

海上大気中での長期暴露試験による銅スラグ細骨材を大量混入したコンクリートの耐久性評価

若築建設(株) 建設事業部門 技術設計部 正会員 ○秋山哲治, 森晴夫
(独)港湾空港技術研究所 材料研究チーム 正会員 山路徹, 与那嶺一秀

1. はじめに

銅スラグ細骨材を用いたコンクリートの鉄筋コンクリート構造物への実用化を目指し, 各種試験を実施して, 施工性や強度特性, 耐久性等の各種性能について確認¹⁾した. このうち, 耐久性については, 管理供試体の促進試験等によって評価を行ったが, 実環境における長期耐久性を把握するため, 別途ケーソン模擬供試体を用いて 2005 年より暴露試験を開始した. 既往の研究では, 小型供試体による促進試験等での耐久性の評価事例はあるものの, 実物大モデルによる長期暴露試験に基づいた知見は少ない. そこで, 暴露供試体を用いて 2012 年に行った各種試験の結果について, 暴露 7 年の経過報告として以下に取り纏めた(以降では, 銅スラグ細骨材を用いたコンクリートを銅スラグコン, 銅スラグ未混入のコンクリートは普通コンと称す).

2. 実験内容

2.1 暴露供試体の概要

表-1 と表-2 に, 暴露供試体で用いた配合および使用材料を示す. コンクリートの配合は呼び強度 30N, スランプ 12cm, 空気量 4.5%, 粗骨材最大寸法 25mm とした. 供試体は, セメント 2 種類, 銅スラグ混入率 0-30-100%, および混和材有無の組み合わせによる計 8 体とし, 高さ 1500×幅 1500×長さ 1500×壁厚 250mm のセルラブロックで港湾用ケーソンを模擬して製作した. 暴露場所は, 写真-1 に示す小名浜港ケーソンヤード海側に面した海上大気中とした.

2.2 試験項目

試験項目は, 表-3 に示すひび割れ観察, 圧縮強度, 中性化深さ, 塩化物イオン濃度とした. 塩化物イオン濃度は, 採取コアの表層から深さ 50mm までを対象とした. コア径は, すべて 100mm とした. なお, 圧縮強度・中性化深さ・塩化物イオン濃度の結果では, 表-1 右欄に示す事前の配合確認試験で得られたブリーディング量との関係を併せて整理することで, ブリーディングが各種性能に与える影響についても考察した.

3. 試験結果

3.1 ひび割れ観察

表-4 にひび割れ観察の結果を示す. 目視観察で確認したひび割れは, 最大幅 0.3mm, 最大長さは側面で 110mm, 天端で 250mm であった. ひび割れが長いものは, すべて天端面に発生しており, 供試体の壁厚が 250mm と比較的薄いことを踏まえると, ひび割れの発生原因は乾燥に起因するものと考えられた. また, セメント種類 BB の場合は, 銅スラグ未混入の供試体にも同程度のひび割れが確認されたことから, 暴露 7 年のひび割れの発生に対する影響について, 銅スラグコンと普通コンは同等の性能を有すると評価した.

表-1 コンクリートの配合

供試体 No.	CUS 混入率	セメント 種類	W/C [%]	単位量 [kg/m ³]						BL量 [cm ³ /cm ²]
				W	C	F	S	CUS	G	
[1]	0	N	47	166	353	—	764	—	1029	0.116
[2]	30	N	48	167	348	—	550	322	1007	0.153
[3]	100	N	45	170	380	—	—	1043	990	0.279
[4]	100F	N	43	163	280	100	—	1008	990	0.346
[5]	0	BB	45	164	364	—	735	—	1042	0.124
[6]	30	BB	47	163	347	—	552	322	1004	0.175
[7]	100	BB	43	163	380	—	—	1050	990	0.287
[8]	100F	BB	42	160	280	100	—	1008	990	0.344

※100F:フライアッシュ有, BL量:事前の配合確認試験で求めたブリーディング量.

