

11. 中性化と塩分浸透による鉄筋コンクリートの 複合劣化作用に関する実験的研究

An Experimental Study on Combined Deterioration on Reinforced Concrete by Carbonation and Chlorides

立松和彦* 山崎順二*
山田 優*²

要 旨

水セメント比の異なるコンクリートを用いた鉄筋コンクリート試験体について、室内で2年間、炭酸ガスによる中性化の促進と塩水浸漬を繰り返す試験を行い、中性化深さ、塩化物イオン濃度分布および鉄筋の腐食度について各々の変化とコンクリートの細孔径分布などとの関係を検討した。その結果、中性化および塩分浸透（乾湿繰り返し）が同時に作用することにより、塩分の浸透速度および鉄筋腐食の進行速度は、塩分浸透が単独で作用するよりも加速されること、表層部のコンクリートの細孔量を測定することで中性化速度および見かけの拡散係数が推測できる可能性があることなどが明らかになった。

キーワード：中性化／塩分浸透／複合劣化作用／鉄筋腐食／拡散係数／自然電位／細孔径分布

1. はじめに

コンクリート構造物の耐久性を阻害する要因には中性化、塩害、凍結融解作用、アルカリ骨材反応などがある。これまで、個々の劣化要因に対してさまざまな研究が行われ、成果が積み重ねられてきたが、その一方で、構造物に生じている劣化の原因を一つに特定できない、すなわち「複合劣化」と呼ばれる劣化現象が多く見られるようになった。この場合、各劣化現象の相互作用によって、単独で生じた場合と異なる劣化形態を示すことがあり、劣化が単独で生じた場合を足し合わせたような単純なモデルで評価を行うことができない¹⁾。例えば、石橋ら²⁾の、新幹線高架橋におけるコンクリートの中性化の進行が異常に速いという調査報告は、著者は言及していないものの複合劣化作用の一端を示したものと考えられる。また、眞嶋ら³⁾は、各種の繊維を用いた繊維補強コンクリートを飛沫帯にて12年間の海洋暴露試験を行った結果、(耐アルカリ) ガラス繊維補強コンクリートはそのタフネス（靱性）が全く消失し、プレーンコンクリートと同様の挙動を示したとして、複合劣化作用が生じていることを示唆している。上田ら⁴⁾は、あらかじめ8.0kg/m³の塩化物イオンを混入したRC供試体の促進中性化を行った結果、フライアッシュを混和した供試体の方が無混和の供試体よりも中性化速度が大きいことから、塩化物イオンとの複合作用により腐食速度も増大する傾向を示したとしている。

本研究は、水セメント比の異なるコンクリートを用いた鉄筋コンクリート試験体について、室内で2年間、炭酸ガスによる中性化の促進と塩水浸漬を繰り返す試験を行い、中性化深さ、塩化物イオン濃度分布および鉄筋の腐食度の変化とコンクリートの細孔径分布との関係を検討した結果について報告する。

2. 実験概要

2.1 実験の要因および水準

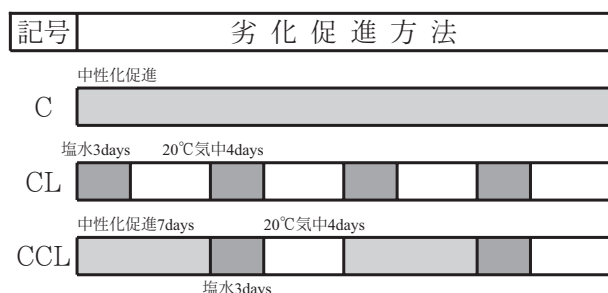
試験体に用いたコンクリートの水セメント比は、70%および55%とし、比較用に40%のものも作製した。水セメント比70%のコンクリートについては、通常は使用されていないが、施工不良などの原因によって構造体中に品質の低下した部分ができる可能性を考慮して設定した。

劣化促進の方法は、以下の6種類とした。

- | | |
|-------------------------|-----------|
| (1)中性化促進のみ | [記号C] |
| (2)中性化と塩分浸透繰り返し（1週ずつ） | [記号CCL] |
| (3)中性化深さが10mmに達した後、塩分浸透 | [記号C10CL] |
| (4)中性化深さが20mmに達した後、塩分浸透 | [記号C20CL] |
| (5)塩分浸透のみ | [記号CL] |
| (6)屋内暴露 | [記号Cin] |

*建築工法・材料研究室

*²大阪市立大学教授 工学部環境都市工学科



図－１ 劣化促進記号C, CL, CCLの違い

中性化促進の条件は、20℃、60%RH、炭酸ガス濃度5%とした。塩分浸透は、3%NaCl水溶液(20℃)浸せき3日+20℃乾燥4日の乾湿繰り返しを1サイクルとした。図－1に、劣化促進記号C, CL, CCLの違いを示す。CCLは、中性化促進と塩分浸透が同時に作用する状態を想定している。

2.2 試験体

表－1に試験体の区分を示す。試験体の寸法は、10×10×40cmとした。図－2に示すように、かぶり厚さ30mmの位置に、直径10mmの磨き丸鋼を設置した。コンクリート打ち込み後、材齢3日で脱型し、端部に露出している丸鋼に自然電位測定用のコードを取り付けてシリコン系のシーリング材で保護した。その後、4週間の水中養生を施した後、各試験体の長手2側面の試験面以外の4面にエポキシ樹脂塗料を塗布した。劣化促進の開始は、試験体の作製から約2.5ヶ月後である。

2.3 使用材料および調査

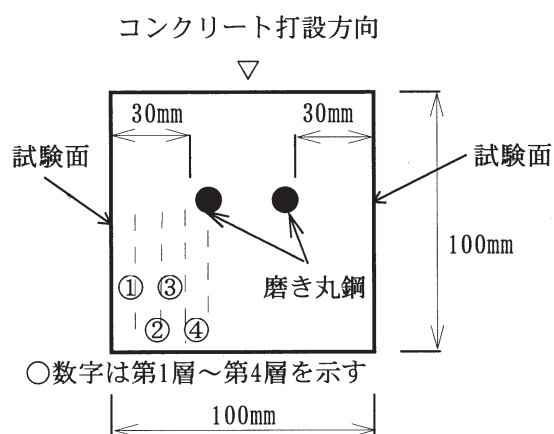
表－2に使用材料を、表－3にコンクリートの調査を示す。セメントは普通ポルトランドセメントを使用した。混和剤として、W/C70%および55%ではAE減水剤を、W/C40%では高性能AE減水剤を使用した。単位水量は、W/C70%および55%では189kg/m³、W/C40%では180kg/m³とし、目標スランプは18cm、目標空気量は4.5%とした。

