

論文 銅スラグ細骨材を大量混合したコンクリートの施工性と品質変化に関する検討

川端 雄一郎^{*1}・岩波 光保^{*2}・加藤 絵万^{*3}・審良 善和^{*4}

要旨:銅スラグ細骨材(CUS5-0.3)を大量混合したコンクリートの施工性およびコンクリートの品質変化について検討を行った。銅スラグ細骨材の混合率が50%以下であれば、理論吐出量30m³/h以下でポンプ圧送が可能であった。また、ポンプ圧送前後におけるフレッシュ性状に大きな差は認められなかった。また、混合率100%の場合であっても直接打設を行えばコンクリートの圧縮強度は設計基準強度を満足し、打設高さ方向における圧縮強度および単位容積質量にも顕著な差は認められなかった。以上から、銅スラグ細骨材を大量混合したコンクリートは品質改善を行わなくとも港湾の無筋コンクリート構造物に適用可能と考えられた。

キーワード: 銅スラグ細骨材, ポンプ圧送, フレッシュ性状, プリーディング

1. はじめに

銅の熔融精錬の際に副産される銅スラグ細骨材は、現在の銅スラグ細骨材の有効利用の用途としてはセメント原料やサンドブラスト材が主体となっているが、コンクリート用骨材としての用途拡大が望まれている。

これまで銅スラグ細骨材を混合したコンクリートに関する研究は多くなされている。1998年には土木学会より「銅スラグ細骨材を用いたコンクリートの施工指針」¹⁾(以下、施工指針)が示され、銅スラグ細骨材の混合率が30%以下の範囲であれば、銅スラグ細骨材の銘柄によらず、普通細骨材と同様に取り扱うことができるとされている。

一方、近年では銅スラグ細骨材のコンクリートへの大量混合が目立っており、関連の研究がなされてきている。錦織ら²⁾はCUS2.5を混合したコンクリートのフレッシュ性状および硬化性状について検討し、混合率50~60%であれば、普通コンクリートと大差なく混合できることを報告している。また、石灰石微粉末や高性能AE減水剤を用いることで全量混合も可能としている。また、森ら³⁾はCUS2.5よりも粗粒率の高いCUS5-0.3を大量混合したコンクリートの鉄筋コンクリートへの適用性について検討し、石灰石微粉末を外割で混合するなどの適切なプリーディング対策を行うことで普通コンクリートと同等の性能が得られることを確認している。五味らのスラグ骨材を混合した高密度コンクリートに関する検討⁴⁾では、粗骨材に対しても電気炉酸化スラグを混合したコンクリートについて、高性能AE減水剤および石灰石微粉末を用いることで粗骨材および細骨材ともに全量混合が可能であることを報告している。

既往の研究の多くでは、銅スラグ細骨材の混合率を変化させる、もしくは混和材等を用いてコンクリートの品質改善を行うことで、銅スラグ細骨材を混合したコンクリートを普通コンクリートと同等の部位に適用できるよう検討を行ってきている。これらの方策は有効な手段ではあるが、適材適所という観点から、銅スラグ細骨材を大量混合したコンクリートを、品質改善を行わなくとも可能な部位に適用することも必要と考えられる。

ここで港湾の無筋コンクリート構造物である消波ブロック等に注目すると、従前から知られている通り高密度になることで所要容積の低減が可能となる。また、スラグ骨材を混合したコンクリートはプリーディングの増加による耐凍害性の低下が懸念されるが、港湾構造物は海洋環境に位置するため凍結融解の影響を受けにくい。さらに、このような構造物は高い強度および耐久性を要しないため、品質改善を行わなくとも銅スラグ細骨材を大量混合したコンクリートを適用できる可能性は十分高いと思われる。この場合、最も懸念すべき項目は施工性とコンクリートの品質変化と考えられる。

本研究は、銅スラグ細骨材を大量混合したコンクリートの港湾の無筋コンクリート構造物への適用を目的として、品質改善を行わずに銅スラグ細骨材を大量混合したコンクリートの施工性とコンクリートの品質変化について検討を行った。まず、銅スラグ細骨材を大量混合したコンクリートの施工条件を明確にし、コンクリートの品質変化についてフレッシュ性状および硬化性状の観点から検討を行った。次に、この結果から、銅スラグ細骨材を大量混合したコンクリートの港湾の無筋コンクリート構造物への適用性評価を行った。

