

# 論文 フライアッシュコンクリート中の腐食発生限界塩化物イオン濃度に関する実験的考察

古村 惇朗<sup>\*1</sup>・杉山 隆文<sup>\*2</sup>

**要旨**：JIS II 種灰を使用したフライアッシュコンクリートを用いて室内塩分浸漬試験を行った。埋込み型鉛照合電極を用いた自然電位の連続モニタリングおよび鉄筋腐食診断器によって腐食発生時期を把握して、腐食発生時の全塩化物イオン濃度と水酸化カルシウム量を測定した。腐食発生限界塩化物イオン濃度や[Cl/OH]は、配合や養生日数および鉄筋種類によって大きく異なることを明らかにした。

**キーワード**：フライアッシュ, 自然電位, 腐食発生限界塩化物イオン濃度, [Cl/OH]

## 1. はじめに

塩害における潜伏期は、鋼材の腐食発生の時間までとされ、鋼材のかぶり位置における塩化物イオン濃度が、腐食発生限界濃度に達するまでの時間で評価されている。現状の土木学会の標準値では、配合や材料に関わらず腐食発生限界塩化物イオン濃度を  $1.2\text{kg/m}^3$  としているが、腐食発生限界塩化物イオン濃度は使用材料の塩化物イオンの固定化の程度や不動態被膜による防食に寄与する水酸化物イオンの影響によって変化する可能性がある<sup>1)2)</sup>。本研究では、自然電位の連続計測および腐食診断器より腐食発生時点を把握して、その時点での全塩化物イオン濃度を求めることで、フライアッシュコンクリートの腐食発生限界塩化物イオン濃度を考察した。また、熱分析から測定した水酸化カルシウム量を用いて、腐食発生の閾値となる全塩化物イオン量と水酸化物イオン量の比率[Cl/OH]を求めた。

## 2. 実験概要

### 2.1 供試体作製

既往の研究<sup>1)-3)</sup>に準拠して、 $100 \times 100 \times 400\text{mm}$ の角柱の鉄筋コンクリートを作製した。また、直径10mm高さ50mmの円柱供試体も使用した。鉄筋は異形鉄筋(SD345  $\phi 19\text{mm}$ )と磨き丸鋼(D19)を使用した。鉄筋はかぶりが20mmと25mmの位置に計2本配置した。供試体の打設方向はコンクリートと鉄筋界面のブリーディングなどの影響を避けるため長さ400mm方向に縦打ちとした。角柱供試体の形状・寸法を図-1に示す。供試体の配合、使用材料およびフライアッシュの品質を表-1、表-2、表-3に示す。供試体は異形鉄筋を使用したものがOPCで養生日数28日(N50D)を3体、フライアッシュ15%置換で養生日数28日(F15D)、フライアッシュ30%置換で養生日数28日(F30D)、フライアッシュを30%置換で養生日数91日(F30DL)、磨き丸鋼を使用したものがOPCで養生日数28日(N50)、フライアッシュを30%置換で

養生日数91日(F30L)を各種類5体作製した。N50DとN50、F30DとF30DLの各配合については同様であり、F30Lについては別である。各供試体のスランプおよび空気量はF15Dが11.5cmで5.4%、F30Dが11.5cmで5.1%、F30が13.5cmで4.7%、N50が13.0cmで5.3%であった。各供試体の種類を表-4に示す。円柱供試体はOPCで養生日数28日(N50-28)を2体、フライアッシュ15%置換で養生日数28日(F15-28)、フライアッシュ30%置換で養生日数28日(F30-28)を各3体、フライアッシュ30%置換で養生日数91日(F30-91)を6体作製した。円柱供試体は無鉄筋であり、塩分浸透性を比較するために作製した。

### 2.2 塩分浸透方法

角柱供試体については表面中央部に幅50mmのプラスチック製塩分供給セルを設置し、10%NaCl溶液を浸透させた(図-1参照)。供試体の塩化物イオン供給面とその反対側の面以外の4面を気密アルミテープにより被覆した。これは、供給面側面からの水の浸透、蒸発を防ぐためである。塩分供給セル内の溶液が減少しないようにセルの上面に蓋をし、溶液が蒸発により減少した場合は適宜蒸留水を補充した。円柱供試体については塩化物イオン供給面以外の側面と底面をエポキシ樹脂で被覆し、10%NaCl溶液中に浸漬した。塩分浸透の実験は室温20°Cの恒温室で行った。

