

報告 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

森 晴夫*1・鳥畑 孝志*2・松本 伸郎*3・本田 友之*4

要旨: 本研究開発は、天然資源が枯渇する中で、天然砂や輸入砂より安価な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すものである。本研究開発では各種試験を実施したが、本報告では銅スラグ細骨材の混入量を変えた配合で、施工性、耐久性、強度特性、収縮特性について報告するものである。本研究成果により、銅スラグ細骨材を大量に混入したコンクリートを、鉄筋コンクリートへ利用する場合において、適切なブリーディング抑制対策を行うことで、施工性、強度特性、耐久性、収縮特性などの面で無混入のコンクリートと同様の性能が得られることが確認された。

キーワード: 銅スラグ細骨材, 鉄筋コンクリート, ブリーディング

1. はじめに

銅スラグをコンクリート用細骨材として用いる研究は1960年代から始められ、銅スラグを用いたコンクリートは、各製錬所におけるコンクリート構造物に適用されてきた。1998年に土木学会から「銅スラグ細骨材を用いたコンクリートの施工指針」¹⁾が発刊された。この施工指針では、通常のコンクリートに使用する天然砂の30%程度を銅スラグ細骨材で置換する範囲においては、コンクリートの性状、品質とも通常のコンクリートと大差ないものと記述されている。

天然資源が枯渇する中、天然砂や輸入砂より安価な銅スラグ細骨材を用いたコンクリートを鉄筋コンクリートとしてケーソン本体に使用することで、天然砂の使用抑制と銅スラグの密度が大きい特徴を活かしてケーソン本体の重量増加によるケーソン断面縮小が図られ港湾工事のコスト縮減が期待される。このため、銅スラグ細骨材を大量に混入した銅スラグ細骨材コンクリートの鉄筋コンクリートへの適用性を検証した。

2. 銅スラグの性状

銅スラグは銅水砕スラグともいい、銅を製錬するプロセスの中で、精鉱中の鉄分と珪石が結合したものを高圧水により冷却し、砂状に水砕したものである。性状はガラス質で、黒色を呈している。

2.1 成分

成分比率²⁾を図-1に示す。主成分は、酸化鉄(FeO)、珪酸(SiO₂)、酸化カルシウム(CaO)、酸化アルミニウム(Al₂O₃)であり、物理的、化学的に安定している。

2.2 特性



図-1 銅スラグの成分比率

材質は、鉄分が多いため非常に硬い。密度は絶乾密度3.5~3.7g/cm³であり、天然砂(2.5~2.7g/cm³)を上回る。また、単位容積質量は1.9~2.1t/m³と重く、アルカリ骨材反応はなく、吸水率は0.3%程度で天然砂に比べて小さい。

2.3 粒度

銅スラグ細骨材は、水砕スラグを破砕し、粒度調整したものである。JIS A 5011-3では、粒度によって4種類に区分されている。本試験で用いた銅スラグ細骨材は、粒度区分5~0.3mmである。粒度分布²⁾を図-2に示す。

3. 試験概要

本研究開発で実施した試験フローを図-3に示す。ステップ1で配合確認試験(室内試験)を行い、ステップ2で耐久性試験及び実プラントを用いた施工性試験や強度特性試験、収縮特性試験などの各種試験を実施し、ス

*1 若築建設(株) 建設事業部門 技術設計部 次長(正会員)

*2 国土交通省 東北地方整備局 小名浜港湾事務所 保全課長

*3 小名浜製錬(株) 事務部 総務課

*4 新菱商事(株) いわき工場 取締役工場長

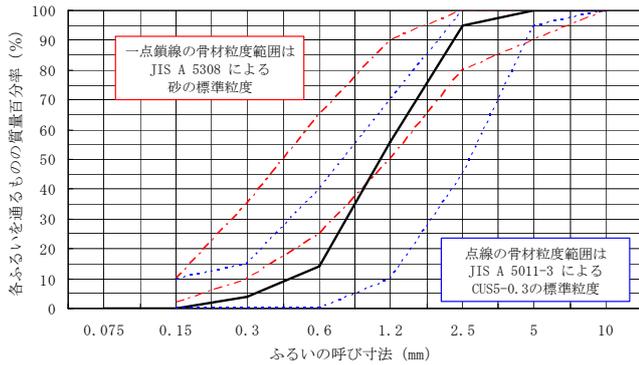


図-2 銅スラグ細骨材の粒度分布

テップ3で鉄筋コンクリートへの適用性を確認した。本試験で使用した主な材料を表-1に示す。コンクリートの配合は呼び強度30、スランプ12±2.5cm、空気量4.5±1.5%、粗骨材の最大寸法25mmとした。

