

[21] コンクリート二次製品工場において排出するセメントスラリーの再利用に関する研究

正会員 伽場重正 (金沢大学)
 正会員 川村満紀 (金沢大学複合材料
 応用研究センター)
 正会員 鳥居和之 (金沢大学)
 正会員 ○竹本邦夫 (金沢大学複合材料
 応用研究センター)

1. まえがき コンクリート二次製品工場から排出されるセメントスラリーの適切な処理が問題となっている。本研究は P. C. 杭製造時に排出されるセメントスラリーを高炉スラグおよび脱硫石膏を結合材とするコンクリートのアルカリ刺激剤として利用することを目的としたものである。コンクリート二次製品工場における排出セメントスラリーを再利用するにあたっての一つの大きな問題点は遠心力締固め直後において各コンクリート製品中に残留するセメントスラリーの水セメント比が大きく変動することである。本研究においては、まず H コンクリート工場において P. C. 杭の製造時に排出されるセメントスラリーのセメント量、水量およびシルト分を推定することによって水セメント比の変動の特徴を把握するとともにセメント量および水量を推定することによって製造されるセメントスラリー、脱硫石膏および高炉スラグを結合材とするコンクリートの圧縮強度を検討した。さらに、セメントスラリーを使用した高炉スラグ・脱硫石膏コンクリートの強度発生の特徴と水和反応特性の関連を明らかにするため、走査型電子顕微鏡による内部組織の観察及び示差熱分析により考察を行った。

2. 実験概要

表-1 P. C. 杭コンクリートの配合

最大寸法 mm	水セメント比 %	細骨材率 %	単位量 (kg/m ³)						混和剤
			セメント量	S		G			
				珪砂	川砂	珪石	砕石		
25	31.5	40	460	353	353	848	214	6.9	

2.1 セメントスラリーの水セメント比の決定

本研究に使用したセメントスラリーは、P. C. 杭製造過程（使用材料及び練り混ぜ時のコンクリートの配合は表-1 に示す通りである。）における遠心力締固め終了時に採取したものである。セメントスラリーの水セメント比の推定には本研究では塩酸とセメントの反応熱による方法を採用した。なお、セメントスラリーにはシルトや型枠油等の不純物も含有している。

2.2 スラリーを使用した高炉スラグ・脱硫石膏コンクリートの強度試験

打設したコンクリートの種類及び配合はスラリーの水セメント比を考慮して表-2 のように決めた。供試体は直径10cm、高さ20cmの円柱で、所定期間水中養生後、圧縮及び引張強度試験を行った。使用した高炉スラグは市販のスラグ粉末（S 社製）である。使用した骨材の物理的性質は表-2 に示す通りである。

表-2 コンクリートの配合・骨材の物理的性質

シメント比を考慮して表－２のように決めた。供試体は直径10cm、高さ20cmの円柱で、所定期間水中養生後、圧縮及び引張強度試験を行った。使用した高炉スラグは市販のスラグ粉末（Ｓ社製）である。使用した骨材の物理的性質は表－２に示す通りである。

No	結合材の割合			単位結合材量	水結合材比	S/G	骨材	
	スラグ	石膏	セメント				細骨材 比 重	粗骨材 2.58 2.60
1	85	13	2	300 kg	0.45	45%	吸水率	2.80% 0.80%
2	85	10	5		0.55			
3	85	7	8		0.65			
4	50	0	50	350 kg	0.50		粗粒率	2.35 7.23
5	60	0	40		0.55			
6	70	0	30		0.60			
					0.65		最大寸法	25 mm

2.3 示差熱分析 (DTA) 及び走査型電子顕微鏡 (SEM) による観察

示差熱分析及び走査型電子顕微鏡に供した試料は、表-2 に示す各配合のペースト部分に相当するものである。直径 5 cm、高さ 10 cm のペースト供試体を所定期間水中養生後破壊し、示差熱分析に対する試料は試料断片を指頭を感じなくなるまで乳鉢で粉碎した。示差熱分析装置はサーモフレックス(理学電機社製)である(昇温速度: 10°K/min 標準試料: アルミナ粉末)。また、SEM に対しては破断試料を真空乾燥後、破断面を炭素及び金で蒸着し観察した。