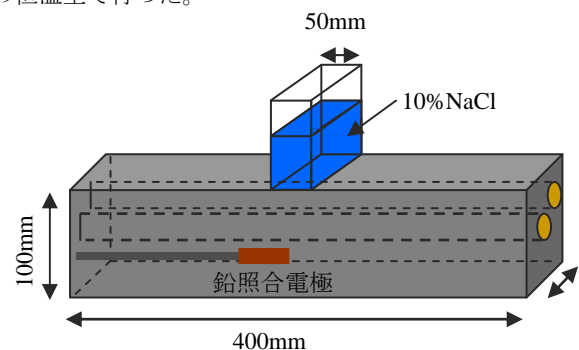


図-1 供試体の形状・寸法および塩分浸漬方法

\*1 北海道大学大学院 工学院 環境フィールド工学専攻 修士課程2年 (学生会員)

\*2 北海道大学大学院 工学研究院 環境フィールド工学部門 教授 Ph.D. (正会員)

表-1 コンクリートの配合と圧縮強度

配合	Gmax	W/(C+F)	F/(C+F)	s/a	単位量(kg/m <sup>3</sup> )					混和剤(C+F)×(%)		圧縮強度(N/mm <sup>2</sup> )	
	(mm)	(%)	(%)	(%)	W	C	F	S	G	AE 減水剤	AE 助剤	28 日	91 日
F15D	13	50	15	45	146	248	44	857	1044	1.0	0.03	35.1	43.2
F30D	13	50	30	45	145	203	87	852	1037	1.0	0.048	29.5	37.9
F30	13	50	30	43	150	210	90	801	1058	0.6	0.05	28.1	38.7
N50	13	50	0	43	162	324	-	793	1047	1.0	0.0035	42.9	48.4

表-2 使用材料

材料	種類	密度(g/cm <sup>3</sup> )	粗粒率(%)
セメント	普通(N)	3.16	-
陸砂	細骨材	2.61	2.67
砕石	粗骨材	2.68	6.06
AE 減水剤	変成リグニンスルホン酸化合物		
AE 助剤	高アルキルカルボン酸系陰イオン界面活性剤と非イオン界面活性剤の複合体		

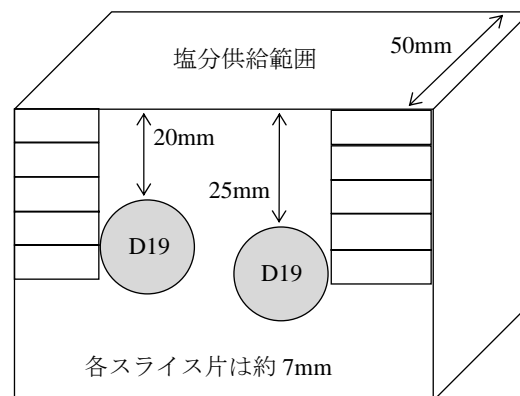


図-3 角柱供試体の塩化物イオン測定試料の採取位置

表-3 フライアッシュの品質

種類	密度(g/cm <sup>3</sup> )	強熱減量(%)	ブレン比表面積(cm <sup>2</sup> /g)
JIS 規格 II 種	2.20	1.9	3990

表-4 角柱供試体の種類

種類	養生日数(日)	使用鉄筋	フライアッシュ置換率(%)
F15D	28	異形鉄筋	15
F30D	28	異形鉄筋	30
F30DL	91	異形鉄筋	30
F30L	91	磨き丸鋼	30
N50D	28	異形鉄筋	0
N50	28	磨き丸鋼	0

