

論文 銅スラグを用いた超硬練り重量セメント硬化体の試験施工

秋田 真良*¹・東 俊夫*²・江口 正勝*³・村上 祐治*⁴

要旨: 港湾構造物などの浮力対策としてコンクリートなどが大量に施工される場合がある。この代わりに質量の重い材料を使用することは有効である。その一つと考えられる銅スラグを用いた重量セメント硬化体の基本特性および施工方法を確認するために試験施工を実施した。その結果、貧配合の超硬練りセメント硬化体とすることで、室内試験においては湿潤密度 3000kg/m³, 圧縮強度 2.6N/mm² (28 日材齢), さらに施工方法ではバックホウによる混合, ブルドーザによる敷均し, 振動ローラによる締固めが適用可能であることを確認できた。

キーワード: 超硬練り, 重量セメント硬化体, 銅スラグ, 鉄精鉱, 振動ローラ, ブルドーザ

1. はじめに

港湾構造物や地下水位の影響を受ける構造物などは、自重のみで揚圧力に対抗することができないため浮き上がり防止の材料を設置している例がある。一般に、浮き上がり防止の材料として、砂, 砕石あるいはコンクリートなどが使用されているが、これらが大量に必要な構造物では、コスト, 施工, 工期に影響を与えることがある。このような場合、材料自体の質量を重くすることによって構造物の形状をコンパクトにでき、効率的な設計が可能となる¹⁾。

このような質量が大きい材料を大量に施工する場合、通常のみキサやポンプなどの施工方法

ではかなりの改造や機械の開発などが必要となることが考えられる。そこで、CSG (Cemented Sand and Gravel) 工法でみられるようなセメントと骨材をバックホウで練り混ぜる方法²⁾やRCD工法でみられるようなセメント硬化体を超硬練りにしてブルドーザや振動ローラで締固める方法³⁾を用いることが考えられる。

本論文は、密度が 3.5g/cm³以上を示す銅スラグおよび鉄精鉱を骨材として用いることで、普通コンクリートよりも単位容積質量の大きい材料とし、この材料の基本特性および施工方法に関する試験施工の結果を報告するものである。ここでは上記の材料にセメントと水を加えた混

表-1 使用材料の物理試験結果

項目	密度 (g/cm ³)		吸水率 (%)	単位容積質量 (g/cm ³)	実績率 (%)
	絶対乾燥状態	表面乾燥飽水状態			
	JIS A 1202	JIS A 1109	JIS A 1109	JIS A 1104	JIS A 1104
セメント	3.04	—	—	—	—
銅スラグ	3.562	3.573	0.3	2.06	57.7
鉄精鉱	4.207	—	—	2.14	50.9

*1 (株)間組 土木事業本部 ダム統括部 (正会員)

*2 国土交通省九州地方整備局 北九州港湾・空港整備事務所 所長

*3 (株)間組 九州支店 新若戸作業所

*4 (株)間組 技術研究所技術研究部 土木研究室 工博 (正会員)

合物は水和反応に起因した硬化体であることから、重量セメント硬化体と呼称する。

2. 使用材料

2. 1 材料試験

使用材料の物理試験結果を表-1 に示す。銅スラグは、銅精鉱を炉で熔融し、銅から分離してできた熔融スラグをさらに高圧水で水砕したものである。鉄精鉱は、通常セメントの生産に必要な鉄分として使用され、銅の精錬過程で生じる鉄分を固化しミルによって微粉碎した材料である。セメントには高炉セメントB種を使用することとした。

2. 2 骨材の粒度分布

各材料の粒度分布曲線および細骨材の標準粒度範囲⁴⁾を図-1 に示す。銅スラグは最大粒径が5mm程度であり、骨材径0.5mm以下が10%程度しか存在せず、微粒分が不足していることが分かる。これを補うために、鉄精鉱を混合することとした。室内試験で使用した銅スラグと鉄精鉱の混合物の粒度範囲も図に併記した。

