

論文 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耐海水性

浜田秀則^{*1}・福手勤^{*2}・石井光裕^{*3}・田中順^{*4}

要旨：分級フライアッシュを用いたコンクリートの耐海水性を検討した。分級フライアッシュの効果を明確にするために、フライアッシュを全く用いないコンクリート、現行の(JIS)フライアッシュ（一般市場品）を用いたコンクリートおよび最大粒径 $20\mu\text{m}$ 以下の粒子のみを集めた分級フライアッシュを用いたコンクリートの海洋環境暴露試験および乾湿繰り返し劣化促進試験を行った。その結果、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の耐久性が向上すること、圧縮強度、引張強度自体が増大し、海水の影響による強度の低下を抑制することができること、が明らかになった。

キーワード：分級フライアッシュ、コンクリートの耐海水性、乾湿繰り返し劣化促進試験

1. はじめに

我が国における近年の電気事業の推移によると、石炭火力発電量が高い割合で増加する傾向にある。それに伴い、副産物である石炭灰の発生量も増加してきており、将来的にこの増加傾向は続くものと予想されている。石炭灰の80～90%を占めるフライアッシュは、過去においてコンクリート用混和材として主にダムなどのマスコンクリートに使用されてきた。しかし、近年フライアッシュの品質変動が大きくなってきており[1]、コンクリート用混和材としての使用にも問題点が生じる可能性が指摘されている。本研究で対象とした分級フライアッシュとは、現行の(JIS)フライアッシュの粒子群の中からもとの粒子を破壊することなく微粒分のみを抽出したものである。著者の一人はこの分級フライアッシュを混和材として用いたコンクリートの種々の性状を調べ、数々の優れた性能を有することを明らかにしている[2]。本報告は、今後我が国において増加が予想される海洋構造物の品質向上および資源の有効活用という観点から実施した、分級フライアッシュを混和材として用いたコンクリートの耐海水性に関する一連の実験結果を取りまとめたものである。

2. 実験の概要

2.1 使用材料

セメントは3種類の普通ポルトランドセメントを等量混合したものであり、比重は3.16、比表面積は $3293\text{cm}^2/\text{g}$ 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碎石（比重2.61、吸水率1.77%、粗粒率6.83、最大寸法20mm）を使用した。練り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四国電力の西条火力発電所の電気集塵器より採取したものであり、比重が2.24、比表面積が $4250\text{cm}^2/\text{g}$ （JIS適合品）である。今回採用した分級方法は乾式分級法のうちの強制渦遠心分級法である。この方法により、最大粒径が $20\mu\text{m}$ （比重2.38、比表面積 $5760\text{cm}^2/\text{g}$ ）、および $10\mu\text{m}$ （比重2.47、比表面積 $8100\text{cm}^2/\text{g}$ ）の2種類の分級フライアッシュを得た。分級前のフライアッシュの重量と得られた分級フライアッシュの重量比を微粉集率と称するが、最大粒径が $20\mu\text{m}$ の場合の微粉収率は約40～50%、 $10\mu\text{m}$ の場合は約20～35%であった。分級フライアッシュの比重、比表面積等の物理的性質は原粉とは異なるが両者の化学的性質はほぼ同

*1 運輸省港湾技術研究所 構造部 主任研究官、工修（正会員）

*2 運輸省港湾技術研究所 構造部材料研究室 室長、工博（正会員）

*3 テクノリソース（株） 企画開発部 次長、工博（正会員）

*4 運輸省港湾技術研究所 構造部材料研究室 研究員

表ー１ 供試体製作の要因の組み合わせおよび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 W/(C+F) (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量 (kg/m ³)						
	最大粒径 (μ m)	置換率 (%)			水	セメント	フライアッシュ	細骨材	粗骨材	A E 減水剤	A E 助剤
1	—	0	55	45.5	180	327	0	795	963	0.818	19.6
2	20	20	45	38.5	175	311	78	650	1049	0.973	132.3
3	10	20	55	43.5	174	253	63	764	1002	0.790	126.4
4	20	20	55	43.6	171	245	62	769	1007	0.778	93.3
5	原粉	20	55	43.0	175	254	65	751	1005	0.795	63.6
6	20	20	65	45.5	175	215	54	815	987	0.673	75.3
7	20	30	55	41.5	169	215	92	733	1044	0.768	165.8
8	原粉	30	55	41.0	173	221	94	715	1039	0.788	88.2

