

廃棄物再資源化研究会

平成 13 年度 第 2 回活動報告会

「石膏ボード廃材再資源化研究部会」 成果報告書

1. はじめに

前年度は、石膏ボード廃材を微粉碎し、150℃で24時間乾式加熱処理によりβ型半水石膏とした場合の硬化性状、ならびに生コンスラッジ（簡易脱水によるスラッジケーキ）と高炉スラグ微粉末から成る結合材（以下、スラグスラッジ結合材と称する）の強度発現促進用混和材としての石膏ボード廃材（β型半水石膏）の利用に関して実験的検討が行われた。その結果として、β型半水石膏にすると、加水すれば硬化するものの、市販品に比べて成型性や強度面で劣ること、石膏混入によりスラグスラッジ結合材の短期および長期強度はともに大きく増加し、廃石膏も市販品の半水石膏と同等の効果があることが分かった。石膏混入による強度発現効果は、石膏と高炉スラグとの反応によりエトリングイトが生成されるためである。しかし、石膏ボード廃材を粉碎・表面紙分離後、加熱工程が処理工程に新たに加わると処理コストの高騰をまねき、また半水石膏の凝結促進や気中不安定性の問題等が懸念される。

そこで、本年度は、前年度の研究成果を基に、石膏ボード廃材を非加熱のまま利用することを前提に、後述のスラグスラッジ結合材の強度発現促進および収縮低減用混和材としての利用、ならびに生コンスラッジの安定型廃棄物処理への利用に関して部会内で実施された実験結果について報告する。

2. 部会活動記録

第一回部会は、平成13年7月5日（木）に開催され、これまでの経過報告ならびに今後の展開について審議された。経過報告として、「石膏ボードリサイクル設備」（八木運送）の紹介、「解体廃石膏ボードの再資源化技術開発」海外調査、北米調査団報告書の紹介、予備実験結果の報告がなされた。ここで、予備実験結果では、非加熱の廃石膏（全量二水石膏）でも前年度の加熱試料（全量半水石膏）の場合と同等の効果が得られることが示された。今後の展開として、基礎研究では、石膏ボード廃材中の不純物、SO₃管理、応用研究では、スラグスラッジ結合材およびコンクリートの初期強度発現および収縮低減用混和材としての利用について研究活動を行うことになった。

第二回部会は、平成14年2月8日（金）に開催され、第一回部会議事録の確認、これまでの経過報告ならびに今後の展開について審議された。経過報告として、実験結果（石膏ボード廃材の有効利用に関する実験的研究）、実験計画（廃石膏混入コンクリートの性状把握実験）、特許出願申請（生コンスラッジの安定型廃棄物処理への石膏ボード廃材の利用方法）の報告がなされた。実験計画については、コンクリート二次製品工場におけるゼロエミッション化の動向に応じて、生コンスラッジの有効利用として生コンスラッジ混入によるコンクリートの収縮増加や強度低下を補うために廃石膏を利用した場合の効果について検討を行うことを目的としたものである。今後の展開としては、これまでの研究の継続、廃石膏混入コンクリートの基礎性状、埋め戻し材および農地改良材への利用について、引き続き研究活動を行うことになった。

3. スラグスラッジ結合材の強度発現促進および収縮低減用混和材としての利用

3. 1 実験概要

生コンスラッジの建築・土木二次製品への有効利用を目的に、生コンスラッジ（スラッジケーキ）と高炉スラグ微粉末から成る結合材（スラグスラッジ結合材）の強度発現促進および収縮低減用混和材として石膏ボード廃材の利用について実験的検討を行った。

3. 2 実験方法

1) 使用材料

表 1 に本実験の使用材料を示す。生コンスラッジには、空圧式脱水機による含水率=240%のスラッジケーキ、混和材料には高炉スラグ微粉末および高性能 AE 減水剤を使用した。また、廃石膏には、石膏ボードリサイクル工場で石膏ボード廃材を破砕機、ロールミルにより細粉碎し、振動篩機により表面紙を分離した後の石膏粉を 1.2mm アンダーに粒度調整したものを使用した。表 2 に、廃石膏の計量試験結果を示す。

