

# 論文 銅スラグ細骨材を用いたコンクリートのプレキャスト部材への適用

中瀬 博一<sup>\*1</sup>・加藤 卓也<sup>\*2</sup>・山村 智<sup>\*3</sup>

要旨：産業副産物である銅スラグは、粒度によっては微粒分が少ない場合があり、コンクリート用細骨材として使用する場合には、施工性の確保などの問題点が生じる。このため、銅スラグ細骨材を有効利用するために、フレッシュ性状および耐久性の検討を行った。その結果、銅スラグ細骨材を用いたコンクリートは、石灰石微粉末および増粘剤混入型の混和剤を適量用いることにより、単位容積質量が2700kg/m<sup>3</sup>程度で、良好なフレッシュ性状および耐久性を有することが確認された。また、プレキャスト製品工場における実大模擬部材製造実験においても、均質で緻密な部材製造が可能であることが確認された。

キーワード：銅スラグ細骨材, 環境負荷低減, 材料分離抵抗性, 耐凍害性, 乾燥収縮, 遮蔽性能

## 1. はじめに

東北地方では、東日本大震災の影響でコンクリート用天然骨材の安定調達に困難になっている。このため、東北地区の銅製錬所で産業副産物として発生する銅スラグは、環境負荷低減の観点からも、地産地消型の復興資材として積極的な利用が望まれるが、利用実績は十分ではないのが現状である。

銅スラグは密度が大きく、細骨材として用いた場合、コンクリートの単位容積質量が大きくなり、遮蔽構造物などへの利用にも適していると考えられるが、一般のコンクリート用細骨材に比べ微粒分が少ないものがあるため、モルタルの粘性が小さくブリーディングが多くなるなどの傾向が指摘されている<sup>1)</sup>。そこで、銅スラグ細骨材をはじめ、主要な材料の全てを被災地である東北三県（岩手、宮城および福島）から調達し、遮蔽コンクリートとしても利用できる高密度のコンクリートの配合検討、および耐久性の確認を行った。また、プレキャスト製品工場における実大模擬部材製造実験により、施工性および材料分離抵抗性の確認を行い、銅スラグ細骨材を使用したコンクリート（銅スラグコンクリート）の実用化の可能性を検討した。

## 2. 室内実験の概要

### 2.1 コンクリートの仕様および目標値

銅スラグコンクリートの仕様および目標値は、想定される部材の要求性能により、表-1に示す値とした。空気量の目標値は4.5±1.5%であるが、耐凍害性向上の目的で一部（後述）6.0±1.5%とした。

### 2.2 実験の要因と水準

実験は、銅スラグ細骨材の石灰石微粉末による置換の有無、増粘剤のタイプ（別添型、SP混入型）および、

高性能減水剤種類（3種）を要因として行った。実験の要因と水準を表-2に示す。

### 2.3 使用材料

実験に使用した材料を表-3に示す。銅スラグ細骨材は、福島県に立地する銅製錬所から発生し、ストッ

表-1 コンクリートの仕様および目標値

項目	仕様・目標値
設計基準強度	30 N/mm <sup>2</sup> (強度保証材齢14日, 製品同一養生)
脱枠時強度	24 N/mm <sup>2</sup> (材齢1日(14h), 製品同一養生)
単位容積質量	2700kg/m <sup>3</sup> 以上 (目標値)
スランブ	18±2.5cm
空気量	4.5±1.5% (一部6.0±1.5%)

表-2 実験の要因と水準

実験要因	水準
水セメント比(%)	36.0
石灰石微粉末の混入	有り, 無し
増粘剤タイプ	SP混入型, 別添型
高性能減水剤種類	SP1, SP2, SP3 (3種)

