

IX 耐久性能照査に関する検討

1. はじめに

耐久性能照査では、①鉄筋腐食の発生を限界状態とする場合には、鉄筋位置における塩化物イオン濃度の経時変化が、②鉄筋腐食によるひび割れの発生を限界状態とする場合には、鉄筋腐食の進行とそれに伴うコンクリートの引張応力の経時変化あるいは鉄筋腐食量の経時変化が、主要な評価項目となる。このため、本技術資料では、鉄筋腐食とそれに伴うコンクリートの引張応力の経時変化あるいは腐食量の経時変化の評価方法、およびフライアッシュコンクリートの塩化物イオンの拡散係数について、既往の研究例を調査し、とりまとめた。これらの評価方法は、一般的に認められたものとして学会指針などに取り入れられてはいないが、今後の検討により実用化が図られるものと考えている。また、将来的に、経年劣化を含めた鉄筋コンクリート構造の性能評価を行うため、鉄筋腐食と鉄筋コンクリート部材性能の関係を把握するために実施した検討例についてもとりまとめた。

2. 鉄筋腐食による経年劣化予測法

2.1 概要

塩害の進展期(腐食発生からひび割れ発生までの期間)を評価するためには、鉄筋の腐食速度およびひび割れ発生腐食量を評価することが必要である。既往の腐食速度評価方法には、森永の方法、梶田らの方法、松村らの方法、関らの方法、鳥取の方法がある。これらの評価法の概要を整理し、各評価法を用いた腐食速度の試算を行い、それぞれの特徴を抽出した。一方、ひび割れ発生腐食量評価方法には、森永の方法、横関らの方法、土木学会の簡易式、西内らの方法などがある。これらの評価法の概要を整理した。

2.2 腐食速度評価方法

(1) 森永の方法¹⁾²⁾

森永らは、2種類の実験を行い、これらの結果を基に、腐食速度評価方法を提案している。なお、この腐食速度評価方法は、後述の森永らの提案するひび割れ発生時の腐食量評価方法と併せて提案されており、精度の検証も両者を併せて検討されている²⁾。このため、森永らの腐食速度評価方法を用いる場合には、ひび割れ発生時の腐食量評価方法も森永らの方法を用いることが適切であると考えられる。

a. 実験の概要

①材料要因の影響評価実験

予め塩分を混入した試験体の4~10年間の屋外(江東区越中島)暴露試験を行い、経過年数と腐食量の関係から、主として材料的な要因と腐食速度との関係性を評価した。使用した鉄筋は丸鋼(黒皮なし)である。ただし、かぶりに応じて暴露期間を変えており、また、経時的な腐食量の変化は測定していない。

②環境要因の影響評価実験

塩分を含むセメントペースト(W/C=0.5)で鉄筋をコーティング(約1mm厚)した試験体を約8年間、温度、湿度、酸素濃度などの異なる環境に暴露し、経時的に腐食減量を測定することにより、主として環境的な要因と腐食速度との関係性を評価した。使用した鉄筋はφ9mm丸鋼(黒皮なし)である。

b. 実験要因

①材料要因の影響評価実験

実験要因は、表 2.2-1 に示すように、コンクリートの種類(普通, 軽量), 水セメント比(40~70%), 塩分濃度(練混ぜ水に対する NaCl の濃度で 0~3.0%), 鉄筋の方向(水平, 鉛直), 鉄筋径(9, 25mm), かぶり(4~37mm)である。

表 2.2-1 森永による材料要因の影響評価実験における要因と水準

要因	水準
コンクリートの種類	普通, 軽量
水セメント比(%)	40, 55, 70
塩分濃度(練混ぜ水に対する NaCl の濃度%)	0, 0.1, 0.5, 1.0, 1.5, 3.0 (0.112, 0.558, 1.117, 1.675, 3.350) ※
鉄筋の打ち込み方向	水平筋, 鉛直筋
鉄筋径(mm)	9, 25
かぶり(mm)	9mm筋: 4, 6, 9, 12, 16, 22, 29, 37 25mm筋: 5, 8, 13, 20, 27, 37

※ () 内は、コンクリートに対する Cl⁻ の濃度 (kg/m³)

②環境要因の影響評価実験

実験要因は、表 2.2-2 に示すように、温度(20, 40℃), 湿度(R.H. 0~100%), 酸素濃度(0~20%) である。

表 2.2-2 森永による環境要因の影響評価実験における要因と水準

要因	水準
温度(℃)	20, 40
湿度(R.H. %)	0, 51, 62, 100
酸素濃度(%)	0, 0.46 (40℃水中), 0.62 (20℃水中), 10, 20
ペースト中の塩分濃度(練り混ぜ水に対する NaCl の濃度%)	0, 0.1, 0.5, 1.0, 1.5, 3.0

c. 評価式

材料要因の影響評価実験の結果、腐食速度は鉄筋径に比例し、かぶりの2乗に反比例した。また、腐食速度は塩分濃度の増大と線形関係にあり、水セメント比の2乗と線形関係にあった。これらの結果から暴露環境における腐食速度 q_{11} の評価式を提案している。なお、腐食によりひび割れが生じた試験体の腐食速度は著しく大きいため、評価式の算出には用いられていない。

$$q_{11} = \frac{d}{c^2} \left(-0.51 - 7.60 \cdot N + 44.97 \cdot (W/C)^2 + 67.95 \cdot N \cdot (W/C)^2 \right) \quad (2.2-1)$$

ここに、 q_{11} : 温度 15℃, 湿度 69%, 酸素濃度 20%における腐食速度 ($\times 10^{-4}$ g/cm²/year)

d : 鉄筋径 (mm)

c : かぶり (mm)

N : 練混ぜ水に対する NaCl としての塩分濃度 (%)

W/C : 水セメント比 (%/100)

また、環境要因の影響評価試験の結果、一定環境における腐食速度は、時間に依らず一定であり、塩分濃度、温度、湿度、酸素濃度の増大は何れも腐食速度を増大させた。これらの結果から次式を提案している。

$$q_{12} = 2.59 - 0.05 \cdot T - 6.89 \cdot H - 22.87 \cdot O - 0.99 \cdot N + 0.14 \cdot T \cdot H + 0.51 \cdot T \cdot O + 0.01 \cdot T \cdot N + 60.81 \cdot H \cdot O + 3.36 \cdot H \cdot N + 7.32 \cdot O \cdot N \quad (2.2-2)$$

ここに、 q_{12} : ペーストコーティング鉄筋の腐食速度 ($\times 10^{-4} \text{g/cm}^2/\text{year}$)

T : 温度 ($^{\circ}\text{C}$)

H : 湿度に関する項 [$H = (RH - 45) / 100$]

RH : 相対湿度 (%)

O : 酸素濃度 (%/100)

N : 練混ぜ水に対する NaCl としての塩分濃度 (%)

これらの式から、腐食速度評価式として次式を提案している。

$$q_1 = q_{11} \times \frac{q_{12}}{q'_{12}} \quad (2.2-3)$$

ここに、 q_1 : 腐食速度 ($\times 10^{-4} \text{g/cm}^2/\text{year}$)

q'_{12} : 温度 15°C 、湿度 69%、酸素濃度 20% におけるペーストコーティング鉄筋の腐食速度
($= 0.56528 + 1.4304N \times 10^{-4} \text{g/cm}^2/\text{year}$)

ここで、森永の実験で用いられたコンクリートの単位水量は 184kg/m^3 であるので、NaCl と Cl^- の分子量の比を 0.607 とすると、塩分濃度 N とコンクリート体積に対する塩化物イオン濃度 Cl (kg/m^3) の関係は次式で表せる。なお、森永の報告に従い、 q_{12} および q'_{12} の算定に用いる N はペーストの練混ぜ水に対する塩分量であるが、骨材への塩分の浸透は無視できるとして同様に扱った。

$$N = 0.8954Cl \quad (2.2-4)$$

ここに、 Cl : コンクリートに対する塩化物イオン濃度 (kg/m^3)

この式を式(2.2-3)に代入し、腐食速度の単位を $\text{mg/cm}^2/\text{year}$ に、かぶりの単位を cm に変換すると次式が得られる。

$$V_1 = V_{11} \times \frac{V_{12}}{V_{12}} \quad (2.2-5)$$

$$V_{11} = \frac{d}{1000 \cdot c^2} \left(-0.51 - 6.81 \cdot Cl + 44.97 \cdot (W/C)^2 + 60.84 \cdot Cl \cdot (W/C)^2 \right) \quad (2.2-6)$$

$$V_{12} = \frac{1}{10} (2.59 - 0.05 \cdot T - 6.89 \cdot H - 22.87 \cdot O - 0.89 \cdot Cl + 0.14 \cdot T \cdot H + 0.51 \cdot T \cdot O + 0.01 \cdot T \times Cl + 60.81 \cdot H \times O + 3.01 \cdot H \times Cl + 6.55 \cdot O \times Cl) \quad (2.2-7)$$

$$V_{12}' = \frac{1}{10} (0.56528 + 1.2808 \cdot Cl) \quad (2.2-8)$$

- ここに、 V_1 : 腐食速度 (mg/cm²/year)
 V_{11} : 温度 15°C, 湿度 69%, 酸素濃度 20%における腐食速度 (mg/cm²/year)
 V_{12} : ペーストコーティング鉄筋の腐食速度 (mg/cm²/year)
 V_{12}' : 温度 15°C, 湿度 69%, 酸素濃度 20%におけるペーストコーティング鉄筋の腐食速度 (mg/cm²/year)
 d : 鉄筋径 (mm)
 c : かぶり (cm)
 Cl : コンクリートに対する塩化物イオン濃度 (kg/m³)
 W/C : 水セメント比 (%/100)
 T : 温度 (°C)
 H : 湿度に関する項 [$H = (RH - 45) / 100$]
 RH : 相対湿度 (%)
 O : 酸素濃度 (%/100)

(2) 榊田らの方法³⁾

a. 実験の概要

予め塩分を混入した試験体の9年間の屋外(つくば市)暴露試験を行い、2, 4, 9年経過時の腐食量を測定し、経過年数と腐食量との関係から腐食速度を評価した。ただし、暴露試験に供する前に試験体の中性化促進試験を行い、コンクリート表面から約15mmの深さまで予め中性化させた試験体を用いている。使用した鉄筋はφ13丸鋼(SR24, 黒皮付き)である。

b. 実験要因

実験要因は、表2.2-3に示すように、塩化物量(細骨材に対するNaCl質量%, 0~1.0%), 水セメント比(50~65%), かぶり(15~40mm)である。

表 2.2-3 榊田らの実験における要因と水準

要因	水準
塩化物量 (細骨材に対する NaCl 質量%)	0, 0.1, 0.3, 0.5, 1.0 (0, 0.5, 1.5, 2.5, 5.0) ※
水セメント比 (%)	50, 55, 60, 65
かぶり (mm)	15, 20, 30, 40

※ () 内は、コンクリートに対する Cl^- の濃度の推定値 (kg/m^3)

c. 評価式

実験の結果、鉄筋の腐食速度は、塩化物量、水セメント比の増加にともなって概ね直線的に増大し、かぶりの平方根に概ね反比例した。実験結果を重回帰分析し、次式を求めている。なお、一部腐食によるひび割れが発生したのも認められたが、腐食速度への影響は小さいとしている。

$$q_2 = \frac{1}{\sqrt{c}} (2.89 \times NaCl + 0.023 \times W/C - 1.52) \quad (2.2-9)$$

ここに、 q_2 : 腐食速度 (%/year) (質量減少率)

$NaCl$: 塩化物量 (%) ($NaCl$ /細骨材換算)

W/C : 水セメント比 (%)

c : かぶり (mm)

上式の塩化物量をコンクリートに対する Cl^- 濃度に換算 (単位細骨材量 $820kg/m^3$ と仮定) し、鉄筋径の減少を無視して鉄筋の密度を $7.8g/cm^3$ とすると、かぶりの単位を cm, 腐食速度の単位を $mg/cm^2/year$ に変換して、次式が得られる。

$$V_2 = \frac{78}{\sqrt{10 \cdot c}} (0.578 \cdot Cl + 0.023 \cdot W/C - 1.52) \quad (2.2-10)$$

ここに、 V_2 : 腐食速度 ($mg/cm^2/year$)

Cl : 塩化物イオン濃度 (kg/m^3) (コンクリートに対する濃度)

W/C : 水セメント比 (%)

c : かぶり (cm)

(3) 松村らの方法⁴⁾

a. 実験の概要

予め塩分を混入した試験体を $40^\circ C$ の恒温恒湿槽に約 1 年間静置し、交流インピーダンス法による分極抵抗測定により腐食速度の経時的な変化を測定した。使用したコンクリートの水セメント比は 55%、鉄筋は $\phi 19$ 丸鋼である。

b. 実験要因

実験要因は表 2.2-4 に示すように、土木構造物を対象としているため、森永、榊田らの実験よりも範囲が

広く、塩化物イオン濃度(2~10kg/m³)、かぶり(2~10cm)、気中の相対湿度(60, 80%)である。

c. 評価式

実験の結果、ある範囲までは、腐食速度は、塩化物イオン濃度が增大すると指数関数的に増大し、また、鉄筋近傍のコンクリートの電気抵抗が増大(コンクリートが乾燥)すると指数関数的に減少した。これらの結果を基に、腐食速度は塩化物イオン濃度とコンクリートの電気抵抗(コンクリート抵抗)に依存し、コンクリート抵抗はかぶり、湿度、経過時間(乾燥時間)に依存するとして、評価式を提案している。

表 2.2-4 松村らの実験における要因と水準

要 因	水 準
塩化物イオン濃度 (kg/m ³)	2, 4, 6, 8, 10
かぶり (cm)	2, 5, 10
相対湿度 (%)	60, 80

※) 塩化物イオン濃度は、かぶり 2cm の場合 6kg/m³、かぶり 5cm の場合 8kg/m³ を上限

$$\log V_{corr} = 33.1R_{RC} + Y \quad (R_{RC} \leq 0.04) \quad (2.2-11a)$$

$$\log V_{corr} = 33.1 \times 0.04 + Y \quad (R_{RC} \geq 0.04) \quad (2.2-11b)$$

$$Y = 0.457C - 9.79 \quad (C \leq 6.89 \text{ kg/m}^3) \quad (2.2-11c)$$

$$Y = -6.64 \quad (C \geq 6.89 \text{ kg/m}^3) \quad (2.2-11d)$$

ここに、 V_{corr} : 腐食速度 (mg/cm²/sec)
 R_{RC} : コンクリート抵抗の逆数 (1/Ω)
 Y : コンクリート抵抗の逆数がゼロの時の腐食速度の対数値
 C : 塩化物イオン濃度 (kg/m³) (コンクリートに対する濃度)

$$\log \{(R_{RC})_{L,H}\} = A + B_{L,H} \sqrt{t} \quad (2.2-12a)$$

$$B_{L,H} = -0.07744 + 0.00180L + 0.00037H \quad (2.2-12b)$$

ここに、 $(R_{RC})_{L,H}$: かぶり L および相対湿度 H におけるコンクリート抵抗の逆数 (1/Ω)
 t : 降雨からの経過日数 (日)
 A : 定数 (= -1.216)
 $B_{L,H}$: かぶり L および相対湿度 H における定数
 L : かぶり (cm)
 H : 相対湿度 (%)