3. 室内試験

3. 1 骨材の混合率試験

単位容積質量がより大きくなる銅スラグと鉄精鉱の混合率を確認する目的で、質量比を70:30から55:45まで変化させて突固めによる締固め試験(JIS A 1210:1999)を行った。含水比と湿潤密度の関係を図-2、最適含水比と最大湿潤密度を図-3 に示す。銅スラグと鉄精鉱の混合率が60:40と65:35の場合で密度が大きくなり、最大湿潤密度3100kg/m³であった。また、混合比率60:40の場合は、65:35の場合と比較して含水比が変動しても密度の変動が小さい配合であることから、銅スラグと鉄精鉱の混合率は60:40とした。

3. 2 重量セメント硬化体の基本特性

(1) 試験方法と配合

重量セメント硬化体の特性を把握するために、骨材の混合率試験で選定した銅スラグ:鉄精鉱=60:40の混合率を用い、単位水量を変化させ

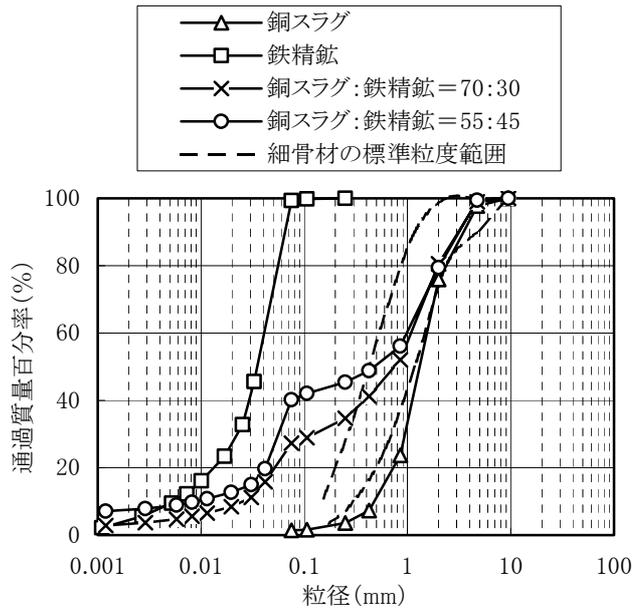


図-1 粒度分布曲線

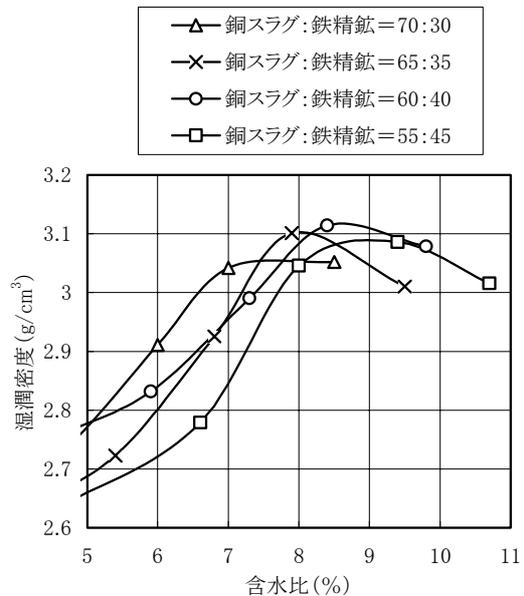


図-2 含水比と湿潤密度の関係

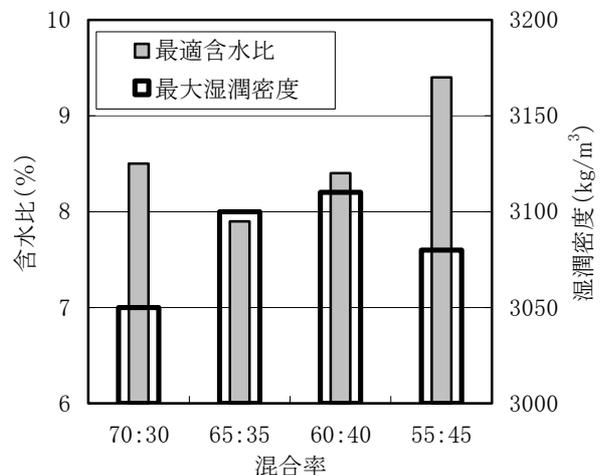


図-3 最適含水比と最大湿潤密度

表-2 試験ケースおよび配合

試験ケース	含水比 W/(SCU+SF) (%)	水セメント比 W/C (%)	単位量(kg/m ³)				理論密度 (kg/m ³)
			水 W	セメント C	銅スラグ SCU	鉄精鉱 SF	
Case 1	6.0	195	177	91	1826	1126	3220
Case 2	7.0	226	201	89	1775	1095	3159
