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砕し、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ガ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砕・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で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、SO_3 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砕し、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 5*l* 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、φ50×100mm の円柱供試体を各 3 個ずつ作製し、所定の 20℃水中養生材齢後圧縮試験に供した。また、収縮試験は、φ50×100mm 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。

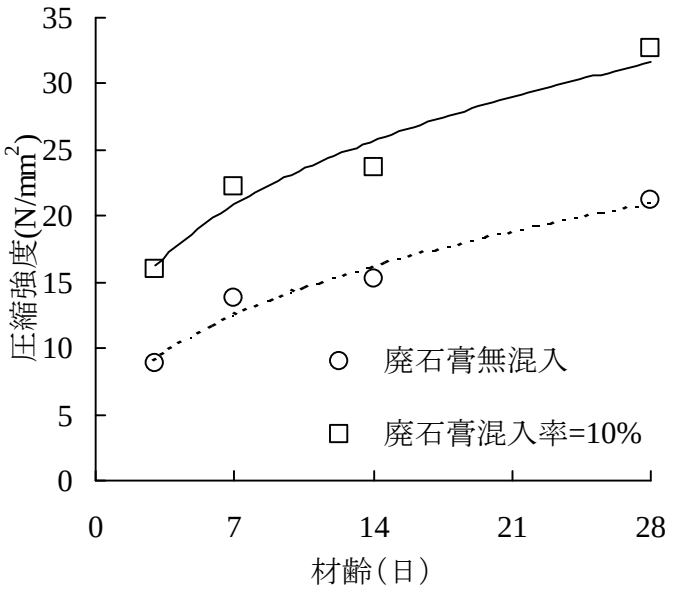


図１　廃石膏混入がスラグスラッジ結合材の圧縮強度発現性状に及ぼす影響

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。

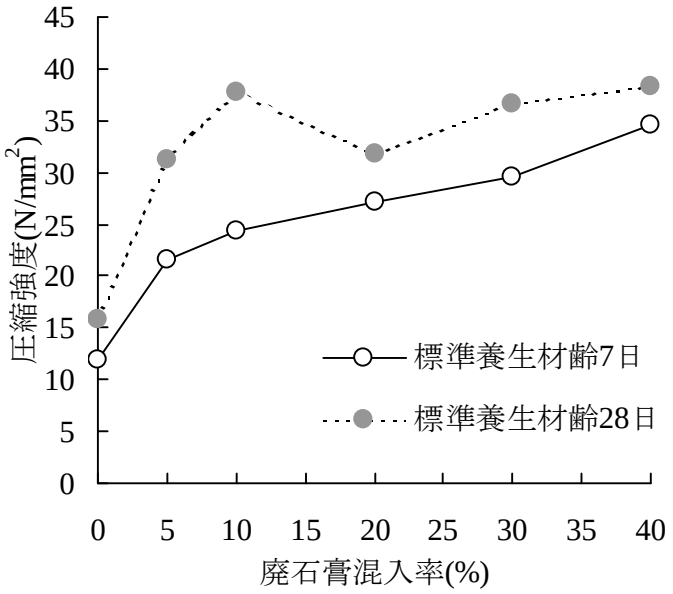


図２　廃石膏混入率がスラグスラッジ結合材の圧縮強度に及ぼす影響

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 1800μ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。

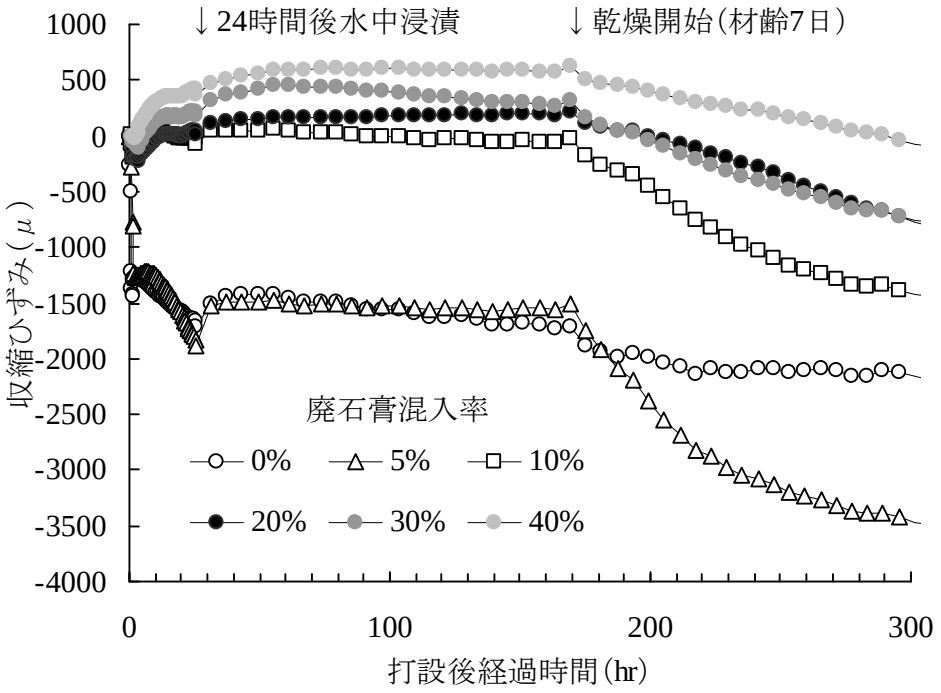


図 3　廃石膏混入率がスラグスラッジ結合材の収縮性状に及ぼす影響

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。

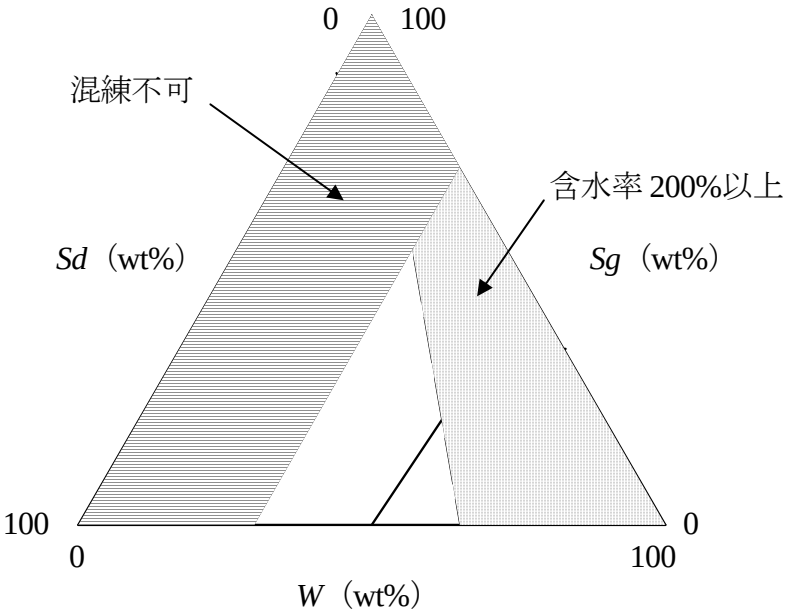


図 4　三成分系表示による調合範囲

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、φ50×100m 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

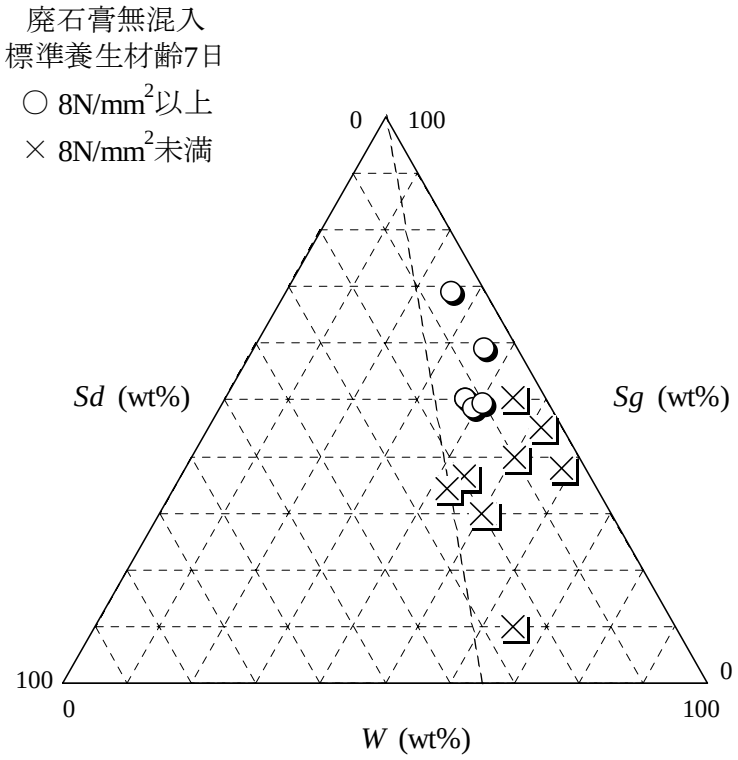
＊×：液状沈下大（供試体成形不可）、－：フロー値計測不可

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、$W(wt\%)$ 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、$Sd(wt\%)=W(wt\%)/\alpha$、高炉スラグ微粉末は、$Sg(wt\%)=100-(W(wt\%)+W(wt\%)/\alpha)=100-W(wt\%)(1+1/\alpha)$ 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 8N/mm^2 以上の圧縮強度を確保するためには、*W*=40wt%以下、標準養生材齢 28 日では *W*=45wt%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 8N/mm^2 以上の圧縮強度を確保するためには、*W*=50～60wt%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*=30wt%以上が必要になる。



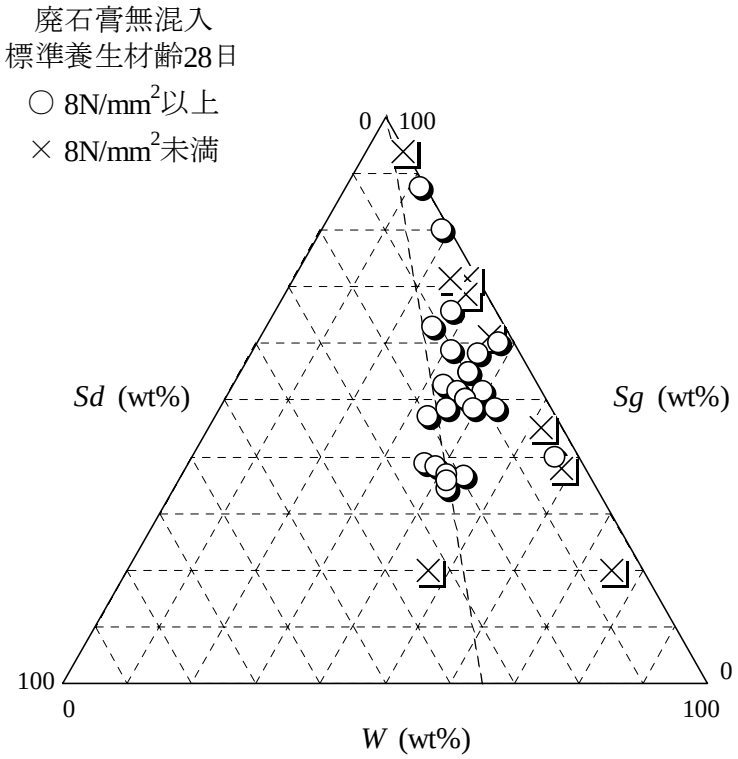


図 5.1　実験結果（廃石膏無混入の場合）

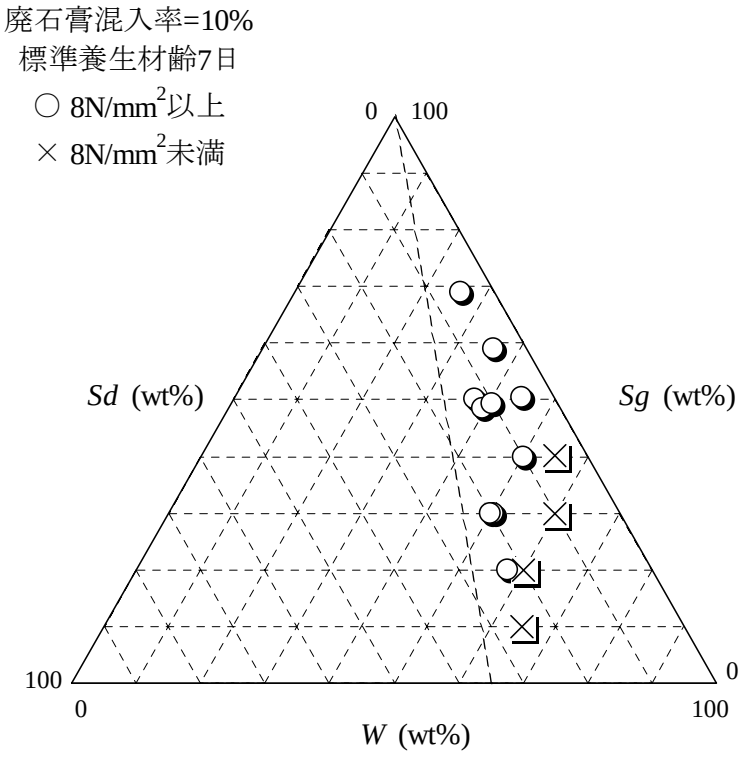


図 5.2　実験結果（廃石膏混入率=10%の場合）

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/mm^2 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。

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

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

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

NPO 法人廃棄物再資源化研究会
平成 14 年度　第 3 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、生コンスラッジのリユースを目的に、スラッジケーキと高炉スラグ微粉末から成る硬化体（以下、スラグスラッジ硬化体と称する）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、ならびに生コンスラッジの安定型廃棄物としての固化処理への利用について実験的検討が行われた。その結果として、次のような結論が得られた。

○ 廃石膏混入によりスラグスラッジ硬化体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）でも乾式加熱処理の廃石膏（全量半水石膏）と同等の強度発現促進効果が認められた。

○ 廃石膏混入率が増加するほどスラグスラッジ硬化体の短期強度は顕著に大きくなるが、混入率が 10%を超えると長期強度の増加が頭打ちとなり、長期強度発現は小さくなる。成形性や強度面からは廃石膏混入率は 5～10%程度が適切である。

○ 廃石膏混入は、混入率が 10%以上でスラグスラッジ硬化体の収縮低減、特に硬化収縮低減に極めて有効であり、エトリンガイト生成に起因する初期膨張による収縮補償が期待できる。

○ 生コンスラッジの安定型固化処理に対して、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/mm^2 以上を得るのに、廃石膏を混入すれば短期材齢で、しかも有価物の高炉スラグ微粉末の使用量を少なくして、その強度を確保することができる。

本年度は、前年度の継続で、スラグスラッジ硬化体の建材への再利用および生コンスラッジの安定型固化処理を目的に、石膏ボード廃材の混和材としての有効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

平成 14 年度の石膏ボード廃材再資源化研究部会の年間活動記録を以下に示す。

平成 14 年 2 月 20 日　特許出願（穴見特許事務所）

部会内の研究成果について、穴見特許事務所にて特許出願を行った。

特願 2002－107262「生コンスラッジの安定型あるいは安定型に準じた廃棄物への加工方法及びその加工廃棄物」

平成 14 年 3 月 15 日　現場実験（有明生コン工場）

有明生コン工場にて生コンスラッジの安定型廃棄物固化処理に関する現場実証実験を行った（研究成果については後述）。

平成 14 年 5 月 16 日　第 1 回石膏ボード廃材再資源化研究部会

有明生コン工場における現場実証実験に関して中間報告を行った。

平成 14 年 5 月 23 日　コア採取（有明生コン工場）

有明生コン工場における現場実証実験の圧縮強度試験用コア供試体の採取を行った。

平成 14 年 5 月 24 日　コア供試体圧縮強度試験（熊本大学）

採取したコア供試体の両端面を研磨仕上げ後、圧縮強度試験を行った。

平成 14 年 7 月 30 日　第 1 回合同部会（コンクリート廃材および石膏ボード廃材）

両部会所属の会員が大体同じであることや両廃材の用途に共通の接点があることなどを考慮し、合同部会を開催した。石膏ボード廃材再資源化研究部会では、生コンスラッジの安定型固化処理への石膏ボード廃材の有効利用に関する実験結果について報告された（研究成果については後述）。その中で、生コンスラッジの安定固化処理において均一な強度を要求するならば、生コンスラッジの前処理が必要であることが述べられた。また、今後の展開として、スラグスラッジ硬化体の建材への再利用に関しては、試作も含めて石膏系のボード製造メーカーの情報が欲しい旨の意見があった。

平成 14 年 9 月 27 日　朝日セラテック工場視察

生コンスラッジの建材への再利用の参考のために、朝日セラテック八代工場にて抄造法による建築用ボード（*f* フレッシュ・ボード）の生産工程を視察した。

平成 15 年 1 月 9 日　第 2 回合同部会

石膏ボード廃材再資源化研究部会では、スラグスラッジ硬化体の建築用ボードへの用途開発を目的に、短繊維補強によるボードの高靭性化および廃ガラス軽量骨材（G ライト）混入によるボードの軽量化に関する実験結果について報告された（研究成果については後述）。その中で、断熱材としてのグラスウール廃材を繊維補強材として使うとともに、ボードに断熱性を付与できないかなどの意見があり、その方向での検討も次年度行うことを確認した。また、石膏ボード廃材単独の利用として、高炉スラグ微粉末混入コンクリートの低温養生に対する強度低下抑制効果に関する実験結果が報告されたが、あまり効果がないことが示された。一方、廃石膏の吸水性を考慮した地盤改良材への用途については、コンクリート廃材再資源化研究部会の方で引き続き検討をお願いすることにした。

３．生コンスラッジの安定型固化処理への利用

３．１　有明生コン工場における現場実証実験

１）実験概要

有明生コン工場に野積みされた生コンスラッジを利用し、生コンスラッジの安定型固化処理に関する現場実験を行った。面積約 50m^2（幅 5m×奥行き 10m）を一区画とし、第一区画は高炉スラグ微粉末と石膏ボード廃材を混入した場合、第二区画は高炉スラグ微粉末のみを混入した場合、第三区画は高炉セメント B 種のみを混入した場合における硬化体の強度性状について比較検討を行った。施工方法は、第一区画では、高炉スラグ微粉末と廃石膏を野積みスラッジ上面に均等に散布し、撹拌用回転羽を取り付けたバックホーにより約 1m の深さまで撹拌混合した（写真 1）。当初、生コンスラッジの含水率が約 400%であるという情報から、高含水率のスラッジケーキはそのチキソトロピー性状のために撹拌により容易に高流動化すると想定していたが、天日乾燥を受けているスラッジ上層部の含水率が予想よりも低く、撹拌にかなり手間取った。そのため、第二区画以降は、まずスラッジをバックホーにより撹拌混合した後に、高炉スラグ微粉末あるいは高炉セメント B 種を散布し、再び撹拌混合を行う方法を採用し、施工時間をかなり低減することができた。

写真１　生コンスラッジの安定型固化処理に関する現場実験状況

２）使用材料および調合

混和材には、高炉スラグ微粉末として密度=2.89g/cm^3、ブレーン 4000 クラスのもの、高炉セメントＢ種､廃石膏として石膏ボード廃材を破砕機､ロールミルにより細粉砕し、振動篩機により表面紙を分離した後の石膏粉（非加熱、表面紙混入率約 3%）をそれぞれ使用した。

調合は、前年度の研究成果を基に（図 1)、廃石膏混入率=10%で標準養生材齢 7 日圧縮強度が 8N/mm^2 以上のうち､高炉スラグ微粉末の使用量が最小となる調合を選定した。

