

フライアッシュを内割置換したコンクリートの内部鉄筋の腐食性状

1TE19017S 長田 武尚

1. はじめに

近年、電力発電の約8割は火力発電が占めており、その副生成物であるフライアッシュの生成量は増加傾向にある。建築分野において、このフライアッシュをコンクリートの混和材として応用する方法がある。フライアッシュをコンクリートの混和材として用いるメリットがいくつかある。その中でも、ポゾラン反応により、長期強度の伸びに期待出来たり、組織が緻密になることで中性化が抑制されたりと、強度面、耐久面での利点がある。しかし、ポゾラン反応によって、コンクリート内部の水酸化カルシウムが消費されてしまうため、コンクリートのアルカリ性が失われやすくなってしまふ。

フライアッシュを内割置換した場合、コンクリートは中性化されやすくなるように見えるが、ポゾラン反応が進むと組織が緻密になり、それ以降の中性化は抑制され、外部からの酸素や水分の供給も穏やかになり、内部の鉄筋腐食は進行しにくいと考えられる。

そこで、フライアッシュを内割置換したコンクリートで、ポゾラン反応による組織の緻密化と中性化のどちらが卓越するかの検討を行い、内部の鉄筋の腐食性状との関係を明らかにすることを目的とする。さらに、現代の鉄筋コンクリート構造物において、すべて鉄筋を取り出して腐食性状を計ることは困難なので、非破壊試験として主流である、自然電位法及び分極抵抗法での測定を行い、実際の腐食性状との整合性の検討も行った。

2. 実験概要

表1に使用したコンクリートの調合、表2に使用した材料を示す。調合は W/B=53%であり、試験体はフライアッシュの置換を行っていない NPC、フライアッシュを内割で 20%置換した、FA20-R、FA20-M、FA20-N (R、M、N はそれぞれフライアッシュの産地が異なることを示す。以下同様)、フライアッシュを内割で 40%置換した FA40-R の計 5 種類である。それらを、暑中期 (実験環境:35±2°C、標準期 (実験環境:20±5°C)) で打設。

試験体は各調合に対して、高さ 600mm、横 900mm、

幅 150mm の壁体を模擬した試験体に、試験体上部から 200mm と 400mm の位置で、かぶり厚さが 30mm となるように径が 13mm の磨き丸鋼が挿入されている(図1)。

壁試験体の促進中性化は炭酸ガスの濃度を調節可能な部屋で行った。促進中性化試験の開始は材齢 13 週、炭酸ガスの濃度は 10±5%、湿度 60±5%で設定し、壁試験体を促進中性化室に定置した。促進中性化試験の終了は中性化速度が一番遅いと予想される標準期の NPC 試験体(無筋)を基準にして、かぶり厚さ 3cm まで中性化が進行したことを確認した時点とし、促進中性化試験の期間は促進中性化試験の開始から約 2 年ほどであった。

促進中性化後、曝露開始前にトレント法による透気性状試験、吸水試験を行い、九州産業大学にて試験体の曝露を約 2 年間行った。今回、曝露試験は屋外と屋内の 2 条件で行い、各曝露場所とその試験体名は表3に示した通り。

曝露終了後、自然電位と分極抵抗を測定した。自然電位は、電位差計をコンクリートから突き出した鉄筋と、照合電極をつなぎ、照合電極のさき取り付けた濡れたスポンジを介して鉄筋と上記の電極との電位差を測定した。分極抵抗は、コンクリートから突き出した鉄筋と測定器具をつなぎ、鉄筋とその器具とで回路を形成し、交流電流を流した時に回路に生じる交流インピーダンスを測定した。非破壊検査を終了したのち、実際に鉄筋をはつりだして腐食測定を行った。腐食面積率と腐食減量の測定

表2 使用材料

種類	記号	表乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	比表面積 (cm ² /g)	品名
セメント	C	3.15	—	—	普通ポルトランドセメント
フライアッシュ	FA-R	2.24	—	4000	Ⅱ種 R 発電所産
	FA-M	2.24	—	3860	Ⅱ種 M 発電所産
	FA-N	2.23	—	3650	Ⅱ種 N 発電所産
細骨材	S	2.57	1.76	—	—
粗骨材	G	2.72	0.68	—	—
混和剤	AE	—	—	—	AE 減水剤 遅延型 I 種