### 2.3 自然電位および腐食電流密度の計測

自然電位の計測には、供試体内部に設置した埋込み電極(鉛照合電極)を使用した。埋込み電極は先端が塩分供給セルの直下となるように設置し、自然電位を8時間間隔で連続モニタリングする方法とした。また、約1か月に1回、2重対極センサー方式の2周波交流インピーダンス法を採用した携帯型鉄筋腐食診断器によって分極抵抗を求め、腐食電流密度と自然電位を計測した。N50Dのみは埋込み電極を設置していないため携帯型鉄筋腐食診断器のみで計測した。

### 2.4 腐食状況の確認

供試体の解体時期は、自然電位が定常状態より大きく低下した時点とした。埋込み電極によって自然電位の低下が確認された時点で直ちに携帯型腐食診断器を用いて計測し、自然電位の低下を確認してから解体を行った。腐食状況の確認は供試体を割裂して鉄筋を取り出し目視で行った。

### 2.5 全塩化物イオン濃度の測定

角柱供試体の塩化物イオン濃度の測定位置は塩水を接触させた範囲の直下とした。円柱供試体の塩化物イオン濃度の測定位置は塩分供給面の中央部とした。スライス片は1つの供試体につき、2か所から採取した。その位置から厚さ約7mmのスライス片を深さ方向に4点もしくは5点採取した。図-3に角柱供試体の塩化物イオン濃度測定試料採取位置を示す。塩化物イオン濃度の測定方法はJIS A 1154「硬化コンクリート中に含まれる塩化物イオンの試験方法」に従った。

### 2.6 OH量の測定

コンクリート中のOH量を測定するために熱分析を行った。熱分析はTG&DTAを使用した。ガスは窒素(200ml/分)を使用し、20℃から1000℃まで昇温した。熱分析で使用する試料は塩化物イオン濃度測定に使用したものと同様の粉末を使用し、腐食が発生した鉄筋付近の深さの試料を測定用とした。今回の実験では水酸化カルシウムが式(1)に従って約400℃から450℃で熱分解するとし

て水酸化カルシウムの量を定量した。また、コンクリート中の空隙水中で水酸化カルシウムが式(2)に従って溶解しているとして、定量した水酸化カルシウム量に  $17.01/74.09(\text{OH}^- \text{の分子量}/\text{Ca}(\text{OH})_2 \text{の分子量})$  を掛けることでコンクリート中の  $\text{OH}^-$  量を定量した。



### 3 実験結果および考察

#### 3.1 自然電位の計測結果

図-4、図-5、図-6にF15D、F30DおよびF30Lの埋込み電極による自然電位の計測結果を示す。ここでは鉛照合電極で測定した自然電位から799mVを引いて飽和硫酸銅電極(CSE)に換算した値を使って表している。かぶり20mmの鉄筋をUP、かぶり25mmの鉄筋をDOと表している。F15Dシリーズでは、すべてのかぶり20mmの鉄筋の自然電位が急激に低下し、F15D(5)のみ25mmの鉄筋の自然電位も低下した。F30Dシリーズも同様に5体中4体のかぶり20mmの鉄筋の自然電位が急激に低下した。F30D(1)では、かぶり20mmと25mmの鉄筋の自然電位が同時に徐々に低下する現象が観察された。ここには示していないが、F30DLシリーズでも5体中4体にこのような現象がみられた。いずれの供試体でも徐々に自然電位が低下する過程における携帯型鉄筋腐食診断器での自然電位計測では、低下がみられなかった。この原因の解明については今後の課題である。

F30LシリーズではF15DやF30Dに比べ、長時間経過しており、5体中1体にしか自然電位の低下が見られなかった。これは養生日数が91日と長くフライアッシュのポゾラン反応によってコンクリート構造が緻密化され塩分浸透抵抗性が向上していることや、磨き丸鋼の使用により異形鉄筋に比べコンクリートと鉄筋の界面が安定したことによって腐食までの時間が長くなっていると考えられる。N50シリーズの自然電位計測結果については既報<sup>34)</sup>で述べたとおりである。

