

# 銅スラグ細骨材の建築用プレキャスト コンクリート部材への適用

中瀬 博一\*1・浦辺 真一\*2・片山 悟\*3・伊藤 翔\*4

近年、良質な天然骨材の減少、天然骨材の低品質化、環境保全、資源の有効利用などの観点から、産業副産物を起源とする各種スラグ骨材の利用が注目されている。各種スラグ骨材のうち、銅スラグ細骨材は、銅を精錬する際に副産される溶融状態のスラグを水砕により固化、粒状化したものであり、年間 300 万 t 程度が生産されている。そこで、銅スラグの有効活用、将来的な骨材不足への対応、および環境負荷の低減などを目的とし、建築用プレキャスト部材に用いるコンクリートに銅スラグ細骨材を使用した。銅スラグ細骨材を使用するにあたり、試し練り、実機試験、および模擬部材の製作などを実施し、コンクリートのフレッシュ性状、強度発現および強度補正值（S 値）などを確認し、建築用プレキャスト部材への銅スラグ細骨材の適用が十分可能であることが確認された。銅スラグ細骨材用いたプレキャスト部材は、プレキャスト PC 造建築物の柱、梁および床版部材に採用され、環境への負荷が小さい PC 建築物が実現した。

キーワード：銅スラグ細骨材、環境負荷低減、プレキャストコンクリート

## 1. はじめに

近年、良質な天然骨材の減少、環境負荷低減、資源の有効利用などの観点から産業副産物などの再利用に対する奨励の動きがあり、銅スラグ細骨材の利用が注目されている。2016 年には「JIS A 5011-3 コンクリート用スラグ骨材-第 3 部：銅スラグ骨材」が改正され、土木学会により「銅スラグ細骨材を用いたコンクリートの設計施工指針」が改定された。銅スラグ細骨材は銅製錬炉で溶融水砕されて生産される副産物であり、安定的に産出され、化学的にもきわめて安定した材料である。色調は黒色を呈しており、一般の骨材に比べ密度が 1.4 倍程度と大きいことが特徴である。従来の建設関係事業では密度の大きさを利用して、消波ブロックのコンクリート材料や、ケーソンの中詰めなどに利用されてきた。

JIS A 5011-3 では、銅スラグ細骨材の種類を粒度により 4 種類に区分しており、古くから利用されてきた 5～0.3 mm 銅スラグ細骨材は粗粒率が大きく、微粒分量が少ないためブリーディングが増加しコンクリートの品質が低下す

る傾向にあったが、近年、摩砕処理技術の進展により粒度分布と微粒分の粒形が改善された 2.5 mm 銅スラグ細骨材が製造されるようになり、コンクリートの品質は大きな低下はしなくなった。そこで、産業副産物である銅スラグの有効利用、将来的な骨材不足への対応、環境負荷の低減などを目的とし、建築用プレキャスト部材に用いるコンクリートへの銅スラグ細骨材の適用を試みた。本稿では事前に実施した各種検討の結果と実構造物への適用事例を紹介する。

## 2. 実験概要

### 2.1 実験の要因と水準

実験は、銅スラグ細骨材を使用したコンクリート（以降、銅スラグコンクリートと略称）の建築用プレキャスト部材への適用に際して必要な基礎データの取得を目的として、試し練り、実機試験および模擬部材の製作などを実施し、銅スラグコンクリートのフレッシュ性状、強度発現および構造体強度補正值（S 値）などを確認した。実験の要因と水準を表 - 1 に示す。



\*1 Hirokazu NAKASE

(株)ピーエス三菱 技術本部  
技術研究所



\*2 Shinichi URABE

(株)ピーエス三菱 九州支店  
久留米工場 製品グループ



\*3 Satoru KATAYAMA

(株)ピーエス三菱 大阪支店  
PC 建築部 PC 工事  
グループ (九州駐在)



\*4 Sho ITOU

(株)ピーエス三菱 大阪支店  
PC 建築部 建築設計  
グループ (九州駐在)