表-3 使用材料

材料	記号	仕様・備考
早強ポルトランドセメント	C	密度3.14g/cm <sup>3</sup> , 比表面積4410cm <sup>2</sup> /g
石灰石微粉末	L	埼玉県産, 密度2.71g/cm <sup>3</sup> , 比表面積3410cm <sup>2</sup> /g
	L2	宮城県産, 密度2.70g/cm <sup>3</sup> , 比表面積3600cm <sup>2</sup> /g
銅スラグ細骨材	CUS	福島県産, 表乾密度3.52g/cm <sup>3</sup> , F.M.3.16, JIS粒度区分5~0.3mm 微粒分量(75μm未満)0.7%
碎石	G	岩手県産, 表乾密度2.92g/cm <sup>3</sup>
高性能減水剤	SP1	ポリカルボン酸系(増粘剤無混入)
	SP2	ポリカルボン酸系(増粘剤混入型)
	SP3	ポリカルボン酸系(増粘剤混入型)
AE剤	AE	アニオン系界面活性剤
増粘剤	VA	セルロース系

\*1 ピーエス三菱 技術本部 技術研究所 (正会員)

\*2 ピーエス三菱 技術本部 技術部 (正会員)

\*3 ピーエス三菱 技術本部 技術研究所 工修 (正会員)

表 - 4 コンクリートの配合

配合名	W/C (%)	s/a (%)	Air (%)	単体量 (kg/m <sup>3</sup> )						VA (g/m <sup>3</sup> )	混和剤 (C × %)			単位容積質量 (kg/m <sup>3</sup> )	
				W	C	L	L2	CUS	G		SP1	SP2	SP3		
SP1	36.0	55.0	4.5	155	431	-	-	1283	871	-	0.50	-	-	2740	
SP1-VA						-	-	1283		465	0.80	-	-	2740	
SP1-L-VA						99	-	1155		200	0.85	-	-	2710	
SP2						-	-	1283		-	-	0.70	-	2740	
SP2-L						99	-	1155		-	-	0.70	-	2710	
SP2-L2						-	98	1155		-	-	0.65	-	2710	
SP3-L2-4.5						-	98	1155		-	-	-	1.1	2710	
SP3-L2-6.0						-	96	1129		851	-	-	-	1.0	2662

クしてあるものを用いた。銅スラグコンクリートを用いたプレキャスト (PCa) 部材は、岩手県内の製品工場での製造を想定しており、その他の主要材料も工場の常用品を含め、すべて東北三県から調達可能なものを用いた。ただし、石灰石微粉末については、実験初期段階で埼玉県産 (L) を用い、調達が可能となった後は、同等品である宮城県産 (L2) を使用した。また、SP3 は SP2 の消泡成分を多くした改良品である。

2.4 コンクリートの配合および練混ぜ方法

コンクリートの配合を表 - 4 に示す。石灰石微粉末を混入した配合は、銅スラグ細骨材の微粒分を補填する目的から銅スラグ細骨材容積の 10% を石灰石微粉末で置換した。SP3 を用いた配合は、耐凍害性の向上を目的としており、空気量 6.0% での検討も行った。また、空気量の調整は、AE 剤を用いて行った。

コンクリートの練混ぜは、強制練り 2 軸ミキサ (容量 55L) を用いて行った。練混ぜ時間はモルタル先練り 90 秒の後、粗骨材を投入しさらに 60 秒練混ぜた後に排出とした。なお、これらの配合は、環境安全品質基準上では鉛含有量の基準値を満足しないため、リサイクルしない部材に用途を限定して取扱うこととした。

2.5 コンクリートの養生方法

圧縮強度供試体は、コンクリートを型枠 (10 × 20cm) に打込み後、蒸気による加熱養生 (最高温度 40 ) を行った。脱枠は翌日 (約 14 時間後) とし、脱枠後は試験材齢まで 20 , 60%RH の気中養生とした。また、乾燥収縮試験体および凍結融解試験体は、型枠 (10 × 10 × 40cm) へ打込み後、20 , 60%RH で養生を行い、翌日に脱枠した後、試験開始材齢まで 20 の水中養生とした。

