

銅スラグ細骨材のプレキャスト PC 造建築物への適用

技術本部	技術研究所	中瀬博一
建築本部	PC 建築部	川本浩一
大阪支店	PC 建築部	小野原英一
久留米工場	製品課	浦辺真一

概要：将来的な骨材不足への対応や環境負荷の低減などを目的とし、産業副産物である銅スラグを細骨材として用いたコンクリートを、建築用プレキャスト部材への適用を検討した。検討の結果、銅スラグ細骨材を全細骨材容積の30%置換して使用したコンクリートは、プレキャスト部材の製造に必要な施工性および強度発現などを十分に満足し、一般の骨材と同様に扱うことができることを確認した。このため、銅スラグ細骨材を使用したコンクリートを PC 建築物のプレキャスト部材に適用し、天然の骨材不足への対応や環境負荷低減に貢献できる高品質な部材の製造実績を得た。

Key Words：銅スラグ細骨材、プレキャスト、PC 建築物、環境負荷低減

1. はじめに

近年、良質な天然骨材の減少、環境保全、資源の有効利用などの観点から銅スラグ細骨材の利用が注目されている。従来の銅スラグ細骨材は粒度分布が狭く、粒形も角ばっていたため単位水量や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、摩砕処理により粒度分布と粒形が改善され、コンクリートの品質が大きく低下することはなくなった。そこで、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に、建築用プレキャスト部材に銅スラグ細骨材の適用を検討した。本報告では銅スラグ細骨材を適用するにあたって実施した各種検討の結果と実際のプレキャスト部材に適用した事例を紹介する。

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）のフレッシュ性および圧縮強度発現など、調合算定に必要なデータの取得を目的として実施した。部材製作の工程上、実験は標準期および冬期の2シーズンとし、夏期実験は部材製作と並行して行い、結果をもと

に決定調合の妥当性を照査することとした。実験の要因と水準を表-1に示す。

表-1 実験の要因と水準

要因	水準
実験時期	2シーズン（標準期、冬期）
水セメント比	3水準（29, 36, 47%）
模擬部材	2種（柱部材、版部材）
圧縮強度	標準養生、部材同一養生、部材コア

2.2 使用材料

使用材料を表-2に示す。銅スラグ細骨材はJIS A 5011-3に規定されるCUS2.5に適合するものとして銅製錬工場で新たにJIS認証を取得したものを使用し、その他の材料は、プレキャスト工場の常用品を用いた。



中瀬博一



川本浩一



小野原英一



浦辺真一

2.3 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）および空気量の目標値を表-3 に示す。銅スラグ細骨材の混入率は、設計上のコンクリートの単位容積質量の上限値である 2500kg/m³ 以下（一般のコンクリートに比べ 100kg/m³ 程度重い）を満足し、かつ、リサイクルの際の環境基準値である単位質量あたりの鉛(Pb)含有量の上限値である 150mg/kg 以下を満足するよう細骨材容積に対し 30%とした。

練混ぜは公称容量 1.5m³ の水平 2 軸型強制練りミキサで 1 バッチ 1.3m³ 練りとし、モルタル先練り方式で行った。練混ぜ時間は W/C47%~29%で 190~300 秒とした翌日の脱型までは蒸気による加熱養生を行い、前養生は 20℃で 3 時間、最高温度は 40℃で 4 時間とした。

2.4 模擬部材の形状

構造体強度補正值 (S 値) を決定するため、断面が大きい部材を模擬した柱部材とおよび、断面が小さい部材を模擬した版部材を製作し、抜き取ったコア供試体により部材コンクリートの強度を確認した。模擬部材の形状、コア抜き位置および温度測定位置を図-1 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り、圧縮強度を確認した。また、材齢 1 日の脱型時（プレストレス導入時）におけるコアの削孔は困難であるため、写真-1 に示すように、柱部材では型枠内に設置したシース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埋設し、部材内部で部材と同様の温度履歴で養生を行い

(以降、部材内部養生供試体と略称)、翌日取出して圧縮強度試験を行い材齢 1 日のコア強度の代替とした。

表-2 使用材料

使用材料	種類	記号	仕様
セメント	早強セメント	HC	密度 3.14g/cm ³
	砕砂	S1	表乾密度:2.70g/cm ³
細骨材	山砂	S2	表乾密度:2.55g/cm ³
	銅スラグ細骨材	CUS	表乾密度 3.48g/cm ³ , 吸水率 0.13%, FM2.69
粗骨材	砕石	G	表乾密度:2.74g/cm ³
混和剤	高性能減水剤	SP	ポリカルボン酸系