表 1 使用材料

生コンスラッジ	スラッジケーキ 含水率=240%
混和材料	高炉スラグ微粉末 密度=2.89g/cm ³ 、比表面積=6140cm ² /g 高性能 AE 減水剤 ポリカルボン酸系、標準使用量 0.5~2.0 (C×wt%)
石膏ボード廃材	非加熱試料 (全量二水石膏) 密度=2.34g/cm ³ 、1.2mm アンダー SO ₃ 含有量 43~46%

表 2 廃石膏の計量試験結果

計量項目	計量方法	計量結果
カドミウム	環境庁告示第 46 号 ICP-MS 法	0.004mg/l
鉛	環境庁告示第 46 号 ICP-MS 法	0.001 mg/l 未満
六価クロム	環境庁告示第 46 号吸光光度法	0.005mg/l 未満
ひ素	環境庁告示第 46 号水素化物発生 AAS 法	0.001mg/l 未満
総水銀	環境庁告示第 46 号還元気化 AAS 法	0.0005mg/l 未満
セレン	環境庁告示第 46 号水素化物発生 AAS 法	0.001 mg/l

2) 使用調合

表 3 に使用調合を示す。シリーズ①では、廃石膏混入がスラグスラッジ結合材の圧縮強度発現性状に及ぼす影響、シリーズ②では、廃石膏混入率がスラグスラッジ結合材の圧縮強度および収縮性状に及ぼす影響について検討した。

表3 使用調合

シリーズ①：廃石膏混入が圧縮強度発現性状に及ぼす影響					
$Sd/(Sd+Sg)$ (%)	$W/(Sd+Sg)$ (%)	$W^*/(Sd+Sg)$ (%)	$Gy/(Sd+Sg)$ (%)	$Sp/(Sd+Sg)$ (%)	フロー値
20	60	12	0	適宜混入	180~200
20	60	12	10		
シリーズ②：廃石膏混入率が圧縮強度および収縮性状に及ぼす影響					
$Sd/(Sd+Sg)$ (%)	$W/(Sd+Sg)$ (%)	$W^*/(Sd+Sg)$ (%)	$Gy/(Sd+Sg)$ (%)	$Sp/(Sd+Sg)$ (%)	フロー値
20	65	17	0	0.3	142
20	65	17	5	0.5	189
20	65	17	10	0.8	198
20	65	17	20	1.0	184
20	65	17	30	1.8	135
20	65	17	40	3.5	174

* Sd ：スラッジケーキ固形分、 Sg ：高炉スラグ微粉末、 W ：含水量+加水量、 W^* ：加水量、 Gy ：廃石膏、 Sp ：高性能 AE 減水剤
 $Sd/(Sd+Sg)$ ：スラッジケーキ固形分混入率、 $W/(Sd+Sg)$ ：水結合材固形分比、 $W^*/(Sd+Sg)$ ：加水率、 $Gy/(Sd+Sg)$ ：廃石膏混入率

3) 混練方法

混練には、容量 5l のオムニミキサーを用い、スラッジケーキを 90 秒間空練り、高炉スラグ微粉末、廃石膏、水を投入し、2 分間練り混ぜた。なお、フロー値が約 180~200 になるように、高性能 AE 減水剤を適宜混入したが、廃石膏混入率=40%では、高性能 AE 減水剤混入量が標準使用量を超え、40%を超えると混練自体が不可能になった。

4) 試験方法

圧縮強度試験には、 $\phi 50 \times 100\text{mm}$ の円柱供試体を各 3 個ずつ作製し、所定の 20°C 水中養生材齢後圧縮試験に供した。また、収縮試験は、 $\phi 50 \times 100\text{mm}$ の円柱供試体の内部中央に埋込み型ひずみゲージ（ゲージ長 30mm）を埋設し、打設直後からの収縮ひずみをデータロガーにより自動計測した。なお、収縮試験用供試体は、各 1 個ずつ作製し、打設後 24 時間まで湿布養生後、乾燥開始材齢 7 日まで水中養生とした。

3. 3 実験結果

1) シリーズ①

図 1 に、廃石膏混入がスラグスラッジ結合材の圧縮強度発現性状に及ぼす影響を示す。非加熱の廃石膏でも、前年度の乾式加熱処理により β 型半水石膏としたものと同等の強度発現促進効果が認められた。また、初期強度発現だけでなく、スラグスラッジ結合材の高強度化にも有効であり、建築・土木二次製品への利用も十分に期待できるものと考えられる。