2.6 試験項目および試験方法

試験項目および試験方法を表 - 5 に示す。乾燥収縮試験体は、材齢 7 日まで 20 水中養生の後、基長を測定した。また、凍結融解試験体は材齢 28 日まで 20 水中養生を行い、相対動弾性係数および質量の初期値を

表 - 5 試験項目および試験方法

試験項目	試験方法
スランブ	JIS A 1101
空気量	JIS A 1128
圧縮強度	JIS A 1108
乾燥収縮	JIS A 1129-1
凍結融解	JIS A 1148 (A 法)
気泡間隔係数	ASTM C 457-98

表 - 6 フレッシュコンクリートの試験結果

配合名	スランブ (cm)	AIR (%)	コンクリート温度 ( )	環境温度 ( )	スランブ状態分類
SP1	3.0	5.1	24.2	19.8	自立
SP1-VA	5.5	5.8	21.5	19.8	自立
SP1-L-VA	20.0	3.8	21.3	19.8	成立
SP2	11.5	5.8	23.4	19.8	部分崩壊
SP2-L	20.0	3.3	23.1	19.1	成立
SP2-L2	20.5	4.3	17.5	18.2	成立
SP3-L2-4.5	19.0	4.7	18.5	18.5	成立
SP3-L2-6.0	20.5	6.3	18.4	17.6	成立

測定した。気泡間隔係数試験は、凍結融解試験を行った試験体を用いて、ASTM C 457-98 リニアトラバース法に準じて測定装置「HF - MAC01」を用いて行った。供試体は、10 × 10 × 40cm の中央部を厚さ約 50mm に切断し、両面研磨の後、超音波洗浄機で洗浄し測定面とした。なお、測定面での気泡の弦長の割合は、確率理論上は気泡径の割合と同様の傾向を示すため<sup>2)</sup>、ここでは測定された弦長の分布を気泡分布として扱った。

3. 実験結果

3.1 フレッシュコンクリートの試験結果

フレッシュコンクリートの試験結果を表 - 6 に示す。銅スラグ細骨材を使用したコンクリートは、普通コンクリートとは異なる挙動を示すため、フレッシュコンクリートは、スランブ試験時における状態を図 - 1 に示すように 4 種に分類<sup>3)</sup>し、評価を行った。スランブ試験状況を写真 - 1 に示す。

