

論文 室内仕上げ材料の透湿性能が地下水の浸透するコンクリート壁面中の鉄筋腐食に及ぼす影響

萩原 大基*1・塚越 雅幸*2・上田 隆雄*3・中山 一秀*4

要旨：外壁面側から水分の供給がある地下 RC 壁面に対し，室内側の仕上げ材料の透湿性能の違いが鉄筋腐食に及ぼす影響について検討した。実験では地下壁面を模した角柱供試体の室内側を想定した面に透湿性能の異なるいくつかの仕上げ材料を施工し，裏面から水分を供給した。室内側と想定した面には高湿と乾燥を繰り返し与え鉄筋の腐食状況を観察した。本実験条件の範囲では，室内側の仕上げ材料は室内が高湿の場合透湿性の低いものを，室内が乾燥している場合は透湿性の高いものを使用した方が鉄筋腐食は抑制される傾向にあり，室内側からの水分の浸入を抑制もしくは乾燥を促すような条件が鉄筋腐食抑制に有効であった。

キーワード：地下構造物，仕上げ材料，鉄筋腐食，含水率

1. はじめに

地下室の利用については，1994 年の建築基準法改正での「その建築物の床面積の合計 3 分の 1 以下に限り，容積率に算入しない」という措置により，都市部など狭い敷地を有効利用するために多く採用されるようになった。地下室は建築面積の拡張だけではなく，防音性に優れる，外気温度の影響を受けにくいなどのメリットがあげられる一方で，湿気や換気の問題¹⁾，水害による浸水などのリスク対策を講じる必要がある。

建築物の防水については，1999 年の品確法の普及により地上部分の漏水については補修が義務化されたが，地下部分の漏水は品確法の適用外となっており補修義務はなく，地下構造物での漏水に関するトラブルは後をたたない²⁾。地下構造物の内外壁面には防水が施されるが，地下水の入り込みやすいとされる部位がある。コンクリート打ち継ぎ面や，貫通部となるセパレータ，パイプ周り，様々な原因で生じるコンクリートのクラックなどの不連続部分である³⁾。また，高度経済成長期には地下水の需要の急増により汲みあげ量が増大し，都市部を中心に地盤沈下の問題が深刻化した。1960 年代前半には，地下水採取規制や河川水への水源転換などの地下水保全対策が進んだため地盤沈下は沈静化し，徐々に地下水位は回復している⁴⁾。そのため，地下構造物にかかる水圧は増し，漏水の危険性もまた高くなってきていると推測される。地下構造物はその外周の状況を容易には確認することが出来ず，漏水(写真-1)が生じていても発見が遅れることが多い。

本研究では，地下 RC 壁の外壁側面より漏水が生じた

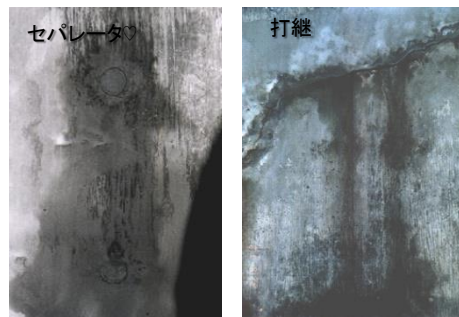


写真-1 地下室のRC壁の漏水の状況

際に，室内側の内装仕上げの種類が鉄筋腐食状況に及ぼす影響について，地下壁面を模した供試体を用いて実験的に検討を行なった。

2. 供試体の作製と試験条件

鉄筋の腐食速度は様々な要因により決まるが，鉄筋周辺のコンクリートの含水率と細孔溶液中の溶存酸素量に強く影響を受けることが知られている。特に，地下 RC 壁面は外壁面側から漏水が生じた際に高含水状態となりやすい。また，壁面の室内側には，透湿性の異なる材質と工法で様々な仕上げ材料が施工され，コンクリート内部の乾燥速度や酸素の供給量に影響を与える。そこで，外壁面から水分供給されているような地下 RC 壁面内部の鉄筋腐食状況を評価するために，室内側の表面仕上げ材料の種類や工法をパラメーターとした地下壁面を模した供試体を作製し，定期的に鉄筋の腐食性状の電気化学的モニタリングを実施した。

*1 徳島大学大学院先端技術科学教育部 知的力学システム工学専攻 (学生会員)

*2 徳島大学大学院社会産業理工学研究部 理工学域 社会基盤デザイン系 助教 博士(工学) (正会員)

