

論文 相対湿度および亜硝酸リチウムが鉄筋腐食に及ぼす影響に関する基礎的研究

李春鶴*1・江良和徳*2・辻幸和*3・郭度連*4

要旨：本研究では、地下鉄や地下の密閉空間、あるいは橋台の盛り土側などのコンクリート構造物の鉄筋腐食問題を課題と挙げて、鉄筋腐食と相対湿度および亜硝酸リチウムとの関連を試みた。中性化および塩害を模擬して、不働態被膜を破壊させた供試体を、異なる相対湿度の環境に曝露し、腐食の進行を検討した。また、一部の供試体に対しては、亜硝酸リチウムの腐食抑制効果についても検討を行い、その結果コンクリートの品質によるが、本研究の範囲内では、亜硝酸リチウムの圧入の有無にかかわらず、相対湿度が鉄筋腐食には大きい影響を及ぼすことが確認できた。

キーワード：鉄筋腐食、相対湿度、亜硝酸リチウム、質量変化、自然電位、分極抵抗、耐久性

1. はじめに

鉄筋コンクリート(RC)部材の劣化としては、様々な要因が挙げられるが、そのなかでも鉄筋の腐食は代表的な劣化形態の一つである。RC部材の鉄筋の腐食について、塩害や中性化などにより、鉄筋の不働態被膜が破壊されるのがその主要因になるが、反応物としての水分や酸素の供給も不可欠である。たとえ、塩害や炭酸化が進行するような環境状況においても、コンクリート中の鉄筋への水分供給程度を変えることによって、鉄筋腐食反応を制御することができると考えられる。従って、地下鉄の背面のようなある程度密閉した空間、あるいは橋台などの構造物の盛り土側部は、雨水などの液状水が直接にかかりにくいいため、地下水などを調整し、相対湿度を調整することで、コンクリート中の鉄筋腐食の反応を抑制することが可能であると推察できる。

また、鉄筋表面の不働態被膜を再生する効果として、亜硝酸イオンが注目されている。江良らの研究¹⁾では、亜硝酸イオンは2価の鉄イオン(Fe^{2+})と反応してアノード部からの(Fe^{2+})の溶出を防止し、不働態被膜(Fe_2O_3)として鉄筋表面に着床することによって、鉄筋腐食反応を抑制することが確認されている。しかしながら、例えば盛り土側の構造物においては、腐食程度や抑止効果を確認することが難しい。そのため地下水位置によるが、構造物の表面の接触部位の乾湿状態から亜硝酸リチウムの効果を確認するのが有効な方法であると考えられる。

鉄筋腐食の検討について既往の研究^{2,3,4)}では、自然電位法や分極抵抗法を使い、塩化物イオンは鉄筋腐食の速度に及ぼす影響についての検討と腐食発生に関しては塩分の限界量についての検討が行われている。また、中性化や乾湿繰返しを同時進行させ、埋設鉄筋の経時変化を調べた報告⁵⁾および中性化深さの程度が腐食開始に及ぼす報告⁶⁾も行われている。しかしながら、これらの研究は、液状水によるコ

ンクリートの含水率の変化が鉄筋腐食に及ぼす影響に関する研究であり、液状水ではない周辺の相対湿度の影響については、ほとんど検討されていない。

本研究では、基礎的研究としてまず異なる相対湿度環境におけるモルタル供試体の腐食進行について検討した結果を報告する。その後、亜硝酸リチウムの圧入の有無によるコンクリートの腐食抑制効果に及ぼす相対湿度の影響について報告する。

2. 実験概要

本研究では、二つのシリーズに分けて、鉄筋コンクリート構造物の鉄筋腐食についての相対湿度の及ぼす影響を検討した。シリーズ1では、予め中性化させたモルタル供試体の鉄筋腐食に関する相対湿度の影響を検討した。また、シリーズ2では、予め塩分を練り混ぜたコンクリート供試体の亜硝酸リチウムの有無における相対湿度の影響を検討した。

2.1 使用材料および配合

シリーズ1の供試体の配合は、水セメント比が65%で、細骨材の占める体積率が50%のモルタルである。これは、中性化促進試験により鉄筋の不働態被膜を破壊させる目的で水セメント比が大きい供試体を用いた。使用したセメントは普通ポルトランドセメントで、細骨材は、密度が $2.64\text{g}/\text{cm}^3$ の豊浦砂を用いた。また、鉄筋は $\Phi 9(\text{SR295})$ の丸鋼を用いた。