2.4 試験項目および試験方法

表－4に試験項目および試験方法を示す。主な試験項目は、中性化深さ、鉄筋の自然電位、塩化物イオンの浸透量、細孔径分布、鉄筋の腐食である。試験材齢は、劣化促進開始後8週、34週、56週、110週間とした。所定の劣化促進期間で、各試験体から幅5cmの試料を乾式切断器でスライスし、中性化深さを測定した後に塩化物イオン量の分析および細孔径分布の測定用試料を採取した。スライス後の試験体は、端部にエポキシ樹脂塗料を塗布し、乾燥後、それぞれ所定の劣化促進方法に戻した。な

表－1 試験体の区分

試験体記号	W/C(%)	試験体数
7C	70	3
7CCL	70	3
7C10CL	70	2
7C20CL	70	1
7CL	70	2
7Cin	70	1
5C	55	3
5CCL	55	3
5C10CL	55	2
5CL	55	2
5Cin	55	1
4C	40	3
4CCL	40	3
4CL	40	2
4Cin	40	1



図－2 試験体断面

表－2 使用材料

材料	種 類 ・ 品 質
セメント	普通ポルトランドセメント 密度3.15g/cm ³
水	上水道水
細骨材	山砂，砕砂の混合（混合比80:20） 表乾密度2.57g/cm ³
粗骨材	砕石 表乾密度2.69g/cm ³
混和剤	ポリカルボン酸系高性能AE減水剤 SP-8S AE減水剤 No.70

表－3 コンクリートの調査

記号	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)				
			セメント	水	細骨材	粗骨材	混和剤
7ー	70.0	48.0	270	189	840	952	2.7
5ー	55.0	46.1	344	189	780	952	2.8
4ー	40.0	42.2	450	180	686	983	4.5

表－４ 試験項目および試験方法

試験項目	試験方法
中性化深さ	切断した試料の内面にフェノールフタレイン 1%アルコール溶液を噴霧し、変色しない深さを測定
鉄筋の自然電位	電位差計（エレクトロメータ HE-104）および飽和カロメル電極により両側面の電位を測定
塩化物イオン量	「JCI-SC4 硬化コンクリート中に含まれる塩分の分析方法」および「JCI-SC5 同 全塩分の簡易分析方法」により、塩素イオン選択性電極を用いた電位差滴定法によって全塩分および可溶性塩分を測定
細孔径分布	3－5mm角の試料約1.5gを水銀圧入式ポロシメータ（Pascal 140/440）により半径1.8nm～10μmの細孔を測定
鉄筋の腐食面積率	鉄筋全周の腐食部分を写し取り、写し取った用紙をスキャナで読みとり、腐食部分の面積比率を計算
鉄筋の腐食減量	「JCI-SC1 コンクリート中の鋼材の腐食評価方法」により腐食生成物を除去し、除去前後の重量変化を測定

お、試験体7C10CL, 7C20CL, 5C10CLは中性化深さの進行によって劣化促進方法を以下のようにした。

7C10CLは中性化促進でスタートし、8週間経過時に中性化深さが10mmを超えたので、以後は塩水の乾湿繰り返し（劣化促進記号CL）とする。

7C20CLは中性化促進でスタートし、34週間経過時に中性化深さが20mmを超えたので、以後は塩水の乾湿繰り返し（劣化促進記号CL）とする。

5C10CLは中性化促進でスタートし、56週間経過時に中性化深さが10mmを超えたので、以後は塩水の乾湿繰り返し（劣化促進記号CL）とする。

また、劣化促進期間110週間経過時に、一部の試験体から鉄筋を取り出し、その腐食面積率および腐食減量を測定した。

中性化深さは、片面5点ずつ、計10点測定した。

鉄筋の自然電位は、塩水浸せきから気中乾燥(20℃)に移す時に鋼材 2 本について、それぞれ2.5cm間隔で測定した。塩水に浸けていない試験体については、8週，34週，56週，110週間経過時に、イオン交換水に約 3 時間浸せき後測定した。なお、電極には飽和カロメル電極を用いた。

塩化物イオンの浸透量は、全塩分および可溶性塩分を測定した。

細孔径分布は、水銀圧入法によって測定した。塩化物イオン量の分析および細孔径分布の測定用試料は、試験体から所定の劣化促進期間で採取された幅5cmの試料か

ら、試験面（両側面）から深さ方向に 4 層の試料を乾式でスライスして採取した（図－ 2 参照）。1 層の厚さは、きりしろを含めて約9mmである。鉄筋のかぶり厚さが 30mmなので、かぶり部分から 3 層分を採取し、鉄筋位置から 4 層目を採取したことになる。

3. 実験結果および考察

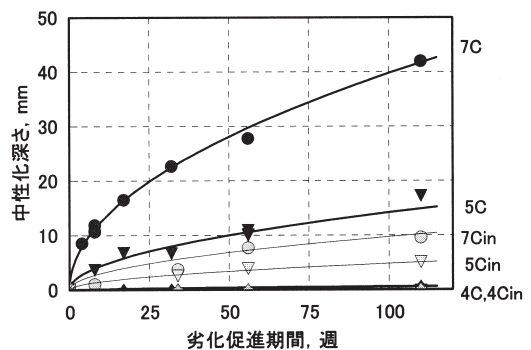
3.1 フレッシュ試験結果および強度試験結果

表－5 に、フレッシュ試験結果および強度試験結果を示す。この強度試験結果を、（財）日本建築総合試験所が平成10年度に行ったコンクリート供試体の受託試験結果を集計した資料⁵⁾と比較すると、W/C70%は呼び強度 18に、W/C55%は呼び強度27に、W/C40%は呼び強度33～36に相当する。

表－３ コンクリートの調査

記号	W/C (%)	フレッシュ試験結果			強度試験結果*1	
		スランプ (cm)	空気量 (%)	コンクリート温度 (℃)	圧縮強度 (N/mm ²)	
					4 週	13 週
7ー	70.0	16.0	4.1	21.0	26.1	30.9
5ー	55.0	16.5	4.8	21.0	35.7	40.2
4ー	40.0	17.3	4.9	20.5	44.8	52.7