ここで、腐食速度の単位を $\text{mg}/\text{cm}^2/\text{year}$ に変換すると腐食速度は次のように表される。

$$\log V_3 = 33.1 R_{RC} + Y + 7.50 \quad (R_{RC} \leq 0.04) \quad (2.2-13a)$$

$$\log V_3 = 33.1 \times 0.04 + Y + 7.50 \quad (R_{RC} \geq 0.04) \quad (2.2-13b)$$

$$Y = 0.457C - 9.79 \quad (C \leq 6.89 \text{kg}/\text{m}^3) \quad (2.2-13c)$$

$$Y = -6.64 \quad (C \geq 6.89 \text{kg}/\text{m}^3) \quad (2.2-13d)$$

ここに、 V_3 : 腐食速度 ($\text{mg}/\text{cm}^2/\text{year}$)

(4) 関らの方法⁵⁾

a. モデル化の概要

鉄筋の腐食機構を次のようにモデル化する。

- ①鉄筋の腐食形態はカソード支配とする。
- ②酸素の透過は一次元の Fick の拡散法則に従うものとし、酸素の拡散係数および表面濃度は一定とする。
- ③コンクリート中の酸素濃度の初期値はゼロとする。
- ④鉄筋表面とコンクリートの間には、コンクリート中の空隙の飽和度(含水率)にしたがってキャピラリー水が存在している。
- ⑤鉄筋表面に達した酸素は、その大部分が鉄筋を通過するが、一部は溶存酸素として水に溶ける。
- ⑥溶存酸素および電流に関して質量保存則、Faraday の法則が成立する。
- ⑦鉄筋上のカソードとアノードの面積比は、時間とともに減少する。
- ⑧鉄筋を通過した酸素は、鉄筋の腐食には一切関与しない。
- ⑨鉄筋の腐食機構に対して塩化物イオンの影響はないとする。

b. 評価式

上記の仮定の下、鉄筋の腐食速度の評価式を誘導している。

$$Fr = \frac{k^A}{k^C} \cdot \frac{C}{A} \cdot \left(\kappa \cdot D_0 \frac{dC_0(L,t)}{dx} \right)$$

$$\frac{C}{A} = \alpha \exp(-\beta \times T) \quad (2.2-14)$$

- ここに、 Fr : 腐食速度
 k^A : 電流密度を錆生成速度に変換する電気化学当量(=5.55×10⁻⁴g/クーロン)
 k^C : 電流密度を酸素消費速度に変換する電気化学当量(=8.29×10⁻⁵g/クーロン)
 C/A : カソードとアノードの面積比
 κ : 水中に溶ける酸素の割合を示す係数(=0.03×S/100, Sは飽和度)
 D_0 : 気体状態の酸素の拡散係数(m²/sec)
 $C_0(L,t)$: 鉄筋位置での浸透開始からの時間 t における酸素の濃度
 L : かぶり
 α, β : アノードとカソードの面積の時間的な変化を表すパラメータ($\alpha=10, \beta=0.05$ を推奨)
 T : 経過時間(年)

そして、酸素濃度 $C_0(L, t)$ は、次式により求められるとしている。

$$C_0(L,t) = C^S \left(1 - \operatorname{erf}\left(\frac{L}{2\sqrt{D_0 \cdot t}}\right)\right) \quad (2.2-15)$$

ここに、 C^S : 酸素の表面濃度(0.26kg/m³)

なお、表 2.2-5～表 2.2-6 に示すように、酸素の拡散係数を仮定している。

表 2.2-5 水セメント比に対する酸素の拡散係数の値 (飽和度 S=60%)

水セメント比 (%)	酸素の拡散係数 (m ² /sec)
40	1.5×10 ⁻⁸
45	1.6×10 ⁻⁸
50	1.7×10 ⁻⁸
55	2.1×10 ⁻⁸
60	2.5×10 ⁻⁸

表 2.2-6 飽和度に対する酸素の拡散係数の値 (水セメント比 W/C=60%)

飽和度 (%)	酸素の拡散係数 (m ² /sec)
40	1.0×10 ⁻⁷
60	2.5×10 ⁻⁸
80	1.0×10 ⁻⁸
100	1.0×10 ⁻¹⁰

(5) 鳥取の方法⁶⁾

a. 検討の概要

梶田らの実験結果³⁾を参考に、次の方針の基に、森永のデータ¹⁾を用いて修正式を提案している。

- ①一般構造物のかぶりを対象とする観点から、かぶり 10mm 以上のデータのみを用い、腐食速度はかぶりの平方根に反比例するものとする。
- ②腐食速度と鉄筋径は無関係とする。
- ③腐食ひび割れが生じて腐食速度は変化しないと考え、森永が評価式の導出の際に用いなかったデータも含めて再評価する。

- ④水平筋と鉛直筋では腐食速度がやや異なるので、水平筋のみのデータを用いる。
 ⑤水セメント比が40%の場合の腐食速度は非常に小さいので、これらのデータは除く。したがって、修正式の適用範囲は水セメント比が55~70%の範囲となる。
 ⑥塩化物イオン量が0~1.117kg/m³の範囲での腐食速度の変化は僅かであるため、1.117kg/m³以上のデータを用いる。これは、一般に鉄筋が腐食する塩化物イオン量のしきい値が1.2kg/m³とされていることとも整合する。

b. 評価式

腐食速度をかぶりの平方根の逆数、水セメント比、塩化物イオン量の線形式により表されるとして、次の重回帰式を求めている。

$$q_5 = \frac{10^{-3}}{\sqrt{C}} (7.70 \cdot Cl^- + 0.503 \cdot W/C - 40.6) \quad (2.2-16)$$

ここに、

- q_5 : 腐食速度 (mm/year)
 Cl^- : 塩化物イオン濃度 (kg/m³) (コンクリートに対する濃度)
 W/C : 水セメント比 (%)
 C : かぶり (mm)

鳥取の評価式の変数を変換する。鉄筋径の減少を無視して鉄筋の密度を7.8g/cm³とすると、かぶりの単位をcm、腐食速度の単位をmg/cm²/yearに変換すると、次式が得られる。

$$V_5 = \frac{0.78}{\sqrt{10 \cdot c}} (7.70 \cdot Cl^- + 0.503 \cdot W/C - 40.6) \quad (2.2-17)$$

ここに、 V_5 : 腐食速度 (mg/cm²/year)

- Cl^- : 塩化物イオン濃度 (kg/m³) (コンクリートに対する濃度)
 W/C : 水セメント比 (%)
 c : かぶり (cm)

(6)各評価方法のパラメータの比較

各評価方法のパラメータおよび実験条件の一覧を表2.2-7に示す。

①塩化物イオン濃度

塩化物イオン濃度は腐食速度に大きな影響を与えることが知られている。関らの方法を除けば、各評価方法ともに塩化物イオン濃度をパラメータとしている。最も広範囲な塩化物イオン濃度を対象としているのは、松村らの方法であり、2~10kg/m³である。

②水セメント比

森永、梶田ら、鳥取の方法では、水セメント比をパラメータとしている。松村らの方法では、海洋構造物

の水セメント比の上限を考慮して55%一定の条件である。関らの方法では、パラメータである酸素の拡散係数を求めるための間接的なパラメータとして水セメント比を取り上げている。

③かぶり

各評価方法ともにかぶりをパラメータとしている。経験式の中で最も広範囲なのは、松村らの方法であり、2～10cmの範囲である。

④鉄筋径

鉄筋径をパラメータとして含むものは、森永の方法のみである(φ9～25mm丸鋼)。梶田らの方法ではφ13mm丸鋼、松村らの方法ではφ19mm丸鋼が実験条件である。

⑤酸素の拡散係数

関らの方法では、酸素の拡散係数をパラメータとしている。酸素の拡散係数はコンクリートの飽和度(含水程度)、水セメント比に影響を受けるとしている。

⑥温度

森永の方法が唯一温度をパラメータとしている。梶田らの方法では屋外暴露(つくば市)のため自然環境中での値となる。松村らの方法では、自然環境中での最大値付近を考慮して40℃一定の条件である。

⑦湿度

森永、松村らの方法では、湿度をパラメータとしている。最も広範囲なのは森永の方法でR.H.0～100%、松村らの方法では60～80%の範囲である。

⑧酸素濃度

森永、関らの方法では酸素濃度をパラメータとしている。他の方法では通常の酸素濃度下での評価となる。

⑨乾燥日数

松村らの方法では、乾燥日数をパラメータとして、コンクリート中の水分の影響を考慮している。

⑩アノードとカソードの面積比

関らの方法では、腐食部分(アノード)と非腐食部分(カソード)の面積が経時的に変化するとして、この比をパラメータとしている。

⑪中性化深さ

梶田らの方法では、予め中性化した試験体を用いて評価式を導いていることに注意すべきである。

表 2.2-7 各腐食速度評価方法のパラメータおよび実験条件の一覧

項目	森永の方法	榊田らの方法	松村らの方法	関らの方法*1	鳥取の方法
塩分濃度 (Cl/kg/m ³)	0.1~3.4	0~5.0	2.0~10.0	—	1.1~3.4
水セメント比(%)	40~70	50~65	— (55)	△	55~70
かぶり (cm)	0.4~3.7	1.5~4.0	2.0~10.0	○	1.0~3.7
鉄筋径 (mm)	9~25 (丸鋼)	— (Φ13 丸鋼)	— (Φ19 丸鋼)	—	9~25 (丸鋼)
酸素の拡散係数	—	—	—	○	—
コンクリートの含水率 (飽和度)	—	—	—	△	—
温度 (°C)	20~40	— (屋外暴露)	— (40)	—	—
湿度 (R.H.%)	0~100	— (屋外暴露)	60~80	—	—
酸素濃度 (%)	0~20	— (20)	— (20)	○	—
乾燥日数 (降雨間隔)	—	— (屋外暴露)	0~∞	—	—
アノードとカソードの面積比	—	—	—	○	—
中性化深さ (mm)	—	(約 15mm)	—	—	—

*1 理論モデルのため、○：パラメータである、△：酸素の拡散係数を算出するための間接的なパラメータ、—：パラメータではないことを表す。

*2 () 内は実験条件を表す。

*3 下線部分はパラメータを表す。

2.3 ひび割れ発生時の腐食量評価方法

(1) 森永の方法¹⁾²⁾

a. 実験の概要

① ひび割れ発生時の圧力評価実験

厚肉円筒供試体(高さ 100mm)に内圧を加えてコンクリートに引張応力を与え、ひび割れが発生する時の圧力を測定した。実験要因は表 2.3-1 に示すように、円筒の外径(50~200mm)、内径(9~25mm)、水セメント比(40~70%)、混入塩分量(塩化カルシウム 2 水塩、対セメント重量%で 0、および 2%)である。

表 2.3-1 森永のひび割れ発生時圧力評価実験における要因と水準

要因	水準
円筒の外径 (mm)	50, 100, 150, 200
円筒の内径 (mm)	9, 19, 25
水セメント比 (%)	40, 55, 70
混入塩分量 (塩化カルシウム 2 水塩 対セメント重量%)	0, 2

② ひび割れ発生時の腐食量評価実験

中心部に鉄筋を埋め込んだ円柱供試体(高さ 100mm)を用いて定電圧による電食試験を行い、電流の経時変化およびひび割れ発生時の腐食量の測定を行った。実験要因は表 2.3-2 に示す通りである。ただし、ひび割れ発生時の判定は、外周面では捕らえにくいため、鉄筋近くのコンクリートにひび割れが生じた時としている。

表 2.3-2 森永のひび割れ発生時腐食量評価実験の要因

要因	水準
印加電圧	0, 1.5, 3.0, 6.0, 12.0
円柱の外径(mm)	100, 150
鉄筋径(mm)	9, 19, 25
水セメント比(%)	40, 55, 70
混入塩分量 (塩化カルシウム 2 水塩 対セメント重量%)	0, 0.5, 1.0, 5.0

b. 評価式

ひび割れ発生時の圧力評価実験の結果、ひび割れ発生時の圧力は、円筒の内径が小さくなるほど、外径が大きくなるほど、また引張強度が大きくなるほど増大した。ひび割れ発生時の圧力から厚肉円筒理論を用いて求めた円筒内面の最大引張応力 $\sigma_{t\max}$ は、引張強度 F_t と、円筒外径 r_2 と内径 r_1 の比 (r_2/r_1) によって次式のように回帰することができた。

$$\sigma_{t\max} = F_t (r_2/r_1)^\beta \quad (2.3-1)$$

$$\beta = 0.85$$

ここに、 $\sigma_{t\max}$: 円筒内面の最大引張応力
 F_t : コンクリートの引張強度
 r_1 : 円筒外径
 r_2 : 円筒内径

そして、ひび割れ発生時の腐食量評価実験の結果を合わせて、腐食生成物の一部(一定割合)はコンクリート中に拡散し内圧発生に関与せず、また、引張強度と破壊時のヤング係数の比 (F_t/E_t) は一定と仮定し、次式の関係を実験結果から導いた。

$$Q_{cr} = K(r_2/r_1)^\beta \cdot r_1$$

$$K = \frac{F_t \rho}{E_t \alpha \delta} (=1.204) \quad (2.3-2)$$

ここに、 Q_{cr} : ひび割れ発生時の腐食量 ($\times 10^{-4}$ g/cm²)
 r_1 : 鉄筋半径 (mm)
 r_2 : 円柱半径 (mm)
 E_t : 破壊時の引張ヤング係数
 ρ : 鉄筋の密度 (g/cm³)
 α : 腐食生成物と鉄筋の体積比
 δ : 腐食生成物と鉄筋とコンクリート界面に溜まる腐食生成物の体積比

以上のことから、次式を提案している。

$$Q_{cr} = 0.602 \left(1 + \frac{2c}{d} \right)^{0.85} d \quad (2.3-3)$$

ここに、 Q_{cr} : ひび割れ発生時の腐食量 ($\times 10^{-4}$ g/cm²)
 d : かぶり (mm)
 c : 鉄筋径 (mm)

(2) 横関らの方法および土木学会コンクリート委員会腐食防食小委員会の方法⁷⁾

横関らはコンクリートの引張軟化、クリープなどを考慮した非線形FEM解析をパラメトリックに行った結果から、腐食ひび割れ発生時の鉄筋腐食量を以下のように定式化している。

