

# 論文 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

岡 竜<sup>\*1</sup>・上田隆雄<sup>\*2</sup>・横田 優<sup>\*3</sup>・石橋孝一<sup>\*4</sup>

要旨：塩害と中性化が複合的に作用する条件において、フライアッシュをセメントに対して30%置換したコンクリート中の鉄筋の腐食挙動を自然電位、分極抵抗などの経時変化をモニタリングすることによって検討した。また、試験開始後392日ではつり出した鉄筋の腐食減量を測定し、分極抵抗との関係からK値を算定した。この結果、フライアッシュを混和したコンクリート中の鉄筋腐食について以下の結果が得られた。(1)塩害と中性化が複合的に作用する場合、厳しい鉄筋腐食環境を形成する危険がある。(2)フライアッシュを混和した場合のK値は、フライアッシュ無混和の場合より大きい値となった。

キーワード：フライアッシュ、鉄筋腐食、自然電位、分極抵抗、腐食減量

## 1. はじめに

近年、コンクリート構造物の早期劣化が大きな社会問題として取り上げられている。その中でも最も深刻な劣化現象の1つに塩害や中性化に起因する鉄筋腐食が挙げられる。今後、コンクリート構造物の耐久性設計手法を確立するためには、鉄筋腐食による構造物の性能低下を定量的に解明する必要がある。

一方、大容量の石炭火力発電所の建設に伴い、今後大幅なフライアッシュ発生量の増加が予想されている。また、資源リサイクルや環境保全といった社会的要請の高まりからも、フライアッシュの有効利用が求められている。フライアッシュは従来からコンクリート用混和材としての活用が検討されているが、コンクリートに混和した場合、流動性改善、水和熱低減、長期強度増進、水密性向上などが期待されている<sup>1)</sup>。これに対して、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(Ca(OH)<sub>2</sub>)が消費されることから、コンクリートのpHが低下し、中性化速度が大きくなることから、それに伴う鉄筋腐食が促進される可能性も指摘されてきた<sup>2)</sup>。

現時点では、フライアッシュを混和したコンクリート中の鉄筋腐食に対するデータは不足しているといえる。本研究では、あらかじめCl<sup>-</sup>を混入した鉄筋コンクリート供試体(以下RC供試体)を促進中性化させ、塩害と中性化の複合的な作用による鉄筋腐食挙動に与えるフライアッシュ混和の影響を電気化学的検査手法により評価することとした。

## 2. 実験概要

### 2.1 コンクリートの配合および使用材料

本実験で用いたコンクリートの示方配合を表-1に示す。厳しい鉄筋腐食環境を想定して、水結合材比(W/B)は60%および単位水量は185kg/m<sup>3</sup>と大きく設定した。セメントに対するフライアッシュ置換率(FA/(C+FA))は単位結合材量(C+FA)を一定とした上で体積比で0および30%の2種類を設定した。また、コンクリート中にあらかじめ混入するCl<sup>-</sup>量として、0、4および8kg/m<sup>3</sup>の3レベルを設定し、合計6配合とした。

セメントは普通ポルトランドセメント(密度

\*1 徳島大学大学院 工学研究科建設工学専攻(正会員)

\*2 徳島大学助手 工学部建設工学科 工博(正会員)

\*3 ㈱四国総合研究所 土木技術部 工博(正会員)

\*4 電気化学工業㈱ 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

配合名	Cl <sup>-</sup> (kg/m <sup>3</sup> )	W/B (%)	FA (C+FA) (容積%)	s/a (%)	Gmax (mm)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )						
						W	C	FA	S	G	NaCl	AE減水 剤(ml)
0(0)	0	60	0	48	15	185	308	0	808	879	0	770
0(30)			30				237	71	796	866	0	
4(0)	4		0				308	0	801	879	6.6	
4(30)			30				237	71	789	866	6.6	
8(0)	8		0				308	0	795	879	13.3	
8(30)			30				237	71	783	866	13.3	