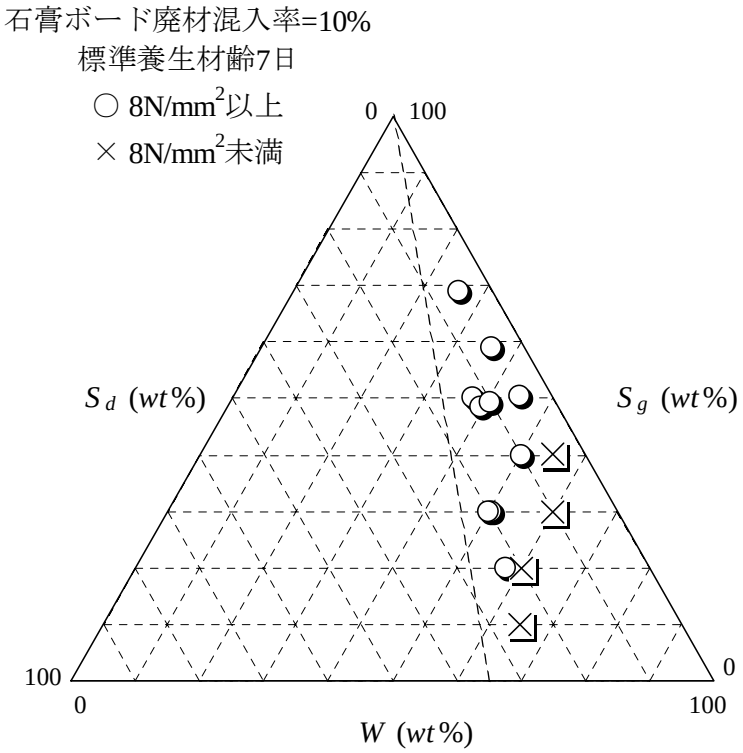


図１　圧縮強度 8N/mm^2 以上を得るための調合範囲

生コンスラッジの含水率が α=4.0（400%）という当初の想定で、一区画約 50m^3 の生コンスラッジ処理量に対する各材料の必要量を見積もった結果を以下に示す。

W=60wt%とすると、

$$S_d = \frac{W}{\alpha} = 15wt\%, \quad S_g = 100 - W\left(1 + \frac{1}{\alpha}\right) = 25wt\%$$

全体質量を T（=S_d+W+S_g）とすると、

$$W + \frac{Sd}{2.2} = 50 \rightarrow 0.6T + \frac{0.15T}{2.2} = 50 \quad \therefore T = 75(t)$$

$$\therefore S_d = 11.3(t), \quad W = 45.0(t), \quad S_g = 18.8(t)$$

廃石膏は、外割で混入率=10%として、

$$G_y = 0.1(S_d + S_g) = 3.0(t)$$

しかし、生コンスラッジ上層部の含水率は、上記の想定よりもかなり小さく、約 100%程度であったため、その結果として実質的な調合は次のようになる。

第一区画：S_d=45wt%, W=45wt%, S_g=10wt%, $G_y/(S_d+S_g)$=6.9%

第二区画：S_d=45wt%, W=45wt%, S_g=10wt%, $G_y/(S_d+S_g)$=0%

第三区画：第二区画において高炉スラグ微粉末を同量の高炉セメント B 種に置換

３）実験方法

施工終了後、各区画から採取した試料によりφ50×100mm 円柱供試体を各 3 個ずつ作製し、20℃気中養生材齢 3、7、14、21、28 日後圧縮試験に供した。また、約 2 か月後に各区画からφ100mm のコアを抜き取り、コア両端を研磨仕上げした後圧縮強度試験を行った。なお、コア採取位置を図 2 に示す。

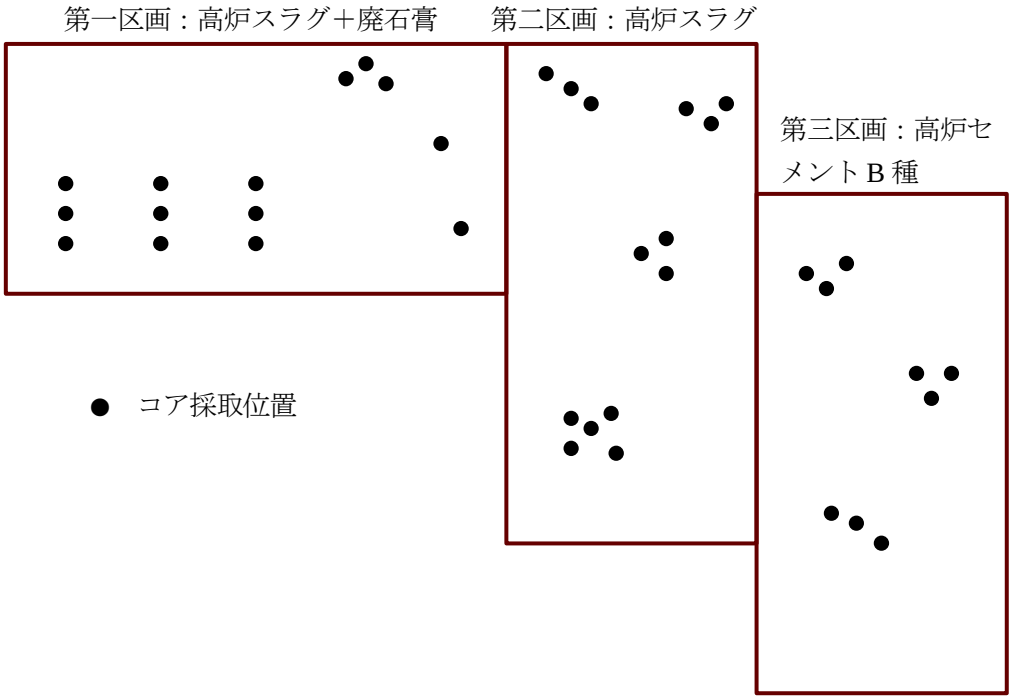


図 2　各区画におけるコア採取位置

4）実験結果

表 1 および図 3 に、各区画から採取したφ50×100mm 円柱供試体の圧縮強度試験結果を示す。また、表 2 に、各区画から採取したφ100mm コア供試体の圧縮強度試験結果を示す。

表 1　φ50×100mm 円柱供試体の圧縮強度試験結果

区画	第一区画		第二区画		第三区画	
材齢	質量 (g)	圧縮強度 (N/mm^2)	質量 (g)	圧縮強度 (N/mm^2)	質量 (g)	圧縮強度 (N/mm^2)
3 日	296	1.16	305	0.76	319	0.41
7 日	297	2.30	304	2.15	317	1.13
14 日	296	2.91	307	3.53	320	1.79
21 日	294	3.33	304	3.07	314	2.49
28 日	293	3.12	306	3.35	311	2.31

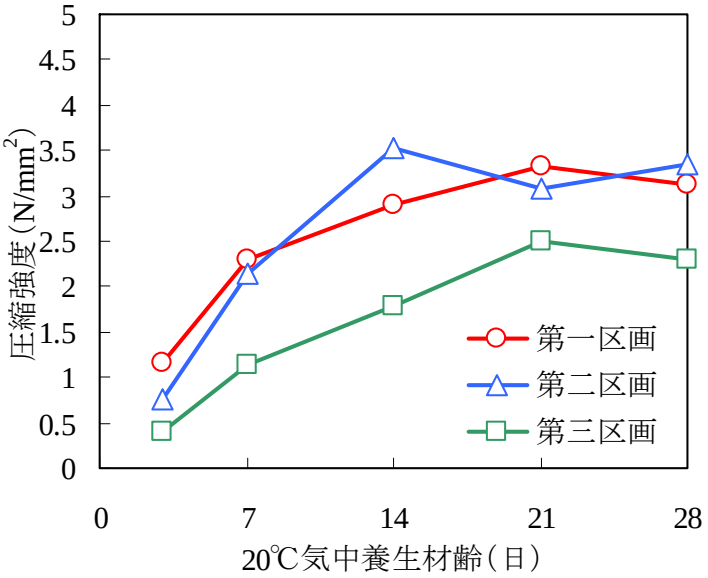


図 3　各区画から採取したφ50×100mm 円柱供試体の圧縮強度発現性状

表 2　φ100mm コア供試体の圧縮強度試験結果

第一区画			第二区画			第三区画		
密度 (g/cm^3)	圧縮強度 (N/mm^2)	変動係数 (%)	密度 (g/cm^3)	圧縮強度 (N/mm^2)	変動係数 (%)	密度 (g/cm^3)	圧縮強度 (N/mm^2)	変動係数 (%)
1.56	2.07	39.6	1.54	2.65	40.6	1.62	2.75	22.9

以上の結果から、いずれの場合も安定型廃棄物として処理可能な圧縮強度 $8N/mm^2$ 以上を確保することができなかった。その要因として、高炉スラグ微粉末の使用量が少なすぎたこと、生コンスラッジが長期間の野積みにより特に表層部が炭酸化し、高炉スラグ微粉末の潜在水硬性に対するアルカリ量が不足したこと、低含水率の生コンスラッジとバックホーによる撹拌混合では、均一な練り混ぜが困難であったこと、天候等の養生条件の影響などが考えられる。表 3 に、同一の生コンスラッジを用い、高炉スラグ微粉

末の使用量を増やした場合のφ50×100mm 円柱供試体による圧縮強度試験結果を示すが、高炉スラグ微粉末の使用量を増すことにより、圧縮強度が大きく増加しており、調合の修正により必要強度を得ることは十分可能であると考えられる。

表３　高炉スラグ微粉末使用量を増やした場合の圧縮強度試験結果

材齢	廃石膏無混入 S_d=20wt%, W=40wt%, S_g=40wt%		廃石膏混入率=10% S_d=20wt%, W=50wt%, S_g=30wt%	
	20℃気中養生	20℃水中養生	20℃気中養生	20℃水中養生
	圧縮強度(N/mm^2)	圧縮強度(N/mm^2)	圧縮強度(N/mm^2)	圧縮強度(N/mm^2)
3 日	0.75	0.67	2.79	3.39
7 日	2.05	2.20	4.51	5.32
28 日	6.08	7.21	6.63	8.82

従って、生コンスラッジの安定型固化処理においては、生コンスラッジの実態や強度のばらつきを考慮した調合設計法、均一な練り混ぜを可能にする施工法などについてさらに検討を行う必要があるが、生コンスラッジの安定型固化処理に関する技術提供等のコンサルタント事業の起業化は今後の発展性として十分に期待できるものと考えている。

３．２　高炉スラグの種類がスラグスラッジ硬化体の圧縮強度に及ぼす影響

１）実験概要

生コンスラッジの安定型固化処理において高炉スラグ微粉末は有価物であり、コスト削減のためにその使用量を少なくすると、生コンスラッジの品質によっては安定強度が得られない場合がある。高炉スラグ微粉末は、ブレーン値が小さくなると価格も安くなり、さらに JIS 規格品外、例えば原料粗粉等が使用できるならば、コスト低減に有用である。そこで、本実験では、高炉スラグの種類として、JIS 規格のブレーン 6000、4000 クラスの高炉スラグ微粉末、原料粗粉及び水砕スラグを用いた場合のスラグスラッジ硬化体の圧縮強度発現性状について検討した。

２）実験方法

生コンスラッジには即日脱水ケーキ（含水率=76%）を用い、高炉スラグには①ブレーン 6000、②ブレーン 4000、③原料粗粉（ブレーン 2000～3000 程度）、④水砕スラグ（粒子状）の 4 種類を用いた。使用調合は、高炉スラグ①、②、③については S_d=20wt%、W=40wt%、S_g=40wt%一定とし、高炉スラグ④については S_d=30wt%、W=30wt%、S_g=40wt%とした。練り混ぜには、容量 5l のオムニミキサーを使用し、φ50×100mm 円柱供試体を各 3 個ずつ作製し、標準養生材齢 7、14、21、28 日後圧縮試験に供した。

３）実験結果

表 4 及び図 4 に圧縮強度試験結果を示す。④水砕スラグの場合には、材齢とともに若干圧縮強度は増加しているが、十分な強度は得られなかった。高炉スラグ微粉末①、②、③の場合には、材齢とともに圧縮強度は大きく増加し、ブレーン値が大きいものほど短期強度が大きくなっている。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/mm^2 以上は、ブレーン 6000 では材齢 7 日、ブレーン 4000 では材齢 14 日、原料粗粉でも材齢 21 日で確保することができ、材齢を問わなければ、原料粗粉も十分に利用でき

るものと考えられる。また、今回の実験では廃石膏を混入していないが、強度発現促進用混和材として廃石膏を混入することにより、原料粗粉を使用した場合でもより短期材齢で必要強度を得ることが可能であると思われ、生コンスラッジの安定型固化処理に対する原料粗粉の利用によるコスト削減が十分に期待できる。

表４　高炉スラグの種類を変えた場合のスラグスラッジ硬化体の圧縮強度試験結果

高炉スラグ 材齢	①6000 圧縮強度 (N/mm^2)	②4000 圧縮強度 (N/mm^2)	③原料粗粉 圧縮強度 (N/mm^2)	④水砕スラグ 圧縮強度 (N/mm^2)
7 日	9.39	5.27	2.68	0.38
14 日	10.5	8.97	5.39	0.85
21 日	13.3	10.9	8.06	1.24
28 日	14.2	12.1	10.1	1.49

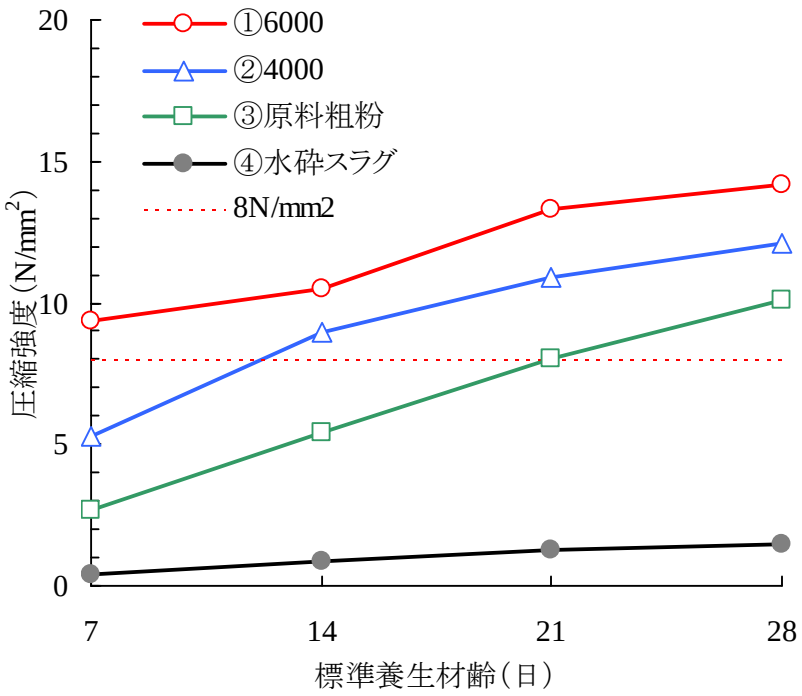


図４　高炉スラグの種類がスラグスラッジ硬化体の圧縮強度発現性状に及ぼす影響

４．生コンスラッジの建材への有効利用

４．１　スラグスラッジ硬化体の短繊維補強

１）実験概要

スラグスラッジ硬化体は、建材への用途を考えた場合、圧縮強度は十分で、製品化に際して廃石膏混入により強度発現促進および収縮低減効果が期待できる。しかし、曲げ引張強度が小さく、ボード類およびパネルへの適用にあたっては、スラグスラッジ硬化体の高靭性化が要求される。そこで、本実験では、スラグスラッジ硬化体に対する短繊維補強効果について検討した。

２）使用材料および調合

使用材料を表 5 に示す。生コンスラッジには即日脱水ケーキを、高炉スラグ微粉末にはブレーン 6000 クラスを、短繊維には繊維長さが 18mm のアクリル繊維、ビニロン繊維およびポリエチレン繊維の 3 種類の合成繊維をそれぞれ使用した。なお、アクリル繊維およびビニロン繊維は、アスベスト製品に対する石綿の代替繊維として実績がある。

使用調合を表 6 に示す。スラッジケーキ固形分混入率=20%、水結合材固形分比=70%、廃石膏混入率=10%、繊維混入率=1.0%一定とした。

表 5　使用材料

生コンスラッジ	即日脱水ケーキ 含水率=277%
混和材	高炉スラグ微粉末 密度=2.89g/cm^3、比表面積=6140cm^2/g
	廃石膏 非加熱、1.2mm アンダー
混和剤	高性能 AE 減水剤
短繊維	アクリル繊維 密度=1.18g/cm^3、寸法=12μm×18mm、 引張強度=1370N/mm^2、引張弾性率=18.6kN/mm^2
	ビニロン繊維 密度=1.3g/cm^3、寸法=41μm×18mm、 引張強度=1850N/mm^2、引張弾性率=43.9kN/mm^2
	ポリエチレン繊維 密度=0.97g/cm^3、寸法=12μm×18mm、 引張強度=2620N/mm^2、引張弾性率=78.7kN/mm^2

表 6　使用調合

繊維種類	W_f (%)	$S_d/(S_d+S_g)$ (%)	$W/(S_d+S_g)$ (%)	$G_y/(S_d+S_g)$ (%)	$S_p/(S_d+S_g)$ (%)	フロー値
プレーン	0	20	70	10	0.5	187
アクリル	1.0	20	70	10	1.0	136
ビニロン	1.0	20	70	10	1.0	149
ポリエチレン	1.0	20	70	10	1.0	141

W_f：繊維混入率（結合材固形分に対する繊維の質量比）

S_d：スラッジケーキ固形分、S_g：高炉スラグ微粉末、S_d+S_g：結合材固形分、

W：スラッジケーキ含水量＋加水量、G_y：廃石膏、S_p：高性能 AE 減水剤

３）実験方法

混練には容量 5*l* のオムニミキサーを使用し、スラッジケーキを投入し空練り 90 秒、次に高炉スラグ微粉末、廃石膏、水、高性能 AE 減水剤を投入し混練 90 秒、最後に短繊維を混入し3分間練り混ぜた。圧縮および引張強度試験にはφ50×100mm 円柱供試体を、曲げ強度試験には 40×40×160mm 角柱供試体を各 3 個ずつ作製し、標準養生材齢 7 日後に強度試験に供した。なお、曲げ強度試験は、JIS R 5201 のセメントの物理試験方法に準拠し、荷重－試験機クロスヘッド変位曲線を計測した。

４）実験結果

表7に強度試験結果を、図5に曲げ試験による荷重－載荷点変位曲線の測定値を示す。プレーンに比べて、短繊維補強による引張強度および曲げ強度の大きな増加がみられ、また荷重－変位曲線から分かるように、ひび割れ発生後も荷重が低下することなく、複数ひび割れの発生を伴いながら、曲げ耐力および変形能力の顕著な増加が認められた。繊維種類の違いについては、最高引張強度のポリエチレン繊維を使用した場合がもっとも繊維補強効果が大きく、引張強度がもっとも小さいアクリル繊維を使用した場合には繊維の破断に起因して、複数ひび割れの発生も少なく、曲げタフネスが小さくなっている。

表 7　強度試験結果

繊維種類	W_f (%)	圧縮強度 (N/mm^2)	引張強度 (N/mm^2)	曲げ強度 (N/mm^2)
プレーン	0	22.2	1.22	2.62
アクリル繊維	1.0	23.9	2.71	6.33
ビニロン繊維	1.0	24.4	3.57	7.78
ポリエチレン繊維	1.0	24.3	4.43	12.1