* 1 10×20cm、3本のテストピースの平均(標準水中養生)



図－３ 中性化深さ（CおよびCin）

3.2 中性化深さ

(1) 中性化深さおよび中性化速度係数

それぞれの試験体の中性化深さの実測値（図－ 3）から、中性化深さと劣化促進期間との関係を、式(1)にあてはめて中性化速度係数を求めた結果を表－ 6 に示す。

$$C = A(t)^{0.5} \quad (1)$$

ここに、C：中性化深さ（mm）

t：劣化促進期間（週）

A：中性化速度係数（mm/(週)^{0.5}）

7Cin,5Cin,4Cinの中性化深さを岸谷式による材齢2年での計算結果（表－6中に併記した）と比較すると、本実験の結果は、4Cinではほぼ等しく、5Cinではやや大きく、7Cinでは約50%大きいことがわかる。これは、試験体作製の際、型枠脱型後に、露出している端部鉄筋にシーリングを施してから水中養生をしているが、その間の約1週間の初期乾燥が、コンクリートの水和の進行に影響を与え、中性化の進行が速くなったと考えられる。水セメント比の大きなW/C70%の試験体では、その影響が大きいようである。

図－4に、試料区分ごとの中性化深さを示す。この図では、劣化促進区分CCL、CLなどの塩水浸せきしたものについてはその湿潤期間（塩水浸せき期間）を除いてプロットしている。これらの図から、劣化促進方法がCLである期間は、乾燥・湿潤それぞれの期間を考慮しても、中性化の進行はほぼ停止している状態であることが分かる。これは、既往の研究において、竹田ら⁶⁾は海洋環境

表－6 中性化促進試験結果（CおよびCin）

試験体区分	中性化速度係数 mm/(週) ^{0.5}	中性化深さ 110w, mm	岸谷式*1 mm
7C	3.977	42.0	—
7Cin	0.972	9.6	6.4
5C	1.418	17.2	—
5Cin	0.484	5.1	4.6
4C	0.057	0.6	—
4Cin	0.010	0.1	0.4

* 1 岸谷式、材齢2年における計算結果

下でのコンクリートの暴露試験の結果、暴露後10年において、飛沫帯および海中では全く中性化していないことを示し、また、大賀ら⁷⁾は乾湿繰り返しによる促進中性化環境下においては、初期の劣化促進条件によらず乾湿繰り返し開始後は中性化の進行が抑えられていることを示した現象と同様である。一方CCLについては、W/C70%,50%ともにCLとは異なりCの状態での中性化が進行している。このことは、乾湿繰り返し条件下であっても、乾湿の程度、環境条件、表層コンクリートの品質などによっては中性化が進行することを示しているといえる。

(2)中性化残りと鉄筋腐食の予測

コンクリートが鉄筋付近まで中性化すると、鋼材表面の不動態皮膜が破壊され腐食し始める。中性化による鉄筋の腐食（腐食面積率5%）は中性化が鉄筋に達する前に生じ、「中性化残り」の値（「かぶり厚さ」－「中性化深さ」）は、岸谷・小林ら⁸⁾は、塩化物イオンを含むコンクリートでは約20mm、含まないコンクリートでは約8mmとしている。これを今回の実験にあてはめると、劣化促進区分CおよびC20CLは塩化物イオンを含まないので中性化残り8mmの時点で、また、劣化促進区分CCLおよびCLは塩化物イオンを含むので中性化残り20mmの時点で鉄筋の腐食が始まると推測できる。即ち、W/C70%では、7Cおよび7C20CLは劣化促進期間34週で、7CCLは約56週で、7C10CLは8週すぎで腐食が始まると推測される。W/C55%では、5C10CLが劣化促進期間56週すぎに腐食開始していると考えられる。以上から、中性化残りを基準に考えると、7C10CL, 7C20CL, 5C10CLは、劣化促進方法をCLに移す時点で鉄筋の腐食が始まる可能性があることが分かる。そして、110週時点では、7Cin, 7CL,5CCL,5Cin,5CLは中性化による鉄筋の腐食が生じないと考えられる。