*1 独立行政法人港湾空港技術研究所 地盤・構造部 構造研究チーム 博士(工学) (正会員)
 *2 独立行政法人港湾空港技術研究所 地盤・構造部 構造研究チーム 博士(工学) (正会員)
 *3 独立行政法人港湾空港技術研究所 地盤・構造部 構造研究チーム 博士(工学) (正会員)
 *4 独立行政法人港湾空港技術研究所 地盤・構造部 材料研究チーム 博士(工学) (正会員)

2. 実験概要

2.1 使用材料および配合

(1) 使用材料

表-1 に使用材料を示す。銅スラグ細骨材には JIS 規格の中で最も粗粒な CUS5-0.3(粗粒率 3.28)を採用した。

セメントには高炉セメント B 種を使用した。普通細骨材には砕砂と山砂の混合砂，粗骨材には砕石 2005 を使用した。化学混和剤として，AE 減水剤(Ad)，AE 剤(AE)，消泡剤(DAE)を使用した。

(2) 配合

表-2 にコンクリートの示方配合を示す。65-100 を除いて，目標スランプ $10.0 \pm 2.5\text{cm}$ ，目標空気量 $4.5 \pm 1.5\%$ とした。銅スラグ細骨材を混合したコンクリートはいずれも単位水量を 180kg/m^3 ，水セメント比を 65% で一定とした。これは，「港湾の施設の技術上の基準・同解説」⁵⁾ において無筋コンクリートの最大水セメント比が 65% となっていること，またコンクリートの単位水量の上限値 175kg/m^3 よりも危険側で検討するためである。銅スラグ細骨材の混合率は 30，50，70，100% とした。また比

較として，普通コンクリートについても検討を行った。

2.2 練混ぜおよび試験体作製

65-100 を除いた 4 配合については，実機練りミキサを使用した。なお，練混ぜ量は後述するポンプ圧送試験に合わせて $2 \sim 4\text{m}^3$ 練り混ぜた。65-100 については，100 リットル二軸強制練りミキサにて練混ぜを行った。

練混ぜ終了後， $\phi 100 \times 200\text{mm}$ の円柱供試体を作製し，脱型後は水中養生を行った。また，65-0，65-100 については型枠への直接打設で $200 \times 500 \times 1000\text{mm}$ の角柱試験体を作製した。角柱試験体では，1 層あたりの打設高さを 0.5m とし，1 層につき 10 秒間棒状バイブレータにより締固めを行った。材齢 28 日まで封緘養生とした。

2.3 ポンプ圧送試験

ポンプ圧送にともなうコンクリートの品質変化を評価するため，図-1 に示す配管条件でポンプ圧送試験を行った。なお，本研究では製作ヤード等におけるポンプ圧送を想定し，水平換算距離を 101.8m に設定した。

管内圧力の測定は 6 箇所で行い，コンクリートのポンプ施工指針⁶⁾に基づく水平換算距離で $10.8\text{m}(P1)$ ，

表-1 使用材料

使用材料	記号	詳細
セメント	C	高炉セメント B 種 (密度 3.04g/cm^3)
細骨材	S	砕砂と山砂の混合砂 (表乾密度 2.62g/cm^3 ，吸水率 0.99%，粗粒率 2.62)
銅スラグ	CUS	CUS5-0.3 (表乾密度 3.45g/cm^3 ，吸水率 0.40%，粗粒率 3.28)
粗骨材	G1	砕石 2005 (表乾密度 2.69g/cm^3 ，吸水率 0.98%，粗粒率 6.71)
	G2	砕石 2005 (表乾密度 2.70g/cm^3 ，吸水率 0.75%，粗粒率 6.61)

