

# 論文 フライアッシュによる置換方法がコンクリート中の鉄筋腐食挙動に与える影響

上田隆雄<sup>\*1</sup>・和田良太<sup>\*2</sup>・横田 優<sup>\*3</sup>・七澤 章<sup>\*4</sup>

**要旨：**コンクリートにフライアッシュを混和した場合のコンクリート中の鉄筋腐食挙動に関する検討は少ない。本研究では、フライアッシュの混和方法としてセメント代替として用いる内割置換、および、細骨材代替として用いる外割置換の2種類の置換方法で作製した鉄筋コンクリート供試体に対して、塩害および中性化が単独、または複合して作用した状況を想定した促進試験を行い、コンクリート中の鉄筋腐食挙動を検討した。この結果、フライアッシュを外割りで混和した場合には、内割りで混和した場合と比較して中性化の進行速度や塩分浸透速度も小さく、コンクリート中の鉄筋防食の観点から良好な結果が得られた。

**キーワード：**塩害、中性化、フライアッシュ、外割置換、鉄筋腐食

## 1. はじめに

石炭火力発電所から副産されるフライアッシュの有効利用法として、コンクリート混和材としての活用が検討されてきた。フライアッシュをコンクリートに混和した場合、資源の有効利用となるばかりでなく、フレッシュコンクリートの流動性改善、コンクリート硬化時の水和熱低減、ポゾラン反応による長期強度の増進、水密性の向上、アルカリ骨材反応による膨張抑制など、多くの効果が確認されてきた<sup>1)</sup>。

一方、ポゾラン反応によりコンクリート中の水酸化カルシウム（以下  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  とする）が消費されることから、コンクリートのアルカリ性が低下し、二酸化炭素（以下  $\text{CO}_2$  とする）の浸入によるコンクリートの中性化や、それに伴うコンクリート中の鉄筋腐食が促進される可能性も指摘されてきた<sup>2)</sup>。これに対して、劣化因子が鉄筋近傍まで浸入した時のコンクリート中の鉄筋腐食挙動に関する検討は従来から不足しており、耐久性設計手法確立の観点からも、この点に関する検討が求められていると言える。著者らがこれまで行ってきた検討結果<sup>3)</sup>によると、塩害と中性化が複合的に

作用するような場合にフライアッシュの混和により厳しい鉄筋腐食環境が形成される可能性があることが確認された。

そこで本研究では、特にフライアッシュによる置換方法に着目して、内割り、または、外割りでコンクリートにフライアッシュを混和したときのコンクリート中の鉄筋腐食挙動の評価を試みた。

## 2. 実験概要

### 2.1 コンクリートの配合条件

本実験で用いたコンクリートの示方配合を表-1に示す。水セメント比 (W/C) が55%の普通コンクリートを基準配合とし、これに対して、内割り、および、外割りで30%のフライアッシュ置換を行った。ここで、内割りの場合は、単位セメント量に対する質量比で30%の混和を行い、外割りの場合は、単位細骨材量に対する体積比で30%の混和を行った。また、塩害による劣化が進行した環境を想定した供試体には、塩化物イオン（以下  $\text{Cl}^-$  とする）量で  $5.0 \text{ kg/m}^3$  の  $\text{NaCl}$  をあらかじめ練混ぜ水に溶解する形で混入した。

セメントは普通ポルトランドセメント（密度：

\*1 徳島大学講師 工学部建設工学科 工博（正会員）

\*2 佐藤工業(株)

\*3 (株)四国総合研究所主席研究員 土木技術部 工博（正会員）

\*4 電気化学工業(株) 青海工場 セメント・特殊混和材研究所（正会員）

表-1 コンクリートの示方配合

W/B (%)	Cl <sup>-</sup> 量 (kg/m <sup>3</sup> )	FA置換率 (%)	s/a (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )							配合名	28日強度 (MPa)
				W	C	FA	S	G	NaCl	WRA		
55	0.0	0	45	179	325	0	847	1047	0	0.81	0(0)	35.0
		30(内割)			227	98	833	1029	0	0.81	0(IN30)	25.9
		30(外割)			325	222	593	1047	0	1.37	0(EX30)	40.1
	5.0	0			325	0	839	1047	8.3	0.81	5(0)	—
		30(内割)			227	98	825	1029	8.3	0.81	5(IN30)	
		30(外割)			325	222	585	1047	8.3	1.37	5(EX30)	