シリーズ2の供試体は、橋台などの構造物を模擬するため、早強ポルトランドセメントを用いた設計基準強度が $24\text{N}/\text{mm}^2$ のコンクリートを用いた。練混ぜの際、予め $8.24\text{kg}/\text{m}^3$ の塩分をコンクリートに添加した。鉄筋は $\Phi 13(\text{SR295})$ の丸鋼を用いた。

2.2 供試体の形状寸法

シリーズ1の供試体は、Fig. 1(a)に示すように、供試体の

*1 宮崎大学 工学教育研究部 社会環境システム工学科准教授 博士 (工学) (正会員)

*2 極東興和(株) 営業本部補修技術課課長 博士 (工学) (正会員)

*3 群馬大学・前橋工科大学 名誉教授 工博 (名誉会員)

*4 太平洋マテリアル(株) 開発研究所サーブリーダー 博士 (工学) (正会員)

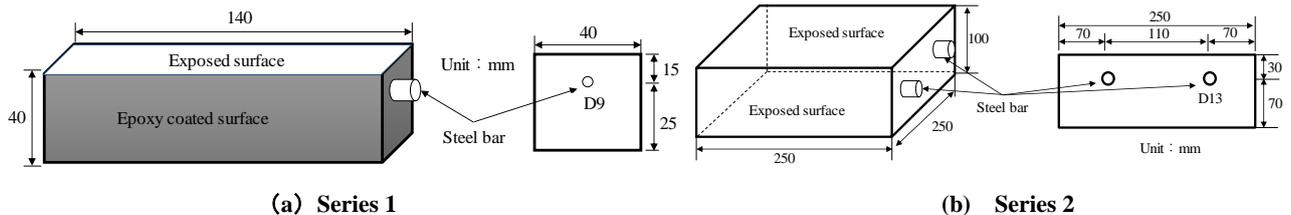


Fig. 1 Dimensions of test specimen

形状寸法が 40mm×40mm×140mm の角柱で、鉄筋はかぶり
が 10.5mm の位置に 1 本配置した。脱型後、型枠面（曝露面）
一面を残して、ほかはエポキシ樹脂とアルミテープにより表
面被覆を行い、水分や気体の侵入を防いだ。

シリーズ 2 の供試体は、Fig. 1 (b) に示すように、250
mm×250 mm×100mm の板状で、鉄筋はかぶりが 23.5mm と
なるように 2 本ずつ配置した。

2.3 養生及び曝露状況

シリーズ1の供試体は、打込みの翌日に脱型し、材齢 7 日
まで水中養生を行った。その後、相対湿度が 60%、温度が
20℃の環境で 1 週間乾燥させた後、自然電位が-350mV(硫
酸銅電極使用)になるまで、相対湿度が 60%、温度が 20℃、
炭酸ガス濃度が 5%の促進中性化装置で中性化をさせた。

Table 1 に示すように、自然電位が-350mV(硫酸銅電極使
用)になった時点で、鉄筋の不働態被膜が破壊されたと判定
して、促進中性化を終了した。その後、温度が 20℃の、相対
湿度が 40%程度、60%程度、80%程度の 3 種類の曝露環境
において 3 体ずつ曝露させた。相対湿度が 60%の場合は、
恒温恒湿室、そのほかの環境は、Table 2 に示す塩類飽和
溶液調湿法⁷⁾を用いた。

シリーズ 2 の供試体は打込み後、3 日間湿潤マットでラッ
プし、脱型後 5 日間水中養生を行った。その後、温度が
20℃、相対湿度が 60%程度の環境に曝露し、材齢 249 日目
から材齢 286 日目まで、さらに 200ml ずつの水を 4 回湛水さ
せ、自然電位を-350mV まで下げて鉄筋腐食を促進 (Table
1)させた。そして材齢 304 日目で供試体に亜硝酸リチウムを
0.5MPa の圧力にて圧入した。圧入孔は両鉄筋間の中央ライ
ンの位置において、供試体を 3 等分するように、直径が
10mm、深さが 70mm 程度の穴を 2 個削孔した。一般的に、
実際の現場で使用される亜硝酸イオンと塩化物イオンのモ
ル比が 1.0¹⁾ということを勘案して、47.2ml/孔の亜硝酸リチ
ウム水溶液(亜硝酸リチウム溶液濃度は 40%で、その密度は
1.25x10³kg/m³)の量を圧入することで NO₂⁻/Cl⁻=1.0(モル比)
になるように調整した。その後、相対湿度が 40%程度、60%
程度、80%~90%程度の環境に 2 体ずつ曝露を開始させた。