表-2 コンクリートの示方配合と材齢 28 日における圧縮強度

記号	W/C	s/a	CUS 混入率 (%)	単位量 (kg/m^3)									圧縮強度 (N/mm^2)
				W	BB	S	CUS	G1	G2	Ad	AE (C%)	DAE (C%)	
65-0	65	45.0	0	168	258	828	0	0	1042	0.65	0.003	0	28.9
65-30		46.0	30	180	277	578	326	0	996	0.69	0.002	0.016	30.9
65-50		46.5	50	180	277	417	549	0	988	0.90	0.002	0.025	27.4
65-70		47.0	70	180	277	252	775	0	980	1.11	0.002	0.034	27.3
65-100		48.0	100	180	277	0	1132	961	0	1.39	0.002	0.05	26.5

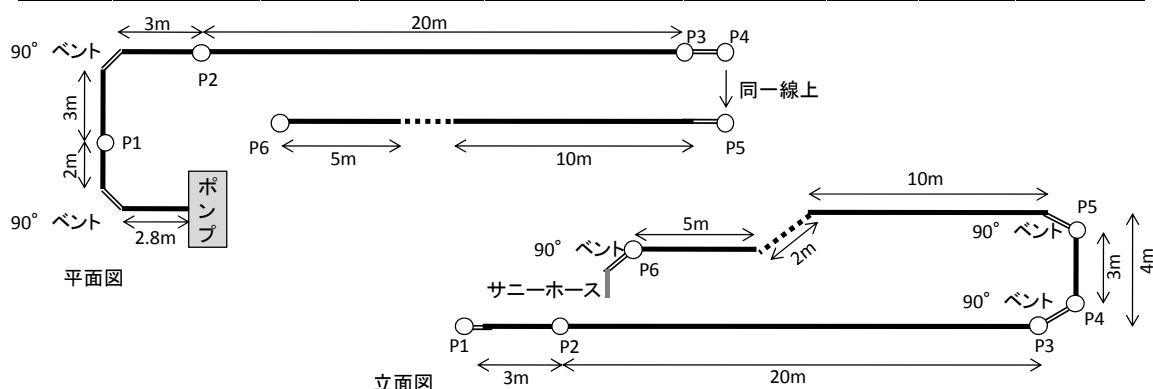


図-1 ポンプ圧送試験の配管条件

22.8(P2), 42.8m(P3), 48.8m(P4), 60.8m(P5), 95.8(P6)の各位置とした。圧送時の管内圧力を圧力計と動ひずみ計を用いて 20msec 間隔で連続測定した。

ポンプ圧送は、吐出量を3段階（以下、大、中、小とする。）に変化させ、ポンプ圧送前後におけるスランブ、空気量、ブリーディング量を測定し、φ100×200mmの円柱供試体を作製した。

2.4 圧縮強度および静弾性係数

作製した円柱試験体について、JIS A 1108にしたがって圧縮強度試験を行った。また、同時にコンプレッソメータを用いてひずみを測定し、静弾性係数を求めた。

3. 実験結果および考察

3.1 フレッシュ性状

表-3 にコンクリートのフレッシュ性状を示す。スランブに着目すると、65-100のスランブが極端に小さくなった。65-100では銅スラグ細骨材同士の噛み合った状態でペーストのみが流動するような材料分離性状を示したため、ポンプ圧送試験は不可能と判断した。また、ブリーディング量に着目すると、銅スラグ細骨材の混合率の増加とともにブリーディング量が大きくなった。

3.2 ポンプ圧送試験

(1) ポンプ圧送性

表-4 にポンプ圧送試験結果および管内圧力の測定値を示す。理論吐出量 10.9~32.8m³/hの範囲であれば、銅スラグ細骨材の混合率が50%まではポンプ圧送を行うことができた。混合率70%では、理論吐出量 12.4 m³/h(小)において良好な性状を示したものの、20 m³/h程度(中)に吐出量を増加させたところ、不安定圧送となり、管内圧力等の測定を行うことができなかった。また、吐出量を

それ以上に大きくしたところ、管内閉塞を生じた。施工指針¹⁾によると、W/C=55%のコンクリート(目標スランブ 12cm)に CUS2.5 を混合した場合には、混合率が 100%であってもポンプ圧送を行うことができるとされている。これは、粗粒率が 2.56 と本研究で混合した CUS5-0.3 の粗粒率 3.28 と比較して小さいこと、また水セメント比が小さかったためと考えられる。