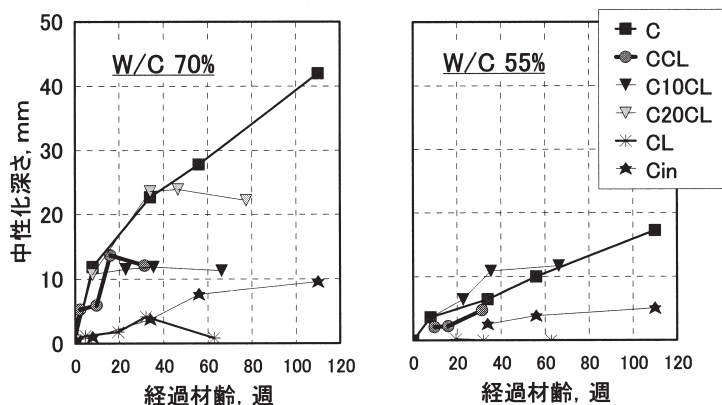
3.3 塩化物イオンの浸透量

(1)CLとCCLの塩分浸透量

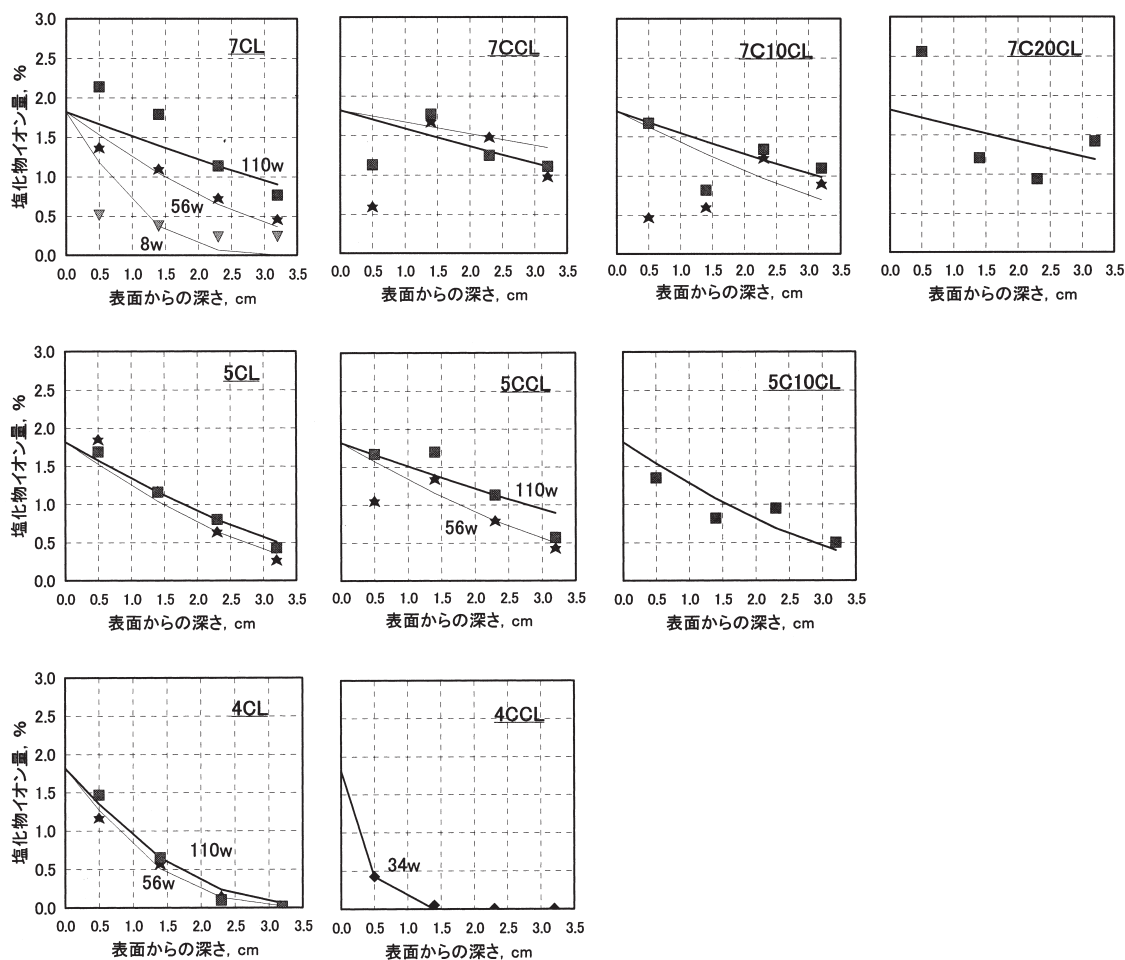
図－5に、各試験体の塩分浸透量を示す。CLでは、いずれの劣化促進期間においても、第1層の塩分量が最も高い。一方、CCLでは、第1層よりも第2層のほうが高い塩分量を示すケースが多かった。また、W/C70%および55%における第3層および第4層での塩分量は、CCLはCLよりも同等以上の値を示した。CCLにおける塩分浸せき期間は、実質的にはCLの1/2であることを考慮すると、本実験におけるCCLではCLの2倍以上の塩分浸透作用が生じていると考えることができる。

(2)C10CLとC20CLの塩分浸透量

7C10CL,7C20CL,5C10CLのいずれも、内部の塩分量は



図－4 試料区分ごとの中性化深さ
（湿潤期間を差し引いて表記）



図－5 塩分浸透量および近似曲線

CCLとほぼ同じ程度の値であるが、表層部での塩分量はCCLよりも高くなる傾向を示した。予め中性化させたC10CL,C20CLと、中性化との同時進行であるCCLとの差がこの部分にあると考えられる。

(3)見かけの拡散係数

コンクリート中への塩化物イオンの移動は、マクロ的には拡散現象で表すことが可能であることが知られている。Fickの拡散方程式において、境界条件をコンクリート表面の塩化物イオン量(C_0)とし、この値を一定としたときの拡散方程式の解は式(2)で表すことができる。式(2)における拡散係数(D_c)は、コンクリート中における塩化物イオンの濃縮や固定化などの現象も全て拡散現象に含めて取り扱うことになるため、以下「見かけの拡散係数」と呼ぶ。 C_0 は、3%NaCl水溶液なので、 $3.0 \times 35.4/58.4=1.822(\%)$ とした。また、C10CL,C20CLにおける初期の中性化促進期間は、 t に算入せずに計算した。

$$C = C_0 \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2(D_c \cdot t)^{0.5}} \right) \right\} \quad (2)$$

ここに、

C ：表面からの深さ $x(\text{cm})$ における塩化物イオン量(%)

C_0 ：表面の塩化物イオン量

($x=0$ における塩化物イオン量(%))

x ：表面からの深さ(cm)

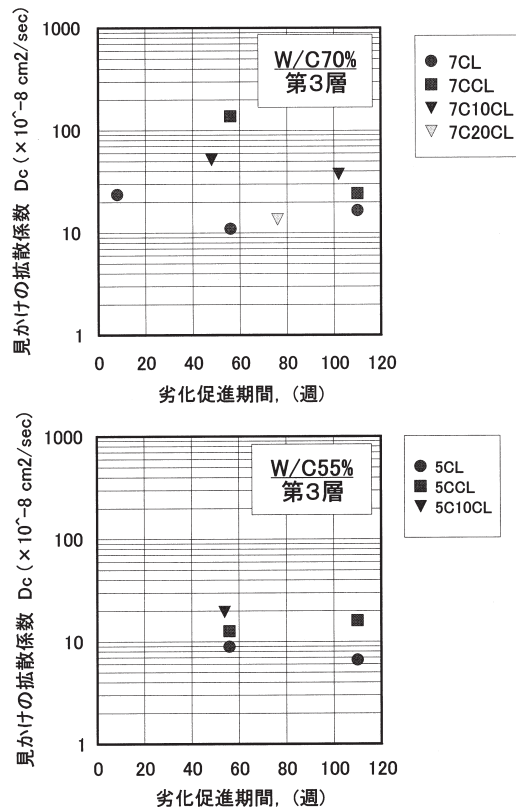
t ：経過時間(s)

