

論文 自然電位法および分極抵抗法を用いた RC 床板内に 2 段配筋された鉄筋の腐食診断についての実験的考察

桃野 英太郎*1・Idrees Zafar*2・杉山 隆文*3

要旨：コンクリート中の鉄筋腐食を判定する非破壊試験の精度は、かぶりの影響を大きく受ける。特に積雪寒冷地の RC 床版の鉄筋腐食では、上部鉄筋が最初に腐食するケースが多いが、これを床版底面から測定する際に、かぶりは大きくしかも下部鉄筋も存在する。本研究では RC 床版を模擬した供試体の上面に 10%NaCl 溶液を供給し、上部鉄筋と下部鉄筋の自然電位、腐食電流密度、コンクリート中の塩化物イオン濃度、含水率等を測定した。その結果、現場を想定した測定で、RC 床版内の鉄筋を精度よく判定できることを示した。

キーワード：RC 床版, 2 段配筋, 鉄筋腐食, 自然電位, 腐食電流密度, 塩化物イオン濃度

1. はじめに

積雪寒冷地の高速道路橋に用いられている RC 床版は、輪荷重の繰り返しや冬期に撒かれる凍結防止剤の影響に加え、構造物が凍結融解を繰り返すことにより塩分がコンクリート中に浸透し、塩害が生じやすくなっている。塩分がコンクリート中に浸透し鉄筋位置まで達すると鉄筋腐食が始まり、腐食生成物の体積増加によってかぶりにひび割れや剥離を生じさせることで RC 床版の耐久性の低下につながる¹⁾。しかし、目視で RC 床版内の鉄筋腐食を確認することはできず、現状ではコンクリート表面に浮き出てくる錆汁や腐食ひび割れなどから診断せざるを得ない。したがって、RC 床版で生じる鉄筋腐食の診断に関する非破壊検査手法の精度向上は欠かせない²⁾。

しかし、RC 床版内に多段配筋された鉄筋の腐食性状を床版の底面から推定するための研究は少なく、特に上部鉄筋のみが腐食した場合の腐食判定については、かぶりが大きく、下部鉄筋も存在するために、その判定精度に対する考察が十分でないと考えられる。本研究では、上部鉄筋のみが腐食した場合と下部鉄筋も腐食した場合を、RC 床版を模擬した供試体の底面からの測定によって適切に腐食判定できるかを実験的に調べることを目的とした。実験では、実構造物における現場測定を想定し、RC 床版の断面を模擬した供試体を、異なる 3 種類の鉄筋配置のもと作製し、10%NaCl 溶液を供試体の上面から供給した。そして、それぞれ自然電位、腐食電流密度等を供試体の上面と底面の両方から定期的に測定した。

2. 実験概要

2.1 供試体作製

供試体は図-1 に示すように、断面寸法が 100×128mm (NA), 100×148mm (NB), 100×210mm (NC) の 3 タイプの角柱供試体を作製した。長さは NA および NB は

300mm, NC は 350mm である。鉄筋は全て異形鉄筋 (D19) であり、各供試体の上面および底面からのかぶりがそれぞれ 30, 30, 40mm, 鉄筋間隔が 30, 50, 92mm の位置になるように 2 本ずつ配置した。また、NC には図-2 に示すように、より実構造物を想定して上下の鉄筋にそれぞれ直行して接するように、6 本の鉄筋を配置した。本実験では実験精度を高めるために、NA, NB および NC の供試体を、それぞれ 5 体ずつ作製した。水中養生

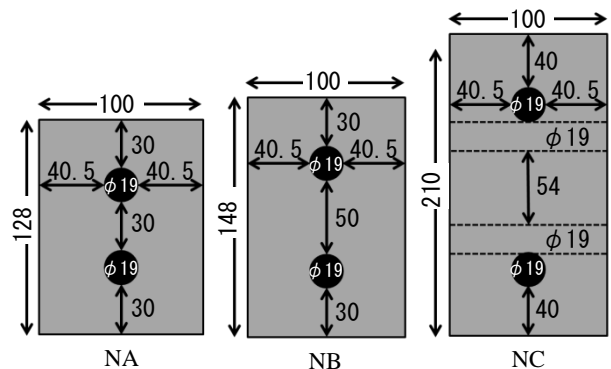


図-1 供試体のタイプ別の断面形状・寸法 (mm)

