

# 論文 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

竹内 彩菜\*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いるが、コンクリートの硬化後の耐久性に関するデータは不足している。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使用したコンクリート中の塩害による鉄筋腐食を実験的に検討した。この結果、スラグ細骨材を塩分混入コンクリートに用いた場合、鉄筋腐食速度の増大が見られた。また、スラグ細骨材を用いたコンクリートにセメント代替でフライアッシュを混和することによるブリーディング量の抑制は見られなかったが、鉄筋腐食速度は抑制された。

**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、川砂や海砂などの良質な天然骨材の代替となる良質な骨材の確保が急がれており、産業副産物である銅スラグ骨材<sup>1)</sup>や高炉スラグ骨材などの各種スラグ骨材が注目されている。銅スラグ細骨材や高炉スラグ細骨材は、一般的な砕砂等と比較して吸水率が小さく、乾燥収縮の抑制効果が報告<sup>2), 3)</sup>されている。また、高炉スラグ細骨材は潜在水硬性を有しているため、長期強度や物質移動抵抗性の向上が期待できる<sup>4), 5)</sup>。

一方で、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から、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<sup>3), 6)</sup>。今後、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の混入がコンクリートの基礎物性や、塩化物イオン（以下 Cl<sup>-</sup>とする）の浸透、コンクリート中の鉄筋腐食などの耐久性に与える影響を明らかにすることが求められている。

著者らは既報<sup>7)</sup>において、銅スラグ細骨材を 50% または 100% 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、特に 100% 混入の場合には、ブリーディング量の顕著な増大が認められたものの、細骨材代替でフライアッシュを 20% 混和することでブリーディングの大幅な低減効果が得られた。これらの供試体を 40℃ 湿空環境に 300 日保管した後に測定したコンクリート中鉄筋の腐食面積率を図-1 に示す。供試体名の数字はコンクリートの W/B、その後の N, H, A はそれぞれ銅スラグ細骨材置換率 0, 50, 100% を示している。こ

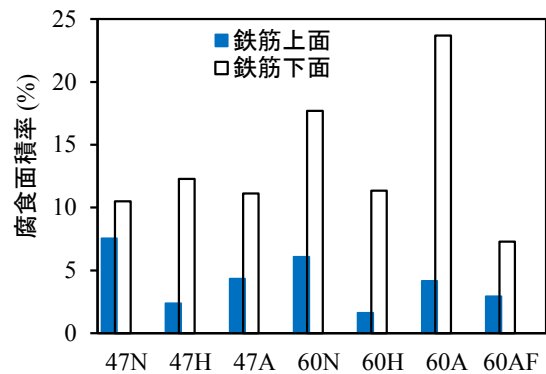


図-1 コンクリート中の鉄筋腐食面積率

れによると、特に W/B が 60% で銅スラグ細骨材を 100% 用いた 60A の場合に、ブリーディングの影響を強く受ける水平鉄筋下面で大きな腐食面積率を示しているが、フライアッシュを細骨材代替で混和した 60AF では腐食面積率が大きく低減されている。

以上の検討結果を踏まえて、本研究では、実施工に適用可能なブリーディング量レベルを想定し、銅スラグ細骨材または高炉スラグ細骨材の置換率が 50% の場合のコンクリートについて、塩分を含有するコンクリート中の鉄筋腐食について実験的に検討することとした。また、既報でブリーディングや鉄筋腐食の抑制効果が認められたフライアッシュを、ここではセメント代替で混和した配合についても併せて検討を行った。

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、モルタル供試体から抽出し

\*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/B (%)	s/a (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )								混和剤量 (C×%)		スランプ (cm)	空気量 (%)
			C	W	NS	CUS	BS	FA	G	NaCl	WRA*	AEA**		
N	55	48	324	178	816	-	-	-	895	9.9	0.30	0.010	11.0	4.7
CU			324		408	574	-	-	895		0.20	0.008	18.0	7.5
CUF			227		401	564	-	97	879		0.20	0.015	19.0	5.0
B			324		408	-	434	-	895		0.20	0.006	15.0	6.3
BF			227		401	-	426	97	879		0.20	0.014	10.0	4.1