(A E 助剤のみ単位は c c)

ーである[2]。コンクリート練り混ぜ時の混和剤として、A E 減水剤および A E 助剤を使用した。

2. 2 供試体製作の要因と水準およびコンクリートの配合

表ー１に供試体製作の要因と水準およびコンクリートの配合を示す。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、20 μ m、10 μ m)および水結合材比(45%、55%、65%)を取り上げた。これらの要因の組み合わせは表ー１に示すような8種類である。コンクリートの配合の決定に際して目標のスランプを8 $\pm$ 1cm、空気量を4 $\pm$ 0.5%とし、試練により表ー１に示すような配合を得た。供試体は ϕ 10 $\times$ 20cmの円柱供試体である。

2. 3 耐海水性試験の方法

(1) 海洋環境暴露試験

供試体は脱型後材齢約50日まで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供試体を設置した。海中部では供試体は常時海水中に没しており、感潮部では1日に2回海水浸せきと気中乾燥を繰り返す。陸上部では供試体は常時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20℃の水道水中での養生も実施した。

(2) 乾湿繰り返しによる促進試験

本試験は西林の示す方法[3]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、としている。本研究においては材齢約50日より乾湿繰り返し試験を開始し、10日1サイクル(5日浸せき、5日乾燥)を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サイクルの長さのみであり、促進試験の合計時間(400日)は同一である。

2. 4 供試体の試験項目およびその方法

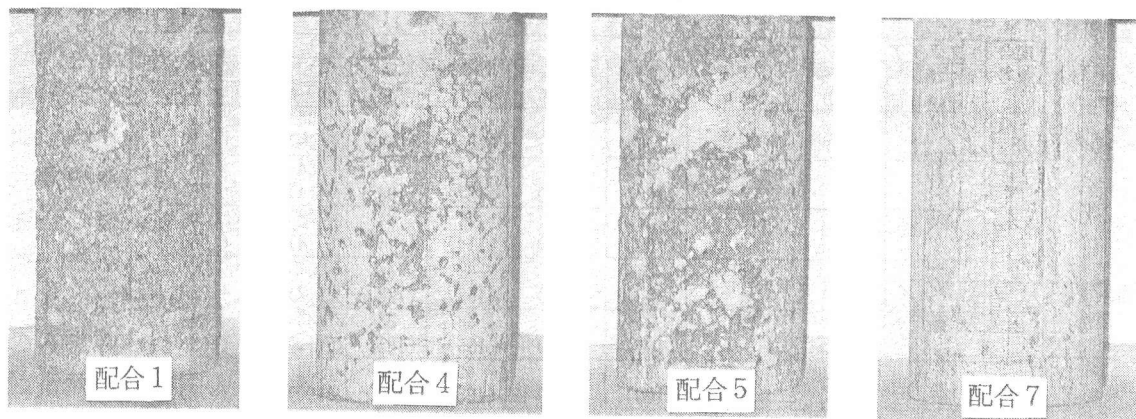
目視により供試体の外観観察を行い表面の変色状況、ペーストの剥離などを調べた。その後、圧縮強度試験、引張強度試験、静弾性係数試験および動弾性係数試験を実施した。これらの試験を行う際には供試体の上下面の凹凸を十分に研磨した。圧縮強度試験はJIS A 1108、引張強度試験はJIS A 1113に準拠した。静弾性係数試験は市販のコンプレッソメーターを用いて行い、動弾性係数試験はJIS A 1127に準拠する測定装置を用いて縦振動法により行った。

3. 実験の結果

3. 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っぽく変色していたが、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拘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拘わらず同一であった。

乾湿繰り返しを受けた供試体では、配合条件により程度の差はあるが、表面のペーストが剥離



写真－１ 乾湿繰り返し試験後の供試体の表面の劣化状況の例

するという劣化が生じた。写真－１に表面が劣化した供試体の例を示す。配合１（フライアッシュの混入なし）の供試体の劣化が最もひどく、配合５（原粉のフライアッシュを２０％混入）の供試体の劣化がそれに次いでひどかった。配合４（分級フライアッシュを２０％混入）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５に比べるとその程度は軽微であった。一方、配合７（分級フライアッシュを３０％混入）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表層部の変状に対する耐久性が向上しているものと思われる。

