

特集：材料技術

した。その後、気温 20℃、湿度 60%、炭酸ガス濃度 5% の条件下で促進中性化を行った。促進中性化期間は、最大を 553 日（約 18 箇月）と設定し、かぶり 20mm の鉄筋を中性化域に、かぶり 45mm の鉄筋を非中性化域にする期間とした。各促進中性化期間は W/C が 70% では 266 日、W/C が 65% では 364 日、W/C が 60% では 476 日、W/C が 50% では 553 日で促進中性化後の中性化深さは表 3 に示すとおりである。

鉄筋腐食速度を測定した環境は、気温が 4 環境 (10, 20, 30, 40℃)、湿度が 3 環境 (60%, 75%, 90%) の計 12 環境とした。気温と湿度の制御には、恒温恒湿室を用い、各環境で各供試体を 1 週間静置した後、鉄筋腐食速度を測定した。また、鉄筋腐食速度の測定は、この期間前後の促進中性化期間と鉄筋を取り出すまでの期間も定期的に行った。なお、この時の環境は気温 20℃、湿度 60% とした。

表 1 コンクリートの配合

W/C* (%)	単位量 (kg/m ³)			
	W	C	S	G
50	165	330	778	1039
60	165	275	835	1028

C: 普通ポルトランドセメント, S: 細骨材 (洗い海砂, 砕砂), G: 粗骨材 (砕砂), *: W/C=65% および 70% の配合は W/C=60% の配合に水を加えて所定の W/C となるように設定した。

表 2 材齢 28 日の圧縮強度

W/C (%)	塩化物イオン量 (Cl ⁻ : kg/m ³)				
	0	0.6	1.2	2.0	5.0
50	32.5	31.5	34.1	32.5	32.5
60	24.2	28.0	26.8	26.8	25.1
65	21.7	22.9	22.6	22.3	22.2
70	17.7	19.1	19.5	19.9	20.1

単位: N/mm²

表 3 中性化深さ

W/C (%)	塩化物イオン量 (Cl ⁻ : kg/m ³)				
	0	0.6	1.2	2.0	5.0
50	12.2	16.3	19.0	20.0	10.8
60	36.5	37.3	35.9	37.9	31.3
65	29.5	43.5	44.8	43.8	35.9
70	47.2	47.7	45.7	44.2	36.1

単位: mm

2.2 分極抵抗から求めた鉄筋腐食速度の検討

鉄筋腐食速度は、非破壊測定法の一つである分極抵抗法により求めた。測定は供試体作製時から定期的に行った。鉄筋を試料極、対向するステンレス丸鋼を対極として、10Hz と 20mHz の 2 周波数の交流インピーダンス値から見かけの分極抵抗 R_p' (Ω) を求め、それに鉄筋の表面積を掛けて真の分極抵抗 R_p (Ω・cm²) とした。鉄

筋腐食速度は腐食電流密度 I_{corr} (A/cm²) を式 (1) から算出し、さらにファラデーの第 2 法則から年間当りの単位表面積当りの腐食減量 (mg/cm²/年) として求めた。なお、得られた値は鉄筋全表面積当りの平均腐食速度である。

$$I_{corr} = L/R_p \tag{1}$$

ただし、 I_{corr} : 腐食電流密度 (A/cm²),

R_p : 分極抵抗 (Ω・cm²), L : 定数 (=0.026V)

次に、この分極抵抗法により求めた鉄筋の腐食速度の信頼性について検証した。検証方法は、作製時から鉄筋取り出しまで経時的に測定している鉄筋の腐食速度を積算して算出した腐食量と、供試体から鉄筋を取り出し、クエン酸アンモニウム水溶液で錆を除去した鉄筋の重量測定から求めた腐食量とを比較するものである。分極抵抗から算出した腐食量と腐食減量から算出した腐食量の関係は、図 2 に示すとおり、ほぼ 1:1 の比例関係であることが確認できた。