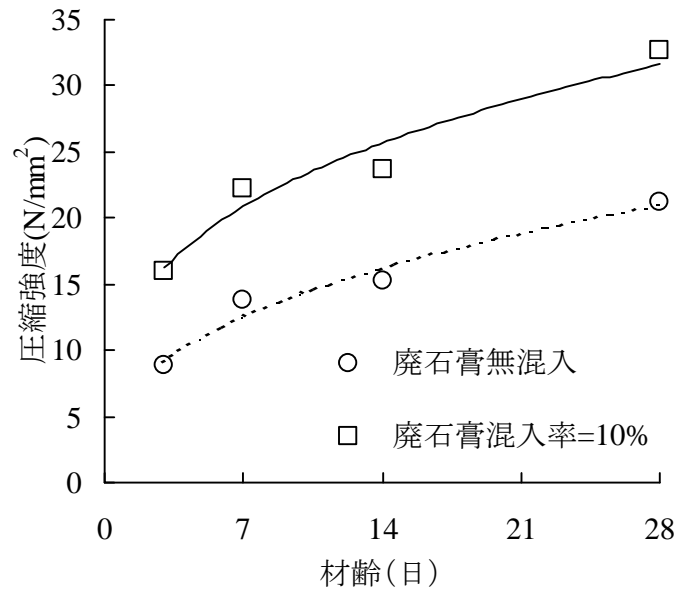


図1 廃石膏混入がスラグスラッジ結合材の圧縮強度発現性状に及ぼす影響

2) シリーズ②

図2に、廃石膏混入率がスラグスラッジ結合材の圧縮強度に及ぼす影響を示す。材齢7日では、廃石膏混入率=5%で圧縮強度は急増し、それ以上ではやや強度増加の伸びが小さくなるが、混入率にほぼ比例して圧縮強度は大きくなっている。また、材齢28日では、廃石膏混入率=10%までは圧縮強度は急増しているが、それ以上で強度の増加が頭打ちとなっており、廃石膏混入率が大きい範囲では、初期強度は大きくなるものの、長期強度の発現は小さくなることが分かる。

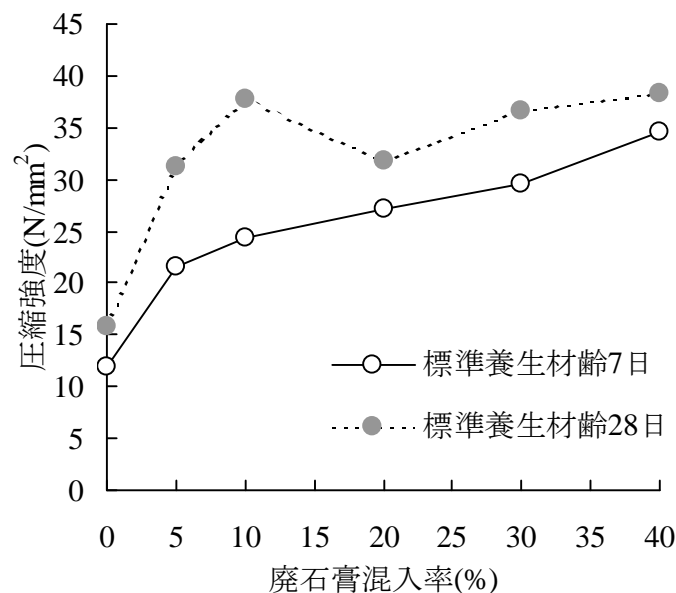


図2 廃石膏混入率がスラグスラッジ結合材の圧縮強度に及ぼす影響

図3に、廃石膏混入率がスラグスラッジ結合材の収縮性状に及ぼす影響を示す。廃石膏無混入および混入率=5%では、打設直後から約1時間の間で急速に、それ以降は徐々に収縮ひずみが増加し、打設後24時間で収縮ひずみは約1800 μ に達し、硬化収縮が非常に大きくなっている。一方、廃石膏混入率が10%以上になると、打設直後の収縮ひずみの急速な増加はみられず、数時間後に収縮ひずみが減少し、廃石膏混入率が大きい場合には逆に膨張に転じている。これは、石膏と高炉スラグとの反応によりエトリンガイトが生成されるためであり、石膏混入は打設後数時間における硬化収縮の低減に大きな効果があることが分かる。また、乾燥開始材齢7日後の乾燥収縮ひずみに関しては、石膏を混入した場合も収縮ひずみの大きな増加が観察されるが、廃石膏混入率が大きくなるほど、その増加の程度は小さくなり、初期の膨張による収縮補償も期待できる。