① 一般部鉄筋 (床板形状構造物)

$$W_{cr} = -1.841\phi(\phi - 8.661) + 145.1\alpha^{-1.194} + 3809A^{-0.8351} + 10.60X_1 - 72.30 \quad (2.3-4)$$

② 隅角部鉄筋 (梁・柱状構造物)

$$W_{cr} = -0.4325\phi(\phi - 19.10) + 65.01\alpha^{-1.217} + 420.5A^{-0.5702} + 5.349X_1 - 33.57 \quad (2.3-5)$$

ここに、 W_{cr} : 腐食ひび割れ発生時の鉄筋腐食量 ((mg/cm²)

ϕ : クリープ係数

α : 体積膨張率 (通常は 3.2)

A : 腐食角度 (°, 通常は 360°)

X_1 : 形状関数 1, $\min(\text{かぶり}/\text{鉄筋径}, \text{鉄筋純間隔}/2/\text{鉄筋径}/1.75)$

X_2 : 形状関数 2, $\min(\text{かぶり}/\text{鉄筋径}, \text{鉄筋純間隔}/2/\text{鉄筋径})$

上記の式はやや複雑であり、直感的に腐食ひび割れ発生時の鉄筋腐食量を推定することができない。土木学会コンクリート委員会腐食防食小委員会の報告では、一般部鉄筋(式(2.3-4))を対象に、以下の仮定の基に試算している。

① 体積膨張率 α を 3.2, 腐食角度 A を 360° とする。

② 載荷材齢は 10 年程度以上と考えられるので、クリープ係数 ϕ は 0.4~0.6 とする。

③ 鉄筋間隔は十分に確保されている配筋状態を想定し、形状関数 X_1 には (かぶり/鉄筋径) の値を用いる。

上記①~③の値を用いて、計算した結果、図 2.3-1 に示すように、腐食ひび割れ発生時の鉄筋腐食量 W_{cr} は概ね下記のように単純な式で表されとしている。

$$W_{cr} = 10c/d \quad (2.3-6)$$

ここに、 c : かぶり, d : 鉄筋径

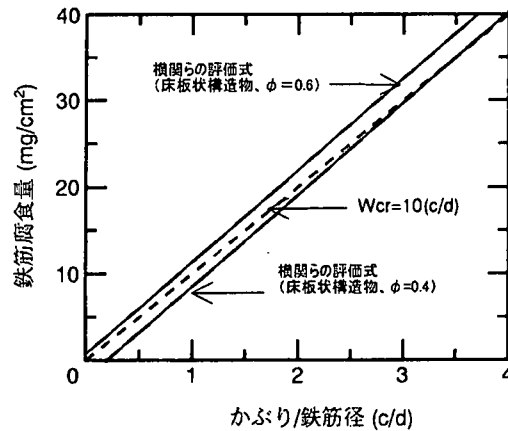


図 2.3-1 腐食ひび割れ時の鉄筋腐食量と（かぶり／鉄筋径）の関係

(3) 西内らの方法⁸⁾

西内らは、鉄筋を中央に埋め込んだ円柱供試体の電食試験を行い、錆の体積膨張圧を逆算し、ひび割れ発生の判定方法を提案した。

錆の腐食膨張圧によるかぶりコンクリートへのひび割れが発生する機構に厚肉円筒理論を適用して、錆の腐食膨張圧とコンクリート内部に発生する応力とを求める。

$$dV - 1 = P \left[\frac{1}{E_{corr}} + \frac{(r_1 + r_0)^2}{E_c r_0 \{r_2^2 - (r_1 + r_0)^2\}} \left\{ (1 - \nu_c)(1 - 2\nu_s)(r_1 + r_0) + \frac{(1 + \nu_c)r_2^2}{r_1 + r_0} \right\} + \frac{(1 + \nu_s)(1 - 2\nu_s)r_1}{E_s r_0} \right]$$

$$r_0 = 0.01 \cdot \frac{W_r}{\rho_s} \tag{2.3-7}$$

- ここに、 dV : 錆の体積膨張率(電食試験結果から求めた値=1.3)
- P : 腐食膨張圧(N/mm²)
- E_s : 鉄筋の弾性係数(N/mm²)
- E_c : コンクリートの弾性係数(N/mm²)
- E_{corr} : 錆の弾性係数(N/mm²)
- ν_s : 鉄のポアソン比(=0.3)
- ν_c : コンクリートのポアソン比(=0.2)
- r_1 : 鉄筋の半径(mm)
- r_2 : 円筒の半径($r_2 - r_1$)がかぶりに相当 : mm)
- r_0 : 錆層の幅 (mm)
- W_r : 鉄筋の腐食量(mg/cm²)
- ρ_s : 鉄の密度(7.85g/cm³)

腐食量が定まれば、上式から膨張圧 P が求まり、厚肉円筒理論による次式から円筒中の周方向応力が求まる。

$$\sigma_t = \frac{P \cdot r_1^2}{r_2^2 - r_1^2} \left(\frac{r_2^2}{r^2} + 1 \right) \quad (2.3-8)$$

ここに、 σ_t : 円筒中の周方向応力 (N/mm²)

r : 鉄筋中心からの距離 (mm)

上式を r について、 r_1 から r_2 まで積分したものをかぶり ($r_2 - r_1$) で除すると、次式が得られる。

$$\sigma_t' = \frac{P \cdot r_1}{r_2 - r_1} \quad (2.3-9)$$

ここに、 σ_t' : ひび割れ直交方向応力の平均値 (N/mm²)

かぶりコンクリートにひび割れが発生する条件として『ひび割れ直交方向応力の平均値が、コンクリートの引張強度に達した時』と仮定することにより、ひび割れ発生の判定を行う。

(4) 各評価方法のパラメータの比較

各評価方法のパラメータを比較すると表 2.3-3 のようになる。

2.4 腐食速度の試算

(1) 試算の方法

森永、梶田ら、松村ら、関らの各腐食速度評価方法を用いた試算を行い、これらの方法の特徴を把握する。屋外重要土木構造物の断面諸元等を参考に、水セメント比、かぶり等の条件について基本ケースを設定し、この基本ケースの1項目を変化させて試算を行った。

表 2.3-3 ひび割れ発生時腐食量評価方法のパラメータの比較

項目	森永の方法	横関らの方法	腐食防食小委員会	西内らの方法
かぶり	○	○	○	○
鉄筋径	○	○	○	○
コンクリートのクリープ係数	-	○	-	-
錆の体積膨張率	-	○	-	○ (定数)
鉄筋間隔	-	○	-	-
腐食角度	-	○	-	-
鉄筋の弾性係数	-	-	-	○
コンクリートの弾性係数	-	-	-	○
錆の弾性係数	-	-	-	○
鉄のポアソン比	-	-	-	○
コンクリートのポアソン比	-	-	-	○
鉄の密度	-	-	-	○

※ ○ : パラメータである、- : パラメータではないことを表す

基本ケースは、各腐食速度評価方法の適用範囲、および屋外重要土木構造物の断面諸元を考慮して表 2.4-1 のように定めた。また、変化させる項目は表 2.4-1 に示すように、塩化物イオン濃度、水セメント比、かぶりの3項目とした。

表 2.4-1 基本ケースと検討に用いた値の一覧

項目	基本ケース	検討に用いた値
塩化物イオン濃度 (kg/m ³)	4	2, 4, 6, 8, 10
水セメント比 (%)	55	40, 45, 50, 55, 60
かぶり (cm)	6	2, 4, 6, 8, 10
鉄筋径 (mm)	19	—
酸素の拡散係数 (m ² /sec)	2×10 ⁻⁸	—
コンクリートの含水率 (飽和度%)	60	—
温度 (°C)	20	—
湿度 (%)	70	—
酸素濃度 (%)	20	—
乾燥日数 (降雨間隔) (日)	0	—
アノードとカソードの面積比 C/A と経過時間 T の関係	$C/A = \alpha \exp(-\beta T)$ $\alpha = 10, \beta = 0.05$	—

(2) 試算結果

a. 塩化物イオン濃度の影響

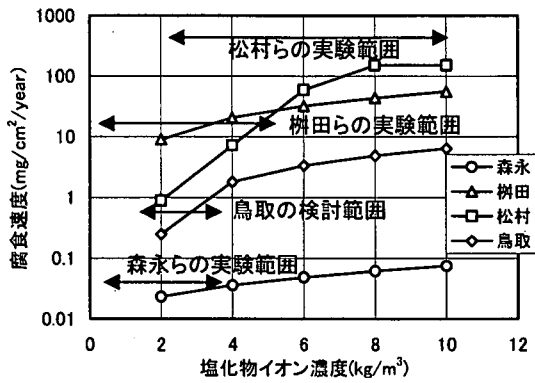
図 2.4-1 に各評価方法による計算結果を示す。森永ら、榊田ら、松村ら、鳥取らの各方法ともに、塩化物イオン濃度の増大により、腐食速度が大きく増大する結果となった。なかでも、松村らの方法が最も増大の割合が大きい。各評価方法の基となる実験における塩化物イオン濃度の範囲(森永らの 3.4kg/m³以下、榊田らの 5.0kg/m³以下、松村らの 10kg/m³以下、鳥取らの 4.5kg/m³)を考えると、この範囲で適用すれば、それぞれの方法の差は小さくなる方向にある。また、榊田らの結果が大きい理由として、予め中性化した試験体(深さ 15mm)を用いていることも考えられる。一方、関らの方法では、塩化物イオン濃度はパラメータに含まれていないため、塩化物イオン濃度の影響は考慮できない。腐食速度は経年的に減少し、ゼロに近づく。

b. 水セメント比の影響

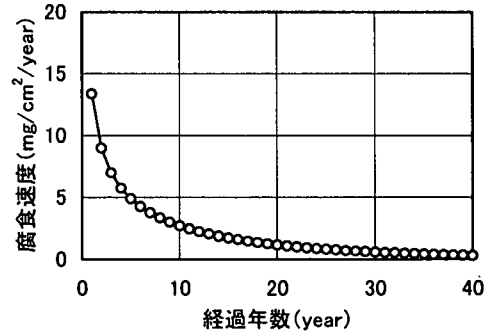
図 2.4-2 に水セメント比を変化させた場合の計算結果を示す。松村らの方法を除いて、水セメント比が増大すると腐食速度は増大するが、塩化物イオン濃度の影響に比較するとその影響度合いは小さい。松村らの実験では、水セメント比 55%のコンクリート用いている。この時の値は鳥取らの方法による値と近い。榊田らの結果が大きい理由は、前述のように中性化の影響が考えられる。

c. かぶりの影響

図 2.4-3 にかぶりの影響を示す。森永ら、榊田ら、鳥取らの方法では、かぶりが増大すると腐食速度は減少する。松村ら、関らの方法ではかぶりの影響はほとんど無い。森永ら、榊田らの実験では、屋外に試験体を暴露している。かぶりが小さいと温度変化や乾湿の繰返しによりかぶりコンクリートに微細なひび割れが生じ、このため腐食速度が大きくなったことも考えられる。

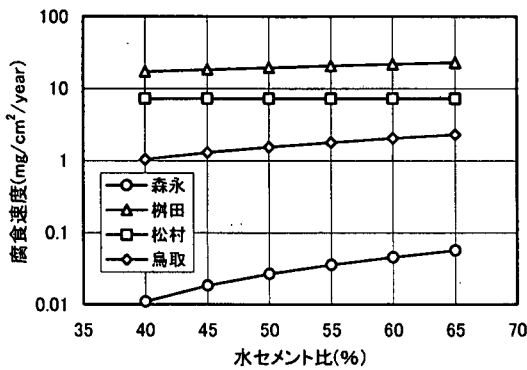


a) 森永ら、榊田ら、松村ら、鳥取らの方法

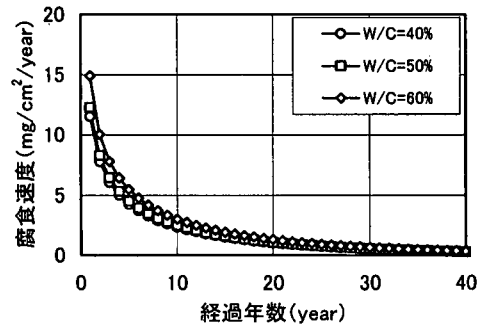


b) 関らの方法

図 2.4-1 腐食速度に与える塩化物イオン濃度の影響

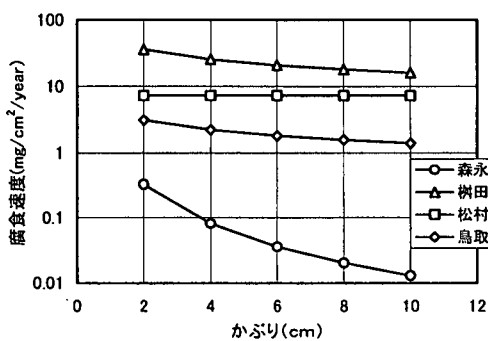


a) 森永ら、榊田ら、松村ら、鳥取らの方法

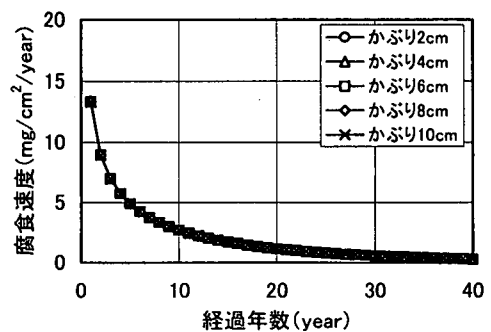


b) 関らの方法

図 2.4-2 腐食速度に与える水セメント比の影響



a) 森永ら、榊田ら、松村ら、鳥取らの方法



b) 関らの方法

図 2.4-3 腐食速度に与えるかぶりの影響

2.5 まとめ

既往の腐食速度評価方法には、森永の方法、榊田らの方法、松村らの方法、関らの方法および鳥取の方法がある。これらの評価法の概要を整理し、各評価法を用いた腐食速度の試算を行い、それぞれの特徴を抽出した。一方、ひび割れ発生腐食量評価方法には、森永の方法、土木学会の簡易式および西内らの方法などがある。これらの評価法の概要を整理した。

3. フライアッシュコンクリートの塩分浸透抵抗性

3.1 概要

耐震性能照査マニュアルでは、フライアッシュコンクリートの塩化物イオンの拡散係数は、高炉セメントなどの混和材を使用したコンクリートと同じ推定式を用いてよいこととしている。ここでは、この根拠となるデータの収集・分析した結果を示す。

