論文 外壁面側より漏水した地下 RC 部材を模した透水性能の異なるモル タル中の鉄筋腐食性状

塚越 雅幸*1・山田 悠二*2・江本 幸雄*3・上田 隆雄*4

要旨:壁面の外側から常に漏水による水分の供給がある RC 壁面に対し,モルタルの使用材料の違いによる 透水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 CUS と FA の混合割合をパラメーター に作製した厚さ 100 mm のモルタル供試体の片面を水面に浸漬し,もう片面を大気に暴露した状態で両暴露 面から 20 mm 位置にある 2 つの鉄筋の腐食状況を観察した。鉄筋位置の含水率が高いものほど腐食電流密度 は高く,空隙率と水分の拡散係数が腐食速度に影響を及ぼしている。また,フライアッシュを混和すること で含水率が同程度であっても水分の拡散速度と鉄筋の腐食速度は低く抑えられた。 キーワード:地下構造物,銅スラグ細骨材,フライアッシュ,鉄筋腐食,含水率

1. はじめに

土木・建築を問わず地下空間の利用については、特に 都市部など狭い敷地を有効利用するために多く採用さ れている。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。

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²⁾。また,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,徐々に地下水位は上昇している³⁾。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,漏水が生じて いても発見が遅れることが多い。

一方で, 銅スラグ細骨材やフライアッシュなど各種産 業副産物の利用については地球温暖化対策などの環境 問題や,天然骨材の枯渇などを背景に有効利用が望まれ ている。そのため,比較的密度が高くガラス質である銅 スラグ細骨材や,ポゾラン活性を有するフライアッシュ などを利用した際の,施工性能,基礎物性,耐久性につ いてはすでに多くの研究がなされている。

本研究では、地下 RC 壁の外壁面側の防水の不具合に より漏水(コンクリートへの地下水の浸み出し)が生じ ている状態を想定し、コンクリート用骨材の種類の違い と、それに伴うコンクリートの水密性の違いが鉄筋腐食 状況に及ぼす影響について、鉄筋のかぶり位置の違いを 含めて実験的に検討を行なった。

2. 供試体の作製と試験条件

地下 RC 壁面は外壁面側から漏水が生じた際に高含水 状態となる。万が一,塩害や中性化などが進行し不働態 皮膜が破壊された場合,その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

配合	FA置換率 (s×Vol.%)	CUS混合率 (Vol.%)	W/C (%)	S/C	単位量(kg/m ³)					
					W	С	FA	S	CUS	NaCl
N	0	0	65	3.5	280	431	0	1511	0	8.2
CUS30	0	30	65	3.9	280	431	0	1057	635	8.2
CUS100	0	100	65	4.9	280	431	0	0	2117	8.2
FA	20	0	65	2.8	280	431	274	1208	0	8.2
CUS+FA	20	80	65	3.9	280	431	274	0	1694	8.2

表-1 モルタルの配合表

*1 福岡大学 工学部 建築学科 准教授 博士(工学) (正会員)

*2 福岡大学 工学部 社会デザイン工学科 助教 博士(工学) (正会員)

*3 福岡大学 工学部 社会デザイン工学科 教授 博士(工学) (正会員)

*4 徳島大学大学院 理工学部研究部 理工学部門 社会基盤デザイン系 教授 博士(工学) (正会員)

られている。ここでは、外壁面側からのコンクリートへの地下水の浸み出しにより水分が常に供給されるような地下 RC 壁面内部の鉄筋腐食状況を評価するために、使用した細骨材の違いにより異なる透気性・水密性を持つモルタル供試体を作製し、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。



図-3 コンクリートの基礎物性試験結果

2.1 鉄筋モルタル下地と表面仕上げの種類

(1) 鉄筋モルタルの作製

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, 福 岡県玄海灘産海砂(表乾密度: 2.59 g/cm³, F.M.: 2.81), 銅スラグ細骨材は、大分県佐賀関産 CUS2.5 (表乾密度: 2.59 g/cm³, F.M.: 2.81), フライアッシュは苓北火力発電 所のフライアッシュⅡ種(密度:2.35 g/cm³,比表面積 3990 cm²/g)を用いた。また、塩害劣化環境を再現するために あらかじめ練り混ぜ水に 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に脱型し、20±2℃ 環境下で28日間の封緘養生を行った後、1か月間20± 2℃, 60 ± 6% R.H.環境の実験室内で乾燥させた。モルタ ルの配合条件を表-1に示す。モルタルは図-1に示す 通り100×100×200 mmの角柱形状とし、暴露面となる打 設時に型枠側面となる2面(100×200 mm)から,かぶり厚 さが 20mm 位置にそれぞれ 1 本ずつ, エポキシ樹脂で端 部をシールした D10 鉄筋を配した。暴露面以外は、側面 についてはアルミテープ,端面はエポキシ樹脂にてシー ルした。