*3 徳島大学大学院社会産業理工学研究部 理工学域 社会基盤デザイン系 教授 博士(工学) (正会員)

*4 東京工業大学 環境・社会理工学院 土木・環境工学系 助教 博士(工学) (正会員)

表-1 コンクリートの調合

W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)							スランブ (cm)	空気量 (%)	28日圧縮強度(N/mm ²)
		W	C	S	G	AE減水剤	AE剤	NaCl			
60	42.8								20	6.4	37.2
		179	298	782	956	1.6	0.024	8.2			

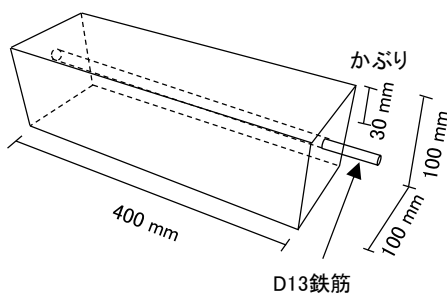


図-1 鉄筋コンクリート供試体の形状

2.1 鉄筋コンクリート下地と表面仕上げの種類

(1) 鉄筋コンクリートの作製

セメントは普通ポルトランドセメント（密度：3.16 g/cm³，比表面積：3280 cm²/g）を用いた。細骨材は、徳島県鳴門市撫養町産砕砂（表乾密度：2.56 g/cm³，F.M.：2.79），粗骨材は、鳴門市撫養町産砕石（表乾密度 2.55 g/cm³，Gmax：15 mm）を用い，AE減水剤を1.5 kg/m³，AE剤を0.02 kg/m³添加した。また，練り混ぜ水にNaClをCl濃度換算で5.0 kg/m³混入した。全ての供試体は打込み翌日，脱型を行い，20±2°C環境下で28日間の封緘養生を行った後に，1か月間20±2°C，60±6%R.H環境の実験室内で乾燥させた。コンクリートの調合条件を表-1に示す。コンクリートは図-1に示す通り100×100×400 mmの角柱形状とし，その後の試験で室内側を想定して仕上げ材料を施工する面より，かぶり厚さが30 mm位置に，エポキシ樹脂で露出部をシールしたD13鉄筋を配した。

(2) 内装側を想定した表面仕上げの施工

コンクリートの養生と乾燥終了後，打設時の型枠面側の1面に，建築の内装材を模擬したいくつかの種類表面仕上げ材料を施工した。表面仕上げの種類と工法などの条件については次の①～⑤の5水準の供試体を用意した。まず，①密着防水工法として，ウレタンゴム系塗膜材を塗膜厚さ2.0 mmとなるように直接コンクリート表面に施工した。②絶縁防水工法では，実際の建築物の屋上スラブコンクリートなどで用いられ，防水層下のコンクリート中の水蒸気が通気緩衝シートを介して脱気筒より放出される。この状態を供試体で再現するために，図-2に示す様にまず不織布タイプの通気緩衝シートを目止め材として高粘性のウレタンゴム系塗膜材で張り付け

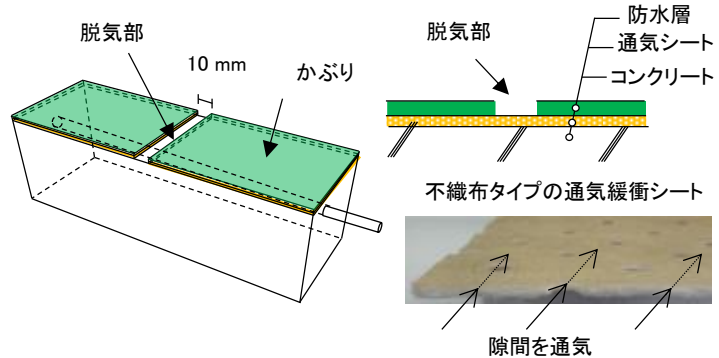


図-2 絶縁仕様のウレタン塗膜の構成

た後に，長手方向中央部の幅10 mmをマスキングしてから2.0 mm厚さのウレタン塗膜材を施工し，塗膜が完全に硬化する前にマスキングごとその直上部の塗膜材を切り取ることで通気緩衝シートを露出させ脱気筒による外気との接触箇所を再現した。③表面含浸工法としてシラン・シロキサン系含浸材を含浸深さ5.0 mm程度を目標に200 g/m²塗布したものを用意した。また比較として，水分の移動を遮断された状態を模擬するために④エポキシ樹脂を塗り厚さ1.0 mmでシールしたものと，なにも施工しない⑤表面仕上げなしの供試体を用意した。外壁面側より漏水を模擬した水分供給を行う面以外は全てエポキシ樹脂にてシールした。ただし，電気化学的モニタリングのために，供試体側面の鉄筋位置には2 cm角の測定窓を設け，暴露期間中はアルミテープで密封した。