表 - 1 実験の要因と水準

要因	水準
実験時期	標準期, 冬期, 夏期
水セメント比	29%, 36%, 47%
模擬部材	柱部材 (大断面), 版部材 (小断面)
圧縮強度	標準養生, 部材同一養生, 部材コア
乾燥収縮	標準期, 水セメント比 36%

2.2 使用材料

コンクリートの使用材料を表 - 2 に示す。銅スラグ細骨材は「JIS A 5011-3 コンクリート用スラグ骨材-第3部: 銅スラグ骨材」に規定される 2.5mm 銅スラグ細骨材 (CUS2.5) を使用し、その他の材料はプレキャスト工場の常用品を用いた。

表 - 2 使用材料

	種類	仕様	記号
セメント	早強セメント	密度 3.14 g/cm <sup>3</sup>	HC
細骨材	砕砂	表乾密度: 2.70 g/cm <sup>3</sup> 吸水率: 1.05%	S1
	山砂	表乾密度: 2.55 g/cm <sup>3</sup> 吸水率: 0.63%	S2
	銅スラグ細骨材 (CUS2.5)	表乾密度 3.48 g/cm <sup>3</sup> , 吸水率 0.13%, FM2.69	CUS
粗骨材	碎石	表乾密度: 2.74 g/cm <sup>3</sup> 吸水率: 0.61%, 実積率 59.0%	G
混和剤	高性能減水剤	ポリカルボン酸系	SP

2.3 コンクリートの調合・練混ぜおよび養生方法

コンクリートの調合、スランプ (スランプフロー) および空気量目標値を表 - 3 に示す。コンクリートの調合は一般骨材のみを使用した既往の調合を参考に、試し練りを行い決定した。銅スラグ細骨材の置換率は、対象物件における設計上のコンクリート単位容積質量の上限値として定められた 2 500 kg/m<sup>3</sup> 以下 (一般のコンクリートに比べ 100 kg/m<sup>3</sup> 程度大きい) を満足し、かつ、リサイクルが想定される一般用途の場合に定められている環境安全品質基準値であるコンクリートの単位質量あたりの鉛 (Pb) 含有量の上限値 150 mg/kg 以下を満足するように、細骨材容積に対し 30% とした。

コンクリートの練混ぜは公称容量 1.5 m<sup>3</sup> の水平 2 軸型強制練りミキサーを用い、1 バッチの練混ぜ容積を 1.3 m<sup>3</sup> とし、モルタル先練り方式で行った。また、練混ぜ時間は W/C 47%~29% で 190~300 秒とした。翌日の脱型までは、図 - 1 に示す温度設定で、蒸気による加熱養生を計 15 時間行った。

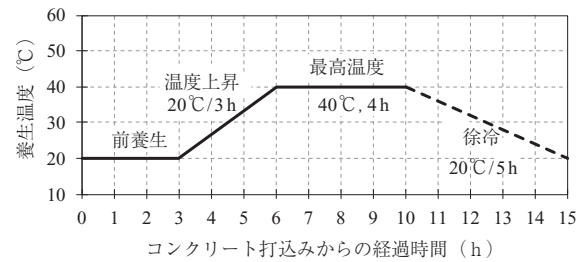


図 - 1 蒸気による加熱養生の温度設定

2.4 模擬部材の形状

プレキャスト部材のコンクリート強度発現を確認するため、大断面部材を想定した柱部材および、小断面部材を想定した版部材を製作し、それぞれから抜き取ったコア供試体により部材コンクリート強度を確認した。模擬部材の形状、コア抜き位置および温度測定位置を図 - 2 に示す。コア供試体は最短の出荷日を想定した材齢 7 日および強度保証材齢である材齢 28 日にそれぞれ部材の中心部および外周部から抜き取った。また、材齢 1 日の脱型時におけるコアの削孔は困難であるため、柱部材では型枠内に設置したシーブ管の中に軽量モールドを挿入し、版部材では軽量モールドを部材コンクリート内に直接埋設し、部材内部で部材と同様の温度履歴で養生を行い、翌朝抜き出して材齢 1 日コア強度試験体の代替として扱った。