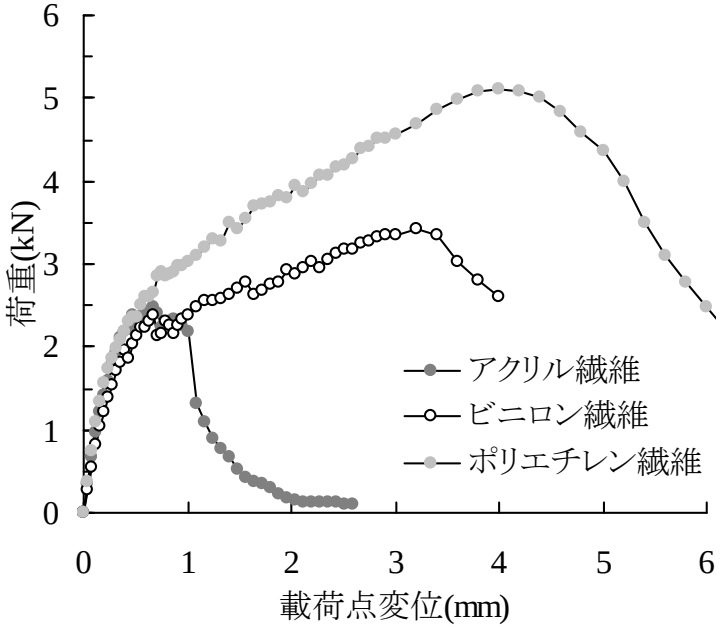


図 5　曲げ試験による荷重－載荷点変位曲線の測定値（平均）

４．２　短繊維補強スラグスラッジ硬化体の建築用ボードへの利用

１）実験概要

前述のように、曲げタフネスがもっとも優れていたポリエチレン繊維補強スラグスラッジ硬化体を用い、建築用ボード 3 号試験体を作製し、曲げ性能について実験的検討を行った。

２）使用材料および調合

使用材料は、前記の表 5 と同様であり、生コンスラッジには含水率が 235%の即日脱水ケーキを、短繊維にはポリエチレン繊維を使用した。使用調合も前記の表 6 と同じであり、フロー値は、プレーンで 198、W_f=1.0%の場合には 184 であった。

３）実験方法

混練方法は前記のとおりであり、素材試験として圧縮および引張強度試験用にφ50×100mm 円柱供試体、曲げ強度試験用に 40×40×160mm 角柱供試体を各 3 個ずつ作製した。また、ボードの曲げ性能試験として、寸法 400×500mm、厚さ 40mm の 3 号試験体を各 1 個ずつ作製し、湿布養生材齢 7 日後試験時まで気中養生を行った。なお、曲げ性能試験は、JIS A 1408 の建築用ボード類の曲げ及び衝撃試験方法に準拠して行った。

４）実験結果

表 8 に素材試験およびボードの曲げ性能試験結果を示す。また、図 6 に荷重－載荷点変位曲線の測定値を示す。なお、素材試験用供試体とボード 3 号試験体の試験体寸法が

表 8　強度試験結果

W_f (%)	素材試験			ボード 3 号試験体	
	圧縮強度 (N/mm^2)	引張強度 (N/mm^2)	曲げ強度 (N/mm^2)	曲げ破壊荷重 (N)	曲げ強度 (N/mm^2)
0	16.5	－	0.83	434	0.41
1.0	20.4	4.27	10.6	8254	7.74

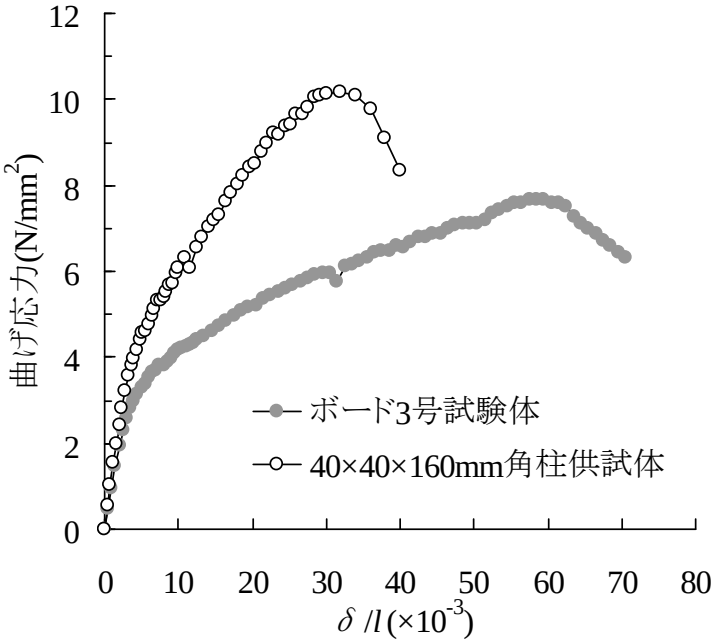


図 6　素材試験用供試体およびボードの荷重－載荷点変位曲線の測定値

異なるので、比較のために荷重を曲げ応力、載荷点変位をスパン長さで除した相対比で表示している。表より、プレーンに比べて W_f=1.0%の場合のボードの曲げ破壊荷重は約20倍と大きく増加し、ひび割れ発生後も荷重が低下することなく、複数ひび割れの発生を伴いながら曲げ耐力および変形能力の顕著な増加が認められた。また、強度の寸法効果により、素材試験用供試体に比べてボード3号試験体の曲げ強度は約3割程度低下しているが、ポリエチレン繊維補強スラグスラッジ硬化体が非常に高靭性であるためにボードとして十分な曲げ強度が保持されている。

４．３　短繊維補強スラグスラッジ硬化体の軽量化

１）実験概要

前述のように､ポリエチレン繊維補強スラグスラッジ硬化体を用いた建築用ボードは、十分な曲げ性能を有することが分かったが、硬化体の軽量化をはかるために、ここでは廃ガラスを再生利用した人工軽量骨材（G ライト）を細骨材として混入した場合の軽量化と強度性状について実験的検討を行った。まず、G ライト混入率を変化させ、軽量化と力学的性能保持を満足するための混入率の範囲について予備的検討を行い、その混入率に対して前記と同様のボード3号試験体を作製し、軽量ボードの曲げ性能試験を行った。

２）使用材料および調合

使用材料を表9に示す。生コンスラッジには即日脱水ケーキを、高炉スラグ微粉末にはブレーン4000クラスを、細骨材にはGライト1号を使用した。なお、今回使用したスラッジケーキは、高性能脱水機を使用したため含水率が 96.6%とこれまでに使用してきたものよりもかなり小さく、そのままではミキサーで撹拌しても流動性を示さないことから、エッジにより粒状にスライスしたものを用いた。

使用調合を表10に示す。スラグスラッジ硬化体の調合は、前記の表6と同じで、G ライト混入率は、結合材固形分に対する質量比で0,10,20,30,40%の5水準とした。

表9　使用材料

生コンスラッジ	即日脱水ケーキ 含水率=96.6%
混和材	高炉スラグ微粉末 密度=2.89g/cm^3、ブレーン4000クラス
細骨材	G ライト1号 絶乾密度=0.72g/cm^3、吸水率=6.1%、粒径=0.3～1.2mm
廃石膏	非加熱、1.2mm アンダー
短繊維	ポリエチレン繊維 密度=0.97g/cm^3、寸法=12μm×18mm、 引張強度=2620N/mm^2、引張弾性率=78.7kN/mm^2

表 10　使用調合

W_f (%)	$S_d/(S_d+S_g)$ (%)	$W/(S_d+S_g)$ (%)	$G_y/(S_d+S_g)$ (%)	$G/(S_d+S_g)$ (%)	フロー値
1.0	20	70	10	0	160
				10	151
				20	144
				30	148
				40	141

G：G ライト

3）実験方法

混練には容量 5*l* のオムニミキサーを使用し、スラッジケーキを投入、加水し混練 2 分、次に高炉スラグ微粉末、廃石膏、G ライトを投入し混練 2 分、最後に繊維を混入し 3 分間練り混ぜた。圧縮および引張強度試験用にφ50×100mm 円柱供試体、曲げ強度試験用に 40×40×160mm 角柱供試体を各 3 個ずつ作製し、標準養生材齢 28 日後に強度試験に供した。

4）実験結果

表 11 に強度試験結果を示す。また、図 7 に曲げ試験による荷重－載荷点変位曲線の測定値を示す。圧縮強度は全体的に小さくなっているが、これは、スラッジケーキの含水

表 11　強度試験結果（なお、曲げタフネスは、変位が 3mm までの吸収エネルギー）

$G/(S_d+S_g)$ (%)	密度(g/cm^3)		圧縮強度 (N/mm^2)	引張強度 (N/mm^2)	曲げ強度 (N/mm^2)	曲げタフネス (kN・mm)
	表乾	気乾				
0	1.63	1.40	8.56	1.93	6.73	6.67
10	1.53	1.35	9.27	2.27	5.45	5.56
20	1.44	1.28	8.50	1.97	5.96	5.95
30	1.37	1.24	9.48	2.17	5.55	5.64
40	1.31	1.19	10.0	2.11	4.48	4.11

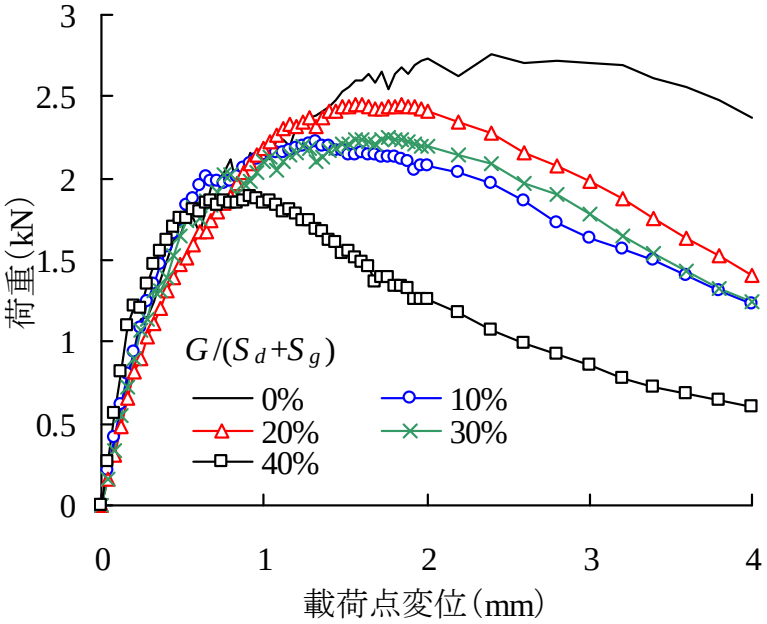


図 7　曲げ試験による荷重－載荷点変位曲線の測定値

率が小さく、粒状にスライスしたものを加水し練り混ぜたので、均一な練り混ぜが不十分だったためと考えられ、スラグスラッジ硬化体を建材へ利用する場合には、練り混ぜの面で含水率がある程度大きいスラッジケーキを使用するのが望ましい。

G ライト混入率が増加するほど、密度は比例的に減少するが、曲げ強度および曲げタフネスは小さくなり、G ライト混入率が 40%で大きく低下している。軽量化と力学的性能保持は相反し、両方を満足させることは難しいが、G ライト無混入に対する密度の減少率と曲げ強度および曲げタフネスの減少率が見合う範囲として、G ライト混入率=30%が限度であると考えられる。

４．４　短繊維補強軽量スラグスラッジ硬化体の建築用ボードへの利用

１）実験概要

前述のように、G ライト混入による軽量化と力学的性能保持を両立させることは難しいが、軽量化を図りながら力学的性能の低下をできるだけ少なくできる範囲として G ライト混入率を 30%に定め、建築用ボード 3 号試験体を作製し、曲げ性能について実験的検討を行った。また、生コンスラッジとして高性能脱水機により含水率が 100%程度のスラッジケーキを使用した場合、含水率が低すぎて均一な混練が困難であったために、ここでは非脱水の天日乾燥によるスラッジケーキを使用し、その適用性についても検討した。

２）使用材料および調合

使用材料を表 12 に示す。生コンスラッジには天日乾燥によるスラッジケーキを使用し、試験時の含水率は 382%とかなり高くなった。また、使用調合を表 13 に示す。なお、スラッジケーキの含水率が高かったために、これまでの調合よりも水結合材固形分比は 80%と大きくせざるを得なかった。

表 12　使用材料

生コンスラッジ	天日乾燥スラッジケーキ 　含水率=382%
混和材	高炉スラグ微粉末 　密度=2.89g/cm^3、ブレーン 6000 クラス 廃石膏 　非加熱、1.2mm アンダー
混和剤	高性能 AE 減水剤
細骨材	G ライト 　絶乾密度=0.72g/cm^3、吸水率=6.1%、粒径=0.3～1.2mm
短繊維	ポリエチレン繊維

表 13　使用調合

W_f (%)	$S_d/(S_d+S_g)$ (%)	$W/(S_d+S_g)$ (%)	$G_y/(S_d+S_g)$ (%)	$G/(S_d+S_g)$ (%)	$S_p/(S_d+S_g)$ (%)
0	20	80	10	30	0
1.0	20	80	10	30	0

３）実験方法

混練方法は前記のとおりであり、素材試験として圧縮および引張強度試験用にφ50×100mm 円柱供試体、曲げ強度試験用に 40×40×160mm 角柱供試体を各 3 個ずつ作製した。また、ボードの曲げ性能試験として、寸法 400×500mm、厚さ 40mm の 3 号試験体を各 1 個ずつ作製し、湿布養生材齢 7 日後試験時まで気中養生を行った。なお、曲げ性能試験は、JIS A 1408 の建築用ボード類の曲げ及び衝撃試験方法に準拠して行った。

４）実験結果

表 14 に素材試験およびボードの曲げ性能試験結果を示す。また、図 8 に荷重－載荷点変位曲線の測定値を示す。４．３の実験結果との比較で、水結合材固形分比が 70%から 80%に大きくなったにもかかわらず、圧縮強度は大きく増加しており、天日乾燥スラッジケーキでも十分に利用できることが分かった。また、４．２の実験結果との比較で、調合条件の違いにもよるが、G ライト混入による軽量化のために全体的に力学的性能は低下している。しかし、水結合材比をもっと小さくするなど調合条件の変更により、ある程度力学的性能の改善を図ることができるものと考えられ、今後軽量性を活かした用途開発も十分に期待できるものと思われる。

表 14　強度試験結果

W_f (%)	素材試験				ボード 3 号試験体	
	気乾密度 (g/cm^3)	圧縮強度 (N/mm^2)	引張強度 (N/mm^2)	曲げ強度 (N/mm^2)	曲げ破壊荷重 (N)	曲げ強度 (N/mm^2)
0	1.18	17.0	1.16	2.13	885	0.83
1.0	1.17	16.5	2.91	5.49	3160	2.96

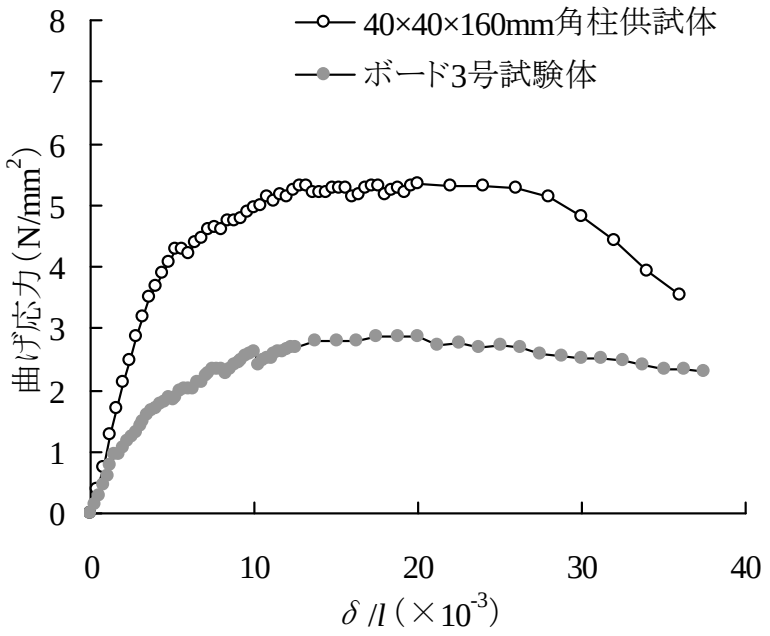


図 8　素材試験用供試体およびボードの荷重－載荷点変位曲線の測定値

５．まとめ

本年度は、生コンスラッジの安定型廃棄物としての固化処理および生コンスラッジの建材への有効利用を目的に、石膏ボード廃材のスラグスラッジ硬化体の初期強度発現促進および収縮低減用混和材としての有効利用について実験的検討を行い、次のような研究成果が得られた。

1) 生コンスラッジの安定型固化処理に関して、スラッジケーキに高炉スラグ微粉末を混合し、強度発現促進用混和材として廃石膏を混入した場合について生コン工場での現場実証実験を行った。その結果、生コンスラッジの保存状態、調合条件、施工方法、天候条件等の影響により、安定型廃棄物として必要な圧縮強度 8N/mm^2 以上を得ることはできなかったが、生コンスラッジの保存状態に応じた調合の修正、強度のばらつきを考慮した調合設計法、均一な練り混ぜを可能にする施工法などについてさらに検討を行うことにより、生コンスラッジの安定型固化処理に関する起業化は可能性として十分に期待できるものと考えられる。また、有価物である高炉スラグ微粉末に対するコスト削減として、JIS 規格品外の原料粗粉を使用した場合も、初期強度は小さいものの、材齢に伴う圧縮強度の大きな増加が観察され、安定型廃棄物として処理可能な強度管理材齢の考慮や初期強度発現促進用混和材として廃石膏の利用などにより、生コンスラッジの安定型固化処理に対する原料粗粉の利用によるコスト削減が十分に期待できるものと考えられる。
2) 生コンスラッジと高炉スラグ微粉末から成る硬化体（スラグスラッジ硬化体）の建材への利用に関して、硬化体の建築用ボードへの利用を目的に、製品化に際しての初期強度発現促進および収縮低減用混和材としての廃石膏の適用性、硬化体の高靭性化のための短繊維補強および短繊維補強硬化体を用いた建築用ボードの曲げ性能、廃ガラス再生軽量骨材（G ライト）による硬化体の軽量化および短繊維補強軽量硬化体を用いたボードの曲げ性能について一連の実験的検討を行った。その結果、廃石膏は、スラグスラッジ硬化体の初期強度発現促進および硬化収縮低減に極めて有効であり、廃石膏混入率は成形性や強度面から約 10%程度が適当であること、硬化体の短繊維補強により、複数ひび割れの発生に伴う曲げ耐力や変形能力の顕著な増加が認められ、建築用ボードとして十分な曲げ強度が得られること、G ライト混入による軽量化と力学的性能保持を両立させることは難しいが、軽量化を図りながら力学的性能の低下をできるだけ少なくできる範囲として G ライト混入率は約 30%が適当であり、軽量化によりボードの曲げ強度は低下するが、軽量性を活かした用途開発が十分に期待できることなどが分かった。

今後の展開としては、部会内で生コンスラッジの安定型固化処理および生コンスラッジの建材への利用の両面について、調合設計法、施工法等の要素技術や起業化に向けての総合技術の開発を進めて行きたいと考えている。

NPO 法人廃棄物再資源化研究会
平成 15 年度　第 4 回活動報告会

廃石膏のコンクリート混和材への適用

1．研究背景

石膏ボードは、鉄骨造の耐火被覆材、内壁・天井などの仕上げ材や下地材として幅広く利用されている。石膏ボードの年間生産高は約 550 万トンであり、そのうちボード工場内で約 25 万トン、新築工事現場内で端材・残材として約 45 万トンの石膏ボードが排出され、また、解体工事現場での石膏ボード廃材の年間排出量は約 100 万トンとなっている。新築現場で排出される廃石膏ボードに限って一部再生利用が進められているが、そのほとんどは廃棄埋立て処分されているのが現状であり、石膏ボード廃材の有効利用が望まれている。

ここで、廃石膏単体で硬化させるには熱処理が必要であり、また、強度性状や成形性を考えると、廃石膏単独の利用は得策でない。また、セメントには凝結時間調節剤として 1～3%の二水石膏が含まれているが、それ以上の石膏の混入はコンクリートの異常膨張の問題があり、通常のコンクリート混和材への適用にも限界がある。

