論文 フライアッシュコンクリートの遮塩性と鉄筋の防食性能に関する 研究

SORN Vira^{*1}・山田 義智^{*2}・山根 茂之^{*3}・大城 武^{*4}

要旨:本研究は,フライアッシュを外割調合したコンクリートについて,塩化物イオンの浸 透性状および鉄筋の腐食性状を把握することを目的としている。ここでは,水セメント比と フライアッシュ混和量をパラメータとした試験体について,乾湿繰り返し促進試験を行い, 塩化物イオンの浸透性状を把握し,また,電気化学的手法による鉄筋腐食診断を行っている。 これらの試験結果より,フライアッシュを外割調合したコンクリートの遮塩性および防食性 能を評価している。

キーワード:フライアッシュ,乾湿繰り返し促進試験,鉄筋腐食診断,遮塩性,防食性能

1. はじめに

本研究は,フライアッシュを外割調合したコ ンクリート(以下,フライアッシュコンクリート と称す)について,塩化物イオンの浸透性状およ び埋設した鉄筋の防食性能を実験的に明らかに することを目的としている。

コンクリート中への塩化物イオンの浸透を促 進するために 乾湿繰り返し促進試験を行った。 遮塩性の効果は,コンクリート中の塩化物イオ ン量の分布より求めた見掛けの拡散係数を用い て評価した。なお,乾湿繰り返し促進試験によ る塩化物イオンの浸透性状に関しては,既に30 サイクルまでの結果について知見を得ているい。 ここでは,50サイクルまでの試験結果について 記述する。また,塩化物イオンの浸透に伴うコ ンクリート中の鉄筋の腐食性状を把握するため, 電気化学的手法による自然電位,分極抵抗およ びコンクリート抵抗の測定を行い、その結果お よび考察についても述べる。これらの試験では、 3種類の水セメント比(W/C=65,60,55%)に対し, フライアッシュの混和量を 50,75,100kg/m³ に変 化させ,フライアッシュの混和量による遮塩性 および防食性能を評価した。

*1(株)沖縄構造設計 設計部 博士(工学)
*2 琉球大学助教授 工学部環境建設工学科 博士(工学)
*3 山口県岩国土木建築事務所 県技術吏員 修士
*4 沖縄職業能力開発大学校校長 Ph.D.

2. 実験概要

2.1 コンクリート調合と試験体の概要¹⁾ 本研究で用いたコンクリートの調合を表 - 1 に示す。これは,既に文献1)にも記述したが,調 合番号と電気化学的手法による鉄筋腐食診断の 結果との対応を明確にするために再記述する。

本調合では水セメント比 65,60,55% をベース として,各ベース調合毎に単位セメント量を一

	Slump (cm)	Air (%)	W/(C+FA) (%)	W/C (%)	S/a (%)	W (kg/m ³)	質量 (kg/m ³)				混和剤 ((C+FA)		
調合番号											x %)		
							С	細骨 S1	材* S2	G	FA*3	*1	*2
65-B	10.	4.5 ± 1.5	65.0	65	50.0	179	275	461	461	921	0	0.25	-
65-F50			55.1		47.9			427	427	929	50	0.25	-
65-F75	10 ±		51.1		43.8			384	384	986	75	0.375	-
65-F100	2.0		47.7		42.7			368	368	988	100	0.35	-
60-B	19.	4.5± 1.5	60.0	60	48.6	170	283	452	452	956	0	0.25	-
60-F50			51.1		46.1			415	415	969	50	0.25	-
60-F75	2.5		47.5		42.2			374	374	1023	75	0.375	-
60-F100	2.0		44.4		41.1			358	358	1026	100	-	0.70
55-B		4.5± 1.5	55.0	55	47.6	170	309	437	437	964	0	0.25	-
55-F50	12 ±		47.4		45.1			401	401	975	50	0.25	-
55-F75	2.5		44.3		40.6			355	355	1040	75	0.375	-
55-F100			41.6		39.6			341	341	1040	100	-	0.70
45-B	12 ± 2.5	4.5± 1.5	45.0	45	45.0	171	380	400	400	977	0	0.25	-
	0 5	フ・石力	いい。混合	2113	K S1	· \$2-1	• 1			-			

表 - 1 コンクリートの調合¹⁾

*S1: 海砂 S2: 呼砂, 混合に率 S1: S2=1: 1 *1: AE 減水剤(リグニンスルホン酸化合物)

*2:高性能AE減水剤(ポリカルボン酸エーテル系)

*3:フライアッシュ(中国南屯産石炭の副産物)

(正会員) (正会員)

(正会員)