3.16 g/cm<sup>3</sup>, 比表面積 3280 cm<sup>2</sup>/g) を, 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 2.2 g/cm<sup>3</sup>, 比表面積 3500 cm<sup>2</sup>/g, SiO<sub>2</sub> 51.2 %, 強熱減量 4.0 %) を用いた。細骨材は徳島県吉野川産川砂 (密度 2.60 g/cm<sup>3</sup>, 吸水率 2.0 %), 粗骨材は徳島県那賀川産玉砕石 (密度 2.61 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 減水剤を結合材重量の 0.25 % 混入した。

## 2.2 供試体の作製

本研究で用いた RC 供試体の概要を図-1 に示す。供試体は, 10×10×15cm の角柱コンクリートとし, かぶり 2cm の位置に異形鉄筋 SD 295A D10 を 2 本配したものを作製した。また, 鉄筋のマクロセル腐食挙動についても検討するため, Cl<sup>-</sup>を混入したコンクリートと無混入のコンクリートを打継いだ供試体 (以下マクロセル供試体) も併せて作製した。この場合, 鉄筋 2 本の内, Cl<sup>-</sup>無混入のコンクリート中に埋設された鉄筋をカソード, Cl<sup>-</sup>を混入したコンクリートに埋設された鉄筋をアノードと想定した。

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 10cm の立方体供試体を別途作製した。

## 2.3 養生および供試体静置条件

コンクリート打設後, 材齢 1 日で脱型し, 材齢 28 日まで 20℃の恒温室内で湿布養生を行った。養生終了後, 1 週間の気中乾燥を行った上で, 暴露面 (かぶり 2cm の面) を 1 面残して, 他の 5 面はすべてエポキシ樹脂による表面被覆を行った。この後, すべての供試体を温度 30℃,

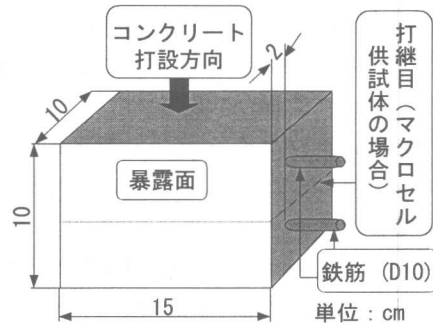


図-1 RC 供試体

湿度 60%, CO<sub>2</sub> 濃度 5% の条件で 84 日間の促進中性化を行った。さらにその後 20℃の恒温室内において, 1 週間周期の乾湿繰り返しを行った。なお, マクロセル供試体については, 2 本の鉄筋をリード線で電氣的に結合した状態で静置を行った。

## 2.4 中性化深さの測定

促進中性化開始後, 28, 56, および 84 日経過した段階で, 立方体供試体を用いて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。測定値の平均を中性化深さとした。

## 2.5 Cl<sup>-</sup>濃度分布の測定

84 日の促進中性化を行った立方体供試体を用いて, コンクリート中の Cl<sup>-</sup>濃度分布の測定を行った。試料として, 暴露面から厚さ 1cm のコンクリートプレートを 4 枚切り出し, それぞれのプレートに対して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碎し, 0.15mm

のふるいを全通させた。この試料を 100℃の乾燥器で約 3 時間乾燥させたものを分析試料として各プレートの全塩分量および可溶性塩分量を JCI-SC4 に準じて測定した。

## 2.6 電気化学的特性値

促進中性化を開始した時点から RC 供試体中の鉄筋の自然電位、分極抵抗（矩形波電流分極法、電流 10~100  $\mu$ A、周波数 800Hz と 0.1Hz）、コンクリート抵抗ならびにマクロセル供試体中の鉄筋間を流れるマクロセル電流量を測定しその経時変化について検討した。照合電極には飽和塩化銀電極 (Ag/AgCl) を、対極にはチタンメッシュを用いた。マクロセル電流量の測定には無抵抗電流計を用いた。また、測定を行う前に供試体表面を湿布で約 30 分覆うことにより、測定のための湿潤状態を確保した。