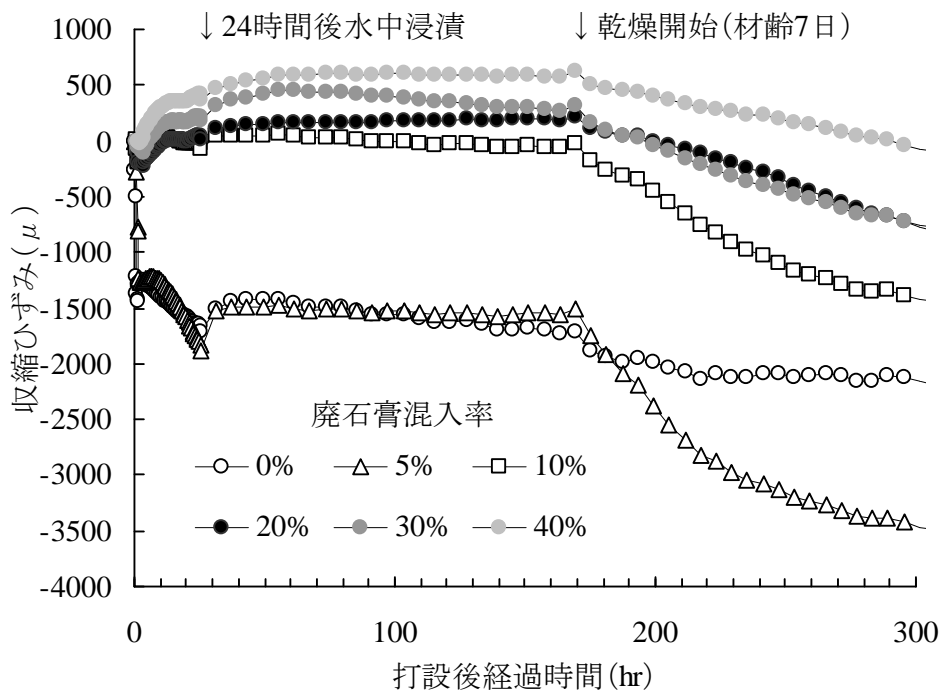


図3 廃石膏混入率がスラグスラッジ結合材の収縮性状に及ぼす影響

3. 4 まとめ

以上の実験結果から次のような結論が得られた。

- 1) 廃石膏混入によりスラグスラッジ結合材の短期および長期強度はともに大きく増加し、非加熱の廃石膏（全量二水石膏）でも乾式加熱処理したもの（全量半水石膏）と同等の効果が得られた。
- 2) 廃石膏混入率が増加するほどスラグスラッジ結合材の短期強度は顕著に大きくなるが、廃石膏混入率が10%を超えると、長期強度の増加が頭打ちとなり、長期強度の発現は小さくなる。成形性や強度面から廃石膏混入率は5~10%程度が適切であると考えられる。
- 3) 廃石膏混入は、混入率が10%以上でスラグスラッジ結合材の硬化収縮低減に極めて有効であり、混入率が大きい範囲では打設後数時間で収縮ひずみの減少から膨張に転じる。これは、石膏と高炉スラグとの反応によりエトリンガイトが生成されるた

めである。また、スラグスラッジ結合材の乾燥収縮はかなり大きいものの、廃石膏混入率が増加するほど乾燥収縮ひずみの増加が小さくなり、初期の膨張による収縮補償も期待できる。収縮性状の面からは、廃石膏混入率は10%以上が適当であるが、成形性や強度面を含めて、廃石膏混入率は10%程度が最適であると考えられる。