(2) 管内圧力損失

図-2 に 65-50 の各理論吐出量における水平換算距離と管内圧力の関係を示す。管内圧力損失は P1-P2 間、P3-P5 間において大きな値を示している。P1-P2 間および P4-P5 間は 90° ベント管、P3-P4 間は鉛直管があるため、圧力損失が大きかったものと考えられる。また、理論吐出量が大きくなるにしたがって圧力損失も大きくなる傾向が認められた。

表-4 から、理論吐出量 10~15m³/h(小)で配合による違いに着目すると、銅スラグ細骨材の混合率の増加に伴って管内圧力が若干ながら大きくなる傾向を示している。また、理論吐出量が中以上では、銅スラグ細骨材の混合率に関わらずほぼ同等の値を示した。

表-3 フレッシュ性状

配合	スランブ (cm)	空気量 (%)	ブリーディング量 (cm ³ /cm ²)
65-0	11.0	4.2	0.16
65-30	11.0	4.3	0.21
65-50	9.5	5.0	0.30
65-70	10.0	5.6	0.40
65-100	5.0	4.6	0.49

表-4 ポンプ圧送試験結果

配合	理論吐出量 (m ³ /h)		ポンプ圧送	管内圧力 (MPa)					
				P1 (10.8m)	P2 (22.8m)	P3 (42.8m)	P4 (48.8m)	P5 (60.8m)	P6 (95.8m)
65-0	10.9	小	可	0.39	0.31	0.22	0.17	0.08	0.00
	17.7	中	可	0.49	0.36	0.28	0.21	0.12	0.00
	26.2	大	可	0.63	0.44	0.34	0.27	0.16	0.00
65-30	11.9	小	可	0.48	0.33	0.29	0.22	0.12	0.01
	15.3	中	可	0.54	0.36	0.31	0.23	0.13	0.01
	26.2	大	可	0.63	0.43	0.34	0.27	0.15	0.01
65-50	14.9	小	可	0.43	0.28	0.25	0.17	0.07	0.00
	23.4	中	可	0.52	0.33	0.29	0.21	0.10	0.00
	32.8	大	可	0.59	0.37	0.33	0.23	0.12	0.01
65-70	12.4	小	可	0.48	0.33	0.27	0.20	0.10	0.00
	計測不可	中	不安定	-	-	-	-	-	-
	計測不可	大	不可	-	-	-	-	-	-