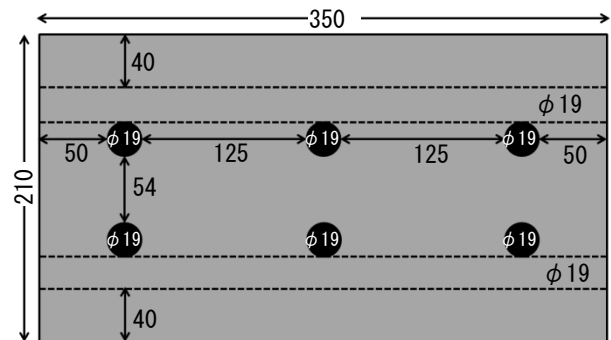


図-2 NC の断面形状・寸法 (mm)

*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 1 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 博士研究員 Ph.D.
 *3 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および圧縮強度

配合	Gmax (mm)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				混和剤 C×(%)		圧縮強度 (N/mm ²) 28 日
				W	C	S	G	AE 減水剤	AE 剤	
N	20	63.5	50.0	142	224	1,002	995	1.0	0.0014	30.2

は 28 日間である。表-1 にコンクリートの配合表および圧縮強度を示す。配合は、長期間経過した実際の RC 床版の設計基準強度を実験室内の配合強度として決定した。コンクリートは、長手方向の鉄筋に対して縦打ちした。

2.2 塩分浸透方法

塩分浸透には、塩化ナトリウムと蒸留水を用いて 10% の濃度になるように NaCl 溶液を作製し用いた。図-3 に示すように、供試体の上面中央に幅 50mm のプラスチック製塩分供給セルを、供試体との隙間から溶液漏れが生じないようにシーリング材を用いて設置した。また、供試体の塩化物イオン供給面とその反対側の底面以外の 4 面は気密アルミテープにより被覆した。これは、塩化物イオン供給面の側面から、水や空気の浸透や蒸発を防ぐためである。さらに、塩分供給セル上部からの溶液の蒸発による塩水の水頭の低下を防ぐために、塩分供給セルには自然電位および腐食電流密度測定時を除いて厚紙製の蓋を付け、溶液の減少が見られた場合は適宜溶液を補充した。本研究では 400 日間の塩分浸透を行い RC 床版の断面を模擬したコンクリート中の鉄筋腐食を調べた。

2.3 自然電位の測定

自然電位は、鉛照合電極と電位差計、もしくは飽和塩化銀照合電極を用いた鉄筋腐食診断装置^{3),4),5),8)}を用いて約 14 日間隔で測定を行った。測定方法は、上部鉄筋について上面から、下部鉄筋について底面から、それらの導線をつないだ場合について底面からの 3 パターンで測定した。これら 3 パターンの測定の概略図および各測定タイトルを、U：上部鉄筋、D：下部鉄筋、J：上下鉄筋接続、T：供給面より測定、B：底面より測定とし、図-4 に示す。このうち、実構造物測定では上面からの測定は困難であり、また床版からの導線は上下鉄筋が導通していると想定した JB のパターンが実際の測定法であると考えた。鉄筋腐食診断装置を用いて測定を行う際には、塩分供給セルを一度外し、測定後再度設置して塩分供給を継続した。異なる 2 つの照合電極を用いて自然電位の測定を行ったため、それぞれの測定値を、飽和硫酸銅電極を基準とした電位に換算し、考察を行った。

2.4 腐食電流密度の測定

塩分浸透を行う直前と、自然電位の測定により上部鉄筋が腐食したと判定された供試体について、数回に渡り腐食電流密度の測定を行った。腐食電流密度は、自然電位の測定の際に用いた鉄筋腐食診断装置のセンター対極と