4. 生コンスラッジの安定型廃棄物処理への利用

4. 1 実験概要

生コンスラッジは、産業廃棄物の取り扱い上「汚泥」に属し、そのままでは管理型廃棄物として生コンの価格に相当する処分費用が必要になる。平成8年、厚生省より、固化したモルタルと同等の性能、すなわち一軸圧縮強度で 8N/mm^2 以上のスラッジケーキは、「ガラス・陶磁器くずに該当する」安定型廃棄物に指定変更し得ることが通達された。管理型から安定型廃棄物になると、その処分費用は約1/5に軽減される。本研究会の廃棄物再資源化という目標からすれば、抜本的な解決策ではないが、生コンスラッジの安定型廃棄物処理による経済効果は計り知れないものがある。しかしながら、通常のスラッジケーキで 8N/mm^2 以上の圧縮強度を確保することは難しく、既往の研究¹⁾でも 8N/mm^2 以上の圧縮強度を得るためのスラッジケーキの条件は、当日脱水による高活性度のもので高性能脱水機により約30%程度の低含水率に調整されたスラッジケーキに限定されている。そこで、本実験では、高炉スラグ微粉末を混和材として、石膏ボード廃材を混入することにより、生コンスラッジをできるだけ短期材齢で安定型廃棄物として処理できることを目標に実験的検討を行った。

4. 2 実験方法

1) 調合設計

前述のスラグスラッジ結合材の調合設計では、調合因子としてスラッジケーキ固形分混入率 $Sd/(Sd+Sg)$ および水結合材固形分比 $W/(Sd+Sg)$ を用いている。これは、スラッジケーキ固形分混入率が高炉スラグに対するアルカリ刺激材としてのスラッジケーキ固形分の閾値を示すもので、水結合材固形分比は、コンクリートにおける水セメント比説と同様、スラッジケーキ固形分混入率が閾値以上であれば、強度を一義的に決定するパラメータになるという考え方に基づいている。しかし、ここでは、より簡便な方法として、全体をスラッジケーキ固形分、水(含水量+加水量)、高炉スラグ微粉末から成る三成分系として取り扱う。また、スラッジケーキの含水率は、加水する場合は加水量をスラッジケーキの含水量に含めて、スラッジケーキ固形分に対する全水量の質量比と定義する。すなわち、含水率が小さい場合、調合条件によっては加水しないと所要の流動性が得られない場合もあり、そのときには加水量を含水量に含めて算定した含水率をもつスラッジケーキとして扱うことを意味する。

三成分系表示には、図4に示す正三角形表示が便利である。ここで、スラッジケーキの含水率は、図中に示される直線で表示され、本実験で対象とする簡易脱水による含水率が200%以上の範囲は図中の薄墨部分に限定される。また、所要の流動性が得られる範囲は水量により限定され、水量の少ない範囲では混練が不可能か、減水剤の使用が必要になる。そこで、本実験では、含水率が約200%程度のスラッジケーキについて、混練が可能な範囲の数点の調合を選定し、標準養生材齢7日圧縮強度が 8N/mm^2 以上とな

る調合範囲を特定するために実験的検討を行った。

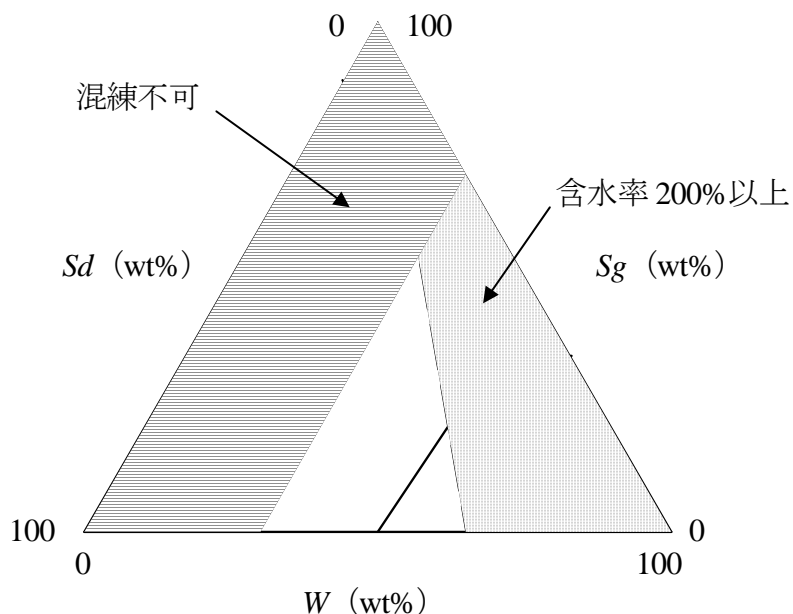


図4 三成分系表示による調合範囲

2) 試験方法

表4に使用材料、表5に使用調合をそれぞれ示す。調合は、含水率が235%以上の範囲の数点を選定し、混練が不可能なものや液状で沈下が大きく供試体を成形できないものは除いた。なお、廃石膏は外割で混入し、廃石膏混入率は10%一定とした。混練方法は前述のとおりであり、圧縮強度試験には、 $\phi 50 \times 100\text{m}$ の円柱供試体を各3個ずつ作製し、標準養生材齢7日後圧縮試験に供した。