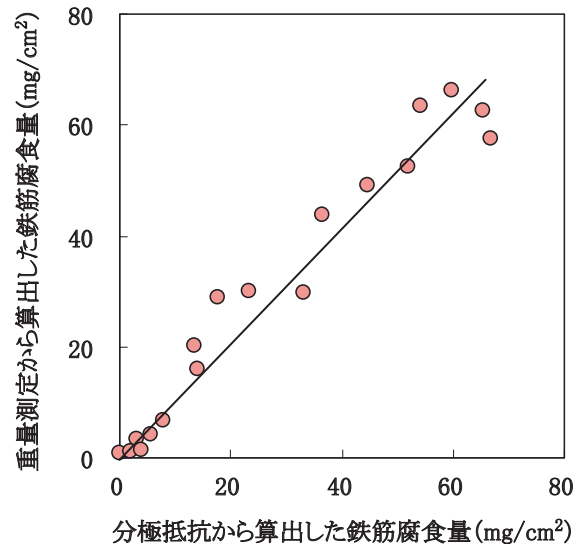


図 2 分極抵抗から算出した鉄筋腐食量と重量測定から算出した鉄筋腐食量

2.3 気温と鉄筋腐食速度の関係

2.3.1 供試体試験

気温と鉄筋の腐食速度の関係をかぶり 20mm (中性化域)、湿度 60% の供試体について水セメント比ごとに整理した結果を図 3～6 に示す。鉄筋腐食速度は、いずれの水セメント比でも気温が高くなるにつれて直線的に増大し、その影響は鉄筋腐食速度が速いものほど大きくなる傾向にあった。この傾向は、湿度を 75%、90% と変えた場合でも、また、鉄筋かぶり 45mm の場合でも同様であった。したがって、鉄筋腐食速度と気温には、いずれの場合でも正の直線関係があることがわかった。

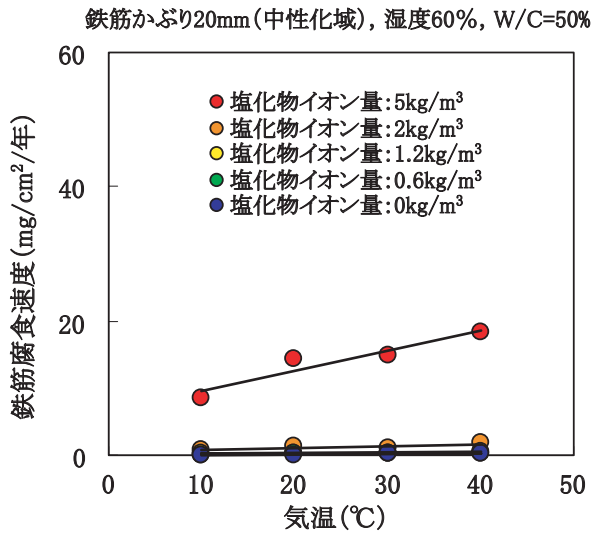


図3 気温と鉄筋腐食速度の関係 (W/C=50%)

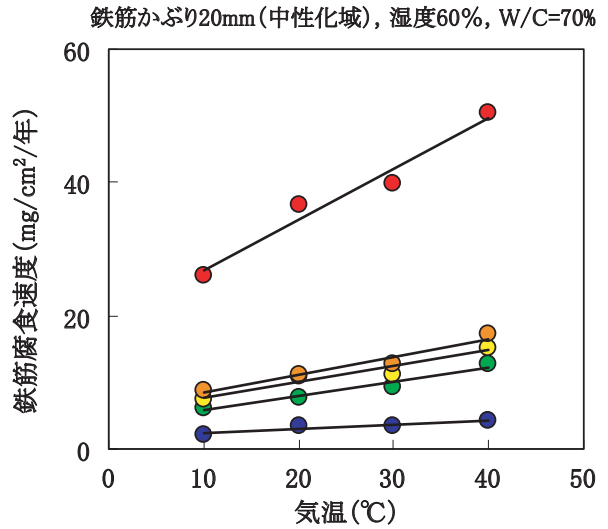


図6 気温と鉄筋腐食速度の関係 (W/C=70%)

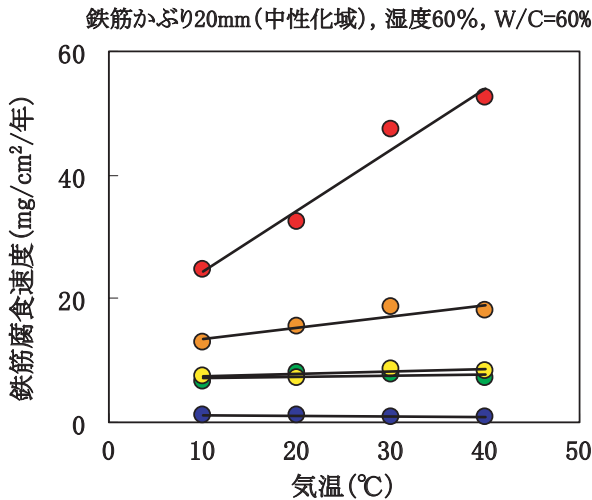


図4 気温と鉄筋腐食速度の関係 (W/C=60%)