ここで，仕上げ材を施工した面を仕上げ材施工面，その反対側の面を裏面，また各種表面仕上げの種類を①密着防水，②絶縁防水，③表面含浸材，④密着エポキシ，⑤表面仕上げなしと以後示すこととする。

2.2 試験条件

外壁面側からの漏水を模擬した水分の供給の有り無し，室内側の乾湿状況の違いをパラメーターに，供試体の暴露環境として図-3に示すような3水準を用意した。①漏水状況を模擬した供試体では，水を張った水槽に外壁面を想定したコンクリート裏面を浸し，室内側の環境となる仕上げ材施工面に対して，7日間の乾燥（20°C，60%RH）と7日間の湿潤（20°C，95%RH）の繰り返しを2か月間与えた後，乾燥環境下に静置した。比較として，外壁面側からの漏水はないものとし，コンクリート裏面はシールし，②仕上げ材施工面で乾湿繰り返しさせたものと，③仕上げ材施工面が乾燥一定での試験も行った。

供試体の自然電位、分極抵抗、コンクリート抵抗と重量をそれぞれ7日毎に測定した。なお電気化学的鉄筋腐食指標の測定を行う際の照合電極は、飽和銀塩化銀電極 (Ag/AgCl)、対極にはチタンメッシュを用いて、供試体中の鉄筋全長の平均値として測定を行った。分極抵抗は矩形波電流分極法で印加電流 10 μ A、周コンクリート抵抗は高周波数側 (800 Hz) のインピーダンス値として求めた。合わせてカソード分極曲線を、掃引速度を 100 mV/min で電位を自然電位より -1000 mV 分極させ、その間の電位と電流の関係を測定した。測定は供試体の側面の鉄筋

位置に、あらかじめ 2 cm 角程度のエポキシ樹脂を塗布していない測定窓が設けられており、図-4 に示すように暴露したコンクリート表面部分に照合電極と対極を湿润状態の脱脂綿を介して測定を実施した。供試体は全ての水準でそれぞれ2体ずつ用意しており、その平均値を試験結果として示す。

2.3 含水率変化と分布予測

実験では、全体の水分の収支として、重量による全体での水分の浸入と乾燥量を把握している。ここでは、各暴露期間での鉄筋付近の含水状態を把握するために、コンクリート中の水分移動シミュレーション予測を行った。なお、コンクリート内の水分移動については、簡便化のために水蒸気と液状水はまとめて Fick の拡散則に従うものとしたが⁵⁾、水分の拡散速度 D cm²/sec はコンクリー