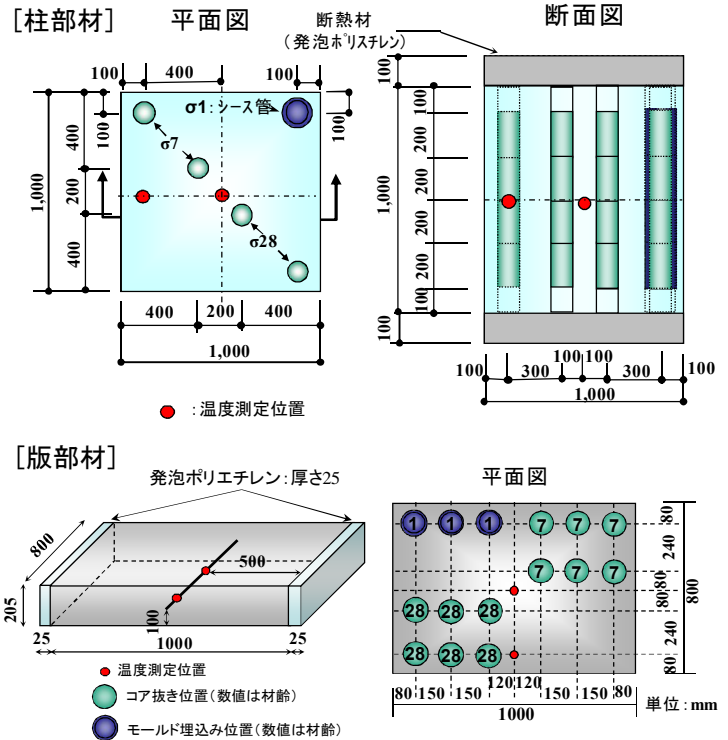


図-1 模擬部材の形状

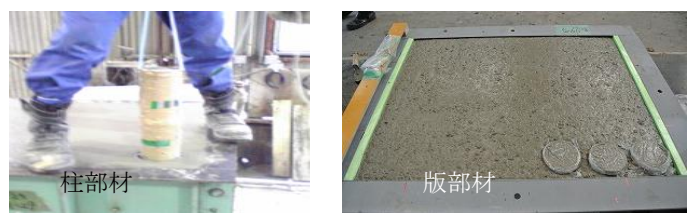


写真-1 部材内部養生供試体の設置状況

表-3 コンクリートの調合

調合名	W/C (%)	s/a (%)	SL (SF) (cm)	Air (%)	単位量 (kg/m ³)						単位容積質量 (kg/m ³)	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	2486	126
CuS-36	36.0	49.5	18	3.0	165	458	308	291	341	912	2474	138
CuS-47	47.0	50.6	12	3.0	165	351	332	314	365	937	2464	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性状は、いずれも目標値を満足した。混和剤添加量は一般の骨材のみを使用した場合と同等であった。これは 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いことが理由として考え



写真-2 フレッシュコンクリートの試験状況

られる。また、従来の銅スラグ細骨材を用いた場合の懸念事項であったブリーディングは、いずれの調査でも発生しなかった。フレッシュコンクリートの試験状況を写真-2 に示す。

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中心部のコンクリート温度履歴をそれぞれ図-2 および図-3 に、最高温度を表-4 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 日程度で最高温度となり、その後緩やかに低下して 4~5 日後に外気温と同等の温度となった。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、加熱養生を終えた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。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。

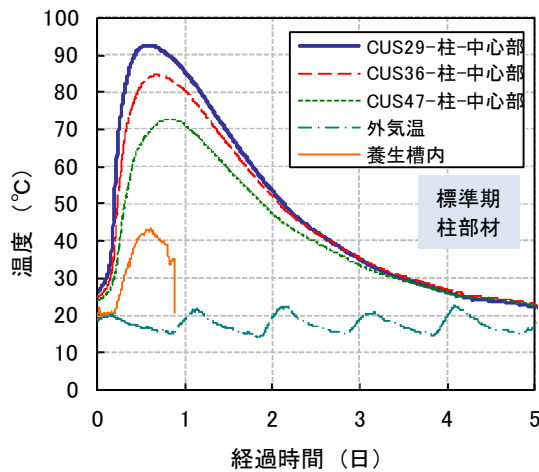


図-2 コンクリートの温度履歴(標準期, 柱部材)

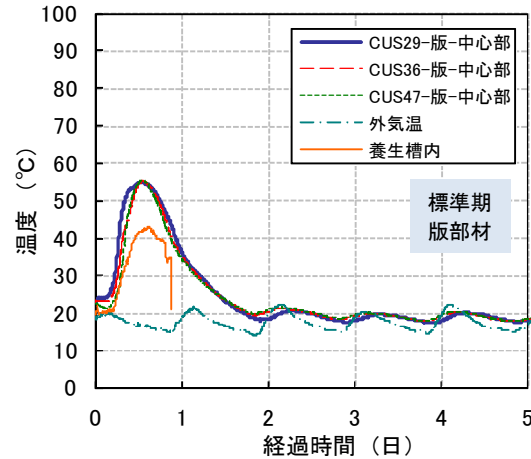


図-3 コンクリートの温度履歴(標準期, 版部材)