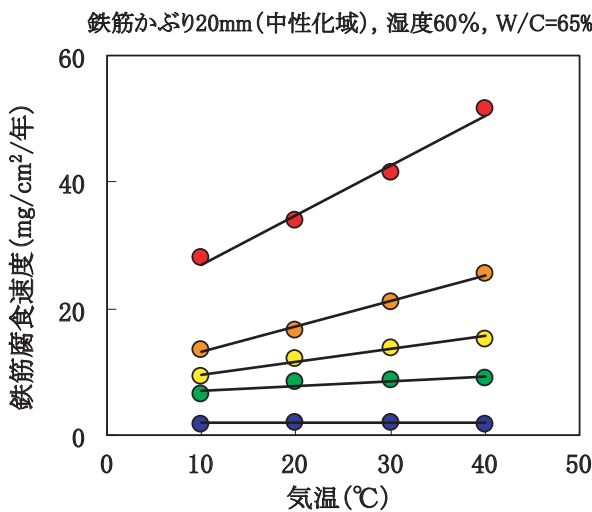


図5 気温と鉄筋腐食速度の関係 (W/C=65%)

Vと絶対温度Tの関係をアレニウスの定理式(2)から導き、腐食速度の対数と絶対温度の逆数は比例関係(式(3))にあることを示している。

$$k = V/C = a \cdot \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \quad (2)$$

$$\log V = -A \frac{1}{T} + B \quad (3)$$

ここで、 k : 反応速度定数、 a : 頻度因子、 T : 絶対温度、 E : 活性化エネルギー、 R : 気体定数、 V : 反応速度 = $k \cdot C$,

$$A = \log \frac{E}{R}, B = \log C, C: \text{反応物の濃度}$$

前述した供試体の試験結果の腐食速度と温度の関係(例えば、図5)を上記関係で整理すると、図7のように

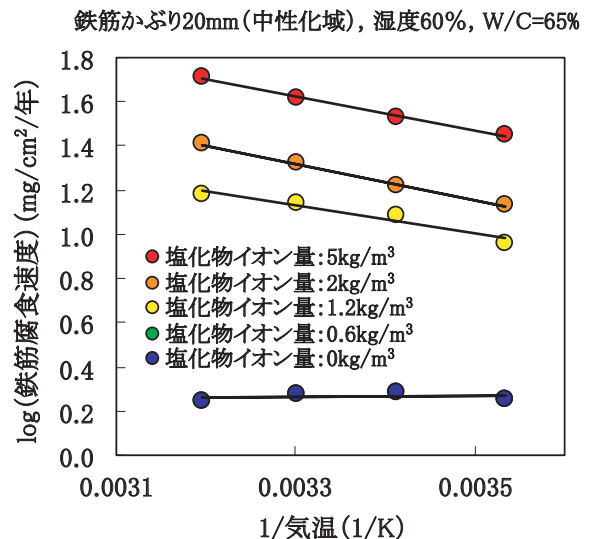


図7 アレニウスの定理に基づいた関係

2.3.2 反応速度論に基づいた検討

反応速度と絶対温度の関係は、アレニウスの定理に基づくことがわかっている。大即ら⁴⁾は、鉄筋の腐食速度

特集：材料技術

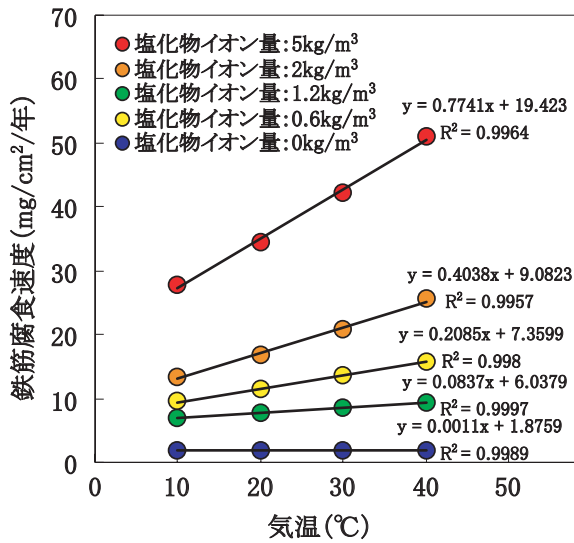


図8 気温と鉄筋腐食速度の関係
(アレニウスの定理に基づいた計算値)