３．２ 強度性状

(１) 圧縮強度

表－２に圧縮強度の試験結果を示す。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測定値の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、４および５を比較してみると、フライアッシュを混入することにより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ることにより強度発現性が改善されていることがわかる。

海洋環境に暴露した場合、いずれの条件においても強度は増大している。著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〔４〕、本研究の結果と一致している。

表－２ コンクリートの圧縮強度

配合 番号	フライアッシュ		水結合材比 W/(C+F) (%)	圧縮強度 (kgf/cm ²)					
	最大粒径 (μm)	置換率 (%)		初期値	水中養生 (2年)	海洋環境暴露 (2年)			乾湿繰り返し 40サイクル
						海中部	感潮部	陸上部	
1	—	0	55	436 (100)	563 (129)	539 (124)	513 (118)	458 (105)	254 (58)
2	20	20	45	490 (100)	656 (134)	600 (122)	660 (135)	606 (124)	366 (75)
3	10	20	55	417 (100)	588 (141)	608 (146)	592 (142)	498 (119)	387 (93)
4	20	20	55	409 (100)	522 (128)	545 (133)	522 (128)	499 (122)	373 (91)
5	原粉	20	55	352 (100)	514 (146)	504 (143)	465 (132)	446 (127)	319 (90)
6	20	20	65	282 (100)	414 (147)	457 (162)	409 (145)	365 (129)	319 (113)
7	20	30	55	318 (100)	526 (165)	506 (159)	454 (143)	413 (130)	319 (100)
8	原粉	30	55	319 (100)	530 (166)	516 (162)	473 (148)	427 (133)	345 (108)
平均				302 (100)	431 (143)	428 (142)	409 (135)	371 (123)	268 (89)

表中の値は３本平均であり、()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

表ー3 コンクリートの引張強度

配合 番号	フライアッシュ		水結合材比 W/(C+F) (%)	引張強度 (kgf/cm ²)					
	最大粒径 (μm)	置換率 (%)		初期値	水中養生 (2年)	海洋環境暴露 (2年)			乾湿繰り返し 40サイクル
						海中部	感潮部	陸上部	
1	—	0	55	38 (100)	39 (103)	39 (103)	39 (103)	34 (90)	21 (57)
4	20	20	55	30 (100)	39 (130)	41 (137)	31 (104)	34 (114)	23 (76)
5	原粉	20	55	36 (100)	37 (103)	41 (114)	34 (94)	28 (78)	20 (56)
7	20	30	55	28 (100)	36 (130)	42 (152)	34 (123)	31 (112)	26 (93)
8	原粉	30	55	28 (100)	41 (145)	38 (135)	38 (135)	33 (117)	24 (85)
平均				32 (100)	38 (109)	40 (125)	35 (109)	32 (100)	23 (72)

表中の値は3本平均であり、()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

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くなっている。乾湿繰り返し試験について見ると、配合1、2、3、4、5において強度の低下が生じている。各配合間の比較は3.4において述べる。

(2) 引張強度

表ー3に引張強度の試験結果を示す。初期値について配合1、4および5を比較してみると、フライアッシュを混入することにより強度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性の改善効果は明らかではない、ことがわかる。

海洋環境暴露の場合、配合1の陸上部、配合5の感潮部および陸上部において初期値を下回っている。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。乾湿繰り返し試験の場合、全ての配合において引張強度が低下しており、その低下の割合は圧縮強度の低下の割合よりも大きくなっている。各配合間の比較は3.4において述べる。

3. 3 弾性性状

(1) 静弾性係数

表ー4に静弾性係数の試験結果を示す。初期値を見てみると、配合7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(55%)であれば弾性係数はほぼ同一となっている。海洋環境暴露の場合、海中部では配合2、感潮部では配合1、2、4、5、6、8、また陸