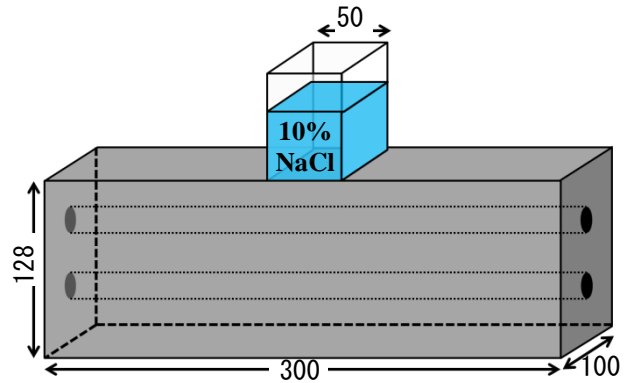


図-3 NA を例にした塩分浸透方法 (mm)

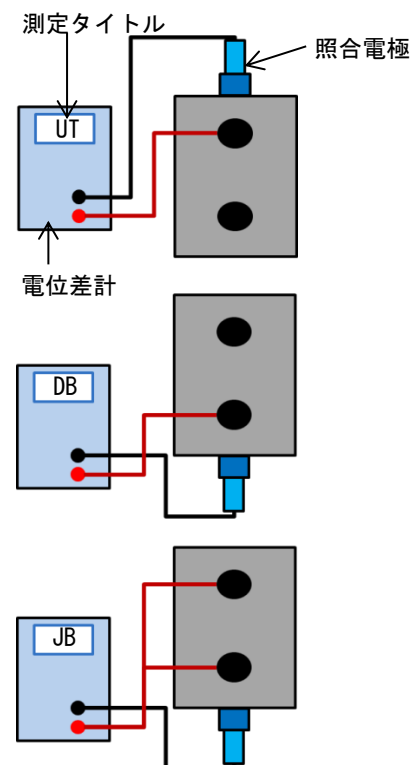


図-4 自然電位および腐食電流密度の測定概略図

ガード対極の2つの対極から構成される2重対極センサー方式の2周波交流インピーダンス法によって分極抵抗を求め、腐食電流密度へ換算した。測定パターンは自然電位同様、図-4に示す3パターンである。

2.5 塩化物イオン濃度の測定

塩分供給から400日目時点で下部鉄筋の腐食が判定された供試体にも、塩化物イオンの測定を行った。塩化物イオンの測定は、側面の気密アルミテープを取り除いた後、図-5に示すように赤い点の位置である、上部鉄筋から直上10mm、下部鉄筋から直上10mm、下部鉄筋から直下10mmの3点に対して、側面からコンクリート用ドリル(D10)を用いて深さ約70mm分のドリル粉を採取し行った。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 含水率の測定

含水率は、高周波容量式のコンクリート・モルタル水分計を用いて、供試体底面の中央表面から測定した。測定時期は塩分供給時から70日目より数回に渡り測定を行った。

3. 実験結果および考察

3.1 自然電位の測定結果

図-6、図-7、図-8にNA(1)、NB(2)およびNC(3)を例に、上部鉄筋を対象としたUT、下部鉄筋を対象としたDB、実構造物における現場測定を想定したJBの3パターンでの自然電位の測定結果を示す。ASTM C876の腐食判定基準⁹⁾を参考にすると、UTおよびDBの測定から、NA(1)は161日目に、NB(2)は140日目に、NC(3)は224日目に上部鉄筋に90%以上の確率で腐食が発生し、NA(1)は245日目に、NB(2)は301日目に下部鉄筋に90%以上の確率で腐食が発生したと判定された。また、NC(3)については400日目を経過しても下部鉄筋に90%以上の確率で腐食が発生していないと判定された。この他の供試体については、400日目が経過した時点のNAおよびNBともに全ての供試体の上部鉄筋に90%以上の確率で腐食が発生したと判定され、5つの供試体の内それぞれ3つの供試体(NAは(1),(2),(4)、NBは(2),(3),(5))について下部鉄筋にも90%以上の確率で腐食が発生したと判定された。またNCは全ての供試体の上部鉄筋にのみ90%以上の確率で腐食が発生したと判定された。NA(1)およびNB(2)と比較してNC(3)の上部鉄筋に腐食が判定された経過日数が遅れているのは、かぶりの差によるものである。また、NA(1)と比較してNB(2)の下部鉄筋に腐食が判定された経過日数が遅れているのも同様に、NAの鉄筋間隔が30mmであるのに対してNBは50mmと大きいことに起因すると考えられる。