表-2 使用材料

項目	名称・特性値など	略号
セメント	普通ポルトランドセメント, 密度3.16g/cm ³	N
	高炉セメントB種, 密度3.04g/cm ³	BB
練混ぜ水	上水道水	W
細骨材	山砂, 表乾密度2.58g/cm ³ , 粗粒率2.70	S
	銅スラグ5-0.3, 表乾密度3.50g/cm ³ , 粗粒率3.30	CUS
粗骨材	砕石2005, 表乾密度2.70g/cm ³ , 粗粒率6.91	G
混和材	フライアッシュⅡ種, 密度2.10g/cm ³	F



写真-1 供試体の暴露状況

表-3 試験項目

試験項目	評価対象	試験方法
ひび割れ観察	側面・天端	目視観察等
圧縮強度	側面-φ100コア	JIS A 1108
中性化深さ	側面-φ100コア	JIS A 1152
塩化物イオン濃度	側面-φ100コア	JSCE G 573

表-4 ひび割れ観察の結果

供試体 No.	CUS 混入率	セメント 種類	ひび割れ本数 [本/側面と天端]	ひび割れ長さ [mm/本]	ひび割れ幅 [mm/本]
[1]	0	N	0	—	—
[2]	30	N	7	50~250	0.04~0.30
[3]	100	N	2	25~45	0.10
[4]	100F	N	4	60~250	0.20
[5]	0	BB	5	40~100	0.08~0.20
[6]	30	BB	1	40	0.10
[7]	100	BB	3	30~80	0.06~0.15
[8]	100F	BB	5	40~250	0.05~0.25

キーワード : 銅スラグ細骨材, 鉄筋コンクリート, 耐久性, ブリーディング, 長期暴露
連絡先 : 〒153-0064 東京都目黒区下目黒 2-23-18 若築建設(株) 技術設計部 TEL 03-3492-0495

3.2 圧縮強度

図-1と図-2に、ブリーディング量と圧縮強度及び（暴露直後の結果¹⁾に対する材齢7年の）強度増加率を示す。暴露7年は $48.5 \sim 67.6 \text{ N/mm}^2$ となり、十分な強度を有していた。強度増加率は $1.23 \sim 1.40$ の範囲となり、各供試体は概ね同程度の増加率と評価した。以上より、銅スラグコンは普通コンと同等の強度特性を有していると考えられる。また、銅スラグ混入率が多いとブリーディングは増加傾向を示したが、この影響に因る強度低下は暴露7年では認められなかった。

3.3 中性化深さ

図-3にブリーディング量と中性化深さの関係を示す。材齢7年の中性化深さは $2.0 \sim 5.4 \text{ mm}$ であり、銅スラグ混入率が増加すると大きくなる傾向を示した。銅スラグ各混入率と未混入で中性化深さを比べると、銅スラグ100%混入では最大で約2.6倍大きくなった。一方、セメント種類で比較すると、（フライアッシュ添加の供試体を除くと）NよりBBの方が中性化は大きく、銅スラグ未混入で $\text{BB}/\text{N}=1.4$ 倍に対し、銅スラグ混入では $\text{BB}/\text{N}=1.6 \sim 1.7$ 倍に増加した。以上より、銅スラグ混入率が多い場合、すなわちブリーディングが増加すると、中性化深さは大きくなる傾向であった。

なお、銅スラグ100%混入の場合で最大約 5 mm となった供試体の中性化速度を用いて、 $\sqrt{t}$ 則に従って材齢50年の中性化深さを試算すると約 14 mm になる。銅スラグ未混入と比較して中性化は進行するものの、かぶりが十分に確保される条件では、中性化による鉄筋腐食は問題にならないと考えられた。

3.4 塩化物イオン濃度分布

図-4に塩化物イオン濃度の結果を示す。同図では、初期塩化物イオン濃度（骨材中に含まれる塩化物イオン）を除外し、外部から侵入した塩化物イオン濃度として整理した。その結果、表層の深さ 5 mm で塩化物イオン濃度 $0.25 \sim 0.83 \text{ kg/m}^3$ となり、塩分の浸透は非常に少なかった。今回の暴露環境において、コンクリート表面への海水の供給が少なかったと推測する。この結果を用い、各供試体の塩化物イオン拡散係数を試算すると $0.04 \sim 0.17 \text{ cm}^2/\text{年}$ （図-5）となり、今回の測定では、配合による差とブリーディングが遮塩性に与える影響は明確ではなかった。