3. 実験結果と考察

3.1 採取セメントスラリー中のセメント量の変動

図-1 はコンクリート工場において 3 日間引続き採取したスラリー中の水セメント比の変動状況を示したものである。図-1 に示される水セメント比の大きな変動は、P. C. 杭の杭径及び遠心力締固め時に加わる回転エネルギー等

によって影響される。³⁾このように水セメント比が大きく変動するセメントスラリーをコンクリート製品に再利用する場合、コンクリートの品質のパラツキが問題となる。まず、本実験において採用したような方法によって水セメント比を推定して一定の目標配合のコンクリートを作製した場合のバッチ間の圧縮強度の変動の程度について検討した。8種類の採取スラリーに対して一定の配合(高炉スラグ:石膏:セメント=85:7:8,単位結合材量350kg,水結合材比0.55)のコンクリートを打設し、材令4週における圧縮強度の変動の程度を示すと表-3のようである。表-4は分散分析によってバッチ間の有意差検定を行った結果を示したものである。表-4より明らかにバッチ間には有意差が存在する。このように異ったスラリーを連続して使用して作製したコンクリートの強度の変動係数は通常のコンクリートの場合よりかなり大きくなることがわかる。水セメント比推定の精度¹⁾を考えると、このような異ったスラリー

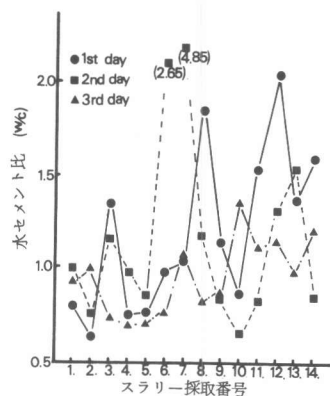


図-1 スラリーの水セメント比の変動

表-3 圧縮強度試験結果

	強度試験値				各バッチの 変動係数
	243	207	218	223	6.8 %
a	142	137	161	147	7.0 %
b	179	168	168	172	3.0 %
c	161	146	152	153	4.0 %
d	190	190	191	190	0.3 %
e	155	152	163	157	3.0 %
f	123	124	130	126	2.5 %
g	195	227	241	221	8.7 %
h	平均				174 kg/cm ²
	バッチ間変動係数				18.9 %

表-4 分散分析結果

因子	SS	r	mS	F	F _{0.05}	p %
級間	26000	7	3720	25	2.68	88
級内	2400	16	150			12
計	28400	23				100

を用いたコンクリートの圧縮強度のバッチ間の変動は、水セメント比推定の誤差のほかにスラリー中のシルト分等の不純物に起因するものと思われる。

3.2 スラリーを使用した脱硫石膏・高炉スラグコンクリートの強度特性

図-2は、各種コンクリートのスランプと単位水量の関係を示したものである。石膏を含む結合材を用いたコンクリートは一定の単位水量において高炉スラグコンクリートよりも小さいスランプを示す傾向がある。しかし、通常のセメントコンクリートと同様に排出セメントスラリーを用いた石膏・高炉スラグコンクリートにおいてもワーカーブルな範囲ではスランプは単位水量と直線関係にある。

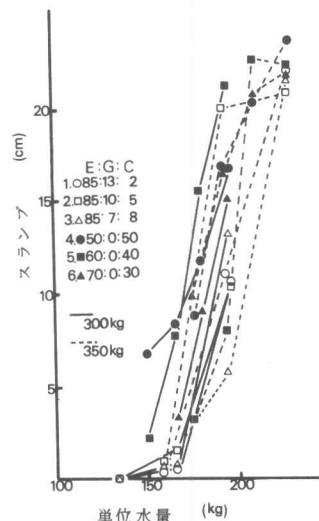


図-2 スランプと単位水量の関係

図-3及び4は圧縮強度(材令4週)と水結合材比(W/B)の関係を示す。図-3より明らかなように、脱硫石膏を含む結合材を用いたコンクリート(配合1~3)では単位結合材量(B) 300kg/m³のコンクリートの圧縮強度は水結合材比の増加とともにほぼ直線的に低下する。一方、単位結合材量の大きいB=350kg/m³においてはW/B=0.55で最大値を示す。しかし、高水結合材比において、単位結合材量が大きい方が大きい強度を示す場合もあり、アルカリ刺激剤として普通ポルトランドセメントを使用したコンクリートに関する小林・魚本²⁾の結果と異っているようである。石膏を含まない高炉スラグコンクリートにおいては、図-4より本実験において採用した水結合材比の範囲内では圧縮強度はW/Bとほぼ直線関係にあることがわかる。