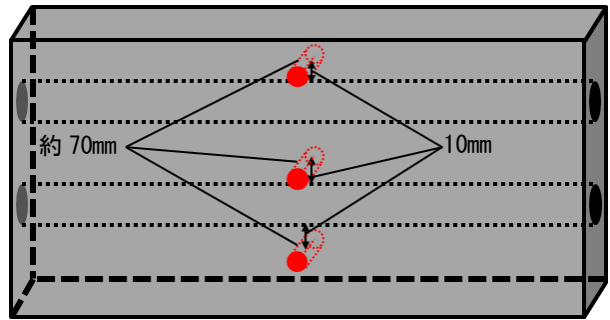


図-5 ドリル粉採取位置

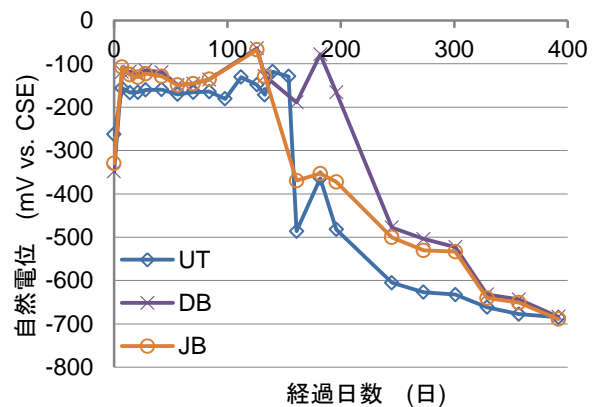


図-6 NA(1)の3パターンでの自然電位測定結果

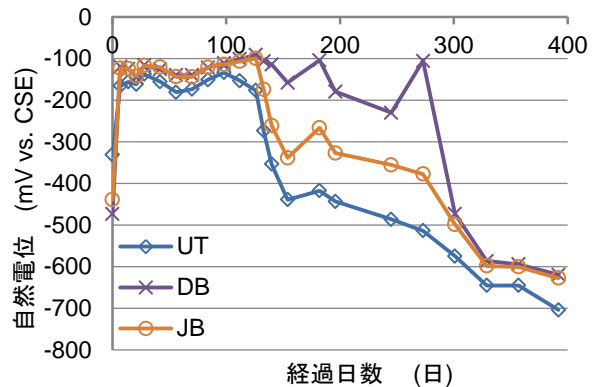


図-7 NB(2)の3パターンでの自然電位測定結果

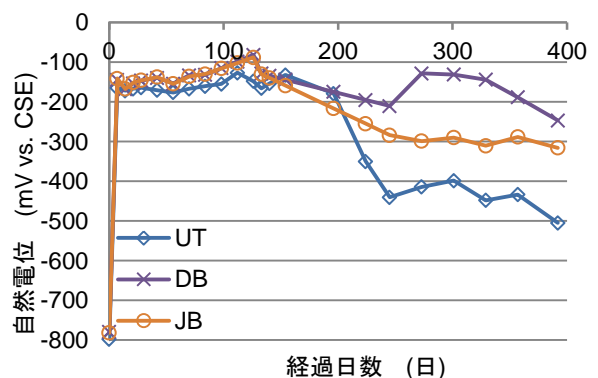


図-8 NC(3)の3パターンでの自然電位測定結果

実構造物における測定を想定した JB での測定値は、UT の自然電位が急激に低下したのとおよそ同時期に急激に低下し、その後 DB での測定値が急激に低下した際にも急激な低下が見られた。これは、上下鉄筋がともに腐食した他の供試体でも同様であった。このことから、実構造物における現場測定においても、底面からの測定でも上部鉄筋の腐食を判定できることが明らかになった。したがって、たとえ比較的大きなかぶりで、測定間に腐食の生じていない下部鉄筋が存在しても、上部鉄筋の腐食の有無を判定できるといえる。