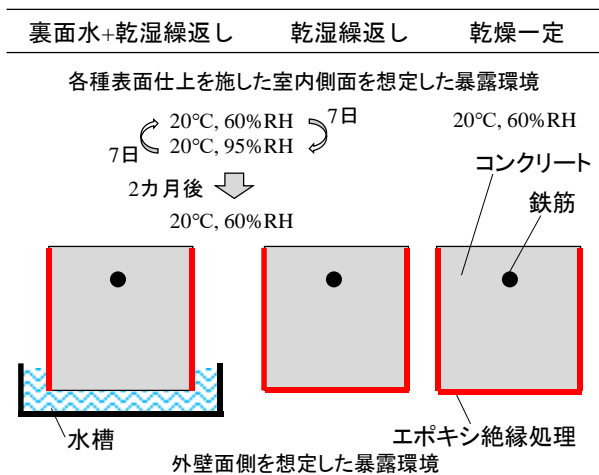


図-3 試験体の暴露環境

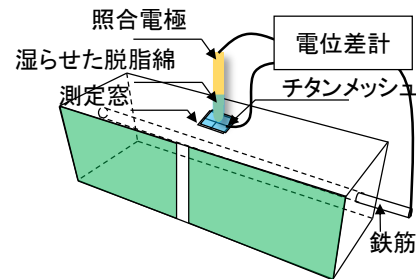


図-4 電気化学的モニタリングの模式図

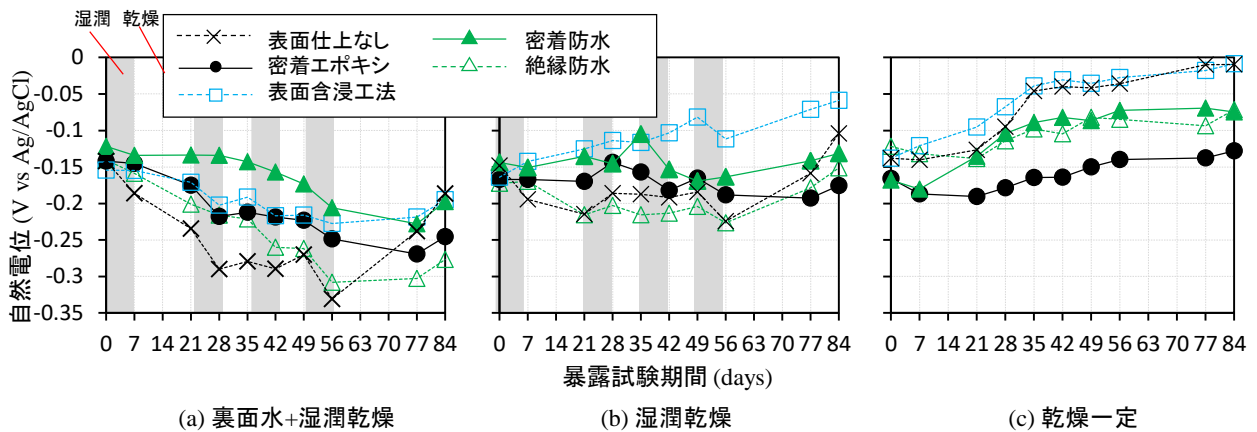


図-5 自然電位の測定結果

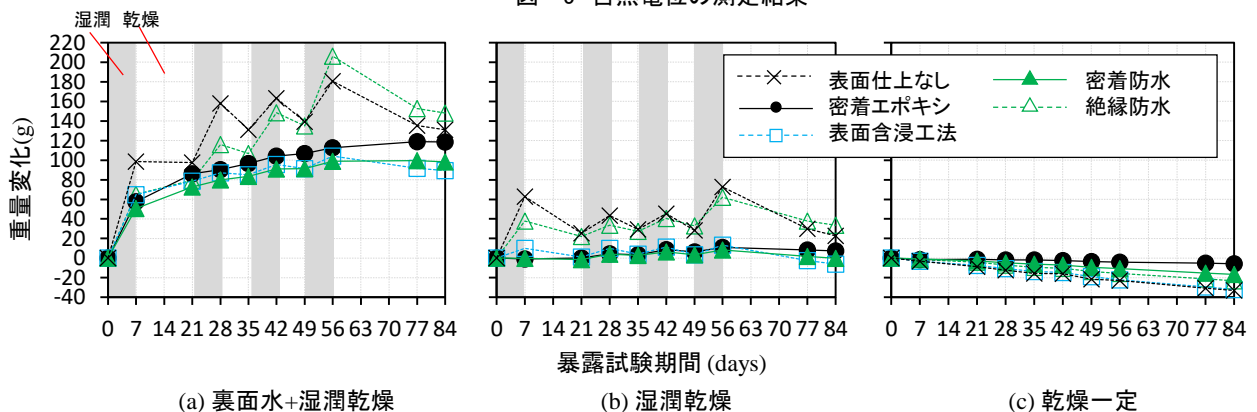


図-6 試験体の吸水・乾燥による質量変化の測定結果

トの含水率に依存することが知られている。ここでは、既往の文献⁹⁾を参考に式(1)より水分の拡散速度に及ぼすコンクリートの含水率の影響を算出した。

$$D/D_{100\%} = 1 / \left\{ 22 \left(1 - \frac{R}{100} \right) + 1 \right\}^{1.4} \quad (1)$$

ここで、 $D_{100\%}$ ：相対含水率 100%の時の水分拡散係数 (cm²/sec)， R ：相対含水率 (%)

計算では、コンクリートは実験と同様の寸法の 10×40 cm の 2 次元断面を想定し、コンクリート部分に関しては 1 cm 角で、通気シートに関しては 0.1×1 cm 角とした。ここに実験と同様の境界条件として、仕上げ材施工面に対して乾湿繰り返しおよび裏面からの水分の浸透を与え、その他の面からは水分の移動はないものとした。なお、通気緩衝シートとコンクリート内の水分の拡散速度および境界からの水分の蒸発と給水速度については、養生から暴露試験中にかけての全体の水分量変化とフィットするような値を逆解析にて求めた。