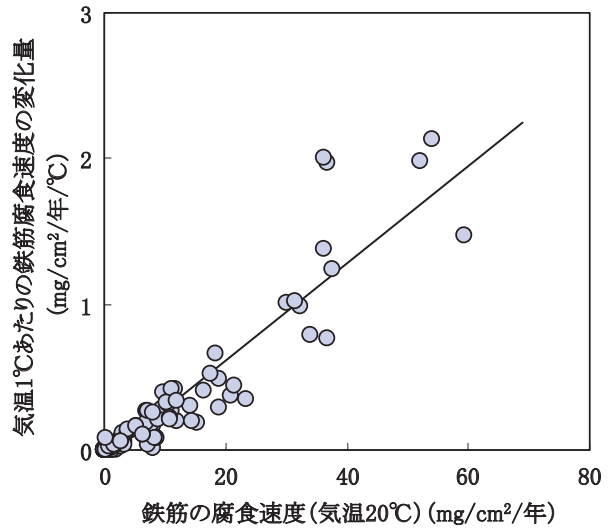


図9 鉄筋腐食速度と気温1°Cあたり変化量

整理される。ここで、図7の各データの傾き(式(3)のA)とY切片(式(3)のB)から求めた値(アレニウスの定理に基づいた計算値)について、腐食速度と摂氏温度の関係について直線近似できるか否かの検討を行った。その結果は、図8に示すとおりで、各直線近似の相関係数(R²値)は、いずれも0.99以上であり、鉄筋腐食によるひび割れや浮きが発生する前の段階において(本報告の範囲内)は、腐食速度と摂氏気温の関係は線形近似できることがわかる。

2.3.3 気温と鉄筋腐食速度の関係

鉄筋腐食速度と気温の関係が線形であることから、供試体ごとに気温1°Cあたりの鉄筋腐食速度の変化量を気温と鉄筋腐食速度の関係の傾きから求め、一般的な気温であり試験結果数を多く得られている20°Cでの鉄筋の腐食速度との関係を算出した。その結果は、図9に示すとおりで、気温20°Cでの鉄筋の腐食速度が大きいものほど、気温1°Cあたりの鉄筋腐食速度の変化量は大きく、その関係は比例関係であることがわかった。また、各気温における鉄筋腐食速度は気温20°Cの値を用いた式(4)により算出できる。

なお、環境を変化させる前後の気温20°C、湿度60%の環境条件で測定した鉄筋腐食速度は、いずれの供試体でも同様の値であったことから、この試験期間中に著しい鉄筋腐食は生じていないと考えられる。

$$V = (1 + 0.0381(t - 20))V_0 \quad (4)$$

ここで、

- V_0 : 気温補正前の鉄筋腐食速度 (mg/cm²/年)
- V : 気温の影響を加えた鉄筋腐食速度 (mg/cm²/年)
- t : 気温 (°C)

2.4 湿度と鉄筋腐食速度の関係

湿度と鉄筋腐食速度の関係をかぶり20mm(中性化域)、気温20°Cの供試体について水セメント比ごとに整理

鉄筋かぶり20mm(中性化域)、気温20°C、W/C=50%

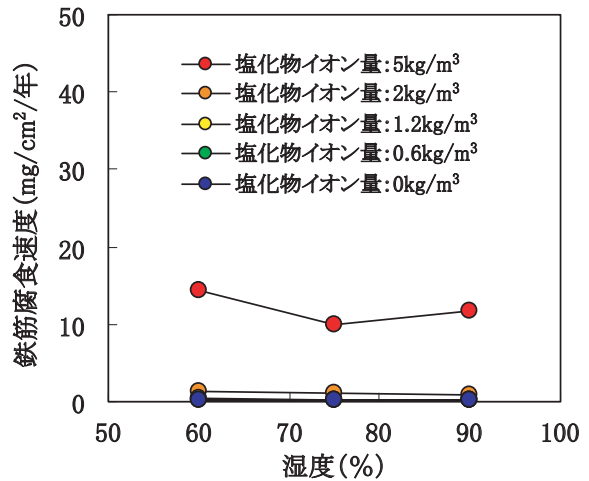


図10 湿度と鉄筋腐食速度の関係 (W/C=50%)