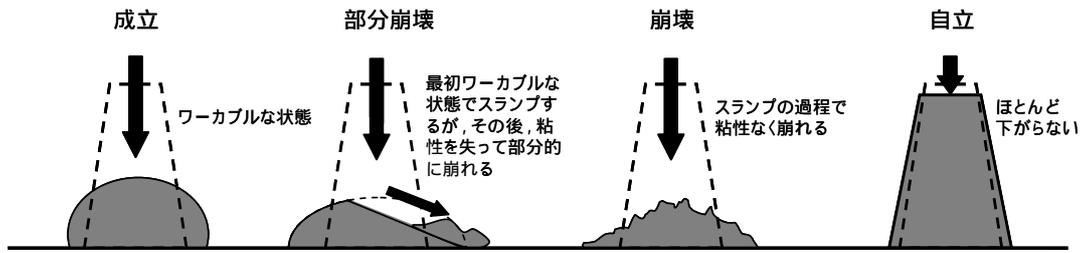


図 - 1 フレッシュコンクリートのスランプ時における状態分類<sup>2)</sup>



写真 - 1 スランプ試験状況

(1) 石灰石微粉末による影響

銅スラグ細骨材を石灰石微粉末で置換した SP1-L-VA, SP2-L, SP2-L2 は、評価「成立」の良好なスランプ性状を示した。一方、石灰石微粉末無混入の SP1, SP1-VA, SP2 配合では、ほとんどスランプしない「自立」、もしくは粘性不足によりコンクリートが部分的に崩れる「崩壊」であり、施工性は不良となることが予想される。単位ペースト量（水+セメント+石灰石微粉末+銅スラグの微粒分とする）は、石灰石微粉末を混入した配合は 330L/m<sup>3</sup> であり、無混入の場合は 295L/m<sup>3</sup> である。このため、スランプ状態が「成立」となる良好なスランプ性状を得るには、少なくとも単位ペースト量を 300 L/m<sup>3</sup> 以上とする必要があると考えられる。なお、生産地の異なる石灰石微粉末である L および L2 の違いによる影響は認められなかった。

(2) 増粘剤種別による影響

別添型の増粘剤を使用した SP1-VA は、無混入の SP1 とほぼ同様のフレッシュ性状であり、両者ともほとんどスランプしない「自立」状態であった。一方、増粘剤混入型の高性能減水剤を用いた SP2 では若干、スランプ性状は改善し「部分崩壊」であった。これらより、本実験で用いた増粘剤混入型の高性能減水剤は、銅スラグコンクリートのスランプ性状改善に効果的であると考えられる。

3.2 硬化コンクリートの試験結果

(1) 圧縮強度試験結果

フレッシュコンクリートの性状が良好であった配合では、圧縮強度試験を行った。ただし、SP2 のフレッシュ性状での優位性が認められたため、SP1-L-VA については材齢 14 日の試験のみとした。圧縮強度の試験結果を表 - 7 および図 - 2 に示す。銅スラグコンクリ

表 - 7 圧縮強度試験結果

配合名	試験材齢	単位容積質量 (硬化後) (kg/m <sup>3</sup> )	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )
SP1-L-VA	1 日	-	-
	14 日	2690	54.4
SP2-L	1 日	2737	41.2
	14 日	2737	57.7
SP2-L2	1 日	2664	29.2
	14 日	2681	47.1
SP3-L2-6.0	1 日	2692	36.0
	14 日	2717	55.8

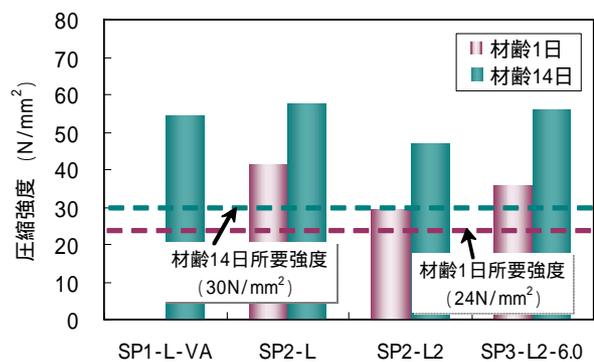


図 - 2 圧縮強度試験結果

トを用いた部材は、設計基準強度 30N/mm<sup>2</sup>、脱枠時強度 24N/mm<sup>2</sup> を想定しており（表 - 1 参照）、強度発現は、ばらつきがあるものの、増粘剤、石灰石微粉末、混和剤の種別に関わらず、すべての配合で設計基準強度および脱枠時強度を満足した。また、圧縮強度供試体の外形寸法および質量から算出したコンクリートの単位容積質量は、2664 ~ 2737kg/m<sup>3</sup> の範囲にあり（平均 2703kg/m<sup>3</sup>）、目標とする 2700kg/m<sup>3</sup> を概ね満足した。