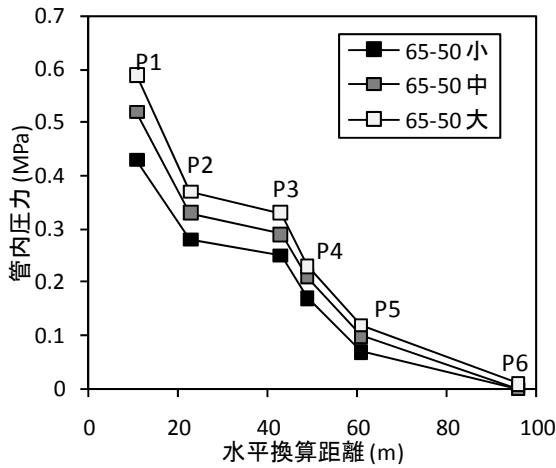


図-2 水平換算距離と管内圧力の関係

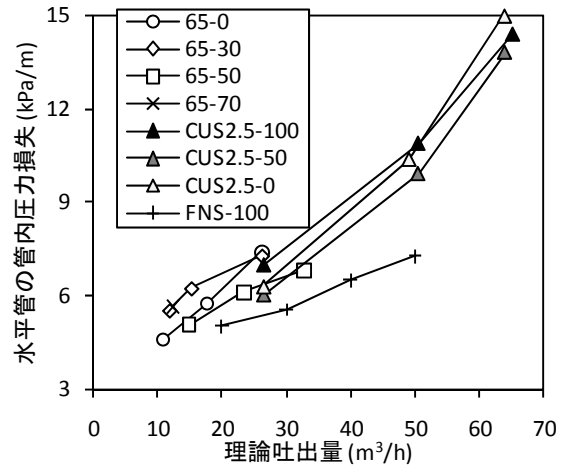


図-3 理論吐出量と管内圧力損失

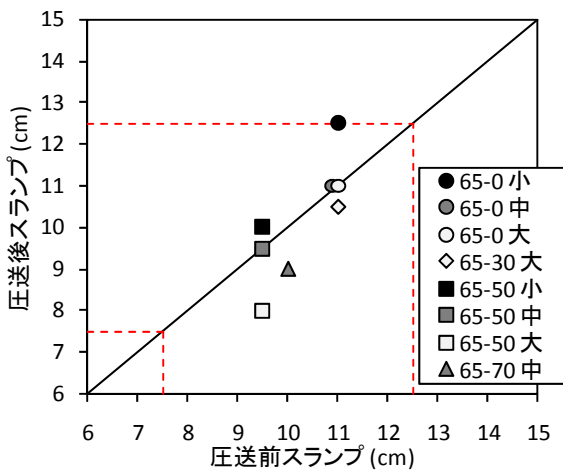


図-4 ポンプ圧送前後におけるスランプの変化

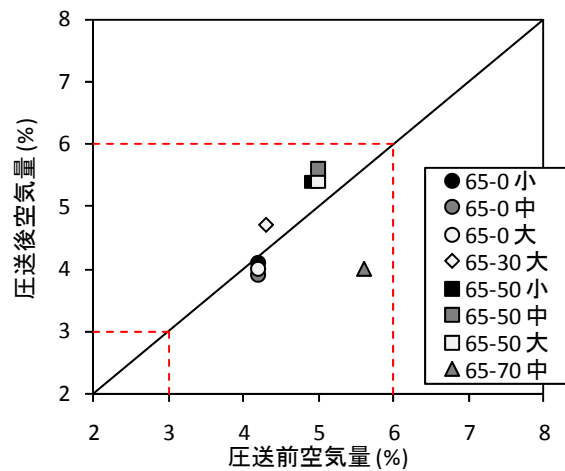


図-5 ポンプ圧送前後における空気量の変化

図-3 に理論吐出量と管内圧力損失の関係を示す。図中凡例のCUS2.5-100, CUS2.5-50, CUS2.5-0, FNS-100は各種スラグ骨材の施工指針^{1), 7)}の(いずれも目標スランプ12cm)ポンプ圧送試験における水平管の管内圧力損失の結果(ハイフンの後の数字はスラグ骨材の混合率を示す)を比較として示した。図より、65-30の圧力損失は65-0よりも若干大きな値を示した。また、65-50については65-0よりも圧力損失が小さくなる結果となった。しかしながら、これらの差は非常に小さいものであり、吐出量30m³/h程度までであれば、銅スラグ細骨材を混合したコンクリートでも普通コンクリートと同様に施工可能であると思われる。

施工指針の結果と比較すると、同じ銅スラグ細骨材であれば理論吐出量20~30m³/hの範囲ではほぼ同じ管内圧力損失を示している。フェロニッケルスラグを100%混合したデータ(FNS:粗粒率2.39)と比較すると、FNSの管内圧力損失の方が銅スラグ細骨材よりも小さい。これは、スラグ骨材の密度の違いによるものと考えられる。

CUS2.5の場合では混合率100%の場合、理論吐出量60m³/h程度としてもポンプ圧送を行うことができているが、CUS5-0.3の場合には混合率を70%とした場合には12m³/h程度が圧送限界であることが明らかとなった。

よって、銅スラグ細骨材混合率が70%を超える場合には、バケットもしくは直接打設を行うことで銅スラグ細骨材を大量使用したコンクリートの打設を行う必要がある。なお、CUS5-0.3混合率が70%以上のコンクリートについては直接打設により消波ブロックの作製が可能であることを確認している。この結果の詳細については追って報告することとする。