銅スラグ細骨材を大量に混入した場合、ブリーディングの増加が懸念事項である。その対処方法として表-2の配合に示すように当初はフライアッシュをセメントの内割で使用した(ケース1)。ステップ3の適用性の確認で、ブリーディングの目標値³⁾0.6cm³/cm²を満足したが、鉄筋との付着力低下などの影響が見られた。このため、ブリーディングの低減、凝結時間の短縮など更なる改善のため表-3に示す石灰石微粉末をセメントの外割で使用した配合で試験を実施した(ケース2)。本報告では、ケース1およびケース2で実施した施工性、強度特性、耐久性、収縮特性に関する主な試験結果について報告する。

4. 施工性

施工性の試験では、ケース1の配合で実機プラントにより製造したコンクリートを小名浜港ケーソンヤード内に搬入し、ポンプ圧送によりケーソンを模擬した試験体(1,500mm(高さ)×1,500mm(幅)×1,500mm(長さ)×250mm(壁厚)のセルラブロック)の製作を行った。また、現地で図-4に示すように高所(地上15m)へのポンプ圧送性の確認とポンプ圧送前後の各種品質確認(スランプ、空気量、単位容積質量、圧縮強度)も行った。

ケーソンを模擬した試験体の製作時には、コンクリート打設時における作業性の確認と、コンクリート締め時の加振時間がフレッシュ性状や硬化コンクリート性状に与える影響についても確認を行った。この際の打設時に製作された模擬試験体は、小名浜港ケーソンヤード内に暴露されており、海上大気中におけるコンクリートの耐久性の確認を行っている。

4.1 ポンプ圧送試験結果

ポンプ圧送前後のスランプ、空気量、単位容積質量、

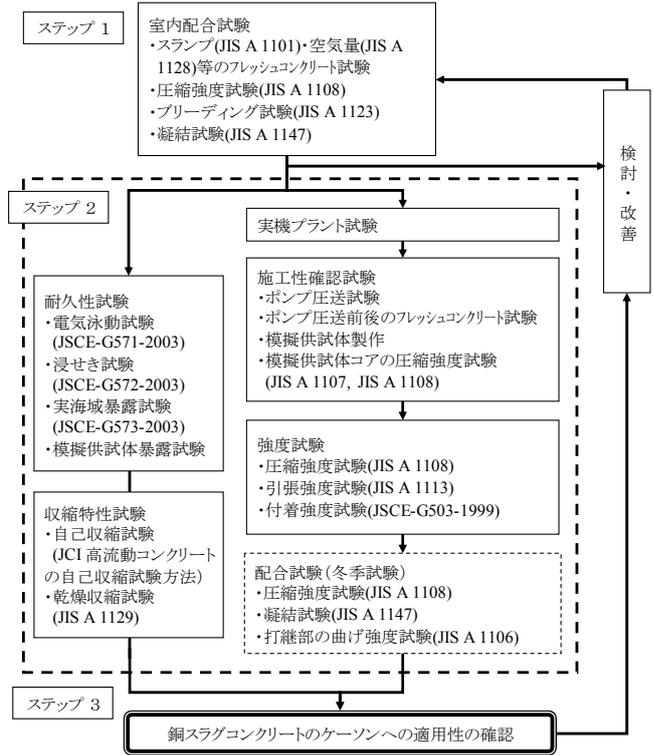


図-3 試験フロー

表-1 使用材料

名称	規格	略号
セメント	普通ポルトランドセメント(密度:3.16 g/cm ³)	C
	高炉セメントB種(密度:3.04 g/cm ³)	
練混ぜ水	上水道水	W
細骨材	山砂(表乾密度:2.58 g/cm ³ ,粗粒率:2.70)	Sand
	CUS5-0.3(表乾密度:3.50 g/cm ³ ,粗粒率:3.30)	CUS
粗骨材	碎石2505(表乾密度:2.70 g/cm ³ ,粗粒率:6.91)	G
混和材	フライアッシュII種(密度:2.10 g/cm ³)	F
	石灰石微粉末(密度:2.60 g/cm ³ ,比表面積:7,500cm ² /g)	Ca