3.2 収集文献

収集した文献の一覧を表 3.2-1 に示す。

表 3.2-1 フライアッシュコンクリートの塩分浸透抵抗性に関する文献一覧

文献番号	文献名・実験名	著者
1	橋湾石炭火力発電所新設工事で採用したフライアッシュC種セメントを用いたコンクリートの耐久性（電力土木 No. 274, 1998）	鎌本広之ほか （電源開発）
2	フライアッシュを用いたコンクリートの遮塩性に関する基礎試験（土木学会第 56 回年次講演会講演概要集, 2001）	佐藤道生 （電源開発）
3	塩害環境下におけるフライアッシュコンクリートの性能評価（土木学会第 53 回年次講演会講演概要集, 1998）	村田陽子 （群馬大）
4	海洋環境下におけるコンクリートへの塩化物イオン浸透性の評価に関する研究（土木学会論文集, No. 571/V-36, 1997）	笹谷輝彦ほか（国土開発センター）
5	急速試験法（AASHTO T 277-83）による各種コンクリートの塩化物イオン透過性の評価（土木学会論文集, No. 564/V-35, 1997）	笹谷輝彦ほか（国土開発センター）
6	フライアッシュコンクリートの中性化、水密性および遮塩性に関する実験（コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 20, No. 2, 1998）	和田真平ほか （東海興業）
7	海岸に暴露したコンクリートへの塩分浸透について（コンクリート工学年次論文報告集, 13-1, 1991）	太田利隆ほか （北海道開発局）
8	海洋環境に暴露したコンクリート供試体中への塩化物の浸透—暴露 2 年の調査—（土木学会第 49 回年次講演会講演概要集, 1994）	岡田浩司（鹿島）、堤知明（東京電力）
9	フライアッシュコンクリートに関する実験研究（中国電力研究報告 No. 8715071, 1989）	塩道智晴 （中国電力）
10	フライアッシュコンクリートの耐海水性に関する研究報告書（中国電力研究報告書 No. 921501, 1993）	塩道智晴ほか （中国電力）
11	フライアッシュコンクリートの耐海水性実験のうちコンクリート試験（材令 10 年）業務報告書	中国電力株式会社 内部資料

3.3 フライアッシュコンクリートの塩分浸透抵抗性

(1) 文献の要約

各文献の内容を要約して次に示す。

a. 文献 1

① 実験条件

セメント（置換率）：普通ポルトランドセメント（0%）、フライアッシュセメント A 種（10%）、フライアッシュセメント C 種（25%）、フライアッシュセメント D 種（40%）、高炉セメント B 種、早強フライアッシュセメント C 種（25%）

水セメント比：普通 56%、A 種 54%、C 種 48%、D 種 40%、高炉 B 種 51%、早強 C 種 51%

養生方法：7 日間噴霧養生（20℃, RH100%）

試験方法：塩水浸漬乾燥試験：塩水浸漬 12 時間／乾燥 24 時間の繰り返し、80 サイクル

②結果

深さ方向に3つ(深さ7.5, 22.5, 30mm)の試料を採取し、全塩分および可溶性塩分を測定し、拡散係数を算出した。フライアッシュコンクリートの拡散係数は、普通セメントを使用したコンクリートと比較して小さく、高炉B種を使用したコンクリートと同程度である。

表 3.3-1 塩分濃度分布および塩分拡散係数

	塩分 (%)	深さ (cm)			拡散係数 (cm ² /sec)
		0.75	2.25	3.00	
普通	全塩分	0.867	0.345	0.170	16.4×10 ⁻⁸
	可溶性塩分	0.382	0.132	0.060	12.7×10 ⁻⁸
A種	全塩分	0.876	0.121	0.035	4.2×10 ⁻⁸
	可溶性塩分	0.370	0.037	0.008	3.0×10 ⁻⁸
C種	全塩分	0.646	0.030	0.020	3.6×10 ⁻⁸
	可溶性塩分	0.279	0.012	0.006	2.9×10 ⁻⁸
D種	全塩分	0.556	0.029	0.025	4.5×10 ⁻⁸
	可溶性塩分	0.245	0.010	0.006	3.2×10 ⁻⁸
高炉B	全塩分	0.850	0.035	0.020	3.1×10 ⁻⁸
	可溶性塩分	0.299	0.013	0.009	3.5×10 ⁻⁸
早強C	全塩分	0.788	0.023	0.019	3.1×10 ⁻⁸
	可溶性塩分	0.363	0.007	0.006	2.6×10 ⁻⁸

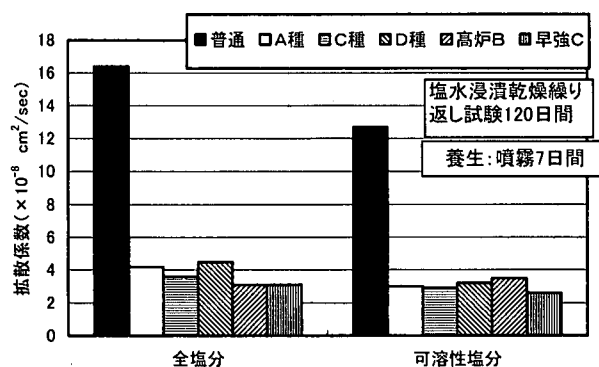


図 3.3-1 拡散係数の比較

b. 文献2

①実験条件

セメント (略称, 置換率): フライアッシュセメントC種 (FC, 30%), 高炉セメントB種 (BB)

水結合材比: FC 45, 50, 55%, BB 45, 50, 55%

養生方法: 28日間噴霧養生 (20°C, RH100%)

試験方法: 塩水浸漬乾燥試験: 40°C3%塩水浸漬12時間/60°C乾燥24時間の繰り返し, 80サイクル

②結果

深さ方向に3つ(深さ0~1.0, 1.0~2.0, 2.0~3.0cm)の試料を採取し、全塩分および可溶性塩分をJCI-SC4に準拠して測定し、拡散係数を算出した。FCの拡散係数は10⁻⁸cm²/sec程度であり、同一の水結合材比の条件ではBBとほぼ同等の値であった。水結合材比による差が明瞭ではないが、深度別の試料数が少ないためと考えられる。

表 3.3-2 塩分拡散係数の算出結果

(単位 : $\times 10^{-8}$ cm²/sec)

	水結合材比 (%)	F C		B B	
		全塩分	可溶性塩分	全塩分	可溶性塩分
スランブ 8cm シリーズ	45	1.00	0.84	1.50	0.92
	50	1.20	0.96	1.60	0.98
	55	0.97	0.77	1.50	0.98
スランブ 12cm シリーズ	45	1.10	0.76	-	1.10
	50	1.20	0.88	-	0.94
	55	1.10	0.88	-	0.95

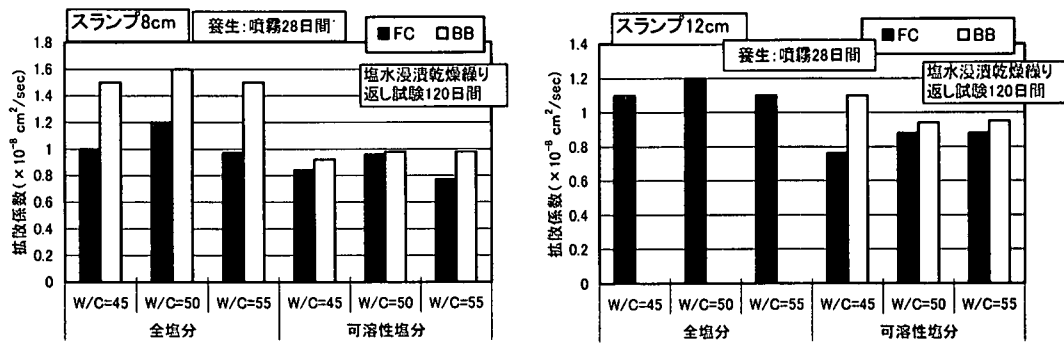


図 3.3-2 拡散係数の比較

c. 文献 3

①実験条件

セメント (略称, 置換率) : フライアッシュセメント (FA30, 30%), 普通セメント (AE-Con)

水結合材比 : FA30 55%, AE-Con 55%

養生方法 : 28~400 日間の水中養生

試験方法 : 電気化学的手法 (拡散セルに通電してイオンの移動を促進評価する方法)

②結果

陽極側の塩分濃度の増加が定常になった段階で, その傾きからフラックスを求め, 拡散係数とフラックスの関係式を用いて, 拡散係数を算出した. 養生日数 (標準水中養生) が増大すると拡散係数は減少する. 特に, FA30 ではその傾向が著しく, 400 日養生では, 28 日養生の 1/2 以下の値である. 同じ養生日数で比較すると, 養生日数が 91 日までは, FA30 と AE-Con の拡散係数は同程度であるが, 270 日では 2/3 程度である.

表 3.3-3 拡散係数の算出結果

養生日数 (日)	拡散係数 ($\times 10^{-12}$ m ² /sec)	
	AE-Con	FA30
28	11.2	10.8
91	10.2	10.5
270	8.7	5.56
400	-	4.36

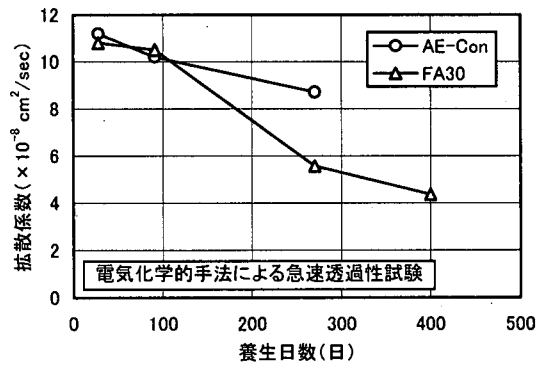


図 3.3-3 拡散係数と養生日数の関係

d. 文献 4

①実験条件

配合 (略称, 置換率): フライアッシュ混和 (FA55, 30%), 高炉スラグ混和 (BS55, 50%)
シリカフェーム混和 (SF55, 10%)

水結合材比: 55%

養生: 20°C水中 28 日 (略号 W), 20°C水中 7 日 + 20°C RH60% 気中 21 日 (略号 A)

試験方法: 日本海に面した石川県徳光海岸の砂浜での暴露 (8ヶ月および7年間)

②結果

φ5cmのコアの深さ方向1cm厚にスライスした試料の全塩分量を測定 (JCI SC-5 準拠) し、フィックの第2法則の拡散方程式に近似させて、表面塩分量および拡散係数を算出した。FA, BS, SFの拡散係数は無混和に比較して小さく、3者はほぼ同程度である。表面塩分量は無混和のものより大きい。暴露期間が長くなると、FA, BS, SFで拡散係数が小さくなる。FAでは水中養生期間の長い方が拡散係数は小さい。

表 3.3-4 表面塩分濃度および塩化物イオンの拡散係数の算出結果

供試体	暴露期間 8ヶ月		暴露期間 7年	
	表面塩分量 (kg/m ³)	拡散係数 ($\times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{sec}$)	表面塩分量 (kg/m ³)	拡散係数 ($\times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{sec}$)
OPC45A	8.5	3.06	10.2	3.90
OPC45W	9.9	2.06	10.9	2.14
OPC55A	10.3	5.10	12.8	6.80
OPC55W	8.9	3.70	8.8	4.27
OPC65A	11.0	8.65	10.2	14.1
OPC65W	12.7	8.20	6.6	10.7
FA55A	10.6	5.25	9.3	2.06
FA55W	14.2	2.46	10.5	1.46
BS55A	10.4	3.89	12.9	1.40
BS55W	12.7	2.68	10.4	1.30
SF55A	14.0	2.17	15.3	1.10
SF55W	18.3	2.07	12.3	1.71

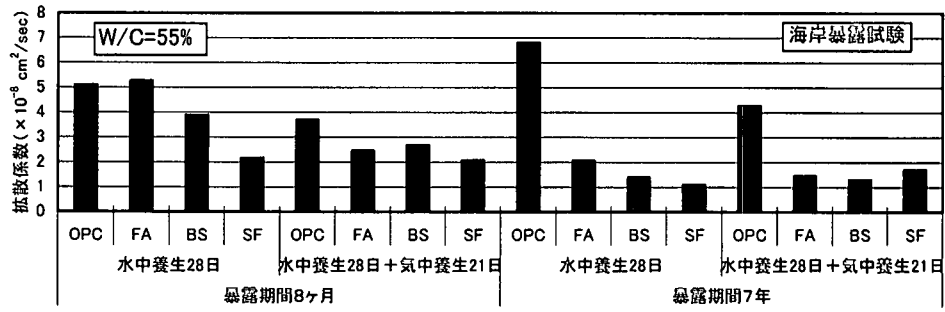


図 3.3-4 拡散係数の比較

e. 文献 5

①実験条件

配合 (略称, 置換率): フライアッシュ混和 (FA55, 30%), 高炉スラグ混和 (BS55, 50%)
シリカフューム混和 (SF55, 10%), 無混和 (OPC55)

水結合材比: 55%

養生および暴露条件: 20°C水中養生 28 日の後, 引き続き 5 年間水中養生 (IW28),
20°C水中養生 7 日 + 20°C RH60% 気中養生 21 日の後, 5 年間の気中養生 (ID7)
20°C水中養生 28 日の後, 5 年間の気中養生 (ID28)
20°C水中養生 7 日 + 20°C RH60% 気中養生 21 日の後, 5 年間の屋上暴露 (OD7)
20°C水中養生 28 日の後, 5 年間の屋上暴露 (OD28)

試験方法: 暴露後の試験体からコアを採取し, 電気化学的手法 (拡散セルに通電してイオンの移動をクーロン量で評価する方法) で評価

②結果

AASHTO T 277-83 に準拠し, 電流値 (アンペア) と時間 (秒) との積分値である電気量 (クーロン) を塩化物イオン透過量として, 塩分透過性を評価した. FA の塩化物イオン透過量は, 暴露前では OPC とほぼ同程度であるが, 暴露期間 1 年で急激に減少し, 5 年後でもそれを維持している. FA の塩化物イオン透過量は, 暴露前では BS, SF よりも大きい, 暴露 1 年後, 2 年後では小さい.