2.4 測定項目

シリーズ 1 では、主に自然電位と分極抵抗の測定を行い、
自然電位の補正のため、中性化深さ、含水率も併せて測定
した。

異なる相対湿度環境に曝露する前の鉄筋表面の自然電

Table 1 Guidance on interpretation of results from half-cell surveys⁷⁾

Ecorr(Cu/CuSO ₄)(mV)	Probability of corrosion
>-200	Greater than 90% probability of no corrosion
-350 to -200	Corrosion activity uncertain
<-350	Greater than 90% probability of active corrosion

Table 2 Laboratory methods for maintaining constant humidity⁷⁾

Temp.	R.H.	Salt solutions
20℃	40%	K ₂ CO ₃
	80%	KBr
	90%	K ₂ HPO ₄ + NH ₄ H ₂ PO ₄

Table 3 Guidance on interpretation of results of polarization resistance

Polarization resistance(kΩ · cm ²)	Corrosion state
>130	Passive
53 to 130	Low corrosion
26 to 52	Moderate
>26	High corrosion

位は、JSCE-E601-2000「コンクリート構造物における自然電
位測定法」を準用して、硫酸銅溶液電極を用いて測定した。
自然電位の測定には、コンクリートの表面を湿潤な状態に保
つ必要があるため、3 回程度スポンジで水を塗ることによっ
てコンクリート表面を湿らせた後、すぐに自然電位の測定を行
った。毎回の測定は、30 分以内に行った。

測定した自然電位の値は、Table 1 に示す ASTM
C876-99 規格⁷⁾を用いて腐食状況の評価を行った。

自然電位は、中性化深さ、含水率、計測環境温度の影響
を多く受けることで、測定結果は式(1)を用いて中性化深さ
や含水率の影響の補正¹⁾を行った。

$$\begin{aligned} X &= X_0 - (X_1 + X_2) \\ X_1 &= -25 \times Z_1 + 180 \\ X_2 &= 8 \times Z_2 \end{aligned} \quad (1)$$

ここに、Z₁:含水率(%), Z₂:中性化深さ(mm), X:補正した
自然電位(mV), X₁, X₂:はそれぞれ含水率と中性化深さによ
り補正した自然電位(mV), X₀:は測定した自然電位(mV)で
ある。ここでは、同じ条件で養生曝露した鉄筋を配置してい
ない供試体の含水率と中性化深さの測定も行い、中性化深
さおよび含水率による補正を行った。

中性化深さ試験は、日本工業規格 JIS A 1152 に準じて行
った。鉄筋が入ってない供試体を、圧縮試験機を用いて真
中を割裂して、割裂面にフェノールフタレイン溶液を吹き付

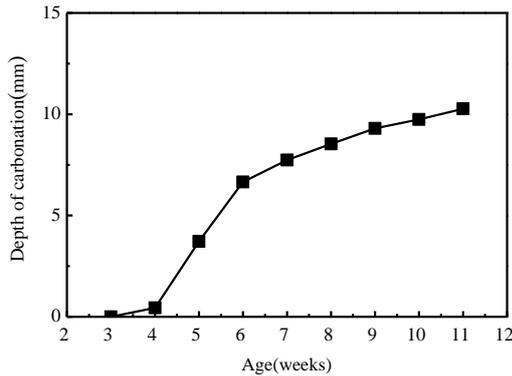


Fig. 2 Depth of carbonation

けた。未呈色部分を中性化部分として、1 側面につき 6 等分した 5 箇所を測定して、その平均を中性化深さとした。

含水率の測定は、日本工業規格 JIS A 1125 に準じて行った。中性化深さと同様に、自然電位の測定用と全く同様な養生、曝露を行った鉄筋が入ってない供試体を用いて、自然電位を計測するたびに計測した。また、自然電位計測時にスポンジで水を塗るため、含水率測定用供試体も、自然電位の測定用の供試体と同程度にスポンジで水を塗り、その質量を測定した。測定が完了した材齢 94 日において、105°Cの炉乾燥で 24 時間乾燥させた質量を絶乾質量とし、以下の式(2)によって求めた。

$$p = \frac{w_1 - w_2}{w_2} \times 100 \quad (2)$$

ここに、 w_1 :各曝露材齢時の質量(g)、 w_2 :絶乾質量(g)、 p :コンクリートの含水率(%)である。

また、計測環境温度の影響は、以下に示す算定式の式(3)を用いて補正を行った。

$$E_t = E + 0.9 \times (t - 25) \quad (3)$$

ここに、 E_t :温度による補正した自然電位(mV)、 E :自然電位の実測値(mV)、 t :測定時の温度(°C)である。

異なる相対湿度環境に曝露してからは、高低 2 周波のインピーダンス測定により、自然電位と分極抵抗を測定した。分極抵抗法は、コンクリート表面に当てた電極から内部鉄筋へ微弱な電流を流したときの分極抵抗を測定して、鉄筋の腐食速度を推定する方法である。測定した分極抵抗値は、Table 3 により腐食速度の評価を行った。

