

論文 各種スラグ細骨材を用いたコンクリートの塩害抵抗性に関する検討

竹内 彩葉^{*1}・上田 隆雄^{*2}・塚越 雅幸^{*3}・七澤 章^{*4}

要旨：銅スラグ細骨材や高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートは、一般の細骨材を用いたコンクリートよりもブリーディングが大きくなる傾向が報告されており、硬化後のコンクリートの物質移動抵抗性やコンクリート中の鉄筋腐食への影響が懸念される。そこで本研究は、銅スラグ細骨材、または、高炉スラグ細骨材を高置換率で使用したコンクリートの塩害抵抗性を実験的に検討した。この結果、スラグ細骨材を混入することでブリーディングが促進された配合では塩分混入コンクリート中の鉄筋腐食速度が増大したが、スラグ細骨材に加えて細骨材代替でフライアッシュを混和することで、鉄筋腐食速度が抑制された。

キーワード：銅スラグ細骨材、高炉スラグ細骨材、ブリーディング、鉄筋腐食、フライアッシュ

1. はじめに

近年、川砂や海砂などの天然骨材の代替材として、産業副産物である各種スラグ骨材の活用が注目されている。銅スラグ細骨材¹⁾は、一般的な砕砂等と比較して吸水率が小さく、弾性係数が大きいことから、コンクリートの乾燥収縮の抑制効果が報告^{2), 3)}されている。また、高炉スラグ細骨材はコンクリート中における潜在水硬性により、コンクリートの長期強度や物質移動抵抗性の向上が期待できる^{4), 5)}。

一方で、これらのスラグ細骨材を用いたコンクリートは、材料分離が発生しやすく、ブリーディング量が大きくなる傾向が指摘されている^{3), 6)}。これは、銅スラグ細骨材や高炉スラグ細骨材は表面がガラス質で、一般の細骨材よりも密度が大きいことが原因と考えられる。今後、天然骨材の代替としてのスラグ骨材の有効利用を推進する観点から、このようなブリーディング量の変化の影響も含めて、銅スラグ細骨材や高炉スラグ細骨材を混入したコンクリートの耐久性に関するデータの蓄積が求められている。

著者らは既報^{7), 8)}において、銅スラグ細骨材を50%または100%、高炉スラグ細骨材を50%混入したコンクリート中の塩害による鉄筋腐食を検討した。この結果、スラグ細骨材の混入により、ブリーディングが大きくなるとともに、コンクリート中の鉄筋腐食速度の電気化学的指標である分極抵抗が低下することで、鉄筋腐食速度の増大傾向が見られた。また、フライアッシュをセメント代替で30%混和した場合においては、ブリーディングの抑制効果は見られず、銅スラグ細骨材と併用した場合はブリーディングがフライアッシュ無混和の配合より増大する結果となったものの、鉄筋の分極抵抗は増大し、

鉄筋腐食速度の抑制が示唆された。

そこで本研究では、ブリーディングの影響がより強く表れると考えられるスラグ細骨材置換率が70%の場合のコンクリートについて、フライアッシュを細骨材代替で混和した配合も含めて、塩害抵抗性を実験的に検討することとした。なお、高炉スラグ細骨材は粒径の違いによる影響も併せて検討した。また、スラグ細骨材置換率50%で約1年間の鉄筋腐食促進を実施した供試体⁸⁾について、コンクリート中の鉄筋腐食状況を確認し、経時的に測定した電気化学的鉄筋腐食指標の値との整合性も含めて考察を行った。

実験手法として、内在塩を含有する鉄筋コンクリート（以下RCとする）供試体を作製し、乾湿繰返しの腐食促進環境に保管した時の鉄筋腐食性状を電気化学的手法により測定した。さらに、モルタル供試体を用いて細孔径分布を測定することにより銅スラグ細骨材、または高炉スラグ細骨材を用いることによる細孔構造の変化と、そのような変化がコンクリート中の鉄筋腐食に与える影響について考察を加えることとした。

2. 実験概要

2.1 コンクリート配合およびフレッシュ性状

本検討で用いたコンクリートの配合を表-1に示す。各配合とも水結合材比（以下W/Bとする）は55%で一定とした。配合名のNはスラグ細骨材を用いていない配合、C、BS、BLはそれぞれ銅スラグ細骨材CUS2.5、高炉スラグ細骨材BFS1.2、BFS2.5を細骨材の体積置換率70%で混入した配合を表している。CF、BLFはそれぞれ、C、BL配合に細骨材代替で20%のフライアッシュを混和した。塩害による鉄筋腐食環境を想定し、コンクリート