表-2 実験要因一覧

	0(0)	0(IN30)	0(EX30)	5(0)	5(IN30)	5(EX30)
乾湿繰り返し				○	○	○
塩水浸漬	○	○	○			
促進中性化→乾湿繰り返し	○	○	○	○	○	○

3.15 g/cm<sup>3</sup>, 比表面積: 3280 cm<sup>2</sup>/g) を用い, フライアッシュはJIS A 6201で規定されたII種フライアッシュ (密度: 2.29 g/cm<sup>3</sup>, 比表面積: 3510 cm<sup>2</sup>/g, SiO<sub>2</sub>: 56.4%, 強熱減量: 2.1%) を用いた。細骨材は徳島県那賀川産川砂 (密度: 2.62 g/cm<sup>3</sup>, F.M.2.79), 粗骨材は徳島県那賀川産玉砕石 (密度: 2.64 g/cm<sup>3</sup>, 最大寸法15 mm) を用いた。また, リグニンスルホン酸系AE減水剤を, メーカー推奨値を参考に粉体質量の0.25%混入した。

## 2.2 供試体の作製および静置条件

供試体は10×10×15 cmの角柱コンクリートに対して, かぶり20 mmと40 mmの位置に丸鋼SR235 φ10を1本ずつ計2本配した(図-1参照)。コンクリート打設1日後に脱型し, 20℃の恒温室内で28日間の封緘養生を行った。なお, 中性化深さ測定用, および, Cl<sup>-</sup>濃度分布測定用に一辺が10 cmの立方体コンクリート供試体を別途作製し, 角柱供試体と同一条件で養生を行った。

養生が終了した供試体は, 1週間の気中乾燥を行った後に, 暴露面(図-1参照)を一面残して, 残る面はすべてエポキシ樹脂による表面被覆を行った。また, 鉄筋の暴露部分は防錆するためにビニールテープを巻き付けた。この後の静置条件として, 以下の3条件を設定した。①内在塩分を含む供試体に対して, 20℃の恒温室内において4日間の湿空静置と3日間の乾燥静置を繰り返す。②内在塩分を含まない供試体に対して, 20℃の恒温室内において4日間の塩水(5.0%のNaCl溶

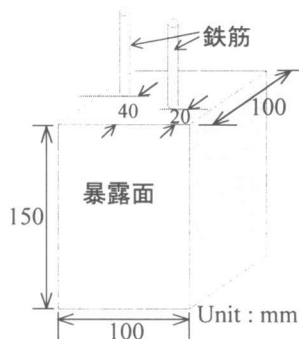


図-1 角柱供試体の概要

液) 浸漬と3日間の乾燥静置を繰り返す。③内在塩分を含む供試体, および, 含まない供試体に対して, 56日間の促進中性化(温度30℃, 相対湿度60%, CO<sub>2</sub>濃度10%)を行った後に, ①と同じ条件で乾湿繰り返しを行う。以上の実験要因をまとめて, 表-2に示す。

## 2.3 測定項目

促進中性化を行った立方体供試体を用いて, 促進中性化開始後, 14日, 28日, 42日および56日経過後の中性化深さを測定した。測定方法としては, 供試体を割裂した後に割裂面にフェノールフタレイン1%エタノール溶液を噴霧し, 赤変しない部分の深さをノギスで測定した。

塩水浸漬と乾燥の繰り返しを28日間行った立方体供試体を用いて, コンクリート中のCl<sup>-</sup>濃度分布を測定した。試料として, 暴露面から厚さ10 mmのコンクリートプレートを表面から約50 mmの深さまで5枚切り出し, 各プレートのエポキシ樹脂

の付着していないコンクリート部分を全量粉砕し、0.15 mmのふるいを全通させた。この試料を100°Cの乾燥器で約3時間乾燥させたものを分析試料として全塩分量をJCI-SC4「硬化コンクリート中に含まれる塩分の分析方法」に準じて測定した。