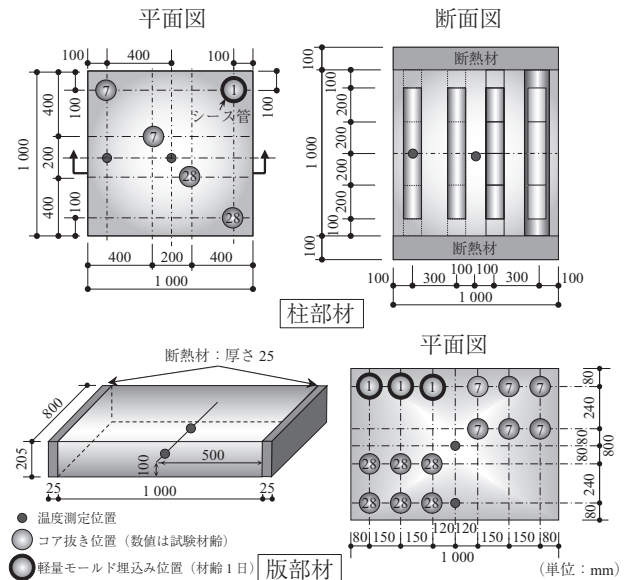


図 - 2 模擬部材の形状

表 - 3 コンクリートの調合

調合名	W/C (%)	s/a (%)	スランプ (スランプフロー) (cm)	Air (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )						単位容積質量 (kg/m <sup>3</sup> )	Pb 含有量 (mg/kg)
					W	HC	S1	S2	CUS	G		
CUS-29	29.0	47.9	(50)	3.0	165	569	283	267	312	891	2 487	126
CUS-36	36.0	49.5	18	3.0	165	458	308	291	341	912	2 475	138
CUS-47	47.0	50.6	12	3.0	165	351	332	314	365	937	2 464	148

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 フレッシュコンクリート

フレッシュコンクリートの試験結果（標準期）を一般骨材の工場実績と併せて表 - 4 に、試験状況を写真 - 1 に、細骨材容積の 30% を銅スラグ細骨材で置換した場合の細骨材粒度分布を図 - 3 に示す。フレッシュコンクリートは一般骨材のみを使用した場合に比べ、粘性が若干大きい傾向であったが、調合および実験時期によらず、いずれも目標値を満足した。混和剤の添加量は一般骨材のみを使用した場合の工場実績と同等であった。また、懸念事項であったブリーディングは、いずれの調合でも一般骨材と同様で問題ない結果であった。これらは図 - 3 に示すように CUS2.5 の粒度分布が一般のコンクリート用細骨材と大きな差異がなく、一般骨材と混合して使用した場合でも、粒度分布に大きな差異が生じないことに起因するものと考えられる。

表 - 4 フレッシュコンクリートの試験結果（標準期）

細骨材種別	銅スラグ細骨材			一般骨材		
	29	36	47	29	36	47
水セメント比 (%)	29	36	47	29	36	47
SP 添加率 (C × %)	1.60	1.05	0.90	1.60	1.00	1.00
スランブ(スランブフロー) (cm)	(53.0)	19	13.5	(54.0)	16.5	11.5
空気量 (%)	2.6	2.3	2.8	2.3	3.0	2.6
コンクリート温度 (°C)	25	23	24	26	26	25