定に保った上で,フライアッシュ量 50,75, 100kg/m³を外割調合とした。また,使用したフ ライアッシュは,南屯(中国)産石炭から副生し たものであり,現行のJIS 規格(JIS A 6201)のII 種に分類される。フライアッシュの品質を表-2 に示す。なお,コンクリートの調合では,フラ イアッシュを混和しないコンクリートをベース コンクリートと称し,調合番号に記号Bを付記 してフライアッシュコンクリートと区別した。

試験体製作に際しては,コンクリート曲げ試 験用の鋼製型枠を用いた。なお,試験体を打設 後28日間養生シートに包んで湿潤養生した後, 底面と打設面を除く他の4面をアクリルゴム系 塗膜にて被覆し,試験面以外からの塩化物イオ ンの浸透を阻止している。

2.2 試験項目

本研究では,乾湿繰り返し促進試験によるフ ライアッシュコンクリートの塩化物イオン浸透 性状および鉄筋の腐食性状を把握するため,下 記の試験を行っている。

(1) 塩化物イオン浸透試験¹⁾

塩化物イオン浸透試験として,乾湿繰り返し 促進試験を行っている。

乾湿繰り返し促進試験では,寸法15×15× 53cmの試験体を塩水槽(3%NaCl溶液,50)に 4日間浸漬させた後,乾燥機内において3日間50

の熱風で強制乾燥させる。その後,1日室温 にて静置させる。これを1サイクルとし,所定 のサイクル後にコンクリートコアを採取し, JCI-SC4法に基づき,コンクリート中の全塩化 物イオン量を分析している。ここでは,10,15, 20,30,40および50サイクル(促進試験の経過時 間:各々80,120,160,240,320および400日)終了 後の試験結果を論述する。

(2) 電気化学的手法による鉄筋腐食診断

上記の塩化物イオン浸透試験用の試験体に黒 皮の異形鉄筋(直径13mm)を2本埋め込んでい る。それらのかぶり厚さは,2.5cmおよび3.5cm である。乾湿繰り返し促進試験を開始してから 5サイクル毎に,携帯用の交流インピーダンス

表-2 フライアッシュの品質

	45.4	
	0.00	
	2.10	
	2.19	
粉末度	45µmふるい残分 (%)	18.9
AND AND A	比表面積 (ブレーン方法 (cm ² /g)	3560
	97	
	12.7	

* 土の pH 試験方法,土質工学会基準(JSF T 211-1990)

測定器²⁾を用い,自然電位,分極抵抗およびコン クリート抵抗の測定を行っている。試験には, 照合電極を内蔵し,電流分散抑制機能をもつ2 重対極センサーを用いる。

測定は,試験体中央で鉄筋真上のコンクリー ト表面にセンサー当て,まず自然電位を測定す る。次に,この電位を基準に,±10mVの高低 2周波(10Hz,20mHz)交流電圧を別々に印加し, それぞれの応答電流と両電気信号の位相差を測 定する。これら高低2周波の交流インピーダン ス値から分極抵抗を求めた。また,10Hzのイン ピーダンス値から見掛けのコンクリート抵抗を 求めた。

これらの電気化学的手法による非破壊試験の 有効性を確認するために,所定サイクル後に試 験体を解体して鉄筋表面の発錆状況を観察した。

3. 試験結果および考察

3.1 塩化物イオン浸透試験の結果および考察

(1) 塩化物イオン浸透性状

50 サイクル終了時(経過時間 400 日)のベース コンクリートの塩化物イオン濃度分布(コンク リート質量に対する全塩化物イオン濃度(Cl⁻, wt%)を図 - 1に示す。水セメント比が大きいも のほど塩化物イオン濃度が高い値を示す。また, 底面側に比べて打設面側の塩化物イオン浸透量 が多い。これは,ブリーディングの影響が一要 因として考えられる¹⁾。

50サイクル終了時の水セメント比65%でフラ イアッシュ混和量を変化させた場合の塩化物イ オン濃度分布を図 - 2に示す。コンクリート表 面の塩化物イオン濃度はほぼ同程度であるが, 内部においては,フライアッシュ混和量の増加



に伴い塩化物イオンの浸透量が小さくなってい る。このことは,フライアッシュ混和による遮 塩性能の向上を表している。また,図-1と図 -2の比較より,フライアッシュ量を75kg/m³以 上混和すると,水セメント比65%のコンクリー トでも水セメント比45%のベースコンクリート 以上の遮塩性能を示すことがわかる。

(2) 蓄積塩化物イオン量の経時変化

水セメント比65% における蓄積塩化物イオン 量¹⁾Qの経時変化を図 - 3に示す。蓄積塩化物イ オン量とは,コンクリート表面を介して,コンク リート中に浸透し蓄積している塩化物イオン量 であり,詳細な定義は文献1)に記述されている。