## 2.7 鉄筋腐食量の測定

促進中性化 84 日+乾湿繰り返し静置 308 日の時点で RC 供試体中の鉄筋をはつり出し、JCI-SC1 に準じて、温度 60℃の 10%クエン酸アンモニウム水溶液に 24 時間浸漬し、腐食減量を測定した。

## 3. 実験結果および考察

以下の図中に示す供試体番号は、「Cl<sup>-</sup>量(フライアッシュ置換率)」とする。また、マクロセル供試体の供試体名は、例えば、「08(30)」はフライアッシュ置換率が 30%で、Cl<sup>-</sup>量が 0kg/m<sup>3</sup>と 8kg/m<sup>3</sup>のコンクリートを打継いだ供試体を示している。

### 3.1 コンクリートの中性化深さ

各配合の中性化深さを図-2 に示す。これによるとフライアッシュを混和した配合は無混和の配合に比べて中性化深さが大きくなっている。また、Cl<sup>-</sup>量が大きいほど中性化深さが大きくなっており、この傾向は既往の検討結果<sup>3)</sup>とも良い相関を示しているといえる。これより、4(30)と 8(30)の中性化深さは 84 日の促進中性化により RC 供試体のかぶりである 2cm に達しており、鉄筋は厳しい腐食環境にあるものと考え

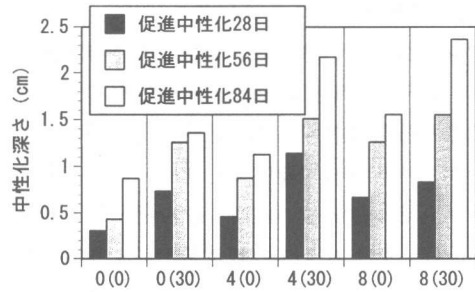


図-2 中性化深さ

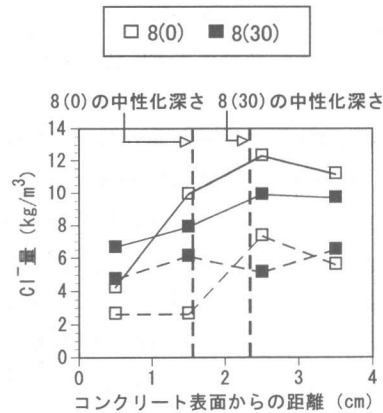


図-3 Cl<sup>-</sup>濃度分布

(実線：全塩分量、破線：可溶性塩分量)

られる。

### 3.2 Cl<sup>-</sup>濃度分布

促進中性化 84 日における 8(0)と 8(30)の Cl<sup>-</sup>濃度分布を図-3 に示す。これによると 8(0)は従来から報告<sup>3)</sup>されているように、中性化部分における Cl<sup>-</sup>の遊離と、その内部における Cl<sup>-</sup>の濃縮現象が見られる。これに対して、8(30)は 8(0)に比べて Cl<sup>-</sup>の濃度勾配は緩やかであるが、中性化部分においては可溶性塩分の全塩分に占める割合が大きくなっている。フライアッシュを混和することにより、コンクリート中への Cl<sup>-</sup>の浸透が抑制されることが報告されているが、今回の実験結果に示されるようにフライアッシュの混和により、中性化速度が大きくなると Cl<sup>-</sup>の遊離現象も促進され比較的早期に厳しい鉄筋腐食環境を形成する状況も考えられる。

### 3.3 鉄筋腐食モニタリング

コンクリート中鉄筋の自然電位の経時変化を図-4に、分極抵抗に鉄筋表面積を乗じた値の逆数である腐食速度指標の経時変化を図-5に、コンクリート抵抗の経時変化を図-6に、およびマクロセル電流量の経時変化を図-7に示す。なお、図-4はASTMの判定基準により区分けを行っている。また、図-5に示した腐食速度指標に定数Kを乗じると腐食電流値が得られることから、腐食速度指標が大きいほど鉄筋の腐食速度は大きいことが推測できる。