D_c ：塩化物イオンの見かけの拡散係数(cm^2/s)

$$\operatorname{erf}(z) = \frac{2}{\pi^{0.5}} \cdot \int_0^z e^{-t^2} \cdot dt$$

図－5に、実測で得られた塩分量および式(2)より求めた見かけの拡散係数による近似曲線を示す。試験体CLおよび、各試験体内部の第3層、第4層などでは比較的近似曲線に合致しているが、表面付近では合致しないものも多い。乾湿繰り返しに伴う表層部での濃縮や溶出などの影響が大きいと考えられる。

図－6には、図－5において比較的近似曲線に合致していた第3層の見かけの拡散係数の経時変化を示す。劣化促進期間110週における見かけの拡散係数は、W/C70



図－6 見かけの拡散係数の経時変化

%, 55%ともにCLよりもCCLおよびC10CLの方がコンクリート中への塩化物イオンの浸透速度は速いと考えられる。

3.4 鉄筋の自然電位

(1)自然電位による腐食評価

自然電位測定法によって測定された電位値から鉄筋の腐食状態を診断するには、ASTM C-876⁽¹⁾と、その基となったOTH 84205⁽²⁾の評価基準が内外で広く適用されている。今回の実験では飽和硫酸銅電極ではなく飽和カロメル電極を用いているので、ASTMの数値に基づいて腐食評価基準を表すと、表－7中の[]のようになる。

(2)各試験体の自然電位

図－7、図－8に、劣化促進区分C, CL, CCL, C10CLの自然電位の測定結果を示す。図中には図－7の腐食評価基準の値を太点線で示している。

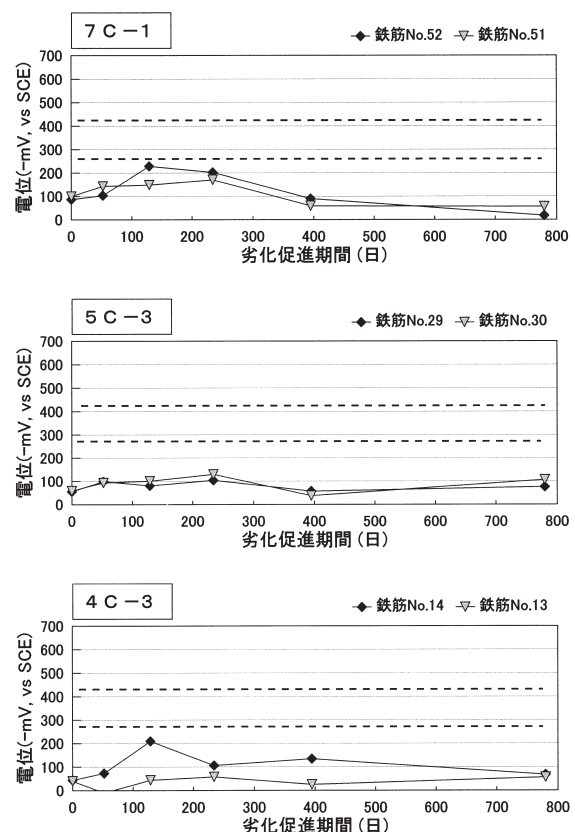
7C, 5C, 4Cでは、劣化促進期間110週までの全期間でいずれも電位は -274mV より貴であり腐食の確率は小さいと判断できるが、後述するように劣化促進期間110週において7Cでは腐食度Ⅲ、5Cでは腐食度Ⅱの腐食を生じている(図－8)。このことは、常時乾燥した状態での鉄筋腐食を電位で判断できない場合もあることを示している。

表－7 自然電位による腐食評価基準

ASTM C-876	
電位 (mV, CSE*)	腐食の確率
-200mV より貴 [-274mV より貴]**	90%以上腐食なし
$-200 \sim -350\text{mV}$ [$-274 \sim -424\text{mV}$]	不確定
-350mV より卑 [-424mV より卑]	90%以上腐食あり