底面側および打設面側ともに,経過時間の増 加に伴い蓄積塩化物イオン量が増加する傾向を 示している。ベースコンクリートの場合,底面



側に比べ打設面側では多くの塩化物イオンが蓄 積されていることが分かる。また,フライアッ シュ混和量の増加に伴い蓄積塩化物イオン量が 小さくなっている。蓄積塩化物イオン量の増加 割合は,経過時間に伴って減少しており,ある 一定の値に収束する傾向を示している。また, ベースコンクリートで見られた打設面側と底面 側の塩化物イオン浸透量の差は,フライアッ シュを混和することによって緩和されている。

(3) 拡散係数の評価

見掛けの拡散係数(以下,拡散係数と記す)の 同定法は,修正シンプレックス法を用いた¹⁾。こ こでは,フライアッシュ混和量を変化させたコ ンクリートについて,10,20,30,40および50サイ クル終了時毎に底面側の拡散係数を同定し,そ の結果を図 - 4にまとめて示す。図 - 4の(a),(b) および(c)は,各々水セメント比65%,60% およ び55%の拡散係数である。ベースコンクリート



およびフライアッシュコンクリートとも,水セ メント比が低くなるほど拡散係数は小さくなっ ている。

各水セメント比において,フライアッシュを 50kg/m³混和した場合の拡散係数は,ベースコン クリートの約5割以下の値を示し,さらに,フ ライアッシュ混和量の増加に伴い拡散係数が顕 著に小さくなっている。また,サイクル数の進 行に伴って,ベースコンクリートでは拡散係数 の経時変化に特徴的な傾向は見受けられない。 しかし,フライアッシュコンリートの場合は, 多少のばらつきはあるが,サイクル数の増加に 伴い拡散係数が小さくなる傾向を示す。これは, ポゾラン反応により,経過時間とともにフライ アッシュコンクリートの細孔組織が緻密化され, 遮塩性が向上することに起因しているものと考 えられる。

3.2 電気化学的手法による鉄筋腐食診断

5 サイクル毎における自然電位,分極抵抗お よびコンクリート抵抗の測定結果を図 - 5 ~ 図 - 7に示す。ここでは,水セメント比を65,60,55 % に対して,フライアッシュ量0,50,75,100kg/m³ と変化させたコンクリートの測定値を示してい る。また,水セメント比45%のベースコンクリー トの測定値も示している。なお,鉄筋のかぶり 厚さを区別するため,図中には調合番号の次に 2.5(cm)又は3.5(cm)の数値を付けている。

(1) 自然電位

自然電位の測定結果を図 - 5 に示す。水セメ ント比の大きいベースコンクリートおよびフラ イアッシュ混和量の少ないコンクリート(65-B,65-F50)では,かぶり2.5cmにおいて15サイク ルで自然電位が-350mV(銅/硫酸銅電極換算)よ りも卑の値を示す。これはASTM規格の評価³⁾ により,腐食の可能性が高いと評価される。一 方,フライアッシュ混和量が75kg/m³以上になる と,50サイクルでいずれの試験体も-350mVよ り貴の値を維持し,同規格によると,不確定も しくは腐食なしと評価され,腐食の可能性は少 ないと考えられる。



図 - 5中には,腐食領域に入った直後の試験 体の鉄筋位置における塩化物イオン量(Cl⁻,kg/ m³)を合わせて示す。これらより,腐食領域と判 断される場合の塩化物イオン量は,鋼材腐食発 生限界値(Cl⁻, 1.2kg/m³)以上⁴⁾であることが認め られた。

(2) 分極抵抗

分極抵抗の測定結果を図 - 6 に示す。65-B お よび60-B(かぶり2.5cm)のコンクリートでは,15 サイクル終了時における分極抵抗が260k ・ cm²より低い値を示し,腐食速度判定基準⁵⁾によ り,腐食が開始していると評価される。さらに, 50サイクルにおける分極抵抗は26k ・cm²より も小さくなり,激しい腐食の範囲に入っている。



また,55-B(かぶり2.5cm)のコンクリートでは25 サイクルにおける分極抵抗が260k ・cm²より も低くなり,さらに,50サイクルで35k ・cm² 程度の値を示し,中から高程度の腐食の範囲に 入る。一方,フライアッシュ混和量が多い75, 100kg/m³の試験体は,いずれも50サイクル終了 時に260k ・cm²より高い値を示し,腐食の可 能性は少ないと評価される。図 - 6中にも図 -5と同様に腐食領域に入った試験体の鉄筋位置 における塩化物イオン量を示す。鉄筋の分極抵 抗が腐食領域と判断される時の塩化物イオン量 は鋼材腐食発生限界値(Cl⁻,1.2kg/m³)以上であっ た。なお,ベースコンクリートのかぶり3.5cmの



図-7 コンクリート抵抗測定結果

場合は,分極抵抗値が腐食を示す範囲に移動す る傾向がかぶり2.5cmよりも5~10サイクル程 度遅く表れた。これらの現象は,各かぶり位置に おける塩化物イオン量に起因している。