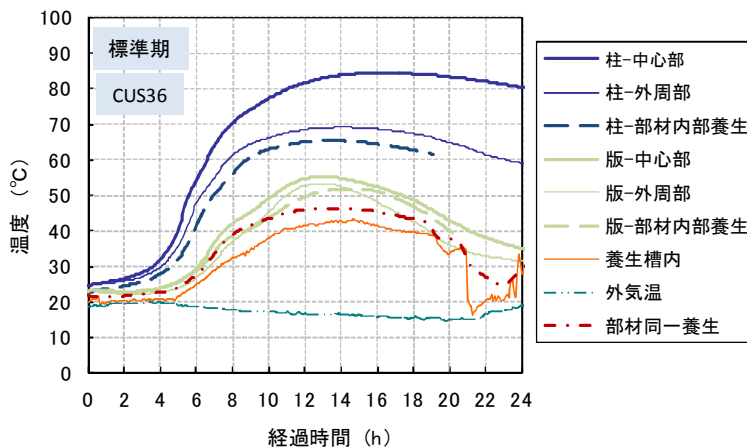


図-4 部材および供試体の温度履歴

表-4 最高温度

調合	測定箇所	標準期	冬期	
CUS29	柱	中心	92.6	75.3
		外周	76.3	64.7
	版	中心	54.8	53.5
		外周	49.7	53.8
CUS36	柱	中心	84.5	73.1
		外周	69.2	60.1
	版	中心	55.3	49.3
		外周	53.3	49.4
CUS47	柱	中心	72.6	63.9
		外周	60.9	53.2
	版	中心	55.4	43.2
		外周	52.8	42.9

部材コンクリートおよび供試体の温度履歴を図-4に示す。プレキャスト部材同一養生供試体は、養生槽内の温度に対し5℃程度高い温度で推移した。一方、部材内部養生供試体の温度は、柱部材および版部材とも、部材外周部の温度と同様もしくは若干低い値で推移した。このことから部材内部養生供試体を用いて脱型時（プレストレス導入時）の部材コンクリート強度をコア供試体の代替として、精度良くかつ安全側に評価できるものと考えられる。

3.3 圧縮強度、静弾性係数

圧縮強度試験結果（標準期、冬期平均）を図-5に示す。柱部材、版部材および部材同一養生供試体の圧縮強度はセメント水比(C/W)の増加とともに直線的に大きくなり、銅スラグ細骨材を30%混入した場合でも、60N/mm²を超える高強度域における強度発現の鈍化は認められなかった。また、柱部材および版部材における材齢28日のコア強度は、標準養生供試体の材齢28日強度に比べ、若干小さい値を示したが、その差として定義される構造体強度補正值 ($_{28}S_{28}$) は、いずれも5N/mm²以下であった。

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-6に示す。これより、銅スラグコンクリートの材齢28日標準養生供試体強度は、プレキャスト製品工場で常用している一般骨材のみを使用した場合と比べ、同等の強度発現が得られることが確認できた。このことから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ことを確認した。

静弾性係数の試験結果を図-7に示す。銅スラグコンクリートの静弾性係数は、いずれの強度レベルにおいても日本建築学会のNEW RC式に対し90%以上の値を示し、建築部材への適用に際して規定されている80%以上を十分に満足した。