*CSE；飽和硫酸銅電極、飽和カロメル電極(SCE)
との差は -74mV

**；[]内は本実験での評価基準(飽和カロメル電極)



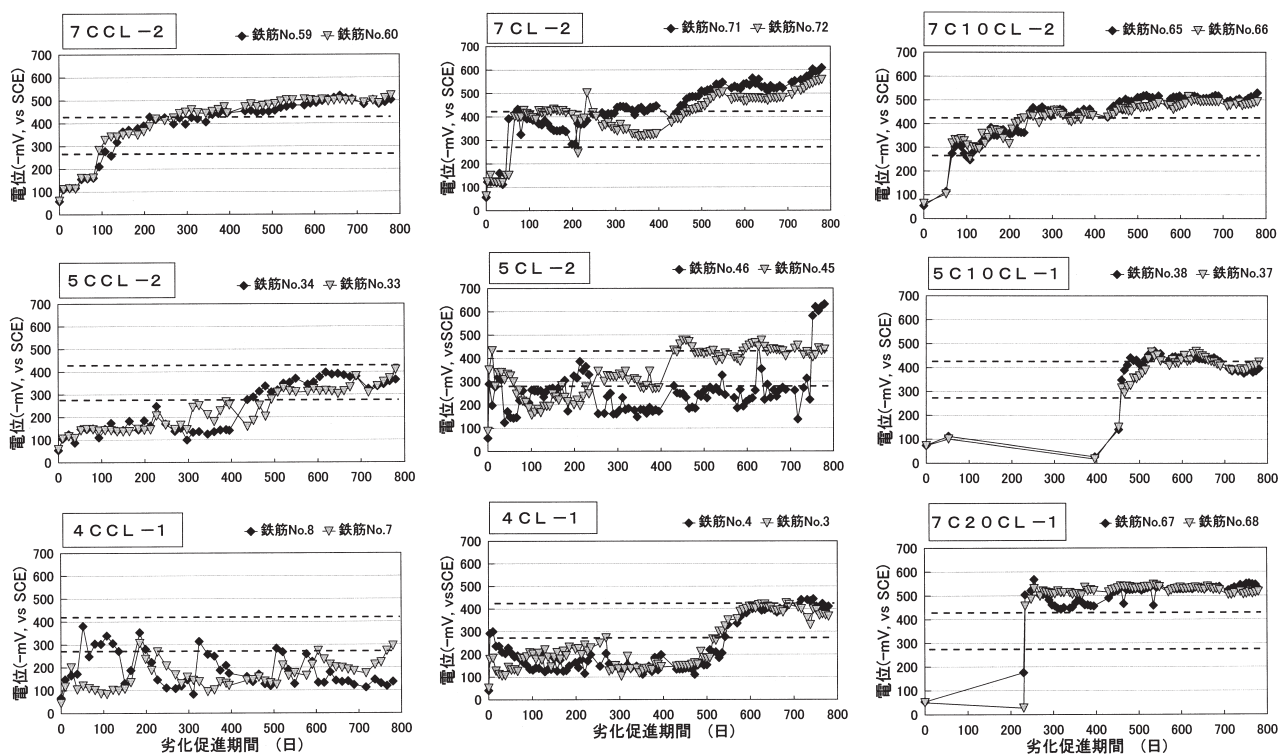
図－7 鉄筋の自然電位の測定結果

一方、7C10CL, 7C20CL, 5C10CLでは、それぞれ、劣化促進方法をCLに移した直後の測定で電位値が腐食領域に変化していることから、この頃に鉄筋の腐食が始まっていた可能性があることが分かる。これは、中性化残りから鉄筋の腐食開始時期を推測した結果とほぼ一致する。CLおよびCCLについては、7CLは60日頃、7CCLは100日頃、5CLは100～300日頃、5CCLは450日頃、4CLは550日頃が鉄筋の腐食開始時期と考えられる。

3.5 鉄筋の腐食

(1)鉄筋の腐食度、腐食面積率および腐食減量

劣化促進期間110週経過後における鉄筋の腐食度、腐



図－8 鉄筋の自然電位の測定結果

食面積率、腐食減量の（目視による）測定結果を表－8に示す。腐食度はⅢに属するものが多く、腐食度Ⅲの鉄筋7C, 7CCL, 5CCL, 7C10CL, 5C10CL, 7CLでは、7C以外は全て孔食が生じており、中でも、7CCL, 7C10CL, 7CLではやや深い孔食（表－8では溝状と表記した）が見られた。5Cおよび5CLが腐食度Ⅱであり、4C, 4CCL, 4CLが腐食度Ⅰであった。表には載せていないが、7Cin, 5Cin, 4Cinは全く腐食していない。なお、表中の腐食面積率および腐食減量は、原則として鉄筋2本の平均値で示した。目視による腐食度については、（旧）建設省総合技術開発プロジェクト「建築物の耐久性向上技術の開発」（昭和55年～59年度）において示されている4段階評価の腐食度評点（表－9）にならった。

腐食面積率では、7CLと7CCL, 5CLと5CCLを比べると、どちらもCLよりもCCLのほうが腐食面積率は大きい。前述したように、自然電位の測定値から推定される鉄筋の腐食開始時期は、CLよりもCCLのほうが遅いと考えられる。にもかかわらず腐食面積率ではCCLのほうがCL以上に大きいということは、劣化の「潜伏期」はCLよりもCCLの方がやや長く、「進展期」および「加速期」における鉄筋腐食の進行速度はCLよりもCCLの

表－8 鉄筋の腐食（劣化促進期間110週）

項目 試料	腐食度 (Ⅰ～Ⅳ)	腐食面積率 (%)	腐食減量 (%)	孔食の有無 および程度
7C	Ⅲ	44	0.99	孔食なし
5C	Ⅱ	15	0.49	孔食なし
4C	Ⅰ	0	0	孔食なし
7CL	Ⅲ	78	1.96	溝状
5CL	Ⅱ	29	0.90	点状
4CL	Ⅰ	1.5*	0*	孔食なし
7CCL	Ⅲ	94	1.85	溝状
5CCL	Ⅲ	55	0.91	点状
4CCL	Ⅰ	1*	0*	孔食なし
7C10CL	Ⅲ	90	1.85	溝状
5C10CL	Ⅲ	63	1.30	点状

* 腐食は鉄筋端部下面の一部のみに生じており、リード線取り付け部のシールが不完全であったために生じたことが明らかであったので腐食減量は0とした。

方が速いことを意味し、中性化の進行によって塩害による鉄筋の腐食が加速されていることを示している。既往の研究では北後ら¹⁰⁾が、内在塩化物と中性化の複合について、水セメント比の影響や微細構造の変化を検討した結果から、塩害による鉄筋の腐食は中性化の進行によって加速されることを示しているが、外部からの塩化物の

表－9 4段階評価の腐食度に対する腐食減量⁹⁾

腐食度評価	腐食減量 (%)	評 価 基 準
I	0～1	黒皮の状態、または錆が生じているが全体的に薄い緻密な錆であり、コンクリート面に錆が付着していることはない。
II	1～3	部分的に浮き錆があるが、小面積の斑点状である。
III	1～8	断面欠損は目視観察では認められないが、鉄筋の全周または全長にわたって浮き錆が生じている。
IV	6～16	断面欠損を生じている。

侵入によっても中性化との複合作用により加速されるようである。

腐食減量は、溝状の孔食が生じた7CCL, 7C10CL, 7CLがやや大きな値となった。

図－9に、セメント水比と腐食面積率および腐食減量の関係を示す。CLとCCLを比較すると、腐食減量はセメント水比ごとにほぼ一致しているが、腐食面積率はW/C70%および55%においてCLの方がCCLよりもやや小さな値であった。

(2)鉄筋腐食と中性化深さおよび塩分量との関係

図－10に、劣化促進期間110週における中性化深さと鉄筋の腐食量との関係を示す。7C, 5C, 4Cについては、中性化による鉄筋腐食であるため、中性化深さと腐食面積率、腐食減量ともに良好な直線関係を示した。CL, CCL, C10CLなど塩水に浸けているものについては、ほとんど相関性は認められなかった。図－11には、鉄筋の前面位置である第3層および鉄筋位置である第4層における塩化物イオン量と鉄筋の腐食量との関係を示す。同図中には塩分がほとんど含まれていない7C, 5C, 4Cの値も示してある（相関性の検討からは除外した）。塩化物イオン量と腐食面積率および腐食減量は正の相関が認められた。相関係数を有意水準5%で検定した結果、腐食面積率(Acorr;%)および腐食減量(Wcorr;%)ともに、第3層の塩分量(CL₃;%)および第4層の塩分量(CL₄;%)との間に良好な相関性が確認できた。得られた一次回帰式を下記に示す。