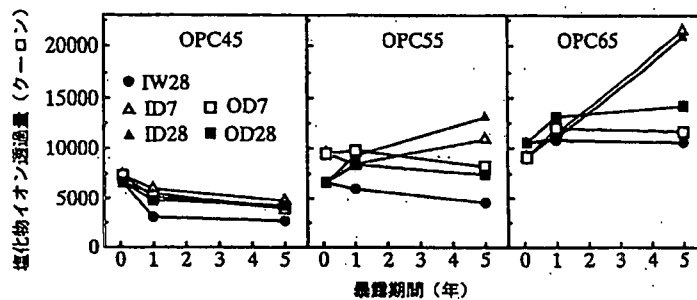


図 3.3.5 塩化物イオン透過量の経時変化 (内部 5~10cm, 普通セメントコンクリート)

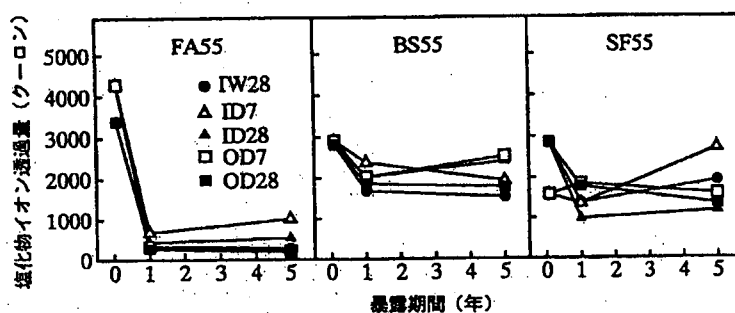


図 3.3.6 塩化物イオン透過量の経時変化 (内部 5~10cm, 鉱物質混和材を使用したコンクリート)

f. 文献 6

①実験条件

フライアッシュ種類: 3種 (H, M, L)

配合 (置換率): フライアッシュ混和 (15, 30, 45%), フライアッシュ無混和

水結合材比: 27, 40, 55, 78.8% (無混和のみ)

養生条件: 20°C水中養生 28日

試験方法: 乾湿繰り返し試験 (50°C3%NaCl 溶液 4日間浸漬/50°C湿度 60%乾燥 3日間の繰り返し, 16サイクル (4ヶ月間))

②結果

2%硝酸銀を噴霧して変色深さを測定し, 塩化物イオン浸透深さを測定した. 無混和と比較して, フライアッシュ混和は, フライアッシュの種類, 置換率によらず, 塩化物イオン浸透深さが小さく, 遮塩性が高い. 同一 W/B では, 置換率の大きい方が塩化物イオン浸透深さが小さい傾向があり, 遮塩性が向上する. (高炉スラグとの比較データはない)

表 3.3-5 フライアッシュの物性

	H*	M	L*	
二酸化ケイ素 (%)	69.2	55.8	61.5	
湿分 (%)	0.1	0.0	0.3	
強熱減量 (%)	2.3	0.9	8.0	
比重	2.35	2.27	2.07	
比表面積 (cm ² /g) (ブレン法)	6510	3890	3410	
フロー値比 (%)	110	110	90	
活性度指数 (%)	材令 28日	98	90	80
	材令 91日	103	103	92

* Hは批評面積の大きなもの, Lは強熱減量の大きなもの

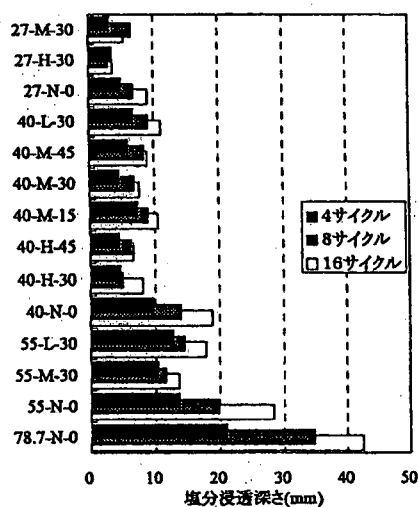


図 3.3-7 塩分浸透深さの比較

表 3.3-6 コンクリートの配合

W/B (%)	W/C (%)	フライアッシュ		単位量 (kg/m ³)						Add 種類*
		種類	置換率 (%)	S/A (%)	W	B		S	G	
						C	FA			
55	55	-	-	45	178	324	-	790	970	1
	78.7	M	30	46	163	207	89	824	970	1
		L		43	185	235	101	723	970	1
40	40	-	-	41	185	463	-	658	970	1
	57.2	H	30	41	175	306	131	668	970	1
	72.7			42	168	231	189	686	970	1
	47	M	30	40	183	389	69	648	970	1
	57.1			40	180	315	135	640	970	1
	72.6			40	175	241	197	642	970	1
	57.1			L	30	39	185	324	139	601
27	27	-	-	47	162	600	-	754	860	2
	38.6	H	30	45	162	420	180	702	860	2
		M		45	162	420	180	697	860	2
78.7	78.7	-	-	48	178	226	-	870	970	1

*Add 種類 : 1 ; AE 減水剤, 2 ; 高性能 AE 減水剤

g. 文献 7

①実験条件

セメントの種類 : フライアッシュ B 種 (FB), 高炉 B 種 (BB), 普通ポルトランド (OPC) の 3 種類

水結合材比 : 不明, 水セメント比 : FB 40.7, 47.0% BB 44.0, 52.0% OPC 43.3~52.7%

初期混入塩分 : 海水混入, 塩化カルシウム (3, 6kg), 無混入

養生条件 : 21℃湿潤養生 7 日後, 材令 28 日まで室内静置

試験方法 : 20 年間の海岸暴露試験 (北海道の日本海に面した留萌海岸, 汀線から 30~40m, 高さ 1~4m の暴露台)

②結果

ひび割れを導入したはり試験体 (15×15×100cm) から径 75mm のコアを採取し, 約 2cm 厚にスライスしたものを試料として, 全塩化物量 (開発局独自の手法) と可溶性塩分 (JCI 法) を測定した. FB は, BB とほぼ同等の塩分浸透抵抗性を有する. OPC と比較すると, 表面から 3cm 程度までは FB, BB の塩化物量が多いが, 表面から 5cm を越えると, FB, BB ではほとんど塩化物の浸透は認められない. FB, BB の塩分浸透性は W/C にほとんど影響を受けずない.

表 3.3-7 塩分拡散係数の算出結果

セメント	W/C (%)	拡散係数 (×10 ⁻⁸ cm ² /sec)
OPC	43.7	1.012
OPC	47.3	5.012
OPC	51.6	13.08
BB	44.0	0.635
FB	40.7	0.414

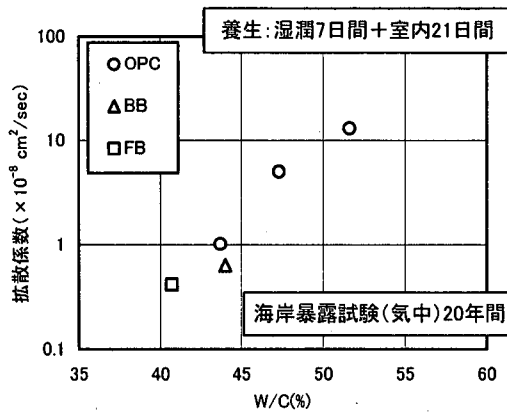


図 3.3-8 拡散係数と水セメント比の関係

h. 文献 8

①実験条件

セメント種類 (略号, 置換率) : フライアッシュ (OF, 20%), 高炉スラグ (OS, 45%), シリカヒューム (SF, 10%), 普通ポルトランド (OPC)

水結合材比 : 40, 55%

養生条件 : 不明 (海水に接する材令 5 日)

試験方法 : 2 年間の暴露試験 (火力発電所中央防波堤先端部の干満帯)

②結果

25×25×25cm の試験体から水平方向に φ50mm のコアを採取し, 深さ方向に約 5cm まで約 1cm 厚にスライスしたものを試料として, JCI-SC4 に準拠して塩分量を測定した. 拡散係数は大きい順に OPC>OF20>OS45>SF10 となり, 高炉スラグおよびシリカヒュームの混和が極めて有効であった.

表 3.3-8 表面塩分濃度および塩分拡散係数の算出結果

	水結合材比 40%				水結合材比 55%			
	OPC	OF20	OS45	SF10	OPC	OF20	OS45	SF10
表面塩化物イオン濃度 (kg/m ³)	14.2	19.2	18.7	16.5	13.9	13.0	14.8	14.5
塩分拡散係数 (×10 ⁻⁸ cm ² /sec)	2.86	2.11	1.21	1.11	4.37	4.01	2.20	2.11

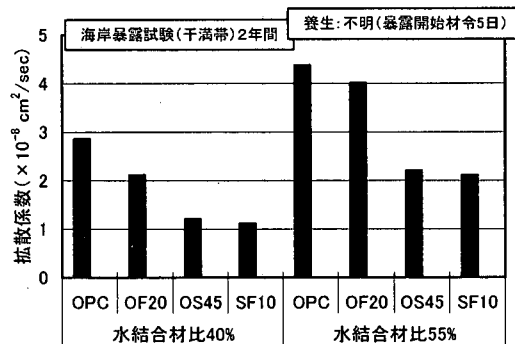


図 3.3-9 拡散係数の比較

i. 文献9

①実験条件

セメント：普通ポルトランドセメント (NP), B種高炉セメント (BS), B種フライアッシュセメント (FA)

水セメント比：55%以下

養生方法：20℃水中6日間

試験方法：①海水浸漬試験：20℃人工海水への1年間の浸漬

②促進劣化試験：20℃人工海水浸漬 (24時間) / 60℃乾燥 (22時間) / 20℃気中 (2時間) の繰返し, 180サイクル (1年間)

②結果

表層 (深さ1cmまで) と中層 (深さ1~2cm) の化学分析 (JIS R 5202セメントの化学分析方法) によるCl⁻分析の結果, 試験条件によりCl⁻の浸透量は異なった。海水浸漬では, 表層では差がみられないが, 中層ではNPに比較してBSは1/3, FAは1/2程度のCl⁻量 (%) であった。促進劣化では, 表層および中層で, NPに比較してBS, FAは小さいCl⁻量 (%) であった。FAはBSとほぼ同等の遮塩性を有していると考えられる。

表 3.3-9 コンクリート中のCl⁻量 (単位: %)

		普通セメント	B種高炉セメント	B種フライアッシュセメント
海水浸漬試験 (1年間)	表層	3.83	3.66	3.64
	中層	2.57	0.90	1.42
促進劣化試験 (1年間)	表層	4.76	3.51	3.38
	中層	3.74	3.20	3.17

*表層：深さ1cmまで, 中層：深さ1~2cm

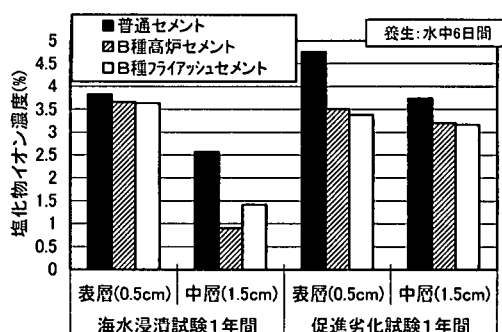


図 3.3-10 塩化物イオン濃度の比較

j. 文献10

①実験条件

セメント：普通ポルトランドセメント (NP), B種高炉セメント (BS), B種フライアッシュセメント (FA)

水セメント比：55%以下

養生方法：20℃水中6日間

試験方法：①海水浸漬試験：実海域 (発電所敷地内) での5年間の浸漬

②結果

表層（深さ 1cm まで）と中層（深さ 1~2cm）の化学分析（JIS R 5202 セメントの化学分析方法）による Cl 分析の結果、次のことが明らかとなった。各セメントの表層の Cl 量はほぼ同等である。中層では、BS が小さく、NP、FA は同等であった。フライアッシュコンクリートは普通セメントと同等の遮塩性を有していると考えられた。

表 3.3-10 コンクリート中の Cl⁻量（単位：％）

		普通セメント	B種高炉セメント	B種フライアッシュセメント
表層	180 日後	3.83	3.66	3.64
	3 年後	4.02	2.99	3.39
	5 年後	4.18	2.96	3.53
中層	180 日後	2.57	0.90	1.42
	3 年後	3.40	1.56	3.00
	5 年後	3.84	1.69	3.10

*表層：深さ 1cm まで，中層：深さ 1~2cm

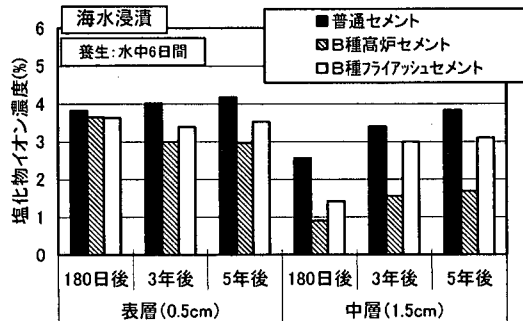


図 3.3-11 塩化物イオン濃度の比較

k. 文献 11

①実験条件

セメント：普通ポルトランドセメント (N)，B 種高炉セメント (BB)，B 種フライアッシュセメント (FB)

水セメント比：N：54.0%，BB：53.3%，FB：52.7%，養生条件：20℃水中 6 日間

試験方法：①暴露試験：3 条件（気中，飛沫帯，海中）での 10 年間暴露

②結果

表層（深さ 2cm まで）と中層（深さ 2~4cm）の温湯抽出法（JCI 規準案「硬化コンクリート中に含まれる塩分の分析方法」）による Cl 分析の結果、次のことが明らかとなった。材令によるばらつきが大きいものの、セメント種による顕著な傾向は認められない。

表 3.3-11 気中コンクリート中の Cl⁻量（セメントベース 単位：wt%）

		普通セメント	B種高炉セメント	B種フライアッシュセメント
表層	1 年後	0.030	0.067	0.029
	3 年後	0.045	0.057	0.043
	7 年後	0.098	0.064	0.052
	10 年後	0.067	0.088	0.068
中層	1 年後	0.027	0.059	0.026
	3 年後	0.014	0.022	0.013
	7 年後	0.018	0.053	0.012
	10 年後	0.023	0.011	0.013

*表層：深さ 2cm まで，中層：深さ 2~4cm

表 3.3-12 飛沫帯コンクリート中のCl⁻量 (セメントベース 単位: wt%)

		普通セメント	B種高炉セメント	B種フライッシュセメント
表層	1年後	0.082	0.126	0.074
	3年後	0.166	0.240	0.153
	7年後	0.260	0.307	0.256
	10年後	0.292	0.410	0.324
中層	1年後	0.026	0.067	0.026
	3年後	0.017	0.024	0.027
	7年後	0.037	0.044	0.024
	10年後	0.075	0.041	0.082

*表層: 深さ2cmまで, 中層: 深さ2~4cm

表 3.3-13 海水中コンクリート中のCl⁻量 (セメントベース 単位: wt%)

		普通セメント	B種高炉セメント	B種フライッシュセメント
表層	1年後	1.300	1.190	1.120
	3年後	1.260	1.370	1.430
	7年後	1.600	1.920	1.520
	10年後	2.460	2.080	1.680
中層	1年後	0.220	0.164	0.176
	3年後	0.598	0.171	0.717
	7年後	0.821	0.937	0.735
	10年後	1.400	1.350	0.862