\*WRA : AE 減水剤, \*\*AEA : AE 剤

た細孔溶液の分析を行うことで、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溶液中のイオンバランスの変化と、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

本実験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、CU, B はそれぞれ銅スラグ細骨材、高炉スラグ細骨材を細骨材の体積置換率 50% で混入した配合を表している。CUF, BF 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質量代替で 30% 混和した。塩害による鉄筋腐食環境を想定し、コンクリート中の初期混入塩分として Cl<sup>-</sup> 濃度が 6.0 kg/m<sup>3</sup> 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/cm<sup>3</sup>，比表面積：3290 cm<sup>2</sup>/g）を用い、普通細骨材 NS は砂岩砕砂（表乾密度：2.57 g/cm<sup>3</sup>，吸水率：1.77%），銅スラグ細骨材 CUS および高炉スラグ細骨材 BFS 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/cm<sup>3</sup>，吸水率：0.11%）および倉敷産 BFS1.2（絶乾密度：2.73 g/cm<sup>3</sup>，吸水率：0.70%）を使用した。粗骨材 G は砂岩碎石（表乾密度：2.57 g/cm<sup>3</sup>，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/cm<sup>3</sup>，比表面積：3240 cm<sup>2</sup>/g，強熱減量：2.8%）を使用した。

各配合コンクリートのフレッシュ性状について、スランプおよび空気量の測定値を表-1 に、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-2 に示す。

目標スランプは 12±2 cm，目標空気量は 5±1% として混和剤量を決定し、スラグ細骨材を用いた配合は N 配合

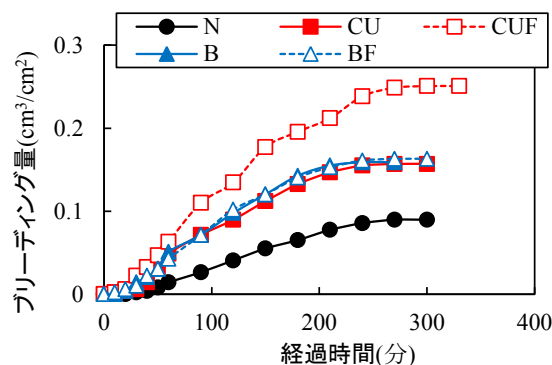


図-2 ブリーディング量の経時変化

よりも AE 減水剤量を減らしたがスランプの値は比較的大きくなる結果となった。また、スラグ細骨材とフライアッシュを併用した CUF, BF 配合は空気量を目標値内に収めるために AE 剤の使用量が大きくなった。

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 cm<sup>3</sup>/cm<sup>2</sup> 以下のブリーディング量とすることを規定している。図-2 から、すべての配合で 0.3 cm<sup>3</sup>/cm<sup>2</sup> 以下のブリーディング量であるものの、銅スラグ細骨材や高炉スラグ細骨材の混入に伴うブリーディング量の増大傾向が見られる。また、フライアッシュをセメント代替で混和することによる効果については、高炉スラグ細骨材を用いた場合には、ブリーディングの発生状況は変わらず、銅スラグ細骨材を用いた場合には、ブリーディング量が増大した。銅スラグ細骨材は砕砂や高炉スラグ細骨材と比較して密度が大きいため、フライアッシュをセメント代替で混和することで、銅スラグ細骨材とセメントペーストの密度差が大きくなり、材料分離が促進されたことでブリーディング量が増加したものと考えられる。

著者らは既往の検討において、W/B が 60% のコンクリートに銅スラグ細骨材を 100% 混入した場合について、フライアッシュを細骨材代替で 20% 混和することでブリーディング量が低減することを報告した<sup>7)</sup>。今回の結果も併せて考慮すると、銅スラグ細骨材とフライアッシュを併用する場合には、混入する銅スラグ細骨材量に對