シリーズ 2 では、供試体の自然電位、供試体と鉄筋の質量変化を計測した。

鉄筋表面の自然電位は、シリーズ 1 と同様に JSCE-E601-2000「コンクリート構造物における自然電位測定法」を準用して、硫酸銅溶液電極を用いて測定し、式(3)により測定環境温度の影響の補正を行った。

自然電位による腐食の判断は、Table 1 に示す ASTM の規格を基準とした。

供試体質量の測定には 5g 精度で、最大 60kg まで測定可

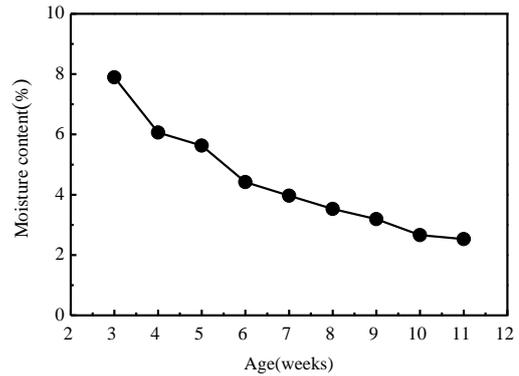


Fig. 3 Moisture content

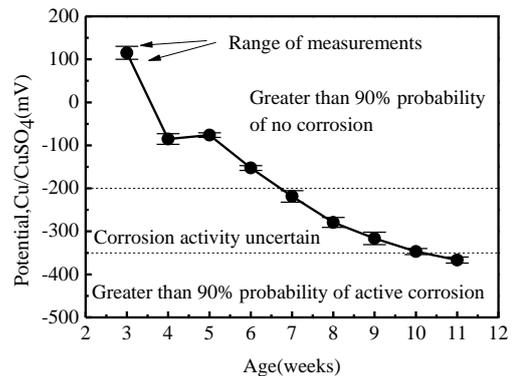


Fig. 4 Potential (Cu/CuSO₄)

能なはかりを用いた。材齢 320 日 (異なる相対湿度環境へ曝露開始日)の質量をベースとして、所定の曝露日ごとに質量を計測することで、質量の変化を検討した。なお、質量は自然電位の測定を行う直前に測定した。鉄筋質量の測定には、精度が 0.1mg のはかりを用いて、打込み前と腐食実験後にそれぞれ計測した。

3. 実験結果および考察

3.1 モルタル供試体の鉄筋腐食における相対湿度の影響

(1) 不働態被膜破壊するまでの結果および考察

中性化深さと含水率の経時変化を、Fig. 2 と Fig. 3 にそれぞれ示す。2 週目は中性化の進行速度が遅いが、3 週目から急激に増加する傾向を示した。これは初期の段階では、水分が多く存在するため、中性化が進行しにくくなるが、その後、乾燥の進行により、含水率が小さくなり、閉塞されてない空隙がモルタル表面まで連続的に繋がることで、モルタル供試体に二酸化炭素が多量に入り込み、中性化が早く進行したと考えられる。

Fig. 4 に自然電位の経時変化を示す。9 体の供試体の平均値とその測定範囲である。自然電位は多少不一致などところが見られたが、時間の経過に従い低下する傾向を示した。

(2) 不働態被膜破壊後の結果および考察

異なる相対湿度環境に曝露してからの供試体の含水率の測定結果を、Fig. 5 に示す。材齢 77 日、すなわち、曝露開始時の 2.5%程度の含水率は、相対湿度が 60%の曝露環境では、2 週間程度で 2%程度に留まっていることが見て取れる。

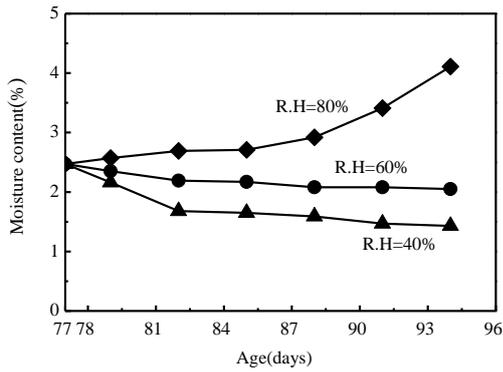


Fig. 5 Moisture content (After exposure)