*表層: 深さ2cmまで, 中層: 深さ2~4cm

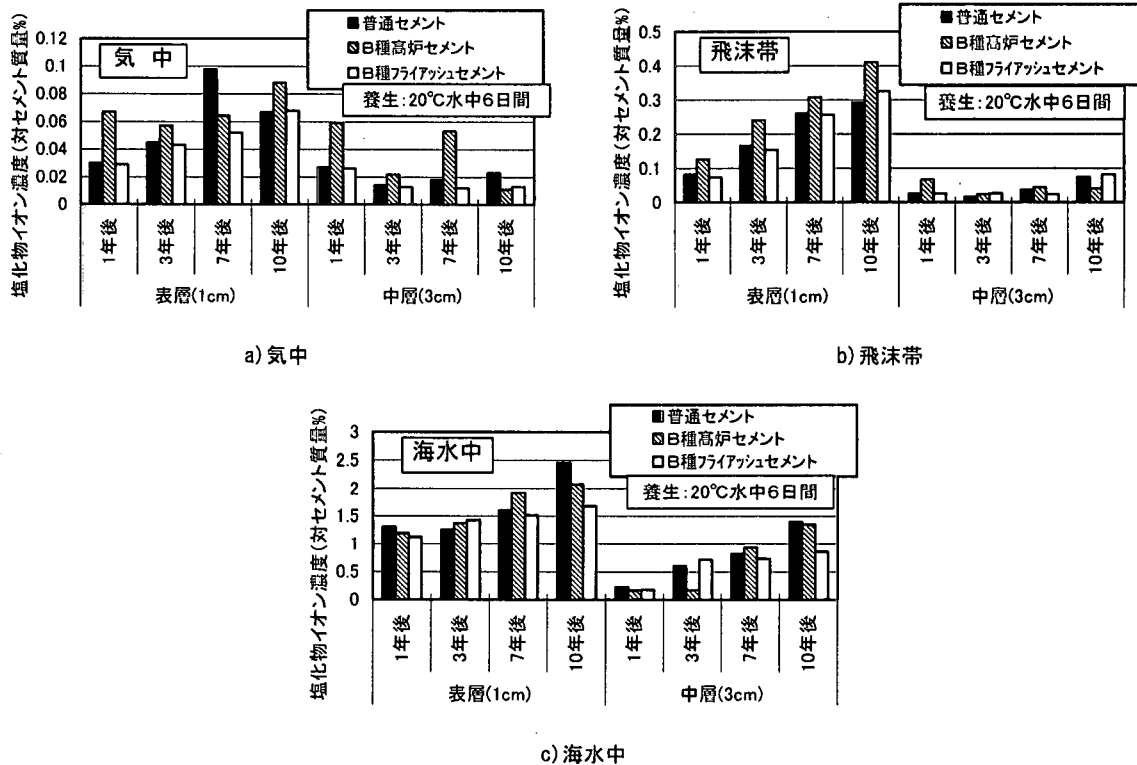


図 3.3-12 塩化物イオン濃度の比較

(2)フライアッシュコンクリートの塩化物イオン拡散係数

収集文献 11 件の内、拡散係数の値が記載されているものは 5 件、データ数は 15 個であった。図 3.3-13 に水結合材比と拡散係数の関係を示す。図中には、「示方書[施工編]」に掲載されている推定式による計算値も示した。データが少なく推定式を導くには至らなかったが、フライアッシュコンクリートのデータは、「示方書[施工編]」に示される普通セメントを使用したコンクリートの塩化物イオン拡散係数の推定式よりも概ね小さい値である。

さらに、同じデータを条件毎（養生、種別、試験期間）に図 3.3-14～図 3.3-16 に示す。養生期間が長い程、混入率が大きい（A種<B種<C種）程、試験期間が長い程、拡散係数が小さくなる傾向がある程度認められる。ここで、①「示方書[施工編]」に混合セメント B 種の養生期間が 7 日以上と規定されていること、②試験期間の長いデータは信頼性が高いと判断できること、を考えると、フライアッシュコンクリートの塩分浸透抵抗性は、『7 日以上養生した B 種および C 種で、高炉セメントおよびシリカフェームを用いたコンクリートと同等』に扱ってよいと考えられる。

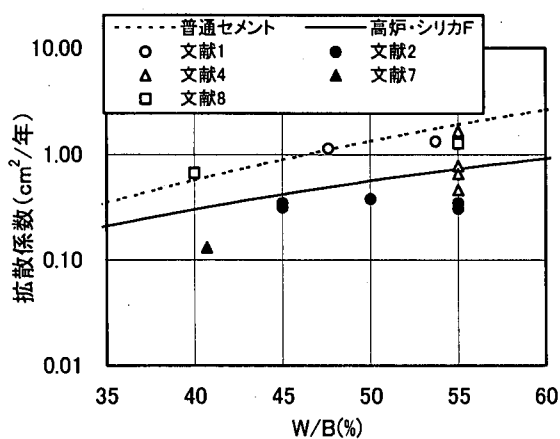


図 3.3-13 拡散係数と水結合材比の関係

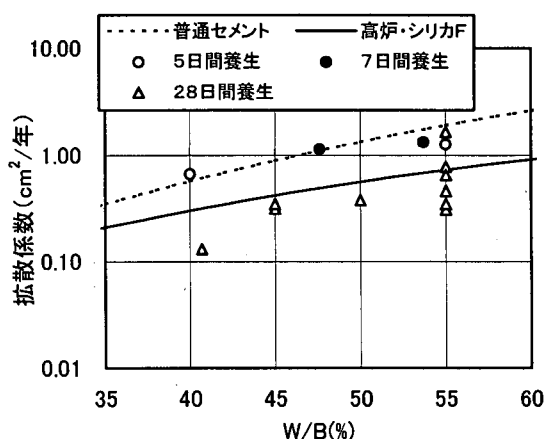


図 3.3-14 養生期間別に表示

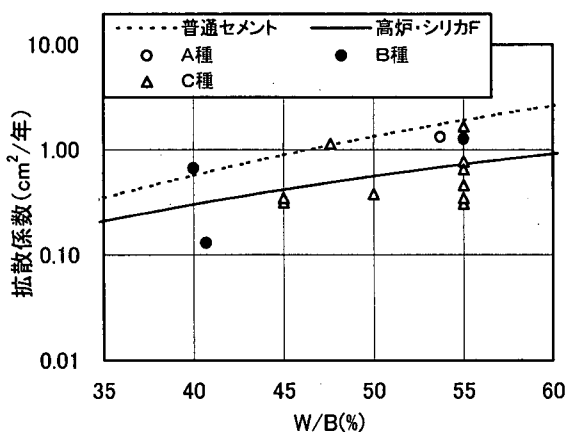


図 3.3-15 種類別に表示

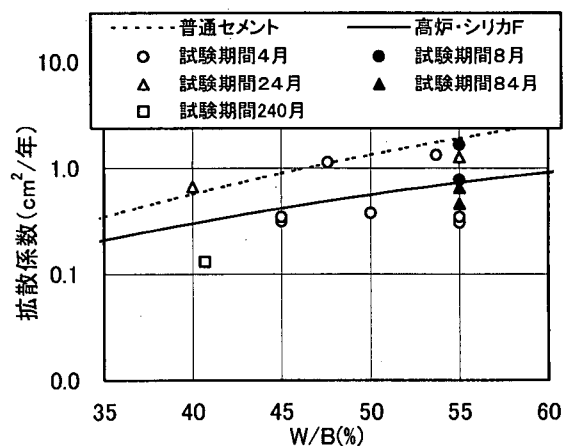


図 3.3-16 試験期間毎に表示

3.4 まとめ

フライアッシュを使用したコンクリートの塩分浸透抵抗性に関する文献(11件)を収集・分析した。その結果、フライアッシュコンクリートの塩分浸透抵抗性は、普通コンクリートよりも優れていることを示すデータが多いことが分かった。文献に報告されているフライアッシュコンクリートの塩化物イオンの拡散係数(15個)を「示方書[施工編]」⁹⁾に掲載されている高炉セメントおよびシリカフェームを使用したコンクリートの塩分拡散係数の推定式により得られた値と比較すると、「示方書[施工編]」に記載された養生条件を満足するフライアッシュB種およびC種を用いたコンクリートの塩化物イオンの拡散係数は、高炉セメントおよびシリカフェームを使用したコンクリートと非常に近い値であり、同じ推定式を用いてもよいと考えられた。

4. 鉄筋腐食が鉄筋コンクリートはり部材の曲げ性能に与える影響に関する検討

4.1 概要

今後、構造性能と耐久性の両者の統合評価を視野に入れた、より合理的な性能設計体系の構築が技術開発の目標となる。経年劣化と構造性能の関係を明らかにし、劣化を考慮した鉄筋コンクリート構造の性能評価方法を構築していくことが必要である。ここでは、劣化を促進させるために電食試験により鉄筋を強制的に腐食させた鉄筋コンクリートはり試験体の正負交番の曲げ載荷試験を実施し、鉄筋腐食が鉄筋コンクリートの力学特性に与える影響について検討した。

4.2 実験の概要

(1) 試験体の仕様

試験体の仕様を図 4.2-1 に示す。試験体のせん断スパン比は 3.43 であり、主鉄筋量は片側 1.14(%) である。試験体上下面のかぶりは純かぶりで 42mm、側面は純かぶりで 32mm となっている。

(2) 試験体の腐食手法

塩害、中性化などによる鉄筋腐食を再現するために、電食試験を実施した。電食試験は、鉄筋に電流を流すことにより、比較的短期間に鉄筋を腐食させることが出来る。ただし、かぶりコンクリートにひび割れ発生後は、水が浸透し易く錆が溶け出すなど、塩害の腐食形態とやや異なる現象が生じると言われている。電食試験の概略図を図 4.2-2 に示す。試験体の等曲げモーメント区間である中央 60cm を腐食させる試験区間として、容器を作成して 3%NaCl 溶液を満たし、試験体の鉄筋をプラス(+)極、鋼製エキスパンダメタルをマイナス(-)極とし、直流電流 10A を通電した。

腐食量の測定は、「コンクリート構造物の腐食・防食に関する試験方法ならびに規準(案)」¹⁰⁾ に準拠した。載荷試験後に鉄筋を取り出して 10%クエン酸二アンモニウム溶液(60℃)に 24 時間浸漬し、腐食生成物を除去して鉄筋の重量を測定し、健全な鉄筋との重量差を腐食量とした。主鉄筋の腐食量は、等曲げモーメント区間 60cm の平均値とし、上下主鉄筋計 8 本の腐食量を計測した。

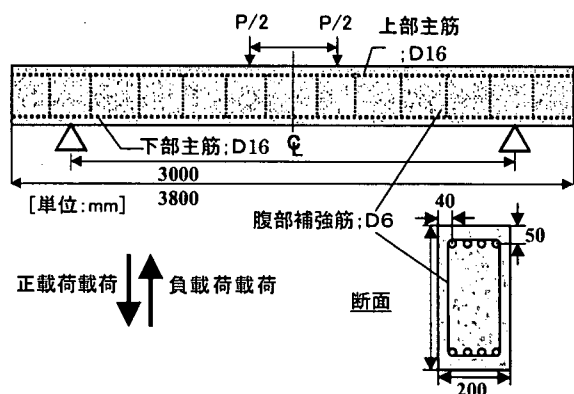


図 4.2-1 試験体の仕様

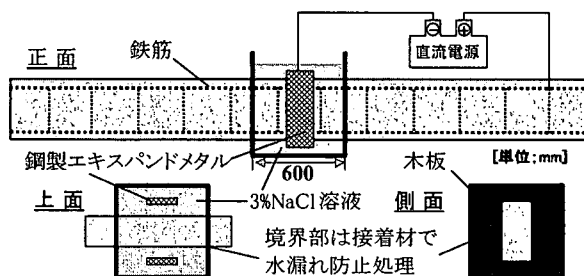


図 4.2-2 電食試験の概略図

(3) 実験ケース

試験ケースは表 4.2-1 に示す通りである。主な試験パラメータは腐食の程度(電食時間)と載荷方法である。腐食の程度は 4 段階とし、それぞれ通電時間を 18 時間、36 時間、72 時間及び、144 時間とした。載荷方法は、正負交番載荷を基本とし、比較用として単調載荷も実施した。載荷パターンの概略図を図 4.2-3 に示す。正負

交番載荷した試験体は、正方向載荷で下部鉄筋を降伏させた後に負方向に載荷して、そのまま負方向で終局に至らせた。各腐食程度で2体の試験を実施したが、試験体の上主鉄筋、下主鉄筋で腐食量とひび割れ状況が若干異なる場合もあったため、2体目の試験体は、試験体の上下面を逆にして載荷した。2体目の載荷パターンについては、試験体上部のコンクリートの圧壊を確認した後、さらに逆方向に載荷した。なお、コンクリートの圧壊は、目視により試験体上面の剥離状況を確認するとともに、コンクリートケージの圧縮ひずみ値の低下を確認することにより判断した。

表 4.2-1 実験ケース

ケース名	腐食程度	載荷方法
A1	健全	交番載荷
A2	健全	交番載荷 2
A3	通電時間 36 時間	交番載荷
A4	通電時間 36 時間	交番載荷 2
A5	通電時間 72 時間	交番載荷
A6	通電時間 72 時間	交番載荷 2
B1	健全	単調載荷
B2	健全	交番載荷 2
B3	通電時間 18 時間	交番載荷
B4	通電時間 72 時間	単調載荷
B5	通電時間 144 時間	交番載荷
B6	通電時間 144 時間	交番載荷 2

注) 交番載荷 2 はコンクリート圧壊確認後、逆方向に載荷した。

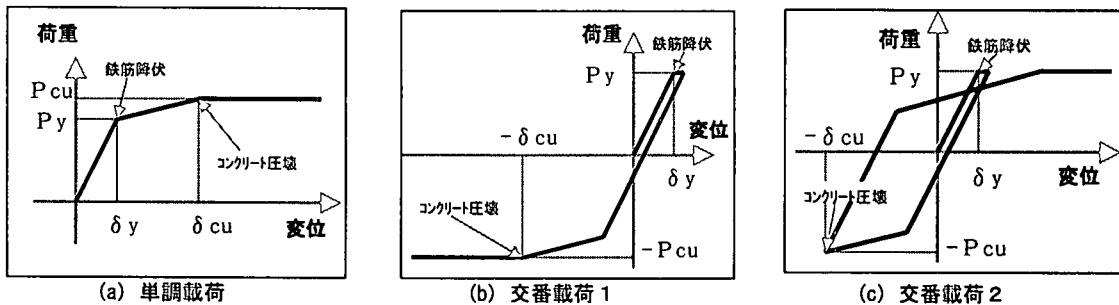


図 4.2-3 載荷パターンの概略

(4) 材料試験結果

表 4.2-2 に鉄筋の引張試験結果、表 4.2-3 に試験時のコンクリートの強度試験結果を示した。

表 4.2-2 鉄筋の材料試験結果

鉄筋径	降伏強度 (N/mm ²)	降伏ひずみ (×10 ⁻⁶)	ヤング係数 (N/mm ²)
D16	344	1818	1.94 × 10 ⁵

表 4.2-3 コンクリートの材料試験結果

試験体	圧縮強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (N/mm ²)	割裂引張強度 (N/mm ²)
A1~A6	40.0	3.01 × 10 ⁴	3.4
B1~B6	50.5	3.10 × 10 ⁴	4.0

