

港湾空港技術研究所 資料

TECHNICAL NOTE
OF
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

No.1233 June 2011

スラグ細骨材を大量混合したコンクリートの各種特性

川端雄一郎
岩波 光保
加藤 絵万

独立行政法人 港湾空港技術研究所
Independent Administrative Institution,
Port and Airport Research Institute, Japan

目 次

要 旨	3
1. 緒言	4
1.1 背景	4
1.2 スラグのコンクリート用細骨材としての有効利用に関する現状	4
1.3 スラグ細骨材を用いたコンクリートに関する既往の研究の整理	5
1.4 既往の研究の課題と本研究の目的および位置づけ	5
2. スラグ細骨材を大量混合したコンクリートの力学特性	6
2.1 実験概要	6
2.2 実験結果および考察	8
3. スラグ細骨材を大量混合したコンクリートの耐久性	11
3.1 実験概要	12
3.2 実験結果および考察	12
4. スラグ細骨材を大量混合したコンクリートの施工性	13
4.1 実験概要	13
4.2 実験結果および考察	14
5. スラグ細骨材を大量混合したコンクリートの港湾コンクリート構造物への適用性	19
5.1 無筋コンクリート構造物への適用性	19
5.2 鉄筋コンクリート構造物への適用性	19
6. 結言	20
参考文献	20
付録	22

Properties of Concrete with High Volume Slag Fine Aggregate

Yuichiro KAWABATA*
Mitsuyasu IWANAMI**
Ema KATO***

Synopsis

It is important to mix slag fine aggregate in concrete from the viewpoint of beneficial utilization of industrial by-products and conservation of natural resources. There have been many reports about properties of concrete containing slag fine aggregate. Most of them, however, are investigating the method on how to improve the properties of concrete containing slag fine aggregate as same as those of normal concrete by reducing mixing ratio of slag fine aggregate and/or increasing binder content in concrete. These methods result in increasing of cost and time. Therefore, it is required to apply concrete with high volume slag fine aggregate without quality improvement (HVSA concrete) to appropriate concrete structures. It is concerned that the increased bleeding affects the properties of HVSA concrete. In this study, mechanical properties, durability and workability of HVSA concrete were investigated experimentally.

As a result, the effect of bleeding on the mechanical properties of HVSA concrete was small when the bleeding content was less than 0.5cm³/cm² while bleeding of about 1.0cm³/cm² reduced them. The exposure test in marine environment for 1 year revealed that the durability of HVSA concrete was as same as that of normal concrete. The pumpability of HVSA concrete were as same as those of normal concrete when the mixing ratio of slag fine aggregate was less than 50 %. The HVSA concrete with more than 70% of mixing ratio could be produced by casting with hydraulic hopper. There results implied that unreinforced concrete port structures such as wave-dissipating block can be produced with HVSA concrete when proper casting method was selected.

Key Words: slag fine aggregate, bleeding, quality change, high volume slag aggregate concrete

* Researcher, Structural Mechanics Division, Geotechnical and Structural Engineering Department
** Head, Structural Mechanics Division, Geotechnical and Structural Engineering Department
*** Senior Researcher, Structural Mechanics Division, Geotechnical and Structural Engineering Department
3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan
Phone : +81-46-844-5059 Fax : +81-46-844-0255 e-mail: kawabata-y@pari.go.jp

スラグ細骨材を大量混合したコンクリートの各種特性

川端 雄一郎*・岩波 光保**・加藤 絵万***

要 旨

産業副産物として排出されるスラグ細骨材の有効利用が不可欠となっている。既往の研究の多くでは、スラグ細骨材を用いたコンクリートの品質が普通コンクリートと同等となるよう混合率を制限したり粉体量を増加するといった方策が取られてきた。これらの方策は有用ではあるものの、結果的にコストや手間の増大につながり、必ずしも効果的な方策とはなっていなかった。適材適所という観点から考えると、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。スラグ細骨材を大量混合したコンクリートではブリーディングの増加等による各種特性への影響が懸念される。そこで本研究は、品質改善を行わずにスラグ細骨材を大量混合したコンクリートの各種特性について実験的に検討した。

その結果、スラグ細骨材を大量混合したコンクリートについて、ブリーディング量 $0.5\text{cm}^3/\text{cm}^2$ 以下であれば、ブリーディング量が力学特性に及ぼす影響は小さかったが、 $1.0\text{cm}^3/\text{cm}^2$ 程度の過剰なブリーディングは力学特性を低下させることが明らかになった。また、海洋環境への約 1 年の暴露の結果、スラグ細骨材を大量混合したコンクリートの耐久性は普通コンクリートと同等であることが示された。さらに、ケーススタディによる施工試験の結果、銅スラグ細骨材を用いたコンクリートの場合、ポンプ圧送による施工が可能な場合には圧送による品質変化は普通コンクリートとほぼ同等であることが分かった。本実験の範囲では、銅スラグ細骨材の混合率が 50% 以下、ブリーディング量 $0.3\text{ cm}^3/\text{cm}^2$ 以下であればポンプ圧送が可能であった。また、銅スラグ細骨材を 70% 以上混合したコンクリートはポンプ圧送が困難となるが、ホッパを用いた直接打設により打設可能であることを示した。以上の結果から、適切な打設方法の選択により、スラグ細骨材を大量混合したコンクリートを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た。

キーワード：スラグ細骨材，ブリーディング，品質変化，大量混合

* 地盤・構造部構造研究チーム研究官

** 地盤・構造部構造研究チームリーダー

*** 地盤・構造部構造研究チーム主任研究官

〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 港湾空港技術研究所

電話：046-844-5059 Fax：046-844-0255 e-mail: kawabata-y@pari.go.jp

1. 緒言

1.1 背景

近年、産業副産物として排出されるスラグの有効利用が不可欠となっている。スラグの有効利用方策の一つとしてコンクリート用骨材としての利用が挙げられる。現在、コンクリート用細骨材として JIS 規格化されているスラグ細骨材は銅スラグ骨材、高炉スラグ骨材、フェロニッケルスラグ骨材、電気炉酸化スラグ骨材、一般廃棄物、下水汚泥又はそれらの焼却灰を溶融固化したコンクリート用スラグ骨材（溶融スラグ骨材）の5種類となっている。しかしながら、これらの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、などが主体となっており、今後有効利用率を増加するためにコンクリート用骨材としての用途拡大が望まれている。

1.2 スラグのコンクリート用細骨材としての有効利用に関する現状

ここでは、それぞれのスラグのコンクリート用細骨材としての有効利用に関する現状について概説する。

(1) 高炉スラグ

高炉スラグは、高炉で銑鉄と同時に生成する溶融スラグを冷却したものであり、細骨材としては急冷スラグが一般的に使用されている。図-1.1に高炉スラグの販売数量の推移を示す¹⁾。2007年度の銑鉄生産量は8787万トンであり、そのうち高炉スラグが2548万トン発生している。高炉スラグの販売量は2007年度において2469万トンとなっており、約97%が有効利用されている。用途としては主にセメント原料であり、また道路、コンクリート用骨材にも使用されている。また、高炉スラグ細骨材としては年間約301万トンが使用され、粗骨材として用いられる高炉徐冷スラグは約25万トンが使用されている。

施工指針²⁾では高炉スラグ混合率（細骨材全量に対するスラグ細骨材の割合）が20～60%の範囲で使用することを推奨している。

(2) 電気炉酸化スラグ

電気炉スラグは、鉄スクラップ等を溶解して製鋼する際に発生するもので、酸化精錬過程において発生するものを酸化スラグという。2009年度における電気炉スラグ生成量は約233万トンである。電気炉スラグの使用内訳のうち多くは道路用、土木用となっており、コンクリート用骨材としての利用は約0.8%と少ない³⁾。

施工指針⁴⁾では電気炉酸化スラグを混合率50%未満で使用することを推奨している。

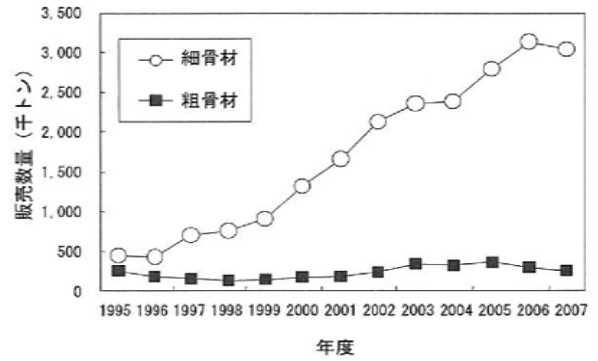


図-1.1 高炉スラグの販売数量の推移¹⁾

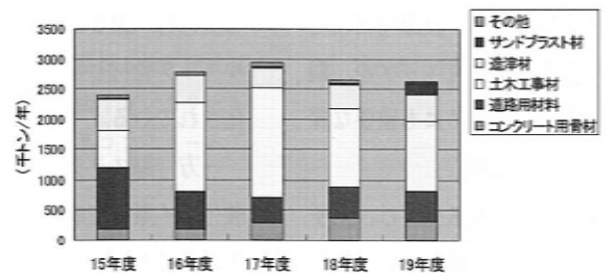


図-1.2 フェロニッケルスラグの販売実績の推移⁵⁾

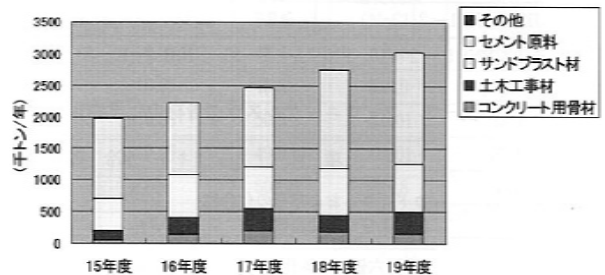


図-1.3 銅スラグの販売実績の推移⁵⁾

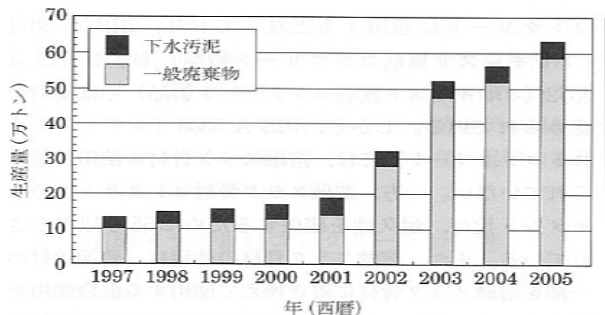


図-1.4 溶融スラグの生産量の推移⁸⁾

(3) フェロニッケルスラグ

フェロニッケルスラグはロータリーキルンや電気炉でフェロニッケルを製造する際に副生する溶融スラグを冷却し、粉碎・粒度調整を行ったものである。図-1.2にフェロニッケルスラグの販売実績の推移を示す⁵⁾。フェロニ

ッケルスラグの年間発生量は200～300万トンで推移している。近年ではコンクリート用細骨材としての用途が拡大しつつあり、2007年度では全体の約10%に達している。