*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 建設創造システム工学コース (学生会員)

*2 徳島大学大学院 社会産業理工学研究部社会基盤デザイン系教授 工博 (正会員)

*3 徳島大学大学院 社会産業理工学研究部社会基盤デザイン系助教 工博 (正会員)

*4 デンカ(株) 青海工場 セメント・特混研究部 工博 (正会員)

表-1 コンクリートの配合

| 配合名 | W/C (%) | s/a (%) | 単位量(kg/m ³) | | | | | | | | | 混和剤量 (B×%) | | スランブ (cm) | 空気量 (%) |
|-----|---------|---------|-------------------------|-----|-----|---------|---------|---------|-----|-----|------|------------|-------|-----------|---------|
| | | | C | W | NS | CUS 2.5 | BFS 1.2 | BFS 2.5 | FA | G | NaCl | WRA* | AEA** | | |
| N | 55 | 48 | 324 | 178 | 816 | - | - | - | - | 895 | 9.9 | 0.30 | 0.008 | 15.0 | 4.5 |
| C | | | | | 245 | 803 | - | - | - | | | 0.10 | 0.004 | 15.5 | 6.2 |
| CF | | | | | 195 | 641 | - | - | 150 | | | 0.30 | 0.013 | 18.0 | 4.0 |
| BS | | | | | 245 | - | 571 | - | - | | | 0.30 | 0.006 | 19.5 | 8.0 |
| BL | | | | | 245 | - | - | 578 | - | | | 0.20 | 0.003 | 16.5 | 7.0 |
| BLF | | | | | 195 | - | - | 461 | 150 | | | 0.30 | 0.011 | 15.5 | 3.6 |

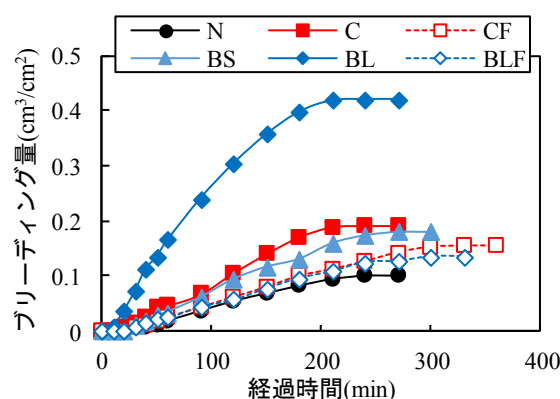
*WRA : AE 減水剤, **AEA : AE 剤

中の初期混入 Cl⁻濃度が 6.0 kg/m³となるように練混ぜ時に溶解する形で NaCl を細骨材代替で混入した。また、モルタル配合はコンクリート配合から粗骨材を除いたものとした。

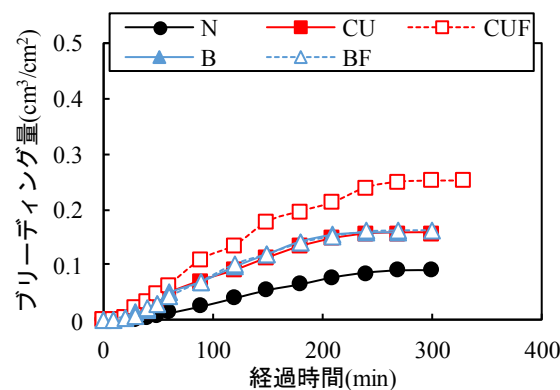
セメントは普通ポルトランドセメント (密度 : 3.16 g/cm³, 比表面積 : 3290 cm²/g) を用い, 普通細骨材 NS は砂岩砕砂 (表乾密度 : 2.57 g/cm³, 吸水率 : 1.77%), 銅スラグ細骨材および高炉スラグ細骨材は, それぞれ, JIS A 5011-3 および JIS A 5011-1 で規定された東予産 CUS2.5 (絶乾密度 : 3.60 g/cm³, 吸水率 : 0.11%), 倉敷産 BFS1.2 (絶乾密度 : 2.73 g/cm³, 吸水率 : 0.70%) および加古川産 BFS2.5 (絶乾密度 : 2.72 g/cm³, 吸水率 : 0.99%) を使用した。粗骨材 G は砂岩砕石 (表乾密度 : 2.57 g/cm³, 吸水率 : 1.60%, Gmax : 15 mm) を用いた。また, フライアッシュは JIS A 6201 で規定された II 種フライアッシュ (密度 : 2.33 g/cm³, 比表面積 : 3240 cm²/g, 強熱減量 : 2.8%) を使用した。