#### 3.2 腐食電流密度の測定結果

図-7にF15Dの腐食電流密度の計測結果を示す。腐食電流密度は他のシリーズでも同様に自然電位の低下時に上昇する傾向がみられた。図-8に異形鉄筋を使用したフライアッシュコンクリート中の鉄筋腐食と腐食電流密度および自然電位の関係を示す。本実験手法において、鉄筋に腐食が発生していた時と鉄筋に腐食が発生していなかった時の自然電位と腐食電流密度の閾値としては、自然電位が-250(mV vs. CSE)かつ腐食電流密度が  $0.02(\mu\text{A}/\text{cm}^2)$  が考えられ、図の腐食発生領域と考えられる部分での鉄筋の腐食発生率は92%となっていた。

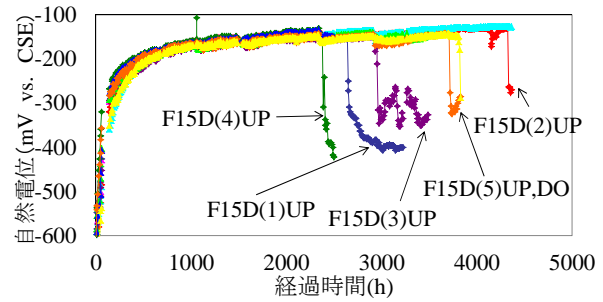


図-4 自然電位の計測結果 (F15D)

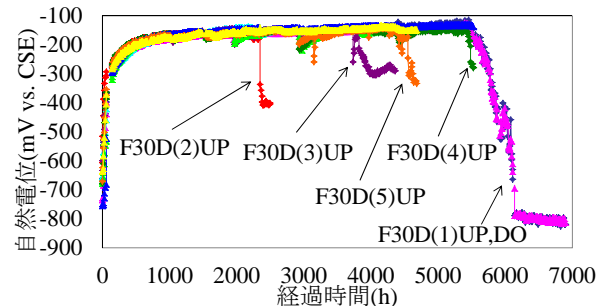


図-5 自然電位の計測結果 (F30D)

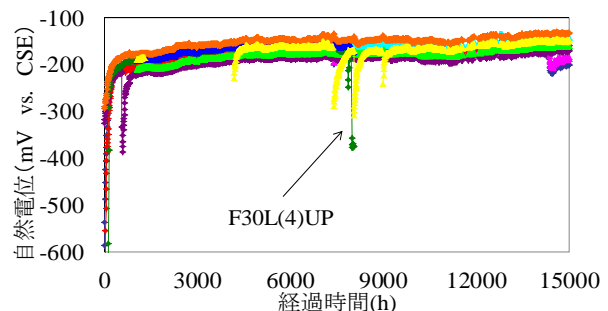


図-6 自然電位の計測結果 (F30L)

N50シリーズについては自然電位の計測結果と同様に既報<sup>34)</sup>のとおりである。

#### 3.3 腐食発生状況

写真-1に腐食発生状況の一例を示す。写真上部の鉄筋がかぶり20mmの鉄筋、下部が25mmの鉄筋である。他の供試体の腐食発生状況もほぼ同様であり、鉄筋のリブの部分に腐食がみられる傾向にあった。リブの凹凸によってコンクリートと鉄筋の付着面に空隙ができやすい状態になるためと考えられる。F30DL(1)とF30L(4)ではかぶり20mmの鉄筋の塩分供給範囲から約1.5cm離れた位置に腐食発生が確認された。塩分供給範囲から離れた位置に腐食が発生した原因は、コンクリート中の細孔構造では塩化物イオンの拡散は均一ではないため、骨材や空隙などの影響によって局所的な不均一性や塩化物イオン濃度の高い部分ができたためと考えられる。加えて鉄筋の不導態被膜が何らかの作用によって破壊され、その部分だけで腐食が起きやすい状況になっていたこ

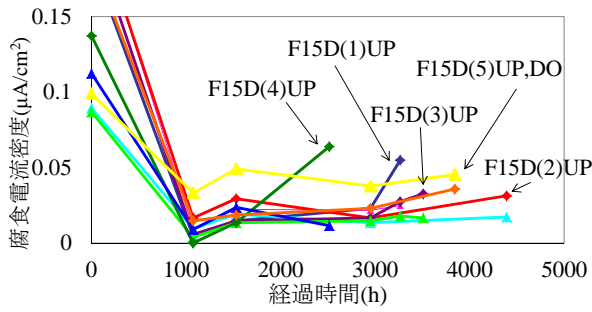


図-7 腐食電流密度の計測結果 (F15D)