そこで、本研究では、産業廃棄物の取り扱い上「汚泥」に属し、管理型廃棄物処理が義務づけられている生コンスラッジの安定型固化処理を目的に、短期に安定型廃棄物として要求される圧縮強度を得るための強度発現促進用混和材としての廃石膏の適用、ならびに生コンスラッジ硬化体の建築用ボード等の建材への有効利用を目的に、製品化に際しての初期強度発現促進および収縮低減用混和材としての廃石膏の適用について、要素技術の開発を行った。

2．生コンスラッジの安定型固化処理への廃石膏の適用

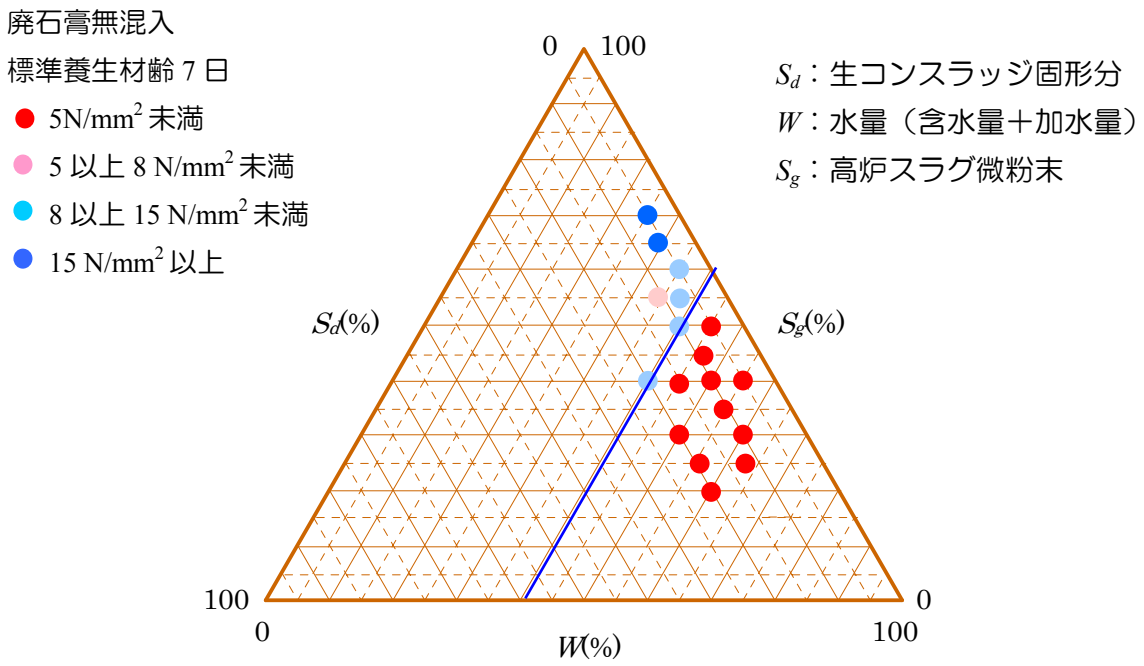
安定型廃棄物として要求される 8N/mm^2 以上の圧縮強度を得るための生コンスラッジの条件は、即日脱水による高活性度のもので、高性能脱水機により約 30%の低含水率に調整されたものに適用範囲が限定される。そこで、本研究では、高炉スラグ微粉末を混和材として、生コンスラッジのアルカリ刺激により高炉スラグが硬化する性質を利用し、さらに高炉スラグと硬化反応性を有する廃石膏を混入することにより、短期材齢で所要の圧縮強度を得るための要素技術の開発を行った。

表 1 に使用材料を示す。ここでは、生コンスラッジ固形分、水（生コンスラッジ含水量＋加水量）、高炉スラグ微粉末の三成分系の硬化体として、それら三成分の比率を変化させた場合の圧縮強度の変化を**図 1** に示す。なお、廃石膏は外割で混入し、廃石膏混入率は 0%および 10%とした。図より、標準養生材齢 7 日で圧縮強度 8N/mm^2 以上を得るためには、廃石膏無混入の場合、水量 W を 40%以下にする必要があり、水量が少なくなると有価物の高炉スラグ微粉末の使用量が増え、練り混ぜも困難となる。一方、廃石膏を混入した場合には、強度発現促進効果により、水量 W を 50%以下にすることができ、その分高炉スラグ微粉末の使用量を減らすことができる。

写真 1 には、本開発技術の検証を目的に、生コン工場内で実施した現場実験の様子を示す。なお、本開発技術に関しては、既に特許出願を行っており（特願 2002－107262「生コンスラッジの安定型あるいは安定型に準じた廃棄物への加工方法及びその加工廃棄物」）、実用化に向けた固化処理技術の開発を進めている。

表 1　使用材料

生コンスラッジ	即日脱水および天日乾燥 含水率=約 100～500%
高炉スラグ微粉末	JIS 適合品 密度=2.89g/cm^3 比表面積=6140cm^2/g
廃石膏	非加熱（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%



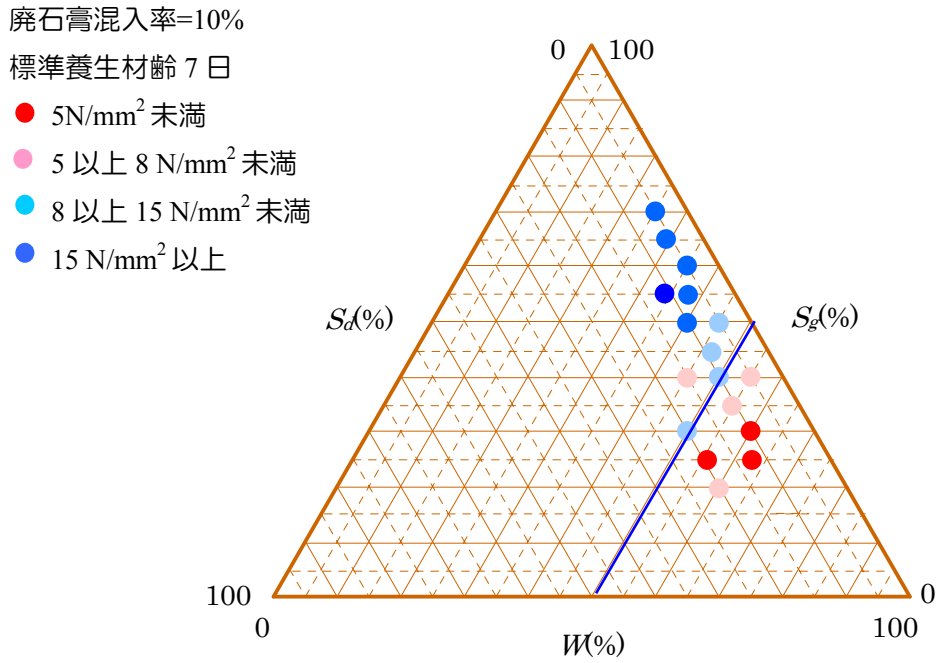


図 1　三成分の比率の変化が生コンスラッジ硬化体の圧縮強度に及ぼす影響

① 生コン工場の敷地に堆積した生コンスラッジ上に高炉スラグ微粉末を散布

② 強度発現促進のための廃石膏を散布

③ 回転羽による撹拌状況（高含水率の生コンスラッジはせん断撹拌により容易に流動）

④ 撹拌状況（全景）

写真 1　本開発技術の検証を目的とした現場実験状況

３．生コンスラッジ硬化体の建築用ボードへの適用

前述の生コンスラッジ硬化体は、調合条件によっては安定型廃棄物として要求される圧縮強度を大きく上回り、建材として十分に適用可能な圧縮強度を有する硬化体が得られる。そこで、本研究では、生コンスラッジ硬化体の建築用ボードへの適用のための要素技術の開発を行った。

建築用ボードの製品化に際して、解決すべき問題点は次のとおりである。

1) 生産効率に関わる硬化体の初期強度発現促進
2) 製品の寸法安定性に関わる硬化体の収縮およびひび割れ低減
3) 建築用ボードの曲げおよび衝撃性能に関わる硬化体の高靭性化

ここで、硬化体の初期強度発現促進および収縮低減に関しては、高炉スラグと反応し、早強性および膨張性のエトリンガイトを生成する廃石膏の混入が有効であり、硬化体の高靭性化には短繊維の混入が有効であると考え、実証実験を行った。

３．１　廃石膏混入による生コンスラッジ硬化体の強度発現促進および収縮低減効果

図 2 に、廃石膏混入率が生コンスラッジ硬化体の圧縮強度に及ぼす影響を示す。図より、廃石膏混入により生コンスラッジ硬化体の大きな初期強度発現促進効果と高強度化が認められる。また、**図 3** に、廃石膏混入率が生コンスラッジ硬化体の収縮性状に及ぼす影響を示す。図より、廃石膏混入により生コンスラッジ硬化体の大きな収縮低減効果が認められる。成形性、強度性状および収縮低減効果を総合的に判断して、廃石膏混入率は 10%程度が最適であると考えられる。

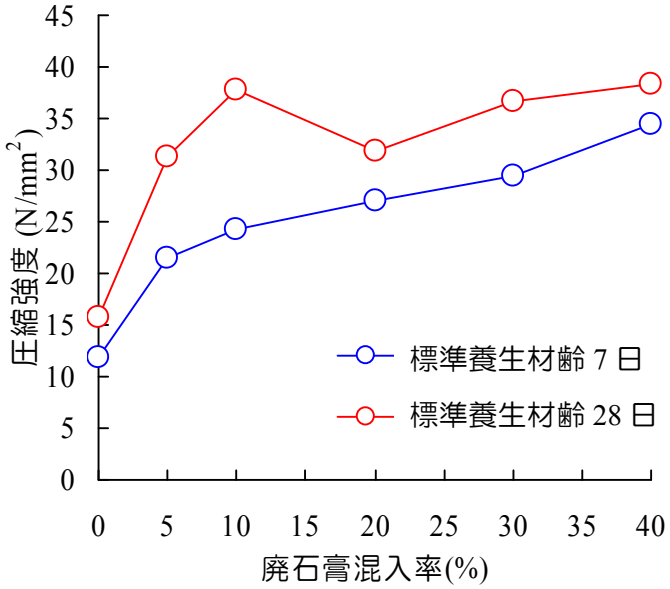


図 2　廃石膏混入率が生コンスラッジ硬化体の圧縮強度に及ぼす影響

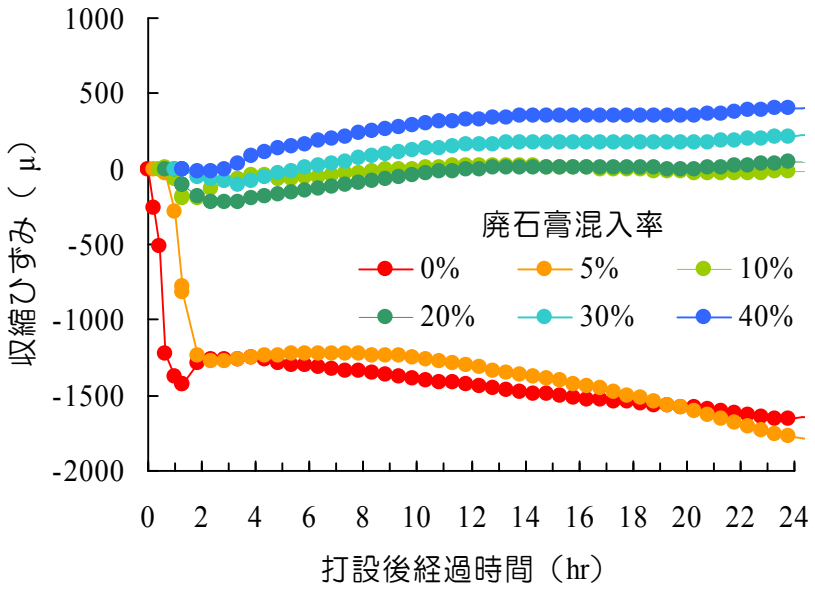


図 3　廃石膏混入率が生コンスラッジ硬化体の収縮性状に及ぼす影響

３．２　短繊維補強による生コンスラッジ硬化体の高靭性化

表 2 に本実験で使用した短繊維の種類を示す。短繊維には、繊維長さが 18mm のアクリル繊維、ポリビニルアルコール（ビニロン）繊維およびポリエチレン繊維の 3 種類の合成繊維を使用した。なお、アクリル繊維とビニロン繊維は、アスベスト製品の石綿代替繊維として実績がある。**表 3** に使用調合を示す。繊維混入率は、結合材固形分（生コンスラッジ固形分＋高炉スラグ微粉末）に対する質量比で 1.0%、廃石膏混入率は 10%一定とした。

表 2　本実験で使用した短繊維の種類

アクリル繊維	密度=1.18g/cm^3、繊維径×繊維長さ=12μm×18mm 引張強度=1370N/mm^2、引張弾性率=18.6kN/mm^2
ビニロン繊維	密度=1.3g/cm^3、繊維径×繊維長さ=41μm×18mm 引張強度=1850N/mm^2、引張弾性率=43.9kN/mm^2
ポリエチレン繊維	密度=0.97g/cm^3、繊維径×繊維長さ=12μm×18mm 引張強度=2620N/mm^2、引張弾性率=78.7kN/mm^2

表 3　使用調合

繊維種類	W_f (%)	S_d/B (%)	W/B (%)	G_y/B (%)	S_p/B (%)	フロー値 (mm)
プレーン	0	20	70	10	0.5	187
アクリル繊維	1.0	20	70	10	1.0	136
ビニロン繊維	1.0	20	70	10	1.0	149
ポリエチレン繊維	1.0	20	70	10	1.0	141

＊ W_f：繊維混入率、$B=S_d+S_g$：結合材固形分、G_y：廃石膏、S_p：高性能 AE 減水剤

表 4 に強度試験結果を示す。なお、圧縮強度および引張強度試験には φ50×100mm 円柱供試体、曲げ強度試験には 40×40×160mm 角柱供試体を各 3 個ずつ作製し、標準養生材齢 7 日後に強度試験に供した。また、**図 4** に曲げ試験における荷重ー載荷点変位曲線、**写真 2** には供試体の最終的ひび割れ状況を示す。繊維無混入のプレーンとの比較で、短繊維補強により引張強度および曲げ強度の大きな増加とともに、複数ひび割れの発生を伴いながら、曲げ耐力および変形能力の顕著な増加が認められた。なお、繊維の引張強度がもっとも小さいアクリル繊維を使用した場合には、繊維の破断に起因して、複数ひび割れの発生が少なく、曲げ靭性も他の繊維を使用した場合に比べてかなり小さくなっている。

表 4　強度試験結果

繊維種類	W_f (%)	圧縮強度 (N/mm^2)	引張強度 (N/mm^2)	曲げ強度 (N/mm^2)
プレーン	0	22.2	1.22	2.62
アクリル繊維	1.0	23.9	2.71	6.33
ビニロン繊維	1.0	24.4	3.57	7.78
ポリエチレン繊維	1.0	24.3	4.43	12.1

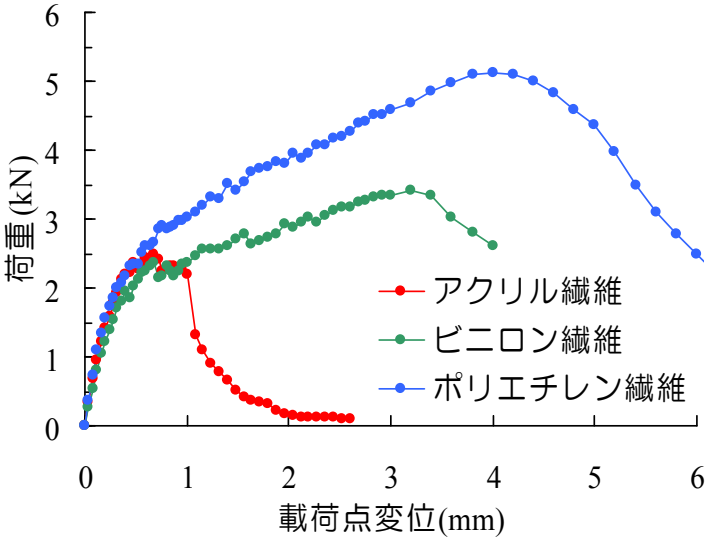


図 4　曲げ試験における荷重ー載荷点変位曲線の測定値

写真 2　曲げ試験における供試体の最終的ひび割れ状況

３．３　建築用ボードの曲げ性能他

前記の短繊維補強生コンスラッジ硬化体を用いて、建築用ボード 3 号試験体（400×500mm、厚さ 40mm）を試作し、曲げ性能試験を行った。また、厚さ 30mm、600×900mm のボードを作製し、収縮・そり、ひび割れ等の有無を観察した。なお、使用した短繊維は、ポリエチレン繊維とした。**表 5** に強度試験結果、**図 5** に曲げ試験における荷重ー載荷点変位曲線を示す。プレーンに比べて、短繊維補強ボードの曲げ破壊荷重は約 20 倍と大きく増加し、複数ひび割れの発生を伴いながら曲げ耐力および変形能力の顕著な増加が認められた。ただし、強度の寸法効果により、40×40×160mm 角柱供試体に比べて、ボード 3 号試験体の曲げ強度は約 3 割程度低下しているが、硬化体が非常に高靭性であるために、ボードとして十分な曲げ強度が保持されている。また、600×900mm のボードについて、収縮・そり、ひび割れ等は観察されず、十分な寸法安定性が得られた。

表 5　強度試験結果

W_f (%)	素材試験			ボード 3 号試験体	
	圧縮強度 (N/mm^2)	引張強度 (N/mm^2)	曲げ強度 (N/mm^2)	曲げ破壊荷重 (N)	曲げ強度 (N/mm^2)
0	16.5	ー	0.83	434	0.41
1.0	20.4	4.27	10.6	8254	7.74

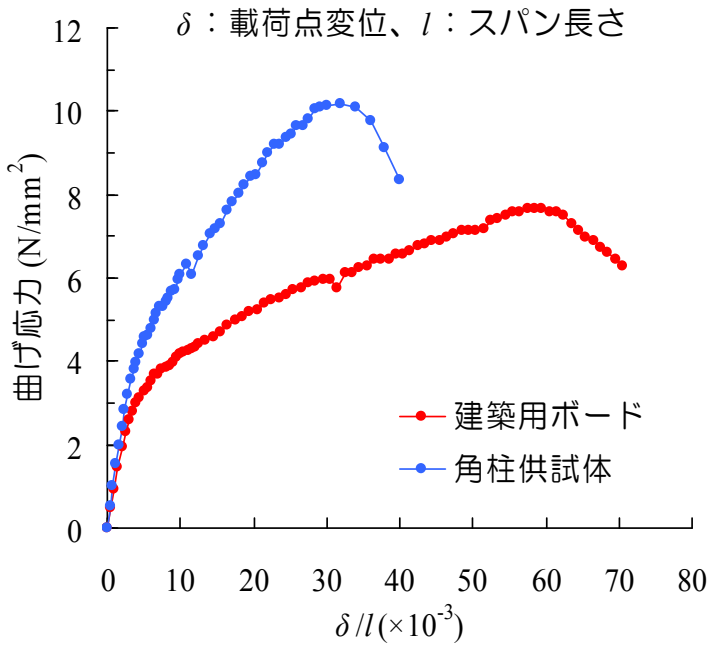


図 5　曲げ試験における曲げ応力ー載荷点変位曲線の測定値

4．今後の展開

生コンスラッジの安定型固化処理への廃石膏の適用に関しては、

1) 廃石膏の混入により、有価物の高炉スラグ微粉末の使用量を減らすことができるが、コスト削減のために使用量を少なくすると、生コンスラッジの品質によっては安定強度が得られない場合がある。高炉スラグ微粉末に JIS 規格品外の原料粗粉を用い、廃石膏混入により初期強度発現促進効果が得られれば、コスト低減に有効であり、生コンスラッジおよび高炉スラグの品質が圧縮強度に及ぼす影響についてさらに実験的検討を行う。
2) 生コンスラッジの品質によっては強度のばらつきが大きくなること、また現場で固化処理を行う場合には、温度や乾湿等の養生条件の影響を受けやすくなることに関係して、生コンスラッジの品質、強度のばらつきおよび養生条件を考慮した強度の補正や強度保証材齢についてさらに実験的検討を行う。
3) 事業化に際し採算ベースに見合う総合的な固化処理技術の開発を進め、生コンスラッジの安定型固化処理に関する技術提供および技術者派遣事業を展開する。