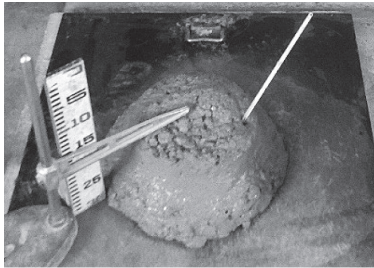


写真 - 1 フレッシュコンクリートの試験状況

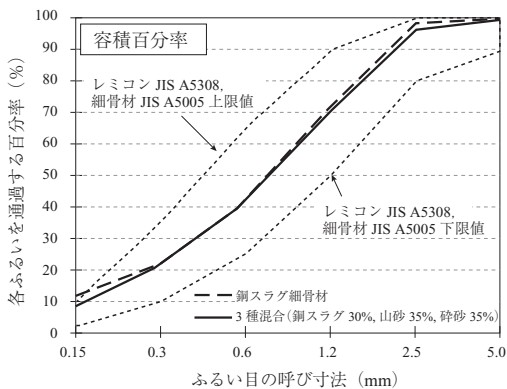


図 - 3 細骨材容積の 30% を銅スラグ細骨材で置換した場合の細骨材粒度分布

#### 3.2 コンクリートの温度履歴

標準期実験における柱部材および版部材のコンクリート温度履歴をそれぞれ図 - 4 および図 - 5 に示す。柱部材のコンクリート温度は、打込みから 0.6~0.8 日程度で最

高となり、そののち緩やかに低下し 4~5 日後に外気温と同等となった。一方、版部材は調合（水セメント比）の違いによる温度差は小さく、養生槽内温度による影響が支配的であり、加熱養生終了後は柱部材に比べ早く温度が低下し、打込みから 2 日後には外気温と同等となった。また、中心部と外周部の最高温度の差は、柱部材では 10~16℃、版部材では最大でも 5℃程度であった。これらの傾向は一般骨材の場合（工場実績）と同様であるため、銅スラグ細骨材の使用によるコンクリートの温度履歴への大きな影響はないものと考えられる。

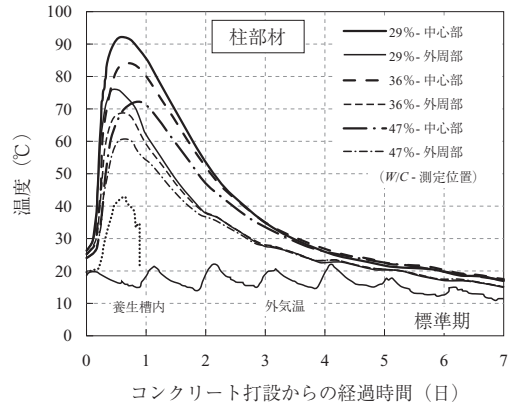


図 - 4 コンクリートの温度履歴 (柱部材)

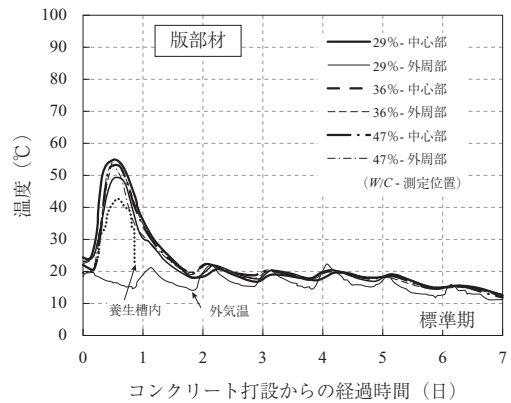


図 - 5 コンクリートの温度履歴 (版部材)

#### 3.3 圧縮強度・静弾性係数

標準期におけるコンクリートの材齢と圧縮強度の関係を図 - 6 に示す。柱部材のコアは版部材のコアに比べいずれの水セメント比でも初期材齢における強度発現が大きい傾向が認められ、この傾向は水セメントが小さいほど顕著であった。これは初期材齢時における部材コンクリートの積算温度に起因するものと考えられ、部材断面が大きいほど、また水セメント比が小さい（単位セメント量が多い）ほど水和発熱による部材コンクリートの温度上昇が大きいためと考えられる。