3. 試験結果と考察

3.1 鉄筋の腐食環境モニタリング結果

自然電位の測定結果について図-5 に示す。なお、自然電位については、ASTM C 876-91 の腐食判定基準を参考にすると、照合電極が飽和塩化銀 (Ag/AgCl) の場合、-0.09 V より貴な電位で 90%以上の確率で腐食なし、-0.24 V より卑な電位で 90%以上の確率で腐食あり、その間の電位で不確定と評価される。

暴露期間 56 日までの漏水状況を模擬した裏面水+乾湿繰り返し環境に暴露された全ての供試体で、電位は卑な値にシフトしていることから、徐々に鉄筋腐食の可能性が高くなる傾向にある。裏面からの水分の供給はないが乾湿繰り返し環境に暴露された供試体では、一部で若干卑な値を示すものもあったが、ほぼ自然電位は横這いか、貴な値へとシフトしていた。また、乾燥一定の供試体では、全体的に貴な方向に値がシフトしており、非腐食環境へと向かっている。

水分量の変化の結果について図-6 に示す。裏面水+乾湿繰り返し環境に暴露された供試体では水分量が急激に増加している。また、表面仕上げなしの供試体および、絶縁防水の供試体では、仕上げ材施工面からも水分の供給と乾燥の影響を大きく受けており、水分量の増加と減少を繰り返している。その他の仕上げ材料が施工された供試体では、ほぼ水分の変化量は同程度となっている。なお、仕上げ材料と工法による水分の移動量について全体的な傾向をみると、表面仕上げなし>絶縁防水>表面含浸材>密着防水>密着エポキシの順となっており、既往の文献⁷⁾などでも報告されている通り、絶縁防水は高い

透湿性を有していると言える。ただし、一般的な絶縁防水工事では、脱気筒は 25m² 程度に 1 か所程度の設置され、本研究では脱気筒の極近傍付近の結果となっている。

さらに水分状態について詳細に検討するために行った含水率シミュレーション予測結果の一例として、表面から裏面までのコンクリートの含水率分布と、鉄筋付近(かぶり 3 cm 位置)の含水率変化を、表面仕上げなし、密着防水、絶縁防水の 3 つについて暴露環境毎にまとめてそれぞれ図-7 (a) と (b) に示す。なお、絶縁防水については、脱気部のみからの水分移動となっているため、長手方向での含水率分布もあるが、今回は電気化学的モニタリングを行った脱気筒近傍部の値を示した。裏面水がなく乾燥一定の供試体では表面仕上げの種類によらず鉄筋