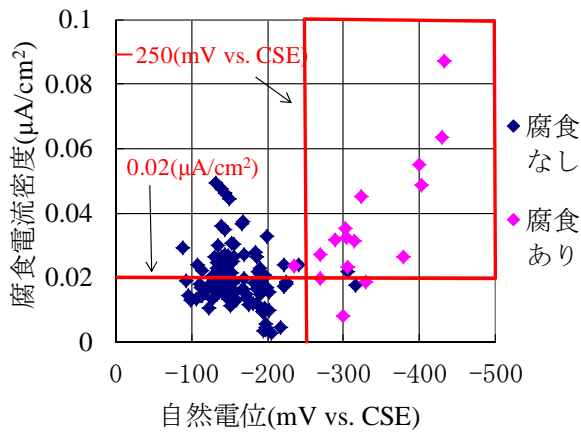


図-8 腐食と腐食電流密度および自然電位の関係 (F15D, F30D, F30DL)

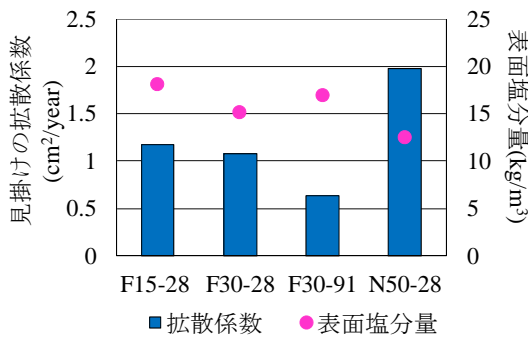


図-9 円柱供試体塩分浸漬試験の結果



写真-1 F15(2)の鉄筋腐食状況

とも考えられる。

### 3.4 円柱供試体における塩分浸漬試験の結果

図-9に円柱供試体の塩分浸漬結果を示す。この値は供試体の養生終了後、1年間10%NaCl溶液中に浸漬し、そのときの塩化物イオン濃度分布から得られた値の平均値である。N50-28と同じ養生日数28日のF15-28とF30-28の拡散係数を比較すると、F15-28、F30-28の拡散係数は半分程度になっており、塩分浸透抵抗性が向上することがわかる。これはフライアッシュのポズラン反応の進行によってコンクリートの細孔構造が緻密化したためと考えられる。また同じフライアッシュ30%置換で養生日数28日のF30-28と養生日数91日のF30-91では拡散係数に大きく差があることがわかる。フライアッシュ置換のコンクリートは養生日数を長くすることで塩分浸透抵抗性が向上することがわかる。

### 3.5 腐食発生限界塩化物イオン濃度

表-6に腐食発生限界塩化物イオン濃度の測定結果を示す。電位差滴定法により求めた塩化物イオン濃度は、腐食が発生した時点のものではなく、供試体をカットした時点のものである。そのため、塩化物イオン濃度の実測値からフィックの拡散方程式における表面塩分量および見掛けの拡散係数を最小二乗法により算出することによって腐食発生時の塩化物イオン濃度(腐食発生限界塩化物イオン濃度)を求めた。各供試体から採取した2カ所のサンプルの深さと塩化物イオン濃度を平均して、表面塩分量と見掛けの拡散係数を算出した。

各供試体の平均拡散係数はF15D, F30D, F30DL, N50D, N50でそれぞれ1.71cm<sup>2</sup>/year, 1.26cm<sup>2</sup>/year, 1.34cm<sup>2</sup>/year, 3.10cm<sup>2</sup>/year, 2.10cm<sup>2</sup>/yearであった。F15DとF30Dを比較すると、フライアッシュの置換量が増えることによって拡散係数が低くなっている。これは円柱供試体を用いた試験と同様にフライアッシュのポズラン反応によってコンクリート組織が緻密化されたためと考えられる。またF30DとF30DLを比較すると、F30DLのほうが若干高い値を示した。拡散係数は時間に依存し、材齢が長くなるほど拡散係数が減少するという報告がある<sup>5)</sup>。