表-2 配合表(ケース1)

ケース	W/C (%)	単位量(kg/m ³)					
		W	C	F	S		G
					Sand	CUS	
0-47N	47	166	353	-	764	-	1,029
30-48N	48	167	348	-	550	322	1,007
100-45N	45	170	380	-	-	1,043	990
100F-43N	43	163	280	100	-	1,008	990
0-45BB	45	164	364	-	735	-	1,042
30-47BB	47	163	347	-	552	322	1,004
100-43BB	43	163	380	-	-	1,050	990
100F-42BB	42	160	280	100	-	1,008	990

※0,30,100:CUS置換率,F:フライアッシュII種,N:普通ポルトランドセメント, BB:高炉セメントB種

表-3 配合表(ケース2)

ケース	W/C (%)	単位量(kg/m ³)					
		W	C	Ca	S		G
					Sand	CUS	
0-47N	47	166	353	-	764	-	1,029
50Ca-50N	50	164	330	70	359	487	1,031
100Ca-50N	50	174	348	120	-	851	1,031
0-45BB	45	164	364	-	735	-	1,042
50Ca-50BB	50	164	330	70	351	480	1,031
100Ca-50BB	50	170	340	120	-	858	1,031

※0,30,100:CUS置換率,Ca:石灰石微粉末,N:普通ポルトランドセメント, BB:高炉セメントB種

圧縮強度の試験結果を表-4 に示す。ポンプ圧送前後において所定の要求性能の範囲内で大きな変化は見られなかった。また、高所への圧送性についても、特に無混入のコンクリートの場合との差異は見られなかった。

4.2 ケーソン模擬供試体製作

模擬供試体の製作時における各ケースのブリーディングの発生の程度は、室内試験同様、銅スラグ細骨材の混入量が増加するほど多くなった（目視確認）。また、結果として打設完了から仕上げまでの時間も、混入量が増加するほど長くなる傾向が見られた。

硬化後の模擬供試体側壁部分の上層と下層より採取したコアの圧縮強度試験結果および単位容積質量試験結果を表-5（締固め時間 15 秒の場合）に示す。供試体上層と下層での品質の差（圧縮強度，単位容積質量）や、締固め時間による品質の差（圧縮強度，単位容積質量）について、ほとんどのケースで上層よりも下層の圧縮強度が大きくなったが、銅スラグ細骨材の混入量の違いによる有意な差や傾向は見られなかった。

4.3 ブリーディング試験結果

ブリーディング試験結果を図-5 および図-6 に示す。ケース 1 の結果では、夏季，冬季にかかわらず，銅スラグ細骨材の混入量が多くなるにつれてブリーディングが増加した。ケース 2 の結果においては，銅スラグ混入率が高くなってほとんど増加しない結果となった。これは，石灰石微粉末をセメントの外割で混入した効果が現れたためと考えられる。また，ケース 1 の場合は，冬季に著しいブリーディングの増加が見られたが，ケース 2 では見られなかった。ただし，コンクリート温度がケース 1 では，6~7℃で，ケース 2 は，13~14℃であったため，温度差の影響が現れた可能性も考えられる。

4.4 凝結試験結果

冬季における凝結試験結果を図-5 および図-6 に示す。ケース 1 において，銅スラグ細骨材の混入量の増加に伴い凝結の始発時間と終結時間は長くなる傾向を示した。特に，銅スラグ細骨材の混入量 100%でフライアッシュをセメントの内割で混入した場合でも凝結の始発までに 25h，終結までに 32h を要した。一方，ケース 2 については，銅スラグ混入量が増加しても大きな変化は見られなかった。これは，ブリーディングが低減したことやケース 1 のコンクリート温度が，6~7℃であったのに対してケース 2 では 13~14℃であったことも影響していると考えられる。