Case 3	8.0	259	223	86	1724	1063	3096
Case 4	8.77	285	239	84	1685	1039	3047
Case 5	9.0	289	243	84	1675	1033	3035

て圧縮強度，湿潤密度および超音波伝播速度試験を実施した。圧縮強度試験は，JIS A 1108「コンクリートの圧縮強度試験方法」に従った。重量セメント硬化体の配合は，下記の条件により設定した。

- ①単位セメント量は，銅スラグと鉄精鉱の合計単位量の 3%，約 90kg/m³ とし，鉄精鉱が微粉であるため，その一部を置き換えることとした。これは，RCD用コンクリートや現地発生材にセメント，水を簡易な練り混ぜ設備にて混合し急勾配盛土などに利用するCSG工法で用いられている単位セメント量などを参考にしたものである⁵⁾。
- ②単位水量は，最適含水比を含み，銅スラグと鉄精鉱の合計単位量の 6～9%まで変化させた。

重量セメント硬化体に関する試験ケースおよび配合を表-2 に示す。配合上の骨材の含水状態は，銅スラグが表面乾燥飽水状態，鉄精鉱が絶対乾燥状態とした。

材齢は 7 日と 28 日を基本とし，ケース 2 のみ長期材齢での強度の増進を確認するために 91 日も追加した。供試体の寸法はφ50×100mm とし，各材齢で 2 本採取した。養生は 20℃の恒温室で封緘養生を行った。

(2) 重量セメント硬化体の基本特性

単位水量と湿潤密度，締固め率および圧縮強度の関係を図-4 にそれぞれ示す。締固め率の算定は JSCE-F507-1999「RCD 用コンクリートのコンシステンシー試験方法」に従った。