表1 調合表

水準	W/B (%)	s/a (%)	air (%)	単位量(kg/m ³)						AE 暑中期 (AE 標準期)	単位容積質量 (kg/m ³)	
				W	C	FA-R	FA-M	FA-N	S			G
①NPC	53	45	4.5	185	350	—	—	—	763	985	4.55(8.05)	2283
②FA20-R		280			70	—	—	743	4.02(7.52)		2193	
③FA20-M		280			—	70	—	740	4.02(7.52)		2190	
④FA20-N		280			—	—	70	745	4.02(7.52)		2195	
⑤FA40-R		210			140	—	—	722	3.50(2.45)		2102	

表3 試験体名

	暑中期		標準期		
	NPC	NPC	FA20R	FA20R	
屋外	FA20M	FA20M	FA20N	FA20N	
	FA40R	FA40R			
	屋内	NPC	FA20R		
		FA20R	-		
	FA40R	-			

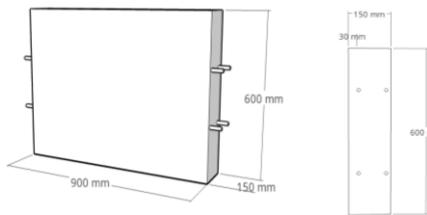


図 2.1 試験体モデル

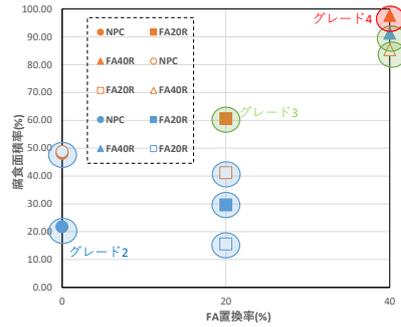


図 3.1 腐食面積率と腐食グレード

表 3.2

腐食グレード	鉄筋腐食評価グレード
I	腐食がない状態、または表面にわずかな点錆が生じている状態。
II	表面にさびが広がって生じている状態。
III	点さびがつながって面さびとなり、部分的に浮きさびが生じている状態。
IV	浮きさびが広がって生じ、コンクリートにさびが付着し、断面積で 20% 以下の欠損を生じている箇所がある状態。
V	厚い層状のさびが広がって生じ、断面積で 20% を超える著しい欠損を生じている箇所がある状態。

を行った。腐食面積率は、鉄筋をはつりだした後表面に付着しているコンクリートを落とし、表面にフィルムを張り付けそのフィルムに腐食部分を写し取った。その後、画像処理ソフトにその画像を読み込み腐食面積の計算をした。腐食減量は、腐食面積率の測定後、鉄筋長さや重さを測定し、クエン酸二アンモニウム 10% で温度 45°C 程度の溶液に 2 日間浸した。その後、溶液をしっかりと洗い流し、乾いた布でふき湿気のない場所で 30 分静置した後、重さを測定した。

3. 実験結果と考察

以降のグラフ（散布図）の凡例は、青色が標準期、橙色が暑中期であり、その中でも色が塗りつぶされたものは屋外曝露、白抜きのは屋内静置した試験体を表している。

3.1 鉄筋腐食面積率

図 3.1 に、フライアッシュの置換率ごとに分けた測定結果を示す。まず、置換率 0% のものを見てみると、標準期に比べ、暑中期のほうが腐食面積率は 30% ほど高くなった。次に、置換率 20% のものを見ると、0% 同様に標準期のほうが腐食面積率は低い結果となり、屋外曝露より屋内静置のほうが低い値を示した。置換率 40% のものを見ると、ほとんど同じ腐食面積率を示した。この結果から、全体的に、標準期に打設されたコンクリート内部の鉄筋は暑中期のものに比べ、腐食が発生しにくい結果となっ

た。フライアッシュ置換率が 20% 以下であれば、フライアッシュの有無による腐食面積率は同じ打設時期の試験体で比較した場合の差はほとんどないといえる。しかし、暑中期の屋外曝露した FA20R はほかの暑中期の置換率 20% 以下の試験体に比べ大きな腐食面積率を示した。また、フライアッシュ置換率が 20% 以下の時と比べ、置換率が 40% ともなるとほとんど打設時期による違いは見られないため、フライアッシュの置換率は 20% 程度までが、鉄筋腐食への悪影響が少ないと考えられる。