各配合コンクリートのスランブおよび空気量の測定値を表-1 に示す。目標スランブは 12±2 cm, 目標空気量は 5±1% として混和剤量を決定したが, 特にスラグ細骨材を用いた場合には, 全体的にスランブ値および空気量の値が目標値よりも大きくなった。これにより, ややブリーディングが促進されるなど塩害環境としては厳しい条件となっている可能性がある。また, スラグ細骨材とフライアッシュを併用した CF, BLF 配合は空気量を目標値程度に収めるために AE 剤の使用量が大きくなった。

JIS A 1123 により測定したブリーディング量の経時変化を図-1 に示す。(a) は表-1 に示した本検討のコンクリートの測定結果, (b) は著者らの既報⁸⁾における測定結果を表している。なお, (b) において, N 配合は本検討における N 配合と同一配合であるのに対し, CU, B 配合はそれぞれ CUS2.5, BFS1.2 を細骨材の体積置換率 50% で混和した配合, CUF, BF 配合はそれぞれ, CU, B 配合に対してさらにフライアッシュをセメント代替で



(a) 本検討 (スラグ細骨材置換率 70%)



(b) 既報⁸⁾ (スラグ細骨材置換率 50%)

図-1 ブリーディング量の経時変化

30%混和した配合となっている。これらの結果より, 砕砂を用いた N 配合と比較して, 銅スラグ細骨材や高炉スラグ細骨材を混入した配合は, 置換率の大きさによらずブリーディング量の増大傾向が見られる。日本建築学会「高耐久性鉄筋コンクリート造設計施工指針 (案)・同解説」では, 耐久性確保のために 0.3 cm³/cm² 以下のブリーディング量とすることを規定しているが, スラグ細骨材置換率 70% の場合も含めて, ほぼすべての配合で 0.3 cm³/cm² 以下のブリーディングとなっており, この観点からは置換率を 70% まで上げることは可能であると言

える。ただし、粒径の大きな BFS2.5 を置換率 70% で混入した BL 配合は、 $0.3 \text{ cm}^3/\text{cm}^2$ 以上のブリーディング量を示している。これは、粒径の小さい BFS1.2 を用いた BS 配合と比較して、微粒分が少なく、余剰水の拘束効果が小さかったためと考えられる。また、フライアッシュを混和した配合では、混和方法によってブリーディング抑制効果に違いが見られる。(a) に示した本検討の CF および BLF は、フライアッシュを細骨材代替で混和しているため、粉体量増加に伴う水分拘束効果により、ブリーディングが抑制されている。一方、(b) に示した、CUF および BF はフライアッシュをセメント代替で混和しており、ブリーディングの抑制効果は確認できず、銅スラグ細骨材を用いた CUF 配合においては、ブリーディングが増大した。フライアッシュをセメント代替で混和することにより、特に密度の大きい銅スラグ細骨材とセメントペーストの密度差が増大することで、材料分離に伴うブリーディングが促進されたものと考えられる。

2.2 供試体の作製および養生

本研究で作製した RC 供試体は $100 \times 100 \times 300 \text{ mm}$ の角柱コンクリートとし、型枠側面からのかぶり量が 25 mm となるように異形鉄筋 D13 を配置した。鉄筋は埋込み長さ 250 mm で、一端はエポキシ樹脂で絶縁した上でコンクリートから露出させた。また、 $\phi 100 \times 200 \text{ mm}$ のコンクリート円柱供試体、 $\phi 50 \times 100 \text{ mm}$ のモルタル円柱供試体もそれぞれ作製した。これらの供試体は打設日翌日に脱型し、 20°C 恒温室中で封緘養生を行った。RC 供試体は 28 日間の養生終了後、乾湿繰返し鉄筋腐食促進環境に保管した。コンクリート円柱供試体は 80 日間封緘養生終了後に圧縮強度および静弾性係数の測定に供した。