施工指針⁶⁾ではフェロニッケルスラグ細骨材を混合率50%未満で使用することを推奨している。

(4) 銅スラグ

銅スラグは、炉で銅を精錬する際に鉄分が酸化されて副生される熔融スラグを水砕して製造されるものである。図-1.3に銅スラグの販売実績の推移を示す⁵⁾。銅スラグの年間発生量は約300万トンに達しており、主な用途はセメント用鉄原料とサンドブラスト用である。コンクリート用細骨材としての販売量は2007年度で約15万トンであり、全体の販売量の約5%にとどまっている。

施工指針⁷⁾では銅スラグ細骨材を混合率30%以下で使用することを推奨している。

(5) 熔融スラグ

熔融スラグとは、都市ごみ等の一般廃棄物および下水汚泥を原料とし、熔融固化施設において1200℃以上の高温で熔融され冷却固化されたものである。図-1.4に熔融スラグの生産量の推移を示す⁸⁾。2005年度の生産実績は約63万トンであり、そのうち一般廃棄物に由来するものが約59万トンとなっている。有効利用用途としては2006年度において道路用骨材(27.8%)、コンクリート用骨材(24.0%)を主として地盤・土質改良材となっている⁹⁾。

(6) スラグの有効利用に関する課題

上述した通りスラグのコンクリート用細骨材としての有効利用は行われているが未だ十分ではなく、今後の有効利用拡大が必要と思われる。また施工指針ではスラグ細骨材の混合率30～60%が推奨されているが、今後の公共事業減少や環境負荷低減を考慮すると、今後スラグ細骨材をコンクリートに大量混合する必要があると思われる。

1.3 スラグ細骨材を用いたコンクリートに関する既往の研究の整理

これまで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。土木学会より、熔融スラグを除いて、各種スラグ細骨材を用いたコンクリートの施工指針^{2),4),6),7)}(以下、施工指針)が示され、混合率がある一定量(30～50%)以下の範囲であれば、普通細骨材と同様に扱うことができるとされている。

一方、近年ではスラグ細骨材のコンクリートに80～100%混合する大量混合方策が注目されており、関連の研究がなされてきている。錦織ら¹⁰⁾は銅スラグ細骨材のうち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

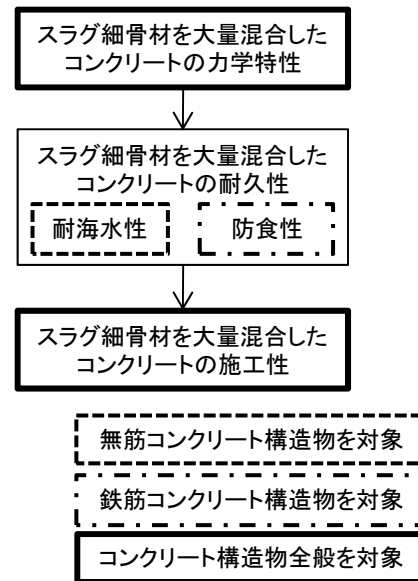


図-1.5 本研究の検討フロー

コンクリートと同等の性能を得られ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¹¹⁾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¹²⁾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。

1.4 既往の研究の課題と本研究の目的および位置づけ

既往の研究の多くでは、スラグ細骨材を用いたコンクリートの品質が普通コンクリートと同等となるよう品質改善を行うといった方策が取られてきた。例えば、スラグ細骨材はガラス質であることや高密度であることから、スラグ細骨材を使用することでコンクリートのブリーディングが増加する。ブリーディングとは、フレッシュコンクリートにおいて、固体材料の沈降または分離によって練混ぜ水の一部が遊離して上昇する現象である。ブリーディングが増加すると、コンクリート上部が多孔質となり、強度や耐久性が損なわれるとされている。しかしながら、ブリーディングがコンクリートの各種性能に及ぼす影響については十分に明らかにされていない。このため、ブリーディングを普通コンクリートと同等量まで低減するためにスラグ細骨材の混合率を変化させる、も

表-2.1 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)
スラグ細骨材	CUS1	銅スラグ細骨材 CUS5-0.3 (表乾密度 3.45g/cm ³ , 粗粒率 3.30)
	CUS2	銅スラグ細骨材 CUS5-0.3 (表乾密度 3.51g/cm ³ , 粗粒率 3.30)
	BFS	高炉スラグ細骨材 BFS5-0.3 (表乾密度 2.72g/cm ³ , 粗粒率 3.29)
	EFS	電気炉酸化スラグ細骨材 EFS5-0.3 (表乾密度 3.80g/cm ³ , 粗粒率 3.68)
	FNS	フェロニッケルスラグ細骨材 FNS5-0.3 (表乾密度 2.90g/cm ³)
細骨材	S	砕砂と山砂の混合砂 (表乾密度 2.58g/cm ³ , 粗粒率 2.50)
粗骨材	G	砕石 2005 (表乾密度 2.65g/cm ³)

しくは混和材等を用いることで粉体量を増加させるなどの方策が経験的に取られてきたのが現状である。これが結果的にコンクリートの製造段階におけるコストや手間の増大につながり、必ずしも効果的な方策とはなっていなかった。スラグの有効利用拡大のためには、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適切な構造物に適用することが必要と考えられる。

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に着目すると、スラグ骨材を大量混合したコンクリートは高密度となり、ハドソン式から求められる所要容積の低減が可能となる。土木学会による試算によるとコンクリートの単位容積質量が 2.6t/m³ の場合、普通コンクリートの単位容積質量である 2.3t/m³ と比較して所要容積を約半分まで低減することができるとされている⁷⁾。また、このような構造物は高い強度を要しないため、品質改善を行わなくとも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。しかしながら、スラグ骨材を大量混合したコンクリートの力学特性等に及ぼすブリーディングの影響については十分に明らかにされておらず、検討の必要がある。

一方、鉄筋コンクリート構造物では、ブリーディングの増加による鉄筋界面の空隙形成に伴い、鉄筋の鋼材腐食発生限界塩化物イオン濃度の低下や腐食速度の増加¹³⁾、鉄筋-コンクリート間の付着力の低下¹⁴⁾が懸念される。これらは部材および構造物の力学性能の変化や耐久性の低下につながると考えられるが十分な検討が行われておらず、その検討が不可欠である。

本研究は、スラグ細骨材を大量混合したコンクリートの港湾コンクリート構造物、特に消波ブロックや根固めブロックなどの無筋コンクリート構造物への積極的な適用を目的として、品質改善を行わずにスラグ細骨材を大量混合したコンクリートの力学特性、耐久性、施工性について実験的に検討したものである(図-1.5)。また、スラグ骨材を大量混合したコンクリートのブリーディング

量と各種性能の関係について検討を行った。これらの結果を基に、スラグ細骨材を大量混合したコンクリートの港湾のコンクリート構造物への適用性について考察した。

2. スラグ細骨材を大量混合したコンクリートの力学特性

本章では、各種スラグ細骨材を大量混合したコンクリートの力学特性について実験的に明らかにし、無筋コンクリート構造物および鉄筋コンクリート構造物への適用性について検討を行った。

具体的には、無筋コンクリート構造物では、主に圧縮強度や静弾性係数、単位容積質量について検討した。また、鉄筋コンクリート構造物では圧縮強度とともに、ブリーディングによるコンクリート-鉄筋界面における空隙生成によって付着力が低下することが懸念されるため、付着強度について検討した。

2.1 実験概要

(1) 使用材料

表-2.1に使用材料を示す。スラグ細骨材にはコンクリート用細骨材としてJIS化されている5種類のうち、関連学会より施工指針が示されている銅スラグ細骨材(CUS1, CUS2)、高炉スラグ細骨材(BFS)、電気炉酸化スラグ細骨材(EFS)、フェロニッケルスラグ細骨材(FNS)の4種類を用いた。セメントには高炉セメントB種を使用した。また、天然細骨材として砕砂と山砂の混合砂を使用した。粗骨材には砕石2005を使用した。化学混和剤には、AE減水剤(Ad1)、AE剤(Ad2)、消泡剤(Ad3)、高性能AE減水剤(Ad4)を使用した。

(2) 配合

表-2.2にコンクリートの示方配合を示す。表中の配合ケースは(スラグ細骨材の種類-水セメント比-細骨材に対

表-2.2 示方配合およびフレッシュ性状

	W/C (%)	スラグ 混合率 (%)	単位量 (kg/m ³)									スラ ンプ (cm)	空 気量 (%)	ブリーディ ング量 (cm ³ /cm ²)		
			W	C	S	Slag	G	Ad1	Ad2	Ad3	Ad4					
N65	65	0	168	258	1090	0	1042	0.32	0.01	0	0	9.0	4.8	0.11		
N55	55		168	258	1090	0	1042	0.32	0.01			9.0	4.2	0.10		
CUS1-65-100	65	100	180	277	0	1132	961	0.69	0.01	0.03	0	5.0	4.6	0.49		
CUS1-65L-100						0.00	0.01	0.02	4.16	9.0	4.2	1.07				
CUS2-65-100						1152	942	0.69	0.01	0.03	0	8.0	4.3	0.36		
CUS1-55-100	55			327		1080	956	1.02	0.01	0.03	0	6.0	4.3	0.45		
CUS1-55-100L				0.00		0.01	0.04	4.91	10.0	3.8	1.19					
CUS2-55-100				1125		920	0.82	0.01	0.03	0	3.5	3.5	0.43			
CUS2-45-100	45			400		1084	887	1.00	0.01	0.02	0	13.0	4.5	0.59		
BFS65-100	65			80		277	0	893	942	0.69	0.01	0.03	0	2.0	4.5	0.43
BFS65-80							177	707				0.03	0	5.0	4.6	0.66
EFS65-100							0	1248				0.04	0	15.5	3.0	0.20
EFS65-80		228	912		0.03		0	13.0				3.0	0.45			
FNS65-100		0	952		0.03		0	3.0				4.5	0.43			
FNS65-80		186	743		0.01		0	5.5				4.5	0.66			

するスラグの体積割合（スラグ混合率）を示す。比較として、普通細骨材を用いたコンクリート（N-65, N-55）を作製した。基本の水セメント比（W/C）は65%, 55%とした。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/m³で一定とした。これは、「港湾の施設上の技術上の基準・同解説」¹⁵⁾（以下、港湾技術基準）において無筋コンクリート、鉄筋コンクリートの最大W/Cがそれぞれ65%, 55%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/m³よりも危険側で検討するためである。また、W/Cと強度の関係について検討するため、CUSを用いたコンクリートについては、W/Cを45%とした配合も検討した。さらに、強制的にブリーディング量を変化させるため、高性能AE減水剤を用いてブリーディング量を増加させた配合（CUS1-65L-100, CUS1-55L-100）についても検討を行った。

(3) 練混ぜ、試験体作製、養生

コンクリートの練混ぜは、100リットルの二軸強制練りミキサにて、粗骨材、セメント、細骨材を投入し、15秒空練りし、水を投入後に120秒間練混ぜを行い、排出した。

練混ぜ終了後、φ100×200mmの円柱供試体、200×500×1000mmの大型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500mm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。打設後は材齢28日まで封緘養生とし、一部のものについては湿布