図-5は、結合材量350kg/m³における材令と圧縮強度の関係を示したものである。図-5より、配合2及び3は材令にともなう強度の伸びが小さいことがわかる。

以上の結果より、セメントスラリーを高炉スラグ及び脱硫石膏結合材とともにコンクリート用結合材として利用する場合の最適配合割合は、高炉スラグ:脱硫石膏:セメント=85:13:2である。一方、脱硫石膏を含

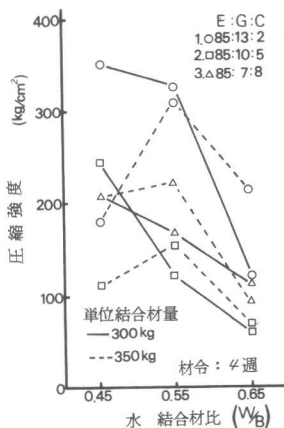


図-3 圧縮強度とW/Bの関係

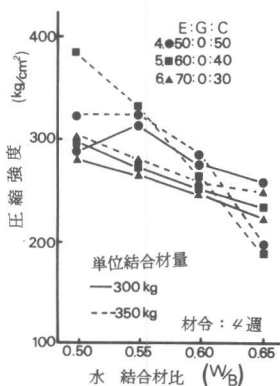


図-4 圧縮強度とW/Bの関係

ない高炉スラグコンクリートは低水結合材比において、かなり大きな圧縮強度を示す。しかし、上述のようにセメントスラリーの水セメント比は大きく変動するので、排出セメントスラリーを実際に使用するにあたって、必ずしも所定の配合(特に低水結合材比の配合)の高炉スラグコンクリートを打設することができないことに注意する必要がある。

3.3 示差熱分析および走査型電子顕微鏡観察

(1) 示差熱分析

図-6, 7, 8は、高炉スラグ:脱硫酸石膏:セメント=85:13:2, 水結合材比=0.45, 0.55および0.65の各配合に対する硬化結合材の各材令におけるDTA曲線である。これらの図によると、エトリンガイトの吸熱ピークが認められるが、材令にともなう変化は顕著ではないようである。しかし、石膏の吸熱ピークは材令とともに減少し、ピークの大きさの減少の度合は水結合材比が0.45以上においては水結合材比が小さい程著しいようである。

しかし、図-9より明らかなようにW/B = 0.35においては材令にともなう石膏の吸熱ピークの変化はほとんどみられない。このことは、W/B = 0.35においては石膏を消費するような反応が水結合材比が0.45以上におけるほど活発でないことを示している。魚本・小林⁴⁾はX線によって同様な結論を得ている。

図-10, 11はセメントスラリーおよび高炉スラグ:セメント=50:50, W/B = 0.55に対するDTA曲線を示している。両者ともに大きな水酸化カルシウムの吸熱ピークが認められる。セメントスラリーでは長期材令においても水酸化カルシウムのピークの大きさにほとんど変化はないが、高炉スラグを含む硬化ペーストのDTA曲線における水酸化カルシウムのピークは材令とともに小さくなる。また、図-11に示すDTA曲線におけるC-S-H系およびC-A-S-Hのピークが図-10のセメントスラリーにおけるより顕著に認められることより、高炉スラグ結合材ではセメントスラリーのアルカリ刺激による潜在水硬性が発揮され、強度に貢献していることがわかる。DTA曲線のピークに付した記号の意味はつぎのようである。s: C-S-A系

e: エトリンガイトのピーク, h: C-A-S-H
g: 石膏, c: 水酸化カルシウム

(2) 走査型電子顕微鏡による観察

写真-1は高炉スラグ:石膏:セメント=85:13:2, 水結合材比=0.45のSEM像を示す。強度発現の良好な配合割合に相当する硬化結合材においては、エトリンガイトの針状結晶の生成がいちじるしいことがわかる。さらに、これらの針状結晶は比較的大きな石膏粒子