NA(1)および NB(2)において JB の測定値が、上部鉄筋の腐食が判定された時期に加えて、下部鉄筋の腐食が判定された時期にも急激に低下したことから、自然電位を継続測定することで下部鉄筋の腐食発生時期も推定できる可能性がある。

3.2 腐食電流密度の測定結果

図-9、図-10、図-11 に自然電位の測定結果と同様に NA(1)、NB(2)および NC(3)を例に、UT、DB、JB の 3 パターンでの腐食電流密度の測定結果を示す。また、表-2 に腐食電流密度測定値による腐食速度の判定基準⁷⁾を示す。これを UT および DB に用いると、NA(1)および NB(2)ともに 126 日目から 245 日目までに上部鉄筋の腐食速度が増加している。これは、3.1 で述べたように、上部鉄筋の自然電位が低下した時期と一致している。また、これら供試体に対する現場測定を想定した JB においても、腐食電流密度は増加している。したがって、自然電位と同様に腐食電流密度においても床版底面からの測定によって、かぶりの大きさや下部鉄筋の影響を受けずに、上部鉄筋の腐食を判定できると考えられる。さらに、NA(1)は 245 日目に、下部鉄筋の腐食速度が $1.0(\mu A/cm^2)$ を超えている。また、NB(2)は、245 日目以降で下部鉄筋の腐食速度は大きく増加している。さらに NC(3)は 245 日目に上部鉄筋の腐食速度が $0.9(\mu A/cm^2)$ に達している。これについても、3.1 で示した自然電位の低下した時期と一致している。しかし、NC(3)は、それ以降は 400 日目前後までは腐食速度はおおよそ一定であった。

次に、図-12、図-13 に 392 日目時点で上部鉄筋と下部鉄筋の双方が腐食と判定された NA(1)および NB(2)における UT、DB および JB について、測定開始からの自然電位と腐食電流密度との関係を示す。自然電位が低下すると腐食電流密度が徐々に上昇し、ある値に達すると自然電位および腐食電流密度の両方の測定値が急激に低下および上昇する傾向がみられた。これは他の供試体においても同様であった。UT および DB での測定結果と JB での測定結果を比較すると、おおよそ同様の挙動を示した。本実験においては UT および DB での測定値からそれぞれ上部鉄筋および下部鉄筋の腐食を判定したが、

表-2 腐食速度の判定基準⁷⁾

腐食電流密度: I_{corr} ($\mu A/cm^2$)	腐食速度の判定
$I_{corr} < 0.2$	不動態状態または極めて遅い腐食速度
$0.2 \leq I_{corr} \leq 0.5$	低～中程度の腐食速度
$0.5 < I_{corr} \leq 1.0$	中～高程度の腐食速度
$1.0 < I_{corr}$	激しい、高い腐食速度