生コンスラッジ硬化体の建築用ボードへの適用に関しては、

1) アクリル繊維、ビニロン繊維、ポリエチレン繊維のうち、繊維補強効果や価格面でビニロン繊維の利用が優位であるが、グラスウール廃材の有効利用も兼ねて、グラスウール廃材の短繊維補強材としての適用性について実験的検討を行う。
2) 高含水率の生コンスラッジの利用を想定し、軽量化兼吸水性混和材としてシラスバルーン、木炭粉末、石炭灰、パルプスラッジ焼却灰等の微粉末を生コンスラッジと混合し、水分調整を行う方法の適用性について実験的検討を行う。
3) ボード製造法（流し込み成形、加圧成形、押し出し成形など）
4) 建築用ボードとしての性能評価（収縮・そり、ひび割れ等に関わる寸法安定性、曲げおよ

び衝撃性能、釘打ち性能など）

5) 多機能化（調湿、断熱、吸音・防音、消臭、耐汚性など）

NPO 法人廃棄物再資源化研究会
平成 16 年度　第 5 回活動報告会

「無機廃材再資源化研究部会」成果報告書

１．はじめに

平成 15 年度より、旧部会を再編成し、有機廃材、無機廃材、焼却灰および木質廃材の 4 部会の構成となり、各部会で新たな研究活動が進められ、1 年が経過した。本年度は、第一回部会において部会員から研究課題を募り、短期および長期目標に応じて部会内で取り上げる研究テーマを選別し、研究を系統的に推進していく方針を採った。旧部会からの継続研究と新規課題研究に分けて、提案の研究テーマを以下に列挙する。

［継続研究］

- 生コンスラッジの安定型固化処理技術の開発
- コンクリート廃材微粉末の建設用埋め戻し材への再利用
- 陶磁器・瓦くずの路盤材への利用
- リサイクル石膏粉の用途開発

［新規研究］

- 廃ガラス発泡軽量骨材を用いたポーラスコンクリートの製造と藻場形成体への利用（木質廃材再資源化研究部会との合同研究）
- 多孔質材料を用いた海草付着のためのコンクリート表面処理工法
- 廃石膏利用セメント代替固化材の開発
- ブラックシリカ、酸化チタンの有効利用
- リサイクル材料利用コンクリート製品の開発

以上のいくつかに関する研究成果について報告する。

２．部会活動記録

平成 16 年度の無機廃材再資源化研究部会の年間活動記録を次に示す。

平成 16 年 7 月 23 日　第一回無機廃材再資源化研究部会

部会員から今年度の研究テーマの提案ならびに研究推進方策の検討

平成 16 年 11 月 4 日　第一回合同部会（無機廃材・焼却灰・木質廃材部会）

研究進捗状況の報告および今後の展開について検討

平成 17 年 4 月 22 日　第二回合同部会（無機廃材・焼却灰・木質廃材部会）

研究進捗状況および活動成果報告会で発表する研究成果の報告

生コンスラッジの安定型固化処理技術の開発

熊本大学工学部環境システム工学科　村上　聖

１．はじめに

部会内で、生コンスラッジを圧縮強度が 8N/mm^2 以上になるように固化し安定型廃棄物として処理する方法や、生コンスラッジ固化体の建築用ボードへの有効利用に関して一連の研究を行ってきた。生コンスラッジの固化処理方法は、生コンスラッジ（脱水および非脱水スラッジケーキ）、高炉スラグ微粉末、廃石膏（リサイクル石膏粉）を混合し、生コンスラッジのアルカリ刺激による高炉スラグの潜在水硬性と、廃石膏と高炉スラグとの反応で生成されるエトリンガイトによる強度発現促進および収縮低減効果を利用したものである。

本研究では、既報の実験結果を取りまとめ、所要の圧縮強度を得るための生コンスラッジ固化体の調合設計方法について検討を行った。

２．調合設計方法

既報 [1)]では、①高炉スラグは、生コンスラッジケーキ中の水酸化カルシウム $Ca(OH)_2$ のアルカリ刺激により硬化するが、最初に添加されたアルカリ性物質は単に高炉スラグの初期水和を促す作用を行うのみで化学量論的に必要なものではなく、高炉スラグの潜在水硬性を発揮させるのに必要なアルカリ刺激材としてのスラッジケーキ固形分混入率に閾値が存在すること、②水セメント比説に従えば、水和反応に与らない余剰水は毛細管空隙となって固化体の強度を低下させ、アルカリ刺激材として必要な量のスラッジケーキを混入した場合、水結合材固形分比により固化体の圧縮強度が一義的に決まるという推論に基づいて実験的検討を行い、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混入率の閾値は約 10%であり、スラッジケーキ固形分混入率がそれ以上において、結合材固形分水比と圧縮強度との間にほぼ直線的な関係が得られることを示した。

本方法では、生コンスラッジ固化体をスラッジケーキ固形分（S_d）、スラッジケーキ含水量（W）、高炉スラグ微粉末（S_g）の 3 成分系の結合材として、3 成分の混合比率を変えて作製した固化体の圧縮強度試験結果をもとに、結合材固形分水比（B/W、$B=S_d+S_g$：結合材固形分）と圧縮強度との間の回帰直線を求め、所要の圧縮強度を得るための 3 成分の混合比率の範囲を同定した。

３．実験方法

表 1 に使用材料を示す。生コンスラッジには、含水率が約 200～900%の脱水および非脱水スラッジケーキ（なお、含水率は W/S_d で定義され、加水量も含水量に含めている）、

高炉スラグ微粉末には、ブレーン 6000 クラスの JIS 適合品、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およびロールミルにより粉砕し、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。

練混ぜには、容量 5*l* のオムニミキサーまたはモルタルミキサーを用い、スラッジケーキを 90 秒間空練り後、高炉スラグ微粉末、廃石膏を投入し、2 分間練混ぜた。なお、水量が過少で練混ぜが困難な調合については、練り具合を観察しながら適宜高性能 AE 減水剤を添加した。

調合は、スラッジケーキ固形分、スラッジケーキ含水量、高炉スラグ微粉末の 3 成分の混合比率を変える方法により、廃石膏を混入する場合には、廃石膏混入率（結合材固形分に対する質量比）=10%一定で外割混入した。

供試体は、φ50×100mm の円柱供試体を用い、各調合ごとに 3 個ずつ作製し、標準養生材齢 7 日後に圧縮強度試験に供した。

表１　使用材料

生コンスラッジ	脱水および非脱水スラッジケーキ 含水率=約 200～900%　＊含水量には加水量も含む
高炉スラグ微粉末	JIS 適合品 密度=2.89g/cm^3、比表面積=6140cm^2/g
廃石膏	リサイクル石膏粉（非加熱、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%
混和剤	高性能 AE 減水剤

４．実験結果

図 1 に、廃石膏混入率=0%および 10%について結合材固形分水比と標準養生材齢 7 日圧縮強度との関係を示す。なお、図中には回帰直線を併記している。図より、結合材固形分水比と圧縮強度との間にほぼ直線的な関係が得られ、廃石膏を混入することにより短期材齢での圧縮強度の発現が顕著に大きくなることが分かる。

いま、実験結果により得られた回帰直線から、次式に示すように、所要の圧縮強度を得るための 3 成分の混合比率の範囲を求めることができる。

$$F_7 = \alpha\left(\frac{B}{W}\right) + \beta \quad \therefore \frac{B}{W} = \frac{F_7 - \beta}{\alpha}$$

ここで、$S_d + W + S_g = 1, \quad B = S_d + S_g$ より

$$W = \frac{1}{1 + \dfrac{F_7 - \beta}{\alpha}} \qquad [1]$$

ここに、F_7：標準養生材齢 7 日圧縮強度

B/W：結合材固形分水比

α、β：回帰係数（図 1 併記）

以上の結果に基づいて、図 2 に 3 成分図表上の圧縮強度分布の実験結果と計算結果の比較を示す。実験結果と計算結果との間に良い対応が得られ、この図表により所要の圧縮強度を得るための 3 成分の混合比率を簡易に選定することができる。なお、含水量 W が過少では練混ぜが困難になり、混和剤の使用が必要になること、逆に W が過大ではブリーディングや沈降が大きく、成形が困難になるので、施工性も考慮する必要がある。

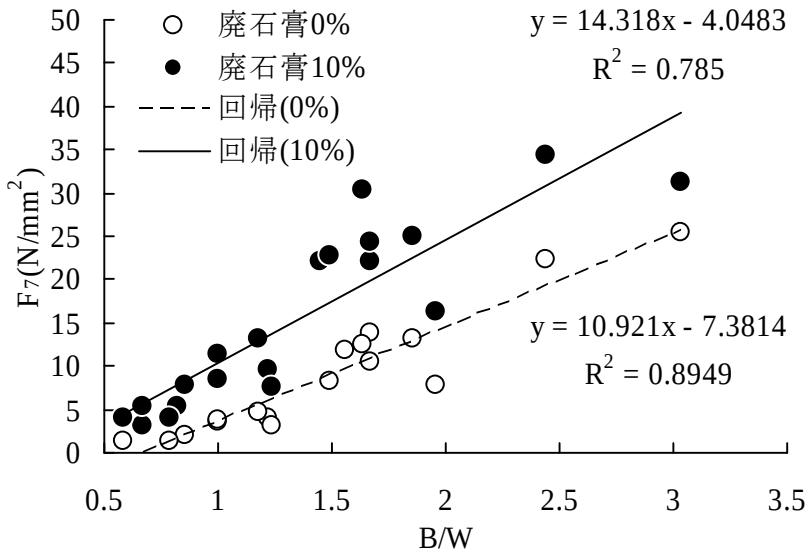


図 1　結合材固形分水比と圧縮強度との関係

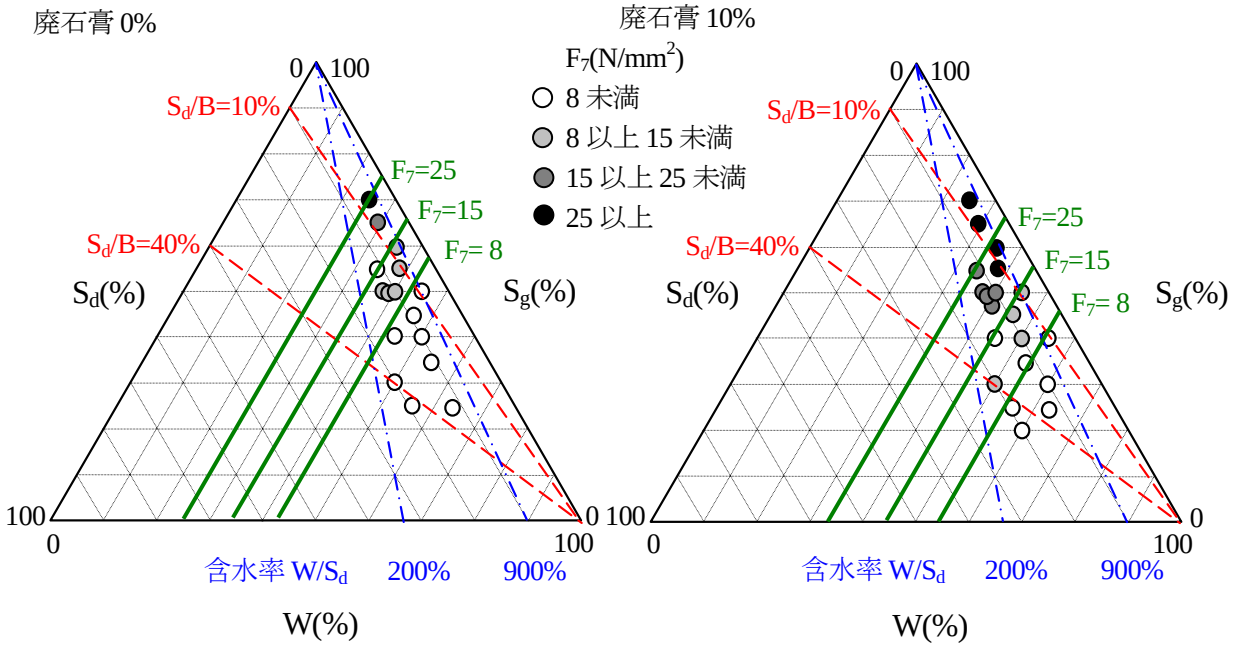


図 2　3 成分図表上の圧縮強度分布

５．まとめ

本研究では、生コンスラッジの安定型固化処理技術として、スラッジケーキ固形分、スラッジケーキ含水量、高炉スラグ微粉末を 3 成分とし、強度発現促進および収縮低減効果を有する廃石膏を混合した生コンスラッジ固化体を有効利用するための調合設計方法を提案した。所要の圧縮強度を得るのに必要な 3 成分の混合比率を図 2 を利用して簡易に求めることができる。なお、使用材料（特に、高炉スラグ微粉末）や養生材齢が本実験結果と異なる場合には、強度の補正が必要になり、高炉スラグ微粉末の比表面積が小さい場合には強度発現が小さくなること、材齢が長くなるとほぼ材齢に比例して強度増進が見込めること、乾燥・低温養生の場合には強度発現がかなり小さくなる恐れがあることなどを考慮しなければならない。

廃ガラス発泡軽量骨材を用いたポーラスコンクリートの製造

熊本大学工学部環境システム工学科　村上　聖

１．はじめに

ポーラスコンクリートは、その名が示すように多孔質で連続空隙を多量に有するコンクリートであり、透水・排水・保水性能、吸音性能、ガス吸着性能、温熱性能、調湿性能といった環境負荷低減型ならびに緑化・植生、水質浄化、藻場造成、ハビタット（生物の生息圏、生育空間）といった生物共生型のエココンクリートとして近年注目されている。

本研究では、骨材自体も多孔質である廃ガラス発泡軽量骨材を用いたポーラスコンクリートの製造法について実験的検討を行った。

２．製造法に関する予備実験

表 1 に使用材料を示す。なお、廃ガラス発泡軽量骨材の骨材試験は、表 2 に示す JIS に準拠して行った。

表 1　使用材料

セメント	高炉セメント B 種 密度=3.04g/cm^3
粗骨材	廃ガラス発泡軽量骨材（NEXT ONE） 表乾密度=0.832g/cm^3 吸水率=44.1% 絶乾密度=0.465g/cm^3 実積率=63.0%
混和剤	高性能 AE 減水剤

表 2　骨材試験方法

試験手順	備考
水中浸漬	24 時間以上
表乾状態用意	紙タオルで骨材表面の空隙中の水分を拭き取る
表乾質量 1000g 計量	
水中質量測定	表乾容積、表乾密度計算
絶乾状態	乾燥機（約 110℃）
絶乾質量測定	吸水率、絶乾密度計算
ジッキング試験	容器中の骨材質量測定→単位容積質量、実積率計算

表 3 に使用調合を示す。なお、骨材には表乾状態のものを使用したが、水セメント比が 25%以上では、ミキサーの撹拌中に骨材内部からの放水によりセメントペーストの流

動性が著しくなり、セメントペーストの垂れが生じたために、水セメント比は20%とした。練り混ぜには、容量10*l*のオムニミキサーを使用し、セメント、骨材を投入し30秒間空練り後、水を投入し2分間練り混ぜた。供試体は、φ100×200mmの円柱供試体を用い、各調合について空隙率試験および圧縮強度試験用に各3個ずつ作製し、標準養生材齢28日後に試験に供した。

表3　使用調合

W/C (%)	目標空隙率 (%)	単位量（kg/m^3）			S_p/C (%)
		C	W	G	
20	10	534	107	514	0
	20	344	69	514	0
	30	155	31	514	0

＊ W/C：水セメント比、C：セメント、W：水、G：粗骨材、S_p：混和剤

＊ 骨材は表乾状態

表4に試験結果を示す。圧縮強度は、空隙率が小さくなるほど増加しているが、骨材自身が低強度であるために普通骨材を用いた一般的なポーラスコンクリートの圧縮強度に比べるとかなり低くなっている。また、目標空隙率に対して、全空隙率の測定値は一様に約26%大きくなっており、これは骨材自身の空隙が多いことに起因するものであり、調合上の目標空隙率と実際の空隙率との対応は一般的なポーラスコンクリートの場合と異なる。

表4　試験結果

W/C (%)	目　標空隙率 (%)	空隙率						No.	圧縮強度 (N/mm^2)
		V_1 (cm^3)	W_1 (g)	W_2 (g)	W_3 (g)	全空隙率 (%)	連続空隙率 (%)		
20	10	1607	380	1394	301	36.9	32.0	1	3.56
								2	5.71
								3	6.53
								平均	5.27
	20	1626	383	1311	285	42.9	36.9	1	5.37
								2	3.33
								3	1.75
								平均	3.48
	30	1618	261	936	120	58.3	49.6	1	1.17
								2	1.39
								3	2.20
								平均	1.59

＊ V_1：供試体容積、W_1：供試体水中質量、W_2：24 時間自然放置後の気中質量、W_3：24時間自然放置後に再び測定された水中質量

３．製造法に関する本実験

予備実験結果により、表乾骨材を使用した場合、ミキサーの撹拌中に骨材内部から放水し、セメントペーストの流動性が大きくなり、セメントペーストの垂れが生じる可能性があることや多孔質の骨材を表乾状態にすることが面倒であることを考慮し、本実験では絶乾状態の骨材を用い、ミキサーの撹拌中に骨材に吸水される水量を単位水量に加える方法を採用した。加水量として骨材の吸水率から得られる吸水量の 1/3、2/3 について試し練りを行った結果、吸水量の 1/3 を単位水量に加える補正が良好であった。また、比較として砕石 5 号を用いた一般的なポーラスコンクリートの製造も行った。表 5 に使用材料、表 6 に使用調合、表 7 に練り混ぜ方法をそれぞれ示す。なお、廃ガラス発泡軽量骨材を用いた場合、使用したオムニミキサーの撹拌速度が高速では骨材がかなり破砕されるために低速で練り混ぜを行った。

表 5　使用材料

セメント	高炉セメント B 種 密度=3.04g/cm^3
粗骨材	廃ガラス発泡軽量骨材（NEXT ONE） 表乾密度=0.832g/cm^3 吸水率=44.1% 絶乾密度=0.465g/cm^3 実積率=63.0%
	砕石 5 号（比較用） 表乾密度=2.95g/cm^3 吸水率=1.27% 粒径=13～20mm 実積率=55.7%
混和剤	高性能 AE 減水剤

表 6　使用調合

使用骨材	W/C (%)	目標空隙率 (%)	単位量（kg/m^3）			S_p/C (%)	備考
			C	W	G		
NEXT ONE	20	20	344	69＋42	287	0	骨材は絶乾
砕石 5 号	25	30	266	67	1610	0.5	骨材は表乾

表 7　練り混ぜ方法

使用骨材	練り混ぜ方法		備考
NEXT ONE	セメント、骨材	空練り　30 秒	オムニミキサー低速撹拌
	＋水	練混ぜ　2 分	＊高速撹拌では骨材の破損が著しい
砕石 5 号	セメント、骨材	空練り　30 秒	強制 2 軸ミキサー
	＋水（混和剤）	練混ぜ　2 分	