2.3 各種試験

養生が終了した RC 供試体は 40°C 、95% R.H. が 4 日間、 20°C 、60% R.H. が 3 日間を 1 サイクルとする乾湿繰返し環境に保管し、各サイクル終了時に電気化学的鉄筋腐食指標として供試体中の鉄筋の自然電位、分極抵抗ならびにコンクリート抵抗を測定した。この際の照合電極としては、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 $10 \mu\text{A}$ 、周波数 800 Hz と 0.1 Hz のインピーダンス値の差から求め、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。

91 日間の封緘養生が終了したモルタル円柱供試体を 5 mm 角程度まで粉碎した後に、アセトンによる水和停止処理を行って作製した試料を用い、水銀圧入法による細孔径分布 ($3 \text{ nm} \sim 100 \mu\text{m}$) の測定を行った。

既報⁸⁾の著者らが過去に作製した塩分含有 RC 角柱供試体に関して、乾湿繰返しの鉄筋腐食促進 349 日終了後

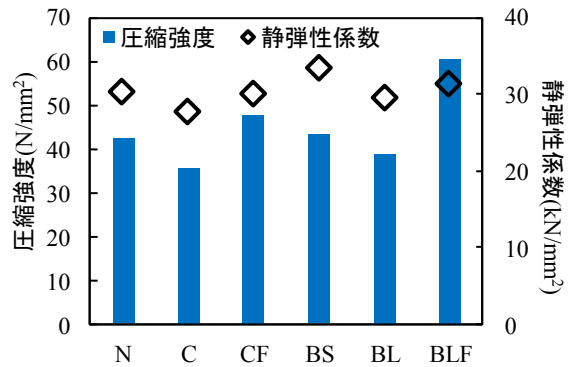


図-2 コンクリートの圧縮強度と静弾性係数

に鉄筋をはつり出し、各鉄筋の腐食面積率を求めた。その後クエン酸二アンモニウム溶液にて錆を除去した後孔食による凹部を欠損部として評価し、欠損部面積率求めた。なお、腐食面積率、欠損部面積率ともに、水平鉄筋の上面と下面に分けて測定を行った。また、乾湿繰返し期間中に経時的に測定した鉄筋の分極抵抗値から各鉄筋の推定腐食量を求めた⁹⁾。

3. コンクリートの圧縮強度およびモルタル細孔径分布

材齢 80 日におけるコンクリートの圧縮強度と静弾性係数の関係を図-2 に示す。これより、N 配合の圧縮強度と比較して、銅スラグ細骨材 CUS2.5 を 70% 混入した C 配合は圧縮強度が若干低下している。これは図-1 に示したように、C 配合のブリーディングが N 配合の場合よりも大きいことによるものと考えられ、同様の傾向は CUS2.5 を 50% 混入した著者らの既報⁸⁾においても見られた。一方で、高炉スラグ細骨材 BFS1.2 を 70% 混入した BS 配合は C 配合と同程度のブリーディング量であったにもかかわらず、N 配合と同程度以上の圧縮強度を示していることから、高炉スラグ細骨材の持つ潜在水硬性が強度増進に寄与した可能性がある。ただし高炉スラグ細骨材 BFS2.5 を 70% 混入した BL 配合の圧縮強度は BS 配合の場合よりも低い。これは、BL 配合のブリーディング量が $0.4 \text{ cm}^3/\text{cm}^2$ 程度と他の配合より大きかったためと考えられる。また、フライアッシュを混和した CF、BLF 配合は、それぞれ無混和の C、BL 配合と比較して、圧縮強度が大きく増進しており、フライアッシュを外割で混和することで W/B が低減されたことに加え、ポズラン反応によりコンクリートが緻密化したためであると考えられる。

静弾性係数に関しては、全体的な傾向として圧縮強度の大きさに比例した大小関係が見られるものの、フライアッシュを細骨材代替で混和した場合 CF 配合および BLF 配合はフライアッシュ無混和の場合からの強度増加に比べて静弾性係数の増加は小さく、コンクリートの剛