4.3 実験結果および考察

(1) 電食試験による鉄筋腐食量

図 4.2-4 (a) に、通電時間と腐食量の関係を示す。主鉄筋の腐食量は、上鉄筋の方が下鉄筋よりも大きくなる

傾向にあった。これは、上部と下部における若干のかぶりの違いやブリージングなどによるコンクリートの品質に起因していると考えられる。主鉄筋の腐食量は、上部と下部で若干異なるものの、その平均値については、通電時間と比較的良好な線形関係にあった。

図 4.2-4(b)には、個々の鉄筋で測定した場合の主鉄筋腐食量の平均値と最大値の関係について示している。電食試験においては、主鉄筋の腐食量の平均値と最大値はほぼ線形関係にあり、最大値は平均値の約 1.5 倍程度であった。図 4.2-4(c)に、主鉄筋の腐食量と最大ひび割れ幅の関係を示す。主鉄筋の平均腐食量が 5Wt% 以上で表面に主鉄筋に沿ったひび割れが確認された。表面にひび割れが発生して以降は、腐食量が増加するに従ってひび割れ幅も増加する傾向にある。図 4.2-4(d)には、主鉄筋と補強筋の平均腐食量の関係を示す。鉄筋径が小さいほど腐食量が多くなる傾向にあり、主鉄筋の平均腐食量と補強筋の平均腐食量にはほぼ線形関係にある。

表 4.2-4 に各試験体の主鉄筋の平均腐食量と電食時間毎の平均値の一覧を、図 4.2-5 には一般的に認識されている劣化進行過程の区分¹¹⁾の概念図を示す。本試験体の場合は、約 5Wt% がひび割れの発生する鉄筋腐食量と判断できることから、電食時間 18 時間は進展期、電食時間 72 時間は加速期に対応すると考えられる。厳密な区分けは難しいが、電食時間 144 時間(鉄筋腐食量約 14Wt%)は、試験体の劣化状況などから判断して、ある程度劣化が進行した劣化期に対応すると考えられる。

(2) 載荷試験結果

図 4.2-6(a)は、鉄筋降伏前後の範囲における荷重-変位関係について腐食量の影響を比較したものである。電食試験 18 時間では耐力の低下はほとんどないが、電食 144 時間程度で約 2 割程度降伏耐力が低下している。

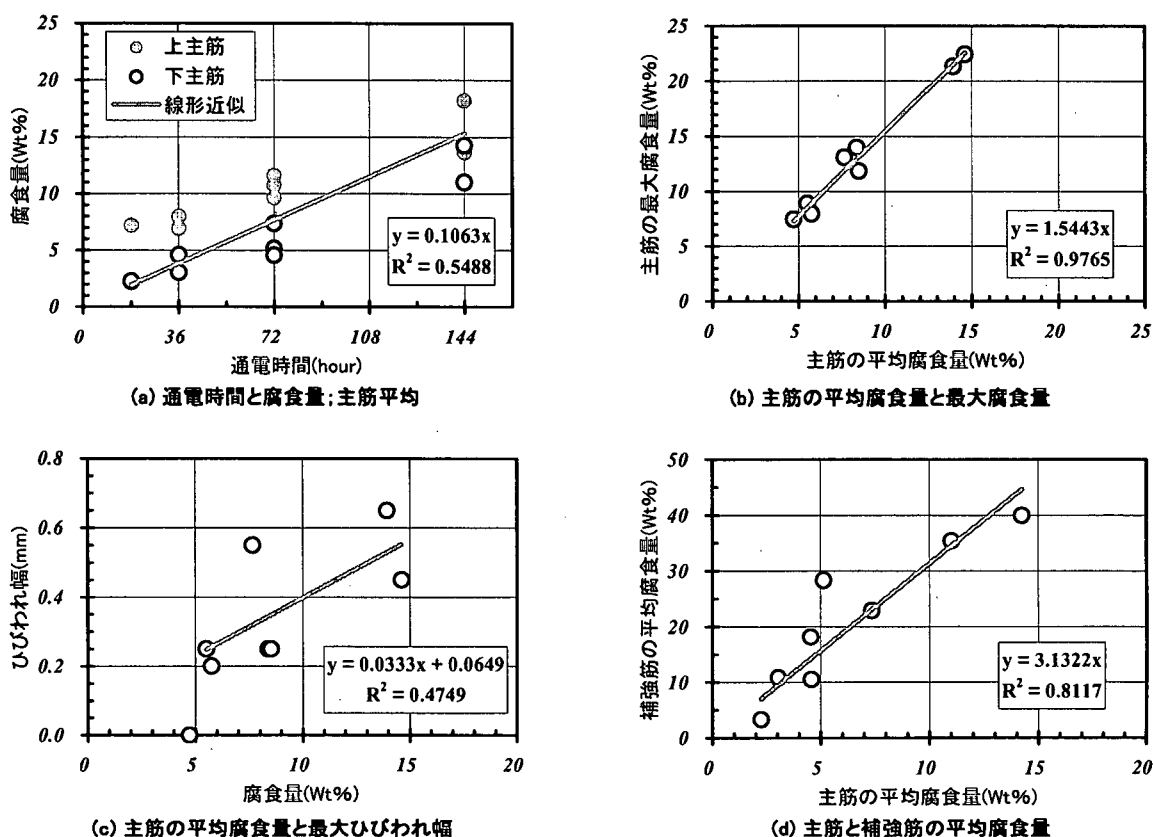


図 4.2-4 電食試験結果

表 4.2-4 腐食量一覧

試験体	電食時間 (時間)	主鉄筋の平均 腐食量(Wt%)	電食時間毎 の平均(Wt%)
B3	18	4.72	4.72
A3	36	5.51	
A4	36	5.75	
A5	72	8.38	8.19
A6	72	8.51	
B4	72	7.67	
B5	144	14.6	14.4
B6	144	13.9	

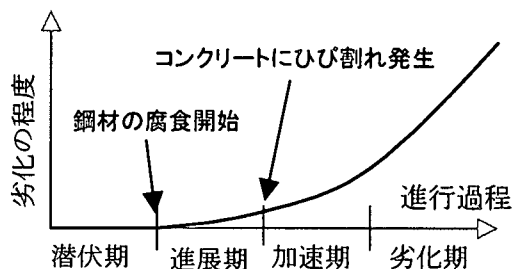


図 4.2-5 一般的な劣化進行過程の区分⁽¹⁰⁾

降伏耐力の低下は鉄筋断面の欠損に起因すると考えられる。図 4.2-6(b)の荷重－中央鉄筋ひずみ関係から電食 144 時間では、鉄筋とコンクリートとの付着も低下していると考えられるが、剛性はあまり低下していない。なお、鉄筋ひずみゲージはコーティングしており、貼付位置については鉄筋腐食が非常に軽微であった。

図 4.2-7 は、荷重パターンと腐食量が荷重－変位関係に与える影響について示したものである。コンクリートの圧壊以降単調载荷した試験体については、腐食量が増加するほど耐力はやや低下する傾向にあるものの、靱性率(最大荷重時変位/鉄筋降伏変位)で 30 程度の高い変形性能があることが分かる。これは、鉄筋降伏後に逆方向に単調载荷したのもでも一方向に単調载荷したのもでも、大きな差は認められない。従って、鉄筋降伏レベルの交番载荷がその後の耐力・変形性能に及ぼす影響は小さいものと考えられる。

一方、コンクリートの圧壊確認後に逆方向に载荷した試験体については、腐食量が多いほど耐力、変形性能ともに低下する結果となった。単調载荷した試験体については、圧縮縁コンクリートの圧壊後も十分に圧縮鉄筋が圧縮力を分担して圧縮鉄筋が座屈しにくいのにに対して、コンクリートの圧壊以降に逆方向へ载荷した試験体では、正方向载荷時の残留ひずみがあり、腐食ひび割れによってかぶりコンクリートによる拘束力が小さくなるために、圧縮鉄筋が座屈し易くなり、耐力および変形性能が著しく低下したものと考えられる。

図 4.2-8 は、荷重上面のコンクリート圧縮ひずみおよび圧縮側の鉄筋ひずみと中央変位との関係について示している。この図より、鉄筋が腐食が進行するとコンクリートの圧縮ひずみが解放される(圧壊)変位が小さくなる傾向にあること、コンクリートの圧壊以降、圧縮側鉄筋に徐々に圧縮力が作用していく様子が分かる。

図 4.2-9 は、鉄筋降伏時の健全な試験体と鉄筋が腐食した試験体のひび割れ状況を示したものである。腐食によるひび割れがあると、その付近では、荷重によるひび割れは発生しにくく、ひび割れの分散性が悪くなる事が分かる。また、主鉄筋に沿った試験体側面のひび割れは、かぶりコンクリートの剥落を誘発する可能性がある。

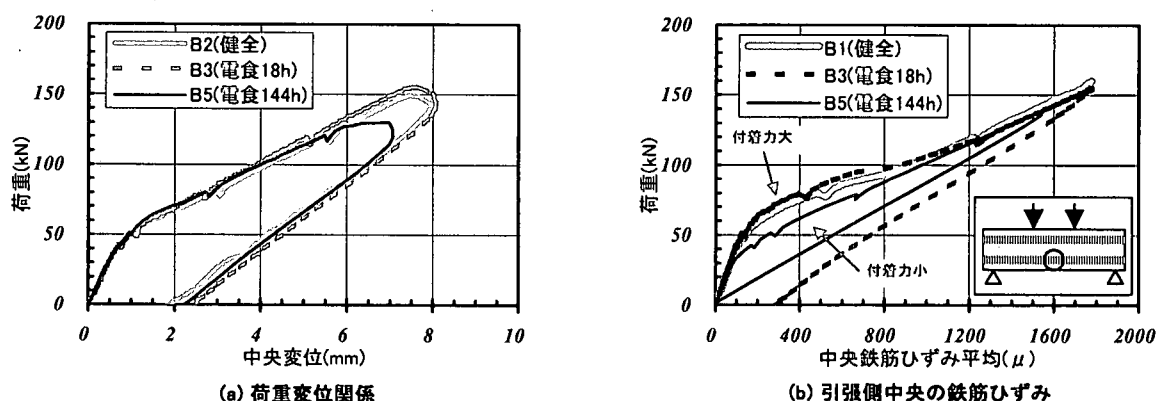


図 4.2-6 载荷試験結果(鉄筋降伏前後)

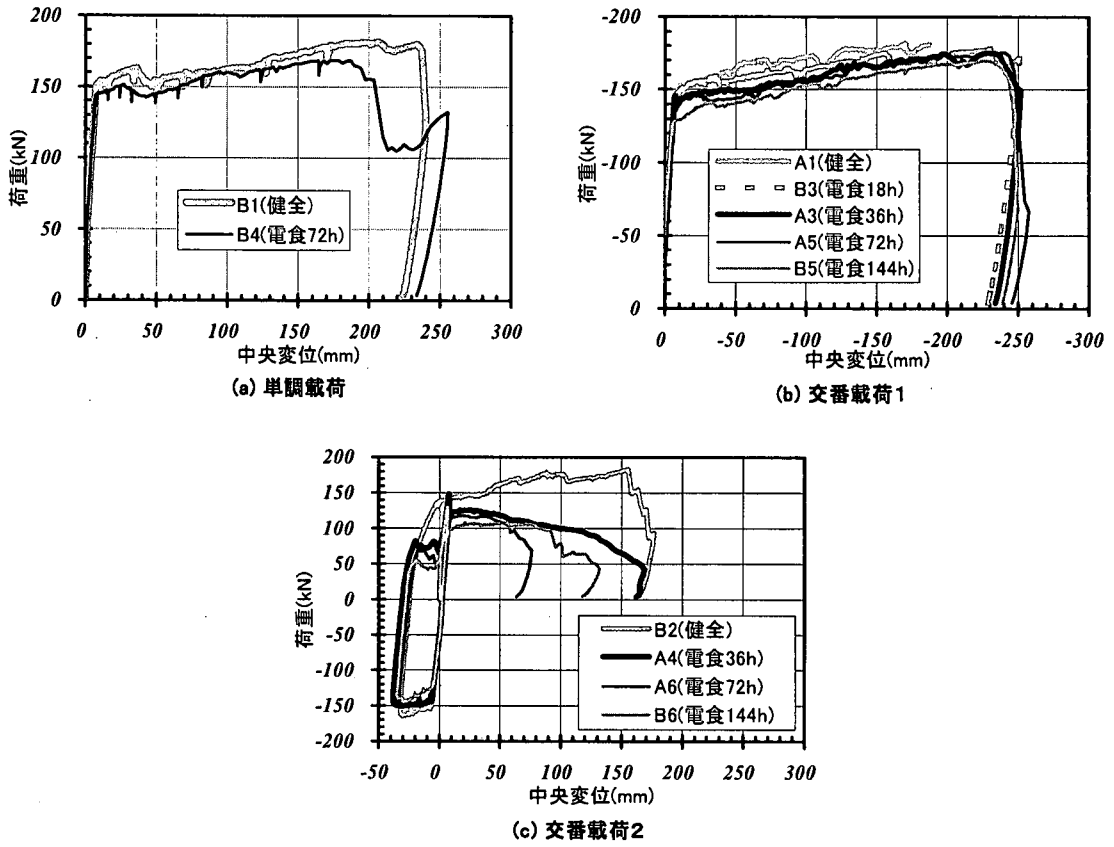


図 4.2-7 載荷試験結果(荷重変位曲線全体)

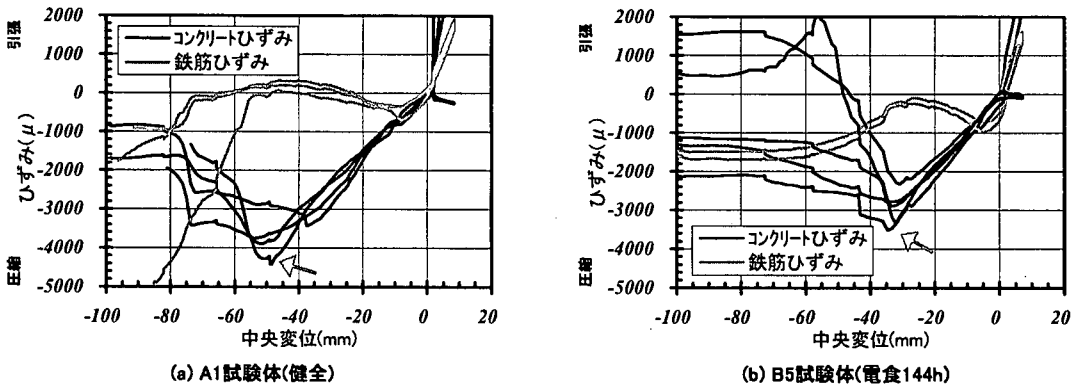


図 4.2-8 載荷試験結果(載荷面上部のコンクリートひずみと鉄筋ひずみ)