鉄筋を埋設した角柱供試体を用いて、自然電位と分極抵抗の経時変化を測定した。照合電極としては飽和銀塩化銀電極 (Ag/AgCl) , 対極には円筒状のチタンメッシュを用い、供試体とともに水道水を満たしたポリ容器に入れて測定を行った。分極抵抗は矩形波電流分極法 (周波数800 Hzおよび0.1 Hz) により測定した。なお、これらの測定を行う前に供試体表面を湿布で約3時間覆うことにより、測定のための湿潤状態を確保した。

### 3. コンクリートの中性化深さ

促進中性化を行った時の各配合のコンクリート中性化深さ経時変化を図-2に示す。これによると、フライアッシュを内割りで混和した場合には、中性化の進行速度は大きくなっており、42日間以上の促進中性化による中性化深さは20 mm以上となっている。内割りでは、フライアッシュ無混和のコンクリートよりもセメント量が少ないことと、ポズラン反応によるコンクリートのpHの低下が原因であるものと考えられる。この場合、特にかぶり20 mmで配置された角柱供試体中の鉄筋は中性化域に入っており、鉄筋腐食への影響が顕著となっているものと予想される。

これに対して、外割りでフライアッシュを混和した場合には、フライアッシュを混和しない場合と同程度かそれ以下の中性化進行速度となっている。これは、外割置換の場合、フライアッシュを混和しない配合と単位セメント量は同じであり、セメントとフライアッシュを合計した粉体量は増加するためにセメント硬化体の細孔組織が緻密化したことが原因と考えられる。

なお、塩化物を混入した場合に、無混入の場合と比較して中性化が促進されるとの報告<sup>4)</sup>があるが、本研究の条件では塩化物の混入が中性化を促進する現象は見られなかった。

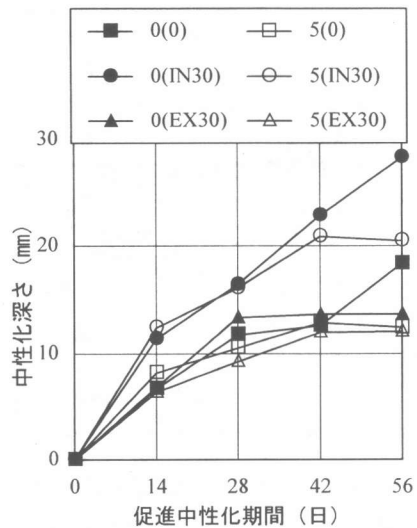


図-2 中性化深さの経時変化

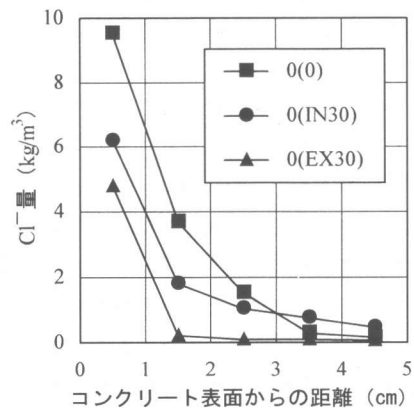


図-3 コンクリート中の全塩分分布

### 4. 外部からのCl<sup>-</sup>の浸透

28日間の塩水浸漬と乾燥繰返しを行った供試体について、コンクリート中の全塩分濃度分布の測定結果を図-3に示す。これによると、浸漬期間は28日と比較的短期間であるにもかかわらず、塩化物イオンの浸透量は大きく、今回採用した乾湿繰返しによる塩水浸漬方法による浸透促進効果は大きいと言える。また、フライアッシュを混和した配合は、無混和の場合と比較してCl<sup>-</sup>の浸透が抑制されており、塩害における潜伏期ではフライアッシュの混和は劣化速度の緩和に有効であることがわかる。特に外割りで混和した場合には、Cl<sup>-</sup>の浸透量、浸透深さ共に大幅に抑制されてお