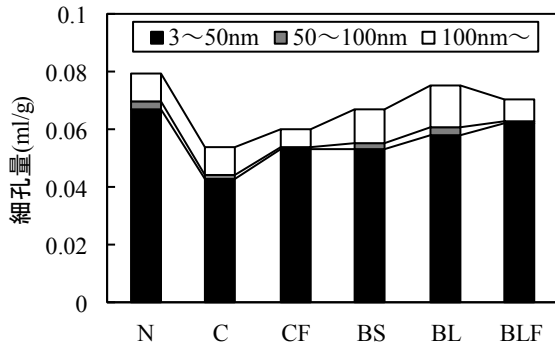


図-3 モルタルの細孔径分布

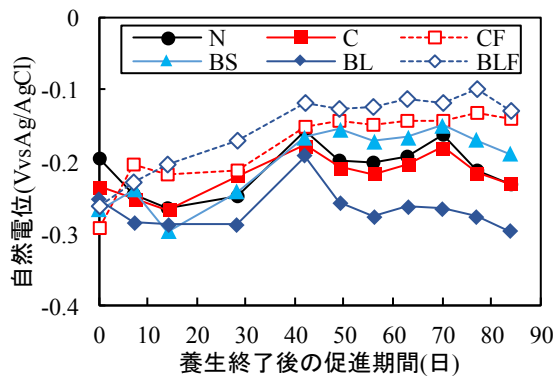


図-4 乾湿繰返し期間中におけるコンクリート中の鉄筋自然電位経時変化

性に対する細骨材の寄与が大きいことが分かる。著者らの既報^{7), 8)}において、銅スラグ細骨材や高炉スラグ細骨材を用いた配合は、骨材自身の弾性係数の大きさが影響し、N配合より若干大きな静弾性係数を示したが、今回の検討では、BS配合で同様の傾向が見られた。

材齢91日におけるモルタルの細孔径分布を図-3に示す。これによると、各種スラグ細骨材を混入した配合のモルタル総細孔量はN配合に比べて減少している。これは、スラグ細骨材を用いることでブリーディング量が増加したが、特にモルタルの場合にはブリーディングによって余剰水が排出され、硬化体としての実質的な単位水量が減少したことによるものと考えられる。一方で、物質移動抵抗性への影響が大きいと考えられる細孔径50nm以上の細孔量は、銅スラグ細骨材を用いたC配合では、N配合より減少しているが、高炉スラグ細骨材を用いたBS, BL配合では、N配合より若干増加している。BL配合は他配合より大きなブリーディングが一因と考えられるが、今回使用したBFS1.2およびBFS2.5の粒度分布はCUS2.5と比較して0.15~0.6mmの細粒分が多いため、練混ぜ時に空気を連行しやすかった¹⁰⁾ことも影響したものと考えられる。また、フライアッシュを混和したCF, BLF配合はともに、無混和の場合と比較して50nm以上の細孔量は減少しており、ポゾラン反応とフィルター

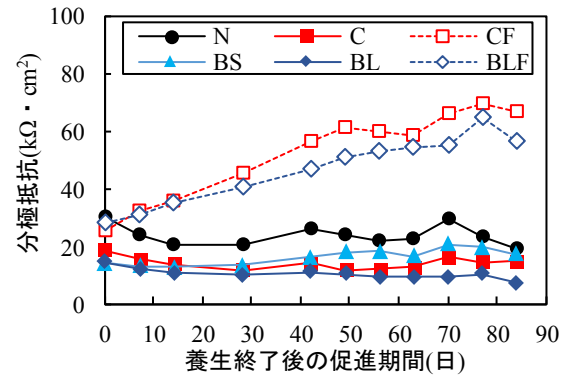


図-5 乾湿繰返し期間中におけるコンクリート中の鉄筋分極抵抗経時変化

効果によって緻密な細孔構造が形成されていることがわかる。

4. 乾湿繰返し中のRC供試体における電気化学的鉄筋腐食モニタリング

塩分含有RC供試体に関して、乾湿繰返し期間中の鉄筋自然電位、分極抵抗およびコンクリート抵抗の経時変化をそれぞれ図-4~図-6に示す。なお、各要因について供試体は2本ずつあり、グラフの各プロットは2体の平均値を示した。