するセメントも含めた粉体量が不十分な場合には、粉体による水分拘束効果よりも材料分離促進効果が卓越し、ブリーディングが増大する場合もあると考えられる。

## 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 100×100×300 mm の角柱コンクリートとし、正方形断面中央に異形鉄筋 D13 を配置した。鉄筋は埋め込み長さ 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、φ100×200 mm のコンクリート円柱供試体、φ50×100 mm のモルタル円柱供試体も作製した。

これらの供試体は打設日翌日に脱型し、20℃恒温室中で封緘養生を行った。RC 供試体は 28 日間の封緘養生終了後、鉄筋腐食促進環境に保管し、定期的に電気化学的鉄筋腐食指標を測定した。コンクリート円柱供試体は 80 日間養生終了後に圧縮強度、静弾性係数と、電気泳動セルを用いた Cl<sup>-</sup>の実効拡散係数の測定 (JSCE G571) に供した。モルタル円柱供試体は、91 日間の養生終了後に細孔溶液の高圧抽出および細孔径分布の測定に供した。

## 2.3 各種試験

RC 供試体は養生終了後、40℃、95%R.H.が4日間、20℃、60%R.H.が3日間を1サイクルとする乾湿繰り返し鉄筋腐食促進環境に保管し、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 μA、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用いて、800 kN~1400 kN の間で載荷と除荷を繰り返す高圧抽出法により 5 ml 以上の細孔溶液の抽出を行った。抽出された細孔溶液に対しては、0.01 mol/L の硝酸銀による電位差滴定法により Cl<sup>-</sup>濃度、0.01 mol/L の塩酸による直接滴定法により OH<sup>-</sup>濃度を求めた。また、別途作製した同じ材齢の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 nm~100 μm) の測定を行った。

## 3. コンクリートの圧縮強度、モルタル細孔径分布と、コンクリートの Cl<sup>-</sup>実効拡散係数

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-3 に示す。これより、スラグ細骨材無混入の N と比較して、スラグ細骨材を 50% 混入した CU、B 配合は圧縮強度に若干の低下が見られる。これは N 配

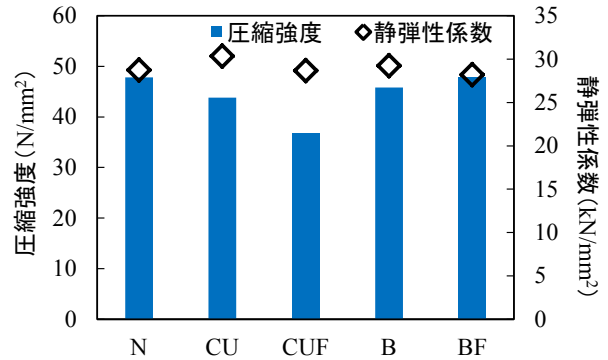


図-3 コンクリートの圧縮強度と静弾性係数

合と比べ、ブリーディング量が多いことが圧縮強度の低下につながったものと推定される。また、高炉スラグ細骨材とフライアッシュを併用した BF は B 配合より高く、N 配合と同程度の圧縮強度となっているのに対して、銅スラグ細骨材とフライアッシュを併用した CUF は CU 配合より圧縮強度が低下している。これは、フライアッシュをセメント代替で混和した場合には、一般に早期強度は低下するもののフライアッシュのポゾラン反応が寄与する長期強度の増進が期待できる。BF の場合には、このようなポゾラン反応に加えて、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ものと考えられる。CUF の場合には、フライアッシュのポゾラン反応による強度増進への寄与はあるものの、図-2 に示したように比較的大きなブリーディングが発生したことから、結果として圧縮強度が低下したものと考えられる。

静弾性係数に関しては、スラグ骨材無混入の N 配合と比較して、銅スラグ細骨材を用いた CU 配合で増加している。これは銅スラグ細骨材の弾性係数が普通細骨材よりも大きいことによるものと考えられる。高炉スラグ細骨材を用いた B と N 配合はほぼ同程度であり、フライアッシュを混和した CUF と BF 配合は、フライアッシュ無混和の場合に比べて静弾性係数が若干減少している。