表4 使用材料

生コンスラッジ	スラッジケーキ 含水率=235%
混和材料	高炉スラグ微粉末 密度=2.89g/cm ³ 、比表面積=6140cm ² /g 高性能AE減水剤 ポリカルボン酸系、標準使用量0.5~2.0 (C×wt%)
石膏ボード廃材	非加熱試料 (全量二水石膏) 密度=2.34g/cm ³ 、1.2mm アンダー SO ₃ 含有量 43~46%

表5 使用調合

質量分率 (wt%)			含水率 (%)	Gy/(Sd+Sg) (%)	Sp/(Sd+Sg) (%)	フロー値
Sd	W	Sg				
5	55	40	1100	0	0	×
5	55	40	1100	10	0	—
5	45	50	900	0	0	—
5	45	50	900	10	0	—
5	35	60	700	0	0	203
5	35	60	700	10	0	192
5	25	70	500	0	1.0	—
5	25	70	500	10	1.0	248
10	60	30	600	0	0	×
10	60	30	600	10	0	—
10	50	40	500	0	0	—
10	50	40	500	10	0	—
10	40	50	400	0	0	177
10	40	50	400	10	0	177
20	60	20	300	0	0	×
20	60	20	300	10	0	—
20	50	30	250	0	0	177
20	50	30	250	10	0	154

*×：液状沈下大（供試体成形不可）、—：フロー値計測不可

4. 3 実験結果

図5に実験結果を示す。なお、図中には、本実験結果だけでなく過去に行った実験結果も併記している。ここで、水、 $W(\text{wt}\%)$ を基準とし、スラッジケーキの含水率を α とすると、スラッジケーキ固形分は、 $Sd(\text{wt}\%) = W(\text{wt}\%) / \alpha$ 、高炉スラグ微粉末は、 $Sg(\text{wt}\%) = 100 - (W(\text{wt}\%) + W(\text{wt}\%) / \alpha) = 100 - W(\text{wt}\%) (1 + 1 / \alpha)$ となる。廃棄物であるスラッジケーキの消費量を多くし、有価物である高炉スラグ微粉末の使用量を少なくするためには、所要の圧縮強度が得られる範囲で水量を多くする必要がある。

廃石膏無混入の場合、標準養生材齢7日で $8\text{N}/\text{mm}^2$ 以上の圧縮強度を確保するためには、 $W=40\text{wt}\%$ 以下、標準養生材齢28日では $W=45\text{wt}\%$ 以下にする必要がある。一方、廃石膏混入率=10%の場合には、標準養生材齢7日で $8\text{N}/\text{mm}^2$ 以上の圧縮強度を確保するためには、 $W=50\sim 60\text{wt}\%$ 以下となり、廃石膏無混入の場合に比べて、水量をかなり多くすることができ、その分高炉スラグ微粉末の使用量を大幅に減らすことができる。また、前述のように廃石膏混入によりスラグスラッジ結合材の長期強度の発現も期待できるので、所要の圧縮強度を得るための材齢を延ばすことが可能ならば、さらに水量を多くし、高炉スラグ微粉末の使用量を減らすことができるものと考えられる。実験では、水量が多くなりすぎると、液状沈下により供試体成型が不可能になったが、生コンスラッジの安定型廃棄物処理では成型の必要はないので、所要の圧縮強度が確保できれば水量が多いことに対する問題はない。ただし、逆に水量が少ないと、混練が不可能あるいは減水