養生とした。大型角柱試験体については材齢28日まで封緘養生した後、コアを採取した。コア採取箇所については、打設高さに応じて設定した。すなわち、打設面から0~300mm(H)、300~600mm(M)、600~900(L)として、それぞれの高さからφ100×200mmのコアを採取した。材齢28日以降は独立行政法人港湾空港技術研究所が所有する海水シャワー暴露場にて所定の材齢まで暴露した。

(4) フレッシュ性状

試験はJIS A 1123「コンクリートのブリーディング試験方法」に従って行った。試験は内径240mm、内高280mmの金属製円筒容器に練り終えたコンクリートを3層に分けて試料を詰め、各層につき25回ずつ突き固めた後、容器の外側を木槌で叩いて突き穴をなくし、コンクリートの上面が容器のふちから約30mm低くなるようにならした。これを振動のない台の上に置き、水分が蒸発しないようにふたをした。測定間隔としては、最初の60分は10分ごとに、コンクリートの表面にしみ出た水を吸い取った。それ以降は、ブリーディングが認められなくなるまで、30分ごとに水を吸い取った。吸い取った水はメスシリンダーに移し、そのときまでにたまった水の累計を1mlまで記録した。なお、ブリーディング量は以下の式(1)によって算出した。

$$B_g = \frac{V}{A} \quad (1)$$

ここに、 B_q : ブリーディング量 (cm^3/cm^2)

V : 最終時まで累計したブリーディングによる水の容積 (cm^3)

A : コンクリートの上面の面積 (cm^2)

算定式から分かる通り、本試験で求められるブリーディング量はコンクリートの高さ方向における影響を考慮していない。このため、本試験で求めたブリーディング量と実際の構造物などで発生するブリーディング量は異なる。しかしながら、寸法・形状がブリーディング量に及ぼす影響については明らかになっていないため、本研究では JIS に準拠して行った試験で求めたブリーディング量を用いて整理した。

(5) 圧縮強度および静弾性係数試験

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。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。また、試験体の直径、高さ、質量を測定し、コンクリートの単位容積質量を求めた。試験は 1 配合につき 3 体行った。

(6) 付着強度試験

CUS1-55-100, CUS1-55L-100, N-55 の 3 配合について、JSCE-G 503「引抜き試験による鉄筋とコンクリートとの付着強度試験方法(案)」に準拠して試験体を作製し、材齢 28 日において引抜き試験を行った。試験は 1 配合につき 3 体行った。

2.2 実験結果および考察

(1) フレッシュ性状

表-2.2 に各配合のスランブ、空気量、ブリーディング量をそれぞれ示す。スラグ細骨材を使用することでブリーディング量が増加していることが分かる。これは、スラグ細骨材の密度が大きいこと、またスラグ細骨材自身がガラス質であるために表面性状が滑らかであることに起因していると思われる。本実験で得られたブリーディング量は約 $0.3 \sim 0.7 \text{cm}^3/\text{cm}^2$ であり、施工指針等に記載されている値^{2),4),6),7)}とほぼ同等の値を示した。なお、CUS1-65L-100, CUS1-55L-100については強制的にブリーディング量を増加させたため、約 $1.0 \text{cm}^3/\text{cm}^2$ と大きな値を示した。混合率の違いに着目すると、混合率 100% よりも混合率 80% のブリーディング量の方が大きい結果となった。これは、天然砂との混合により実積率が増加したためと思われる。

(2) 圧縮強度および静弾性係数

a) ブリーディング量の影響

図-2.1 に材齢 28 日、1 年のコンクリートのブリーディング量と圧縮強度の関係を示す。図より、スラグ細骨

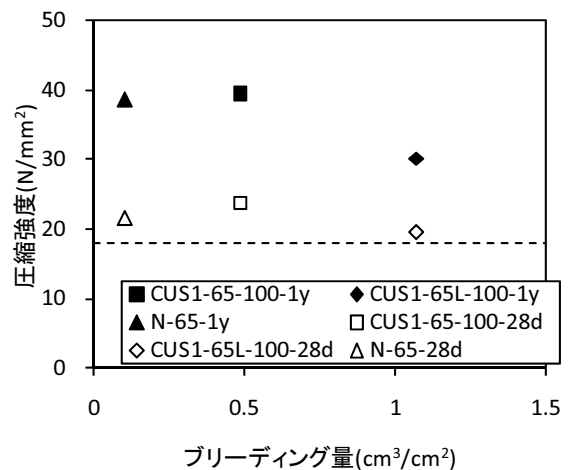


図-2.1 ブリーディング量と圧縮強度の関係
(破線：無筋コンクリートに求められる強度)

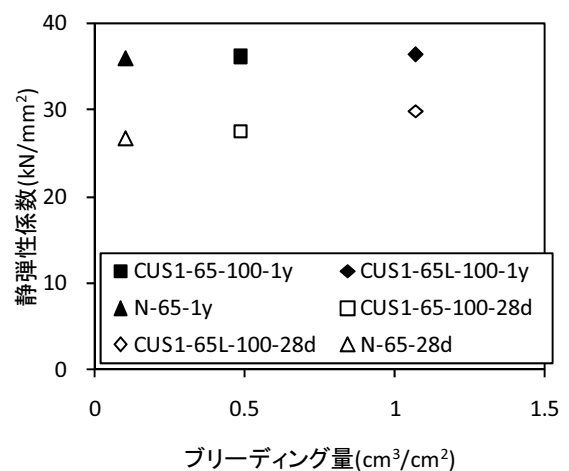


図-2.2 ブリーディング量と静弾性係数の関係

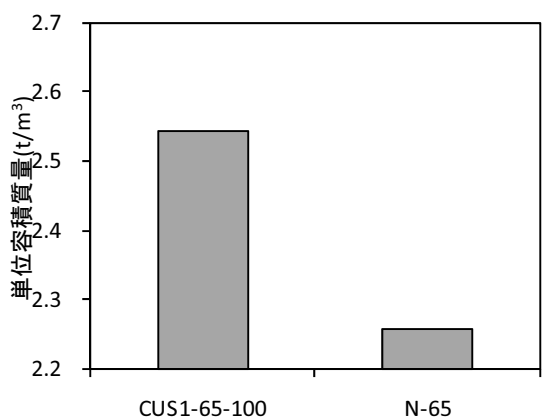


図-2.3 単位容積質量の関係 (材齢 28 日)

材を大量混合したコンクリートの圧縮強度は無筋コンクリートの消波ブロックや根固めブロックに要求される強度 $18 \text{N}/\text{mm}^2$ を満足していることが分かる。ただし、

ブリーディング量 $1.0\text{cm}^3/\text{cm}^2$ 付近では圧縮強度が他と比較して小さくなる傾向が認められた。

図-2.2 にブリーディング量と静弾性係数の関係を示す。いずれの配合もブリーディング量の増加に関わらずほぼ同等の静弾性係数を示した。図-2.3 に CUS1-65-100 と N-65 の単位容積質量を示す。高密度なスラグ細骨材を使用することで単位容積質量の増加が認められる。すなわち高密度のスラグ細骨材を大量混合することで単位容積質量が 1 割程度増加し、消波ブロック等の設計上有利になる。

b) ブリーディングが圧縮強度に及ぼす影響の考察

ブリーディングの増加によるコンクリートの強度への影響として、コンクリート内部における水みちの形成による強度低下とセメントペーストの W/C 低下による強度増加の 2 点が考えられる。そこで、まずセメントペーストの W/C 低下による強度増加の影響について検討するため、ブリーディング量を基に試験体から逸散した水量を差し引き、実質の水セメント比 (W/C) を求めた。

図-2.4 に実質の C/W と圧縮強度の関係を示す。図より、ブリーディング量 $0.5\text{cm}^3/\text{cm}^2$ 程度の CUS1-65-100, CUS1-55-100 は普通コンクリートである N-65, N-55 と同様の傾向を示したが、CUS1-65L-100, CUS1-55L-100 については、同一 C/W であっても他のデータよりも圧縮強度の低い箇所にプロットされた。これはブリーディングの増加によってコンクリート内部に水みちの形成や内部の粗大な空隙の増加が顕著に生じたことによるものと推察された。よって、スラグ骨材を大量混合したコンクリートの強度はブリーディング量 $0.5\text{cm}^3/\text{cm}^2$ 程度までは普通コンクリートと同様の傾向を示すが、過剰なブリーディングを生じた場合には普通コンクリートと異なる力学特性を示すことが分かった。ただし、本研

究では強制的にブリーディングを大きくしたが、施工指針^{2),4),6),7)}に示されているスラグ細骨材を大量混合したコンクリートのブリーディング量が約 $0.5\text{cm}^3/\text{cm}^2$ 程度

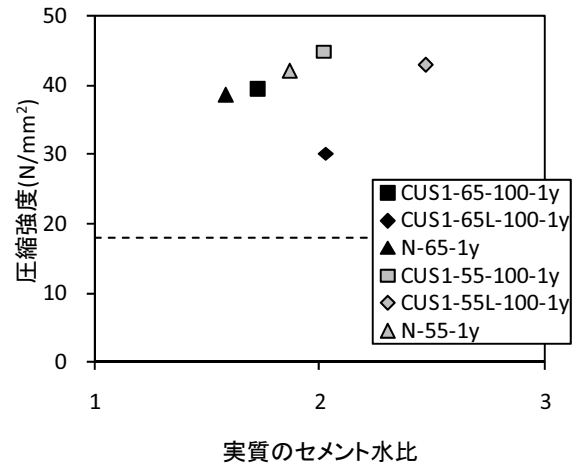


図-2.4 実質のセメント水比と圧縮強度の関係

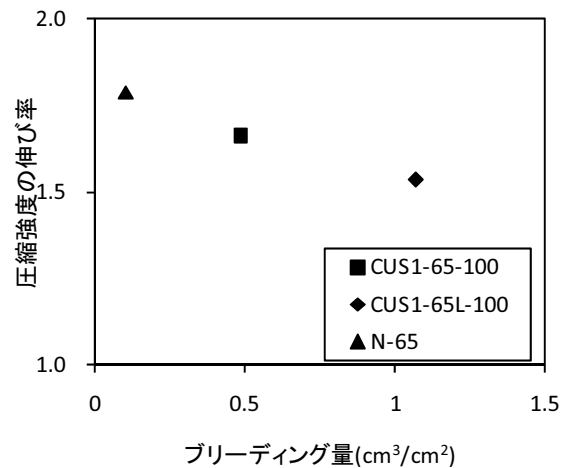


図-2.5 ブリーディング量と圧縮強度の伸び率の関係

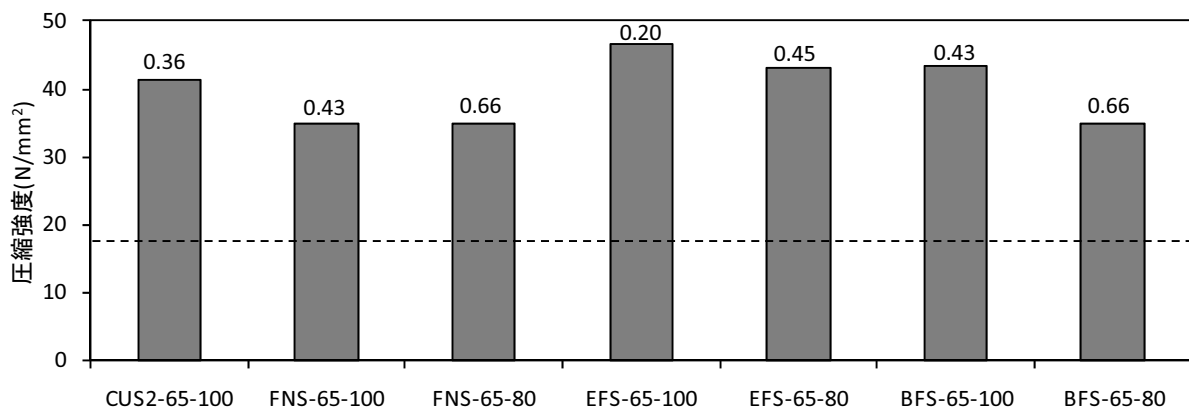


図-2.6 各種スラグ細骨材を大量混合したコンクリートの材齢 28 日における圧縮強度 (湿布養生, 図中の数字はブリーディング量を示す.)