材齢 91 日におけるモルタルの細孔径分布を図-4 に示す。これによると、スラグ細骨材を混入した CU と B 配合のモルタル総細孔量は N 配合に比べて減少しており、さらにフライアッシュを混和することで増加している。スラグ細骨材を混入したことで減少している細孔は細孔径 50 nm 以下の微細な空隙であり、100 nm 以上の大きな径の細孔量はスラグ細骨材を混入することで増加している。これに対して、フライアッシュを混和した場合には、無混和の場合に比べて細孔径 50 nm 以下の微細な空隙が増加しており、100 nm 以上の大きな径の細孔量は減少している。

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

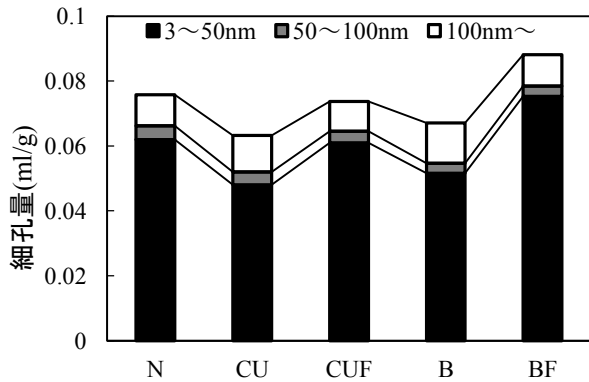


図-4 モルタルの細孔径分布 (材齢 91 日)

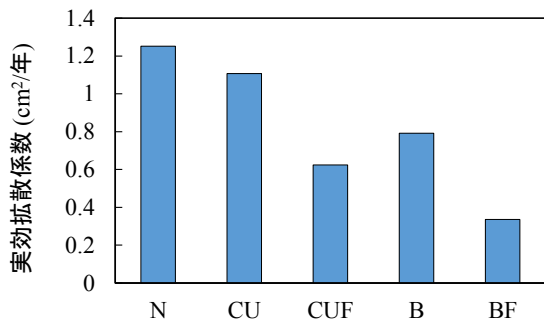


図-5 コンクリートの Cl<sup>-</sup>実効拡散係数

量が減少したことで総細孔量が減少したものと考えられる。ただし、骨材界面などで局部的にブリーディングの影響が残る、粗大な細孔量は増加したものと考えられる。特にコンクリートの場合には、このような骨材界面部分の空隙の影響を受けやすいことから、図-3 に示したような強度低下につながったものと推定される。一方で、フライアッシュを混和した場合にはフライアッシュ微粒子のフィラー効果とポズラン反応の効果で大きな径の空隙は充填されるものの、単位セメント量が減少していることもあり、微細な細孔量は増加したものと考えられる。

材齢 80 日における各配合コンクリートの Cl<sup>-</sup>実効拡散係数の測定結果を図-5 に示す。これによると、スラグ細骨材を混入することで、実効拡散係数は小さくなっており、さらにフライアッシュを混和することで実効拡散係数の値は低下している。フライアッシュと銅スラグ細骨材を併用した CUF はブリーディング量が大きく、コンクリート強度の低下も見られたが、径の大きなモルタル細孔量は減少しており、コンクリート中における Cl<sup>-</sup>の移動の観点からは、細孔構造の緻密化の影響が卓越したと考えられる。また、銅スラグ細骨材を用いた場合よりも高炉スラグ細骨材を用いた場合の方が小さな実効拡散係数を示しており、高炉スラグ細骨材の潜在水硬性が Cl<sup>-</sup>移動抵抗性の向上に寄与したものと推察される。