2.2 ブリーディング量測定試験方法

容器は、 φ100 mm×高さ 200 mm のプラスチック製円 柱捨て型枠とした。型枠内に 180 mm の高さまでモルタ ルを 2 層詰めし、1 層ごとに木槌で型枠を数回叩いた。 ブリーディングの採取は、30 分毎に行い、これをブリー ディングが生じなくなるまで継続して行った。1 配合に つき、2 回試験を行い、平均値を試験値とした。

2.3 暴露試験と鉄筋腐食モニタリング方法

壁面の外側からの漏水を模擬するため,写真-1のように,外側面側を模擬した面を水面に接するように暴露 (以後,水浸漬側と表記)し,内側面(大気暴露側)は, 20±2℃,60±5%RHに管理した実験室内に暴露させた。 供試体の自然電位,かぶりモルタルの電気抵抗と,分極 曲線より腐食電流密度を求めた。なお照合電極には,飽



図-4 ブリーディング試験結果

和銀塩化銀電極(Ag/AgCl)を,対極はステンレスを用い て,供試体中の鉄筋全長の平均値として測定を行った。 併せて含水状態の把握のために供試体の総重量を,それ ぞれ一定間隔で測定した。

アノード,カソード分極曲線はそれぞれ,掃引速度を 60 mV/min で電位を自然電位より±300 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 暴露面 2 面の中央部で行い,図-2 に示すようにモルタ ル表面部分に照合電極と対極を湿潤状態のウェスを介 して実施した。供試体は全ての水準で2体ずつ用意して おり,平均値を試験結果として示す。

3. 試験結果と考察

3.1 供試体の基礎物性試験結果

モルタルの基礎的な力学試験結果について図-3 に示 す。併せて、飽水状態と 105℃炉乾燥後の重量差より求 めた、 91 日養生の空隙率(飽和含水率)も示す。

CUS 配合は N 配合と比べ,若干高い強度を示した。また,FA+CUS 配合がもっとも高い強度となり,FA を外割り置換で混和していたため,FA の充填効果が有効に働き初期材齢においても高強度を示したものと思われる。材齢の進行とともに全ての配合で強度は増進しており,とくにFA を混和した FA+CUS 配合の供試体では56から91日で,ポゾラン反応の影響と思われる大きな強度増進



図-5 電気化学的腐食指標のモニタリング結果

が見られた。また,強度と反比例するように空隙量も低 下しており, 緻密なモルタルであることが推測される。

ブリーディング試験結果について図-4に示す。Nと 比べ CUS30 ではブリーディング量が減少し, CUS100 で は増大した。CUS は表面がガラス質であることや密度が 大きいため、一般にその使用によりブリーディング量は 増大する。CUS30のブリーディング量が低減した理由は 不明確だが、CUS は海砂よりも粒度が細かく、少量の置 換では表面性状や密度の影響よりも,細粒化により細骨 材表面に保水されるブリーディングが増えたことの影 響が卓越したことなどが推察される。また、フライアッ シュを細骨材代替で混和した配合では、ブリーディング 量はかなり少ない(発生しない)結果となった。これは フライアッシュ混和により、ペーストの粘性が増大し、 細骨材の沈降が減少したことなどの影響と考えられる。 なお、ブリーディング量は CUS100 が最も多かったが、 強度は、NとCUS30よりも高く、空隙率も低くなった。 これは、余剰水が失われ、見かけ上 W/C が低下したため と思われる。

3.2 鉄筋の腐食モニタリング結果

鉄筋の腐食指標のモニタリング結果を図-5 に示す。 なお、自然電位は、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、 -90 mV より貴な電位で 90%以上の確率で腐食なし、-240 mV 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。

まず,図-5(a)の自然電位についてみると,あらかじ め Cl-濃度換算で 5.0 kg/m³の塩化物ナトリウムをモルタ ル中に練り込んでいるため,全ての供試体で2暴露面方 向にある両鉄筋は比較的卑な値を示しており,FA+CUS の暴露開始前の初期値ではおよそ-100 mv 程度であった が,他の4配合では初期の自然電位は-200 mV 程度と, より卑な値を示している。先の圧縮強度と空隙率の結果 より,FA+CUS は緻密な細孔構造が形成されているため だと思われる。