しかし、相対湿度が80%の曝露環境では、含水率が4%まで上昇し、相対湿度40%の曝露環境では、1.5%程度までに含水率が低下し、その変化は時間の経過に伴って増加していることが見て取れる。

Fig. 6 に異なる相対湿度環境に曝露してからの供試体の自然電位の測定結果を示す。図に示すように、相対湿度が40%程度、60%程度の環境では、それぞれ-350mV、-370mVの電位に安定し、曝露開始から2週間後に若干増加する傾向が見て取れる。その一方で、相対湿度が80%程度の環境では、曝露開始からの自然電位の低下が顕著である。これは、供試体の含水率の増加と関連があると考えられる。

Fig. 7 に異なる相対湿度環境に曝露開始からの供試体の分極抵抗値の測定結果を示す。すべての曝露環境中の供試体の分極抵抗の値が初期の3日間においては、低下するまたは横ばいになる傾向を示したが、その後大きな差を示している。相対湿度が40%程度の曝露環境下においては、分極抵抗値が増加し、相対湿度が60%程度の環境下においては分極抵抗がほぼ一定となった。一方、相対湿度が80%程度の環境下においては、分極抵抗の値が小さくなる傾向を示している。これは初期の3日間が中性化促進段階から腐食傾向を引き続いたが、その後促進中性化の影響がなくなったため、各曝露の環境の含水率の相違により、分極抵抗の値がそれぞれ異なって、含水率が大きいほど分極抵抗が低下すると考えられる。

このように、Table 3 の腐食速度の判断基準⁸⁾によると、相対湿度が60%程度以上の曝露環境においては、低～中の腐食速度が発見され、相対湿度が大きくなるに従って、腐食速度も大きくなっていることが推測される。一方で、相対湿度が40%程度の曝露環境においては、腐食が停滞することが推測される。

Photo. 1 は、異なる相対湿度環境で曝露後の供試体から鉄筋を取り出して撮った写真である。写真に示すように、相対湿度が40%程度の環境で曝露した供試体の鉄筋はほぼ健全であり、相対湿度が60%程度および80%程度の環境で曝露した供試体の鉄筋には錆があり、相対湿度が高いほど

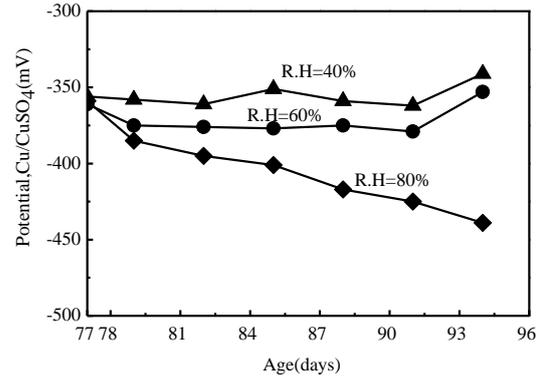


Fig. 6 Potential (After exposure)

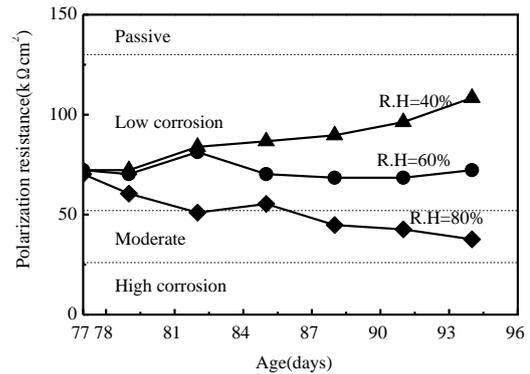


Fig. 7 Polarization resistance

ど、その量が増加し、面積が大きいことが見て取れる。これは、Table 3 の基準に従って行った判断結果と整合性が取れたと考えられる。

すなわち、相対湿度の高い曝露環境の場合、供試体に水分が供給され、コンクリートの含水率が増加する。含水率の増加により酸素拡散係数は小さくなるものの、水分供給の増加とそれに伴う溶存酸素の増加により鉄筋腐食が進んだと考えられる。逆に、相対湿度が低い曝露環境の場合、供試体から水分が逸散され、コンクリートの含水率が低下する。含水率の低下により酸素拡散係数は大きくなるものの、鉄筋の腐食反応に必要な水分の減少とそれに伴う溶存酸素の減少により鉄筋腐食が抑制されたと考えられる。