(3) コンクリート抵抗

図 - 7に示すように,各試験体において,水セ メント比の低下に伴いコンクリート抵抗は大き くなる傾向を示す。ベースコンクリートでは,初 期からコンクリート抵抗が低い値を示す。フラ イアッシュコンクリートでは,ベースコンク リートに比べてコンクリート抵抗が高い値を示 し,さらに,フライアッシュ混和量の増加に伴 い,コンクリート抵抗が大きくなる傾向を示し ている。また,フライアッシュコンクリートは, サイクル数の増加に伴い,コンクリート抵抗も 増加する傾向が見られる。これは,ポゾラン反応 によりコンクリートが密実になる事や,塩化物 イオンの浸透量が少ないために電気抵抗が高く なるためと考えられる。

以上,自然電位,分極抵抗およびコンクリート 抵抗の測定結果より,フライアッシュ混和に よって遮塩性が高まり,かつ,コンクリート抵抗 も大きくなることにより,埋設した鉄筋の防食 性能の向上が解明された。

3.3 解体時の鉄筋腐食状況

電気化学的手法による測定と実際の鉄筋の腐 食状況を比較するため,各種試験体の解体を行 い,腐食面積率(=(腐食面積/鉄筋表面積)× 100%)を測定し,それらの結果を図-8に示す。 65-B,60-Bのかぶり2.5cmの鉄筋は15サイクル



で,55-Bのかぶり2.5cmの鉄筋は,30サイクル から急激に腐食が増加していた。さらに,50サ イクルで腐食面積率が100%となり,鉄筋には孔 食も広い範囲で発生していた。このことは,前 述したように,鉄筋周辺の塩化物イオン量が鋼 材腐食発生限界値を大きく超えている(図-1 参照)ため,腐食が著しくなったものと考えら れる。また,65-F50のかぶり2.5cmの場合,50 サイクルで腐食面積率は約50%程度となり, ベースコンクリートに比べ腐食の進行は遅い。 なお,図-8中に示さない試験体の鉄筋は,腐食 面積率が0%であった。これらの腐食状況は,図 -5および図-6に示す自然電位および分極抵 抗の評価とよく対応している。

4. まとめ

フライアッシュを外割調合したコンクリート について、遮塩性状と鉄筋の防食性を検討した。 以下に、本研究で得られた知見をまとめる。

- 水セメント比が大きいコンクリートほど塩化 物イオンの浸透量が多くなる。また,打設面 側において,底面側よりも多くの塩化物イオ ンが浸透する。
- フライアッシュの混和によって,塩化物イオンの浸透を抑制する効果が表れ,蓄積される塩化物イオン量も小さくなる。その効果は,フライアッシュ混和量が多いほど大きくなる。
- 3) フライアッシュの混和量が多く,かつ,経過 時間が増加するほど塩化物イオンの見掛けの 拡散係数は小さくなる。

- 4)ベースコンクリート(65-B,60-B,55-B)中の鉄筋 において,自然電位は15~20サイクル終了 時で卑の値に移行し,また,分極抵抗は低く なり,腐食が開始していると評価される。
- 5) フライアッシュ混和量が75kg/m³以上のコン クリートでは,50サイクル終了時においても 自然電位が貴の値を維持し,分極抵抗も高い 値を表す。従って,腐食の発生はないものと 評価される。
- 6) フライアッシュコンクリートのコンクリート 抵抗は、ベースコンクリートに比べ、フライ アッシュ混和量の増加およびサイクルの増加 に伴い高い値を示す。
- 7)試験体を解体して鉄筋腐食状況を観察した結果,その状況は自然電位および分極抵抗の評価と良く一致することが明らかになった。

謝辞:本研究は,沖縄電力株式会社との共同研 究として,多くの関係者の協力のもとで行われ ております。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Vira SORN,山田義智,杉山隆文,大城武:フラ イアッシュを細骨材の一部として代替したコ ンクリートの遮塩性評価,日本建築学会構造 系論文集,第560号,pp.17-25,2002.10
- 2) 横田優:建設後36年経過したRC造海水路側 壁の腐食モニタリング結果について,コンク リート工学年次論文報告集,Vol. 20, No. 1, pp. 185-190, 1998.6
- 3)ASTM C876-91: Standard Test Method for Half Cell Potentials of Reinforcing Steel in Concrete, 1991.
- 4) 土木学会:平成11年版コンクリート標準示 方書[施工編] - 耐久性照査型 - , pp. 9-19, 2000.1
- 5)CEB Working Party V/4.1: Strategies for Testing and Assessment of Concrete Structures Affected by Reinforcement Corrosion (draft 4), BBRI-CSTC-WTCB, Dec.1997.