第3層の塩分量より；

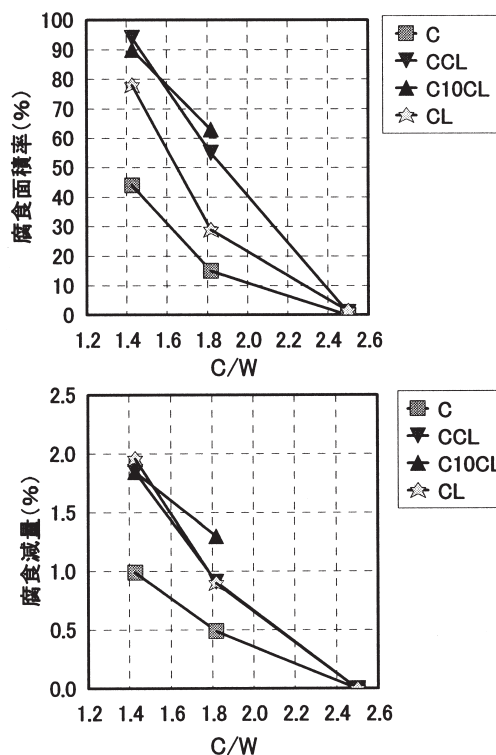
$$Acorr(\%) = 74.8 \times (CL_3) - 13.0 (\text{相関係数 } r=0.932)$$

$$Wcorr(\%) = 1.52 \times (CL_3) - 0.20 (\text{相関係数 } r=0.897)$$

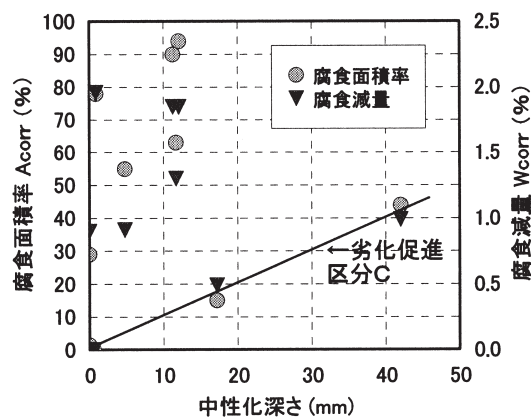
第4層の塩分量より；

$$Acorr(\%) = 83.0 \times (CL_4) + 5.31 (\text{相関係数 } r=0.957)$$

$$Wcorr(\%) = 1.68 \times (CL_4) + 0.17 (\text{相関係数 } r=0.917)$$



図－9 セメント水比と鉄筋腐食量



図－10 中性化深さと鉄筋の腐食量(110週)

このことより、外部からの塩分浸透による鉄筋腐食では、鉄筋位置の塩分量が求められなくても、鉄筋の前面での塩分量を求めることで鉄筋の腐食量が把握できると考えられる。

3.6 細孔径分布

(1)初期値

細孔径分布の初期値については、採取試料による値のばらつきをできるだけ小さくするために、試料断面の上左右(LU:左上、LD:左下、RU:右上、RD:右下)のそれ

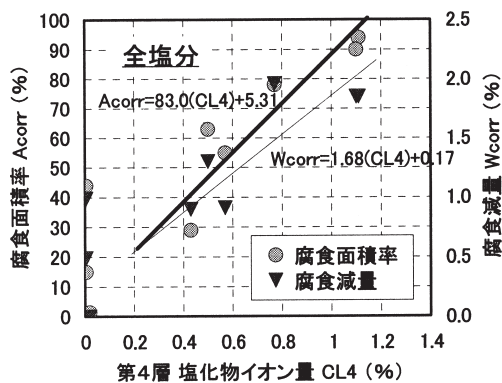
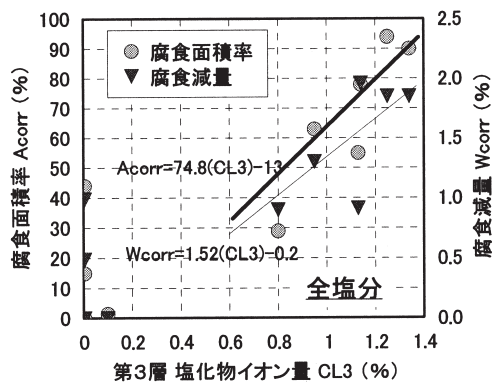


図-11 塩化物イオン量と鉄筋の腐食量(110週)

それぞれ、試験面の第1層から内部へ2～3層分を測定して平均した。図-12は、第1層から第3層におけるそれぞれの細孔径分布の初期値を水セメント比ごとに、また、各細孔径の範囲ごとに示したものである。図より、各水セメント比とも、第1層から第3層の各層における初期の細孔径分布にはほとんど差が無いこと、また、水セメント比の違いは、主としてtotal pore(半径10 μ m以下)および半径25～1000nmの細孔量に表れていることがわかる。

(2)各劣化促進区分ごとの細孔量の変化

図-13に、各劣化促進区分ごとの細孔量の変化を示す。横軸をセメント水比とし、縦軸を初期値の細孔量(半径10 μ m以下)に対する110週での細孔量(同)の比率とし、第1層の値で示した。C/W=2.5において、CおよびCinの比率が高く、細孔の増加を示しているが、それぞれの劣化促進区分ごとの違いは明瞭にはなっていない。

(3)細孔量と中性化速度係数

図-14に、細孔量と中性化速度係数の関係を示す。中性化速度係数は全期間の実測値から求めた平均である。細孔量は、第1層における初期値および劣化促進期間110週での値を用いた。図から、25～1000nmの細孔量あ