であったことを考慮すると、一般的なスラグ細骨材を大量混合したコンクリートにおけるブリーディングが圧縮強度に与える影響は顕著ではないものと考えられた。また、図-2.5 にブリーディング量と圧縮強度の伸び率（材齢 28 日に対する材齢 1 年の圧縮強度の伸び率）の関係を示す。図より、ブリーディング量の増加に伴って圧縮強度の伸び率が低下していることが分かる。ブリーディングによって生じたコンクリート内部の空隙等はセメント水和物で十分には充填されないため、長期強度発現性が小さくなると思われる。ただし、いずれの配合も材齢 1 年の圧縮強度は 30N/mm^2 以上と無筋コンクリートに要求される強度を満足していることがわかる。

c) スラグ細骨材の種類の影響

コンクリートの力学特性に及ぼすスラグ細骨材の種類の影響について検討した。図-2.6 に種類の異なるスラグ細骨材を用いたコンクリートの材齢 28 日における圧縮強度を示す。なお、図中の数字はブリーディング量を示す。いずれの配合も無筋コンクリートの消波ブロックや根固めブロックに要求される強度を満足していることが分かる。ただし、ブリーディング量と圧縮強度に相関は認められなかった。

図-2.7 に CUS2 を用いたコンクリートについて、セメント水比と圧縮強度の関係を示す。CUS2 を用いたコンクリートについては湿布養生を行っている。なお、比較として封緘養生を行った普通コンクリートのデータも合わせて示す。セメント水比と圧縮強度には正の相関が認められ、その傾きは普通コンクリートとほぼ同等であった。本実験では養生条件が異なるために圧縮強度の絶対値に差があるものの、セメント水比と強度の関係における傾きはほぼ同じであった。

d) 打設高さ方向の強度分布

スラグ細骨材を用いたコンクリートでは、ブリーディングや骨材の沈下に伴って、打設高さ方向においてコンクリートの特性が変化することが知られている。しかしながら、スラグ細骨材を大量混合したコンクリートにおける打設高さ方向における傾向や骨材種類の影響などについては検討されていないため、これらを明らかにする必要がある。

図-2.8 に CUS1 を用いてブリーディング量を変化させたコンクリートの大型角柱試験体における打設底面からの高さ（mm）と圧縮強度（ N/mm^2 ）の関係を示す。普通コンクリートでは、打設底面からの距離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。一方、CUS1-65-100 では打設高さに関わらずほぼ同等の圧縮強度を示した。これは、骨材粒子同士の噛み合いによりスラグ細骨材の

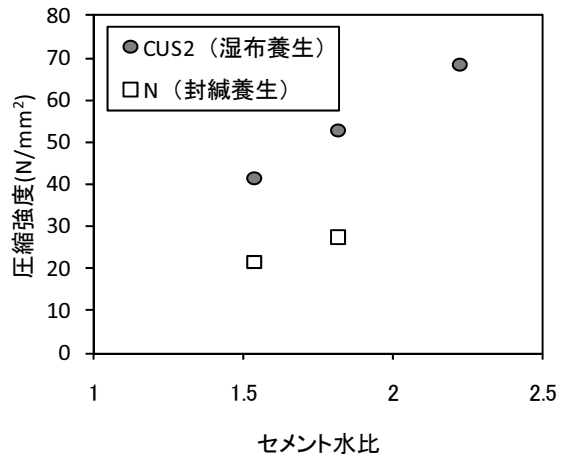


図-2.7 セメント水比と圧縮強度の関係

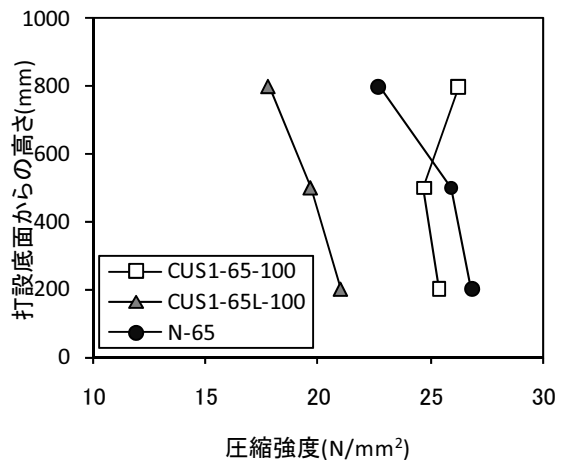


図-2.8 打設高さ方向における圧縮強度分布
(同一配合でブリーディング量を変化)

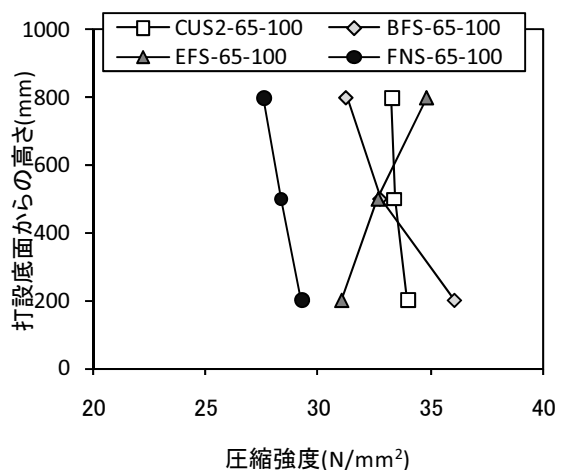


図-2.9 打設高さ方向における圧縮強度分布
(各種スラグ細骨材を混合)

沈下が生じにくくなったためと考えられる。ブリーディングを強制的に増加させた CUS1-65L-100 では、打設底面からの距離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。これは、強制的にブリーディングを生じさせたためペースト分も分離し、硬化後に粗大な空隙が多くコンクリート内に残存したためと考えられる。実際に、脱型後のコンクリート表面には多くの水みちが認められた。

図-2.9 に各種スラグ細骨材を用いたコンクリートにおける打設底面からの高さや圧縮強度、静弾性係数および単位容積質量の関係を示す。それぞれのスラグ細骨材において各種特性の傾向が異なった。しかしながら、密度の小さなスラグ骨材である BFS, FNS が普通コンクリートと同様の傾向を示すのに対して、密度の大きなスラグ骨材である CUS2, EFS は打設高さによらず圧縮強度がほぼ一定もしくは増加傾向となった。そこで、打設底面からの高さや圧縮強度の関係を直線近似し、その傾きを材料分離指数と定義し、その傾向について考察した。

図-2.10 にスラグ細骨材の密度と材料分離指数の関係を示す。材料分離指数が負の値の場合、圧縮強度は打設底面からの高さの増加とともに低下することを示し、その絶対値が大きいほど材料分離傾向が大きいことを示している。また、N-65, CUS1-65-100 のデータについてもあわせて示す。図より、スラグ細骨材の密度と材料分離指数には良好な相関が認められる。すなわち、スラグ細骨材の表乾密度 3.2 g/cm^3 程度を境界として、材料分離傾向が異なることが分かった。N の材料分離指数が -0.0069 であるのに対して、本実験で使用したスラグ細骨材の材料分離指数は $-0.008 \sim 0.0063$ であり、スラグ細骨材を大量混合したコンクリートの材料分離指数の絶対値は普通コンクリートと同等以下であった。このことから、スラグ細骨材を大量混合したコンクリートであってもコンクリートの打設高さ方向における強度分布は普通コンクリートと大きな差が無いものと考えられた。

(3) 付着強度

図-2.11 に最大荷重時の付着応力とブリーディング量の関係を示す。図より、いずれの要因もほぼ同程度の値を示しており、今回の検討の範囲内ではブリーディング量が付着挙動に及ぼす影響は小さいと推察された。ただし、松家らはブリーディング量 $0.8 \text{ cm}^3/\text{cm}^2$ 程度までのコンクリートで作製した RC はりの載荷試験結果から平均付着応力を求め、ブリーディングの増加により平均付着応力が低下することを示している⁹⁾。本実験では、鉄筋下面に大きな空隙は認められなかったため付着応力の低下は認められなかったものと考えられる。鉄筋下面の空

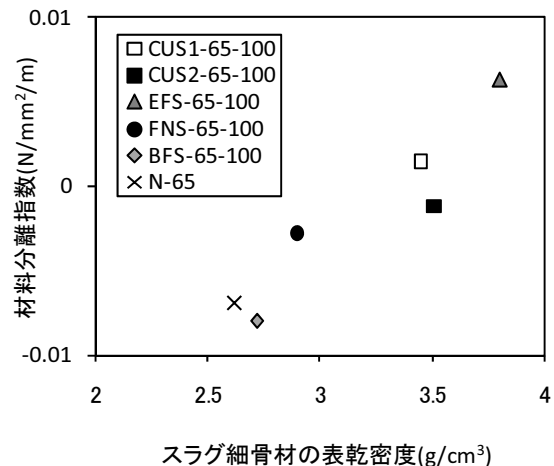


図-2.10 スラグ細骨材の表乾密度と材料分離指数の関係

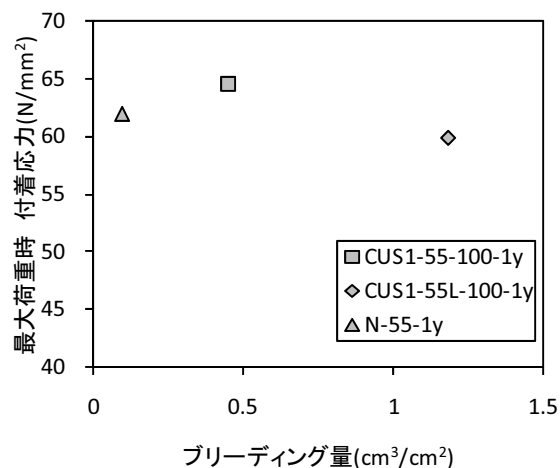


図-2.11 ブリーディング量と付着応力(最大荷重時)の関係

隙の形成機構は明らかになっていないため、今後の検討が必要である。

3. スラグ細骨材を大量混合したコンクリートの耐久性

本章では、スラグ細骨材を大量混合したコンクリートの耐久性について検討した。まず、海水には Mg^{2+} や SO_4^{2-} が含まれ、これらがコンクリート表層の劣化に影響することが指摘されている¹⁶⁾。久里浜湾において測定された海水中の Mg^{2+} 濃度、 SO_4^{2-} 濃度はそれぞれ 1200 ppm 、 2400 ppm 程度であり¹⁶⁾、また表層の劣化速度は非常に緩慢である。よって、スラグ細骨材を大量混合したコンクリートを 1.8% の MgSO_4 水溶液へ浸漬し、海水による表層劣化を促進させることで耐海水性について検討を行った。次に、