片面を水面に浸漬を開始後は、水浸漬側にある鉄筋に ついては CUS100 と FA+CUS では僅かな変化はあるがほ ぼ横這いとなっている。N と CUS30 配合では 28 日程度 まで、FA 配合では 40 日程度まで徐々に卑な値へと変化 し、このあたりをピークに徐々に貴な値へと変化し始め ている。これは、長期間水面に浸漬され高含水状態で保 持されたために、モルタル溶液中の酸素が枯渇してしま い、カソード反応が抑制されているためであると思われ る。この点については、後に含水率の予測結果とカソー ド分極曲線を用いて検討を行う。

一方で、大気暴露側の鉄筋については、全ての配合で 横這いか緩やかに貴な値へと変化した。 図-5(b)のかぶりモルタルの電気抵抗は,FA+CUS 配合の値の増加が著しく,次いでFAの増加量が大きかった。その他の配合でも、わずかだが全体的に抵抗値は大きくなった。一般に,抵抗値は含水率の増加とともに低下するが,本研究では材齢が比較的短いモルタルを用いたため,セメントの水和とフライアッシュのポゾラン反応の影響が卓越したものと思われる。またそのため,抵抗値の増加は,水浸漬側,大気暴露側に大きな差はなかったものと思われる。



最後に、図-5(c)に示す分極曲線より求めた腐食電流 密度⁴⁾では、CUS100 供試体では暴露開始前より 1.0 μA/cm²と高く、CUS の大量置換によりブリーディングが 生じた際に鉄筋とコンクリート界面に脆弱層が生じ、腐 食に必要な酸素や水分が多く存在していた可能性が考 えられる。他の配合ではほぼ 0.5 μA/cm² 同程度であった。

暴露試験開始後は、NとCUS30配合の水面浸漬側にある鉄筋の食電流密度が急激に上昇し、CUS100とFAでは若干の上昇傾向にあった。FAの自然電位は28日まで徐々に卑化したが腐食電流密度の増加割合は小さく、フライアッシュのポゾラン反応による緻密化の影響が表れているものと思われる。また、自然電位と同様にNとCUS30配合でも、28日をピークに腐食電流密度は低下に転じた。CUS100もその変化割合は小さいが同様の傾向にある。FA+CUSについては、暴露試験開始から常に低下しており、抵抗値の著しい上昇からも見て取れるポゾラン反応による組織の緻密化の影響が卓越していると推測される。

3.2 暴露試験中の含水率変化

片面吸水時の供試体の総重量の変化の測定結果を図 -6(a)に数値予測計算結果と併せて示す。N と CUS30, CUS100 配合の供試体の重量変化は暴露期間7日程度で 横這いであり含水率は平衡状態になっているものと思 われる。またフライアッシュを混和した配合の供試体の 初期の重量の増加割合は小さいが,総空隙量に大きな差 がないことから水分の浸透(拡散)速度が小さいものと 思われる。

得られた水分浸透量より,モルタル中の鉄筋位置の含 水率を予測した。モルタル内の水分移動は Fick の拡散 則に従いかつ,拡散速度 *D* cm²/sec とモルタルの含水率 の関係は既往研究を参考⁵に式(1)より算出した。

$$D/D_{100\%} = 1/\left\{a\left(1 - \frac{R}{100}\right) + 1\right\}^{b}$$
 (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 (%), *a*,*b*:係数 (-)

計算では、実験状況を簡便に再現するために水浸漬側 から大気暴露側への断面を1次元方向に移動すると仮定 し、供試体の暴露面側の寸法である10 cm を1 cm 間隔 で離散化した。境界条件として、水浸漬側と仮定した一 端には含水率100%を、もう一方には大気面としてモル タルの平衡含水率程度の20%を与えた。全体の水分量変 化とフィットするように(図-6(a)は実験結果と予測計 算結果を併記)逆解析にて求めた拡散係数を図-6(b)に 示す。1日目の吸水による重量の増加量はCUS100 が最 も大きく、次いでCUS30, Nの順となっている。また、 2日目では同程度となり、3日目以降はNが最も高い値 となっておりCUS30, CUS100の順と総空隙量の順とな っている。なお, 拡散係数は CUS100 が最も高く, 次い で CUS30, N の順で大きい。また FA と FA+CUS 配合で は重量の変化量は見かけ上同程度となっているが, FA 配 合の総空隙量に対し, FA+CUS 配合の方が低いことから, FA 配合の方が拡散係数は小さい。