柱部材から抜き取ったコアにおけるセメント水比 (C/W) と圧縮強度の関係を図 - 7 に示す。材齢 28 日における柱部材のコア強度は、水セメント比 (W/C) が 47% の場合は 55~60 N/mm<sup>2</sup>、36% の場合は 65~75 N/mm<sup>2</sup>、29% の場合は 85~95 N/mm<sup>2</sup> であり、セメント水比 (C/W) が大

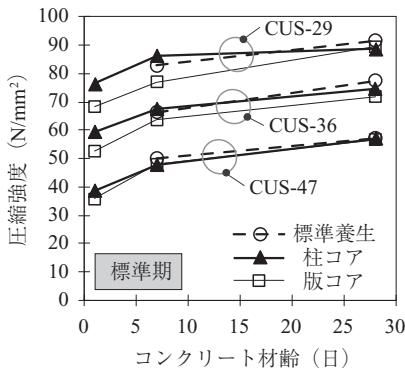


図 - 6 コンクリート材齢と圧縮強度の関係 (標準期)

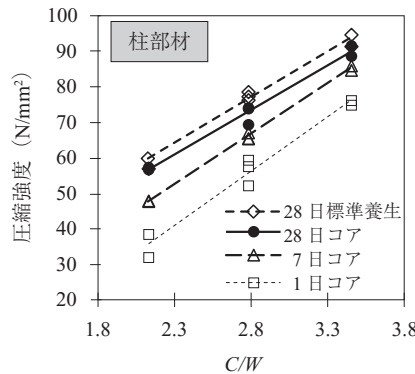


図 - 7 セメント水比と圧縮強度の関係 (柱部材)

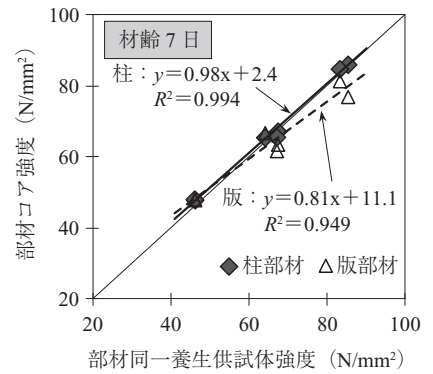


図 - 8 部材同一養生供試体強度と部材コア強度の関係 (材齢 7 日)

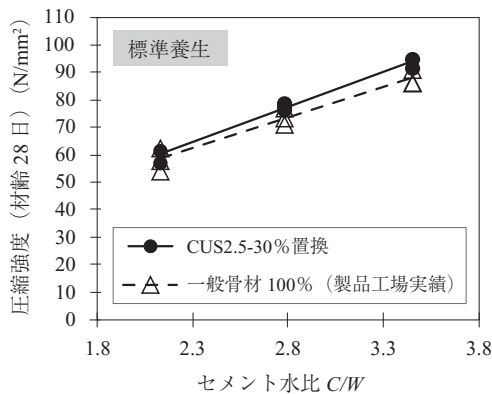


図 - 9 一般骨材との強度比較

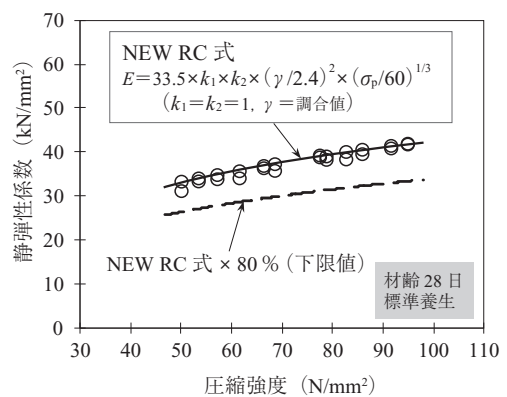


図 - 10 静弾性係数試験結果

きくなるに比例して大きくなった。このため、銅スラグ細骨材を 30% 置換使用した場合には、低品質の骨材を用いた場合などに見られる 60 N/mm<sup>2</sup> を超える高強度域における強度発現の鈍化傾向は認められなかった。