図 3.1 には、腐食グレードも示しており、図中の通り、青がグレード II、緑がグレード III、赤がグレード IV を示している。この鉄筋腐食グレードは日本建築学会によるものである（表 3.2）。同程度の腐食面積率であっても、暑中期屋外の FA20R はほかの置換率 20% 以下のものに比べて、グレードが一段階高く、暑中期屋外の FA40R も同様である。図 3.3、図 3.4 には透気係数、吸水係数の測定結果と腐食面積率の関係を示した。どちらの図からも相関がみられる。両係数は、コンクリートの粗密の程度を表しており、値が大きいほどコンクリートの表層の組織が粗いことを示している。両係数の値が大きいと表層から、空気や水分が通りやすいため、鉄筋の腐食に悪影響を及ぼすことが分かる。透気係数、吸水係数はそれぞれのグラフの縦軸の値である。透気係数の値に着目すると、フライアッシュ置換率 20% 以下の試験体では多少ばらつき

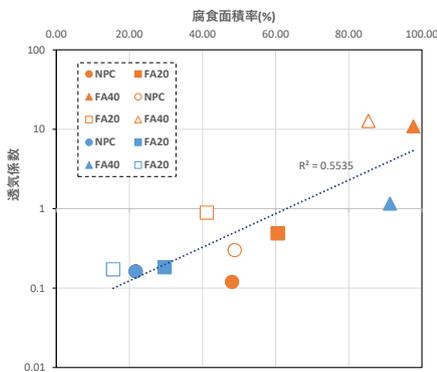


図 3.3 腐食面積率と透気係数

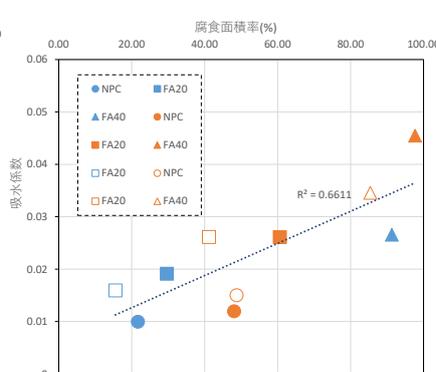


図 3.4 腐食面積率と吸水係数

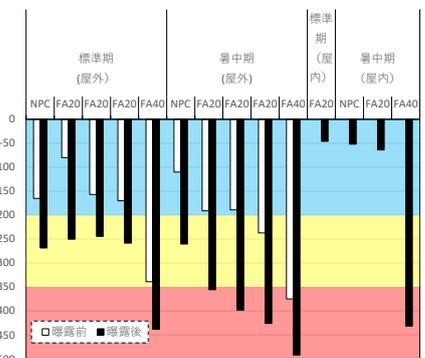


図 3.5 自然電位

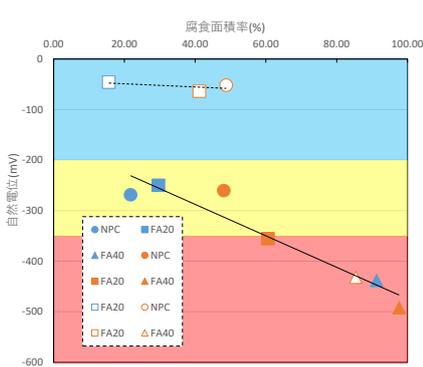


図 3.6 腐食面積率と自然電位

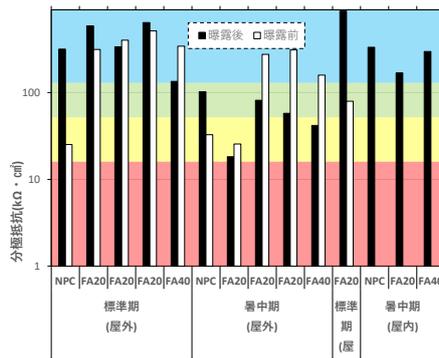


図 3.7 分極抵抗

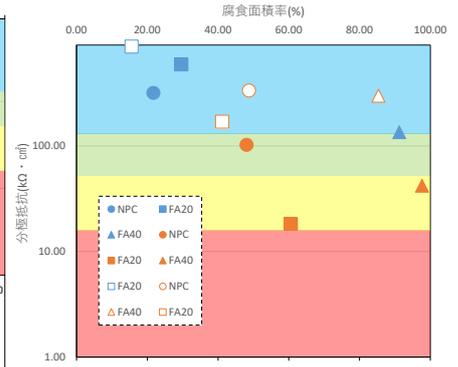


図 3.8 腐食面積率と分極抵抗

はあるが、それほど大きな差は見受けられないが、置換率が 40%では同じ打設時期で比べると差が大きくなっている。吸水係数にも同様のことが読み取れる。よって、フライアッシュ置換率が 20%程度であれば、コンクリートの表層性状への悪影響は少ないが、置換率が 40%でさらに暑中期打設の場合表層性状へ悪影響を及ぼす恐れがある。つまり、フライアッシュの置換率が 40%ともなると、フライアッシュを内割置換することによる組織の緻密化に関する効果は得られない可能性がある。

3.2 自然電位