得られた拡散係数を用いて、断面方向への含水率分布 を予測計算した結果を図-6(c)に示す。水面に浸漬して いる面の表面付近は飽水状態であり、大気暴露側に向か って徐々に含水率は低くなる。全ての配合で、水浸漬面 側にある鉄筋位置(かぶり 2~3cm の平均)はほぼ飽水状 態であり、大気暴露面側の鉄筋位置(かぶり 7~8 cm の平 均)でも相対含水率で 70%程度と予想された。

予測計算で求めた鉄筋位置の体積含水率と腐食電流 密度が最大となった28日時の値と低下した84日の時と の関係を図-7に示す。鉄筋位置の含水率が高いものほ ど腐食電流密度は高いが、フライアッシュを混和した配 合は低く抑えられている。また本研究の試験条件下で は28日以降ではすでに水分の移動は平衡状態に達して おり、28日と84日では鉄筋付近の水分量は大きな差は ないはずだが腐食電流密度は低下した。

そこで,試験開始前と暴露試験 28 日,84 日の時のカ ソード反応の状況を,カソード分極曲線より検討した。 例として N と CUS30, CUS+FA 配合について図-8 に示 す。CUS+FA では,暴露開始後,28 日,84 日と曲線全体 が徐々に電流密度の小さい値側にシフトした。これは抵 抗値の上昇から,FA のポゾラン反応による緻密化によ り,鉄筋の腐食が抑制されているものと推測される。一 方,N と CUS30 は,暴露開始前の曲線に対して,28 日 の曲線は全体的に電流密度が大きい値側へシフトした





が,84日では小さい値側へシフトした。これは,28日ま では水分の供給を受けて腐食が促進されたが,それ以降 は飽水状態の期間が長く,酸素の供給が途絶え,鉄筋腐 食反応によりモルタル細孔液中の溶存酸素が消費され, カソード反応に必要な酸素が欠乏し腐食速度が低下し たと推測される。

そこで、全ての配合に対してカソード分極時の-200 mV 掃引時電流密度を時系列にまとめたものを図-9 に示す。Nと CUS100 では 28 日後に、CUS30 では 40 日後より、電流密度が低下した。先述の通り、酸素の欠乏によりカソード反応が抑制され、分極しにくい状態にあるためだと推測される。大気暴露側では水浸漬側と比べて含水率の低いことと、抵抗値の増加に表れているように水和の影響から全体的に徐々に電流密度は低下傾向にあった。

4. まとめ

水浸漬面からかぶり 20 mm 位置にある鉄筋の腐食状 況は、かぶり 80 mm にある鉄筋よりも水分供給の影響を 強く受けた。N と CUS30 配合では、暴露試験開始後の 腐食電流密度の増加変化割合は同程度となった。これは、 強度や空隙率などが同程度であり、水分の拡散状況も同 程度であったためであると思われる。CUS100 は初期よ り腐食電流密度は高くその値が暴露試験期間中保持さ れていた。ブリーディング量が多く鉄筋とコンクリート 界面に脆弱層が生じており鉄筋周辺に酸素と水分が多 く存在していた可能性が考えられる。フライアッシュを 混和した配合では全体的に腐食電流密度は抑制された 事から、フライアッシュのポゾラン反応による組織の緻 密化の影響と思われる。

厚さ10cm の壁面を想定した場合,一方の壁面表面か ら漏水により水分が供給され続け,長時間高含水状態に 保持され続けるような期間が28日以上保持される場合, もう一方の表面が大気に暴露されていたとしても酸素 の供給量が不足しカソード反応が抑制された。



謝辞 本研究の遂行にあたり, JCI 四国支部「コンクリ ートの品質向上を目指した CUS 利用普及のための技術 研究委員会」(委員長:徳島大学 橋本親典)」より CUS のご提供を,福岡大学工学部社会デザイン工学科4年生 の半田久乃氏に多大なご協力を頂いた。ここに記して謝 意を表す。

参考文献

- 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) 岩間 正壱,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、pp141-144、1956.10
- 3) 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
- 4) 竹子賢士郎,山本悟,高谷哲:分極曲線測定によるコンク リート中鋼材の腐食速度測定方法の開発,日本コンクリ ート工学会年次論文集,Vol.36, No.1, pp.2092-2097, 2017.7
- 5) 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