3.2 亜硝酸リチウムの有無の鉄筋腐食における相対湿度の影響

(1) 供試体の質量変化

Fig. 8 には、各相対湿度環境における亜硝酸リチウムの圧入の有無による供試体の質量変化を示す。供試体は40%程度および60%程度の相対湿度環境では供試体の水分逸散により質量が減少し、亜硝酸リチウム溶液の水分の影響により、亜硝酸リチウムを圧入している供試体は亜硝酸リチウムを圧入していない供試体より質量変化率が大きい。しかしながら、80~90%程度の相対湿度環境では供試体への水分供給により、供試体の質量が増加し、亜硝酸リチウム溶液の水分の影響により、亜硝酸リチウムを圧入している供試体は亜硝酸リチウムを圧入していない供試体より質量変化率が小さい。

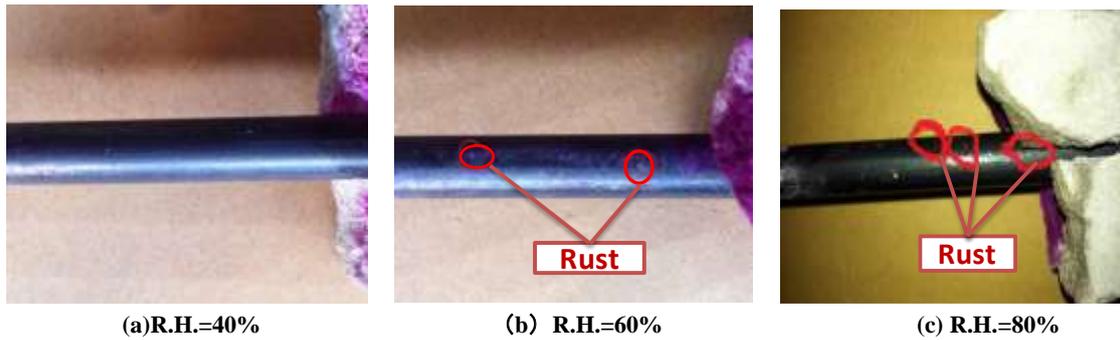


Photo. 1 Corrosion state (Series 1)

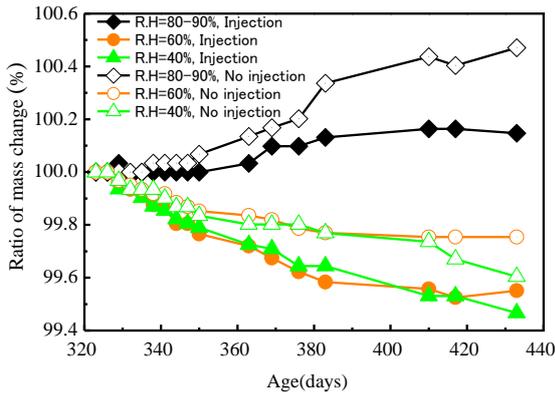


Fig. 8 Ratio of mass change

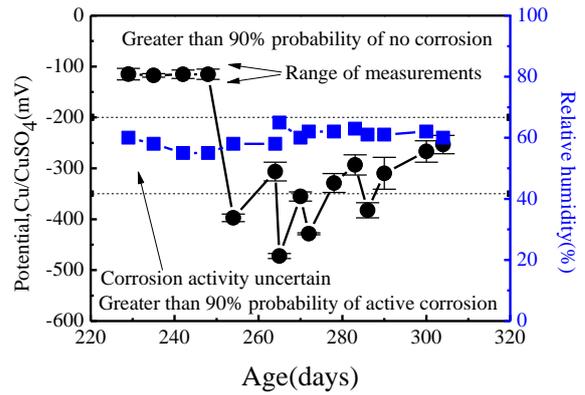


Fig. 9 Potential (Before injection)

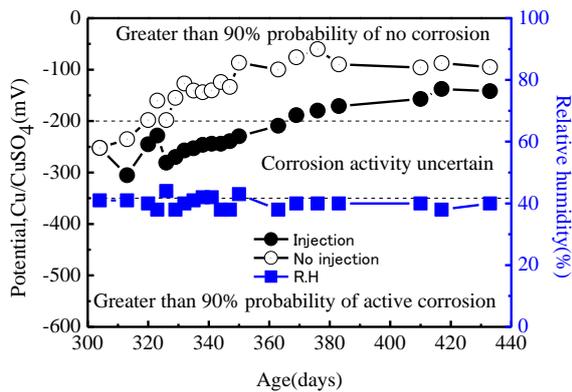


Fig. 10 Potential with/without NO_2^- (R.H.=40%)