スラグ細骨材を大量混合したコンクリートを鉄筋コンクリート構造物へ適用することを想定した場合、鉄筋の腐食発生が懸念される。そこで、暴露試験よりコンクリートの塩化物イオンの見かけの拡散係数を求め、また、作製した鉄筋コンクリート試験体を海洋環境に暴露し、自然電位の経時変化から、スラグ細骨材を大量混合したコンクリートの防食性能について検討した。

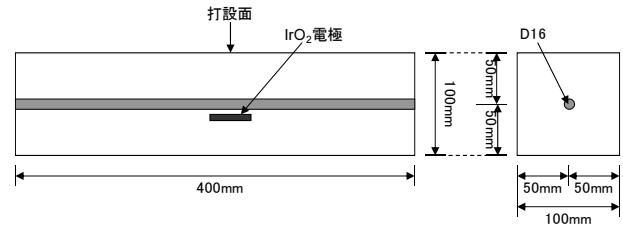


図-3.1 腐食用試験体の諸元

3.1 実験概要

(1) 耐海水性

表-2.2に示す配合のうちCUS1-65-100, CUS1-65L-100, N-65について材齢28日より1.8%のMgSO₄水溶液に浸漬した。所定の材齢において質量を測定し、コンクリートの質量変化を求めた。

(2) 防食性

CUS1-55-100, CUS1-55L-100, N-55について材齢28日より暴露試験を行った。腐食用試験体には、非破壊で鉄筋の腐食の有無を判定する自然電位のモニタリングのため、鉄筋付近に酸化イリジウム電極を設置した。図-3.1に腐食用試験体の試験体寸法を示す。打設側面100×400mm断面1面以外についてエポキシ樹脂によりコーティングを行った。また、塩化物イオンの見かけの拡散係数を算出するための円柱供試体についても打設側面をエポキシ樹脂によりコーティングした。

3.2 実験結果および考察

(1) 耐海水性

図-3.2に1.8%のMgSO₄水溶液に浸漬したコンクリートの質量変化率の経時変化を示す。いずれの配合においても、コンクリートの明確な質量変化は認められなかった。また、コンクリート表面の観察結果からも劣化傾向は認められなかった。本研究では高炉セメントB種を用いているため、劣化の進行が遅いものと考えられた。暴露約500日の結果、スラグ細骨材を大量混合したコンクリートの耐海水性には問題ないものと考えられた。

(2) 防食性

a) 塩化物イオンの見かけの拡散係数

図-3.3に材齢1年におけるコンクリート中の塩化物イオン濃度の分布を示す。図より、コンクリート表面で最も塩化物イオン濃度が高く、表面からの距離が大きくなるにしたがって塩化物イオン濃度は小さくなった。かぶり42mmの鉄筋付近の塩化物イオン濃度は最大でも0.3kg/m³であった。図-3.4に塩化物イオン濃度分布から求めた塩化物イオンの見かけの拡散係数(D_{ap})とブリーディング量との関係を示す。ブリーディング量に関わらず、

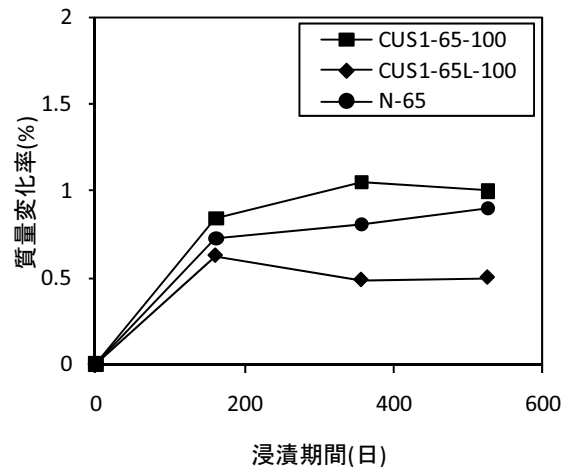


図-3.2 質量変化率の経時変化 (1.8% MgSO₄水溶液)

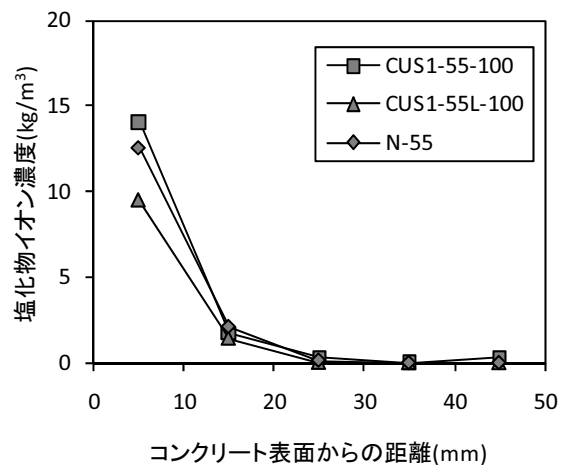


図-3.3 塩化物イオン濃度分布 (材齢1年)

D_{ap}はほぼ同等の値を示した。また、これらの値は現行の港湾技術基準よりも小さく、約0.6倍程度の値を示した。このことから、ブリーディングが塩化物イオンの浸透に及ぼす影響は小さいものと考えられる。

b) 自然電位の経時変化

図-3.5に自然電位の経時変化を示す。自然電位はいずれの配合も約+100~-100mVとなっている。表-3.1に示すASTM C 876の腐食判定によると、現時点ではいずれの配合も「90%以上腐食なし」と判定された。上述したように、

塩化物イオンは鉄筋付近までは到達していないことから、不動態が十分に機能し、腐食発生を抑制しているものと考えられる。

既往の研究によると、ブリーディングの増加によって鉄筋界面に空隙が発生し、これが腐食を促進するという指摘がある⁹⁾。しかしながら、本研究の実験結果において現時点では腐食による自然電位の変化は認められていない。この理由として、セメントに高炉セメントB種を使用したために腐食要因の侵入を抑制していること、また付着強度の実験と同様に鉄筋下面の空隙が形成されていなかったことが考えられる。今後も継続的にデータを取得する予定である。

4. スラグ細骨材を大量混合したコンクリートの施工性

前章までにおいて、スラグ細骨材を大量混合したコンクリートの力学特性および耐久性はブリーディング量が約 $0.5\text{cm}^3/\text{cm}^2$ 程度であれば普通コンクリートと同等であることが示された。しかしながら、スラグ細骨材を大量混合したコンクリートはブリーディング量の増加や高密度骨材の沈降といった材料分離によって施工性が低下することが懸念される。そこで本章では、スラグ細骨材を大量混合したコンクリートの施工性のうち特に打設方法に着目した。一般に、消波ブロック等の打設はホッパ等を用いた直接打設が主流である。しかしながら、一部では製作ヤードからのポンプ圧送が必要な場合もあると思われる。そこで、まずケーススタディとして、銅スラグ細骨材を対象に、その混合率を変化させたコンクリートについてポンプ圧送試験を行い、ポンプ圧送が可能なスラグ混合率やブリーディング量を明らかにした。その上で、ポンプ圧送が困難なスラグ混合率の場合には、ホッパなどを用いた直接打設により施工可能であることを検証するため、直接打設による消波ブロックの実施工試験を行い、その施工性や消波ブロックの出来形について調べた。

4.1 実験概要

(1) 使用材料

使用材料には表-2.1に示すものを用いた。また、化学混和剤としてAE減水剤(Ad), AE剤(AE), 消泡剤(DAE)を用いた。

(2) 配合

表-4.1にコンクリートの示方配合を示す。目標スランブ $10.0\pm 2.5\text{cm}$, 目標空気量 $4.5\pm 1.5\%$ とした。銅スラグ

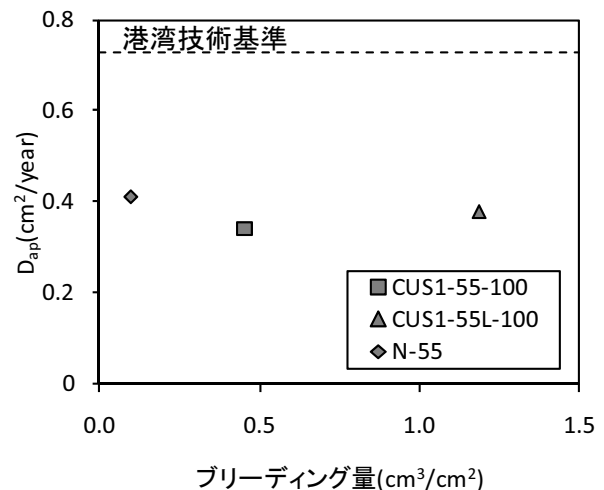


図-3.4 ブリーディング量と見かけの拡散係数の関係 (材齢1年)

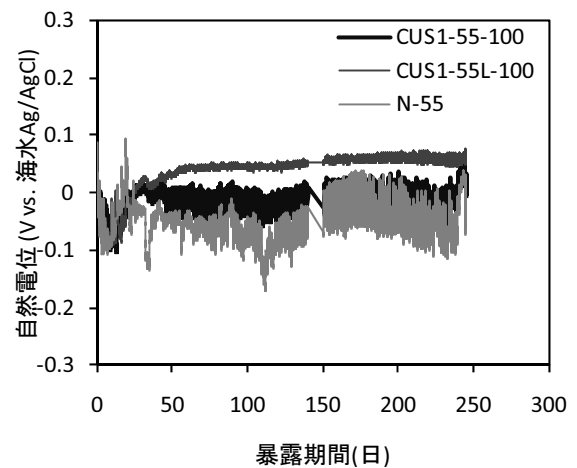


図-3.5 自然電位の経時変化

表-3.1 鉄筋の自然電位による腐食判定 (ASTM C 876)

鉄筋腐食の可能性	電位 E (mV vs. CSE)	電位 E (mV vs. Ag/AgCl)	電位 E (mV vs. 海水 Ag/AgCl)
90%以上腐食なし	$-200 < E$	$-81 < E$	$-135 < E$
不確定	$-350 < E \leq -200$	$-231 < E \leq -81$	$-285 < E \leq -135$
90%以上腐食あり	$E \leq -350$	$E \leq -231$	$E \leq -285$