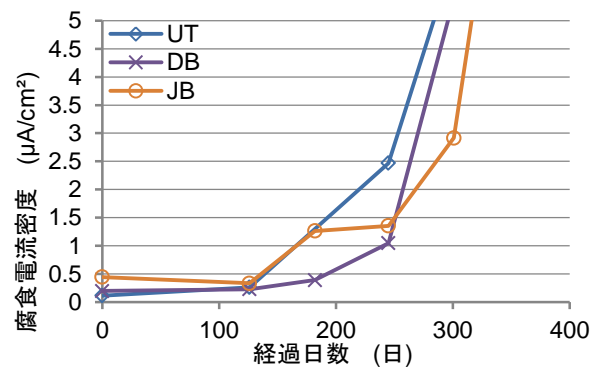


図-9 NA(1)の3パターンでの腐食電流密度測定結果

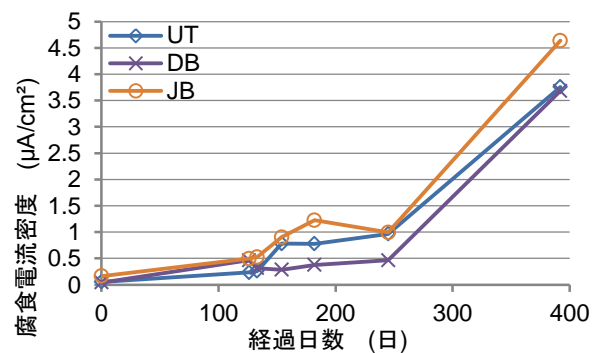


図-10 NB(2)の3パターンでの腐食電流密度測定結果

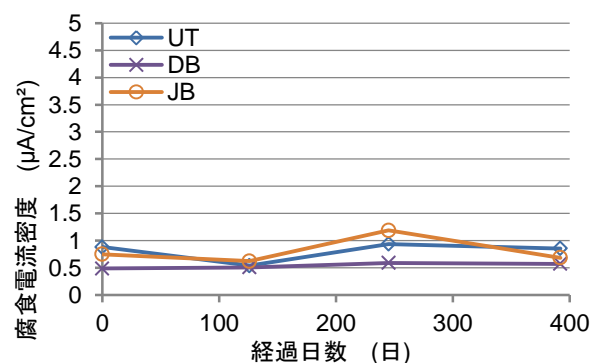


図-11 NC(3)の3パターンでの腐食電流密度測定結果

その際の JB での測定値は、NA の自然電位が上部鉄筋では約-300(mV vs. CSE)、下部鉄筋では約-500(mV vs. CSE)であり、腐食電流密度が上部鉄筋では約 0.6($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)、下部鉄筋では約 1.4($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)であった。同様に NB の自然電位が上部鉄筋では約-250(mV vs. CSE)、下部鉄筋では約-500(mV vs. CSE)であり、腐食電流密度が上部鉄筋では約 0.9($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)、下部鉄筋では約 1.5($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)であった。したがって、本研究ではこれらの閾値を用いることで、実構造物における現場を想定した測定値から、上部鉄筋と下部鉄筋の腐食を把握できると考えられた。

3.3 塩化物イオンの測定結果

図-14、図-15 に NA(1), (2)および NB(2), (3)の図-5 で示した 3 点における塩化物イオンの測定結果を示す。いずれの供試体も上部鉄筋の直上では塩化物イオン濃度が平均約 25 (kg/m^3)であり、下部鉄筋の直上および直下では NA は 14.1~19.4 (kg/m^3)、NB では 10.1~15.3 (kg/m^3)であった。下部鉄筋の直上および直下での塩化物イオン濃度が鉄筋腐食限界濃度を大きく超えており、下部鉄筋も腐食と判定されたことと一致した。

3.4 含水率の測定結果

図-16、図-17、図-18 に NA, NB および NC の底面中央部の含水率の測定結果を示す。NA から NB, NB から NC と供試体の高さが大きくなるにつれて、経過日数が増えても含水率の測定値が大きくなっていない。また 400 日目経過時点での NA および NB において、下部鉄筋も腐食していると判定された NA(1),(2),(4)および NB(2),(3),(5)の含水率が、残りの他の供試体と比較して、約 5 (%)より高いことがわかる。NC については、測定期間を通じて供試体の差異は小さく安定している。

このように、非破壊試験である含水率測定からも、塩分供給から 400 日目経過時点で NA および NB, 特に NA (供試体高さ: 128(mm)) の底面近くまで塩分が供給面から浸透してきていることが推察された。