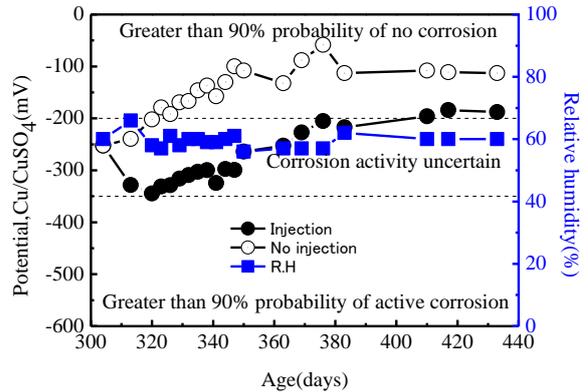


Fig. 11 Potential with/without NO_2^- (R.H.=60%)

(2) 自然電位の変化

Fig. 9 には、亜硝酸リチウム圧入前の供試体の自然電位を示す。図に示すように、材齢 250 日から材齢 290 日の間で、湛水により自然電位が -350mV 以下になっていることが確認できる。これで不動態被膜が破壊されたと判断し、それぞれの曝露環境に曝露を開始した。

Fig. 10~Fig. 12 には、各相対湿度曝露環境における自然電位の傾向を示す。相対湿度が 60%より小さい曝露環境においては、亜硝酸リチウムの圧入の有無にかかわらず、材齢の増加に伴い、自然電位が貴の傾向になり、その変化勾配は相対湿度が小さい曝露環境ほど急な勾配になっていることが確認できる。また、同じ相対湿度曝露環境において、亜硝酸リチウムを圧入した供試体は、亜硝酸リチウム溶液の水分の影響により、圧入初期において、圧入していない供試体より卑な電位になっているが、その後は、亜硝酸リチウムの腐

食抑制効果により、鉄筋の自然電位が貴な電位へ変化した。また、相対湿度が小さい曝露環境ほど、さらに水分の逸散量が大きくなり、さらに亜硝酸リチウムの鉄筋腐食抑制効果により、貴な電位への変化勾配が大きいことが確認できる。

相対湿度が 80%程度以上の曝露環境においては上記と異なる傾向となる。すなわち、亜硝酸リチウムを圧入していない供試体の場合、相対湿度が 80%程度の曝露環境では、材齢の増加に伴い自然電位はほぼ変化がないが、相対湿度が 90%程度になると急激に卑な電位になっていることが確認できる。しかしながら、亜硝酸リチウムを圧入している供試体は、相対湿度が 80%程度の曝露環境において、圧入初期は、亜硝酸リチウム溶液の水分により自然電位が圧入していない供試体より若干下がっているが、材齢の増加に伴い自然電位は貴な電位に変化し、相対湿度が 90%になって、水分供給が増加されても自然電位のほとんど変化がないこ

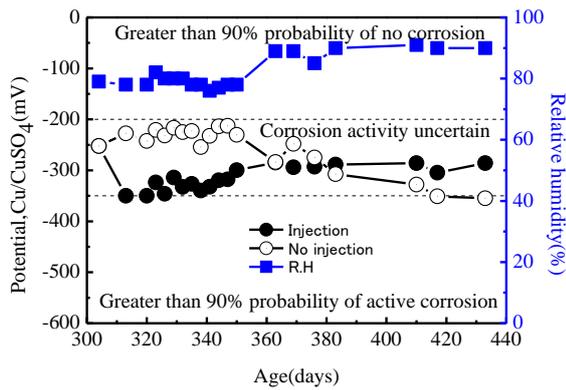


Fig. 12 Potential with/without NO_2^- (R.H.=80-90%)

とが確認できる。

(3)腐食による鉄筋の質量減少率

Fig. 13 には、鉄筋の質量減少率を示す。相対湿度が 80～90%の場合に鉄筋の質量減少率が増加し、また、亜硝酸リチウムを圧入した供試体の鉄筋質量減少率が低減していることが確認できる。

以上の検討結果から以下のことが考えられる。まず、亜硝酸リチウムを圧入していない供試体については、異なる相対湿度環境による供試体への水分の逸散あるいは供給により、鉄筋腐食に及ぼす影響としてはシリーズ1で得られた知見と同様である。また、亜硝酸リチウムを圧入した場合、圧入初期においては、亜硝酸リチウム溶液の水分の影響が鉄筋の自然電位に影響があるが、本研究の圧入量の範囲内では、その影響の程度は小さい。しかしながら、長期的には、異なる相対湿度の曝露環境による含水率の変化とそれに伴う溶存酸素の変化、また、亜硝酸リチウムの鉄筋腐食に及ぼす影響が複合的に作用し、相対湿度の小さい曝露環境ほど、亜硝酸リチウムの腐食抑制効果が大きいことが明らかになった。