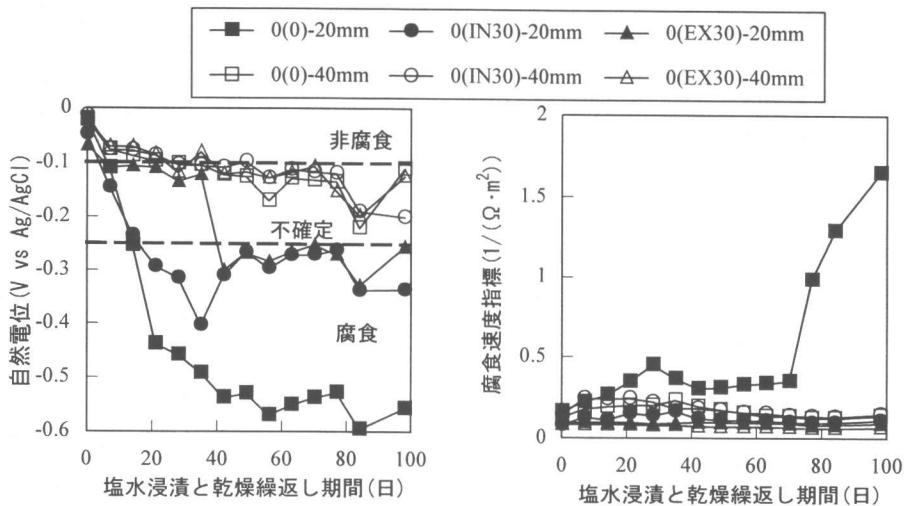


図-4 自然電位および腐食速度指標の経時変化（塩水浸漬および乾燥繰返し条件）

り、中性化深さの測定結果にも反映されたような、物質透過阻止性能の向上が確認された。

### 5. 鉄筋の電気化学的特性値

コンクリート中に埋め込まれた鉄筋の腐食状況を非破壊で把握することを目的に、鉄筋の自然電位と分極抵抗の経時変化を測定した。鉄筋腐食速度は分極抵抗の逆数に比例するが、ここでは、分極抵抗に鉄筋表面積を乗じた値の逆数を腐食速度指標とし、鉄筋腐食速度の目安とすることとした。

塩水浸漬を行った供試体中の鉄筋に関して、自然電位と腐食速度指標の経時変化を図-4に示す。自然電位の経時変化を示す図中において点線で区切った3区分はASTM C876で規定された腐食状況の判定基準を示している。また、塗りつぶし記号はかぶり20mmの鉄筋、白抜き記号はかぶり40mmの鉄筋の測定値を示している。図-4によると、かぶり20mmの鉄筋の自然電位は、図-3におけるCl<sup>-</sup>浸透量の大きなものから順番に卑変して、腐食領域の電位を示している。特にフライアッシュ無混和の場合に大きく電位が卑変しており、厳しい鉄筋腐食環境が形成されているものと考えられる。腐食速度指標の経時変化によると、フライアッシュ無混和の場合のかぶり20mmの鉄筋が顕著に大きな値を示しており、他の場合は自然電位が腐食領域に入っている場合も含めて比

較的小さな値となっている。このことから、鉄筋腐食の開始時期を知るには自然電位が有効であるが、腐食開始後の腐食速度を推定するには分極抵抗の測定が必要になるものと考えられる。

乾湿繰返しを行った供試体中の鉄筋に関して、自然電位と腐食速度指標の経時変化を図-5に示す。この場合、コンクリート中にはあらかじめ5.0 kg/m<sup>3</sup>のCl<sup>-</sup>が混入されているため、乾湿繰返し開始時点ですべての鉄筋において腐食が開始していることになる。このため、自然電位の経時変化は小さく、どの場合も腐食領域の電位を推移している。これに対して、腐食速度指標の経時変化を見ると、フライアッシュ無混和の供試体のかぶり20mmの鉄筋が顕著に大きな値を示しており、フライアッシュを混和した場合、特に外割りで混和した場合の値が小さいことがわかる。コンクリート中の鉄筋腐食において、進展期以降の腐食速度を支配するのはカソード反応に必要な酸素の供給量であることから、フライアッシュの混和は鉄筋への酸素供給を抑制する効果があると考えられる。ただし、実際の鉄筋腐食速度を算出する際には、腐食速度指標に比例定数kを乗じる必要があり、このk値がフライアッシュの混和により変化することも考えられることから、今後の長期的な測定により腐食量まで確認する必要がある。