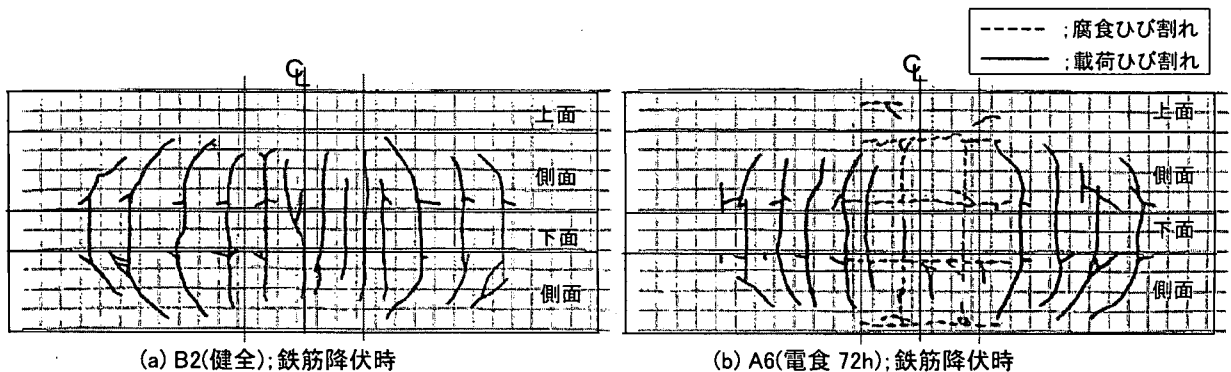


図 4.2-9 ひび割れ状況比較

(3) 腐食が力学特性に与える影響

図 4.2-10 に、主鉄筋の平均腐食量と力学特性の関係を示す。鉄筋降伏荷重およびコンクリート圧壊時の荷重は、主鉄筋の平均腐食量とほぼ線形関係にあることが分かる。鉄筋降伏変位については、平均腐食量 5～8Wt%まではほとんど低下しないが、平均腐食量 8Wt%以降では徐々に低下している。鉄筋が腐食した場合、ひび割れが表面に現れるまでは、鉄筋腐食による膨張圧により付着力が増大する傾向にあり⁸⁾、ひび割れが表面に発生して以降については、付着力が低下することにより局所的な鉄筋ひずみは緩和されると考えられる。コンクリート圧壊時の変位については、鉄筋が腐食すると低下する傾向にあるものの、ひび割れが発生する腐食量と考えられる約 5Wt%以降はほとんど変わらない。鉄筋比の高い鉄筋コンクリート部材は、鉄筋腐食によりかぶりコンクリートが鉄筋配置面にそって剥落しやすくなり、複鉄筋の場合は、圧縮側のかぶりコンクリートのはがれ易いことにより、載荷面上部におけるコンクリートの圧縮ひずみの解放も早くなると考えられる。

最大荷重および最大荷重時の変位については、コンクリートの圧壊以降の載荷方法および腐食量が大きく影響する結果となった。特に、コンクリートの圧壊以降では、交番載荷が終局変形性能に与える影響は大きい。

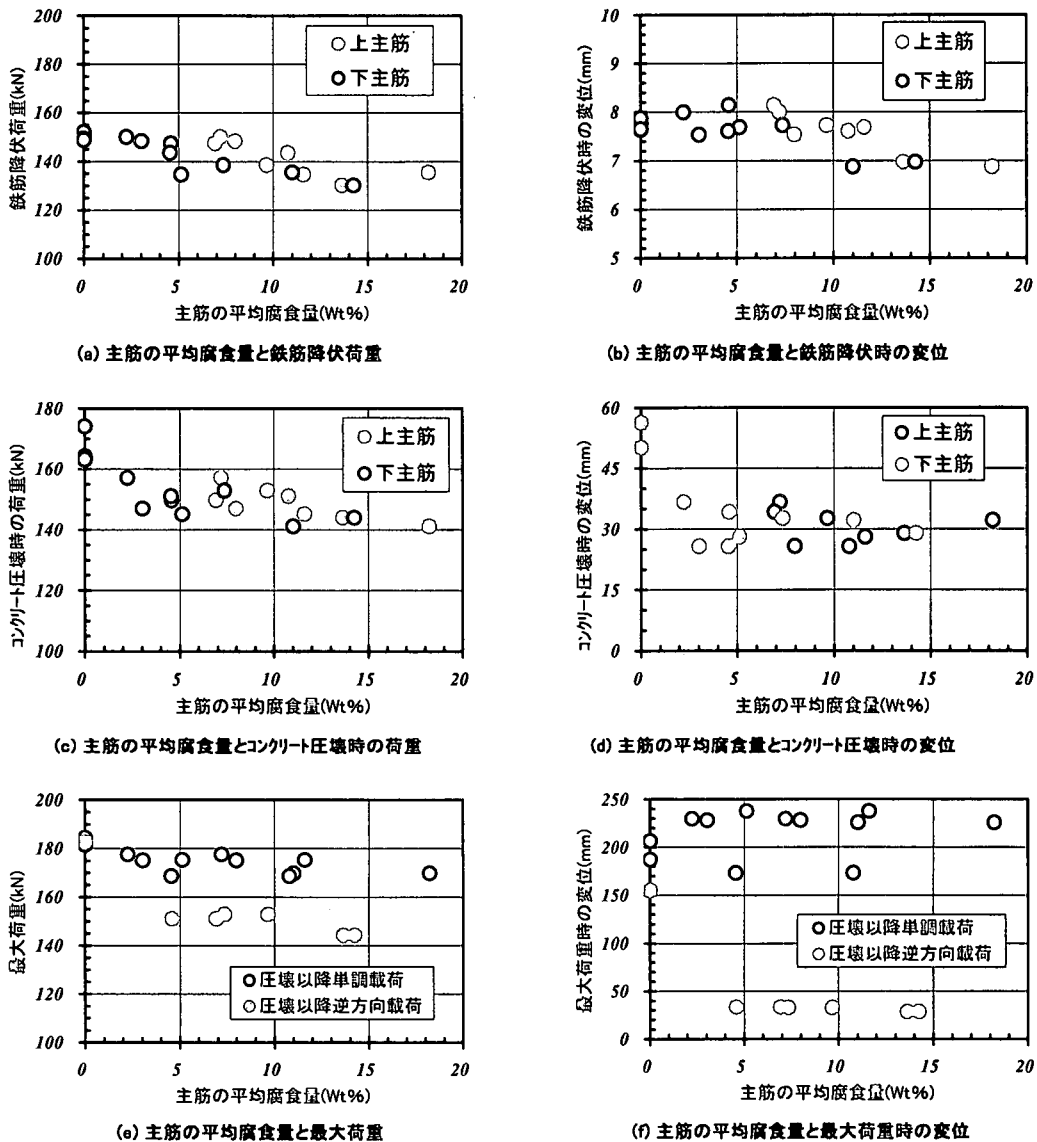


図 4.2-10 主鉄筋平均腐食量と力学特性

図 4.2-11 には、腐食による鉄筋の断面減少のみを考慮して、「示方書[構造性能照査編]」¹²⁾に示されている断面計算手法を用いて降伏モーメントと終局モーメントを計算し、試験結果と比較した図を示す。降伏耐力、終局耐力ともに、鉄筋の腐食量 15Wt%の範囲まで概ね良好に評価可能であることが分かる。

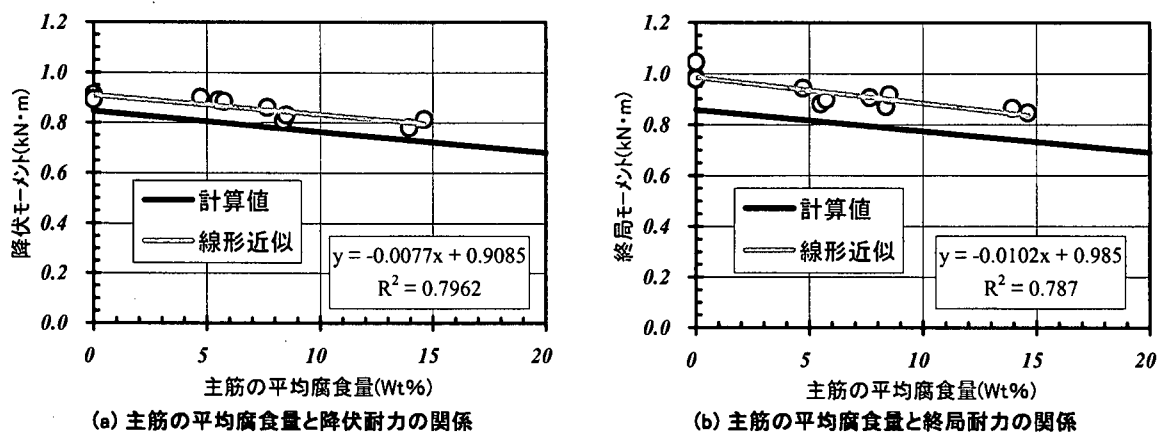


図 4.2-11 耐力と計算式の関係

4.4 まとめ

電食により腐食させた鉄筋コンクリートはり部材の曲げ載荷実験を行った。実験結果より明らかとなった事項を取り纏めると次の通りである。

- ①腐食量 5Wt%の範囲までは、鉄筋腐食が鉄筋降伏変形に与える影響は小さい。
- ②鉄筋を密に配置した鉄筋コンクリートはり部材では、鉄筋腐食によって鉄筋配置面に沿ったひび割れが入りやすい。複鉄筋の場合は、圧縮側の鉄筋配置面に沿った腐食ひび割れは、コンクリート圧壊時の変形性能を低下させる要因となる。曲げ降伏までの交番載荷履歴（本実験では 1 回の履歴）であれば、鉄筋腐食量が 5Wt%を超えていても終局変形に与える影響は小さい。
- ③降伏耐力および終局耐力は鉄筋の腐食量増加に伴って低下するが、腐食による鉄筋の断面減少のみを考慮すれば、鉄筋の腐食量 15Wt%の範囲までは、「示方書[構造性能照査編]」に示されている計算法を用いて概ね良好に評価可能である。
- ④鉄筋降伏域では、交番載荷が鉄筋コンクリートはり部材の耐力・変形性能に与える影響は小さいが、コンクリート圧縮破壊以降では、鉄筋腐食量が正負交番載荷された時の圧縮側主鉄筋の座屈に与える影響は大きく、曲げ変形性能を大きく低下させる可能性がある。

5. まとめ

耐久性照査に関連する検討結果をまとめると、次の通りである。

(1) 鉄筋腐食による経年劣化予測法

鉄筋腐食によるひび割れ発生時期の評価は、鉄筋の腐食速度評価とひび割れ発生時の腐食量評価の組み合わせにより評価することができる。鉄筋の腐食速度評価方法としては、森永らの方法、梶田らの方法、松村らの方法、関らの方法がある。これらの方法では、コンクリートの条件として塩化物イオン濃度、水セメント比、かぶりなど、環境条件として温度、湿度などを変数としている。一方、ひび割れ発生時の腐食量評価方法としては、森永の方法、横関らの方法、これを基にした腐食防食小委員会の簡易式、西内らの方法があ

る。これらの方法では、かぶり、鉄筋径などを変数としている。

(2) フライアッシュコンクリートの塩分浸透抵抗性

フライアッシュコンクリートの塩分浸透抵抗性は、普通コンクリートよりも優っていることを示すデータが多いことが分かった。報告されているフライアッシュコンクリートの塩化物イオンの拡散係数(15個)を「示方書[施工編]」に掲載されている高炉セメントおよびシリカフェームを使用したコンクリートの塩分拡散係数の推定式により得られた値と比較すると、「示方書[施工編]」に記載された養生条件を満足するフライアッシュB種およびC種を用いたコンクリートの塩化物イオンの拡散係数は、高炉セメントおよびシリカフェームを使用したコンクリートと非常に近い値であり、同じ推定式を用いてもよいと考えられた。

(3) 鉄筋腐食が正負交番載荷した鉄筋コンクリートはりの力学特性に及ぼす影響

電食により腐食させた鉄筋コンクリートはり試験体の正負交番曲げ載荷試験の結果、①鉄筋の腐食量が5wt%の範囲までは、鉄筋腐食が鉄筋コンクリートはりの力学特性に与える影響は小さいこと、②耐力は鉄筋の腐食量増加に伴って低下するが、腐食による鉄筋の断面減少のみを考慮すれば概ね良好に評価可能であること、③コンクリートの圧壊以降に関しては、正負交番載荷レベルと鉄筋腐食量との関係で圧縮側主鉄筋の座屈に与える影響は大きくなる場合があり、鉄筋コンクリートはり部材の変形性能を大きく低下させる可能性があることが明らかとなった。

[(財) 電力中央研究所 松村卓郎, 松尾豊史]

【参考文献】

- 1) 森永 繁：鉄筋の腐食速度に基づいた鉄筋コンクリート建築物の寿命予測に関する研究，東京大学学位請求論文，1986. 11.
- 2) 森永 繁・入野一男・太田達見・土本凱士：腐食による鉄筋コンクリート構造物の寿命予測，コンクリート工学論文集第1巻第1号，pp. 177-189，1990. 1.
- 3) 笹淵優樹・榊田佳寛・中村成春：塩化物を含んだコンクリート中の鉄筋腐食速度に関する暴露試験，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 20，No. 1，pp. 317-322，1998.
- 4) 松村卓郎・金津 努・西内達雄：海岸近くの大気中に位置するコンクリート構造物の鉄筋腐食進行評価手法，土木学会論文集，No. 634/V-45，pp. 303-314，1999. 11.
- 5) 関 博・松井邦人・松島 学・金子雄一・田畑裕：コンクリート構造の寿命予測に関する一考察，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 12，No. 1，pp. 569-574，1990.
- 6) 鳥取誠一：鉄筋腐食に関する暴露試験等に基づいたコンクリート構造物の劣化予測，京都大学学位論文，2002. 2.
- 7) 土木学会：コンクリート技術シリーズ 40 鉄筋腐食・防食および補修に関する研究の現状と今後の動向(その2)ーコンクリート委員会腐食防食小委員会(2期目)報告一，2000.
- 8) 西内達雄・金津 努・石田博彰・松村卓郎：塩害劣化を受ける鉄筋コンクリートの力学的基本特性ーひび割れ発生機構および付着性状一，電力中央研究所報告(U92060)，1993.
- 9) 土木学会：[平成13年制定]コンクリート標準示方書・施工編，2002. 3.
- 10) 日本コンクリート工学協会：コンクリート構造物の腐食・防食に関する試験方法ならびに規準(案)，1987. 4
- 11) 土木学会：[平成12年制定]コンクリート標準示方書・維持管理編，2001. 1.
- 12) 土木学会：[平成13年制定]コンクリート標準示方書・構造性能照査編，2002. 3.