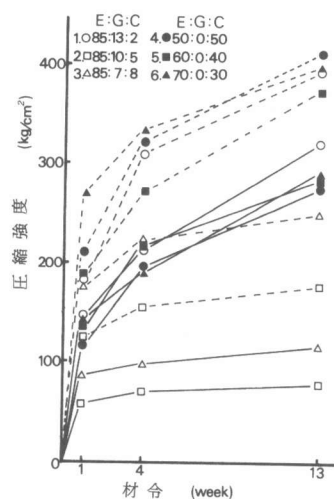


図-5 圧縮強度と材令の関係

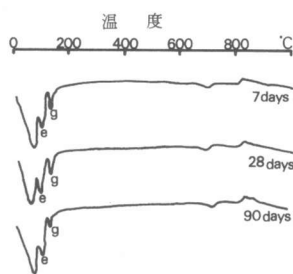


図-6 高炉スラグ:石膏:セメント=85:13:2, W/B = 0.45のDTA曲線

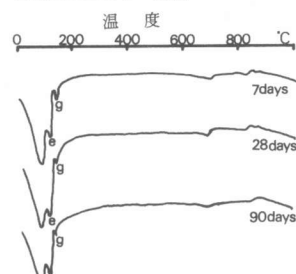


図-7 高炉スラグ:石膏:セメント=85:13:2, W/B = 0.55のDTA曲線

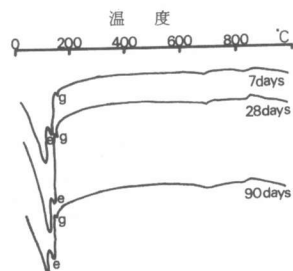


図-8 高炉スラグ:石膏:セメント=85:13:2, W/B = 0.65のDTA曲線

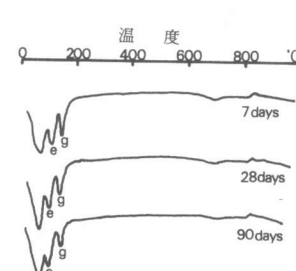


図-9 高炉スラグ:石膏:セメント=85:13:2, W/B = 0.35のDTA曲線

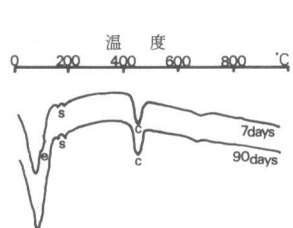


図-10 セメントスラリーのDTA曲線

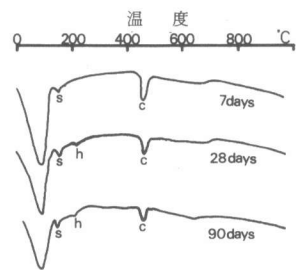


図-11 高炉スラグ:セメント=50:50, W/B = 0.55のDTA曲線

付近に多数存在していることがわかる(写真2)。W/B=0.55および0.65においても写真-3および4のように針状のエトリンガイトの結晶がみられた。一方石膏粒子の表面は写真-5および6に示すように水和反応の進行とともに溶解して大きく変化していることがわかる。このように石膏-高炉スラグコンクリートにおいては石膏粒子表面の溶解にともなってその周囲にエトリンガイトの針状結晶が生成されるようである。写真-7は高炉スラグ:石膏:セメント=85:10:5, W/B=0.45のSEM像である。写真-1および7を比較すると石膏量の相違によってエトリンガイトの針状結晶の大きさが著しく異っている。すなわち、石膏量が少ない程エトリンガイトの針状結晶は小さくなる。このように、生成されるエトリンガイトの結晶形態の相違が高炉スラグ-石膏コンクリートにおける各結合材の配合割合による比較的大きな強度差の一因であると考えられる。

結合材が高炉スラグとセメントスラリーのみで構成されている場合には、写真-8に示すように水酸化カルシウムの結晶および針状のC-S-Hゲルがみられる。このことは示差熱分析によっても示された(図-11)。