図-4によると、初期混入 $\text{Cl}^-$ 量が $0\text{kg/m}^3$ の場合、初期状態における $\text{Cl}^-$ の作用がないために、特に促進中性化期間中は貴な電位で推移しているが、乾湿繰り返し静置開始後は電位が卑変している。これは、乾湿繰り返し環境に移したことにより、腐食反応に関与する水分や酸素が十分に供給されたためと考えられる。初期混入 $\text{Cl}^-$ 量が $4\text{kg/m}^3$ の場合、4(30)は4(0)に比べて常に卑な電位を示しており、フライアッシュの混和により、促進中性化の影響が顕著にあらわれたものと考えられる。初期混入 $\text{Cl}^-$ 量が $8\text{kg/m}^3$ の場合、試験開始直後よりフライアッシュ混和の有無にかかわらず同程度の卑な電位を示しており、 $\text{Cl}^-$ の影響が中性化の影響よりも卓越して初期から厳しい鉄筋腐食環境が形成されていることがわかる。

図-5によると、初期混入 $\text{Cl}^-$ 量が $0\text{kg/m}^3$ の場合、フライアッシュ混和の有無にかかわらず同程度の小さい値で安定した経時変化を示しており、中性化のみ作用している状態では腐食速度は比較的小さいものと考えられる。初期混入 $\text{Cl}^-$ 量が $4\text{kg/m}^3$ の場合、促進中性化期間中は同程度の小さい値であるが、乾湿繰り返し静置開始以降、4(30)は4(0)に比べて大きな値で推移している。 $\text{Cl}^-$ 量が $8\text{kg/m}^3$ の場合、フライアッシュ混和の有無にかかわらず大きな腐食速度を示している。これらの傾向は自然電位の経時変化と良い相関を示しているといえる。

図-6によると、促進中性化期間中は全体的

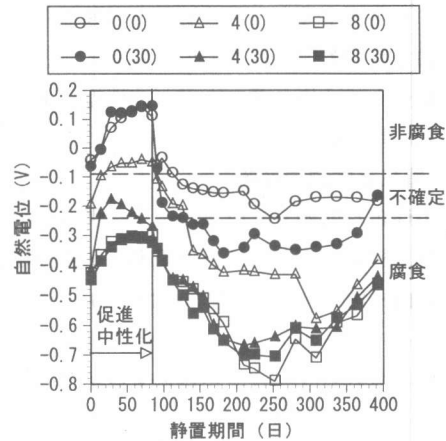


図-4 自然電位の経時変化

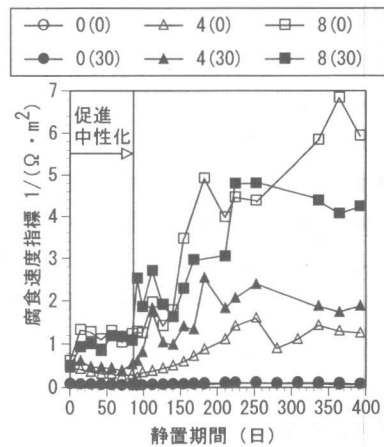


図-5 腐食速度指標の経時変化

にコンクリート抵抗は大きい値となっている。これは、促進中性化期間中、供試体は乾燥状態にあるため電気抵抗が増大したと考えられる。また、初期混入 $\text{Cl}^-$ 量が $0\text{kg/m}^3$ の場合、全体的に大きいコンクリート抵抗を示しているが、特にフライアッシュを混和することによってコンクリート抵抗は大きくなっている。これはフライアッシュのポズラン反応によってコンクリート硬化体組織が緻密化したためと考えられる。初期混入 $\text{Cl}^-$ 量が $4\text{kg/m}^3$ および $8\text{kg/m}^3$ の場合、コンクリート抵抗は小さくなっている。 $\text{Cl}^-$ があらかじめ混入されている場合、フライアッシュ混和によるコンクリート抵抗の増大がみられないが、これは $\text{Cl}^-$ の含有による電気抵抗の低