自然電位測定では、自然電位 (E_{corr}) の値の範囲によって、 $-200 \leq E_{corr} \leq 0$:90%腐食なし、 $-350 \leq E_{corr} \leq -200$:不確か、 $E_{corr} \leq -350$:90%腐食している、というように鉄筋の腐食可能性を測ることができる。

図 3.5 に自然電位の曝露前後の結果を示す。鉄筋はすべて曝露前の自然電位よりも低い値を示しており、鉄筋の腐食は進んだといえる。この図からは、暑中期に打設したもののほうが自然電位は低いことが分かる。図 3.6 に自然電位と腐食面積率の関係を示す。屋外曝露した試験体では、腐食面積率が高くなるにつれて、自然電位の値も小さくなっている。屋外曝露した試験体に見られる相関からは腐食面積率及び腐食グレードは自然電位の値から推測することが可能だと考えられる。屋内静置した試験体は腐食面積率に違いはあるが自然電位はほとんど差がない。屋内静置した試験体では、腐食面積率に差はあるが腐食が軽微なためにそこまで自然電位の差は生まれなかったと考えられる。しかし、図 3.6 の屋内静置した試験体の相関を示す近似直線は、暑中期の FA40R を除いたものである。この図では、暑中期の屋内静置した FA40R は屋外曝露した試験体の相関に沿った値を示している。本来、鉄筋の腐食は水と酸素の両方が供給されることで起こるが、水分の供給がないはずである屋内の試験体でも屋外曝露した試験体と同様の傾向を示すものがあることが分かった。

3.3 分極抵抗

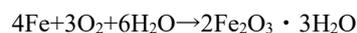
分極抵抗は、腐食電流密度と反比例の関係にあり、分

極抵抗測定では腐食速度を推測することができる。分極抵抗 R とすると、腐食速度は $R \leq 26$:速い、 $26 \leq R \leq 52$:中程度から速い、 $52 \leq R \leq 78$:中程度から遅い、 $78 \leq R$:遅い、の 4 段階で評価する。図 3.7(分極抵抗は対数表記)を見ると、屋外曝露した試験体で標準期のものは分極抵抗による腐食速度の判定は同じかより遅くなったと見ることができる。暑中期では、NPC のみ腐食速度はより遅くなったという判定だが、他の試験体は少なくとも 1 段階は速くなったと見ることができる。

図 3.8 では、腐食面積率と分極抵抗値を比較した。分極抵抗値と腐食面積率にはあまり相関は見られない。これは、腐食面積は測定段階までに腐食した合計値を示しており、分極抵抗値は測定時点での腐食速度を示していることから明らかである。