表-4.1 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	CUS1 混入率 (%)	単位量 (kg/m ³)								圧縮強度 (N/mm ²)
				W	C	S	CUS1	G	Ad	AE (C×%)	DAE (C×%)	
65-0	65	45.0	0	168	258	828	0	1042	0.65	0.003	0	28.9
65-30		46.0	30	180	277	578	326	996	0.69	0.002	0.016	30.9
65-50		46.5	50	180	277	417	549	988	0.90	0.002	0.025	27.4
65-70		47.0	70	180	277	252	775	980	1.11	0.002	0.034	27.3
65-100		48.0	100	180	277	0	1132	961	1.39	0.002	0.05	26.5

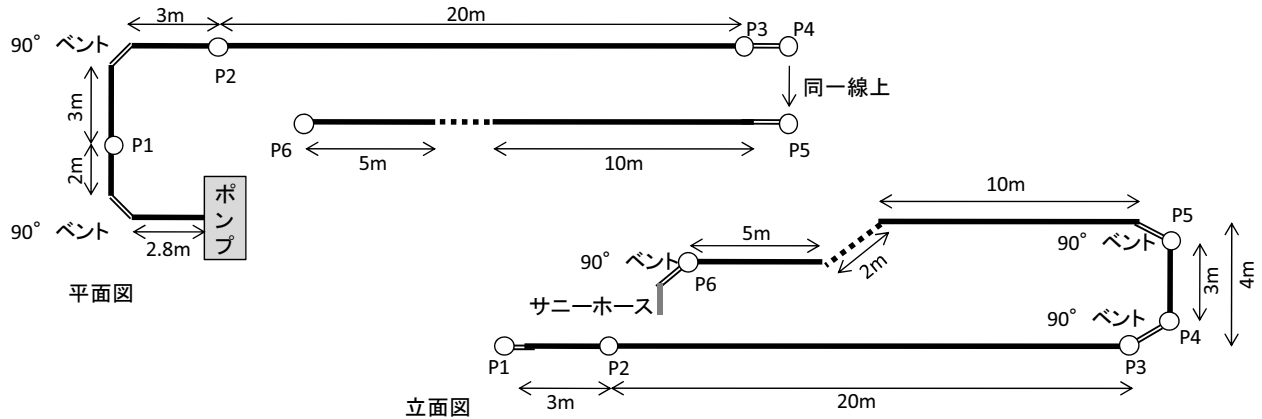


図-4.1 ポンプ圧送試験の配管条件

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/m³、水セメント比を 65%で一定とした。銅スラグ細骨材（CUS1）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（65-0）についても検討を行った。

(3) 練混ぜおよび試験体作製

コンクリートの練混ぜに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 2～4m³ 練り混ぜた。練混ぜ終了後、φ100×200mm の円柱供試体を作製し、脱型後は水中養生を行った。

(4) 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-4.1 に示す配管条件でポンプ圧送試験を行った。ポンプ車は最大吐出量 110m³/h、最大油圧 27.44MPa、コンクリートシリンダ容積 65.610 とした。なお、本研究では製作ヤード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。配管には 5B(125A)を用いた。

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¹⁷⁾に基づく水平換算距離で 10.8m(P1)、22.8m(P2)、42.8m(P3)、48.8m(P4)、60.8m(P5)、95.8m(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

表-4.2 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 ³)
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

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するとともに、φ100×200mm の円柱供試体を作製した。

(5) 直接打設による施工試験

ポンプ圧送が困難であった配合のコンクリートに対して、ホッパを用いた直接打設により 2t 型消波ブロックを作製する実施工試験を行った。

(6) 圧縮強度および静弾性係数試験

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。試験は 1 配合につき 3 体行った。

表-4.3 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	-	-	-	-	-	-

4.2 実験結果および考察

(1) フレッシュ性状

表-4.2 にポンプ圧送前の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。

(2) ポンプ圧送試験

a) ポンプ圧送性

表-4.3 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)において良好なポンプ圧送性を示したものの、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⁴⁾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。

b) 管内圧力損失

図-4.2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。

図-4.3 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^{3), 4)} (いずれも目標スランブ 12cm)の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銅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ポンプ施工が可能であると思われる。

スラグ細骨材の施工指針^{3), 4)}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、スラグ細骨材の密度の違いによるものと考えられる。

CUS2.5 の混合率 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

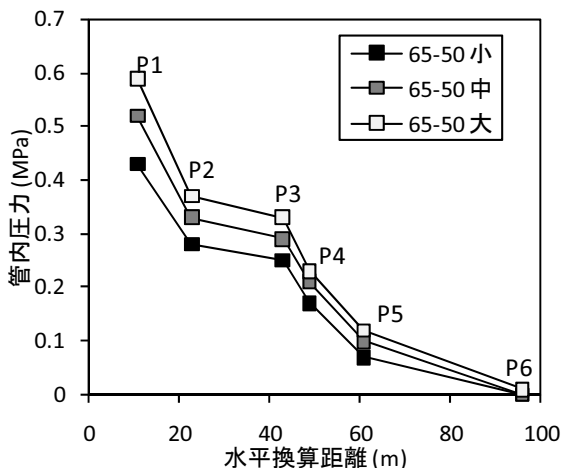


図-4.2 水平換算距離と管内圧力の関係

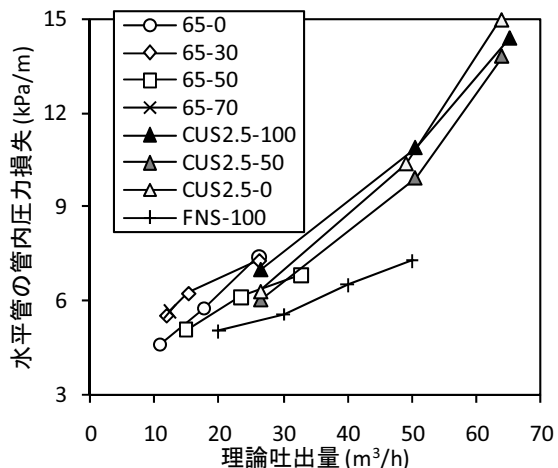


図-4.3 理論吐出量と管内圧力損失

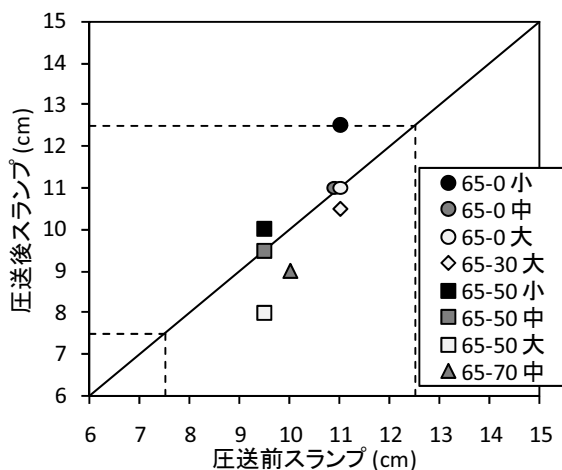


図-4.4 ポンプ圧送前後におけるスランプの変化

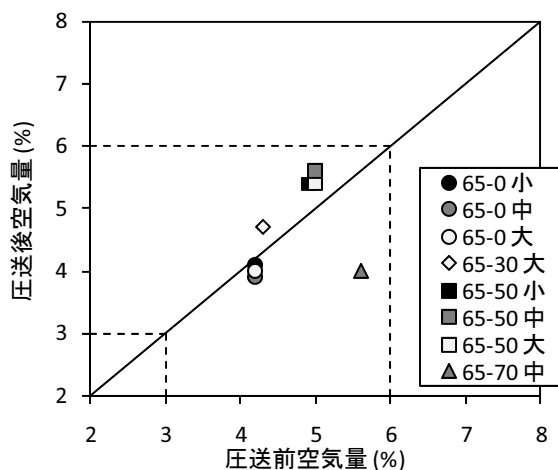


図-4.5 ポンプ圧送前後における空気量の変化

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、スラグ細骨材混合率が70%を超える場合には、ホッパもしくは直接打設を行うことでスラグ細骨材を大量混合したコンクリートの打設を行う必要がある。

(3) ポンプ圧送前後のコンクリートの品質変化

a) フレッシュ性状

図-4.4 および図-4.5 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、ポンプ圧送試験後における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-4.6 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、銅スラグ細骨材を混合したコンクリートでは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、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),2),3),4)}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、これまでの研究ではその関係は十分には明らかにされていない。本研究では、ブリーディング量が0.5cm³/cm²以下のコンクリートであればブリーディングがコンクリートの力学特性に及ぼす影響は小さいことが前章までに明らかになっていることから、本実験内においてコンクリートのブリーディングの変化がコンクリートの力学特性に及ぼす影響は小さいものと考えられた。

b) 力学特性

図-4.7 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

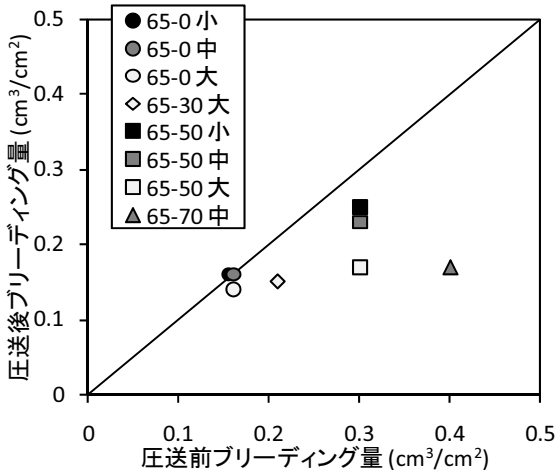


図-4.6 ポンプ圧送前後におけるブリーディング量の変化

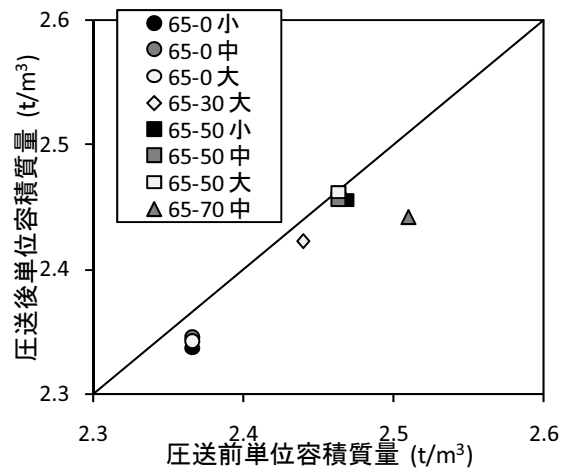


図-4.7 ポンプ圧送前後における単位容積質量の変化

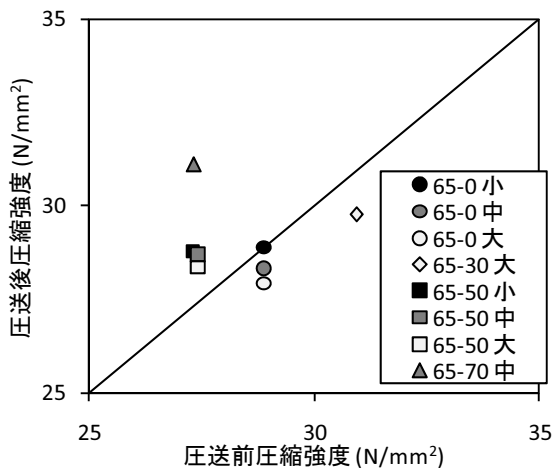


図-4.8 ポンプ圧送前後における圧縮強度の変化

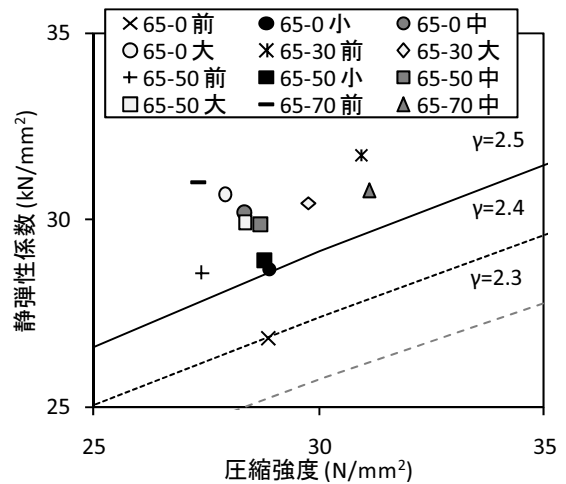


図-4.9 圧縮強度と静弾性係数の関係

くなった。このことから、65-70 で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ことが推測される。

