

論文 自然電位連続モニタリングによる発錆時期推定手法の検討と腐食発生限界塩化物イオン濃度の測定

堀口 賢一^{*1}・丸屋 剛^{*2}・武若 耕司^{*3}

要旨：塩害劣化における潜伏期は、鋼材の腐食発生までの時間とされ、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。本研究は、限界濃度を測定するために、鉄筋コンクリート供試体に鉛照合電極を埋設して、自然電位の連続モニタリング計測により、鋼材の腐食発生時点を明確にとらえて、その時点での塩化物イオン濃度を測定した。その結果、水セメント比 65%の普通ポルトランドセメントコンクリートでの腐食発生限界濃度の範囲は、 $0.9\sim 3.5\text{kg/m}^3$ であることが確かめられた。

キーワード：自然電位, 腐食, 腐食発生時点, 腐食発生限界塩化物イオン濃度, 潜伏期

1. はじめに

塩害の潜伏期についての耐久性照査では、鋼材の腐食発生時点を予測することが重要であるが、現段階では鉄筋位置の塩化物イオン濃度が 1.2kg/m^3 に達する時点を腐食開始とする考えが一般的¹⁾である。しかし、この値に基づいて長期耐久性を照査すると、大きなかぶりの確保が必要となる場合がある。効率的な耐久性設計のためには、使用するコンクリートの材料や配合に応じた腐食発生限界塩化物イオン濃度を設定する必要があり、それにはコンクリート中の鋼材の腐食発生時点をとらえなくてはならない。

本研究では、鋼材の腐食発生時点を自然電位の計測により評価し、その時点における塩化物イオン濃度を測定することを目的とした。実験は、供試体全体を塩水中に浸漬した全体浸漬実験と、供試体の限定された範囲にのみ塩水を接触させた部分接触実験の2つを行った。

2. 全体浸漬実験

2.1 実験内容

(1) 塩水浸漬方法

供試体を水槽中に静置して、10%塩化ナトリ

ウム溶液に供試体全体を浸漬して乾湿繰返しを行った。乾湿繰返しは、乾燥3日・湿潤4日を1サイクルとした。乾燥は、気中において自然乾燥させる条件とした。

(2) 供試体

図-1に供試体の形状・寸法を示す。供試体寸法は $100\times 100\times 400\text{mm}$ で、粗骨材最大寸法は 13mm 、鉄筋はSD 295AのD19をかぶり 15mm で1本配置した。また、供試体の打設方向は、長さ 400mm 方向に縦打ちとした。

表-1に供試体の配合を示す。セメントは普通ポルトランドセメントで、水セメント比は65%、35%の2通りとした。細骨材は山砂(表乾密度 2.59g/cm^3 、吸水率2.15%)、粗骨材は碎石(表乾密度 2.67g/cm^3 、吸水率0.74%)を使用した。28日標準養生後の圧縮強度は、水セメント比65%



図-1 全体浸漬実験供試体の形状・寸法

*1 大成建設(株) 技術センター土木技術研究所土木構工法研究室副主任研究員 工修 (正会員)

*2 大成建設(株) 技術センター土木技術研究所土木構工法研究室主席研究員 工博 (正会員)

*3 鹿児島大学 工学部海洋土木工学科教授 工博 (正会員)

表-1 供試体の配合

実験名	供試体数	Gmax mm	スランプ cm	空気量 %	W/C %	s/a %	単位量 (kg/m ³)				
							水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤
全体浸漬	4体	13	13.5	4.8	65	52	175	269	935	892	2.7
	4体	13	12.5	4.8	35	46	165	471	764	924	4.7
部分接触	16体	13	12.5	4.9	65	52	180	277	933	881	2.8

で 28.8N/mm², 35%で 67.9 N/mm²であった。

供試体は水セメント比ごとに 4 体 (65N1-1~65N1-4, 35N1-1~35N1-4) 製作し, 28 日間標準養生後に, 図-1 に示すように側面 4 面に遮塩性能を有するアクリルゴム系表面被覆を塗布し, 7 日間乾燥後に実験に供した。4 面に表面被覆を塗布したのは, 開放した 2 面のみから塩化物イオンを浸透させるためである。