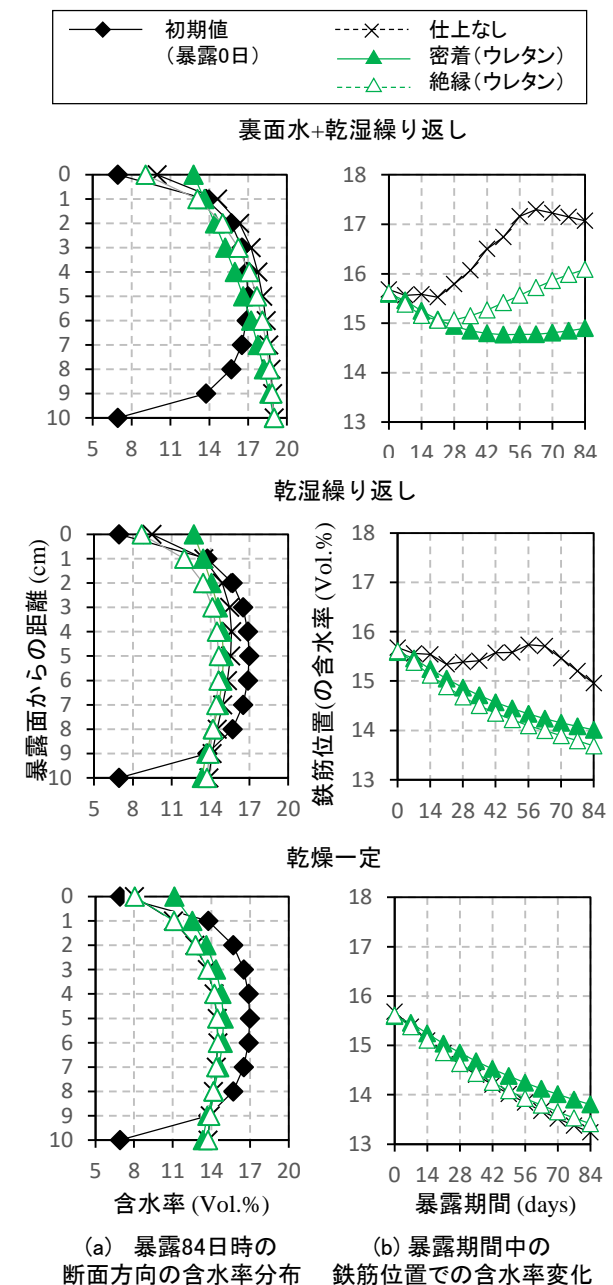


図-7 含水率変化の予測結果

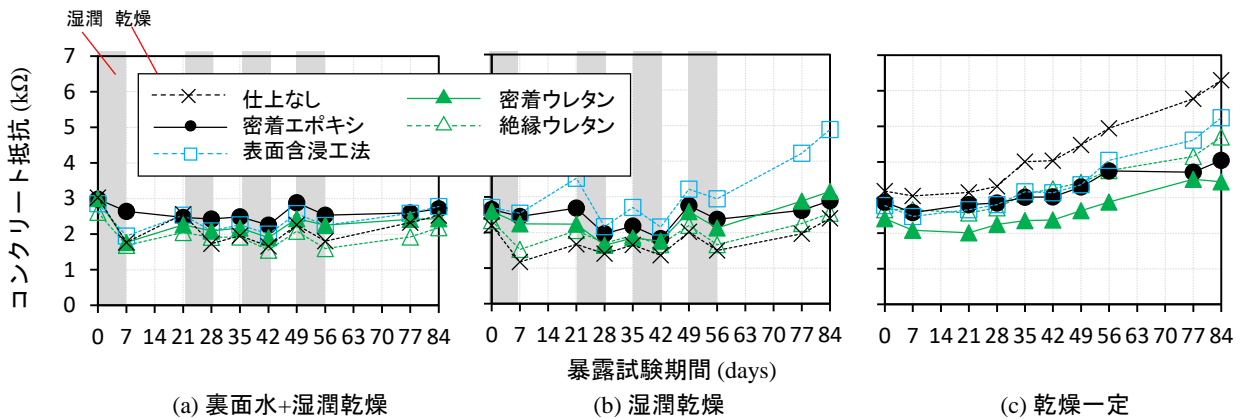


図-8 コンクリート抵抗の測定結果

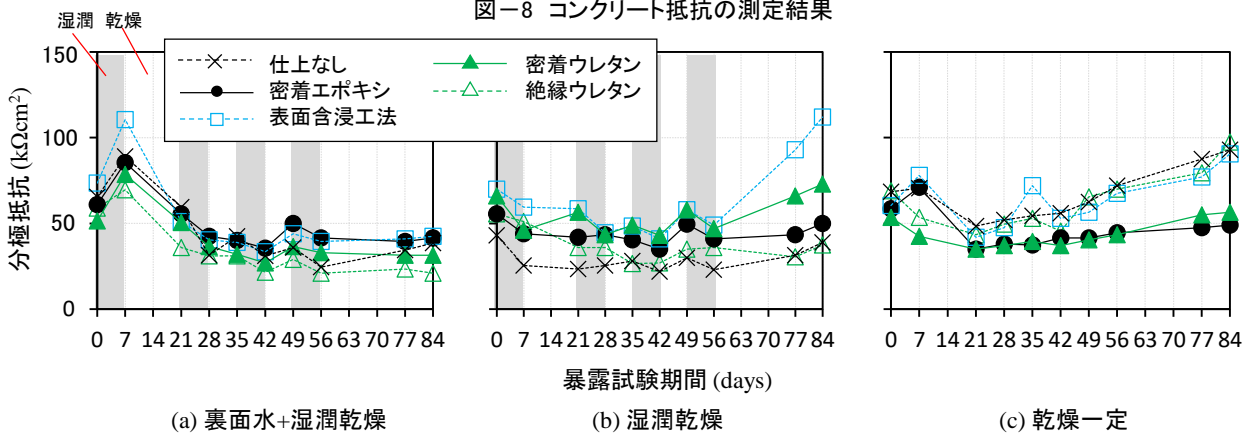


図-9 分極抵抗の測定結果

位置の含水率は 13.5%程度まで乾燥すると予想された。乾燥一定の供試体については、重量変化量も 20 g 程と小さく、鉄筋位置の含水率の変化はコンクリート内の含水率が平均化するように水分がコンクリート内部を拡散している。そのため乾湿繰り返し環境下に暴露された供試体でも鉄筋位置の含水率は全体的に低下傾向にあると予想された。一方、裏面水がある場合では全供試体で、暴露初期では含水率は低下傾向にあるが、その後数週間で増加傾向に変化し、表面仕上げなしの供試体では 17%程度まで、密着防水でも 16%程度まで上昇すると予想された。