4. まとめ

本研究では、以下の知見を得た。

(1) コンクリート、モルタルに関わらず、相対湿度環境は RC 部材の鉄筋の腐食には大きな影響を及ぼす。すなわち、曝露環境の相対湿度が小さいほど、鉄筋の腐食抑制効果があり、相対湿度が大きい場合は、腐食反応が進む可能性が明らかになった。これは、異なる相対湿度による供試体の水分の逸散、あるいは供試体への水分供給により、供試体の含水率が変化し、さらにそれに伴う溶存酸素が変化するためである。

(2) 亜硝酸リチウムを圧入した場合、圧入初期においては、自然電位が下がるが、長期的には、相対湿度の小さい曝露環境ほど、亜硝酸リチウムの腐食抑制効果が大きいことが明らかになった。亜硝酸リチウム溶液の水分の影響、異なる相対湿度の曝露環境による含水率の変化とそれに伴う溶存酸素の変化、また、亜硝酸リチウムの鉄筋腐食に及ぼす影響

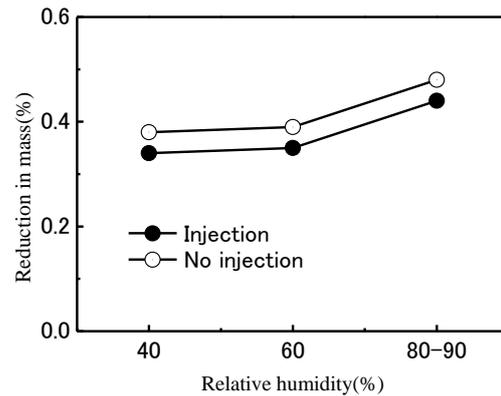


Fig. 13 Reduction in mass with/without NO_2^-

が複合的に作用するためである。すなわち、相対湿度の大きい曝露環境において、亜硝酸リチウムを圧入していない供試体が卑な電位に変化することは、亜硝酸リチウムの腐食抑制効果が確認できる。一方、相対湿度が小さい曝露環境においては、亜硝酸リチウムの圧入の有無に関わらず貴な電位になることは、水分の低減と溶存酸素の低減が主要因か亜硝酸リチウムの腐食抑制効果が主要因か現段階では不明である。これは今後の課題にしたい。

従って、RC 構造物において、直接に雨水がかからない、あるいは漏水などの液体状態の水分の影響を受けない部位においても、周辺の相対湿度の管理をしっかりとする必要があり、それにより構造物の耐久性を向上させることが可能である。

謝辞：

本実験の実施にあたり、コンクリートメンテナンス協会にご協力頂いた。厚くお礼申し上げます。また、実験の実施、データの整理について、宮崎大学の犬寺稔雅氏（現宮崎市役所）、長谷川貴広氏（現安藤・間組）、堀田成治氏、群馬大学のチャンドックヒュウ氏（現日本コンクリート工業）の支援を頂いた。ここに記して謝意を示す。

参考文献：

- 1) 一般社団法人コンクリートメンテナンス協会：コンクリート構造物の維持管理，pp.37-38，2014
- 2) 土木学会：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，コンクリート技術シリーズ，No.26，pp.123-126，2001
- 3) 佐伯竜彦，大即信明，長滝重義：中性化によるモルタル中の鉄筋腐食の定量的評価，土木学会論文集，No.532，V-30，pp.55-65，1996
- 4) 佐々木孝彦，玉井謙，工藤輝大：自然電位による鉄筋腐食判定に関する考察，コンクリート工学年次報告集，Vol.18，No.1，pp.36-39，1996
- 5) 仁平達也，井原啓知，関博：中性化および乾湿繰り返しを受けるコンクリート中の鉄筋腐食について，コンクリート工学年次論文集，Vol.25，No.1，pp.815-820，2003
- 6) 蒔田鐵夫，片山敏幸：コンクリートの電気的特性に関する研究，日本建築学会東海支部研究報告，Vol.23，No.6，pp.17-20，1991
- 7) ASTM C 876-99：Standard test method for half cell potentials of reinforcing steel in concrete，Annual book of ASTM standards，Vol.03.02，pp.11-16，1999
- 8) Hugh M. Spencer：International Critical Table，Vol.1，pp.67，1926