F30DLシリーズの供試体の中ではF30DL(1)が塩分供給範囲外で早期に腐食したためにF30DLシリーズの拡散係数の平均値を引き上げている。そのほかのF30DLの供試体の拡散係数の平均値は1.14cm<sup>2</sup>/yearであり、F30Dシリーズよりも低くなっていた。いずれの供試体も円柱供試体試験で得られた拡散係数の値のほうが小さいが、円柱供試体試験は1年間浸漬後の結果であり角柱供試体に比べ浸漬期間が長かったため、拡散係数が小さくなったと考えられる。またN50Dの拡散係数は3.10cm<sup>2</sup>/yearとフライアッシュを置換した供試体よりも大きく、円柱供試体試験同様にフライアッシュを置換することにより

表-6 腐食発生限界塩化物イオン濃度

供試体	腐食発生限界塩化物イオン濃度(kg/m <sup>3</sup> )			セメント 従量(%)	平均腐食 発生時間 (h)
	最小	平均	最大	平均	
F15D	0.8	1.1	1.8	0.45	3316
F30D	1.0	1.2	1.4	0.57	4064
F30DL	1.8	1.9	2.0	0.95	5097
F30L	5.5*			2.62*	—
N50D	1.0	2.3	4.1	0.71	2856
N50	3.7	4.8	6.6	1.48	6427

\*31024 時間における鉄筋位置の塩化物イオン濃度の推定値

塩分浸透抵抗性が向上し、腐食発生までの時間も長くなることがわかる。今回の実験は腐食発生を早めるために標準的な実構造物と比べると小さいかぶりである 20mm と 25mm で行った。かぶりの大きな実構造物では鉄筋位置まで塩化物イオンが浸透するのに必要な時間が長くなるため、その間にフライアッシュのポズラン反応による緻密化が進み塩分浸透抵抗性が向上し、腐食発生までの時間が OPC に比べさらに長くなると推測される。

異形鉄筋を使用したフライアッシュ置換の各供試体の平均濃度は、F15D, F30D, F30DL でそれぞれ 1.1kg/m<sup>3</sup>, 1.2kg/m<sup>3</sup>, 1.9kg/m<sup>3</sup> であった。F15D と F30D の腐食発生限界塩化物イオン濃度はほぼ同等の値となった。コンクリート中に存在する塩化物イオンは空隙水中に存在する自由塩化物イオンとセメント水和物に取り込まれる固定塩化物イオンに分けられる。このうち腐食発生に寄与するのは自由塩化物イオンであり、固定塩化物イオンは腐食発生に寄与しないことが知られている<sup>1)</sup>。F15D はフライアッシュの置換率が F30D に比べ少ないが、単位セメント量は多く、pH も異なるため、鉄筋腐食に直接関与する自由塩化物イオン濃度と固定塩化物イオン濃度は異なると考えられる。また、圧縮強度から推察されるコンクリートと鉄筋の付着強度は、F15D が大きく界面の状態が比較的良好と考えられる。これらが総合的に作用して、同等の腐食発生限界塩化物イオン濃度になったものと考えられる。さらに、F15D と F30D の値は土木学会標準値である 1.2kg/m<sup>3</sup> に近い値である。このように近似した原因は、養生日数が 28 日であることやかぶりが 20mm であったことが考えられる。先述したように、通常これよりかぶりの大きな実構造物では、鉄筋位置まで塩化物イオンが浸透するのに必要な時間が長くなり、その間にフライアッシュのポズラン反応による緻密化が進み、腐食発生限界塩化物イオン濃度も増加すると推測される。養生日数が 91 日である F30DL では、腐食発

生限界塩化物イオン濃度が大きくなった。コンクリートと鉄筋の界面の状態が改善されて、腐食発生限界塩化物イオン濃度が増加したと推察される。N50D の腐食発生限界塩化物イオン濃度は 2.3 kg/m<sup>3</sup> であり、フライアッシュを置換した F15D, F30D, F30DL より高い値となった。塩化物イオンの固定化やコンクリートと鉄筋の付着状態も関与していると考えられるが、コンクリート中の pH もフライアッシュコンクリートと異なると考えられる。これに関係する水酸化カルシウムの影響については次節で考察する。