図-4.8 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 25N/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 4N/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

表-4.4 直接打設時のコンクリートのフレッシュ性状

	スランプ (cm)	空気量 (%)	ブリーディング量 (cm^3/cm^2)
65-0	9.0	3.7	0.06
65-70	-	3.5	0.87
65-100	12.0	5	0.37

ものと推察される。

図-4.9 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¹⁸⁾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が、静弾性係数の変化は 4kN/mm^2 程度と小さかった。また、65-50 においてもポンプ圧送前後における静弾性係数の変化は 2kN/mm^2 程度と変化が小さかった。65-70 では、ポンプ



写真-4.1 アジテータ車による練混ぜ状況



写真-4.2 ホッパへの投入状況

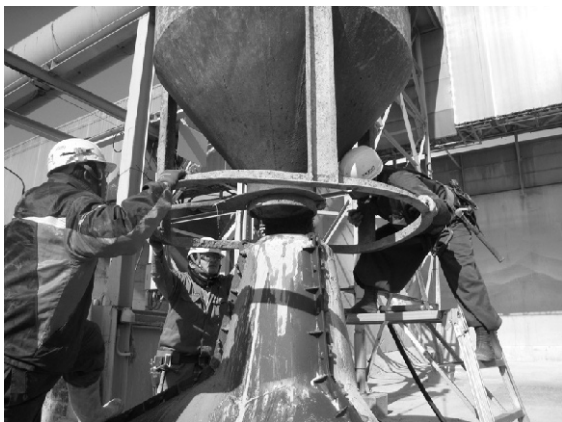


写真-4.3 ホッパによる型枠への打込み状況



写真-4.4 打設終了後の試験体上面 (65-70)

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力学特性に大きな差は認められなかった。よって、銅スラグ細骨材を50%以下、ブリーディング量 $0.3 \text{ cm}^3/\text{cm}^2$ 以下の銅スラグを混合したコンクリートでは、 $30 \text{ m}^3/\text{h}$ 以下の吐出量にてポンプ圧送が可能であることがわかった。

(4) 直接打設による施工

ポンプ圧送が困難であった CUS 混合率の大きいコンクリート (70%以上) に対して、直接打設により 2t 型消波ブロックを作製する実施工試験を行った。対象とする配合は 65-70, 65-100 とし、比較として 65-0 についても実施工試験を行った。表-4.4 に直接打設時におけるコンクリートのフレッシュ性状を示す。65-70 では後述する理由によりスランプが崩壊したため、測定不可となった。打設はアジテータ車に直接材料を投入し、アジテータ車によって練混ぜを行った (写真-4.1)。その後、アジテータ車からホッパにコンクリートを流し込み (写真-4.2)、

ホッパを消波ブロックの型枠上部まで移動し、コンクリートを打ち込んだ (写真-4.3)。

写真-4.4 に打設終了後の 65-70 の試験体上面を示す。試験体上面にはブリーディングが認められ、打設直後から約 50mm の沈下が認められた。

施工性に関して、65-70 (ブリーディング量 $0.87 \text{ cm}^3/\text{cm}^2$) についてはプラントにおける実機練りではなかったため化学混和剤の効果が変化し、実機練りと比較して大幅にブリーディング量が大きくなった。この場合、打設が困難な状況であり、打込み速度等の配慮が必要であった。65-100 (ブリーディング量 $0.37 \text{ cm}^3/\text{cm}^2$) については通常通り打設が可能であった。これらから、ポンプ圧送が困難な場合にはホッパなどを用いた直接打設によって施工が可能であり、適切な施工方法を選択することで消波ブロックを作製できることが分かった。

写真-4.5～写真-4.7 に実施工試験にて製作した消波ブロックの外観を示す。65-0 の普通コンクリートでは外観に問題が無かった。一方、65-70, 65-100 については表面に水みち、あばたが認められた。これらは波力によるすり減りに対して十分な抵抗性を有しているか今後

検討する必要がある。また、美観等の観点から出来形を重視する場合にはさらに銅スラグ細骨材の混合率もしくは許容するブリーディング量を小さくする必要があると思われる。

なお、付録において本研究で作製した消波ブロックの耐荷性能について検討を行っており、スラグ細骨材を大量混合したコンクリートで作製した消波ブロックの耐力は普通コンクリートのそれよりも大きかった。これらの結果から、適切な方法を選択して打設することでスラグ細骨材を大量混合したコンクリートを消波ブロックへ適用できるものと考えられた。

5. スラグ細骨材を大量混合したコンクリートの港湾コンクリート構造物への適用性

本章では、上述した実験結果を基に、スラグ細骨材を大量混合したコンクリートの港湾コンクリート構造物への適用性について考察する。

5.1 無筋コンクリート構造物への適用性

本研究による力学特性に関する実験結果では、 $0.5\text{cm}^3/\text{cm}^2$ 程度のブリーディング量であれば、スラグ細骨材を大量混合したコンクリートの力学特性は普通コンクリートと同等であった。ただし、 $1.0\text{cm}^3/\text{cm}^2$ 程度の過剰なブリーディングは力学特性を低下させる要因になる。また、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施工実績⁵⁾も考慮すると、ブリーディング量 $0.5\text{cm}^3/\text{cm}^2$ 以下のコンクリートであれば、無筋コンクリート構造物に適用して問題無いものと考えられる。

耐海水性に関する促進試験結果から、スラグ細骨材を大量混合したコンクリートの耐海水性は普通コンクリートとほぼ同等であり、無筋コンクリート構造物に適用して問題無いものと考えられる。

施工性の観点からは、スラグ細骨材混合率が 50%、ブリーディング量が $0.3\text{cm}^3/\text{cm}^2$ よりも小さければポンプ圧送が可能であった。また、これよりも多くなった場合には、直接打設により施工が可能であることを示した。ただし、出来形を重視する場合にはさらにブリーディングの許容値をさらに小さくする必要があると思われる。

以上の結果から、スラグ細骨材を大量混合したコンクリートは適切な施工方法を選択することで港湾の無筋コンクリート構造物に適用することが十分可能と思われる。



写真-4.5 配合 65-0
(ブリーディング量 $0.06\text{cm}^3/\text{cm}^2$)



写真-4.6 配合 65-70
(ブリーディング量 $0.87\text{cm}^3/\text{cm}^2$)



写真-4.7 配合 65-100
(ブリーディング量 $0.37\text{cm}^3/\text{cm}^2$)

5.2 鉄筋コンクリート構造物への適用性

鉄筋コンクリート構造物では、コンクリートの力学特性だけでなく、鉄筋との付着、防食性能を適切に評価する必要がある。本実験結果から、 $0.5\text{cm}^3/\text{cm}^2$ 程度のブリーディング量までであれば、スラグ細骨材を大量混合したコンクリートの力学特性、塩化物イオンの見かけの拡散係数、鉄筋とコンクリートの付着強度は普通コンクリートとほぼ同等であった。また、海洋環境下における自然電位のモニタリング結果では、スラグ細骨材を大量混合したことによる変化は現時点では認められていない。

しかしながら、ブリーディングの増加によって鉄筋界面に空隙が発生し、腐食促進⁸⁾や付着力低下⁹⁾が生じるという指摘がある。本実験では、寸法が比較的小さな試験体を使用したため、ブリーディングが容易に打設面まで上昇した可能性が考えられる。このため、実構造物などで見られる鉄筋下面の空隙が生成しなかった可能性が考えられる。よって、現時点ではスラグ細骨材を大量混合したコンクリートを鉄筋コンクリート構造物に適用するためには大型の試験体などを用いた検証を今後行う必要がある。引き続き、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構造物に適用性について検討する予定である。

6. 結言

本研究は主に室内試験によりスラグ細骨材を大量混合したコンクリートの各種特性について検討し、以下の成果を得た。

- (1) 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無筋コンクリート構造物への適用に十分な力学性能を有している。
- (2) $1.0\text{cm}^3/\text{cm}^2$ 程度の過剰なブリーディングを生じるコンクリートでは、実質の水セメント比と強度の関係が普通コンクリートと異なり、ブリーディングが圧縮強度に影響を及ぼすことが分かった。本実験の範囲では、少なくともブリーディング量 $0.5\text{cm}^3/\text{cm}^2$ 以下であれば、実質の水セメント比と強度の関係は普通コンクリートと同様の傾向を示した。
- (3) 海洋環境への約1年の暴露の結果、スラグ細骨材を大量混合したコンクリートの耐海水性および防食性能は普通コンクリートと同等であることが示された。
- (4) スラグ細骨材を混合したコンクリートにおいてポンプ圧送が可能な場合、圧送による品質変化も普通コンクリートとほぼ同等であった。また、ポンプ圧送

が困難となるようなスラグ細骨材を大量混合したコンクリートは、ホッパ等を用いた直接打設により施工が可能である。本実験の範囲では、スラグ細骨材の混合率が50%、ブリーディング量 $0.3\text{cm}^3/\text{cm}^2$ 以下であれば、ポンプ圧送による施工が可能であった。

- (5) スラグ細骨材を大量混合したコンクリートは適切な施工方法を選択することで港湾の無筋コンクリート構造物に適用することが十分可能と思われる。

(2011年1月27日受付)

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.92，1998年
- 2) 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.78，1995年。
- 3) 土木学会：高炉スラグ骨材コンクリート施工指針，コンクリートライブラリー，No.76，1994年。
- 4) 土木学会：電気炉酸化スラグ骨材を用いたコンクリートの設計・施工指針(案)，コンクリートライブラリー，No.110，2004年。
- 5) 錦織和紀郎，谷口昇，川西政雄，松田節男：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.1，2005年，pp.127-132。
- 6) 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.1，2009年，pp.1843-1848。
- 7) 五味信治，栢田佳寛：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.1，2005年，pp.1417-1422。
- 8) 審良善和，濱田秀則，山路徹，中野松二：鉄筋とコンクリート界面の空隙が鉄筋腐食に及ぼす影響，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.5，2005年，pp.1-6。
- 9) 松家武樹，堺孝司，中村俊之，梅沢健一，草薙悟志，佐藤淳一：鉄筋コンクリート梁に対する産業廃棄物溶融スラグの適用性に関する基礎的研究，土木学会論文集E，Vol.63，No.2，2007年，pp.235-249。
- 10) 鉄鋼スラグ協会骨材WG：天然材の代替拡大による環境保全を図る，コンクリートテクノ，Vol.28，No.5，2009年，pp.73-80。
- 11) http://www.slg.jp/pdf/fs-117_01.pdf
- 12) 栗栖一之：フェロニッケルと銅の安定供給にも有効利用重要，コンクリートテクノ，Vol.28，No.5，2009

年, pp.81-89.