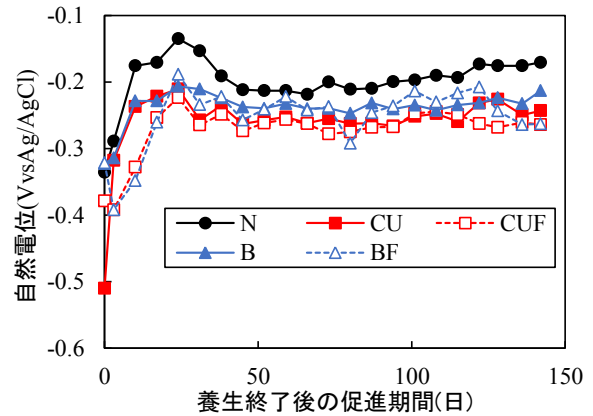


図-6 乾湿繰り返し期間中におけるコンクリート中の鉄筋自然電位経時変化

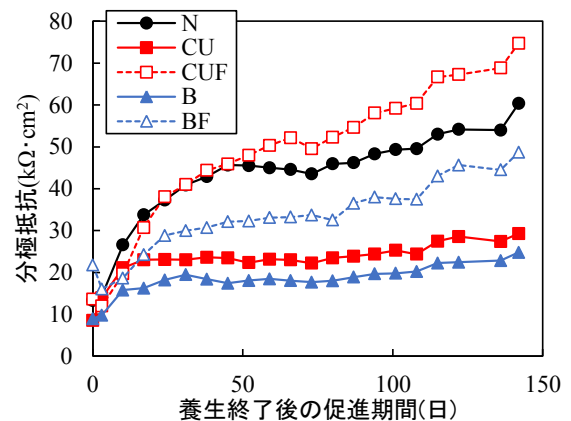


図-7 乾湿繰り返し期間中におけるコンクリート中の鉄筋分極抵抗経時変化

#### 4. 乾湿繰り返し試験中の 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 角柱供試体に関して、乾湿繰り返し試験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を図-6～図-8 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-6 によると、コンクリート配合種類によらず、概ね ASTM C876-91 の判定基準の腐食領域 ( $E < -0.23$  V vs Ag/AgCl) に入っている。これは初期混入 Cl<sup>-</sup>濃度が  $6.0 \text{ kg/m}^3$  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。N 配合の供試体は他の 4 配合の場合と比べると、比較的高い自然電位で推移している。これは、図-2 に示したように、N 配合のブリーディング量が他の場合よりも少ないことで、鉄筋とコンクリートとの一体性が確保されやすい状況であったものと推定される。

図-7 によると、スラグ細骨材を用いた CU および B 配合の供試体の分極抵抗は、スラグ細骨材無混入の N 配合の場合より小さい値を示している。分極抵抗は腐食速

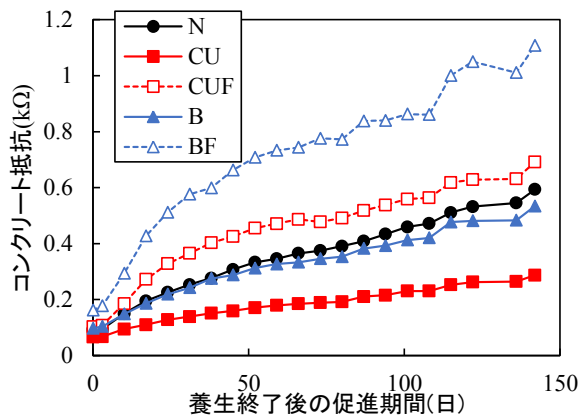


図-8 乾湿繰り返し期間中における供試体のコンクリート抵抗経時変化

度の逆数に比例する指標であることから、分極抵抗の値が小さいほど大きな腐食速度を意味しており、本実験の条件では、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。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とコンクリートとの界面に空隙が生じ、鉄筋腐食のカソード反応を律速する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れる。これらに対して、フライアッシュを混和した場合には分極抵抗が大きくなっている。図-4 に示したように、フライアッシュを混和することで径の大きな空隙が減少し、緻密な細孔構造が得られていることが、鉄筋腐食速度の減少に寄与したものと考えられる。また、CUF 配合は、最もブリーディング量が大きく、圧縮強度の減少も見られたが、図-7 においては最も大きな分極抵抗を示している。これは、ブリーディングの影響で鉄筋腐食の発生があっても、コンクリートが緻密化していればカソード反応が抑制され、腐食電流量としては抑制されるためと考えられる。なお、高炉スラグ細骨材を用いた B あるいは BF 配合の場合に銅スラグ細骨材を用いた場合よりも分極抵抗が小さくなっているが、高炉スラグは含有する硫黄成分の影響で電気化学的測定値が変動する場合があることが報告<sup>8)</sup>されており、本実験の場合も今後、実際の腐食状況と併せて腐食速度の検証を行う必要がある。