4. 結 論

コンクリート二次製品工場において排出するセメントスラリーをコンクリート用結合材として再利用する場合、通常のコンクリートよりも圧縮強度の変動がかなり大きくなることおよびセメントスラリーの水セメント比の変動がかなり大きいので所定の

配合のコンクリートを作り、その変動を少なくする方法を講ずる必要がある。セメントスラリーを使用した高炉スラグ-脱硫石膏コンクリートにおいて生成されるエトリンガイトの結晶形態は結合素材の配合割合によって異なるようである。そのような結晶形態が石膏-高炉スラグコンクリートにおける強度に影響すると思われる。

参考文献

- 1) 神田: "まだ固まらないコンクリートの水セメント比の測定法" コンクリートライブラリー 第38号
- 2) 小林・魚本他: "高炉スラグ・セッコウ系結合材を用いたコンクリートに関する研究(2)" 生産研究 '78
- 3) 榎場・川村他: 昭和54年度研究発表会概要集 土木学会中部支部
- 4) 小林・魚本他: 高炉水砕スラグ・セッコウ系結合材を用いたコンクリートの圧縮強度特性" 第1回コンクリート工学年次講演会論文集

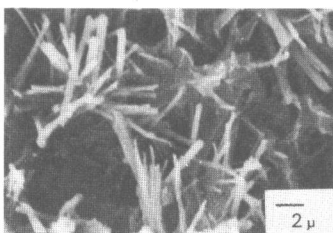


写真-1 高炉スラグ:石膏:セメント=85:13:2, W/B=0.45のSEM像

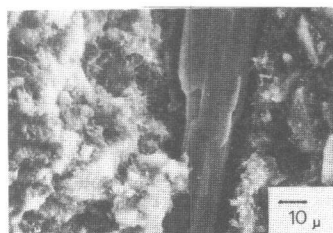


写真-2 高炉スラグ:石膏:セメント=85:13:2, W/B=0.35のSEM像

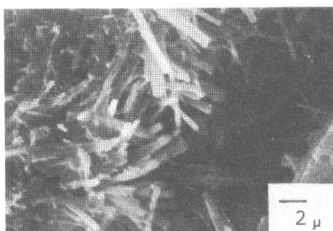


写真-3 高炉スラグ:石膏:セメント=85:13:2, W/B=0.55のSEM像

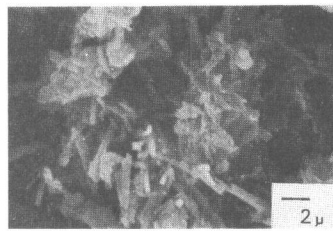


写真-4 高炉スラグ:石膏:セメント=85:13:2, W/B=0.65のSEM像

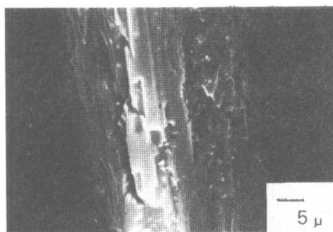


写真-5 高炉スラグ:石膏:セメント=85:13:2, W/B=0.35のSEM像

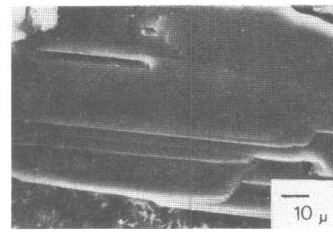


写真-6 高炉スラグ:石膏:セメント=85:13:2, W/B=0.45のSEM像

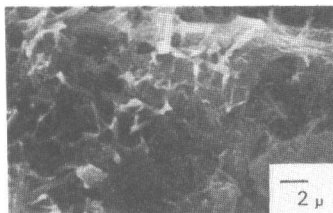


写真-7 高炉スラグ:石膏:セメント=85:10:5, W/B=0.45のSEM像

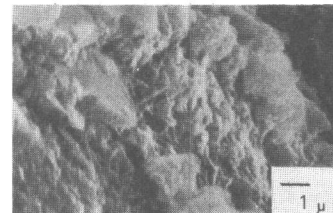


写真-8 高炉スラグ:セメント=50:50 W/B=0.55のSEM像