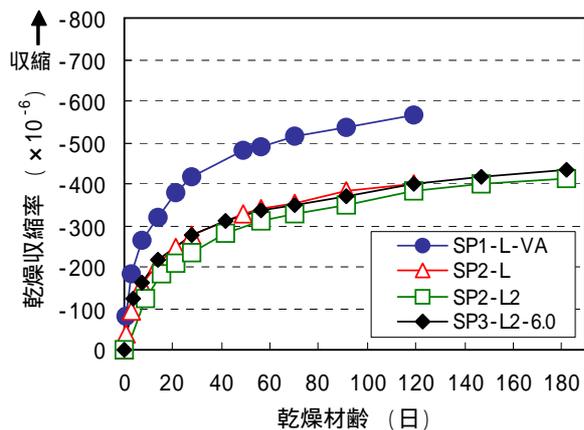


図 - 3 乾燥収縮試験結果

### (2) 乾燥収縮試験結果

フレッシュ性状が良好であった配合について、乾燥収縮試験を行った。ただし、SP3-L2-4.5 はフレッシュ性状が良好であったが、SP2-L2 と高性能減水剤の種類のみが異なる同一配合であるため、乾燥収縮試験は行わなかった。また、石灰石微粉末を用いた SP1-L-VA および SP2-L については、乾燥収縮に一定の傾向が認められた乾燥材齢 119 日（17 週）までの測定とした。乾燥収縮試験結果を図 - 3 に示す。

増粘剤混入型の高性能減水剤である SP2 および SP3 を使用した SP2-L、SP2-L2 および SP3-L2-6.0 はいずれも材齢 182 日まで同様の収縮性状を示し、乾燥材齢 182 日での乾燥収縮率は 400 ~ 450  $\mu$  であった。一方、別添型増粘剤を使用した SP1-L-VA は材齢 119 日まで SP2 および SP3 を用いた他の配合に比べ、200  $\mu$  程度大きな値を示した。また、石灰石微粉末および空気量の相違による乾燥収縮率への影響は認められなかった。

### (3) 凍結融解試験結果

凍結融解試験結果を気泡間隔係数試験結果と併せて表 - 8 に示す。また、凍結融解試験結果を図 - 4 に示す。SP2 混和剤を用いた SP2-L2 配合では、凍結融解 120 サイクル以後に相対動弾性係数は低下し、300 サイクル終了時には 20% となった。一方、SP3 を使用した SP3-L2-4.5 および SP3-L2-6.0 では、300 サイクル終了時での相対動弾性係数はそれぞれ 87%、98% であった。一般に耐久性指数が 60% 以上で耐凍害性に優れているとされており、耐凍害性向上を目的として改良された SP3 を用いることにより、優れた耐凍害性を持つ銅スラグコンクリートの製造が可能であることが明らかとなった。また、空気量の違いによる影響も認められ、空気量を 6.0% とした場合には 4.5% の場合に比べ、若干ではあるが、耐凍害性に優れていた。

外観上の変化については、300 サイクル終了時の質量減少率は、いずれの配合も 0.5% 未満であり、スケー

表 - 8 凍結融解試験結果

配合名	気泡間隔係数 ( $\mu$ m)	耐久性指数 (%)	質量減少率 (%)
SP2-L2	1169	20	0.4
SP3-L2-4.5	622	87	0.0
SP3-L2-6.0	375	98	0.2