図-4によると、BL配合はASTM C876-91の判定基準の腐食領域 ($E < -0.24$ V vs Ag/AgCl) に、BL配合以外の配合は不確定領域 ($-0.09 < E < -0.24$ V vs Ag/AgCl) に入っている。これは初期混入 Cl^- 濃度が 6.0 kg/m³ となるようにコンクリート中にNaClを添加したためである。特に低い電位を示しているBL配合は、図-1に示したように、ブリーディング量が大きく、鉄筋とコンクリートとの界面に生じたブリーディングによる空隙により、他の供試体よりも厳しい腐食環境が形成されているものと推察できる。また、著者らの既報⁸⁾では、フライアッシュをセメント代替で混和した配合は、比較的低い電位を示したが、今回の検討ではフライアッシュを細骨材代替で混和することで、フライアッシュ無混和の配合よりも貴な電位を示している。これより、フライアッシュ混和によるブリーディング抑制が、 Cl^- 混入条件であっても鉄筋腐食環境の改善に寄与したものと考えられる。

図-5によると、スラグ細骨材を用いたC, BS, BL配合の分極抵抗値はスラグ細骨材無混入のN配合の場合より小さく、スラグ細骨材を用いることで、腐食速度が増大したものと考えられる。同様の傾向はスラグ細骨材置換率50%の既報⁸⁾でも見られたが、これはスラグ細骨材の混入で増加したブリーディングによって鉄筋下部に生じた空隙部分を中心に酸素と水分の供給量が増加することで鉄筋腐食速度が大きくなったものと考えら

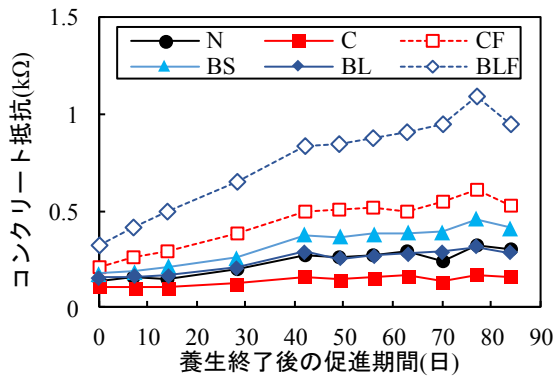


図-6 乾湿繰返し期間中における供試体のコンクリート抵抗経時変化

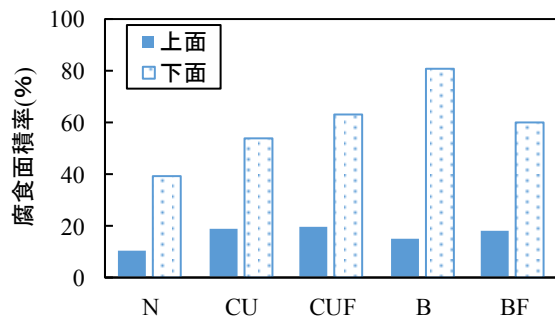


図-7 コンクリート中の鉄筋腐食面積率

れる。これに対してフライアッシュを混和した配合は、顕著な分極抵抗の増大が見られる。同様の傾向はフライアッシュをセメント代替で混和した既報⁸⁾でも見られたが、本検討のフライアッシュ混和配合は、N配合よりも顕著に大きな分極抵抗値を示している。この場合、細骨材代替でフライアッシュを混和することで、図-3に示したようなセメント硬化体としての緻密化と鉄筋近傍のブリーディングによる空隙形成の抑制によって、より大きな腐食速度抑制効果が得られているものと推定される。

図-6より、フライアッシュ無混和の配合と比べ、フライアッシュを混和した配合では大きなコンクリート抵抗値を示している。これは、フライアッシュのポゾラン反応が長期的に進行することで、緻密な細孔構造が形成されたことによるものと考えられる。また、最も大きなコンクリート抵抗値を示しているBLF配合については、フライアッシュの反応に加えて、高炉スラグ細骨材の反応が進行することでより大きな抵抗値を示した⁵⁾可能性がある。一方、銅スラグ細骨材を用いた配合の場合には、普通骨材や高炉スラグ細骨材を用いた配合の供試体に比べ、小さいコンクリート抵抗値を示している。これは銅スラグ細骨材が高い割合で含有する酸化鉄(FeO)の影響でコンクリートとしての電気抵抗値が低下したことによるものと考えられ、著者らの既報^{7), 8)}でも同様