5. 強度特性

5.1 圧縮強度試験結果

標準養生（20℃）時の材齢 3，7，28，91 日の圧縮強度を図-7 および図-8 に示す。なお，材齢 3 日は冬季

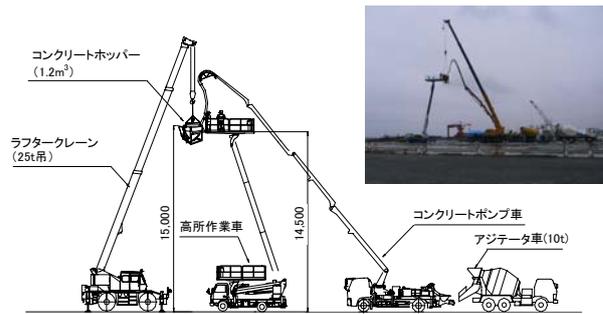


図-4 ポンプによる高所圧送試験状況

表-4 ポンプ圧送前後の各種試験結果

ケース	スラブ (cm)		空気量 (%)		単位容積質量 (t/m³)		圧縮強度 (材齢28日) (N/mm²)	
	圧送前	圧送後	圧送前	圧送後	圧送前	圧送後	圧送前	圧送後
0 - 47N	12.0	11.5	5.4	5.1	2.294	2.299	34.9	35.4
30 - 48N	11.0	11.0	5.2	5.0	2.377	2.368	37.4	34.9
100 - 45N	11.0	10.5	4.8	4.4	2.563	2.471	40.6	38.6
100F - 43N	11.0	13.5	3.8	3.3	2.594	2.577	36.2	37.0
0 - 45BB	11.0	9.5	3.8	3.4	2.357	2.390	38.6	38.2
30 - 47BB	12.0	12.5	5.0	4.6	2.373	2.385	36.5	37.1
100 - 43BB	11.0	10.5	4.5	4.3	2.578	2.580	37.6	39.9
100F - 42BB	12.5	14.0	4.1	3.5	2.565	2.577	34.3	36.9

表-5 模擬供試体の上層と下層の各種試験結果

ケース	コアの圧縮強度(材齢44日) (N/mm²)			単位容積質量 (t/m³)		
	上層	下層	差	上層	下層	差
0 - 47N	36.9	35.9	-1.0	2.265	2.291	0.026
30 - 48N	39.3	46.5	7.2	2.378	2.401	0.023
100 - 45N	38.6	47.8	9.2	2.584	2.584	0
100F - 43N	49.3	54.0	4.7	2.597	2.609	0.012
0 - 45BB	42.6	46.7	4.1	2.376	2.367	-0.009
30 - 47BB	43.9	46.6	2.7	2.382	2.424	0.042
100 - 43BB	46.3	52.6	6.3	2.603	2.637	0.034
100F - 42BB	44.2	50.0	5.8	2.596	2.613	0.017

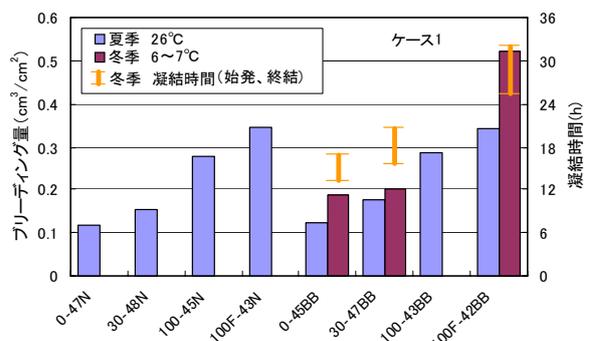


図-5 ブリーディング量及び凝結時間(ケース 1)

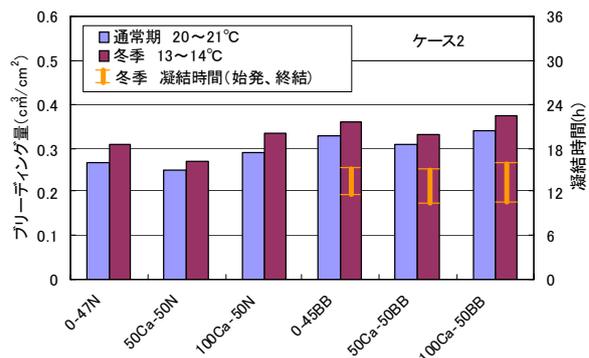


図-6 ブリーディング量及び凝結時間(ケース 2)