3.3 ポンプ圧送前後のコンクリートの品質変化

(1) フレッシュ性状

図-4 および図-5 にポンプ圧送前後におけるスランプおよび空気量の変化を示す。図より、ポンプ圧送試験前後における銅スラグコンクリートのスランプおよび空気量は圧送前と比較してほぼ同等の値を示し、目標スランプおよび目標空気量の範囲内となっており、ポンプ圧送にともなう大きな品質変化は生じなかった。

図-6 にポンプ圧送前後のブリーディング量の変化を示す。普通コンクリートでは、ポンプ圧送前後におけるブリーディング量への変化は認められないが、銅スラグ

細骨材の混合率が大きくなるにしたがって、また吐出量が大きくなるにしたがってブリーディング量が減少する傾向が認められ、他のスラグ骨材を使用したポンプ圧送に関する既往の研究^{1), 7)}と同様の傾向が得られた。

ブリーディングの増加は硬化コンクリートの強度・耐久性に影響を及ぼすとされるが、現時点ではその関係は不明確である。ただし、ブリーディング量が $0.5\text{cm}^3/\text{cm}^2$ 以下のコンクリートであれば品質に問題が無いという現場実績²⁾から、ブリーディング量の変化によってコンクリートの品質への悪影響は無いものと推察される。

(2) 硬化性状

図-7 にポンプ圧送前後における単位容積質量の変化を示す。65-50 まではポンプ圧送前後における単位容積質量の変化はほとんど無い。一方、65-70 においてはポンプ圧送後における単位容積質量が圧送前よりも小さくなった。これは、ポンプ圧送が不安定で、圧送中に材料分離を生じペースト量が増加したためと考えられる。

図-8 にポンプ圧送前後における圧縮強度の変化を示す。いずれの配合も $25\text{N}/\text{mm}^2$ 以上の値を示しており、設計基準強度に十分達する値を示した。65-0 では、ポンプ圧送の吐出量が大きくなるにしたがって圧縮強度が若干低下する傾向が認められ、吐出量大において約 5%の低下が生じた。また、吐出量大において、65-30 の圧縮強度の低下率は 65-0 とほぼ同じ値となった。一方、65-50 でも吐出量の増加にともなって圧縮強度が低下する傾向が認められたが、ポンプ圧送後の圧縮強度の方がいずれも圧送前の圧縮強度よりも大きい結果となった。65-70 では、ポンプ圧送後の圧縮強度がポンプ圧送前よりも $4.0\text{N}/\text{mm}^2$ 程度大きくなった。これは、不安定圧送にともなってペースト分が増加したために圧縮強度が増加したものと推察される。

図-9 に圧縮強度と静弾性係数の関係を示す。なお、図中には単位容積質量を考慮した建築学会式⁸⁾を合わせて示している。65-0 に着目すると、ポンプ圧送前よりもポンプ圧送後の静弾性係数が大きくなり、また吐出量の増加にともなって静弾性係数は低下した。一方、65-50 ではポンプ圧送前後における静弾性係数には大きな変化は認められなかった。65-70 では、ポンプ圧送後に圧縮強度が増加したにも関わらず静弾性係数はほぼ同じ値を示した。これは、上述した通り、コンクリート中のペースト分が増加したためと考えられる。

いずれの配合においても、ポンプ圧送前後における銅スラグ細骨材を 50%以下で使用したコンクリートの硬化性状に大きな差は認められなかった。よって、 $30\text{m}^3/\text{h}$ 以下のポンプ圧送であれば、消波ブロックまたは根固めブロックのような無筋コンクリート構造物の要求性能は満足していると考えられる。