4. 結論

本研究の範囲内で次のことが明らかになった。

- (1) 実構造物における現場測定を想定した JB での測定において、かぶりが大きく測定間に腐食していない下部鉄筋が存在しても上部鉄筋の腐食を判定できた。また、継続測定することで、下部鉄筋の腐食判定も可能であることが示唆された。
- (2) NA および NB シリーズにおける RC 床版の現場測定を想定した JB での測定値によって、上部鉄筋のみ場合は自然電位が約-250~-300(mV vs. CSE)、腐食電流密度が約 0.6~0.9($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)を、上部鉄筋および下部鉄筋双方の場合は自然電位が約-500(mV vs. CSE),

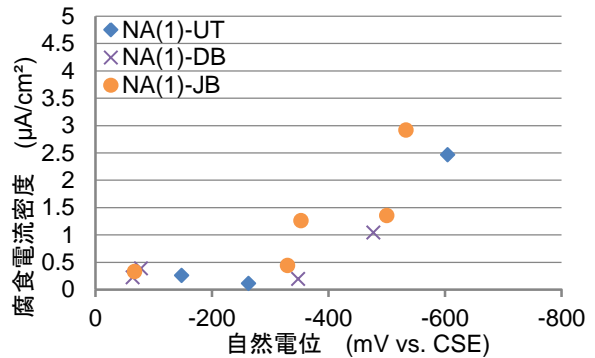


図-12 NA(1)の自然電位と腐食電流密度との関係

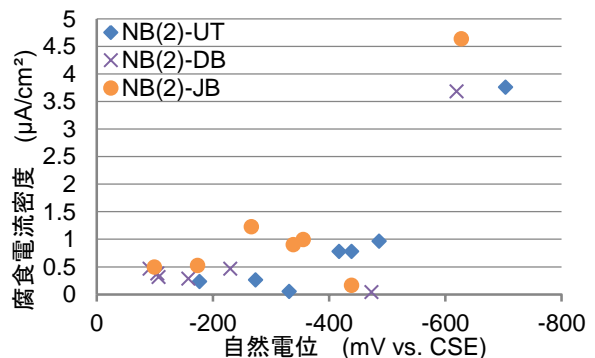


図-13 NB(2)の自然電位と腐食電流密度との関係

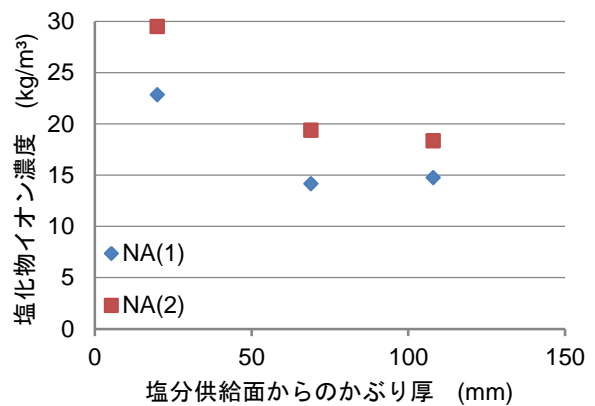


図-14 NA(1), (2)の塩化物イオン濃度の測定結果

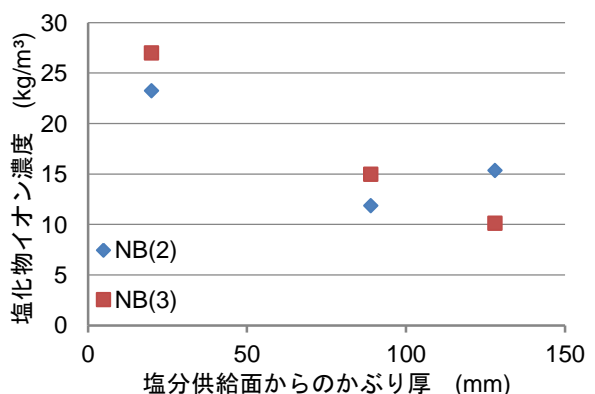


図-15 NB(2), (3)の塩化物イオン濃度の測定結果

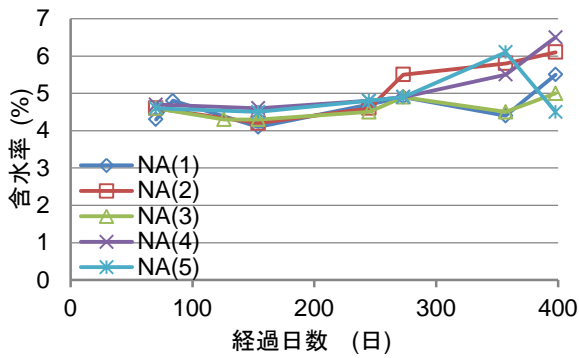


図-16 NAの含水率の測定結果

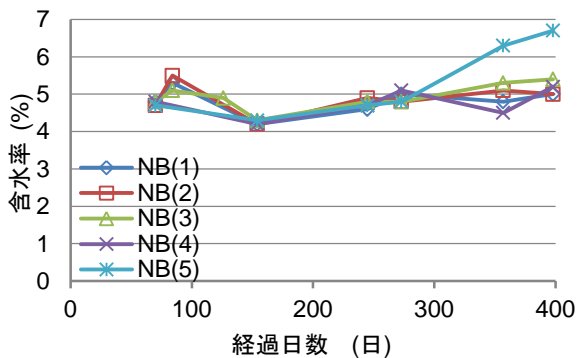


図-17 NBの含水率の測定結果

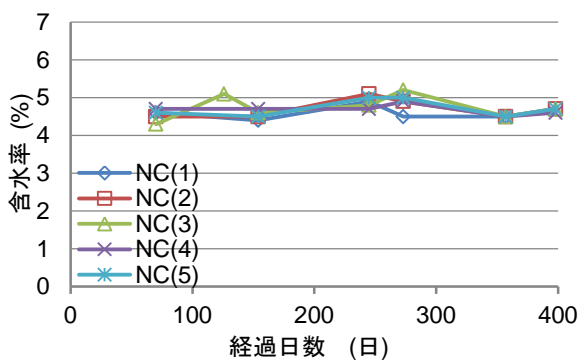


図-18 NCの含水率の測定結果

腐食電流密度が約 1.4~1.5($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)を閾値として鉄筋腐食を判定できることが示唆された。

(3) 塩分供給開始から 400 日が経過した時点で NA およ

び NB シリーズの下部鉄筋が腐食発生と判定されたが、底面から測定した含水率の増加傾向と一致していた。

謝辞 本研究は、科学研究費補助金（基盤研究 B 課題番号 26289133）を受けて実施した研究成果の一部です。