図-8 によると、CU および B 配合の供試体の場合に比べ、フライアッシュを混和した CUF および BF 配合の場合のコンクリート抵抗値が大きくなっている。これは、フライアッシュのポズ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 BF 配合については、フライアッシュの反応だけではなく、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<sup>9)</sup>可能性がある。一方、銅スラ

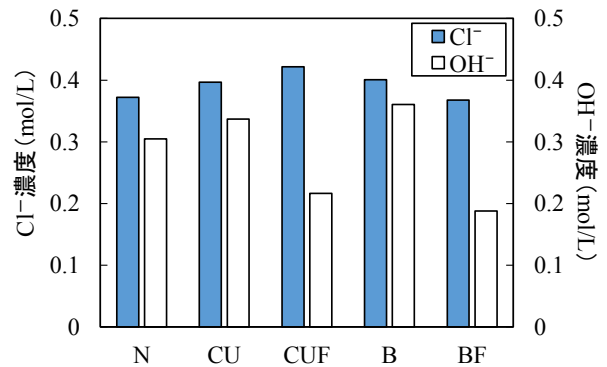


図-9 モルタル細孔溶液中の Cl<sup>-</sup>および OH<sup>-</sup>濃度

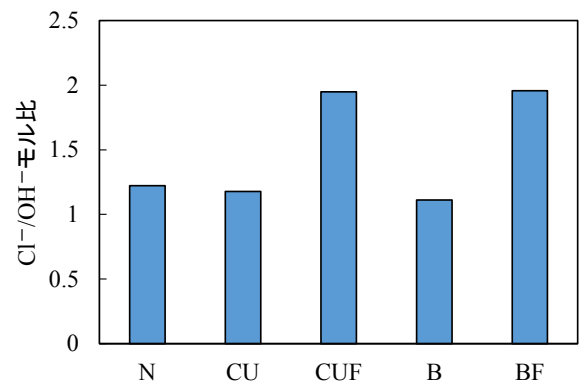


図-10 モルタル細孔溶液中の Cl<sup>-</sup>/OH<sup>-</sup>モル比

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。同様の傾向は、著者らによる既往の検討<sup>7)</sup>でも確認されており、銅スラグ細骨材が70%程度と高い割合で含有する酸化鉄 (FeO) の影響が出ているものと考えられる。コンクリート抵抗からコンクリートの細孔構造や物質移動抵抗性を評価する場合には、このような骨材の持つ電気的性質を適切に考慮する必要がある。

### 5. 高圧抽出されたモルタル細孔溶液の化学分析

あらかじめ  $6.0 \text{ kg/m}^3$  (コンクリート体積換算) の Cl<sup>-</sup> を混入したモルタルから材齢 91 日で抽出した細孔溶液中の Cl<sup>-</sup>濃度および OH<sup>-</sup>濃度を図-9 に、Cl<sup>-</sup>/OH<sup>-</sup>モル比を図-10 に示す。図-9 より、スラグ骨材を混入した CU および B 配合の場合には、無混入の N 配合の場合と比較して、細孔溶液中の Cl<sup>-</sup>濃度および OH<sup>-</sup>濃度が上昇していることがわかる。細孔溶液中の Cl<sup>-</sup>濃度の上昇の原因としては、セメント水和物などに固定される Cl<sup>-</sup>量の低下と、モルタル細孔構造の緻密化による細孔溶液中の Cl<sup>-</sup>濃度の濃縮が考えられる。今回の場合、図-4 に示したように、スラグ細骨材を混入することでモルタル総細孔量は減少していることから、細孔構造緻密化に伴