(3) 測定項目

全体浸漬実験では, 供試体表面からの自然電位の計測 (以下, 表面計測) と, 解体による腐食状態の目視確認, および塩化物イオン濃度の測定を行った。

図-2 に自然電位の表面計測方法を示す。表面計測には鉛照合電極を用い, 鉄筋直上のコンクリート表面を 25mm ピッチで測定した。測定は, 乾湿繰返しの湿潤状態から乾燥状態に切り替える時点とし, 乾湿繰返し 6 サイクルから 1 サイクルごとに解体まで継続して測定した。解体時期は, 自然電位が平均で-200mV (CSE) より卑になった時点²⁾を目安とした。腐食状態の確認は, 解体時期となった供試体を割裂して, 鉄筋

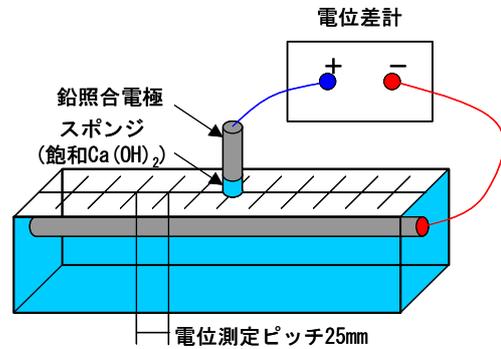


図-2 自然電位の表面計測方法

を取り出して目視で行った。塩化物イオン濃度の測定は, JIS A 1154 「硬化コンクリートに含まれる塩化物イオンの試験方法」に従った。

2.2 実験結果

(1) 供試体表面から計測した自然電位

図-3, 図-4 に自然電位の表面計測結果を示す。それぞれ水セメント比 65%, 35%のうち 1 体ずつ (65N1-4, 35N1-1) の測定結果である。

65N1 タイプ供試体では, 最初に電位の測定を行った 6 サイクルの時点で, いずれの供試体の鉄筋自然電位も既に-200mV (CSE) を大きく下回った。また, 35N1 タイプの全ての供試体でも, 6 サイクルで-200mV (CSE) を下回ったが, 自

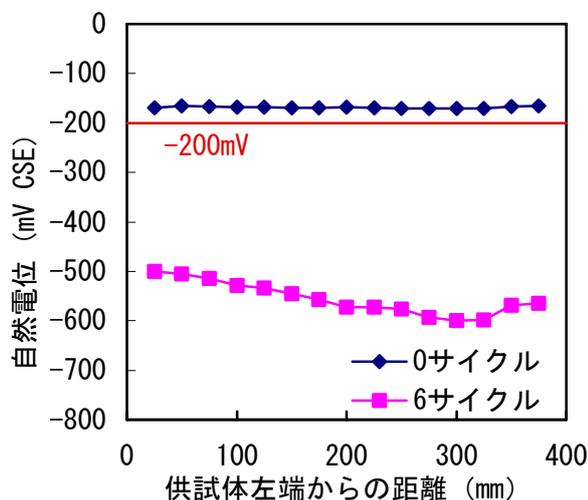


図-3 自然電位 (65N1-4・腐食有)

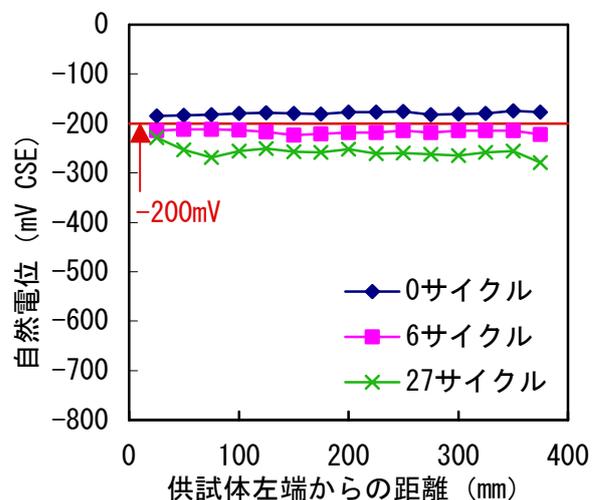


図-4 自然電位 (35N1-1・腐食無)

腐食発生箇所

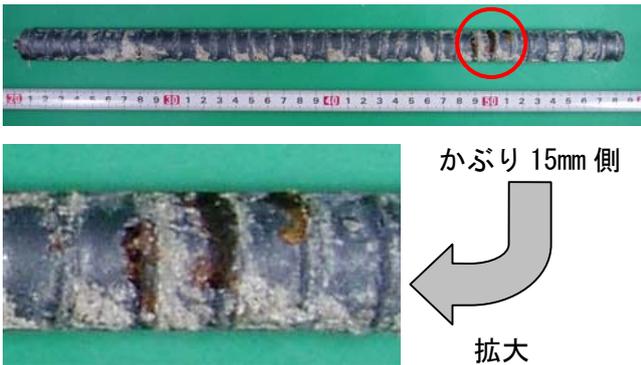


写真-1 腐食状況 (65N1-4)