＊ オムニミキサーは容量 30*l*、強制 2 軸ミキサーは容量 55*l*

表 8 に試験結果を示す。廃ガラス発泡軽量骨材では、ミキサーを高速撹拌した場合骨材が破砕され、空隙率が非常に小さくなったために圧縮強度はかなり大きくなっている。低速撹拌の場合には、予備実験とほぼ同様の結果が得られている。また、砕石を用いたポーラスコンクリートに比べて、廃ガラス発泡軽量骨材を用いたポーラスコンクリートの圧縮強度は、かなり低くなっている。これは、空隙率が大きいことも関係しているが骨材強度が小さいことが大きな理由である。ただし、24 時間自然放置後のかさ密度を比較すると、砕石ポーラスコンクリートが 1.92g/cm^3、廃ガラス発泡軽量骨材ポーラスコンクリートが 0.83g/cm^3 であり、その軽量性を生かした用途、例えば屋上緑化などが期待できる。

表 8　試験結果

使用骨材	W/C (%)	目　標空隙率 (%)	No.	空隙率						圧縮強度 (N/mm^2)
				V_1 (cm^3)	W_1 (g)	W_2 (g)	W_3 (g)	全空隙率 (%)	連続空隙率 (%)	
NEXT ONE	20	20 高速撹拌	1	1610	917	2272	865	15.9	12.6	12.3
			2	1602	937	2270	879	16.8	13.2	17.5
			3	1587	1006	2483	964	6.92	4.24	10.6
			平均	1600	953	2342	902	13.2	10.0	13.5
		20 低速撹拌	1	1571	361	1258	281	42.9	37.8	3.77
			2	1571	417	1370	343	39.3	34.6	3.07
			3	1594	363	1301	286	41.2	36.4	3.85
			平均	1579	380	1310	303	41.1	36.3	3.56
砕石 5 号	25	30	1	1579	2015	3048	1976	34.6	32.1	8.14
			2	1602	2046	3099	1974	34.3	29.8	11.4
			3	1579	1981	2998	1946	35.6	33.4	9.96
			平均	1587	2014	3048	1965	34.8	31.8	9.83

写真 1　廃ガラス発泡軽量骨材を用いたポーラスコンクリート

NPO 法人廃棄物再資源化研究会

平成 17 年度　第 6 回活動報告会

廃ガラス発泡軽量骨材を用いたポーラスコンクリートの屋上緑化への利用

熊本大学工学部建築学科　村上　聖

１．はじめに

ポーラスコンクリートは、その名が示すように多孔質で連続空隙を多量に有するコンクリートであり、透水・排水・保水性能、吸音性能、ガス吸着性能、温熱性能、調湿性能といった環境負荷低減型ならびに緑化・植生、水質浄化、藻場造成、ハビタット（生物の生息圏、生育空間）といった生物共生型のエココンクリートとして近年注目されている。

本研究では、骨材自体も多孔質である廃ガラス発泡軽量骨材を用いた軽量ポーラスコンクリートの屋上緑化への利用を目的に､ポーラスコンクリート表面に高麗芝を植栽し、越冬後の芝の生長状況について長期観察を行った。

２．供試体作製方法

表 1 に使用材料を示す。なお、廃ガラス発泡軽量骨材の骨材試験は、表 2 に示す JIS に準拠して行った。また、比較として砕石 5 号を用い、保水材に木炭粉末をプレミックスしたポーラスコンクリートも同時に作製した。

表 1　使用材料

セメント	高炉セメント B 種 密度=3.03g/cm^3
粗骨材	廃ガラス発泡軽量骨材（NEXT ONE） 表乾密度=0.832g/cm^3 吸水率=44.1% 絶乾密度=0.465g/cm^3 実積率=63.0%
	砕石 5 号 表乾密度=2.95g/cm^3 吸水率=1.27% 絶乾密度=2.91g/cm^3 実積率=55.7%
混和剤	高性能 AE 減水剤
保水材	木炭粉末 絶乾密度=0.38g/cm^3 吸水率=189%
緑化用資材	培養土 張り芝（高麗芝）

表 2　骨材試験方法

試験手順	備考
水中浸漬	24 時間以上
表乾状態用意	紙タオルで骨材表面の空隙中の水分を拭き取る
表乾質量 1000g 計量	
水中質量測定	表乾容積、表乾密度計算
絶乾状態	乾燥機（約 110℃）
絶乾質量測定	吸水率、絶乾密度計算
ジッキング試験	容器中の骨材質量測定→単位容積質量、実積率計算

表 3 に使用調合を示す。ここで、廃ガラス発泡軽量骨材を用いたポーラスコンクリートに関しては、前報の結果に基づいて、骨材は絶乾状態とし、練混ぜ時の骨材の吸水を見込んで、骨材の吸水量の 1/3 の水を単位水量に加えた。また、水セメント比は W/C=20%、計算上の目標空隙率は 20%として調合を定めた。なお、実際の空隙率は、骨材の空隙も含まれるので、目標空隙率よりもかなり大きくなる。一方、砕石 5 号を用いたポーラスコンクリートに関しては、既報の結果に基づいて、骨材は表乾状態とし、練混ぜ時の木炭の吸水を見込んで、木炭の吸水量の 2/3 の水を単位水量に加えた。また、水セメント比は W/C=25%、目標空隙率は 30%として調合を定めた。なお、木炭粉末混入率は、C×10%とした。

練混ぜには、砕石 5 号を用いたポーラスコンクリートでは強制 2 軸ミキサー（容量 55*l*）、廃ガラス発泡軽量骨材を用いたものではオムニミキサー（容量 30*l*）をそれぞれ用いた。表 4 に練混ぜ方法を示すが、廃ガラス発泡軽量骨材を用いたポーラスコンクリートでは、骨材の破砕が生じやすいので、低速撹拌を行った。

表 3　使用調合

使用骨材	W/C (%)	目標空隙率 (%)	単位量（kg/m^3）				S_p/C (%)	備考
			C	W	G	Ch		
砕石 5 号	25	30	266	67+34	1610	27	0.5	骨材は表乾 Ch/C=10% 木炭吸水量×2/3
NEXT ONE	20	20	344	69+42	287	0	0	骨材は絶乾 骨材吸水量×1/3

＊ C：セメント、W：水、G：粗骨材、Ch：木炭、S_p：高性能 AE 減水剤

表 4　練混ぜ方法

砕石 5 号	強制 2 軸ミキサー（容量 55*l*）使用 1)　セメント、粗骨材、木炭粉末投入後、30 秒間空練り 2)　水（高性能 AE 減水剤）投入後、2 分間練混ぜ
NEXT ONE	オムニミキサー（容量 30*l*）使用、低速撹拌 1)　セメント、粗骨材投入後、30 秒間空練り 2)　水投入後、2 分間練混ぜ

表 5 に強度試験用供試体および植栽試験用供試体の種類を示す。なお、圧縮強度試験用供試体は、セメントペーストにより両面キャッピングを行った。また、表 6 に空隙率および圧縮強度試験結果を示す。その結果として、廃ガラス発泡軽量骨材自体が低強度のため、それを用いたポーラスコンクリートの圧縮強度も比較用の砕石 5 号を用いたポーラスコンクリートに比べてかなり小さくなっているが、気乾密度は約 1/2 弱と顕著な軽量化をはかることができ、屋上緑化基盤として有用であると考えられる。

表 5　供試体の種類

試験項目	供試体	個数	測定項目
空隙率試験	φ100×200mm 円柱	各 3	全空隙率、連続空隙率、気乾密度
圧縮強度試験	φ100×200mm 円柱 ＊　両面キャッピング	各 3	圧縮強度
植栽試験	600×600×100mm 版	各 1	芝成長状況（写真撮影）

＊　強度試験用供試体は、標準養生材齢 28 日

表 6　試験結果

使用骨材	W/C (%)	目　標 空隙率 (%)	空隙率						圧縮強度 (N/mm^2)
			V_1 (cm^3)	W_1 (g)	W_2 (g)	W_3 (g)	全 空隙率 (%)	連　続 空隙率 (%)	
砕石 5 号 ＊　ρ=1.83	25	30	1597	1917	2926	1859	36.8	33.2	9.48
NEXT ONE ＊　ρ=0.78	20	20	1592	373.5	1246	331.5	45.2	42.5	1.82

＊　V_1：供試体容積、W_1：供試体水中質量、W_2：24 時間自然放置後の気中質量、W_3：24 時間自然放置後に再び測定された水中質量、$\rho=W_2/V_1$：気乾密度（g/cm^3）

３．高麗芝の植栽試験結果

写真 1 に示すように、ポーラスコンクリート表面に培養土を約 2cm ほど盛り、その上に張り芝（高麗芝）を敷設した。また、比較として、地面の上に直接張り芝を敷設し、越冬後の現在までの芝の生長状況を写真撮影により観察を行った。その結果を写真 2 に示す。植栽開始が去年の 10 月下旬であったが、越冬後も立ち枯れすることなく、新緑を生じた。特に、地面に張った芝には野生種の植物が繁茂し、張り芝の区画が識別できないのに対して、ポーラスコンクリート表面に張った芝には、ほとんど野生種の植物が生えておらず、芝のメンテナンスが容易になる利点も得られることが分かった。

写真 1　張り芝敷設（2005.10.24）

地面

砕石 5 号

NEXT ONE

[1] 2005 年 11 月 7 日

地面

砕石 5 号

NEXT ONE

[2] 2005 年 11 月 14 日

地面

砕石 5 号

NEXT ONE

[3] 2005 年 12 月 21 日

地面

砕石 5 号

NEXT ONE

[4] 2006 年 4 月 11 日

地面

砕石 5 号

NEXT ONE

[5] 2006 年 4 月 26 日

地面　　砕石 5 号　　NEXT ONE

[6] 2006 年 8 月 7 日

地面　　砕石 5 号　　NEXT ONE

[7]2006 年 9 月 12 日

地面　　砕石 5 号　　NEXT ONE

[8]2006 年 12 月 19 日

写真 2　張り芝の生長状況

４．まとめ

本研究では、廃ガラス発泡軽量骨材を用いた軽量ポーラスコンクリートの屋上緑化への利用を目的に、緑化基盤としての基礎的物性の測定と張り芝の生長状況の経過観察を行った。その結果として、屋上緑化として十分な軽量化が達成され、張り芝の生長状況に関しては越冬後の立ち枯れもなく、野生種の植物も繁茂しないことから、メンテナンスの容易な緑化基盤が実現できることが期待される。

NPO 法人廃棄物再資源化研究会
平成 18 年度　第 7 回活動報告会

保水性を付与した廃ガラス発泡軽量骨材ポーラスコンクリートの屋上緑化への利用

熊本大学工学部建築学科　村上　聖

１．はじめに

ポーラスコンクリートは多数の空隙を有するために生物共生型エコマテリアルとして期待されている。ここで対象とする屋上緑化ポーラスコンクリートは、粗骨材に廃ガラス発泡軽量骨材を使用し､軽量化による積載荷重低減に資することを目的としている。また、屋上緑化では日射による水分蒸散が激しいので十分な灌水が要求されるが、ポーラスコンクリート自体にある程度保水性を付与することにより灌水設備の簡略化が期待される。そこで、本研究では、ポーラスコンクリートの保水性を確保するための各種保水層の開発ならびに保水性が植生効果に及ぼす影響について実験的検討を行った。

２．実験方法

２．１　使用材料およびポーラスコンクリートの調合

表 1 に使用材料を示す。セメントには、植生を考慮し、高炉セメント B 種を用いた。粗骨材には、廃ガラス発泡軽量骨材と比較として砕石 5 号を用いた。また、廃ガラス発泡軽量骨材ポーラスコンクリートの下部に保水層を設け、その保水層として吸水率が約 40%と大きい珪砂を用いてポーラスコンクリートを作製した。なお、珪砂には、粒径が異なる 3 号と 8 号の 2 種類を用いた｡混和剤にはポリカルボン酸系の高性能 AE 減水剤、セメントペーストにプレミックスするタイプの保水材として、木炭粉末およびパルプスラッジ焼却灰（以下、PS 灰と称する）を用いた。

表 2 に各種ポーラスコンクリートの使用調合の一覧を示す。比較用の砕石 5 号使用の場合には、水セメント比を W/C=25%、目標空隙率を 30%一定とし、保水材無混入、木炭粉末をセメント質量の 10%混入および PS 灰をセメント質量の 20%混入の 3 種類についてポーラスコンクリートを作製した。なお、木炭粉末使用の場合、木炭吸水量の 2/3 の水を単位水量に加算、PS 灰使用の場合には、PS 灰質量の 0.5 倍の水を単位水量に加算し、混練時の木炭粉末および PS 灰の吸水を考慮した。廃ガラス発泡軽量骨材使用の場合は、水セメント比を W/C=20%、目標空隙率を 20%とし、骨材吸水量の 1/3 の水を単位水量に加算した。また、8 号珪砂使用の場合は、水セメント比を W/C=20%、目標空隙率を 20%とし、骨材吸水量を単位水量に加算、3 号珪砂使用の場合には、水セメント比を W/C=40%、目標空隙率を 20%とし、骨材吸水量の 2/3 の水を単位水量に加算した。なお、これらの調合は、試し練りにより定めた。

表 3 に各種ポーラスコンクリートの練混ぜ方法を示す。廃ガラス発泡軽量骨材および珪砂の場合には、通常の強制撹拌型ミキサーでは骨材の破損を生じるために、オムニミ

キサーを使用し、低速撹拌により練混ぜを行った。

表 1　使用材料

セメント	高炉セメント B 種 密度=3.03g/cm^3	
粗骨材	廃ガラス発泡軽量骨材（NEXT ONE） 表乾密度=0.832g/cm^3 吸水率=44.1% 絶乾密度=0.465g/cm^3 実積率=63.0%	砕石 5 号 表乾密度=2.95g/cm^3 吸水率=1.27% 絶乾密度=2.91g/cm^3 実積率=55.7%
保水層	3 号珪砂（ハーモニー3 号） 表乾密度=1.63g/cm^3 吸水率=41.4% 絶乾密度=0.955g/cm^3 粗粒率=3.51（最大寸法=2.5mm） 実積率=59.3%	8 号珪砂（ハーモニー8 号） 表乾密度=1.63g/cm^3 吸水率=42.4% 絶乾密度=0.939g/cm^3 粗粒率=6.26（最大寸法=15mm） 実積率=62.9%
混和剤	高性能 AE 減水剤（ポリカルボン酸系）	
保水材	木炭粉末 絶乾密度=0.38g/cm^3 吸水率=189%	パルプスラッジ焼却灰 絶乾密=2.31g/cm^3
緑化用資材	培養土、西洋芝、有機肥料	

表 2　ポーラスコンクリートの使用調合

使用骨材	W/C (%)	目　標 空隙率 (%)	単位量（kg/m^3）			保水材種類	保水材 (kg/m^3)	S_p/C (%)	備　考
			C	W	G				
砕石 5 号	25	30	266	67	1610	無し	0	0.5	粗骨材は表乾
	25	30	266	67+34	1610	木炭粉末	27	0.5	粗骨材は表乾 C_h/C=10% 木炭吸水量×2/3
	25	30	266	67+27	1610	PS 灰	53	0.5	粗骨材は表乾 PS/C=20% PS×0.5
NEXT ONE	20	20	344	69+42	287	無し	0	0	粗骨材は絶乾 骨材吸水量×1/3
8 号珪砂	20	20	346	69+245	579	無し	0	0	粗骨材は絶乾 骨材吸水量
3 号珪砂	40	20	300	120+153	555	無し	0	0	粗骨材は絶乾 骨材吸水量×2/3

＊　400×400×60mm 版：1 個、φ100×200mm 円柱：3 個（空隙率測定用）、3 個（圧縮強度試験用）

表 3　ポーラスコンクリートの練混ぜ方法

砕石 5 号：

強制 2 軸ミキサー（容量 55*l*）使用

1)　セメント、粗骨材投入後、30 秒間空練り

2)　水（高性能 AE 減水剤）投入後、2 分間練混ぜ

NEXT ONE、珪砂：

オムニミキサー（容量 30*l*）使用、低速撹拌

1)　セメント、粗骨材投入後、30 秒間空練り

2)　水投入後、2 分間低速撹拌

２．２　試験方法

ポーラスコンクリートの空隙率および圧縮強度試験には、φ100×200mm 円柱供試体を各 3 個ずつ作製し、標準養生材齢 28 日後、各試験に供した。

屋上緑化に供することを目的に、日射による水分蒸散をシミュレートするために、ここでは、赤外線照射によるポーラスコンクリート平板の水分蒸散量を測定した。図 1 に保水量試験に供したポーラスコンクリート平板の形状寸法を示す。供試体寸法は、すべて 400×400×60mm とし、表 2 に示すすべての使用調合について各 1 個ずつ作製した。また、廃ガラス発泡軽量骨材を用いたポーラスコンクリートと、保水層として珪砂を用いたポーラスコンクリートを 2 層構造としたものも作製した。なお、作製方法は、まず珪砂を用いたポーラスコンクリートを厚さ 20mm で打設し、その上に廃ガラス発泡軽量骨材を用いたポーラスコンクリートを打継ぐ方法によった。

保水量試験は、図 1 の供試体を用い、次の要領で行った（図 2 参照）。供試体は、24 時間 20℃水中浸漬後、湿布で包み 1 時間気中放置した。赤外線ランプは、アスファルトが 5 時間で 60℃に達する距離（27cm）に設置し、室温は 26℃として、供試体質量を所定の時間間隔で電子秤により測定した。また、24 時間の測定終了後、供試体を 110℃の乾燥器に入れ、保水量を測定した。ここで、保水率(%)を供試体の初期保水量に対する経時保水量の百分率として求めた。

植栽試験は、培養土に芝種子を 20*l*：1*dl* の割合で混合したものを前記供試体の表面に約 1cm 程度盛り、播種後の芝の生長状況を観察した。図 3 に各供試体の植栽試験状況を示す。