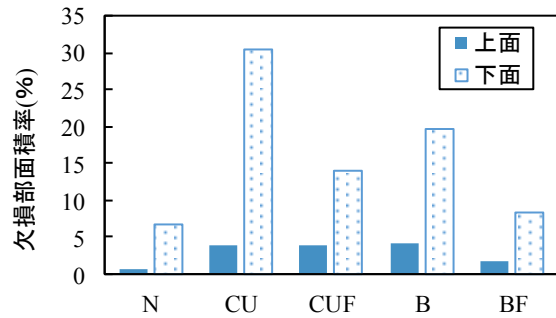


図-8 コンクリート中の鉄筋欠損部面積率

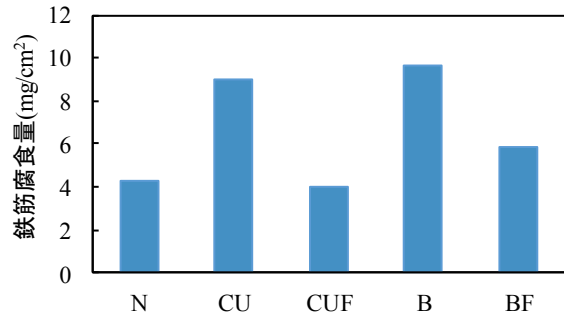


図-9 分極抵抗から求めた推定鉄筋腐食量

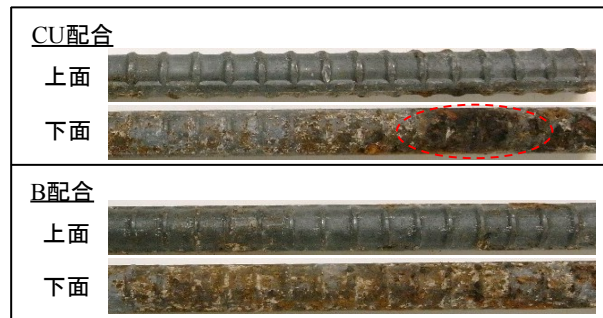


図-10 CU配合およびB配合供試体からはつり出した鉄筋の腐食状況

の傾向が確認されている。

5. 約1年の乾湿繰返しを行ったRC角柱供試体中の鉄筋腐食状況

既報⁸⁾の著者らが過去に作製した塩分含有RC角柱供試体に関して、乾湿繰返しの鉄筋腐食促進349日終了後にはつり出した鉄筋の腐食面積率、欠損部面積率および分極抵抗測定値から算出した推定腐食量をそれぞれ図-7~図-9に示す。なお、図中の配合名は図-1(b)に示したものと同一である。

図-7より、鉄筋の腐食面積率はすべての配合で鉄筋上面より鉄筋下面の方が大きくなっていることから、水平鉄筋の下面に発生したブリーディングに伴う空隙部分を中心に鉄筋腐食が進行したことが確認できる。図-1(b)に示した通り、ブリーディング量が最も大きかったのは、銅スラグ細骨材を置換率50%で混入した上でセメ

ント代替でフライアッシュを混和した CUF 配合であったが、鉄筋下面の腐食面積率は高炉スラグ細骨材を 50% 混入した B 配合が最も大きくなっている。一方、図-8 より、鉄筋欠損部面積率では、B 配合と同程度のブリーディング量の CU 配合が最も高くなっている。これらの鉄筋の実際の腐食状況を図-10 に示す。ここに示されるように、B 配合供試体中の鉄筋は軽微な腐食が鉄筋下面に広く分布しているのに対し、CU 配合の場合には、鉄筋下面に部分的に激しい腐食（図中、赤点線で囲んだ範囲）が見られ、欠損部として現れたと考えられる。銅スラグ細骨材を用いた場合には、鉄筋下面のブリーディング部分が比較的大きな空隙となつて広がり、マクロセル腐食が生じやすい状態が形成されたため、局部的に大きな孔食が生じたものと思われる。一方で、高炉スラグ細骨材を用いた B 配合でも、CU 配合と同様にブリーディングによる空隙は生じたものの、高炉スラグ細骨材の潜在水硬性により、鉄筋とコンクリートとの界面部分が比較的緻密となったことで、広範囲に軽微な腐食が広がるマイクロセル腐食が卓越したものと推察される。また、フライアッシュを混和した CUF 配合および BF 配合は、無混和の CU 配合および B 配合よりも欠損部面積率が小さくなっており、フライアッシュ混和によって孔食の形成されるような局部腐食は抑制されたものと考えられる。