然電位の急激な低下が見られない供試体もあったため、解体時期を 27 サイクルまでとした。

(2) 腐食発生状況

写真-1 に水セメント比 65% の供試体 65N1-4 における腐食発生状況を示す。65N1 タイプおよび 35N1 タイプのいずれにおいても、腐食は各供試体の自然電位分布で電位が相対的に卑な位置で発生する傾向にあったが、連続した複数の節にわたり比較的広範囲に発生していた。なお、供試体 35N1-1 では、その自然電位は図-4 のように平均-260mV (CSE) 程度に低下し、同一供試体内で最も貴な値と卑な値の差が 50mV (CSE) であったが、腐食は見られなかった。

(3) 塩化物イオン濃度

表-2 に鉄筋位置の塩化物イオン濃度の測定結果を示す。塩化物イオン濃度は、供試体表面から深さ 15~20mm で、供試体長辺方向に 25mm、短辺方向に 70mm のスライス片を切出して測定した。表-2 における腐食の有無は、同一試験体内で腐食が発生した位置と発生しなかった位置のそれぞれでの測定値を表している。供試体 35N1-1 は、鉄筋全体に腐食が見られなかったため、腐食無部分の数値のみ示している。

65N1 タイプ供試体では、6 ないし 8 サイクルで塩化物イオン濃度の測定を行ったが、上述のようにこの時点で既に自然電位は-200mV (CSE) を大きく下回っており、腐食発生時点を大きく経過したと思われる、腐食有部分の塩化物イオン量は腐食発生限界量を示すものではない。また、

表-2 鉄筋位置の塩化物イオン濃度

供試体	塩化物イオン濃度 (kg/m ³)		測定 サイクル
	腐食有部分	腐食無部分	
65N1-1	6.7	(5.4)	8
65N1-2	7.1	(4.7)	8
65N1-3	6.8	(6.4)	8
65N1-4	7.2	(3.3)	6
35N1-1	—	2.8	27
35N1-2	0.5	(0.3)	6
35N1-3	0.9	(0.8)	11
35N1-4	3.3	(3.2)	27

() の数値は腐食発生限界以下を示すものではない。

腐食無部分についても、マクロセル腐食のカソード域となって腐食が発生していないと考えられるため、この塩化物イオン濃度もまた、腐食発生限界を示すものではない。

一方、35N1 タイプ供試体では、自然電位が -200mV (CSE) を下回った 6, 11 サイクルで測定した腐食有部分の塩化物イオン濃度が、0.5, 0.9kg/m³ と比較的低い状況であるにもかかわらず、腐食が発生した場合もあった。これは、この実験に用いた供試体のかぶり 15mm に対して、粗骨材最大寸法が 13mm であったため、これらの供試体では粗骨材とモルタルの界面を塩化物イオンが浸透し、極めて局所的に塩化物イオン濃度が高くなり、この状況を今回の塩化物イオン測定方法では評価できなかった可能性もある。

また、図-4 に示した供試体 35N1-1 では、自然電位が全体で平均-260mV (CSE) 程度に低下していたが腐食はみられず、塩化物イオン濃度が鉄筋位置で 2.8kg/m³ でも腐食が発生しない場合があることが確かめられた。

これらから、塩化物イオンの供給方法、自然電位の測定方法をさらに工夫する必要があると考え、次に示す塩水の部分接触実験を行った。

3. 部分接触実験

3.1 実験内容

(1) 塩水接触方法

部分接触実験は、鉄筋上の腐食発生箇所を限定するために、供試体表面からの塩水 (10%塩

化ナトリウム溶液)の供給範囲を制限した。また、鉄筋の腐食発生時点を明確にとらえるために、鉛照合電極を供試体中に埋設し、自然電位を10分間隔で連続モニタリングした。

(2) 供試体

表-3 に部分接触実験の実験要因を示す。試験要因は、鉄筋本数、塩分供給セルの幅、乾湿条件とした。鉄筋本数は、1

本ないし2本とした。1本ときはかぶり20mm、2本ときはかぶり20mmと25mmとした。塩分供給セルの幅は、供試体表面で塩水を接触させるプラスチック容器の幅で、50mmか25mmとした。乾湿条件は、塩水に接触させる部分以外の供試体表面を乾燥状態もしくは湿潤状態とした。