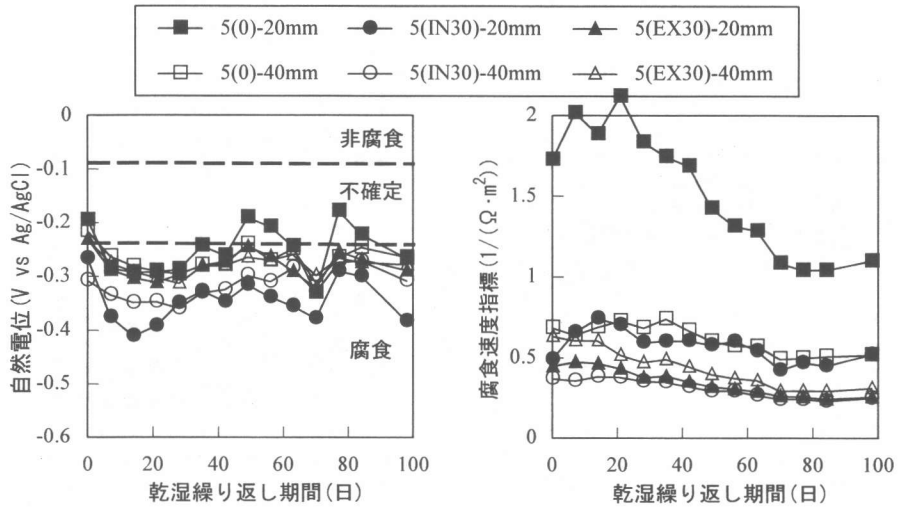


図-5 自然電位および腐食速度指標の経時変化 (乾湿繰り返し条件)

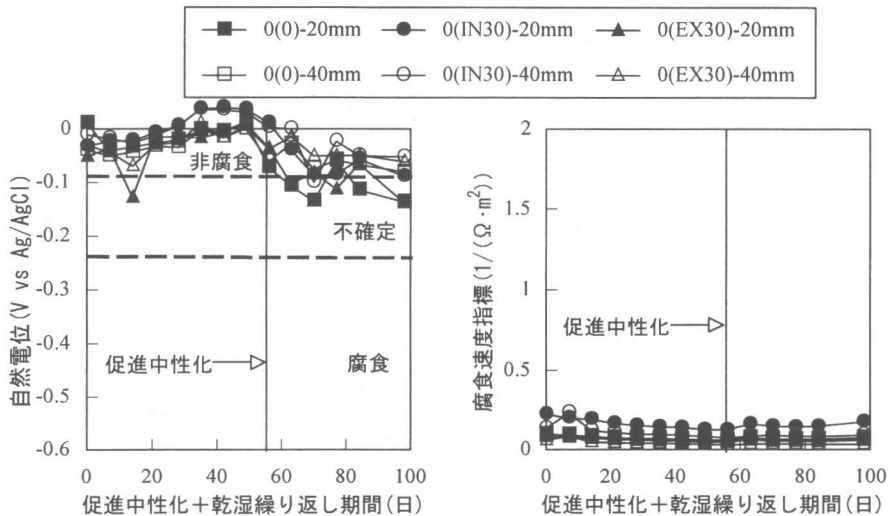


図-6 自然電位および腐食速度指標の経時変化 (促進中性化+乾湿繰り返し条件 (Cl<sup>-</sup>無混入))

Cl<sup>-</sup>無混入の供試体に対して56日間の促進中性化とその後の乾湿繰り返しを行った場合の、鉄筋自然電位と腐食速度指標の経時変化を図-6に示す。図-2に示したように、フライアッシュを内割りで混和した場合には促進中性化終了時点で中性化深さが20mmを超えていることから、かぶり20mmの鉄筋に関しては不動態被膜が破壊されているものと予想される。ただし、この場合には、Cl<sup>-</sup>の影響が無い中性化単独の劣化であることと、促進中性化期間中は水分の供給が抑制されていることもあり、全体的に自然電位は貴な値を

推移しており、腐食速度指標は比較的小さな値にとどまっている。今後は乾湿の繰り返しにより、腐食速度を支配する酸素と水が供給されることから、特に中性化が進んでいる配合については自然電位は卑変し、腐食速度指標も増大していくものと予想される。

5.0 kg/m<sup>3</sup>のCl<sup>-</sup>をあらかじめ混入した供試体に対して56日間の促進中性化とその後の乾湿繰り返しを行った場合の、鉄筋自然電位と腐食速度指標の経時変化を図-7に示す。この場合、内在塩分を含むコンクリートが中性化するという、塩害