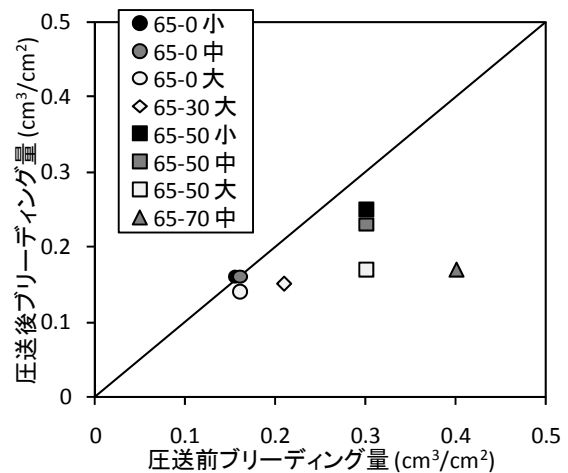


図-6 ポンプ圧送前後におけるブリーディングの変化

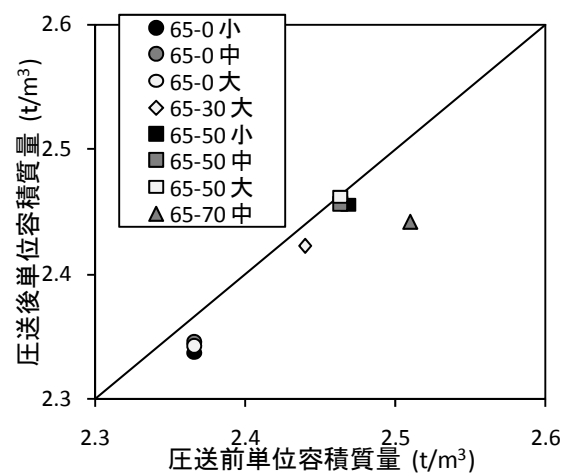


図-7 ポンプ圧送前後における単位容積質量の変化

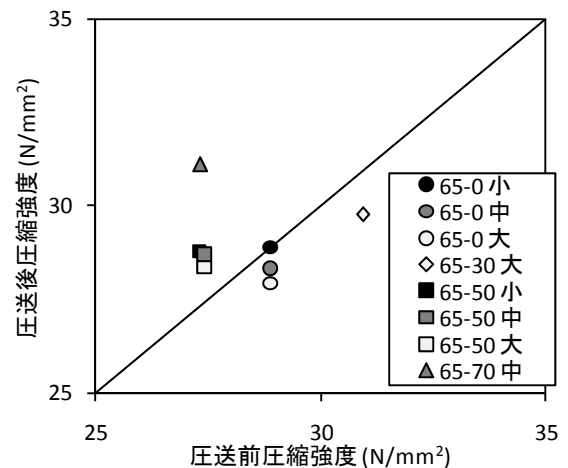


図-8 ポンプ圧送前後における圧縮強度の変化

3.4 打設高さ方向における材料分離性状

直接打設で作製した角柱試験体から打設高さ方向にコアを採取し、圧縮強度を測定した結果を図-10に示す。なお、図中の数字はコアの単位容積質量、破線はそれぞれの封緘養生を行った円柱供試体の圧縮強度を示している。65-0 では打設底面からの高さが大きくなるにしたがって圧縮強度が低下する傾向が認められたが、65-100

では打設面付近の圧縮強度が最も大きくなった。65-100では、単位容積質量も打設面付近が最も大きな値を示した。また、65-0ではコアの圧縮強度が円柱供試体よりも小さくなったが、65-100ではコアの圧縮強度の方が大きくなった。これは、試験体寸法によるブリーディング量の差に起因すると考えられる。角柱試験体打設面に生じたブリーディング量は65-0および65-100でそれぞれ $0.11\text{cm}^3/\text{cm}^2$ 、 $0.76\text{cm}^3/\text{cm}^2$ であった。表-3に示すJIS A 1123に準拠したブリーディング量と比較すると、65-0はほぼ同じ値を示したのに対して65-100では大きくなった。よって、65-100では実質の水セメント比が普通コンクリートよりも低下したため、角柱供試体の圧縮強度が円柱供試体よりも大きくなったと推察される。

以上より、銅スラグ細骨材(CUS5-0.3)の混合率100%、ブリーディング量 $0.50\text{cm}^3/\text{cm}^2$ 程度のコンクリートであっても、直接打設であれば十分に打設可能であることが明らかとなった。錦織ら²⁾は、消波ブロックに使用されるコンクリートはブリーディング量が $0.50\text{cm}^3/\text{cm}^2$ 程度となることもあるが、品質等に問題は生じていないという現場実績を報告している。また、既往の研究¹⁾から、銅スラグ細骨材を使用したコンクリートのブリーディング量は最大でも $0.50\text{cm}^3/\text{cm}^2$ 程度である。以上から、銅スラグ細骨材を100%混合したコンクリートであっても直接打設を行うことで品質改善を行わなくとも十分に港湾の無筋コンクリート構造物に適用可能と考えられる。