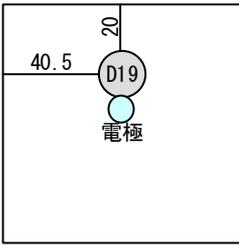
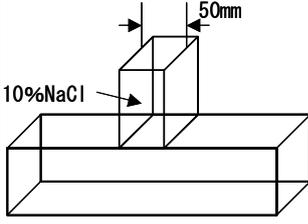
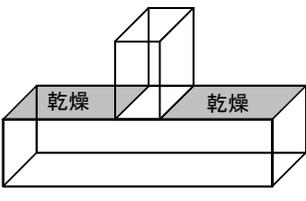
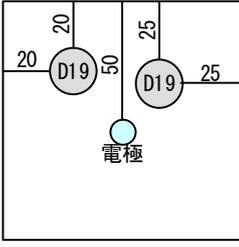
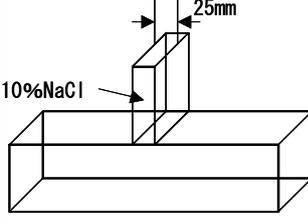
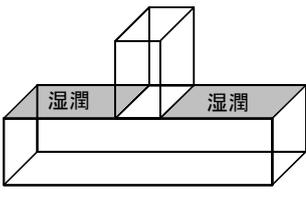
供試体寸法は100×100×400mmで、粗骨材最大寸法は13mm、鉄筋はSD 295AのD19を使用した。また、供試体の打設方向は、長さ400mm方向に縦打ちとした。コンクリートの配合は表-1中に示した部分接触実験のもので、水セメント比は65%である。使用材料は全体浸漬実験と同一である。28日標準養生後の圧縮強度は、31.0 N/mm²であった。

供試体は表-3に示した要因の組合せ8ケースで各2体、合計16体製作した。28日間標準養生後に、側面4面にエポキシ樹脂系表面被覆を塗布し、7日間乾燥後に実験に供した。側面4面に表面被覆を塗布したのは、供試体側面からの水の蒸発を抑止するためである。

(3) 測定項目

部分接触実験では、コンクリート内部に埋設した電極による自然電位の計測（以下、内部計測）と、分極抵抗・比抵抗の計測、解体による

表-3 部分接触実験の実験要因

鉄筋本数	塩分供給セルの幅	乾湿条件
 <p>単鉄筋</p>	 <p>セル幅50mm</p>	 <p>乾燥状態</p>
 <p>複鉄筋</p>	 <p>セル幅25mm</p>	 <p>湿潤状態</p>

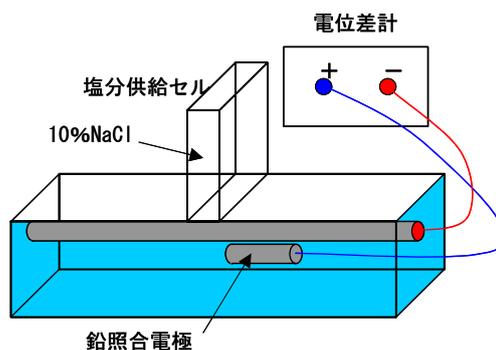


図-5 自然電位の内部計測方法

腐食状態の目視確認、および塩化物イオン濃度の測定を行った。

図-5に自然電位の内部計測方法を示す。内部計測には鉛照合電極を用い、10分間隔で連続モニタリングした。分極抵抗と比抵抗の計測は、試験開始時と解体時にACインピーダンス法で行った。解体時期は、自然電位が定常状態より卑になった時点を解体の目安とした。腐食状態の確認は、解体時期となった供試体を割裂して、鉄筋を取り出して目視で行った。塩化物イオン濃度の測定は、全体浸漬実験と同様に行った。

3.2 実験結果

(1) 埋設電極による自然電位

図-6に「単鉄筋・セル幅25mm・乾燥状態」と、「複鉄筋・セル幅25mm・湿潤状態」の埋設

電極による自然電位の経時変化を示す。塩水接触を開始してある時間まではほぼ定常状態を保持し、その後急激に自然電位が低下した。自然電位がほぼ定常状態である時間は一定ではないが、電位がある時点で急激に低下することは実験要因によらず同様であった。ただし、図-6で示した単鉄筋の測定結果のように、自然電位が低下と上昇を繰り返す期間が表れる場合も見られた。これは、不動態の破壊と再生が繰り返されている状態と考えられ、実験要因によらず見られる場合があった。