- 13) 川上勝弥:溶融スラグ骨材, コンクリート工学, Vol.46, No.5, 2008年, pp.105-108.
- 14) http://www.jsim.or.jp/ecoslag/pdf/toukei_youtobetu.pdf
- 15) 日本港湾協会: 港湾の施設の技術上の基準・同解説(上), 2007年, pp.445-450.
- 16) 山路徹, 審良善和, 濱田秀則, 山田一夫: 海洋環境におけるコンクリートの劣化性状および劣化指標に関する検討, 土木学会論文集E, Vol.66, No.2, 2010年, pp.21-37.
- 17) 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, 2000年.
- 18) 日本建築学会: 建築工事標準仕様書・同解説, 1997年.

付 録

スラグ細骨材を大量混合したコンクリートで作製した消波ブロックの載荷試験

1. 検討の目的

本編において、スラグ細骨材を大量混合したコンクリートについて、港湾の無筋コンクリート構造物への適用が可能であることを示した。

現在の消波ブロック、根固めブロックの要求性能は重量と強度のみであり、所定の強度を満たすことで消波ブロックの要求性能は満足される。しかしながら、普通コンクリートであっても現場では消波ブロックの脚部の折損等が認められる場合もある。スラグ細骨材を大量混合したコンクリートではあばたや水みちが認められたことから、それらが弱点部となって折損等を誘発する可能性が懸念される。そこで、本研究では本編にて作製した消波ブロックの載荷試験を行うことでスラグ細骨材を大量混合したコンクリートで作製した消波ブロックの耐荷力を明らかにするとともに、普通コンクリートで作製した消波ブロックの耐荷力の結果と比較した。

2. 実験概要

2.1 試験体

試験体は本編において作製した65-0（1体）、65-70（65-70_1, 65-70_2の2体）、65-100（65-100_1, 65-100_2の2体）の2t型消波ブロックとした。試験体は材齢3日において脱型後、気中養生とした。付表-1に載荷試験時におけるコンクリートの圧縮強度および静弾性係数、割裂引張強度を示す。

2.2 載荷試験

作製した消波ブロックに対して付図-1に示すような載荷方法で試験を行った。支点は3点ローラー支持とした。また、弱点部が多いと思われる打設面側の脚部が折損するよう、載荷点を消波ブロックの中心よりも78mm打設面側の脚部に偏心させた。載荷試験の状況を付図-2に示す。

2.3 計測項目

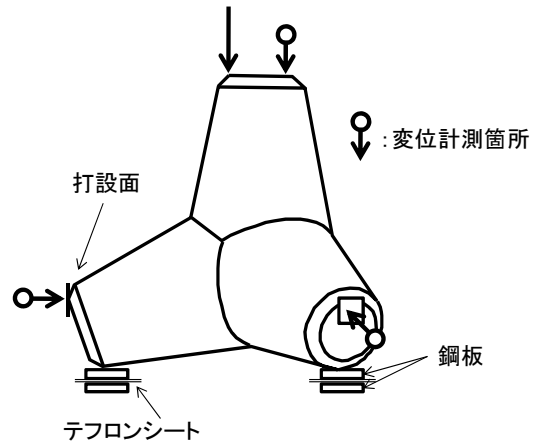
載荷試験中は荷重、載荷点変位、各脚部における水平変位を測定した。

3. 実験結果および考察

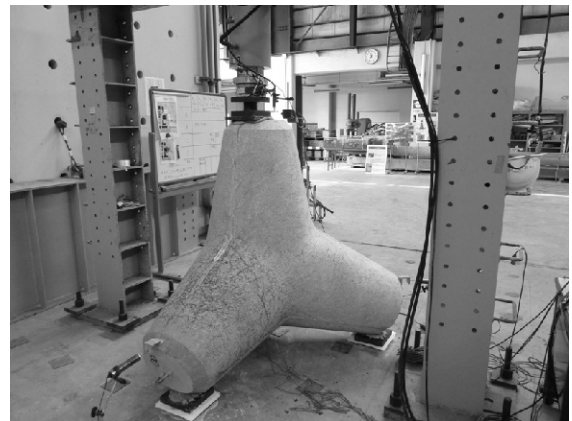
付表-2にそれぞれの試験体の最大荷重を示す。また、

付表-1 コンクリートの物性

	圧縮強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)	割裂引張強度 (N/mm ²)
65-0	21.8	21.2	2.43
65-70	21.9	18.8	2.56
65-100	26.4	22.0	2.99



付図-1 載荷方法



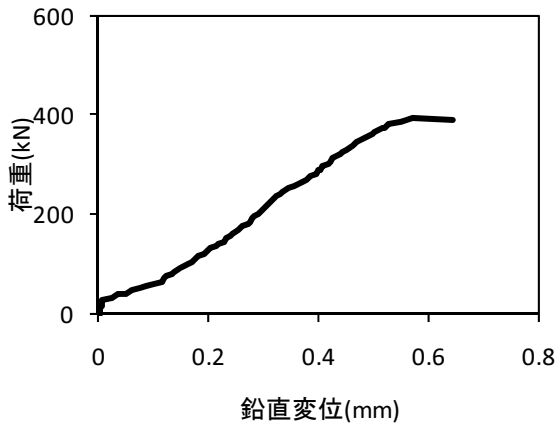
付図-2 載荷試験の状況

付表-2 最大荷重

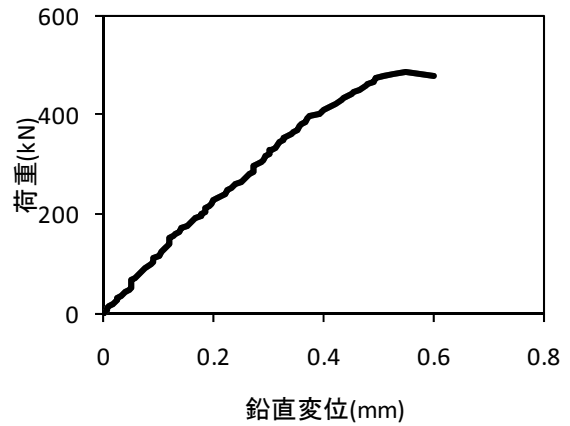
	最大荷重 (kN)	脚部の折損数 (本)
65-0	395	1
65-70_1	485	3
65-70_2	667	1
65-100_1	541	1
65-100_2	545	1

付図-3～付図-5に消波ブロックの載荷試験による荷重－鉛直変位関係を示す。なお、65-70_2については変位計の不具合により鉛直変位が計測できなかったため、図中に示していない。

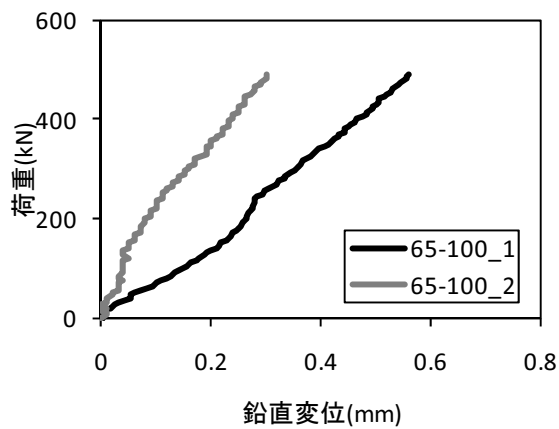
図より、鉛直変位の増加とともに荷重がほぼ比例して



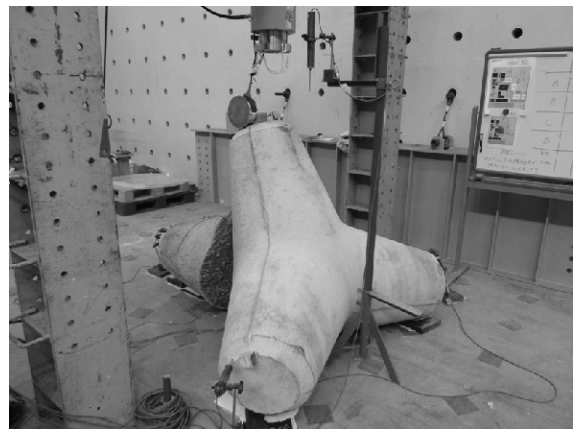
付図-3 荷重—鉛直変位関係 (65-0)



付図-4 荷重—鉛直変位関係 (65-70)



付図-5 荷重—鉛直変位関係 (65-100)



付図-6 脚部1本の折損状況 (65-100_1)

大きくなり、最終的には脚部の折損により耐荷力が急激に低下した。最大荷重に着目すると、普通コンクリートで作製した65-0の最大荷重が395kNであるのに対して、65-70、65-100ともに485～667kNと大きな値を示した。

一方、脚部の損傷本数に着目すると、65-70_1のみ3本の脚部の全てが折損した状況が確認され、その他の試験体については1本の脚部が折損した。また、65-100（ブリーディング量 $0.37\text{cm}^3/\text{cm}^2$ ）については2体の試験体間の最大荷重の差が小さいのに対して、65-70（ブリーディング量 $0.87\text{cm}^3/\text{cm}^2$ ）は2体の最大荷重の差で182kNとばらつきが非常に大きかった。この原因について十分に言及できないが、原因の一つとしてブリーディングの増加によって2体の消波ブロック打設時のコンクリートの品質が異なっていた可能性がある。これらの点については今後検討が必要である。



付図-7 脚部3本の折損状況 (65-70_1)

港湾空港技術研究所資料 No.1233

2011. 6

編集兼発行人 独立行政法人港湾空港技術研究所

発行所 独立行政法人港湾空港技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号
TEL. 046(844)5040 URL. <http://www.pari.go.jp/>

印刷所 株式会社 大應

Copyright © (2011) by PARI

All rights reserved. No part of this book must be reproduced by any means without the written permission of the President of PARI

この資料は、港湾空港技術研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部または一部の転載、複写は港湾空港技術研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。