湿潤密度は単位水量 239 kg/m³ (ケース 4) で最大となり 3080～3100kg/m³であった。材齢 28

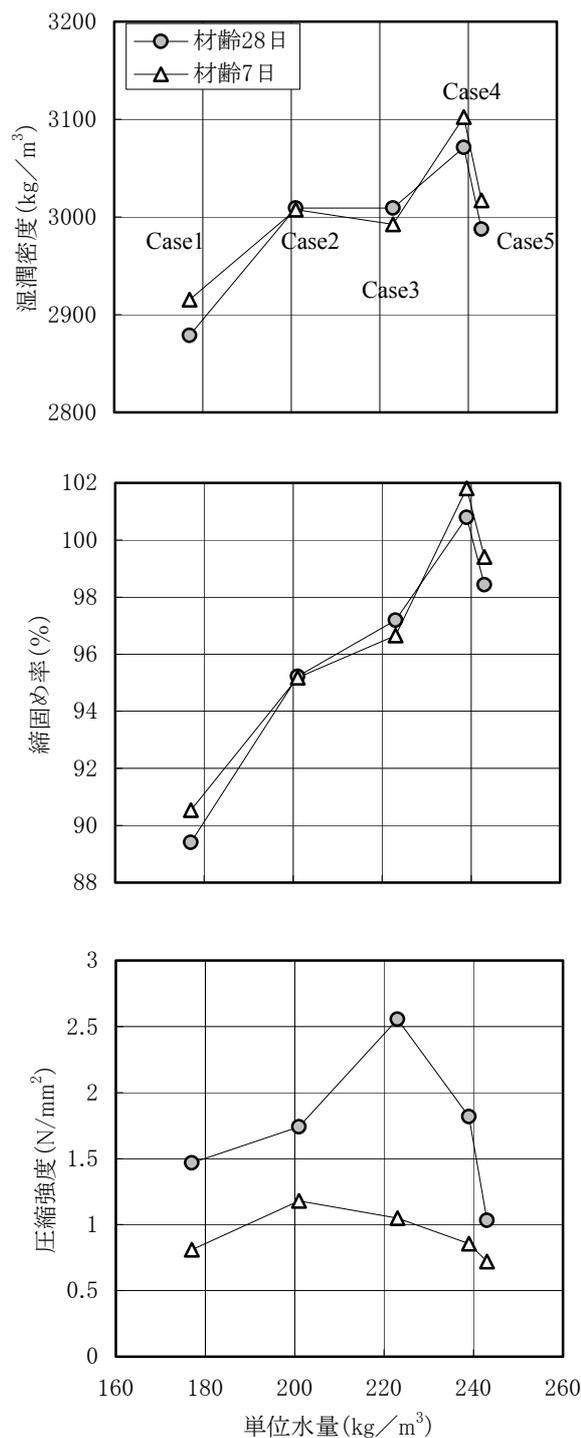


図-4 単位水量と湿潤密度，締固め率，圧縮強度の関係

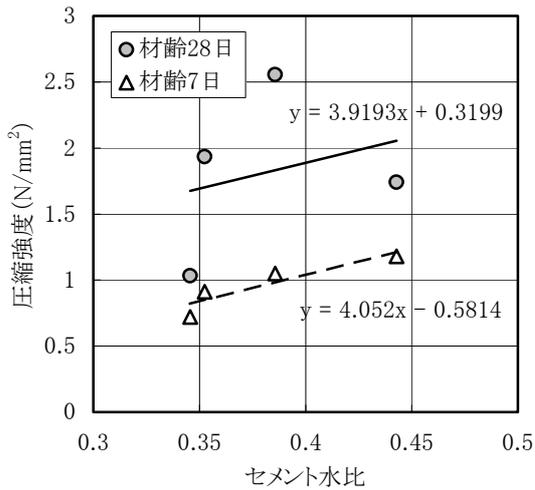


図-5 セメント水比と圧縮強度の関係

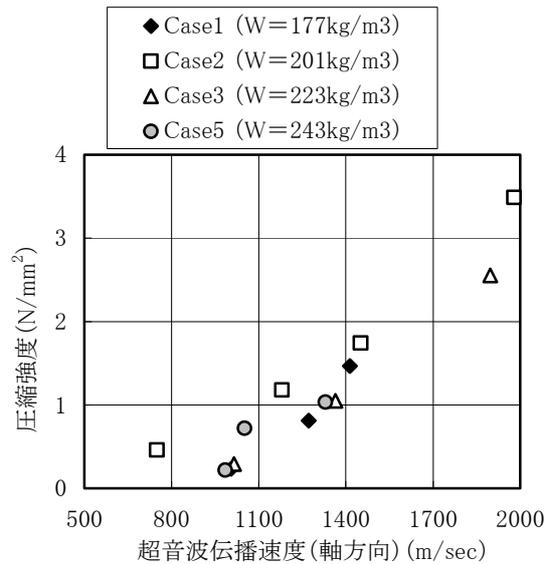


図-7 超音波伝播速度と圧縮強度の関係

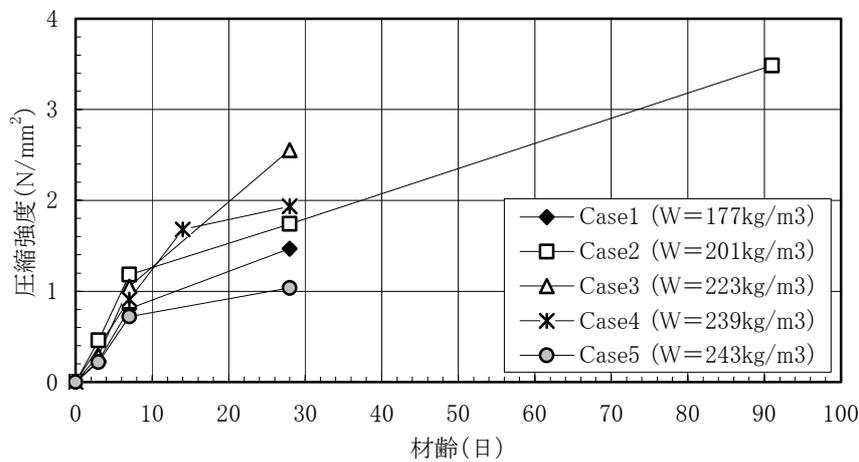


図-6 圧縮強度の履歴

日の圧縮強度は単位水量 223 kg/m^3 (ケース 3) で最大となり 2.6 N/mm^2 であった。湿潤密度と圧縮強度のピークにずれが生じている。これは締固め率がケース 4 よりケース 3 が 4~5% 低い、水セメント比がケース 4 よりケース 3 の方が小さいことが影響しているためである。ここで締固め率が明らかに他より小さいケース 1 を除き、セメント水比と圧縮強度の関係を図-5 に示す。材齢 7 日、28 日ともにセメント水比の増加に伴い、圧縮強度が増加していることが分かる。

各ケースの圧縮強度の履歴を図-6 に示す。ケース 2 の 91 日材齢の圧縮強度は 28 日材齢の 2 倍となっていることが分かる。これは、銅スラグの成分として二酸化けい素 (SiO_2) が 32%、酸化カルシウム (CaO) が 2%、鉄精鉱の成分

として SiO_2 が 20%、 CaO が 2% 程度それぞれ存在しており、これがポゾラン反応しているためと考えられる。