(2) 分極抵抗・比抵抗

実験終了時の分極抵抗と比抵抗は、実験要因による明確な違いは認められなかった。

実験前後の分極抵抗は、かぶり 20mm の鉄筋に対する平均で、開始時が $36.4\text{k}\Omega\cdot\text{cm}^2$ 、終了時が $27.8\text{k}\Omega\cdot\text{cm}^2$ で、終了時の分極抵抗がやや低下していた。一方、実験前後の比抵抗は、開始時が $3.3\text{k}\Omega\cdot\text{cm}$ 、終了時が $3.4\text{k}\Omega\cdot\text{cm}$ でほとんど差がなかった。

(3) 腐食発生状況

写真-2に「単鉄筋・セル幅 50mm・乾燥状態」の腐食発生状況を示す。この供試体は、自然電位が低下を始めてから 197 時間で解体したもので、プランメータで測定した腐食面積は 37mm^2 であった。また、写真-3に「複鉄筋・セル幅 25mm・乾燥状態」の腐食発生状況を示す。この供試体は、自然電位が低下を始めてから 10 時間で解体したもので、腐食面積は 1mm^2 以下であった。腐食面積は、自然電位が低下を始めてからの時間に応じて増加する傾向が見られ、自然電位が低下を始める時点と腐食発生時点と考えるとよいと考えられる。これは、図-6のように、複鉄筋でかぶり 20mm の鉄筋の自然電位が急激に低下した時点で解体して腐食状況を確認すると、かぶり 20mm の鉄筋には腐食が見られるが、電位の低下していないかぶり 25mm の鉄筋には腐食が見られないことから確かめられた。

腐食の発生位置は、ほとんどの場合で塩分供給セル直下の鉄筋直上であったが、乾湿条件が

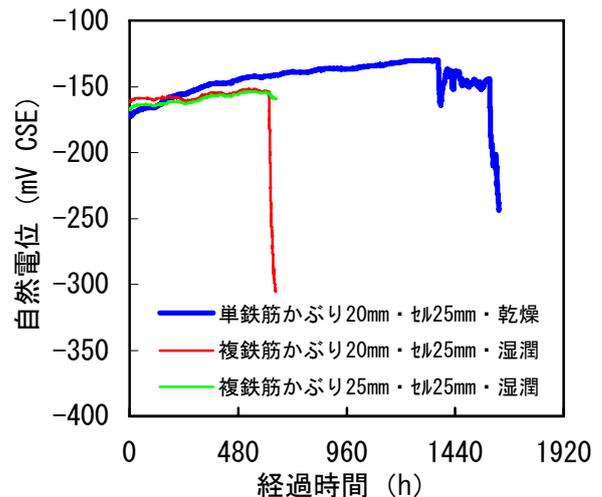


図-6 自然電位の経時変化

腐食発生箇所

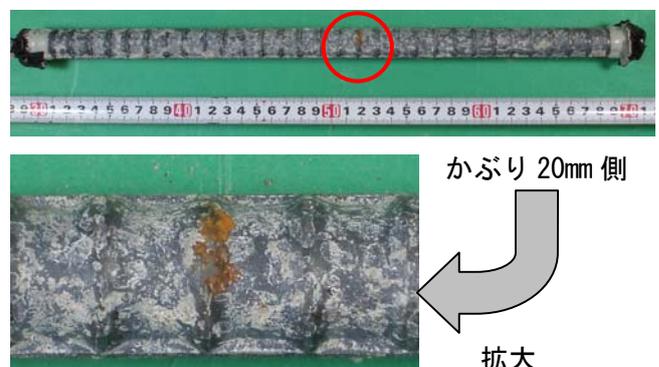


写真-2 腐食状況 (単鉄筋・セル幅 50mm・乾燥)

腐食発生箇所

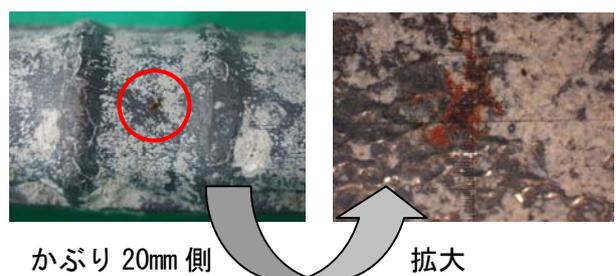


写真-3 腐食状況 (複鉄筋・セル幅 50mm・乾燥)