剤の使用が必要になり、減水剤を使用しないで流動性を確保するためには、 $W=30\text{wt}\%$ 以上が必要になる。

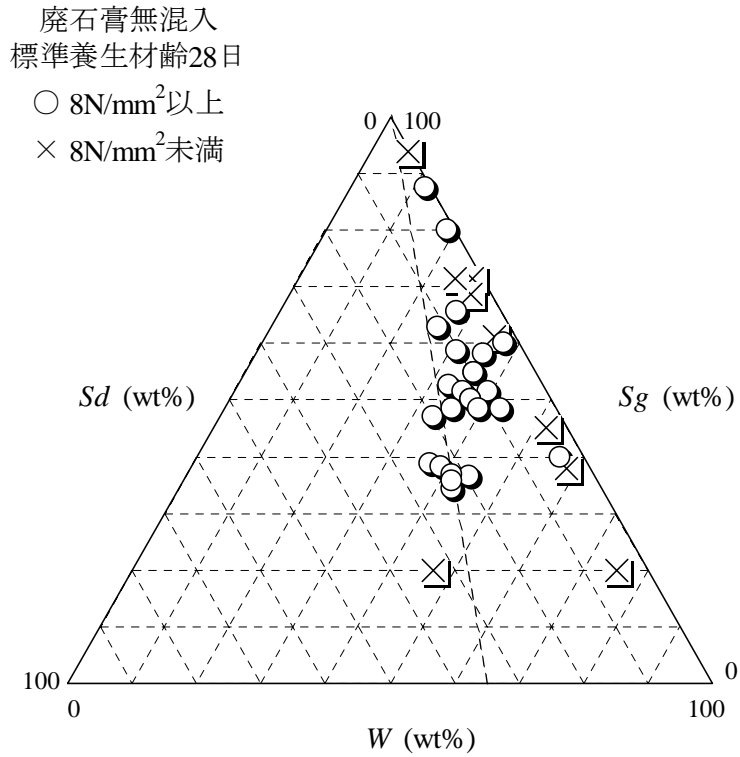
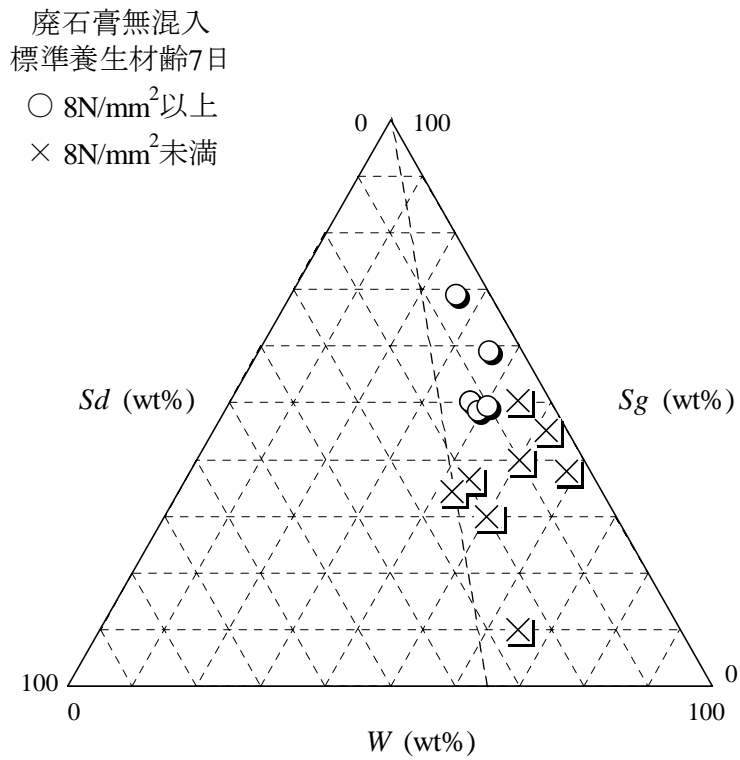