表ー4 コンクリートの静弾性係数

配合 番号	フライアッシュ		水結合材比 W/(C+F) (%)	静弾性係数 (×10 ⁶ kgf/cm ²)					
	最大粒径 (μm)	置換率 (%)		初期値	水中養生 (2年)	海洋環境暴露 (2年)			乾湿繰り返し 40サイクル
						海中部	感潮部	陸上部	
1	—	0	55	2.90 (100)	2.86 (99)	3.09 (107)	2.85 (98)	2.45 (84)	1.19 (41)
2	20	20	45	3.19 (100)	3.42 (107)	3.14 (98)	3.11 (97)	2.78 (87)	1.05 (33)
3	10	20	55	2.92 (100)	3.18 (109)	3.22 (110)	3.33 (114)	2.46 (84)	1.27 (43)
4	20	20	55	2.94 (100)	3.26 (111)	3.32 (113)	2.56 (87)	2.13 (72)	1.10 (37)
5	原粉	20	55	2.91 (100)	3.12 (107)	3.09 (106)	2.64 (91)	2.73 (94)	1.21 (41)
6	20	20	65	2.76 (100)	2.36 (86)	3.18 (115)	2.15 (78)	1.49 (54)	1.24 (45)
7	20	30	55	2.46 (100)	3.36 (137)	3.01 (122)	2.90 (118)	2.11 (86)	1.05 (43)
8	原粉	30	55	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)

表中の値は3本平均であり、()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

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、コンクリートの乾燥時間が静弾性係数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、中でも配合6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かったことがその原因と考えられる。乾湿繰り返し試験の場合、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。なお、各配合間の比較は3.4において述べる。

(2) 動弾性係数

表一5に動弾性係数の試験結果を示す。本試験は乾湿繰り返し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[3]。初期値について、配合1、4および5を比較してみると、フライアッシュを混入することにより、またさらに、分級フライアッシュを使用することにより動弾性係数は大きくなっていることがわかる。乾湿繰り返し試験の場合、配合2を除く全ての配合において動弾性係数の低下が認められる。各配合間の比較は3.4で述べる。

表一5 コンクリートの動弾性係数

配合番号	フライアッシュ		水結合材比 W/(C+F) (%)	動弾性係数 ($\times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$)		耐海水性 指数*
	最大粒径 (μm)	置換率 (%)		初期値	乾湿繰り返し 40サイクル	
1	—	0	55	3.03 (100)	2.59 (86)	86
2	20	20	45	3.54 (100)	3.66 (103)	103
3	10	20	55	3.65 (100)	3.00 (82)	82
4	20	20	55	3.62 (100)	3.08 (85)	85
5	原粉	20	55	3.27 (100)	3.04 (93)	93
6	20	20	65	3.01 (100)	2.84 (94)	94
7	20	30	55	3.32 (100)	2.84 (86)	86
8	原粉	30	55	3.64 (100)	3.51 (96)	96
平均				3.39 (100)	3.07 (91)	91

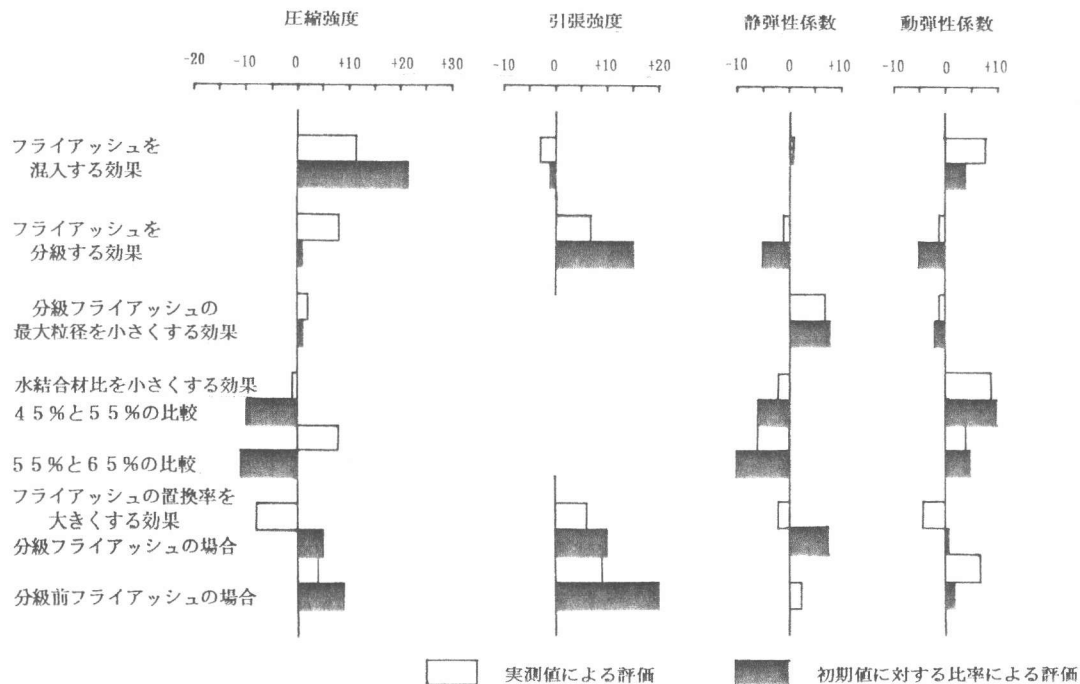
表中の値は3本平均であり、()内の数値は初期値に対する比率のパーセント表示
*：耐海水性指数は西林の提案[3]による