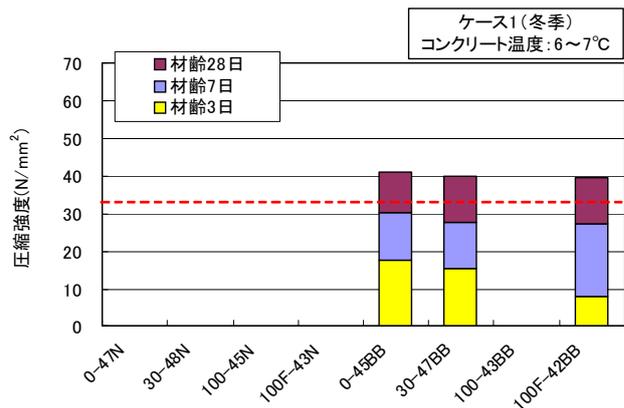
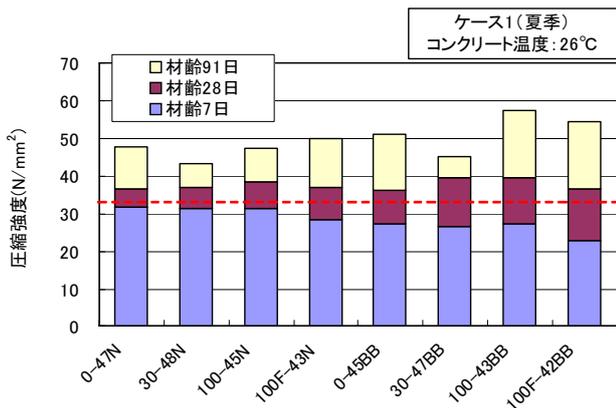


図-7 圧縮強度試験結果(ケース 1)

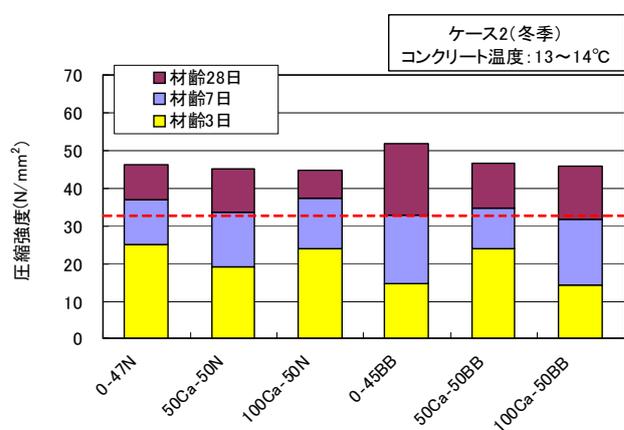
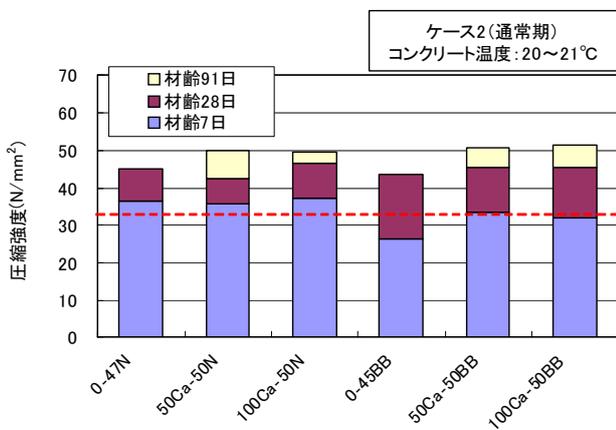


図-8 圧縮強度試験結果(ケース 2)

のみ、材齢 91 日は夏季及び通常期のみ実施した。全ての配合において材齢 28 日では、目標強度 33N/mm²を上回っている。冬季の材齢 3 日の強度は、100F-42BBに見られるように銅スラグ細骨材の混入量が多く、高炉セメントを用いた場合、無混入のコンクリートと比べて強度発現が通常よりも遅いため、型枠脱型時期に注意が必要である。