下の影響がコンクリート硬化体組織の緻密化の影響よりも卓越したためであると考えられ、この場合、腐食電流の流れやすい環境が形成されているといえる。

図-7 によると、マクロセル電流量は、促進中性化期間中においてはフライアッシュ混和の影響より  $Cl^-$  濃度差の影響の方が顕著であり、また、コンクリートの乾燥に伴い経時的に減少しているが、乾湿繰り返し静置開始後は再び増大している。また、フライアッシュを混和した場合は、無混和の場合に比べて全体的に小さい値を示している。この原因として、フライアッシュを混和したコンクリートは硬化体組織が長期材齢で緻密化したことも考えられるが、一方で、カソードとした鉄筋も腐食したために、鉄筋間を流れる電流量が減少したことも一因と考えられる。

### 3.4 鉄筋の腐食減量

試験開始後 392 日の時点で RC 供試体およびマクロセル供試体からはつりだした鉄筋の腐食減量をそれぞれ図-8 および図-9 に示す。図-8 によると、初期混入  $Cl^-$  量が  $0kg/m^3$  の場合、フライアッシュ混和の有無にかかわらず腐食減量は小さいが、初期混入  $Cl^-$  量が  $4kg/m^3$  の場合になると、フライアッシュ置換率 30% のコンクリート中の鉄筋が無混和のものに比べて著しく大きいことがわかる。これは、フライアッシュの混和により中性化速度が大きくなり、初期混入  $Cl^-$  と中性化が複合的に作用したためと考えられる。また、初期混入  $Cl^-$  量が  $8kg/m^3$  の場合、フライアッシュ混和の有無にかかわらず同程度の大きい腐食減量を示している。これは 3.3 で述べたように、 $Cl^-$  の影響が中性化の影響よりも卓越して初期から厳しく作用したためと考えられる。図-9 によると、アノードの鉄筋の腐食減量が、図-8 に示した同配合のコンクリート中の鉄筋より大きい。これはマクロセルの形成に起因する激しい腐食によるためと考えられる。一方、特にフライアッシュを混和した場合に中性化の影響でカソードの鉄筋も腐食してい

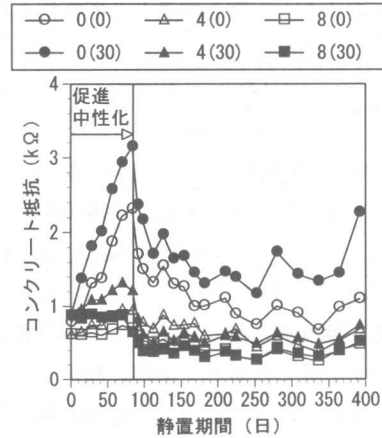


図-6 コンクリート抵抗の経時変化

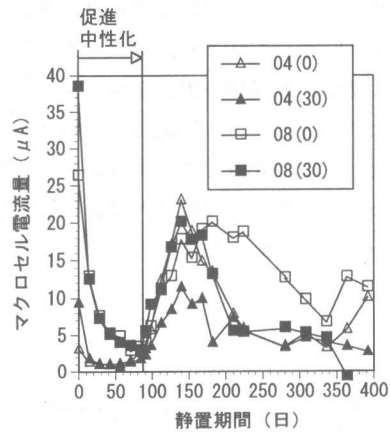


図-7 マクロセル電流量の経時変化

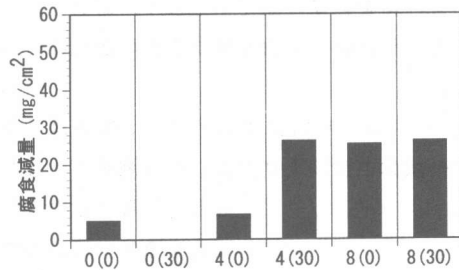


図-8 RC 供試体の腐食減量  
(試験開始後 392 日経過時点)