4. まとめ

本実験の範囲において、銅スラグコンと普通コンは、ひび割れへの影響及び圧縮強度は同等の性能を有しており、ブリーディングの増加による各性能への影響は殆どないものと考えられた。実験は、鉄筋コンクリート部材を対象とした $\text{W/C}=50\%$ 以下の範囲であり、元々ブリーディング量が抑制された配合であったことで、これらの性能が良好であったと考える。一方、中性化については、銅スラグコンは普通コンよりもその進行が早い傾向を示した。銅スラグコンは、普通コンよりブリーディングが相対的に多く、型枠付近（部材のごく表層）ではその影響が大きくなると推測され、中性化の進行に違いが現れたと考える。これに対しては、所要のかぶりを確保することで、長期耐久性は十分に満足すると推測されるが、今後の長期暴露試験結果（暴露15年を予定）と併せて評価する予定である。

本試験は、国土交通省東北地方整備局小名浜港湾事務所、小名浜製錬(株)、新菱商事(株)、及び若築建設(株)による共同研究¹⁾で作製した供試体を用いて行った。各種試験においてご協力を頂いた関係各位の皆様に謝意を表します。

参考文献 1)森晴夫, 鳥畑孝志, 松本伸郎, 本田友之: 銅スラグ細骨材を大量に混入したコンクリートの鉄筋コンクリートへの適用性に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, pp.1843-1848, 2009.7 2)川端雄一郎, 岩波光保, 加藤絵乃: スラグ細骨材を大量混合したコンクリートの各種性状, 港研資料 No.1233, 2011.6

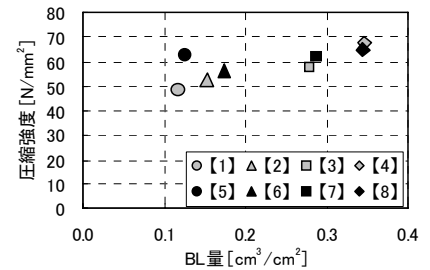


図-1 ブリーディング量-圧縮強度の関係

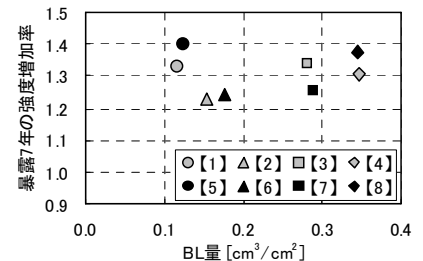


図-2 ブリーディング量-強度増加率の関係

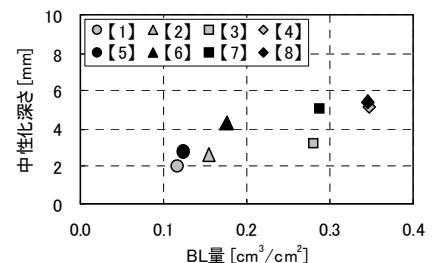


図-3 ブリーディング量-中性化深さの関係

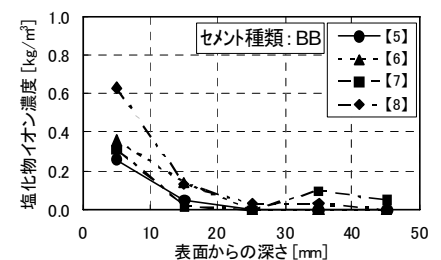
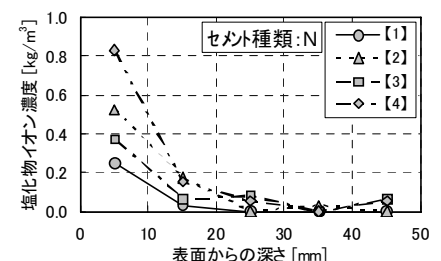


図-4 塩化物イオン濃度の結果
[上段: セメント=N, 下段: セメント=BB]

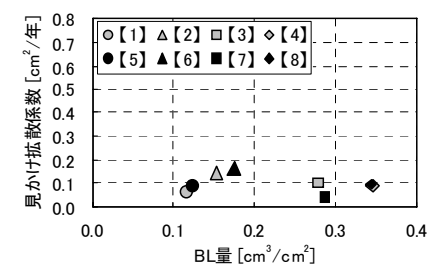


図-5 ブリーディング量-塩化物イオンの見かけ拡散係数の関係