4. 屋内静置した試験体の鉄筋腐食

鉄筋の腐食は、下に示す反応式によって生じる。



この反応式から、鉄筋の腐食には酸素と水の供給が不可欠であることが分かる。鉄筋の腐食は、コンクリート内の強アルカリ性が失われたことによる不導体皮膜の破壊が前提である。本研究では、促進中性化によりその条件は満たしているため、腐食因子に焦点を当てる。この反応式より、 $a[\text{g}]$ の鉄筋を腐食させるために必要な水分 $W[\text{g}]$ は、 $\frac{W}{18.00} : \frac{a}{213.69} = 3:1$ より、 $W = a \times 0.253[\text{g}/\text{cm}]$ となる。酸素は屋内であっても空気中からの供給であるが、屋内静置は雨水が侵入しない条件で行ったため、コンクリートの外部環境からの水分供給は期待できない。そのため、本来は水分供給がなく腐食は生じるはずはないが、本血球で扱った試験体では腐食は生じていた。そこで、水分の供給経路を検討したところ、1 つの可能性としてコンクリートの短酸化によって生じる水分の影響が挙げられた。既往の論文にはこの可能性に関する記述は見当たらなかったため、検討することとした。

まず、コンクリートはポルトランドセメントが水和反応を起こすことで硬化体を生成する。その時に水酸化カ

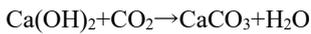
表 4.1 Ca(OH)₂ の炭酸化により生じた水の量と鉄筋腐食に必要な水の量の関係

		単位容積 質量 [g/1cm ³]	1cm ³ あたりの セメント量 [g/cm ³]	Ca(OH) ₂ 炭酸化 により生じる 水分 [g/cm ³]
審中期	NPC	2.28	0.35	1.03E-02
	FA20	2.19	0.28	8.27E-03
	FA40	2.1	0.21	6.20E-03
標準期	FA20	2.19	0.28	8.27E-03
			鉄筋長さ1cmに 腐食の生じてい た量 a [g/cm]	腐食させるの に必要な水量 W [g/cm]
			1.51E-03	3.82E-04
			4.21E-03	1.06E-03
			3.49E-03	8.82E-04
			2.48E-03	6.27E-04

ルシウムが生じ、これが強アルカリ性を示す要因である。そして、コンクリートの中性化はこの水酸化カルシウムの炭酸化により生じる。ここで、普通ポルトランドセメント 1g の水和によって生じる水酸化カルシウム量 m[g/g] は

$$m = \left(\frac{1.3}{2.0} \cdot \frac{0.5}{228.33} + \frac{0.3}{2.0} \cdot \frac{0.25}{172.25} \right) \times 74.08$$

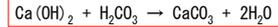
より m=0.122 [g/g] なので、水酸化カルシウムが完全に中性化する際に生じる水分量 w[g/g] は、水酸化カルシウム炭酸化反応(下式)より



$$w = \frac{m}{74.08} \times 18.00$$

よって、 $w=2.95 \times 10^{-2}$ [g/g] となる。これらの計算結果から、本研究で扱ったコンクリートの調合ごとに発生する水分量を求め、実際の鉄筋の 1cm あたりの腐食減量 a [g/cm] を生じさせるのに必要な水分量を求め比較した(表 4.1)。この表より、1cm³ のコンクリートから水和反応で生じた水酸化カルシウムが完全に炭酸化すると、1/100g 前後の水分が発生することとなった。そして、鉄筋 1cm あたりに生じた腐食を生成させるために必要な水分量が 1/1000g 前後となった。これより、炭酸化によって生じた水分がすべて鉄筋の腐食に用いられるとすると、本研究で屋内の鉄筋 1cm あたりの腐食に必要な水分は、約 1/100cm³ 程度のコンクリートがあれば供給可能だと考えられる。

実際は炭酸化によって生じた水分は蒸発などによってすべてが鉄筋の腐食に用いられるとは限らず、コンクリートの内部組織の細孔容積によって発生した水分の鉄筋位置まで到達する割合が異なる。しかし、炭酸化反応は水酸化カルシウムに限った反応ではなく、その他水和物(エトリンガイト、モノサルフェート水和物等)でも発生する。図 4.2 にその反応を示す。この反応において、青枠で囲った部分はその他の水和物における炭酸化反応である。これらの炭酸化は水和物全体の一部でのみ生じる。既往の論文によると、この反応を考慮すると水酸化カルシウムの約 2 倍以上の炭酸化カルシウムが生じていたことが分かっている。そのため、炭酸化によって生じる水分は中性化反応で得られるものの 2 倍以上生じる可能性がある。さらに、中性化後のコンクリートには 1%前後の自由水が存在することが分かっている。以上のことから、コンクリート内部では、本研究の屋内曝露試験体の内部鉄筋に