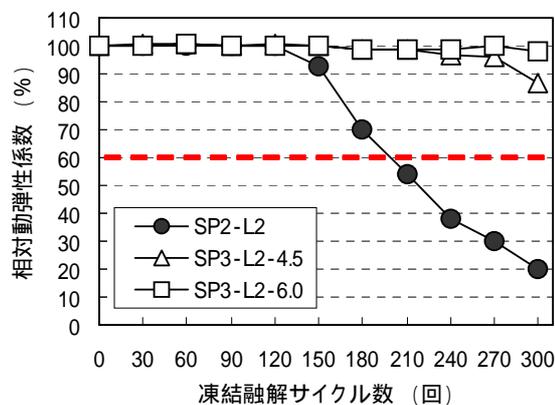


図 - 4 凍結融解試験結果

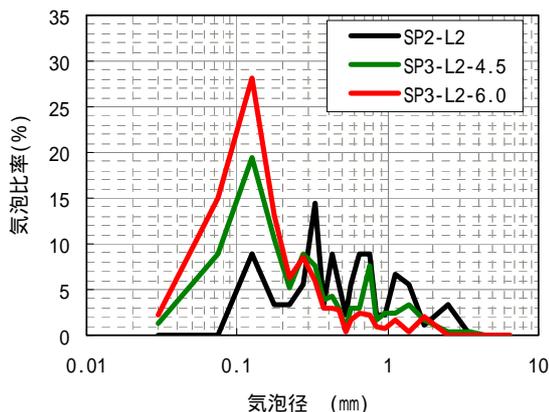


図 - 5 気泡径と気泡比率の関係

リング等は軽微であった。

### (4) 気泡間隔係数試験結果

SP2 を使用した SP2-L2 の気泡間隔係数は 1169  $\mu$ m であり、SP3 を使用した SP3-L2-4.5 および SP3-L2-6.0 では、それぞれ 622  $\mu$ m および 375  $\mu$ m であった。使用した混和剤のみが異なる同じ配合の SP2-L2 に対し、SP3-L2-4.5 の気泡間隔係数は 53% 程度に低減された。SP3 の使用により、比較的大きな径の気泡量が少なくなったことが原因と推察される。

気泡間隔係数試験により求まるコンクリート中の気泡径と気泡比率の関係を図 - 5 に示す。SP2-L2 では、0.2  $\mu$ m 未満の気泡径の割合が小さく、0.2  $\mu$ m 以上の気泡径が 90% 近くを占めた。一方、SP3 を用いた配合では、0.1 ~ 0.15  $\mu$ m の気泡径の割合が最も多く、SP3-L2-4.5 では 19%、SP3-L2-6.0 では 28% を占め、

0.2 μm 未満の気泡径の割合は SP3-L2-4.5 で 40% , SP3-L2-6.0 では 60% 近くを占めた。図 - 5 から明らかなように、SP2 を用いた配合では、0.3 μm 以上の気泡径が SP3 を用いた場合よりも多く存在する。これは消泡成分を多くした SP3 を用いたことにより 0.3 μm 程度以上の気泡が減少し、AE 剤により 0.3 μm 未満の微細な空気泡が連行されたことが原因と考えられる。

銅スラグコンクリートは、銅スラグ細骨材の形状および粒度分布等に起因して、エンラップドエアが増加すると推察される。このため通常の細骨材を用いた場合に比べ、同一空気量の場合、大きな径の気泡の割合が大きくなり、気泡間隔係数も大きな値になると考えられる。一般に気泡間隔係数が 200 ~ 250 μm 以下であれば、優れた耐凍害性が期待できると考えられているが、本実験で扱った範囲では気泡間隔係数が 600 μm 程度であっても、優れた耐凍害性が認められた。これは、銅スラグコンクリートの水セメント比が低いため組織が緻密であり、圧縮強度が大きいことが主たる原因であると考えられる。