うイオン濃縮の可能性が高いと考えられる。また、BF配合は、B配合と比べてCl<sup>-</sup>濃度が低下していることから、高炉スラグ細骨材とフライアッシュを併用することによる相乗効果で、反応生成物に固定化されるCl<sup>-</sup>量が增大した可能性がある。一方で、銅スラグ細骨材とフライアッシュを併用したCUF配合はブリーディング量が最も大きかったことから、細孔溶液の濃縮に伴ってCl<sup>-</sup>濃度が最も高くなったものと推定される。

フライアッシュを混和したCUFおよびBF配合の細孔溶液中OH<sup>-</sup>濃度は、フライアッシュ無混和のCUおよびB配合の場合に比べて低下している。これは、フライアッシュを混和したことでボゾラン反応が進行し、OH<sup>-</sup>の供給源であるCa(OH)<sub>2</sub>を消費したためである。特に、BF配合の場合には最もOH<sup>-</sup>濃度が低くなっていることから、Cl<sup>-</sup>濃度の場合と同様に、高炉スラグ細骨材とフライアッシュの併用によって、Ca(OH)<sub>2</sub>を消費する反応が促進されたものと推定される。

図-10によると、N配合に対してスラグ骨材を混入することによって、Cl<sup>-</sup>濃度とOH<sup>-</sup>濃度がともに上昇したため、結果として銅スラグ細骨材、高炉スラグ細骨材の混入がCl<sup>-</sup>/OH<sup>-</sup>モル比に与える影響は小さくなっている。一方で、フライアッシュを混和したCUFおよびBF配合の場合には、細孔溶液中のOH<sup>-</sup>濃度が低下するため、Cl<sup>-</sup>/OH<sup>-</sup>モル比が大きくなっている。一般にCl<sup>-</sup>/OH<sup>-</sup>モル比の値はコンクリート中の鉄筋腐食環境を表す指標であり、この値が大きいほど厳しい鉄筋腐食環境であることを表している。ただし、図-5に示したCl<sup>-</sup>の実効拡散係数低減効果や、図-7に示したCl<sup>-</sup>存在環境下におけるコンクリート中の鉄筋腐食速度の抑制状況を勘案すると、細孔溶液中のCl<sup>-</sup>/OH<sup>-</sup>モル比がフライアッシュの混和によって上昇したとしても、スラグ細骨材とフライアッシュの併用は、塩害によるコンクリート中の鉄筋腐食に対する耐久性向上の観点から有効であると考えられる。

## 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、圧縮強度が若干低下した。また、銅スラグ細骨材と併せてフライアッシュをセメント代替で混和した場合には、ブリーディングがさらに増大し、圧縮強度も低下した。
- (2) 今回の配合条件では、材齢91日のスラグ細骨材混入モルタルの総細孔量は無混入の場合に比べて減少した。これは、細孔径が50 nm以下の微細な細孔の減少効果が大きかった。一方で、フライアッシュを併用することにより総細孔量は増加したが、100 nm以

上の細孔は減少し、Cl<sup>-</sup>の実効拡散係数は低下した。

- (3) Cl<sup>-</sup>を含有するRC供試体の乾湿繰り返し試験の結果、フライアッシュの混和による鉄筋極抵抗およびコンクリート抵抗の増加が認められた。
- (4) モルタル細孔溶液中のCl<sup>-</sup>濃度およびOH<sup>-</sup>濃度はスラグ細骨材の混入により上昇したが、Cl<sup>-</sup>/OH<sup>-</sup>モル比への影響は比較的小さかった。

乾湿繰り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、三菱マテリアル(株)から銅スラグ細骨材、JFEスチール(株)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) 斉藤和秀，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) 笹谷輝彦：過酷な塩分環境下におけるコンクリート構造物の劣化機構とその防止対策，金沢大学博士学位論文，1997.1