炭酸化の主要反応

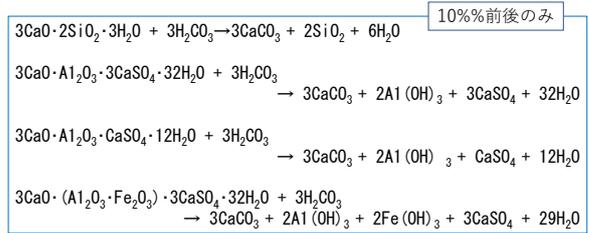


図 4.2 コンクリートの炭酸化反応

炭化環境	定義	部位の例	耐久設計の対象外
一般炭化環境 (非腐食環境)	鉄筋の腐食因子が存在しないときのみ発生する腐食	外気に接することのない屋内空間にある部位で、直接の表面は、結露などによる水分供給の可能性のない部位	対象外
一般炭化環境 (腐食環境)	鉄筋の腐食因子が存在する状態	<ul style="list-style-type: none"> 常時外気に接する屋外 およびたまに外気に接する屋外 一般炭化環境(非腐食環境)でない部位 	対象外
一般炭化環境 (非腐食環境)	鉄筋の腐食因子が存在しない状態	<ul style="list-style-type: none"> 屋外空間にあって、外壁や外部にあるスラブなど直接雨が降り当たる部位、および開かれていない窓枠や、常時開放された開口を介して外気に触れる非腐食環境 屋内空間にあって、屋上スラブ・外壁など外気の層内側、地下の構造物、基礎回り等の屋内側で、腐食の条件となる水分供給の可能性が否定できない部位 屋内空間にあって、台所・風呂・トイレ、屋内プールや地中ピットなどを有する浴室・トイレ・浴室など、水漏れや結露などによる水分供給があると想定される部位 	対象外

図 4.3 2022 年版 JASS5 耐久設計に対する考え方

生じた程度の腐食量に必要な水分は十分に供給される可能性があり、腐食を生じさせ得ると考えられる。

図 4.3 に、JASS5 より耐久設計に対する考え方を抜粋した。この表から、外気に接することのない屋内は、腐食因子である水分の存在がないとみなされ、非腐食環境とされている。そのため、耐久設計の対象外となっている。しかし、本研究において屋内の鉄筋にも腐食が生じ、それがコンクリート内部の水分によるもの可能性があると考えられる結果となった。

5.まとめ

標準期打設のほうが、フライアッシュを置換した際の影響は大きく、ポゾラン反応による組織の緻密化の効果は少なくなると考えられる。さらに、フライアッシュを置換率が 40%ともなると標準期打設や、屋内静置した場合でも、鉄筋腐食への影響は大きくなった。さらに、JASS5 で非腐食環境と定義される屋内でも鉄筋に腐食が発生しており、その腐食量はコンクリート内部で発生する水分でも十分供給できる可能性があった。そのため、外部からの水分供給がなくても鉄筋が腐食する可能性があると考えられる。

参考文献

- 1) 白川 敏夫・花井 伸明: 吸水試験方法による表層部コンクリートの品質評価に関する研究、コンクリート工学年次論文集, Vol. 35, No. 1, 2013
- 2) 井上翔、秋山仁志、岸利治、魚本健人: 現場簡易透気試験による実構造物コンクリート表層の透気性評価とその相互比較、第 35 回土木学会関東支部技術研究発表会
- 3) 自然電位法による鉄筋腐食診断技術に関する共同研究報告書
- 4) 小林一輔: コンクリートに対する二酸化炭素の作用、生産研究
- 5) 高橋茂: セメントの水和反応と効果組織、特集コンクリートへのオマージュ 謝辞

本研究に際して実験及び本論文の作成に当たり、指導教員である小山智幸先生、実験場所の提供もしてくださった九州産業大学の白川敏夫先生に心よりの感謝の意をここに表します。