材齢 7 日 (最短の出荷日) における部材同一養生供試体強度と部材コア強度の関係を図 - 8 に示す。部材同一養生供試体強度に対し、柱部材のコア強度はいずれの強度レベルでもほぼ 1 : 1 の関係にあり、版部材のコア強度は 60 N/mm<sup>2</sup> 以下では同程度の値を示した。このため、60 N/mm<sup>2</sup> 以下では、部材同一養生供試体で出荷日における部材コンクリート強度を評価できるものと考えられる。

銅スラグコンクリートと一般骨材のみを使用したコンクリートの強度比較を図 - 9 に示す。銅スラグコンクリートのポテンシャル強度を表す材齢 28 日標準養生供試体の圧縮強度は、プレキャスト製品工場の常用品である一般骨材のみを使用した場合と同等以上の値が得られた。これより強度発現の観点からは銅スラグ細骨材はプレキャスト部材に問題なく使用できるものと考えられる。

静弾性係数の試験結果を図 - 10 に示す。銅スラグコンクリートの静弾性係数はにおけるいずれの強度レベルにおいても JASS10 (2013) で建築部材への適用に際して規定されている日本建築学会の NEWRC 式に対して 80% 以上を十分に満足した。

### 3.4 乾燥収縮

水セメント比 36% のコンクリートの乾燥収縮試験結果を図 - 11 に示す。銅スラグ細骨材で 30% 置換使用したコ

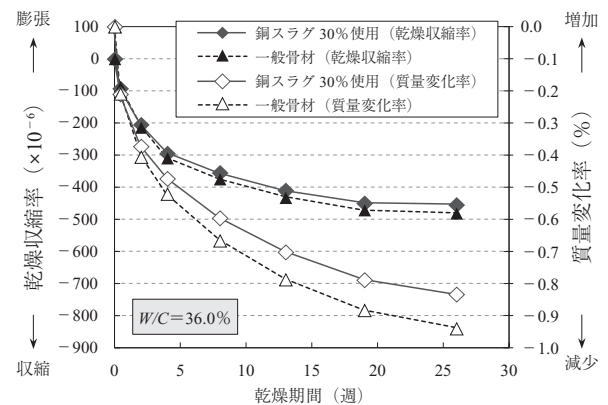


図 - 11 乾燥収縮試験結果

ンクリートの乾燥収縮率は、一般骨材のみを使用した場合と比べ同等もしくは若干小さな値を示し、材齢 26 週で約 450 μ 程度であった。また、質量変化率は一般骨材のみの場合に対し小さかった。銅スラグ細骨材は一般骨材に比べ吸水率が小さいことが主な原因と考えられる。

## 4. 適用事例

### 4.1 物件概要

銅スラグコンクリートは、プレストレストコンクリート (PC) 構造の 2 階建オフィスビルのプレキャスト部材 (柱、梁、ハーフ床版) に適用した。本建物の構造概要を図 - 12 に、プレキャスト部材概要を表 - 5 に示す。部材は

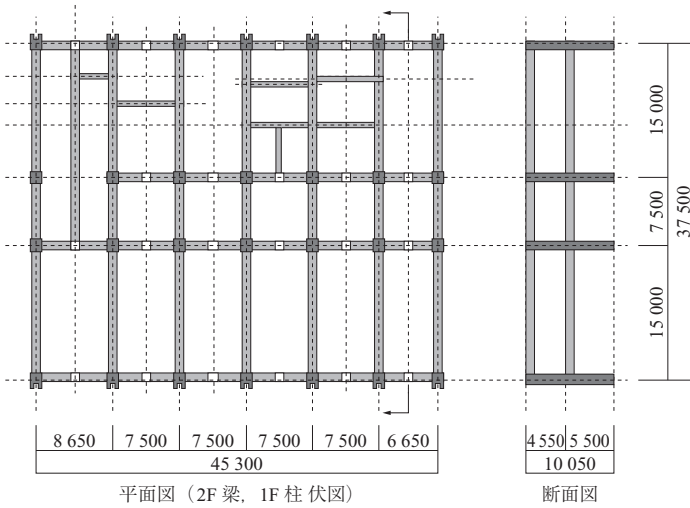


図 - 12 構造概要図 (プレキャスト部材)