これら水分量の変化の結果を踏まえ、再度自然電位について見てみると、裏面水+乾湿繰り返し環境に暴露された供試体については含水率の増加割合に比例して、特に増加割合の大きな仕上げ材料なしの供試体で最も卑な値をとっており、暴露開始より 14 日で室内側環境の乾湿の期間によらず腐食確定領域を推移している。次いで絶縁防水の供試体が卑な値を示しており、28 日程度で腐食確定領域となった。仕上げ材施工面からの水分の浸入がより過酷な腐食環境へと導いているものと思われる。同様に、裏面からの水分の供給がない供試体についても、含水率の増加とともに表面仕上げなしと絶縁防水の供試体が若干卑な値へとシフトし、腐食確定領域の手前あたりで自然電位が推移した。裏面からの水分の供給の有無によらず、室内側の仕上げ材施工面側からの水分の浸入

が予想されるような環境では、水分の浸透を抑制する効果の高い密着工法での仕上げ材料の施工が鉄筋腐食の抑制に有効であると言える。

コンクリート抵抗と分極抵抗を、それぞれ図-8 と図-9 に示す。乾燥一定の供試体ではコンクリート抵抗は全体的に上昇傾向にあった。一方で、裏面水の有無によらず乾湿繰り返し環境に暴露された供試体では、全体的にコンクリート抵抗はほぼ一定の値を推移していたことから、セメントの水和によるコンクリート抵抗の増加分が含水率の増加で相殺されている状態にあると思われる。また、鉄筋腐食速度の逆数に比例する分極抵抗については全体的に自然電位と同様の傾向を示しており、裏面水の有無によらず乾湿繰り返しを受ける供試体では、密着エポキシおよび密着ウレタンの値は高い値を示しているのに対し、乾燥一定では最も低い値をとっている。仕上げ材施工面側からの水分の供給がある場合では、その遮断効果が鉄筋腐食抑制に有効であるが、乾燥が進むような場合では不利に働いてしまう傾向にあると言える。

次いで 56 日以降での全ての供試体を乾燥一定環境に暴露した試験期間について見ると、裏面水の有無によらず、表面仕上げなしの供試体では、腐食域にあった自然電位が貴な値にシフトしており、同様に絶縁防水の供試体についても貴な値にシフトしている。あわせて分極抵抗も高い値となっており鉄筋腐食の可能性と速度は小さ

くなる傾向にあった。これは室内環境が空調や換気などで一定の乾燥状態で保持された場合には、裏面水の影響の有無によらず室内側の仕上げ材料の透湿性が高い材質や工法で内部の水分の乾燥を促したほうが、鉄筋の腐食環境を低減させるために有効に働いていると言える。

またコンクリート中の鉄筋腐食速度は、コンクリートの含水率だけでなく溶存酸素量の影響を受けるが、これらは暴露環境と表面仕上げ材料の種類によって変化する。そこで、腐食速度に及ぼす含水率と酸素量の影響を検討⁸⁾するために、暴露期間 84 日目でのカソード分極曲線を仕上げ材料の種類ごとにまとめて図-10 に示す。曲線の立ち上がり部における電流密度は、仕上げ材料の種類によらず全ての暴露環境で裏面水+乾湿繰返し環境が最も大きく、乾燥一定が小さな値をとっており、分極抵抗と同様の傾向を示している。一般的に透湿性の高い仕上げ材料は透気性も高く、酸素の供給量は水分の供給量に比例する。表面仕上げなしはもちろんのこと、絶縁防水や表面含浸材などが、コンクリート内への酸素の拡散量は大きいと予想されるが、乾燥環境になると水分の蒸発量に比例し、鉄筋の腐食確率と速度は小さくなる傾向にあった。これらの結果より、本研究の各種条件の範囲においては、鉄筋腐食環境には含水率の影響が支配的であり、酸素の供給量の影響は小さかった、もしくはまだ十分に鉄筋付近に酸素が存在した状態にあったといえる。さらに、本研究ではかぶり厚さが 3 cm と比較的薄く鉄筋位置の水分についても飽和状態にならず、室内環境の影響を強く受け、酸素が供給されやすい環境下にある鉄筋を対象としている。そのため、外壁面側の鉄筋腐食などについては今後検討が必要であると考えられる。