鉄筋かぶり20mm(中性化域)、気温20°C、W/C=60%

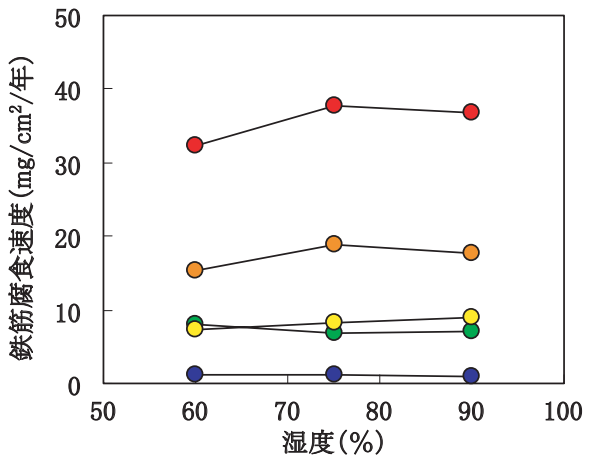


図11 湿度と鉄筋腐食速度の関係 (W/C=60%)

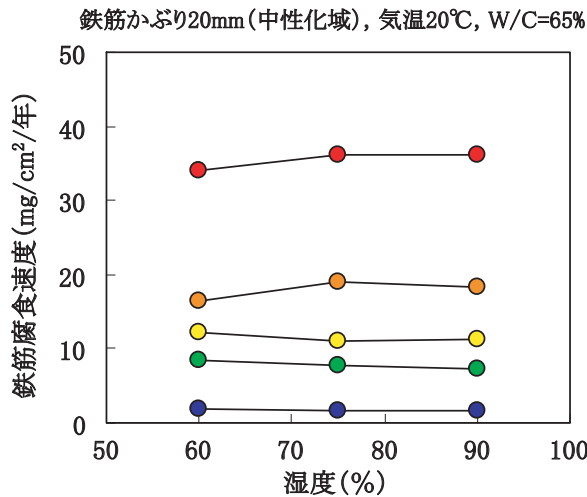


図12 湿度と鉄筋腐食速度の関係 (W/C=65%)

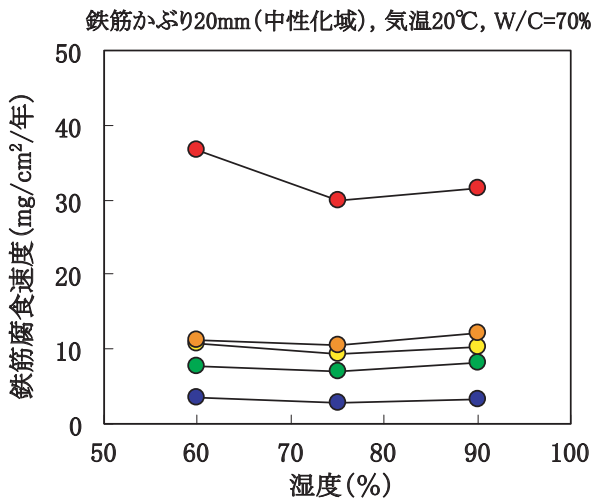


図13 湿度と鉄筋腐食速度の関係 (W/C=70%)

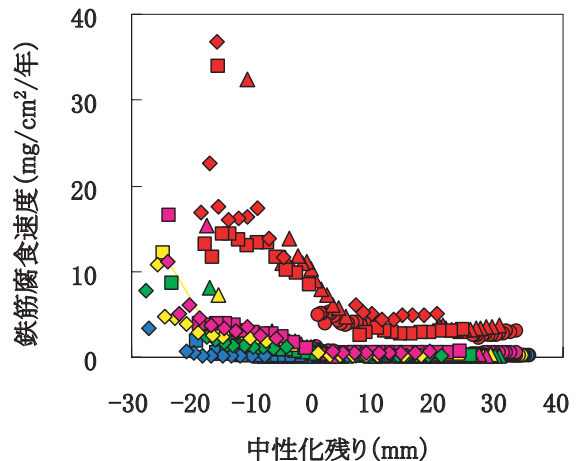
理した結果を、図10～13に示す。湿度が変化しても鉄筋腐食速度はほぼ一定の値である。この試験条件では湿度が変わっても鉄筋腐食速度はほとんど変わらなかった。