4. 結論

本研究は、品質改善を行わずに銅スラグ細骨材(CUS5-0.3)を大量混合したコンクリートの施工性およびコンクリートの品質変化について検討を行った。

理論吐出量 $30\text{m}^3/\text{h}$ の範囲であれば、銅スラグ細骨材(CUS5-0.3)の混合率が50%まではポンプ圧送による施工を行うことができ、ポンプ圧送によるスランプ、空気量、圧縮強度等の品質の変化は生じなかった。また、銅スラグ細骨材の混合率が100%であっても、直接打設を行うことで施工が可能であり、圧縮強度は普通コンクリートと同等の値を示すことが分かった。圧縮強度の打設高さ方向の分布にも顕著な差は認められなかった。

以上より、打設方法を適切に選択すれば銅スラグ細骨材を大量混合したコンクリートは品質改善を行わなくとも港湾の無筋コンクリート構造物に適用可能であると考えられる。

参考文献

1) 土木学会：銅スラグ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ー，No.92，pp.71-76，

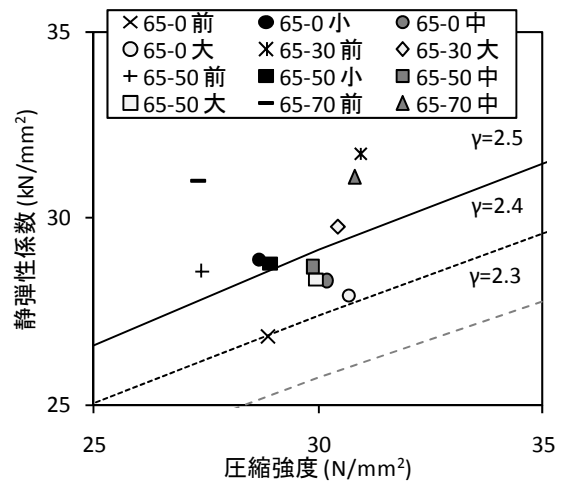


図-9 圧縮強度と静弾性係数の関係

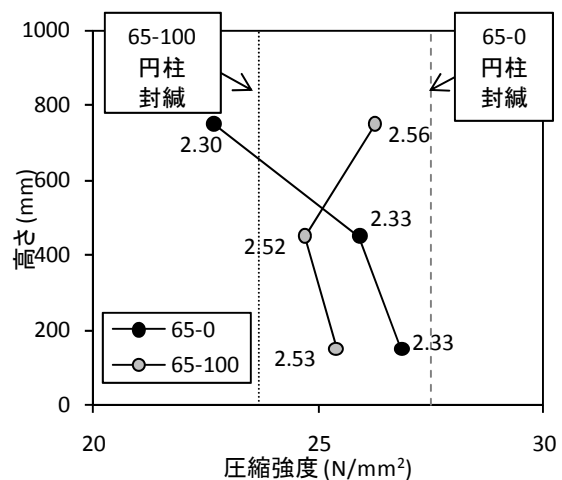


図-10 圧縮強度の高さ方向の分布 (封緘養生)

1998

2) 錦織和紀郎ほか：銅スラグ(CUS2.5)を用いたコンクリートの特性と施工例，コンクリート工学年次論文集，Vol.27，No.1，pp.127-132，2005
 3) 森晴夫ほか：銅スラグ細骨材を大量混合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
 4) 五味信治，柘田佳寛：スラグ骨材を使用した高密度コンクリートの基礎的実験，コンクリート工学年次論文集，Vol.27，No.1，pp.1417-1422，2005
 5) 日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説(上)，pp.445-450，2007
 6) 土木学会：コンクリートのポンプ施工指針，コンクリートライブラリー，No.100，pp.13-24，2000
 7) 土木学会：フェロニッケルスラグ細骨材コンクリート施工指針(案)，コンクリートライブラリー，No.78，pp.77-79，1994
 8) 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説，pp.165-170，1997