4. まとめ

裏面から漏水があるような状態下にある地下コンクリートを想定した供試体を用いて、室内面に施工される表面仕上げ材料の透湿性が、内部の鉄筋腐食に及ぼす影響について検討を行なった。

- (1) 仕上げ材施工面側の湿度が高くなるような状況では、裏面水の有無によらず、水分の浸透を遮断するような仕上げ材や工法が鉄筋の腐食抑制に有効であった。
- (2) 一方、仕上げ材施工面側が乾燥状態にある場合では、コンクリート内部からの水分が蒸発できるような仕上げ材料が鉄筋腐食を抑制には好ましいという結果になった。
- (3) 仕上げ材による酸素の供給の遮断効果については、本研究の範囲では大きな差が見られず、含水率の変化に支配される結果となった。これは、試験期間が短く養生中に十分な酸素がコンクリート中に存在しておりそれが消費されつくしていないという可能性も考えられ、今後長期的に測定を継続していく予定である。

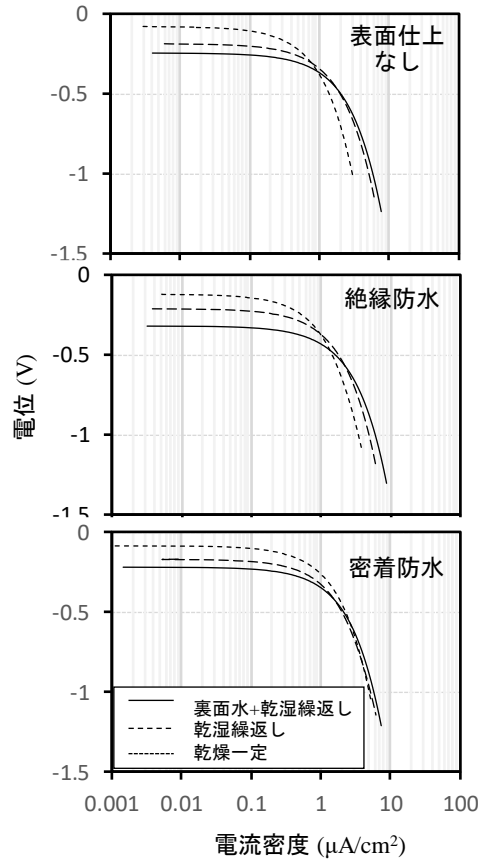


図-10 カソード分極曲線

参考文献

- 1) 小椋 大輔, 寺島 貴根, 水畑 雅行, 松本 衛: 完全埋設型地下室及び周辺地盤の熱・湿気性状の年間実測, 日本建築学会計画系論文集, Vol.65, pp.35-41, 2000.10
- 2) 高橋佑弥, 石田哲也, 香川紗絵: 塩害環境下におかれた地下構造物の漏水履歴の推定と鋼材腐食解析, 土木学会年次論文集, Vol.63, pp.445-446, 2008.9
- 3) 岩間 正彦, 松田 清一: コンクリート打継部の透水について, 日本建築学会論文報告集, Vol.54, pp.141-144, 1956.10
- 4) 佐藤 邦明, 佐藤 正之: 健全な地下水の保全・利用に向けて, 土と基礎, Vol.55, No.8, pp.1-4, 2007.8
- 5) 阪田 憲次, 蔵本 修: 乾燥に伴うコンクリート中の水分の逸散と乾燥収縮に関する研究, 土木学会論文報告集, Vol.316, pp.145-152, 1981.12
- 6) 秋田 宏, 藤原 忠司, 小西 俊之, 尾坂 芳夫: コンクリート中の水分移動における水分伝導率の評価, コンクリート工学会年次論文集, Vol.12, No.1, pp.161-166, 1990.7
- 7) 古澤 洋祐, 石原 沙織, 田村 和夫, 田中 享二: ウレタンゴム系塗膜防水通気緩衝工法における脱気装置によるふくれ圧力低減効果, 日本建築学会構造系論文集, Vol.80, No.715, pp.1367-1374, 2015.9
- 8) 篠田 吉央, 望月 紀保, 高久 豊広, 小林 浩之: 湿潤環境下コンクリート電気防食の防食評価方法に関する検討, コンクリート工学会年次論文集, Vol.33, No.1, pp.1157-1162, 2011.7