートは、原粉を使用したコンクリートあるいは普通コンクリートに比べて耐海水性が優れており、また、塩素イオンの浸透・拡散の抑制効果を有していることが明らかとなった。また、分級フライアッシュは品質変動が極めて少ないという利点を有しており、この点を加味しても今後海洋環境下において建設、供用される港湾・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示された。
(1996年9月30日受付)

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，平成4年12月
- 5) 福手勤，寺野宜成，石井光裕，国府勝郎：転圧コンクリート舗装の性能向上に及ぼす分級フライアッシュの効果，土木学会論文集，No.526/V-29，pp.85-95，1995.11
- 6) 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
- 7) 例えば，最新コンクリート工学，岡田清編，国民科学社，1986年
- 8) 松下博通，牧角龍憲，浜田秀則：硫酸塩によるコンクリートの劣化に関する基礎的研究，第7回コンクリート工学年次学術講演会論文集，1985
- 9) 松下博通，浜田秀則，牧角龍憲：硫酸塩を含む土壌におけるコンクリートの劣化，第8回コンクリート工学年次学術講演会論文集，1986
- 10) 西林新蔵：コンクリートの耐海水性一その現状と将来一，セメント・コンクリート，No.410，pp.2-9，Apr. 1981
- 11) 福手勤，山本邦夫，濱田秀則：海水を練り混ぜ水とした海洋コンクリートの耐久性に関する研究，港湾技術研究所報告，第29巻，第3号，1990.9
- 12) 明石外世樹：コンクリートの非破壊試験法に関する研究，港湾技術研究所蔵書，B-98，昭和39年9月
- 13) 大即信明：コンクリート中の鉄筋に及ぼす塩素の影響に関する研究，港湾技術研究所報告，第24巻，第3号，1985.9
- 14) 大即信明，浜田秀則，原茂雅光：各種補修を施したコンクリート梁の促進海水養生試験，港湾技研資料，No.631，Dec.1988
- 15) 大即信明，長滝重義，福手勤，中下兼次：港湾での鉄筋コンクリートの塩害に及ぼす海洋環境の影響に関する基礎的検討，土木学会論文集，No.472/V-20，1993.8
- 16) 濱田秀則，R.N.Swamy：種々の海洋環境下におけるコンクリート中への塩化物イオンの浸入過程および浸入量に関する一考察，コンクリート工学論文集，第7巻，第1号，1996年1月
- 17) 浜田秀則，福手勤，R.N.Swamy，谷川伸，J.C.Laiw：鉱物質混和材の混入およびコンクリート表面被覆の塩害防止効果の定量的評価に関する研究，土木学会論文集，No.538/V-31，pp.169-181，1993.8