5.2 鉄筋との付着強度試験結果

鉄筋との付着強度試験 (JSCE-G503-1999) 結果から、最大付着応力度およびすべり量が 0.002D (試験では鉄筋 D16 を使用) に達したときの付着応力度を式(1) により算定した。

$$\tau = \frac{P}{4\pi D^2} \cdot \alpha \quad (1)$$

ただし、 τ : 付着応力度 (N/mm²)、P: 引張荷重 (N)、D: 鉄筋の径 (mm)、 α : コンクリートの圧縮強度に対する補正係数 (=30/ f_c 、 f_c : 同時に作製した円柱供試体の材齢 28 日における圧縮強度 (N/mm²)) である。

鉄筋との最大付着応力度を図-9に示す。最大付着応力度は、ケース1の場合、100-45Nを除き11~13N/mm²の

範囲で、ケース2の場合、8~10N/mm²の範囲にあった。また、すべり量が0.002Dに達したときの付着応力度は、ケース1の場合、4~8N/mm²程度、ケース2の場合、4~6 N/mm²程度であった。なお、全ての配合でコンクリートの目標強度33N/mm²に対する付着強度³⁾2.7 N/mm²以上であった。

また、「銅スラグ細骨材を混入した場合の最大付着応力度 (τ_s)」を求め、「銅スラグ細骨材が無混入の場合の最大付着応力度 (τ_0)」の鉄筋付着応力度比 τ_s/τ_0 を図-10および図-11に示す。ケース1の場合、鉄筋付着

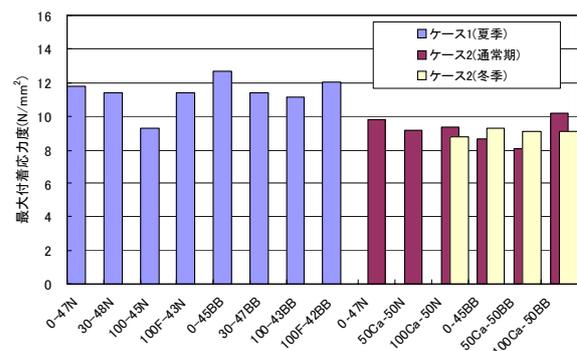


図-9 鉄筋最大付着応力度

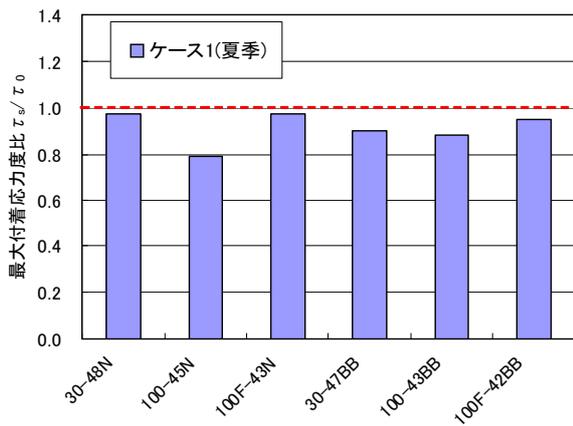


図-10 τ_s/τ_0 (ケース 1)

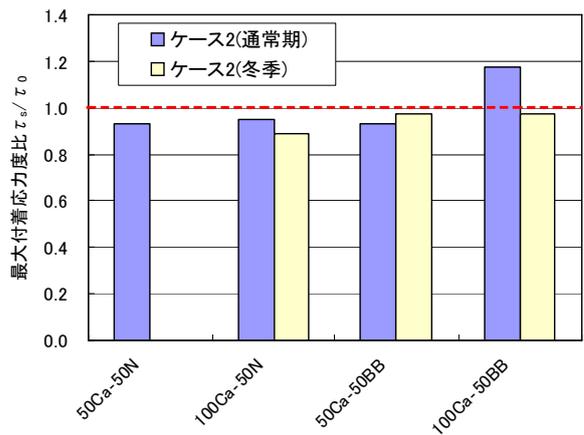


図-11 τ_s/τ_0 (ケース 2)

応力度比は0.8~1の範囲で全て1を下回る結果となった。特に、100-45Nの場合は、大きく1を下回っており、このときのブリーディングは、無混入のコンクリートと比べ約2倍程度であった。また、フライアッシュを混入した配合の100F-43Nや100F-42BBの場合には、ブリーディングが多いものの鉄筋付着応力度比が1に近いものもあった。ブリーディングが改善されたケース2の場合の鉄筋付着応力度比は0.9~1.2の範囲で、1に近いものが多かった。鉄筋コンクリートに使用する際には極力ブリーディングを低減する必要があることが分かる。