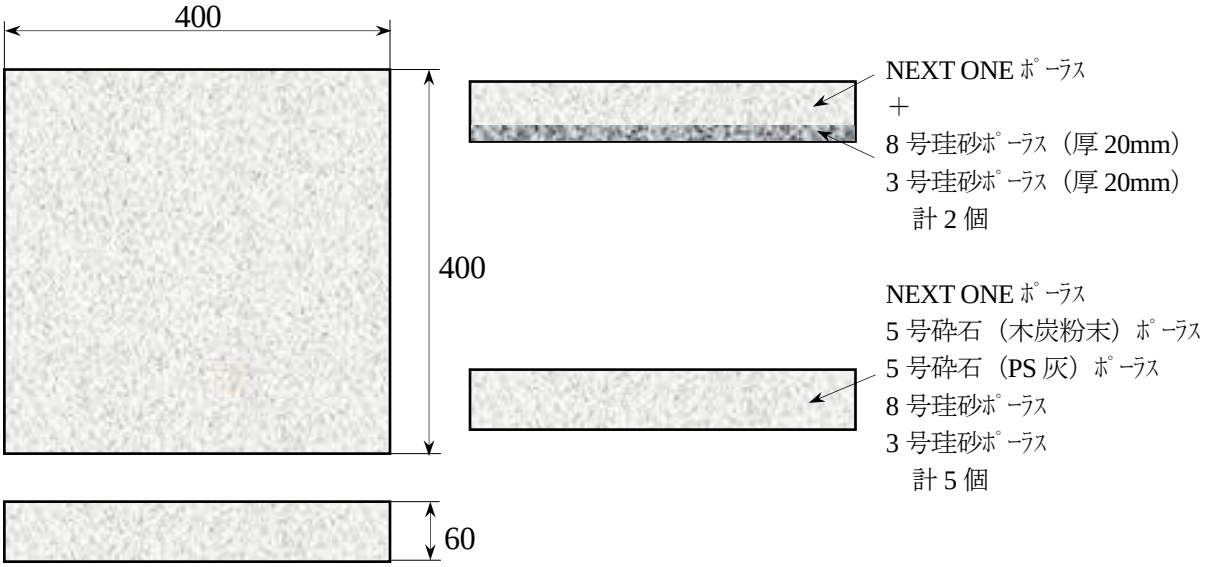


図 1　保水量試験および植栽試験に供したポーラスコンクリート平板の形状寸法

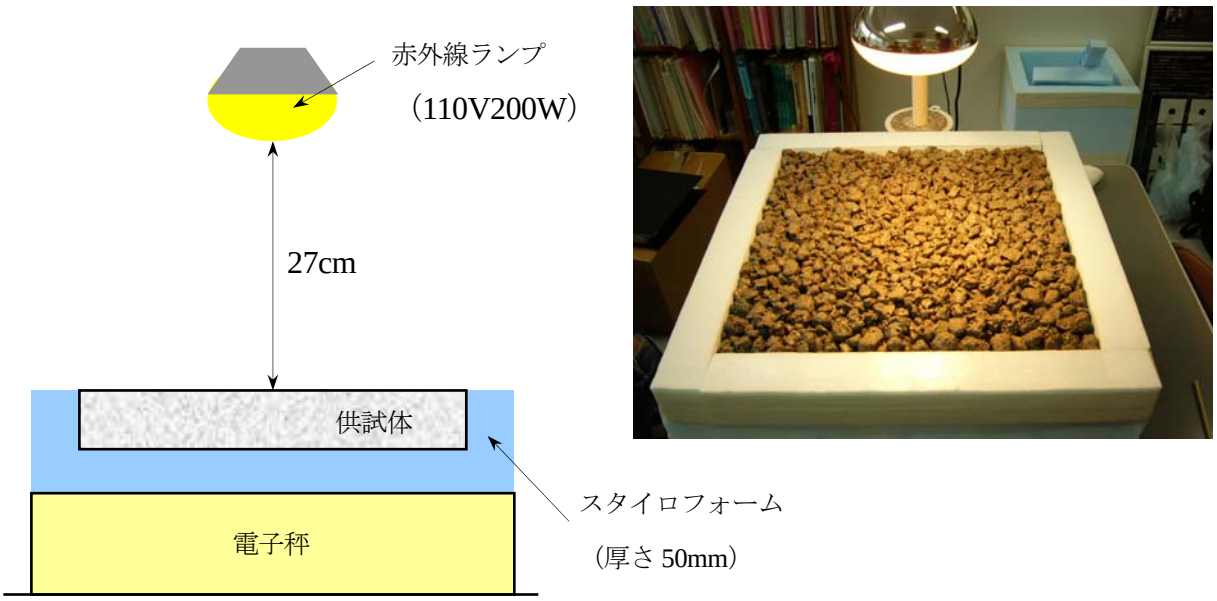


図 2　赤外線照射によるポーラスコンクリートの保水量試験

図 3　各供試体の植栽試験状況

３．実験結果

表 4 に各種ポーラスコンクリートの空隙率および圧縮強度試験結果を示す。また、図 4 に各供試体に対する空隙率、圧縮強度および表乾密度の変化を示す。空隙率に関して、砕石 5 号を使用したものは目標空隙率 30%にほぼ近い値が得られているが、保水材として木炭粉末や PS 灰を混入した場合には若干空隙率が小さくなっている。また、目標空隙率を 20%とした廃ガラス発泡軽量骨材、3 号および 8 号珪砂を使用したものは、8 号珪砂についてはほぼそれに近い値が得られているが、廃ガラス発泡軽量骨材を用いたものは、骨材自体の空隙量が大きいために約 2 倍の値になっている。また、3 号珪砂の場合には粒径の範囲が細骨材であるために、空隙がセメントペーストにより閉塞されやすく、目標空隙率よりもかなり小さい値となっている。圧縮強度に関しては、砕石 5 号を用いたものは、約 8～10N/mm^2 程度の値が得られ、保水材として木炭粉末や PS 灰を混入した場合には空隙率が小さくなっているために圧縮強度も大きくなっている。また、廃ガラス発泡軽量骨材を用いたものは、空隙率が大きいだけでなく、骨材自体の強度もかなり小さいために、他に比べてかなり強度が小さくなっているが、表乾密度は 1.0g/cm^3 以下と超軽量になっている。

表 4　各種ポーラスコンクリートの空隙率および圧縮強度試験結果

使用骨材	W/C (%)	目　標 空隙率 (%)	No.	空隙率						圧縮強度 (N/mm^2)
				V_1 (cm^3)	W_1 (g)	W_2 (g)	W_3 (g)	全空隙率 (%)	連　続 空隙率 (%)	
砕石 5 号	25	30	1	1602	1968	3010	1962	34.9	34.6	8.58
			2	1579	1919	2928	1911	36.1	35.6	6.34
			3	1587	2047	3129	2038	31.8	31.3	7.18
			平均	1589	1978	3022 (1.90)	1970	34.3	33.8	7.37
砕石 5 号 ＋ 木炭粉末	25	30	1	1602	2030	3164	2021	29.2	28.7	9.99
			2	1610	1929	2989	1917	34.2	33.4	11.5
			3	1594	1961	3046	1952	31.9	31.3	11.1
			平均	1602	1973	3066 (1.91)	1963	31.8	31.1	10.9
NEXT ONE	20	20	1	1587	345	1289	290	40.5	37.1	1.26
			2	1587	392	1354	353	39.4	37.0	1.37
			3	1579	339	1237	291	43.1	40.1	1.20
			平均	1584	359	1293 (0.82)	311	41.0	38.1	1.28
8 号珪砂	20	20	1	1594	941	2144	837	24.5	18.0	5.37
			2	1602	991	2306	896	17.9	12.0	5.38
			3	1571	1013	2336	909	15.8	9.17	4.74
			平均	1589	981	2262 (1.42)	881	19.4	13.1	5.16
3 号珪砂	40	20	1	1587	1076	2521	1017	8.95	5.23	9.51
			2	1594	1058	2496	1003	9.79	6.34	8.89
			3	1587	1009	2404	972	12.1	9.77	8.74
			平均	1589	1047	2474 (1.56)	997	10.3	7.11	9.05
砕石 5 号 ＋ PS 灰	25	30	1	1602	2053	3285	1994	23.1	19.4	7.87
			2	1571	1989	3077	1973	30.7	29.7	7.74
			3	1594	2065	3203	2051	28.6	27.7	11.5
			平均	1589	2035	3188 (2.01)	2006	27.5	25.6	9.04

＊（　）内の数値は、表乾密度（g/cm^3）を表す

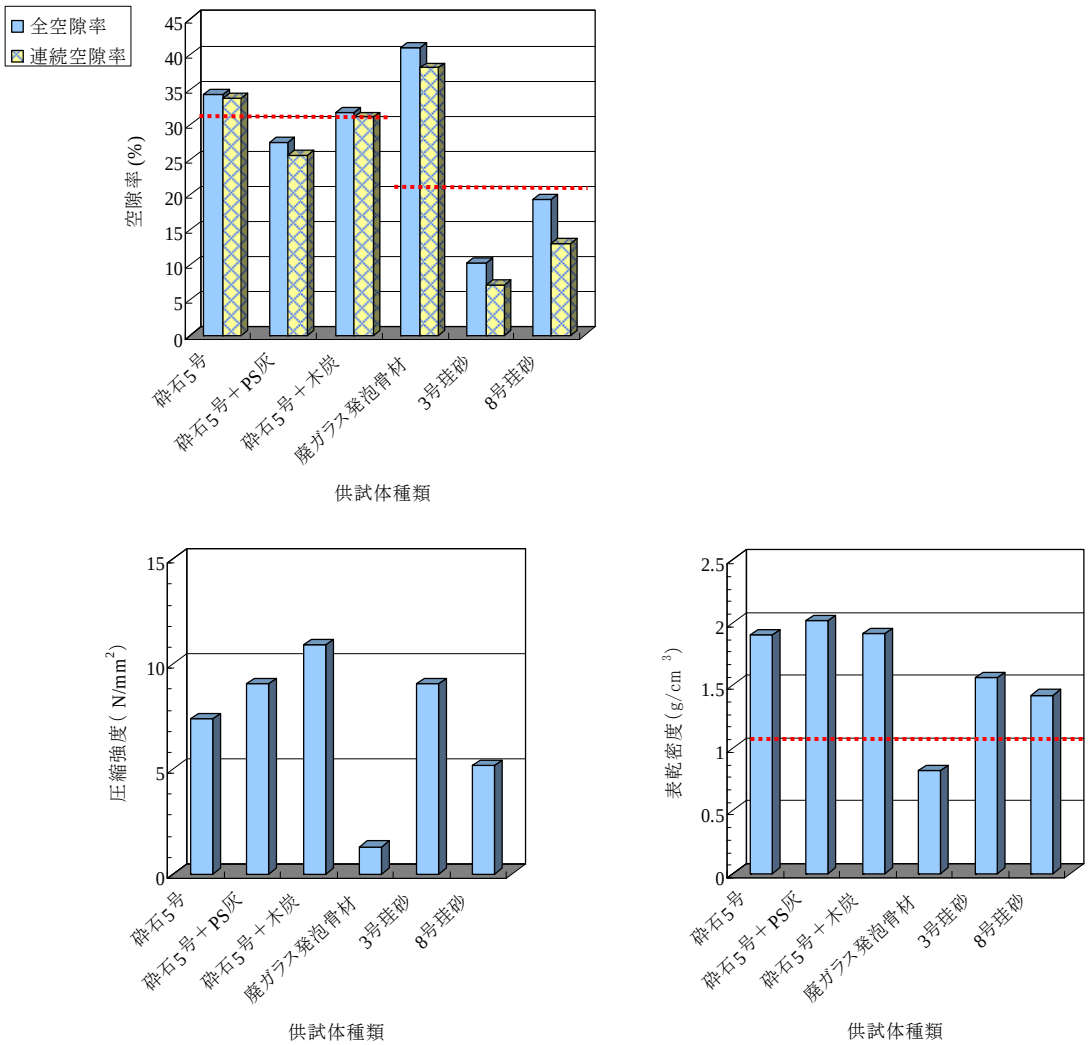


図 4　各供試体に対する空隙率、圧縮強度および表乾密度の変化

図 5 に各供試体の初期保水量を、また、図 6 に赤外線ランプ照射による保水量試験結果を示す。初期保水量は、砕石 5 号、廃ガラス発泡軽量骨材、珪砂の順に大きくなっており、吸水率の大きな骨材や保水材の使用により初期保水量がかなり大きくなっている。経過時間による保水率は、廃ガラス発泡軽量骨材、砕石 5 号、珪砂の順に大きくなっている。砕石 5 号を用いた場合、木炭粉末や PS 灰の混入により若干保水率が高くなっている。また、廃ガラス発泡軽量骨材使用の場合骨材自体の連続空隙量が多いために赤外線ランプ照射による水分蒸散量が大きくなり、保水率は予想外に小さくなっているが、珪砂を保水層として 2 層構造にすることによって、保水能力がかなり向上している。

なお、芝の植栽試験結果については、播種時期が 10 月下旬と遅くなり、各種ポーラスコンクリートにおける芝生長量の差異を論じるに至っていない。今後、実験を継続し、供試体の保水性能の違いが芝生長量に及ぼす影響について検討を行う予定である。

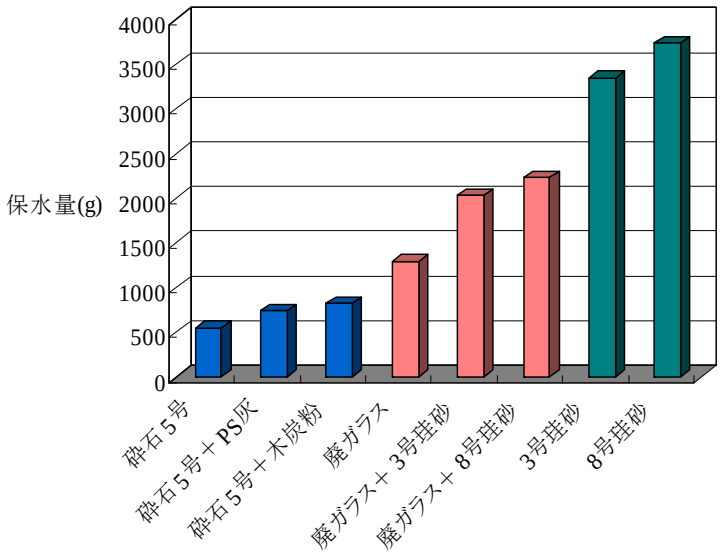


図５　各種ポーラスコンクリートの初期保水量の比較

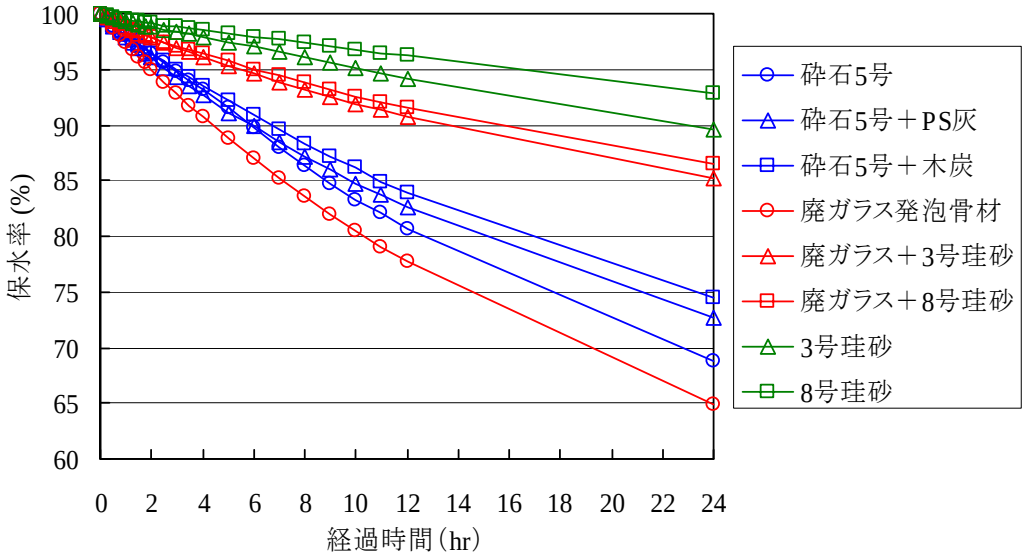


図６　赤外線ランプ照射による保水量試験結果

４．まとめ

本研究では、リサイクル資材による生物対応型エココンクリートの開発を主眼に、廃ガラス発泡軽量骨材を用いた屋上緑化ポーラスコンクリートの基礎物性および植栽試験を行い、その適用性について実験的検討を行った。その結果として、廃ガラス発泡軽量骨材ポーラスコンクリートは、骨材強度が小さいために圧縮強度は小さくなるが、超軽量化がはかれ、屋上緑化基盤として有効であること、また廃ガラス発泡軽量骨材単独では骨材自体の連続空隙量が多いために水分蒸散量が大きくなり、保水性能に劣るが、保水性能の大きな珪砂を保水層として 2 層構造にすることにより保水能力の改善がはかれることなどが判った。

最後に、本研究成果は、本研究会会員の賛同を得て、「緑化コンクリートブロック、お

よび緑化コンクリートブロックの製造方法」という発明の名称で、特許申請を行っていることを付記する。

謝辞

本研究にあたっては、NPO 法人廃棄物再資源化研究会 B,C,D 部会会員の皆様、熊本大学工学部甲斐定夫技術専門職員、同大学大学院博士前期課程河上晃一郎、同大学工学部環境システム工学科卒研生衛藤千晴、松本　淳、森崎洋輔、米重大輔諸氏の協力をいただきました。ここに記して、謝意を表します。

発表論文リスト

1) 武田浩二ほか : 産業副産物を活用した藻場復元用・緑化基盤用ポーラスコンクリートの開発、日本建築学会九州支部研究報告、第 45 号・1、pp.121-124、2006.3
2) 武田浩二ほか : 産業副産物を活用した藻場復元用・緑化基盤用ポーラスコンクリートの開発、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.1019-1020、2006.9
3) 河上晃一郎ほか : 産業副産物を活用したポーラスコンクリートの緑化基盤材への応用、日本建築学会九州支部研究報告、第 46 号・1、pp.113-116、2007.3

NPO 法人廃棄物再資源化研究会

平成 19 年度　第 8 回活動報告会

産業副産物を活用したポーラスコンクリートの屋上緑化への利用

熊本大学工学部建築学科　村上　聖

１．はじめに

ポーラスコンクリートは多数の連続空隙を有するために生物共生型エコマテリアルとして期待されている。ここで対象とする屋上緑化用ポーラスコンクリートは、粗骨材に廃ガラス発泡軽量骨材を使用し、軽量化による屋根スラブの積載荷重低減に資することを目的としている。また、屋上緑化では日射による水分蒸散が激しいので十分な灌水が要求されるが、ポーラスコンクリート自体にある程度保水性を付与することにより灌水設備の簡略化が期待される。そこで、本研究では、保水層の積層や各種保水材の混入を施したポーラスコンクリートにおける芝の植生効果について実験的検討を行った。

２．実験方法

２．１　使用材料およびポーラスコンクリートの調合

表 1 に使用材料を示す。セメントには、植生を考慮し、高炉セメント B 種を用いた。粗骨材には、廃ガラス発泡軽量骨材と比較として砕石 5 号を用いた。また、廃ガラス発泡軽量骨材ポーラスコンクリートの下部に保水層を設け、その保水層として吸水率が約 40%と大きい珪砂（鉱石の種類はモルデナイト）を用いてポーラスコンクリートを作製した。混和剤にはポリカルボン酸系の高性能 AE 減水剤、セメントペーストにプレミックスするタイプの保水材として、木炭粉末およびパルプスラッジ焼却灰（以下、PS 灰と称する）を用いた。

表 2 に各種ポーラスコンクリートの使用調合の一覧を示す。比較用の砕石 5 号使用の場合には、水セメント比を W/C=25%、目標空隙率を 30%一定とし、保水材無混入、木炭粉末をセメント質量の 10%混入および PS 灰をセメント質量の 20%混入の 3 種類についてポーラスコンクリートを作製した。なお、木炭粉末使用の場合、木炭吸水量の 2/3 の水を単位水量に加算、PS 灰使用の場合には、PS 灰質量の 0.5 倍の水を単位水量に加算し、混練時の木炭粉末および PS 灰の吸水を考慮した。廃ガラス発泡軽量骨材使用の場合は、水セメント比を W/C=20%、目標空隙率を 20%とし、骨材吸水量の 1/3 の水を単位水量に加算した。また、8 号珪砂使用の場合は、水セメント比を W/C=20%、目標空隙率を 20%とし、骨材吸水量を単位水量に加算、3 号珪砂使用の場合には、水セメント比を W/C=40%、目標空隙率を 20%とし、骨材吸水量の 2/3 の水を単位水量に加算した。なお、これらの調合は、試し練りにより定めた。

表 3 に各種ポーラスコンクリートの練混ぜ方法を示す。廃ガラス発泡軽量骨材および珪砂の場合には、通常の強制撹拌型ミキサーでは骨材の破損を生じるために、オムニミキサーを使用し、低速撹拌により練混ぜを行った。

表 1　使用材料

セメント	高炉セメント B 種 密度=3.03g/cm^3	
粗骨材	廃ガラス発泡軽量骨材（NEXT ONE） 表乾密度=0.832g/cm^3 吸水率=44.1% 絶乾密度=0.465g/cm^3 実積率=63.0%	砕石 5 号 表乾密度=2.95g/cm^3 吸水率=1.27% 絶乾密度=2.91g/cm^3 実積率=55.7%
保水層	8 号珪砂（ハーモニー8 号） 表乾密度=1.63g/cm^3 吸水率=42.4% 絶乾密度=0.939g/cm^3 粗粒率=6.26（最大寸法=15mm） 実積率=62.9%	
混和剤	高性能 AE 減水剤（ポリカルボン酸系）	
保水材	木炭粉末 絶乾密度=0.38g/cm^3 吸水率=189%	パルプスラッジ焼却灰 絶乾密度=2.31g/cm^3
緑化用資材	培養土、西洋芝、有機肥料	