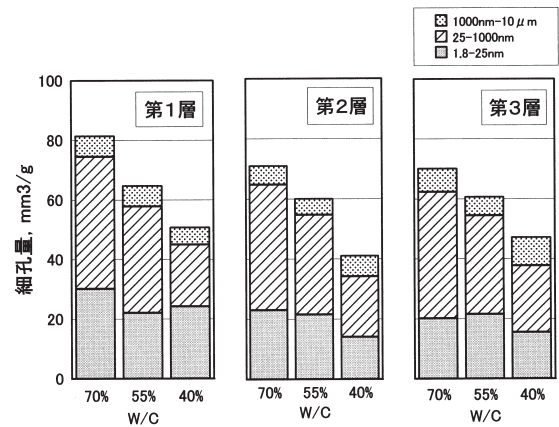


図-12 各水セメント比ごとの細孔分布(初期値)における各細孔範囲ごとの細孔量

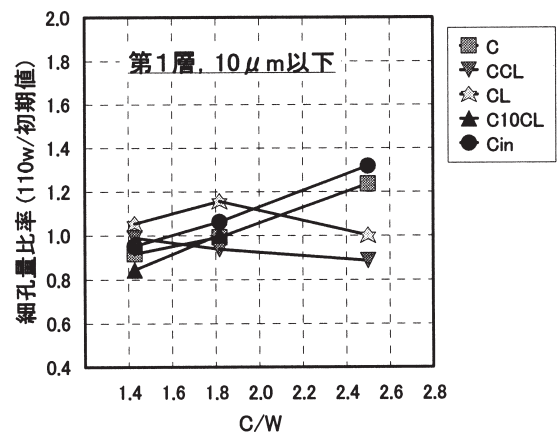


図-13 各劣化促進区分ごとの細孔量の変化

るいはtotal pore(10 μ m以下の細孔量)と中性化速度係数との間には線形の関係が見られ、表層部のコンクリートの細孔量を測定することでそのコンクリートの中性化速度を推測できる可能性があると考えられる。

(4)細孔量と塩分浸透

図-15に、CLにおける細孔量と見かけの拡散係数の関係を示す。細孔量は、110週の第1層での値を見かけの拡散係数は図-5での値を用いた。図から、total pore(10 μ m以下の細孔量)と見かけの拡散係数との間には線形の関係が見られる。すなわち、表層部のコンクリートの細孔量を測定することで、中性化速度係数の場合と同様に、そのコンクリートの見かけの拡散係数を推測できる可能性があると考えられる。

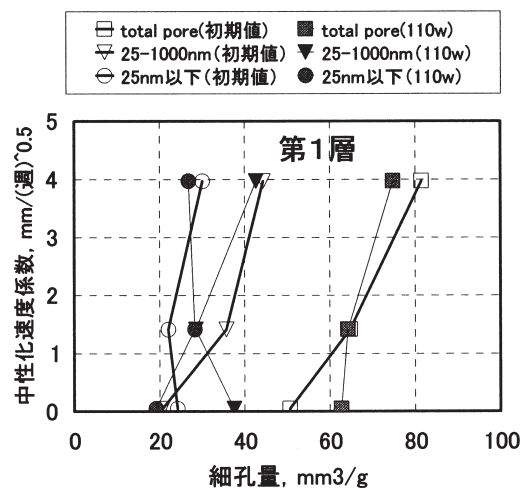


図-14 細孔量と中性化速度係数

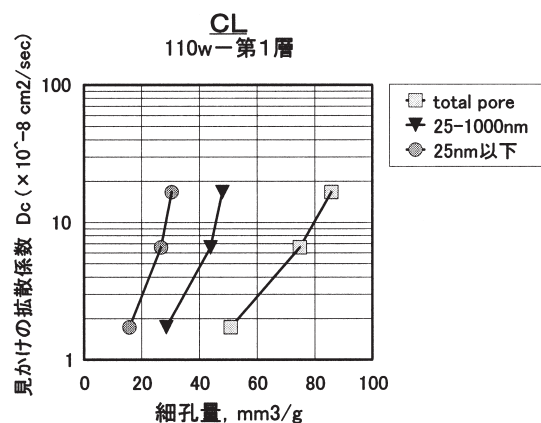


図-15 細孔量と見かけの拡散係数(CL)

4. まとめ

本研究で得られた知見は以下に示すとおりである。

- (1) 中性化および塩分浸透（乾湿繰り返し）が同時に作用することにより、塩分の浸透速度および鉄筋腐食の進行速度は塩分浸透が単独で作用するよりも加速される。
- (2) 外部からの塩分浸透による鉄筋腐食の調査では、鉄筋位置の塩分量が求められなくても、鉄筋の前面での塩分量を求めることで鉄筋の腐食量が把握できる。
- (3) 表層部のコンクリートの細孔量を測定することで中性化速度および見かけの拡散係数が推測できる可能性がある。

今後は、複合劣化作用の影響を定量化できるよう、研究を重ねていきたいと考えている。

[参考文献]

- 1) 複合劣化コンクリート構造物の評価と維持管理計画 研究委員会報告、コンクリート工学年次論文集、Vol.22, No.1, pp.11-14、2000.6
- 2) 石橋忠良・北後征雄：鉄筋コンクリート床版下面に施工した各種補修工法の効果、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.9, No.1, pp.429-434、1987
- 3) 眞嶋光保・宮川豊章・小林茂広・角田 忍：繊維補強コンクリートの海洋暴露試験結果、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.19, No.1, pp.1003-1008、1997.6
- 4) 上田隆雄・岡 竜・石橋孝一・横田 優：塩害と中性化による複合劣化フライアッシュコンクリート中の鉄筋腐食挙動、材料、Vol.49, No.10, pp.1115-1120、2000.10
- 5) 平成10年度工事用材料試験データシート、GBRC、日本建築総合試験所、No.96, pp.58-67、1999.10
- 6) 竹田宣典・十河茂幸・迫田恵三・出光 隆：種々の海洋条件におけるコンクリートの塩分浸透と鉄筋腐食に関する実験的研究、土木学会論文集、No.599/V-40, pp.91-104、1998.8
- 7) 大賀宏行・佐伯竜彦・長滝重義：乾湿繰り返しを受けるコンクリートの中性化に関する研究、セメント・コンクリート論文集、No.43, pp.418-423、1989
- 8) 岸谷孝一・小林一輔・樫野紀元・宇野祐一：塩化物を含むコンクリート中における鉄筋腐食と中性化の関係、コンクリート工学論文集、Vol.2, No.1, pp.77-84、1991.1
- 9) 建築物耐久性向上技術普及委員会編：鉄筋コンクリート造建築物の耐久性向上技術、技報堂出版、1986.6
- 10) 北後征雄・小林茂広・菊池保孝・宮川豊章・藤井 学：コンクリート構造物の鉄筋腐食に関する複合要因の影響、材料、Vol.45, No.9, pp.1048-1054、1996.9
- 11) ASTM C-876：Standard Test Method for Half Cell Potentials of Reinforcing Steel in Concrete, 1980
- 12) Figg, J.W. and Marsden, A.F.：Development of Inspection Techniques for Reinforced Concrete, Offshore Technology Report OTH 84205, 1985