供試体縦軸方向の超音波伝播速度と圧縮強度の関係を図-7 に示す。超音波伝播速度が速くなると圧縮強度は増加する傾向にあり、超音波伝播速度は $700 \sim 2000 \text{ m/sec}$ の範囲で分布していることが分かった。

4 試験施工

4.1 試験施工で用いた配合

RCD用コンクリートでは、室内試験で得られた最大密度を示す単位水量で施工した場合、含水比が高いために、締固めエネルギーの大きい振動ローラでは施工が困難となる。そこで単位水量を減少させて示方配合を設定している。

表-3 試験施工に用いた重量セメント硬化体の配合

項 目	水セメント比 W/C (%)	単体量(kg/m ³)				理論密度 (kg/m ³)
		水	セメント	銅スラグ	鉄精鉱	
銅スラグ:鉄精鉱:セメント =60:37:3	233	205	88	1,758	1,084	3,135

例えば、竜門ダムでは単位水量を 30kg/m³ 減少している⁶⁾。本試験でもRCD用コンクリートと同様の施工方法を用いることから、室内試験で得られた最大湿潤密度における単位水量 239 kg/m³ よりも 30 kg/m³ 程度減少させて、重量セメント硬化体の示方配合とした。

試験施工で採用した配合を表-3 に示す。

4. 2 施工方法

重量セメント硬化体の製造は、銅スラグおよび鉄精鉱を 10t ダンプトラックに個別に積込み、トラックスケールで計量、混合ヤードまで運搬、0.7m³ 級バックホウにて銅スラグ、鉄精鉱およびセメントを 30 分間混合（空練り）した後、所定の水を加えさらに 30 分間混合（本練り）することで練り混ぜ完了とした。

打込み方法は 7 t 級ブルドーザ（接地圧 13.7kPa）で敷均し、10 t 級振動ローラ（起振力 232kN，最大振動数 30Hz）にて締固めた。1 層の厚さは 40cm とし、振動ローラの転圧回数は 2 回の無振動転圧後、8 回の振動転圧を行った。