今回の研究では、腐食発生限界塩化物イオン濃度は使用する鉄筋の種類やコンクリートとの界面の状態で変化することが明らかになった。N50 の腐食発生限界塩化物イオン濃度は 4.8kg/m<sup>3</sup> と異形鉄筋を使用した N50D の 2.3 kg/m<sup>3</sup> と比べ 2 倍以上の差があった。磨き丸鋼を使用しフライアッシュを置換した F30L は 5 体中 4 体が腐食しておらず、表中では、円柱供試体試験で得られた見掛けの拡散係数と表面塩分量を用いて計算によって推定した現在の塩化物イオン濃度の値を示した。この推定値は 5.5 kg/m<sup>3</sup> となっており、同条件で異形鉄筋の 5 体中 3 体が腐食した F30DL に比べ大きな値となっている。これは異形鉄筋のリブの凹凸によって界面の状態が磨き丸鋼に比べ不安定になるために低い塩化物イオン濃度で腐食が発生したと考えられる。また既往の研究では、界面部のコンクリートに気泡や空隙が認められた場合、腐食発生限界塩化物イオン濃度は低下する傾向が示されている<sup>1),3)</sup>。

### 3.6 硬化体中の [Cl/OH]

発錆には塩化物イオンだけでなく不導体被膜の形成やその安定に寄与すると考えられる水酸化物イオンも関与しており、それらの比率 [Cl/OH] によって支配されている。鋼材腐食に関する [Cl/OH] の閾値に関する研究では、試験方法によって大きなばらつきがあり、測定された条件が溶液中かモルタル中かコンクリート中かによって大きな違いが生じている<sup>1)</sup>。また、フライアッシュを置換したコンクリートの場合は低 Ca/Si 比の C-S-H のアルカリ吸着<sup>6)</sup>やポズラン反応による Ca(OH)<sub>2</sub> の消費<sup>7)</sup>も鉄筋腐食に影響すると考えられている。

本研究では全塩化物イオン量と Ca(OH)<sub>2</sub> から求めた水酸化物イオン量を用いて [Cl/OH] を求めた。[Cl/OH] の結果を図-7 に示す。腐食発生の [Cl/OH] の閾値は配合によって違いが見られ、F15D で [Cl/OH]=0.05 (モル比率では 0.025)、F30D で [Cl/OH]=0.1 (モル比率では 0.05)、F30DL では [Cl/OH]=0.2 (モル比率では 0.1) となった。OH 量に着目すると、ポズラン反応の Ca(OH)<sub>2</sub> の消費によって、F15D, F30D, F30DL の順に OH 量が減少している。F30DL では、鉄筋腐食時の OH 量が少なく Cl 量が大きく、図の

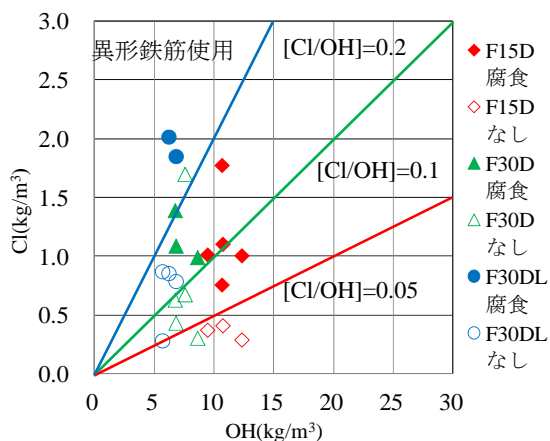


図-7 F15D, F30D, F30DL の[Cl⁻/OH⁻]