一般に、ひび割れが発生した後では、鉄筋に直接空気が接するため、湿度の増加により空気中の水分供給は増加し、鉄筋腐食が増大する可能性がある。しかし、今回の試験は、鉄筋腐食によるひび割れが発生する前の条件であることから、コンクリート中の鉄筋に空気中の酸素、水分の供給がほとんどなく、鉄筋腐食速度と湿度の相関は認められなかったと考えられる。

3. 気温の影響を考慮した劣化予測

3.1 気温の影響を加えた鉄筋腐食推定法の検討

鉄筋コンクリート部材中の鉄筋は、コンクリート中の細孔溶液のアルカリ性により不動態化している。鉄筋腐食は、中性化により細孔溶液のpHが低下して不動態が消失する場合と塩化物イオンが関与して不動態を破壊する場合とがある。また、コンクリートの含水率が高くな



水セメント比(%)—塩化物イオン量(kg/m³)									
●	○	●	●	●	●	●	●	●	●
▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲
■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆

図14 気温20°Cで測定した鉄筋腐食速度

ると鉄筋の腐食が加速される³⁾。そこで、気温20°Cで測定した全ての鉄筋腐食速度(中性化促進中の測定値も含む)を用いて鉄筋腐食の推定法を検討した。

算出に用いた鉄筋腐食速度を図14に示す。この結果から、中性化残り10mmまでは、塩化物イオン量により鉄筋腐食速度を推定することとした。また、中性化残りが10mm以下では、中性化残り、塩化物イオン量、含水率が鉄筋腐食速度の要因である¹⁾ことがわかっており、腐食速度の推定は、中性化残り、塩化物イオン量、含水率を腐食因子として、重相関から算出することとした。

気温20°Cでの鉄筋腐食速度の推定式は、式(5)(中性化残り>10mm)、式(6)(中性化残り≤10mm)になる。前述した腐食速度と気温の関係をj用いて補正式を算出すると式(7)になる。これらを用いた鉄筋腐食速度の推定法は、図15のように整理される。

$$V_0 = 1.32(Cl - 1.2) \tag{5}$$

$$V_0 = 0.840W - 0.145C + 1.32Cl + 0.0293W \cdot C - 0.0917C \cdot Cl + 0.658Cl \cdot W - 2.52 \tag{6}$$

$$V = (1 + 0.0381(t - 20))V_0 \tag{7}$$

ここで、

V_0 : 気温補正前の鉄筋腐食速度 (mg/cm²/年)

V : 気温の影響を加えた鉄筋腐食速度 (mg/cm²/年)

W : コンクリートの表面含水率 (%)

C : 中性化残り (mm) (=鉄筋かぶり—中性化深さ)

Cl : コンクリートの塩化物イオン量 (kg/m³)

t : 気温 (°C)