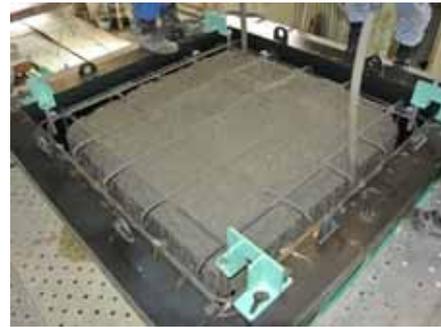


写真 - 2 小型遮蔽容器打設状況

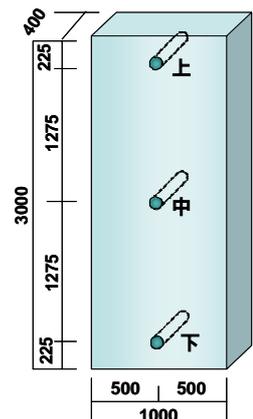


写真 - 3 大型壁脱枠時状況

#### 4. 実機プラントでの部材製造実験

##### 4.1 実験概要

室内実験で決定した配合の銅スラグコンクリートを、岩手県に立地する PCa 製品工場の容量 2.2m<sup>3</sup> の実機ミキサで製造し、実大模擬部材への打設実験および部材からコアを採取し、施工性、強度発現および材料分離抵抗性について確認を行った。模擬部材は、大型壁試験体および小型遮蔽容器の 2 種とした。大型壁試験体は、高さ 3.0m × 幅 1.0m × 厚さ 0.4m の壁形状とし、鉄筋は、長辺方向が D25、短辺方向が D19 とし、125mm 間隔で 2 段に配置した。小型遮蔽容器は、縦 1.4m × 横 1.4m × 高さ 1.3m、部材厚さ 100 ~ 125mm の箱形状とした。鉄筋は D13 とし、縦方向、横方向とも 250mm 間隔で 1 段に配置した。

銅スラグコンクリートの使用材料、配合および練混ぜ方法は、室内試験時と同様とし、大型壁部材には空気量 4.5%、小型遮蔽容器には空気量 6.0% の配合を適用した。コンクリートの配合およびフレッシュコンクリートの試験結果を表 - 9 に示す。大型壁部材の製造実験は冬期に行い、部材高さ 3m を 5 層に分けて打設

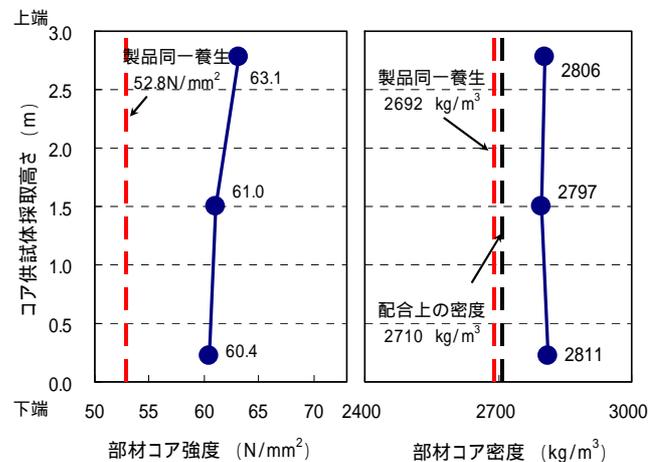


図 - 7 コア供試体試験結果 (材齢 14 日)

し、小型遮蔽容器の製造実験は夏期に行い、箱形状の部材を伏せた状態で部材底面から打設した。コンクリートの締固めは、いずれの部材も棒型振動機を用

表 - 9 コンクリートの配合およびフレッシュコンクリートの試験結果

部材名	W/C (%)	s/a (%)	Air (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					混和剤 (C × %)	スラフ° (cm)	Air (%)	C.T. ( )
				W	C	L2	CUS	G				
大型壁部材	36.0	55.0	4.5	155	431	98	1155	871	1.1	18.5	4.9	6.5
小型遮蔽容器			6.0			96	1129	851				

いて行った。部材の養生は、最高温度 40℃、4h の蒸気による加熱養生とし、翌日に脱枠を行った。

#### 4.2 実験結果

##### (1) フレッシュコンクリートの試験結果

フレッシュコンクリートは、空気量 4.5%、6.0%いずれの配合も、室内試験と同様に各種目標値を満足し、良好な性状を有していた。

##### (2) コンクリートの施工性および仕上り状況

小型遮蔽容器の打設状況を写真 - 2 に、大型壁試験体の脱枠時状況を写真 - 3 に示す。銅スラグコンクリートの打設および、部材表面のコテ押さえは、普通コンクリートと同様に行うことができ、良好な施工性を有していた。また、型枠面の仕上がりも良好で、充填不良や、ひび割れ等は認められなかった。