(3) 静弾性係数と動弾性係数の比較

表一4および表一5より明らかであるが、乾湿繰り返し試験後に測定した弾性係数の値は両者で大きく異なった。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%となっている。この理由について本文で明確に言及することはできないが、非破壊試験である動弾性係数試験が、乾湿繰り返しにより生じたコンクリートの弾性性状の変化を十分に捉えることができなかったものと思われる。

3. 4 乾湿繰り返し促進試験の結果による各種要因の影響の大きさの検討

上述したとおり耐海水性試験として2種類の試験を実施した。このうち乾湿繰り返し試験においてコンクリートの劣化は顕著であった。乾湿繰り返し促進試験においては、乾燥を促進させるためにコンクリートを高温乾燥状態においているが、実海洋環境においてはこのような高温状態は一般には存在しない。したがって、本試験結果を評価するにあたっては実海洋環境を促進しているだけでなく、さらに厳しい高温という条件下における耐久性も評価されていることになる。本項では乾湿繰り返し試験の結果を用いて実験開始時に設定した各種要因がコンクリートの耐海水性に及ぼす影響の大きさについて検討する。図一1に各種要因の影響を検討した結果を示す。図に示す値は、比較対象となった2個の実験データの変化係数のパーセント表示(標準偏差/平均値 $\times 100$)である。効果がある場合は「+」、負の効果がある場合は「-」となる。この図より以下に示すいくつかの傾向が読み取れる。圧縮強度の場合、フライアッシュの混入の有無が最も大きな要因である。すなわち、フライアッシュを混入することにより強度自体を増大させ、海水の影響による強度低下の割合を小さくすることができる。また、分級フライアッシュを用いることにより圧縮強度自体を増大させることができる。引張強度の場合、分級フライアッシュを用いることにより、またフライアッシュの置換率を大きくすることにより、強度自体を増大させ、海水の影響による強度低下の割合を小さくすることができる。静弾性係数および動弾性係数については両者の傾向が一致しておらず、いずれの要因の効果も明確に認めることはできない。



図一 乾湿繰り返し試験結果による各種要因の影響の大きさの検討

4. 結論

一連の実験より得られた結論を以下にまとめる。

暴露試験および促進試験によるコンクリートの劣化に関して、

- (1) 2年間の海洋環境暴露後においては、いずれの配合のコンクリートの場合でも強度は増大の傾向にあった。弾性係数は、海中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。

- (2) 乾湿繰り返し試験後において、強度は10~30%、弾性係数は50%以上の低下を示した。

乾湿繰り返し試験結果に基づく分級フライアッシュの効果に関して、

- (3) 分級フライアッシュを混入することにより、コンクリート表層部分の耐久性が向上した。
- (4) フライアッシュの使用の有無が圧縮強度に最も大きな影響を及ぼすが、分級フライアッシュの混入も圧縮強度自体を増大させる効果があった。
- (5) 分級フライアッシュの混入は引張強度の増大および引張強度の低下率の抑制に効果があった。また、フライアッシュの置換率が30%の方が20%よりもその効果が大きかった。
- (6) フライアッシュの混入の有無および分級フライアッシュの混入は、弾性係数およびその変化率に明確な効果を示さなかった。

参考文献

- 1) 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
- 2) 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
- 3) 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
- 4) 福手勤、濱田秀則、山本邦夫：海洋環境に20年間暴露されたコンクリートの耐久性に関する研究、土木学会論文集 No. 442/V-16、pp. 43~52、1992.2