合計 540 ピースでコンクリート打設量は約 1 400 m<sup>3</sup>であった。

#### 4.2 銅スラグコンクリートの製造

部材に適用したコンクリートの調合を表 - 6 に示す。コンクリートの調合は JASS10 (2013) に準拠して実機実験の結果をもとに算定した。構造体強度補正值 28S28 は 5.0 N/mm<sup>2</sup> とし、水セメント比は実機試験により得られたセメント水比と圧縮強度の関係式より算定し 36.0% として、設計監理者の承認を得て用いた。

銅スラグ細骨材は、製錬所が所在する香川県直島から海上輸送して福岡県の荏田町に陸揚げののち、プレキャスト製品工場の所在地である久留米市に陸送した。プレキャスト部材の製造期間中に製品工場に入荷する銅スラグ細骨材の品質に大きな変動が生じないようにロット管理、保管方法および運搬中における降雨などにも注意を払った。

#### 4.3 プレキャスト部材の製造

銅スラグコンクリートの打設状況を写真 - 2 に示す。銅スラグコンクリートのフレッシュ性状は良好であり、柱、梁およびハーフ床版いずれの部材形状においても、コンクリートホッパーと棒型振動機を用いる通常の方法で問題なく打込み可能であった。

部材製造期間中に使用したコンクリートの材齢 28 日における標準養生供試体の圧縮強度 (部材の品質基準強度に対する圧縮強度の判定基準) の試験結果を図 - 13 に示す。これより、銅スラグコンクリートの強度発現は良好であり、部材の強度発現を判定する基準値を下回ることはなく、実機試験での結果が精度良く反映されていた。また、強度発現のばらつきを示す標準偏差は 2.0 N/mm<sup>2</sup> となっており、非常に小さな値であるといえる。このため、銅スラグコンクリートは適正な強度管理が行われたものと考えられる。

プレキャスト部材の外観および出荷状況を、写真 - 3 (柱部材) および写真 - 4 (梁部材) に示す。銅スラグコンクリートを使用したプレキャスト部材は、有害なひび割れ発生などの大きな不具合は認められず、部材表面の美観も一般骨材のみを用いた通常のコンクリートと同様であり、構

表 - 5 プレキャスト部材概要

項目		基準値
部材用 コンク リートの 仕様	設計基準強度	50 N/mm <sup>2</sup>
	脱型時所用強度	30 N/mm <sup>2</sup>
	出荷日所用強度	50 N/mm <sup>2</sup>
	単位容積質量	2 500 kg/m <sup>3</sup> 以下
	鉛 (Pb) 含有量	150 mg/kg 以下
	銅スラグ置換率	細骨材容積の 30 %
数量	部材ピース数	約 540 P
	部材総重量	約 3 400 t
	銅スラグ細骨材	約 460 t
最大梁スパン		22.5 m
PC 鋼材定着工法		ディビダーク工法 C-MA type

表 - 6 適用したコンクリートの調合

水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	スランプ (cm)	空気量 (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )						単位容積質量 (kg/m <sup>3</sup> )	Pb 含有量 (mg/kg)
				W	HC	S1	S2	CUS	G		
36.0	49.5	18	3.0	165 (165)	458 (146)	308 (114)	291 (114)	341 (98)	912 (333)	2 475	139

※単位量欄のカッコ ( ) 内は絶対容積 (ℓ/m<sup>3</sup>)



写真 - 2 コンクリート打設状況 (PC 床版)