また、図-9 によると、分極抵抗測定値から算出した推定鉄筋腐食量の全体的な傾向は、図-8 に示した鉄筋欠損部面積率の傾向に比較的近いものの、CU 配合と B 配合の推定鉄筋腐食量は同程度となっている。今回測定した分極抵抗は鉄筋表面全体の平均値として測定していることから、マクロセル腐食とマイクロセル腐食の腐食形態の違いを区別することなく平均的な鉄筋腐食速度として評価した結果、同程度の推定腐食量となったものと考えられる。

6. まとめ

本研究結果をまとめると次のようになる。

- (1) 今回の配合条件では、スラグ細骨材の混入によってブリーディングが増大した。特に、BFS2.5 を置換率 70% で混入した BL 配合では、他の配合よりブリーディング量が大きくなった。
- (2) 塩分含有 RC 供試体の乾湿繰返し試験の結果、ブリーディング量の大きかった BL 配合の供試体中鉄筋の分極抵抗は他の配合供試体のばあいより小さかったが、フライアッシュを細骨材代替で混和することによって、鉄筋分極抵抗およびコンクリート抵抗が顕著に増大した。
- (3) 塩分含有 RC 供試体の乾湿繰返し試験を約 1 年実施した後に、供試体中の鉄筋腐食状況を確認したところ、

鉄筋腐食面積率は高炉スラグ細骨材を 50% 混入した B 配合の鉄筋が大きく、鉄筋欠損部面積率は銅スラグ細骨材を 50% 混入した CU 配合の鉄筋が大きかった。

今回作製した RC 供試体の乾湿繰返し試験は今後さらに 1 年程度継続した後に、コンクリート中の鉄筋腐食状況を確認する予定である。

謝辞：本研究を遂行するに当たり、住友金属鉱山(株)から銅スラグ細骨材、JFE スチール(株)および(株)神戸製鋼所から高炉スラグ細骨材、四国電力(株)からフライアッシュのご提供をいただいた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 土木学会：銅スラグ細骨材を用いたコンクリートの設計施工指針，コンクリートライブラリー147，2016.7
- 2) 中島和俊，渡辺健，橋本親典，石丸啓輔：拘束条件の有無による非鉄スラグ細骨材を用いたコンクリートの乾燥収縮特性の評価，コンクリート工学年次論文集，Vol. 37，No. 1，pp. 469-474，2015.7
- 3) 岡友貴，山田悠二，橋本親典，渡邊健：非鉄スラグ細骨材を用いたコンクリートの施工性能および強度に関する実験的検討，コンクリート工学年次論文集，Vol. 37，No. 1，pp. 1033-1038，2015.7
- 4) 齊藤和秀，木之下光男，伊原俊樹，吉沢千秋：高炉スラグ細骨材を使用した耐久性向上コンクリートの性質，コンクリート工学年次論文集，Vol. 31，No. 1，pp. 139-144，2009.7
- 5) 藤田亮，皆川浩，宮本慎太郎，久田真，細谷多慶：高炉スラグ細骨材がモルタルの電気抵抗率と塩化物イオン実効拡散係数に及ぼす影響，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，Vol. 16，pp. 201-206，2016.10
- 6) 山崎舞，千歩修，長谷川拓哉：高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートの耐凍害性におよぼすブリーディングの影響，コンクリート工学年次論文集，Vol. 34，No. 1，pp. 898-903，2012.7
- 7) 上田隆雄，宇田昌樹，塚越雅幸，七澤章：銅スラグ細骨材を用いたコンクリート中における塩害による鉄筋腐食に関する検討，コンクリート工学年次論文集，Vol. 39，No. 1，pp. 565-570，2017.7
- 8) 竹内彩菜，上田隆雄，塚越雅幸，七澤章：スラグ細骨材を用いたコンクリート中の塩害による鉄筋腐食に関する検討，コンクリート工学年次論文集，Vol. 40，No. 1，pp. 609-614，2018.7
- 9) 公益社団法人日本コンクリート工学会：物理化学的解釈に基づく電気化学的計測手法の体系化に関する研究委員会報告書，pp.101-119，2015.9
- 10) 田澤栄一他：エースコンクリート工学 [改定新版]，朝倉書店，p.45，2015.9