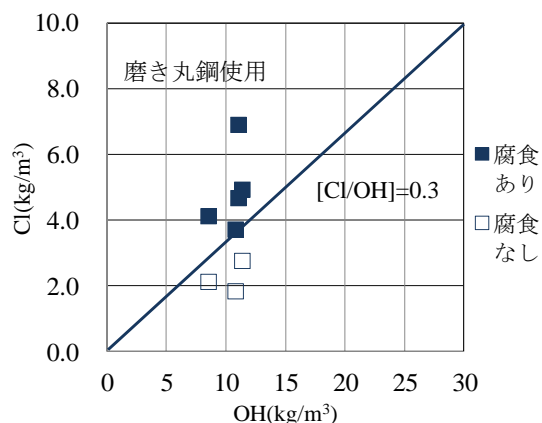


図-8 N50 の[Cl⁻/OH⁻]

傾きが大きくなった。養生日数を長く確保することで、アルカリ度の低下による影響をしのぐ物理化学的な作用が働いたと考えられる。

磨き丸鋼を使用した N50 の[Cl⁻/OH⁻]を求めた結果を図-8 に示す。腐食発生の閾値は[Cl⁻/OH⁻]=0.3(モル比率では 0.15)となった。既往の研究<sup>1)</sup>と比べると比較的小さい値となったが、本研究は硬化体中における全塩化物イオン量および Ca(OH)<sub>2</sub> から[Cl⁻/OH⁻]を算出しているため違いが生じたと考えられる。今後は配合ごと、使用する鉄筋の種類ごとの鋼材腐食の[Cl⁻/OH⁻]の閾値を確立することが課題である。

#### 4 結論

本研究では、実験室において鉄筋腐食モニタリングを行い腐食発生時点でのコンクリート中の全塩化物イオン濃度、[Cl⁻/OH⁻]の測定を行った。本研究の範囲内で得られた知見を以下に示す。

- (1) 本実験手法において、鋼材の腐食発生の閾値は自然電位が-250(mV vs. CSE)かつ腐食電流密度が 0.02 (μA/cm<sup>2</sup>)であった。

- (2) 本研究で使用したフライアッシュコンクリートの平均腐食発生限界塩化物イオン濃度は、普通コンクリートに比べ低い値となった。しかし、養生日数が長くなると増加し、異形鉄筋に比べ磨き丸鋼を使用すると増加した。
- (3) フライアッシュコンクリートの拡散係数はいずれも普通コンクリートに比べ低い値となり、フライアッシュを置換することで塩分浸透抵抗性が向上することが確認された。
- (4) 腐食発生時の[Cl⁻/OH⁻]は、配合や養生日数、使用する鉄筋の種類ごとに異なった値を示した。

**謝辞** 本研究は、科学研究費補助金(基盤研究 B 課題番号 23360187)を受けて実施したものです。また、実験に際して、齋藤敏樹氏((株)北電総合設計)のご協力を賜りました。ここに付記して謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート中の鋼材の腐食性評価と防食技術研究小委員会(338 委員会)委員会報告書、コンクリート技術シリーズ 86, 2009.10
- 2) 堀口賢一, 丸屋剛, 武若耕司：腐食発生限界塩化物イオン濃度に及ぼすコンクリート配合の影響、コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.1, pp.1377-1382, 2007
- 3) G.M.Sadiqul-Islam and T.Sugiyama : Corrosion initiation state of rebars in concrete subjected to chloride penetration, Concrete under severe conditions, CRC Press, Vol.1, pp453-460, 2010
- 4) 藤秀学, 杉山隆文：コンクリート中の鉄筋腐食発生限界塩化物イオン濃度の測定に関する考察, 土木学会第 65 回年次学術講演会概要集第 V 部, pp.421-422, 2010.9
- 5) 鈴木健太, 杉山隆文, 川北昌宏, 志村和紀：フライアッシュコンクリートの塩分浸透性に関する実験的考察, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.1, pp.849-854, 2008
- 6) 河野克哉, 梁承奎, 山田一夫, 市川牧彦, 高橋晴香：混合セメントを用いたモルタル中の鋼材腐食に対する塩化物イオンの限界濃度, 土木学会年次学術講演会概要集第 V 部, pp.483-484, 2009.9
- 7) 土木学会：循環型社会に適合したフライアッシュコンクリートの最新利用技術, コンクリートライブラリー132, 2010.1