る。これは 3.3 で示した、カソード鉄筋の腐食により、マクロセル電流量が小さくなったという考察を裏付ける結果となっている。

腐食反応において鉄がすべて二価のイオンに

なると仮定すると、腐食減量と分極抵抗の関係は次式のようになる<sup>4)</sup>。

$$G = K \times \frac{M}{2Fa} \int \frac{1}{Rp \times A} dt \quad (1)$$

ここで、G：腐食減量 (g/cm<sup>2</sup>)、M：鉄の原子量 (=55.8)、Fa：ファラデー定数 (96500C)、K：比例定数 (V)、Rp：分極抵抗 (Ω)、A：鉄筋表面積 (cm<sup>2</sup>) である。

そこで、腐食速度指標 1/(Rp×A)を時間積分し、M/2Fa を乗じた値と、実際に測定した腐食減量との関係を図-10 に示し、比例定数である K 値の推定を試みた。これによると、フライアッシュを混和したコンクリート中鉄筋の K 値が無混和のコンクリート中鉄筋の K 値より大きい値となっている。これより、フライアッシュを混和した場合と無混和の場合を同じ K 値で評価すると、フライアッシュを混和した場合の方が腐食減量を小さく見積もる危険性がある。ただし、この結果は本実験の範囲内で得られた限定的なものであるため、今後さらにデータを蓄積していく必要がある。

#### 4. まとめ

本研究結果をまとめると次のようになる。

(1) 塩害と中性化が複合的に作用する場合 (初期混入 Cl<sup>-</sup>有り)、自然電位、分極抵抗の経時変化および腐食減量の測定結果より、フライアッシュの混和は厳しい鉄筋腐食環境の形成に寄与していた。

(2) マクロセル供試体のアノード鉄筋は一体型の供試体中鉄筋より大きな腐食減量を示した。また、フライアッシュを混和した場合は中性化の影響でカソード鉄筋も腐食する傾向にあった。

(3) 分極抵抗の測定値と鉄筋の腐食減量の関係より、K 値を推定した結果、フライアッシュを混和した場合の方が、無混和の場合よりも大きい値が得られた。

謝辞：本研究の一部は文部省科学研究費基盤研究(B)(2) (課題番号：10555149, 研究代表：橋

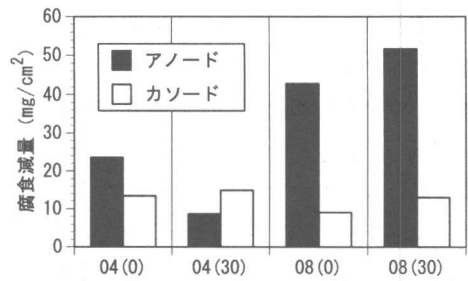


図-9 マクロセル供試体の腐食減量 (試験開始後 392 日経過時点)

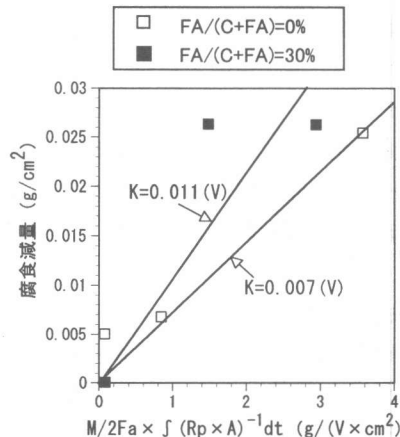


図-10 腐食減量と分極抵抗の関係

本親典) によったことを付記する。

#### 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, 1999.1
- 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
- 3) 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, pp.1-14, 1993
- 4) 小林孝一、中村士郎、服部篤史、宮川豊章：高炉スラグ微粉末を用いたコンクリート中の鉄筋の腐食性状について、材料、Vol.48, No.8, pp.882-888, 1999.8