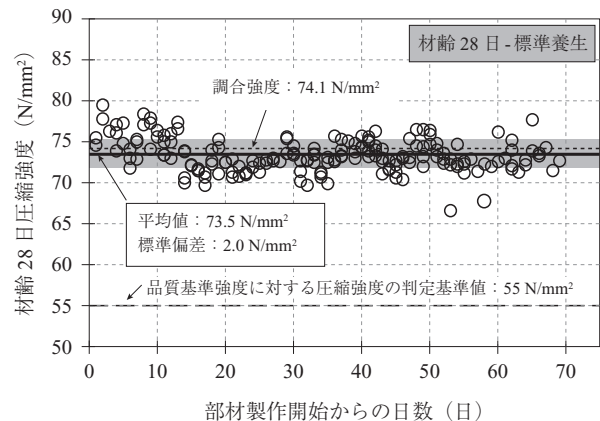


図 - 13 コンクリート強度管理結果 (品質基準強度)

造性能、美観ともに要求性能を満足する高品質なプレキャスト部材の製造が可能であった。また、建築用のプレキャスト部材はさまざまな形状・寸法を有する場合が多く、運搬の際に荷崩れなどのないようバランス良く積載できるように、十分な事前検討を行い、必要により積載用の治具などを用いて対応した。



写真 - 3 プレキャスト柱部材出荷状況



写真 - 4 梁部材（柱付）出荷状況



写真 - 5 梁部材架設状況

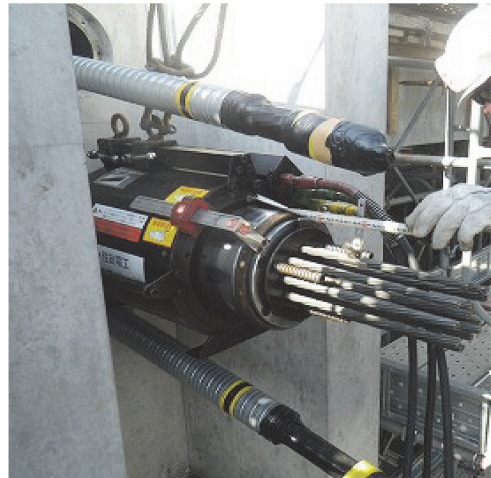


写真 - 6 緊張作業状況

梁部材の架設状況を写真 - 5 に示す。梁部材はスパン梁で 15 m（一部、最大スパン 22.5 m）の長大な部材寸法となり、さらに、銅スラグコンクリートは一般のコンクリートと比べ単位容積質量が大きいため、揚重機の選定や配置にも十分な検討が必要であった。

PC ケーブルの緊張状況を写真 - 6 に示す。PC ケーブルの定着はディビダーク工法とし、建築用に開発されたコンパクトな C-MA タイプを用いた。銅スラグコンクリートの圧縮強度およびヤング係数などの諸物性が一般のコンクリートと同等であるため、プレストレスの導入も問題なく行えた。

プレキャスト工事完了時の建物外観を写真 - 7 に示す。本物件では、コンクリートの素地を生かし外壁に見せる意匠になっており、銅スラグコンクリートを使用したプレキャスト部材は、顧客の要求性能を十分に満足する美観を有していた。

## 5. おわりに

本報告では、銅スラグコンクリートの建築用プレキャスト部材への適用事例を紹介した。銅スラグコンクリートは、一般のものとは密度が大きいことや、リサイクルが想定される一般用途に適用する場合に鉛含有量などに規定があり、使用に際し事前検討が必要となるが、強度発現や施工性になどの物性は一般骨材と同等であることが確認され



写真 - 7 プレキャスト工事完了外観

た。躯体の施工にプレキャストコンクリート工法を用いることで、型枠用木材の消費低減による環境負荷低減や、作業所における建設作業員不足の解消などにも有効である。さらに本事例では、産業副産物である銅スラグ細骨材を天然骨材の代替として使用したことで、環境負荷の低減や循環型社会へ向けて貢献できたものと考えられる。

【2017年9月20日受付】