特集：材料技術

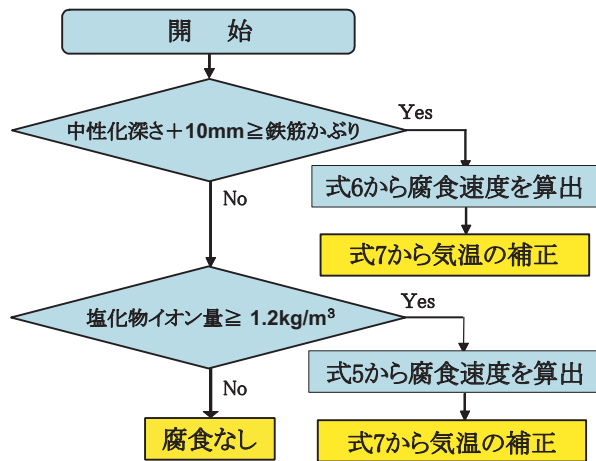


図15 鉄筋腐食速度の推定法

3.2 気温の影響を考慮した腐食速度の算出例

コンクリート構造物が供用されている地点の気温により、鉄筋の腐食速度がどのように異なるかを調べるため、年間平均気温が10℃（例えば函館）と25℃（例えば那覇）の値を用いて、劣化条件を中性化と内的塩害として、低品質な施工（中性化速度係数：5.0）と良質な施工（中性化速度係数：1.7）の2条件で鉄筋の質量減少率を算出した。算出に用いた条件は表4に示すとおりで、気温以外は同一とした。鉄筋の質量減少率の算出は、コンクリート構造物が作製された年から毎年の鉄筋腐食速度を算出してその年間当たりの鉄筋腐食量を積算して求めた。図16に示すように、気温10℃と25℃では鉄筋の質量減少率は大きく異なる。図から平均質量減少率1%（鉄筋の腐食状態が面錆になり補修が必要と想定される腐食量）となるまでの期間を算定すると、良質な施工の場合、気温10℃では66年、気温25℃では52年となり、低品質の施工の場合、気温10℃では26年、気温25℃では17年となる。コンクリートが低品質である場合、気温25℃で鉄筋が面錆状態になるまでの期間は10℃の場合と比較して2/3程度と短くなり、コンクリート中の鉄筋腐食に対する気温の影響は非常に大きいことがわかった。

表4 鉄筋の質量減少率の算出条件

コンクリートの品質	低品質の施工	良質な施工
かぶり	20mm	
中性化速度係数	5.0	1.7
塩化物イオン量	1.5kg/m ³	
表面含水率	4%	

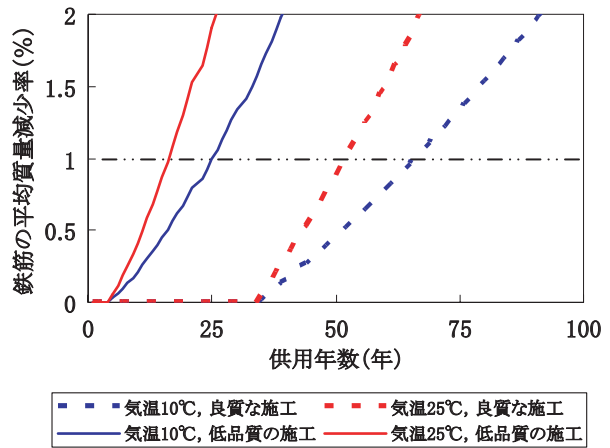


図16 鉄筋の質量減少率

4. おわりに

コンクリート構造物を適切に維持・管理するためには、鉄筋腐食の状態と今後の進行性の把握が必要である。そこで、コンクリート構造物の鉄筋腐食による劣化予測の精度向上を目指すために、鉄筋腐食速度と気温、湿度の関係を調査した。

気温が高くなるにつれて鉄筋腐食速度は増大し、その増加は気温に対してほぼ直線関係にあることがわかった。気温の変化により増減する鉄筋腐食速度の1℃あたりの変化量と鉄筋の腐食速度との関係は比例関係であることがわかった。また、湿度が変わっても鉄筋腐食速度はほとんど変わらなかった。

温度と鉄筋腐食速度の関係から、気温の影響を考慮した鉄筋腐食速度の推定法を提案した。また、その推定法により、年間平均気温が10℃と25℃の値を用いて、平均質量減少率1%までの期間を算定した。コンクリートが低品質な場合、気温25℃での期間は、気温10℃の場合と比較して2/3程度と短くなり、コンクリート中の鉄筋の腐食に対する気温の影響は非常に大きいことがわかった。

文献

- 1) 飯島亨他：塩害と中性化の複合劣化を受けるコンクリート中にある鉄筋の腐食に関する研究，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集，第4巻，pp.11-16，2004
- 2) 飯島亨他：コンクリート中の鉄筋腐食速度と浮き・はく落発生 の推定手法，鉄道総研報告，Vol.21，No.2，pp.5-10，2007
- 3) 佐々木孝彦他：塩害により鉄筋が腐食したコンクリートの劣化予測，鉄道総研報告，Vol.17，No.10，pp.5-10，2003
- 4) 大即信明他，中性化したコンクリート部材中の鉄筋の腐食速度に及ぼす温度の影響，材料，Vol.53，No.1，pp.108-113，2004