湿潤状態の 2 供試体で、塩分供給セル直下を外れた位置にも腐食が発生した。このひとつで、セル直下から 10cm 離れた鉄筋表面の塩化物イオン濃度を測定したところ $1.2\text{kg}/\text{m}^3$ であった。このことから、湿潤状態ではセル直下外のコンクリートの含水率も高いことから、セル直下外へも塩化物イオンが浸透しやすく、特に腐食発生までの時間が長くなると、直下以外へ浸透し

た量も大幅に増えて、外れた位置で腐食が発生する可能性も高くなると考えられる。

(4) 塩化物イオン濃度

表-4 にかぶり 20mm の鉄筋位置における塩化物イオン濃度を示す。塩化物イオン濃度は、供試体表面から深さ 0~5mm, 20~25mm (複鉄筋は更に 25~30mm) で、供試体長辺方向に 25mm, 短辺方向に 70mm のスライス片を切出して測定した。表-4 中の補正值は、深さ方向への濃度分布から表面塩分量と拡散係数を求め、自然電位が低下した時点のかぶり 20mm の鉄筋表面での濃度に換算した値で、計算上の腐食発生限界塩化物イオン濃度である。なお、「複鉄筋・セル幅 25mm・乾燥状態」の 1 体は、かぶり 25mm の鉄筋に腐食が発生したため、ここでは除外した。

乾燥状態では、実験開始の初期に自然電位が低下 (平均 957 時間に対し、100~200 時間で低下) したケース (補正值で 0.1, 0.4 kg/m³) がある。これは、何らかの原因で極めて局所的に塩化物イオン濃度が高くなる状態が生じた可能性が考えられたため、この 2 ケースを評価の対象からはずした。その結果、乾燥状態の腐食発生限界塩化物イオン濃度の平均は、2.7kg/m³ となった。これに対して、湿潤状態ではこの限界量は平均 1.7kg/m³ と乾燥状態に比べ低い傾向にあった。なお、全体を通してみると、本実験の結果に基づく腐食発生限界塩化物イオン濃度の範囲は、0.9~3.5kg/m³ となった。

4.まとめ

全体浸漬実験と部分接触実験の結果、以下のことが明らかとなった。

- (1) 供試体表面からの自然電位の計測では、腐食発生時点を明確にとらえることが難しい。
- (2) 供試体内部に埋設した電極による自然電位の連続モニタリングにより、腐食発生時点を明確にとらえることができる。
- (3) 供試体全体の乾湿繰返しでは、腐食発生位置が定まらず、また複数箇所発生することもあるため、腐食発生限界塩化物イオン濃度を測

表-4 鉄筋位置の塩化物イオン濃度

乾湿条件	鉄筋条件	セルの幅	塩化物イオン濃度 (kg/m ³)	
			実測値	補正值
乾燥	単	50	2.4	3.2
	単	50	(0.7)	(0.1)
	単	25	2.9	3.5
	単	25	2.4	3.2
	複	50	1.4	2.0
	複	50	(1.0)	(0.4)
	複	25	2.4	1.7
	乾燥平均			2.3
湿潤	単	50	1.4	1.9
	単	50	1.2	1.8
	単	25	1.4	2.1
	単	25	1.2	1.9
	複	50	0.9	1.2
	複	50	2.0	2.5
	複	25	0.6	1.0
	複	25	1.1	0.9
湿潤平均			1.2	1.7
全平均			1.6	2.1

() の数値は異常値と考えられるため、平均から除外した。

定する位置を決定することが難しい。

- (4) 供試体表面の特定範囲に塩水を接触させることで、鉄筋上の特定部分に腐食を発生させることができる。
- (5) 部分接触実験の結果、水セメント比 65% の普通ポルトランドセメントコンクリートにおける腐食発生限界塩化物イオン濃度の範囲は、0.9~3.5kg/m³ であった。

本実験は、(財) エンジニアリング振興協会における、「コンクリート構造物診断技術開発」の一環として実施した。実施に際し同協会に多大なる協力を頂いた。ここに謝意を表する。

参考文献

- 1) 土木学会：2001 年制定コンクリート標準示方書 維持管理編，2001.1
- 2) 小林一輔，小林豊治，米澤敏男，出頭圭三：鉄筋腐食の診断，森北出版，1993