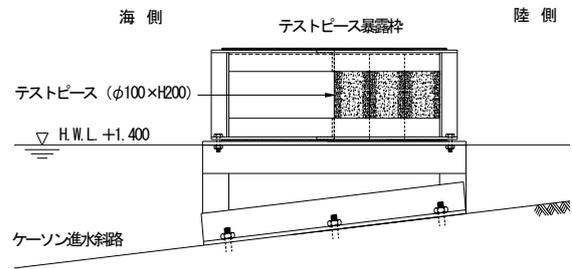


図-12 実海域暴露試験イメージ図

6. 耐久性

塩害を受ける鉄筋コンクリート構造物において、耐久性に影響を及ぼすものに、コンクリートの見かけの塩化物イオン拡散係数 D_{ap} がある。この D_{ap} を評価するため、電気泳動試験 (JSCE-G571-2003)、浸せき試験 (JSCE-G572-2003)、実海域暴露試験を行った。実海域暴露試験イメージ図を図-12、電気泳動試験模式図を図-13に示す。電気泳動試験、浸せき試験、実海域暴露試験結果から求めた見かけの塩化物イオン拡散係数 D_{ap} を図-14に示す。なお、実海域暴露試験における D_{ap} はJSCE-G573-2003に準拠して求めた。

各試験結果において、高炉セメントを使用することにより、 D_{ap} が大幅に低下していることが分かる。また、銅スラグ細骨材を混入した場合の D_{ap} は、銅スラグ細骨材無混入の場合の D_{ap} と比べて同等か小さくなる結果となった。