参考文献

- 1) 太田哲司ほか：凍結防止剤により塩害劣化した床板の健全度についての研究，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 14 巻，2014
- 2) 山本悟，上野萌，石井浩司，関博：マクロセルを形成したコンクリート中鉄筋の電気防食効果に関する実験的研究，土木学会論文集 E2（材料・コンクリート構造），Vol. 68， No. 1， pp. 9-25， 2012
- 3) 古村惇朗，杉山隆文：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，コンクリート工学年次論文集，Vol.34， No.1， pp.1012-1017， 2012
- 4) 横田優：電気化学的方法，講習会「コンクリート構造物の診断技術」，pp.26-31， 2001
- 5) 吉田秀典，川上純，荒木志帆，横田優：電流分散範囲を考慮した分極抵抗評価に関する数値解析的研究，土木学会論文集 A2（応用力学），Vol. 69， No. 2， pp. I_677-I_687， 2013
- 6) ASTM C876-09: Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete, 2009
- 7) C. Andrade and C. Alonso: Test methods for on-site corrosion rate measurement of steel reinforcement in concrete by means of the polarization resistance method, Materials and Structures / Matériaux et Constructions, Vol. 37, Nov.2004, pp 623-643
- 8) I. Zafar and T. Sugiyama: Laboratory investigation to study the corrosion initiation of rebars in fly ash concrete, Magazine of Concrete Research, Vol.66, No.20, pp.1051-1064, 2014