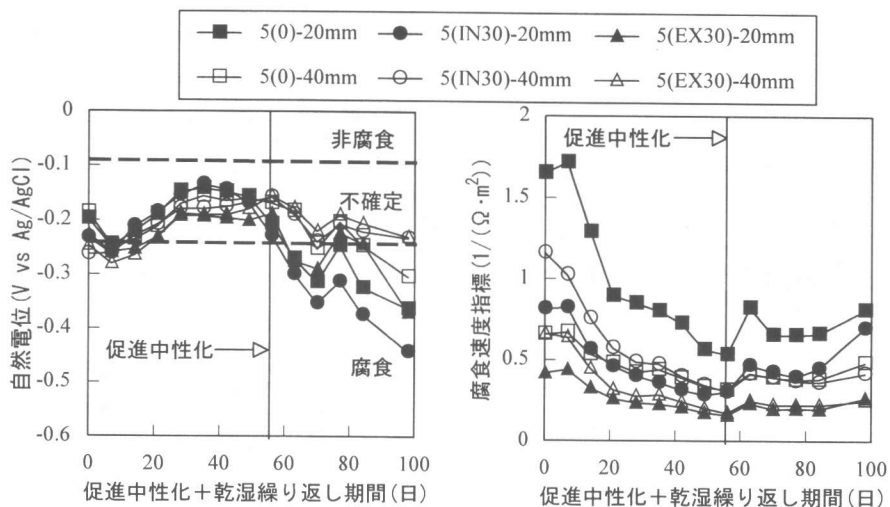


図-7 自然電位および腐食速度指標の経時変化（促進中性化+乾湿繰り返し条件（Cl<sup>-</sup>混入））

と中性化の複合劣化が進行することになる。既往の研究<sup>4)</sup>では、中性化したコンクリート部分では固定塩分が遊離し、内部に移動することによって未中性化部分で塩分が濃縮することが報告されており、塩害や中性化が単独で作用する場合よりも劣化が促進される恐れがある。

図-7によると、促進中性化期間中は供試体への水分供給量が小さいために、自然電位は不確定領域を推移しているが、乾湿繰り返し環境に移った後は、水分の供給に伴って電位が卑変している。特にフライアッシュを内割りで混和した場合のかぶり 20 mm の鉄筋電位は中性化影響で大きく卑変している。これに対して、腐食速度指標の値はフライアッシュ無混和でかぶり 20 mm の場合がもっとも大きく、フライアッシュを混和した配合、特に外割りの場合に小さな値となっている。このような傾向は、図-4や図-5とも共通するものであるが、今後の長期的な検討により実際の鉄筋腐食量との対応関係を確認する必要がある。

## 6. 結論

本研究結果をまとめると次のようになる。

①フライアッシュを内割りで混和したコンクリートの中性化速度は、無混和の場合よりも大きくなったが、外割りで混和した場合には中性化速度の増大は見られなかった。

②フライアッシュを混和することにより、外来塩分のコンクリートへの浸透は抑制され、その効果は外割りで混和した場合に特に大きかった。

③フライアッシュを混和することにより、腐食速度指標の値が概ね抑制される傾向を示したが、実際の腐食速度が抑制されているかどうかについては、鉄筋腐食量による確認が必要である。

謝辞：本研究の一部は、(社)四国建設弘済会の平成11年度建設事業の技術開発支援制度により行ったものであることを記して謝意を表する。

## 参考文献

- 1) 土木学会：フライアッシュを用いたコンクリートの施工指針（案），コンクリートライブラリー94，1999
- 2) 土木学会：フライアッシュを混和したコンクリートの中性化と鉄筋の発錆に関する長期研究，コンクリートライブラリー64，1988
- 3) 岡 竜，上田隆雄，横田 優，石橋孝一：フライアッシュの混和がコンクリート中の鉄筋腐食性状に与える影響，コンクリート工学年次論文集，Vol. 22，No. 1，pp. 151-156，2000
- 4) 小林一輔：コンクリートの炭酸化に関する研究，土木学会論文集，Vol. 433/V-15，pp. 1-14，1991