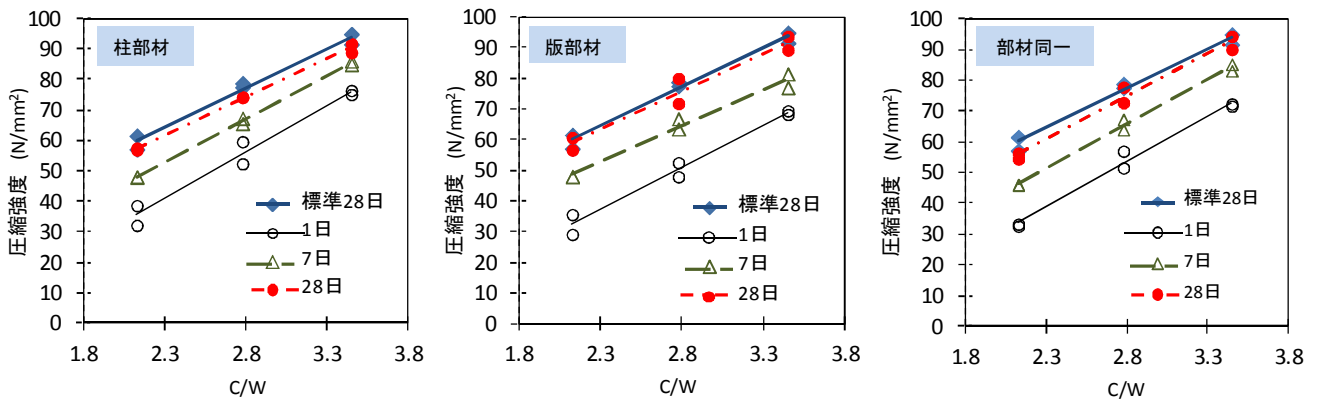


図-5 圧縮強度試験結果

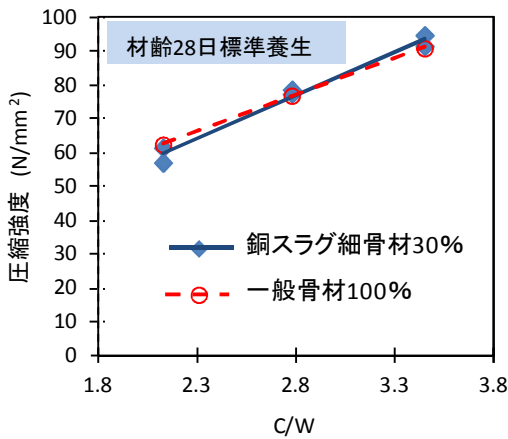


図-6 一般骨材との強度比較

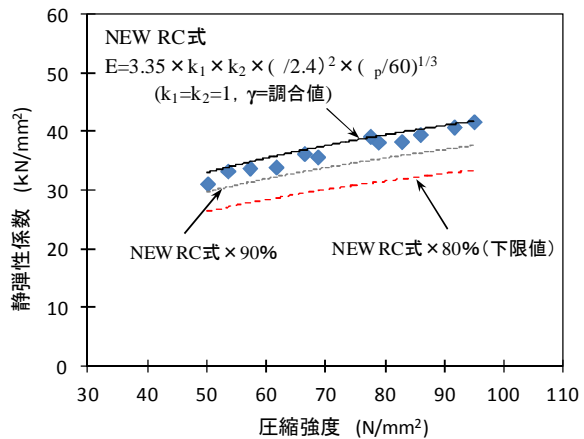


図-7 静弾性係数試験結果

4. 適用事例

4.1 プレキャスト部材およびコンクリートの仕様

銅スラグコンクリートを PC 構造のオフィスのプレキャスト部材（柱、梁、ハーフ床版）に適用した。部材に用いたコンクリートの仕様を表-5 に示す。コンクリートの調合は JASS10（2013）に準拠して算定した。構造体強度補正值 $_{28}S_{28}$ は 5.0N/mm^2 とし、水セメント比は 36.0% とした。適用した銅スラグコンクリートの調合を表-6 に示す。

4.2 プレキャスト部材への適用性

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、通常の方法で問題なく打込み可能であった。また、強度発現も良好であり、部材表面の美観（色合い）も一般骨材の場合と大きな差異はなく、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。銅スラグコンクリートの打込み状況を写真-3 に、プレキャスト部材の外観の一例を写真-4 および写真-5 に示す。

表-5 コンクリートの仕様

項目	基準値
設計基準強度	50 N/mm ²
脱型時所用強度	30 N/mm ²
出荷日所用強度	48 N/mm ²
単位容積質量	2500 kg/m ³ 以下
鉛(Pb)含有量	150 mg/kg 以下
銅スラグ混入率	細骨材容積の 30%

表-6 適用した銅スラグコンクリートの調合

調合	W/C (%)	s/a (%)	スランプ [°] (cm)	Air (%)	単位量 (kg/m ³)						単位容積質量 (kg/m ³)	Pb 含有量 (mg/kg)
					W	C	S1	S2	CUS	G2		
CUS50	36.0	49.5	18	3.0	165	458	308	291	341	899	2,462	139



写真-3 コンクリート打込み状況



写真-4 柱部材外観



写真-5 床版部材外観

5. まとめ

本報告は、銅スラグ細骨材を使用したコンクリートの建築用プレキャスト部材への適用化に向けて実施した各種試験結果と適用事例を示した。銅スラグコンクリートは、密度が大きいことや鉛含有量に規定があるため、調合に若干の制約を受けるものの、部材の重量増を除き、施工性および強度発現においては一般骨材と同様に扱える材料であることが確認された。銅スラグ細骨材は工業製品であり、供給量および品質の両面で安定した材料であるため、良質な天然骨材の安定供給が不安視される今後に向けての一つの準備が整ったものと考えられる。