##### (3) 硬化コンクリートの試験結果

大型壁試験体の 3 点からコアを抜き取り、圧縮強度試験および単位容積質量の測定を行った。コア抜き位置を図 - 6 に、コア供試体の試験結果を図 - 7 に示す。部材から抜き取ったコア供試体の圧縮強度は、上から順に 63.1N/mm<sup>2</sup>、61.0N/mm<sup>2</sup>、60.4N/mm<sup>2</sup>であり、上中下平均で 61.5N/mm<sup>2</sup> となり、設計基準強度の 30N/mm<sup>2</sup> を十分に満足した。また、部材の高さ位置による強度の差異および、単位容積質量の差異はごく僅かであり、均質なコンクリート部材であることが確認された。

##### (4) 放射性廃棄物の格納

放射性廃棄物を模擬したフレキシブルコンテナを、小型遮蔽容器に格納し、試験的に搬出入を行った。遮蔽物格納状況を写真 - 4 に、遮蔽容器吊上げ状況を写真 - 5 に示す。小型遮蔽容器は精度良く製造されており、遮蔽物の搬出入は円滑に行うことができた。また、コバルト 60 線源による放射線(γ線)の照射試験を行った結果、厚さ 10cm の銅スラグコンクリートは同厚の普通コンクリート(単位容積質量約 2300kg/m<sup>3</sup>) に比べ、放射線透過率は約 19% 小さい値を示し、普通コンクリートと同等以上の遮蔽性能を有することが確認された。

#### 4.3 実機試験の考察

銅スラグ細骨材を使用したコンクリートは、施工性、耐久性に優れており、プレキャストコンクリート部材への適用は十分に可能であると考えられる。

#### 5. まとめ

本件のように微粒分量の少ない銅スラグ細骨材を用いたコンクリートの、プレキャスト部材への適用性について検討をした結果、以下の知見を得た。

(1) 銅スラグコンクリートのフレッシュ性状の向上には、増粘剤混入型の高性能減水剤は効果的である。



写真 - 4 放射性廃棄物の格納状況

写真 - 5 遮蔽容器吊上げ状況

- (2) 銅スラグ細骨材を使用した場合、良好なフレッシュ性状を得るためには、増粘剤の使用に加え、単位ペースト量(水+セメント+石灰石微粉末+銅スラグ微粒分)を、300 L/m<sup>3</sup> 以上とする必要がある。
- (3) 銅スラグ細骨材を用いた場合、他の重量骨材などを併用せずにおよそ 2700kg/m<sup>3</sup> の高密度コンクリートとすることが可能であり、遮蔽コンクリートとしての利用も可能である。
- (4) 銅スラグコンクリートは、比較的大きな径の気泡の割合が多くなる傾向にあるが、大きな径の気泡を減らすよう改良を加えた高性能減水剤を用いることにより、耐凍害性凍害性は向上する。
- (5) 水セメント比が小さく、強度発現が良好なコンクリートでは、気泡間隔係数が 600 μ 程度であっても、優れた耐凍害性を有する場合がある。
- (6) 銅スラグコンクリートは、実機プラントでの製造した場合でも、良好な施工性を有しており、普通コンクリートと同様な打設が行うことができる。このため、プレキャスト部材への適用は十分に可能であると考えられる。

銅スラグ細骨材を使用したコンクリートは、天然骨材の供給が困難ななか、産業副産物の有効利用としても期待される。また、主要な材料すべてを東日本大震災の被災地である東北三県から調達可能であり、震災復興材料としても積極的な利用が望まれる。

#### 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.44-48、1998
- 2) 粒状体の粒径分布検出方法：日本国特許庁、公開特許公報(A)、特開平 10-232195、1998.9.2 公開
- 3) 五味信治、柘田佳寛、青沼隆嗣、保坂綱鎮：スラグ骨材を使用した高密度コンクリートの調合とその性質に関する実験、コンクリート工学年次論文集、Vol.30、No.2、pp.433-438、2008