重量セメント硬化体の練り混ぜ状況を写真-1、締固め状況を写真-2 に示す。



写真-1 練混ぜ状況



写真-2 締固め状況

4. 3 試験施工結果

振動転圧 4, 6, 8 回における径 70mm のボーリングコアの写真とコア評価点を図-8 に示す。なお、コア評価点はRCD用コンクリートのコア評価を行う際、目視観察によって評価されているものであるが、重量セメント硬化体は最大粒径が 5mm であるため、RCD用コンクリートのコア評価基準を参考にし、表-4 のように修正した⁷⁾。評価は 5cm 毎に行い、その平均を対象コアの評価点とした。コアは全長にわたって密実であり、評価点も 4.5 以上であったことから、良好な締固めが行われたことがわかる。

	4回転圧	6回転圧	8回転圧
コア写真			
評価点	4.66	4.69	4.56

図-8 コア評価結果（1層の厚さ 40cm×2層）

5. まとめ

銅スラグを用いた重量セメント硬化体の室内試験および試験施工を実施し、以下の知見が得られた。

- (1) 室内試験において銅スラグと鉄精鉱の混合率が質量比で 60:40, 含水比が 8.5% の場合に密度が高くなり、湿潤密度で 3100kg/m^3 程度は確保できることが確認できた。
- (2) 上記の骨材比率で単位セメント量 84kg/m^3 , 単位水量 239kg/m^3 の重量セメント硬化体は、湿潤密度として 3000kg/m^3 を確保でき、締固め率が最大となった。圧縮強度は単位水量 220kg/m^3 で最大となり、材齢 28 日で 2.6N/mm^2 であることが分かった。
- (3) 銅スラグを用いた重量セメント硬化体は、長期にわたって強度が増進していくことが分かった。
- (4) 超音波伝播速度は、 $700\sim 2000\text{m/sec}$ で、圧縮強度が増加する程、速くなることが分かった。
- (5) ブルドーザや振動ローラを用いる RCD 工法や CSG 工法と同様の施工方法を実施する場合、最大湿潤密度の単位水量よりも 30kg/m^3 減少させた重量セメント硬化体の配合で十分施工が可能であることを確認できた。
- (6) 重量セメント硬化体をバックホウで空練り 30 分、加水後 30 分練混ぜ、ブルドーザで 1 層 40cm で敷均し、振動ローラで締固める施工方法の場合、コア評価点 4.5 を確保できることを確認した。

6. おわりに

今回確認した重量セメント硬化体の基本特性および施工方法をもとに、今後、最適な施工厚さ、転圧回数などの施工仕様、あるいは施工管理手法などを検討していきたい。

表-4 コア外観評価基準

区分	コアの外観評価	評価点
良好	通常のもルタル硬化体と比べて遜色がない部分	5
ほぼ良好	表面がややポーラスな部分、銅スラグや鉄精鉱が少し現れている部分	4
やや良好	表面がポーラスな部分、もルタルがやや剥げ落ちている部分	3
不良	もルタルが充分に行きわたらず、豆板状になっている部分	2
極めて不良	もルタルが大きく欠損していて、コアの外観を全く呈していない部分	1

謝辞：本研究では、九州大学工学研究院建設デザイン部門、善 功企教授の多大なるご指導をいただきました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 村上祐治, 望月武, 横尾正義, 天明敏行：粒鉄を用いた超硬練り重量セメント硬化体の試験練り, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.1, 2002
- 2) 国峯紀彦, 陣門謙一, 野村貢：堤体掘削材料を利用した CSG 工法の施工手法の確立, 土木学会第 54 回年次学術講演会, 1999.9.
- 3) 島田保之：上野ダム の設計と施工について：大ダム No.179, p.38-47, 2002.4
- 4) 土木学会：コンクリート標準示方書（施工編）, p.63, 2002.3.
- 5) (財)日本ダム協会：CSG 事例調査報告書, p.17-22, 2001.6.
- 6) (財)ダム技術センター：改定 コンクリートダム の細部技術, p.56, 1992.3
- 7) 舎川徹, 関根裕治, 堤知明, 村上祐治, 井上慎介：RCD 用コンクリートのリアルタイム締固め管理システムの研究開発, 土木学会論文集 No.693/VI-53, p.105-115, 2001.12