図 5.1 実験結果（廃石膏無混入の場合）

廃石膏混入率=10%
標準養生材齢7日

○ 8N/mm²以上
× 8N/mm²未満

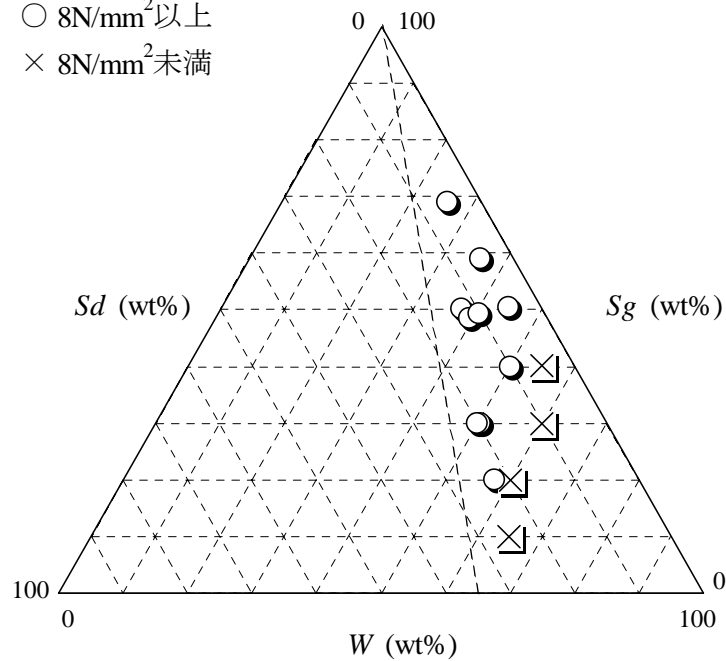


図 5.2 実験結果（廃石膏混入率=10%の場合）

4. 4 まとめ

以上の実験結果から、次のような結論が得られた。

- 1) 廃石膏無混入の場合、標準養生材齢7日で生コンスラッジを安定型廃棄物として処理できる圧縮強度 8N/mm²以上を確保するためには、W=40wt%以下にする必要があるが、廃石膏混入率=10%の場合には、W=50~60wt%以下となり、廃石膏無混入に比べて水量をかなり多くすることができ、その分高炉スラグ微粉末の使用量を大幅に減らすことができる。
- 2) スラッジケーキの含水率 α に応じて、廃石膏を混入する場合、W=50~60wt%以下とし、スラッジケーキおよび高炉スラグ微粉末の量は次式により算定できる。

$$\text{スラッジケーキ} : Sd + W = W(1 + 1/\alpha)(\text{wt}\%)$$

$$\text{高炉スラグ微粉末} : Sg = 100 - W(1 + 1/\alpha)(\text{wt}\%)$$

$$\text{廃石膏混入率} : \beta = Gy / (Sd + Sg)$$

なお、 β は5~20%が適当

5. 今後の展開

部会内での今後の展開について次の項目が上げられた。

- 1) 生コンスラッジの安定型廃棄物処理への石膏ボード廃材の利用に関しては、生コン工場における大規模な実証実験を行う予定で、具体的な実験準備を進める。また、高炉スラグ微粉末は、JIS 規格品の比表面積が高いものはセメントよりも高価なので、4000 クラスのもの、あるいは JIS 規格品外のものを用いて、その効果について実験的検討を行う。さらに、生コンスラッジの安定型廃棄物処理における材料費、施工費等のコスト試算を行い、新規事業の可能性について検討する。
- 2) 実験計画として提出された廃石膏混入コンクリートのフレッシュおよび硬化性状に関して実験的検討を行い、初期強度発現および収縮低減効果について確認する。
- 3) 埋め戻し材や農地改良材への廃石膏の有効利用に関しては、部会の枠を越えて実験を依頼し、その効果について検討を行う。

6. 結論

本部会では、石膏ボード廃材の有効利用を目的に、前年度の研究成果を発展させ、次のような成果が得られた。

- 1) スラッグスラッジ結合材の建築・土木二次製品への利用を目的に、スラッグスラッジ結合材の強度発現促進および収縮低減用混和材としての石膏ボード廃材の有効利用に関しては、非加熱の廃石膏でも前年度の加熱処理による半水石膏と同等の効果が得られること、廃石膏混入により初期強度発現だけでなく、二次製品として利用するのに十分な圧縮強度が得られること、廃石膏混入率が増加するほど、初期強度発現や収縮低減効果が大きくなるが、成形性や長期強度発現の面で廃石膏混入率は約 10%程度が最適であることなどが分かった。
- 2) 生コンスラッジの安定型廃棄物処理への石膏ボード廃材の有効利用に関しては、廃石膏混入により短期材齢で安定型廃棄物処理が可能になる 8N/mm^2 以上の圧縮強度を確保することができ、また廃石膏無混入の場合に比べて、生コンスラッジの消費量を多くし、有価物である高炉スラグ微粉末の使用量を大幅に減らすことができることが分かった。

【参考文献】

- 1) 鈴木一雄ほか：スラッジケーキの強度管理方法に関する基礎実験、第 53 回セメント技術大会講演要旨、pp.414-415、1999.5
- 2) 菊池雅史ほか：平成 12 年度「解体廃石膏ボードの再資源化技術開発」海外調査、北米調査団報告書、pp.1-43