7. 収縮特性

ケーソン等の大型構造物に銅スラグ細骨材コンクリートを適用した場合のひび割れ発生に対する試験として自己収縮試験、乾燥収縮試験を実施した。

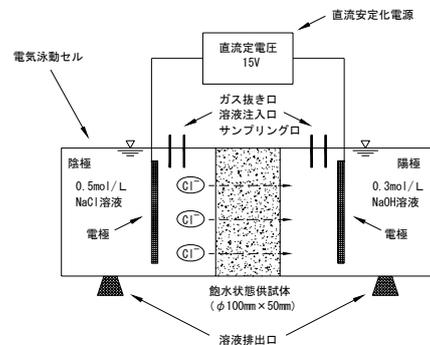


図-13 電気泳動試験模式図

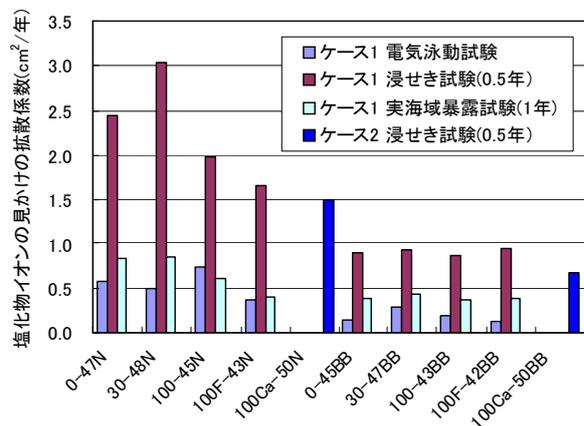


図-14 見かけの拡散係数 D_{ap}

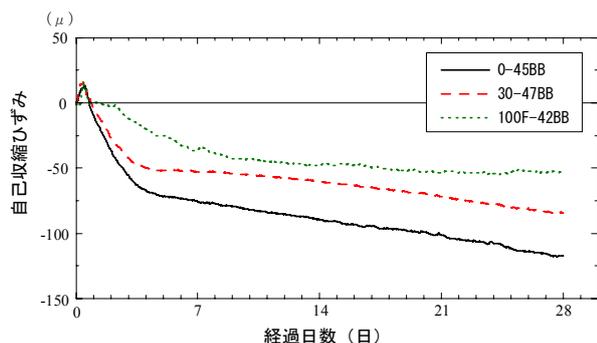


図-15 自己収縮ひずみ

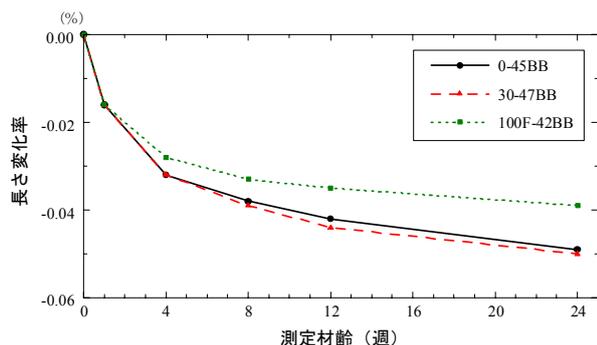


図-16 乾燥収縮

7.1 自己収縮試験結果

自己収縮試験 (JCI 高流動コンクリートの自己収縮試験方法) 結果を図-15 に示す。銅スラグ細骨材の混入量が多くなるほど自己収縮は低減されている。この原因として、骨材自体が収縮しにくいことやフライアッシュ混入により発熱量が減少したことなどが考えられる。

7.2 乾燥収縮試験結果

乾燥収縮試験 (JIS A 1129) 結果を図-16 に示す。銅スラグ細骨材の混入量が 100% の場合、混入量 0%, 30% に比べてかなり収縮量が減少している。これは、骨材自体が収縮しにくいことが考えられる。

8. まとめ

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を検討し、得られた結果を以下にまとめる。

8.1 施工性

銅スラグ細骨材を大量に混入したコンクリートの高所へのポンプ圧送について、無混入のコンクリートの場合と差異は見られず、圧送前後において、スランプ、空気量、単位容積質量、圧縮強度等に大きな変化はみられなかった。また、銅スラグ細骨材を大量に使用した際には、ブリーディングが増加する傾向があるが、石灰石微

粉末をセメントの外割で混入することで、ブリーディングの増加を抑制可能であることが確認された。

8.2 強度特性

圧縮強度は、全ての配合において、目標強度 33N/mm^2 (材齢 28 日) を上回った。しかし、打設温度が低い場合には、若材齢時の強度発現特性に注意が必要となる。

鉄筋との付着強度は、ブリーディングの量を通常の骨材と同程度に抑制することで、鉄筋の付着強度低下を抑制できることが確認できた。

8.3 耐久性

塩害を受ける鉄筋コンクリート構造物の耐久性に影響を及ぼすコンクリートの見かけの塩化物イオン拡散係数 D_{ap} について、銅スラグ細骨材を混入した場合、無混入のコンクリートと同等か小さくなった。また、高炉セメントを使用することにより、 D_{ap} が大幅に低下していることが確認された。

8.4 収縮特性

自己収縮、乾燥収縮ともに銅スラグ細骨材の混入量が多くなるほど減少する傾向が見られた。コンクリートのひび割れ抵抗性に関して、銅スラグ細骨材を混入することによる悪影響は現れにくいと考えられる。

本研究開発により、銅スラグ細骨材を大量に混入したコンクリートを鉄筋コンクリートへ利用する場合において、適切なブリーディング抑制対策を行うことで、施工性・強度特性・耐久性・収縮特性などの面で、無混入のコンクリートと同様の性能が得られることが確認された。ただし、配合が大幅に変わる場合や低温環境で施工を実施する場合は、施工前に確認試験、施工時における品質の変化を想定しておく必要がある。

なお、本研究開発は国土交通省小名浜港湾事務所、若築建設、小名浜製錬、新菱商事の 4 者の共同研究開発であり、本研究開発の遂行、とりまとめに際しては、関西国際空港 (株) 山路徹氏 (前 (独) 港湾空港技術研究所) にご指導頂いた。ここにお礼申し上げる。

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施工指針, コンクリートライブラリ 92, 1998
- 2) 高橋真, 浅井孝多郎, 森晴夫, 本田友之：銅スラグを用いたコンクリートに関する利用開発 - 銅スラグ細骨材を 100% 用いた重量コンクリートについて -, 若築建設土木技術年報, 第 13 巻, pp.19-28, 2004
- 3) 土木学会：コンクリート標準示方書 [構造性能照査編], 2002