表 2　ポーラスコンクリートの使用調合

使用骨材	W/C (%)	目　標 空隙率 (%)	単位量（kg/m^3）			保水材種類	保水材 (kg/m^3)	S_p/C (%)	備　考
			C	W	G				
砕石 5 号	25	30	266	67	1610	無し	0	0.5	粗骨材は表乾
	25	30	266	67+34	1610	木炭粉末	27	0.5	粗骨材は表乾 C_h/C=10% 木炭吸水量×2/3
	25	30	266	67+27	1610	PS 灰	53	0.5	粗骨材は表乾 PS/C=20% PS×0.5
NEXT ONE	20	20	344	69+42	287	無し	0	0	粗骨材は絶乾 骨材吸水量×1/3
8 号珪砂	20	20	346	69+245	579	無し	0	0	粗骨材は絶乾 骨材吸水量

＊　400×400×100mm 版：1 個、φ100×200mm 円柱：3 個（空隙率測定用）、3 個（圧縮強度試験用）

表 3　ポーラスコンクリートの練混ぜ方法

砕石 5 号：

強制 2 軸ミキサー（容量 55*l*）使用

1)　セメント、粗骨材投入後、30 秒間空練り

2)　水（高性能 AE 減水剤）投入後、2 分間練混ぜ

NEXT ONE、珪砂：

オムニミキサー（容量 30*l*）使用、低速撹拌

1)　セメント、粗骨材投入後、30 秒間空練り

2)　水投入後、2 分間低速撹拌

２．２　試験方法

ポーラスコンクリートの空隙率および圧縮強度試験には、φ100×200mm 円柱供試体を各 3 個ずつ作製し、標準養生材齢 28 日後、各試験に供した。

植栽試験用供試体は、図 1 に示すように、400×400×100mm の平板とし、廃ガラス発泡軽量骨材ポーラスコンクリートと保水層として 8 号珪砂ポーラスコンクリートの 2 層構成板については、厚さ 30mm まで 8 号珪砂ポーラスコンクリートを打設後、廃ガラス発泡軽量骨材ポーラスコンクリートを打継ぐ方法により作製した。

植栽試験は、培養土に芝種子を 20*l*：1*dl* の割合で混合したものを前記供試体の表面に約 3cm 程度盛り、播種後の芝の生長状況を観察した。設置場所は、図 2 に示すように、実験棟南面に接する骨材ヤードのコンクリート土間上とした。

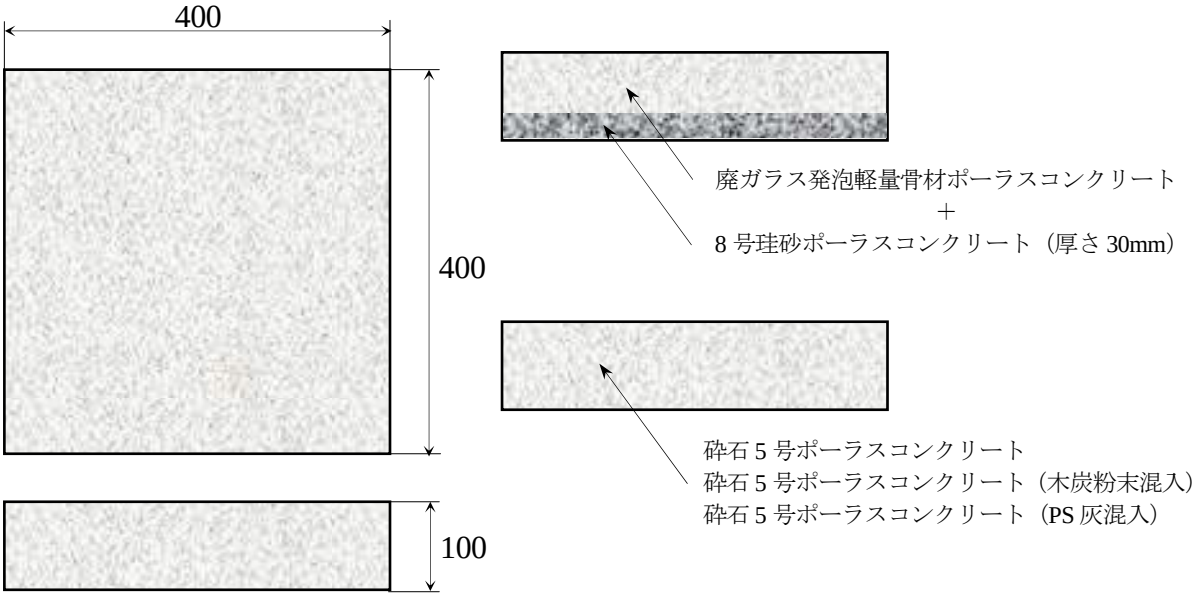


図 1　植栽試験に供したポーラスコンクリート平板の形状寸法

図 2　各供試体の設置場所

３．実験結果

表 4 に各種ポーラスコンクリートの空隙率および圧縮強度試験結果を示す。全空隙率に関して、砕石 5 号および 8 号珪砂ポーラスコンクリートは、目標空隙率にほぼ近い測定値が得られているが、廃ガラス発泡軽量骨材ポーラスコンクリートの場合は、骨材自体に開放空隙量が大きいために、目標空隙率の約 2 倍の測定値になっている。圧縮強度に関しては、廃ガラス発泡軽量骨材ポーラスコンクリートの場合は、空隙率が大きいだけでなく、骨材自体の強度もかなり小さいために、他に比べてかなり強度が小さい結果となったが、表乾密度は 0.77g/cm^3 と小さく、超軽量であることが判る。

表 4　各種ポーラスコンクリートの空隙率および圧縮強度試験結果

使用骨材	W/C (%)	目　標 空隙率 (%)	No.	空隙率						圧縮強度 (N/mm^2)
				V_1 (cm^3)	W_1 (g)	W_2 (g)	W_3 (g)	全空隙率 (%)	連　続 空隙率 (%)	
廃ガラス発泡軽量骨材	20	20	1	1602	326	1176	286	46.9	44.5	1.26
			2	1610	375	1313	332	41.7	39.1	1.20
			3	－	－	－	－	－	－	－
			平均	1606	350	1244	309	44.3	41.8	1.23
8 号珪砂	20	20	1	1587	1046	2379	936	16.0	9.0	4.21
			2	1594	1026	2359	934	16.4	10.6	3.06
			3	1579	1020	2301	909	18.9	11.9	2.41
			平均	1587	1030	2346	926	17.1	10.5	3.23
砕石 5 号 ＋ 木炭粉末	25	30	1	1587	1941	3019	1919	32.1	30.7	6.79
			2	1602	1955	3049	1935	31.7	30.4	5.49
			3	1590	1944	3039	1926	31.2	30.0	8.00
			平均	1593	1946	3035	1926	31.7	30.4	6.76
砕石 5 号 ＋ PS 灰	25	30	1	1594	2033	3052	2019	36.1	35.2	9.57
			2	1603	1994	3093	1977	31.5	30.4	13.0
			3	1589	1948	3019	1929	32.6	31.4	14.3
			平均	1595	1992	3054	1975	33.4	32.3	12.3
砕石 5 号	25	30	1	1611	1956	2974	1948	36.8	36.3	5.14
			2	1587	1980	3007	1970	35.3	34.6	11.6
			3	1594	1982	3014	1975	35.2	34.8	8.78
			平均	1598	1972	2998	1964	35.8	35.2	8.49

各供試体の保水性に関して、参考までに前年度実施した赤外線ランプ照射による保水量試験結果を図 3 および図 4 に示す。初期保水量は、砕石 5 号、廃ガラス発泡軽量骨材、珪砂ポーラスコンクリートの順に大きくなっており、吸水率の大きな骨材や保水材の使用により初期保水量がかなり大きくなっている。また、赤外線ランプ照射による経時保水率の低下は、珪砂、砕石 5 号、廃ガラス発泡軽量骨材ポーラスコンクリートの順に大きくなっている。砕石 5 号ポーラスコンクリートの場合、木炭粉末や PS 灰の混入により経時保水率の低下が小さくなっており、保水性の改善が認められる。また、廃ガラス発泡軽量骨材ポーラスコンクリートの場合、骨材自体の開放空隙量が多いために赤外線ランプ照射による水分蒸散量が大きくなり、保水率は予想外に小さくなっているが、珪

砂を保水層として 2 層構造にすることによって、保水能力がかなり向上している。

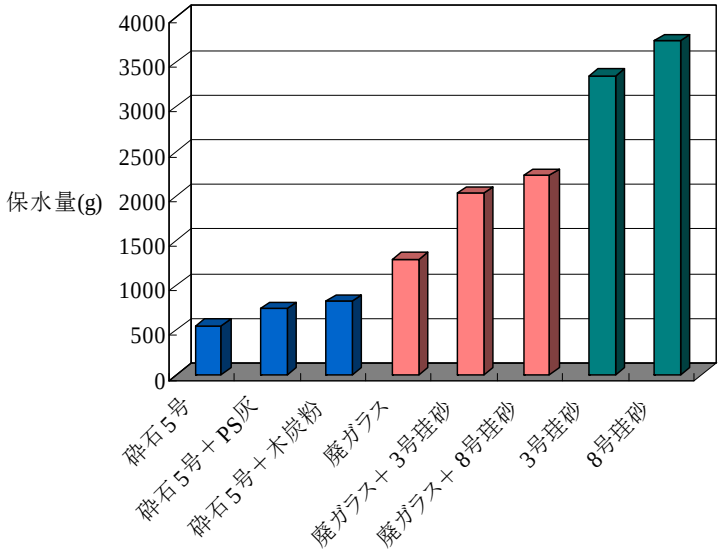


図 3　各種ポーラスコンクリートの初期保水量の比較

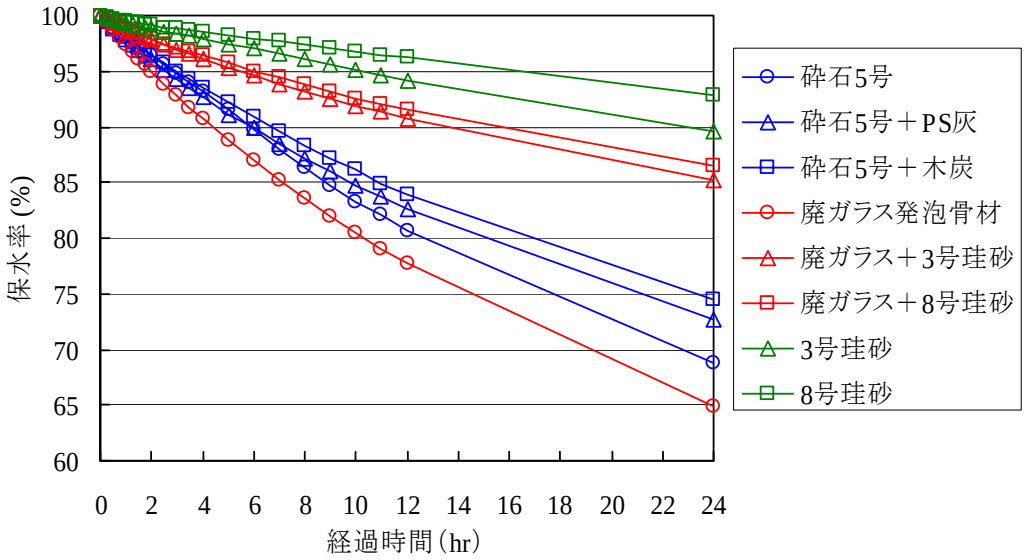
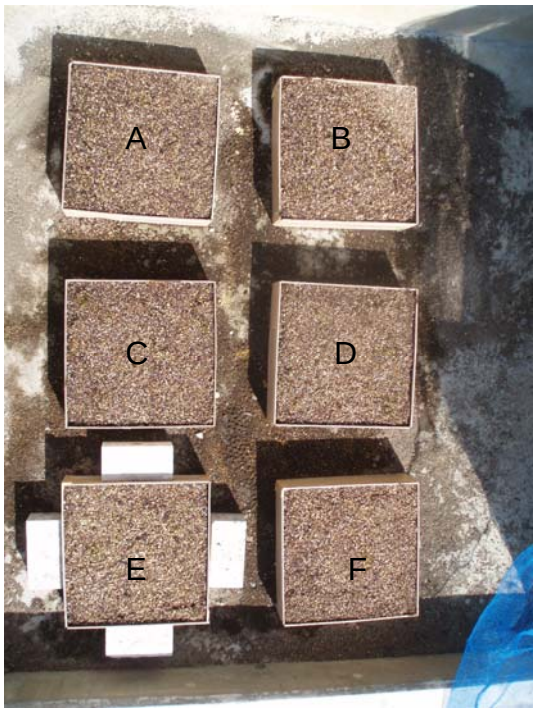


図 4　赤外線ランプ照射による保水量試験結果

写真 1 に、芝の生長状況を示す。また、図 5 に芝の草丈の経時変化を示す。砕石 5 号ポーラスコンクリートに PS 灰を混入したものは、播種後 1 ヶ月における草丈の生長量が他に比べてかなり大きくなっており、灰による芝の成長促進作用が認められる。また、砕石 5 号ポーラスコンクリートの場合は、他に比べて草丈の生長量がやや小さくなっているが、各供試体における芝の生長状況に有意な差異はみられず、今後さらに長期的な観察が必要である。



①播種後 1 週間

②播種後 1 ヶ月後

③播種後 2 ヶ月後

④播種後 3 ヶ月後

A：廃ガラス発泡軽量骨材＋8 号珪砂ポーラスコンクリートの 2 層構成板

B：砕石 5 号ポーラスコンクリート＋木炭粉末混入

C：廃ガラス発泡軽量骨材ポーラスコンクリート

D：砕石 5 号ポーラスコンクリート＋PS 灰混入

E：川砂敷設（比較用）

F：砕石 5 号ポーラスコンクリート

写真 1　各種ポーラスコンクリートにおける芝の生長状況

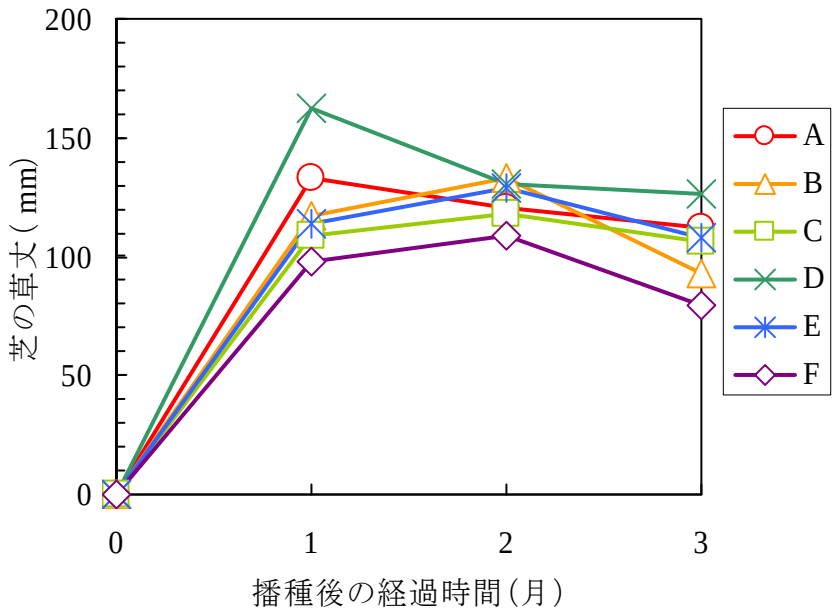


図 5　各種ポーラスコンクリートにおける芝の草丈の経時変化

４．まとめ

本研究では、産業副産物を活用したポーラスコンクリートの屋上緑化基盤への利用を主眼に、廃ガラス発泡軽量骨材を用いたポーラスコンクリートの基礎物性および植栽試験を行い、その適用性について実験的検討を行った。その結果として、廃ガラス発泡軽量骨材ポーラスコンクリートは、骨材強度が小さいために圧縮強度は小さくなるが、超軽量化がはかれ、屋上緑化基盤として有効であること、廃ガラス発泡軽量骨材単独では骨材自体の開放空隙量が多く保水能力に劣るが、保水性能の大きな珪砂を保水層として 2 層構成にすることにより保水能力の改善がはかれること、砕石ポーラスコンクリートの場合に比べると、本供試体における芝の生長状況は良好であることなどが判った。

謝辞

本研究にあたっては、NPO 法人廃棄物再資源化研究会 B,C,D 部会会員の皆様、熊本大学工学部の甲斐定夫技術専門職員、同大学大学院博士前期課程の河上晃一郎、松本淳、同大学工学部環境システム工学科 4 年生の金丸健太郎、坂本祐樹、内藤海諸氏の協力をいただきました。ここに記して、謝意を表します。

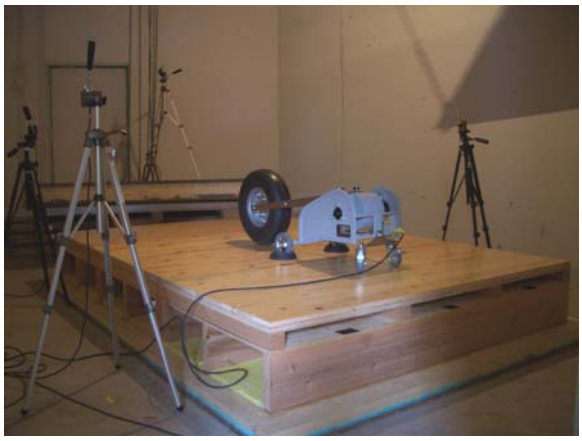
NPO 法人廃棄物再資源化研究会
平成 20 年度　第 9 回活動報告会

多層構成木質系パネルへのエアミルクの断熱材としての有効利用

熊本大学工学部建築学科　村上　聖

１．はじめに

本研究では、多層構成木質系パネルへのエアミルクの断熱材としての有効利用を目的に実験的検討を行った。パネルの構成は、図 1 に示すように、杉材を梁材とし、その上下部を構造用合板でサンドウィッチ構造としたもので、多層構成による通気層を有する床および壁材への用途を想定している。そのときに、通気層部分に断熱材を充填することになるが、ここでは、合板への各種断熱工法について、簡易な赤外線ランプ照射試験を実施し､合板に対する各種材料の断熱性能について相対的な比較検討を行った｡なお、使用材料としては、断熱材として一般的なグラスウールおよびポリスチレンフォーム、また軟弱地盤の改良に対する気泡混合軽量盛土に使用されているマイクロバブル（気泡径 100～200μm）をセメントペーストに練り混ぜてつくられるエアミルク、熱線に対して反射率の大きなアルミシートなどを用いた。



重量衝撃音試験

曲げ性能試験

図１　多層構成木質系床パネルの各種試験の実施状況

２．実験方法

２．１ 使用材料

表 1 に使用材料を示す。基材として、寸法 400×400mm、厚 9mm の構造用合板 1 級を用い、断熱材のうちグラスウールとポリスチレンフォームは、厚 40mm のフェルト状およびボード状のものを枠付き合板の裏面に充填工法により取り付けた。また、エアミルクは、表 2 に示す旧道路公団の仕様配合 K0-10 により製造し、合板裏面に打設した。なお、エアミルクの製造状況を写真 1～4 に示す。アルミシートは、合板裏面に張り付けた場合と赤外線照射側の合板表面に張り付けた場合の 2 種類について、また、比較用に合板、エアミルク、ポリスチレンフォーム単体についても検討を行った。

表１　使用材料

基材	構造用合板１級　寸法 400×400mm、厚 9mm
断熱材	グラスウール：フェルト状（厚 40mm）、充填工法 ポリスチレンフォーム：ボード状（厚 40mm）、充填工法 エアミルク：配合 K0-10、打設工法 アルミシート：厚 0.1mm、張り付け工法
断熱箱	ポリスチレンフォーム：ボード状、厚 50mm
赤外線ランプ	赤外線家畜用電球　110V 200W
温度測定	熱電対

表２　エアミルクの使用材料および調合

１）使用材料

セメント	高炉セメント B 種 密度=3.05g/cm^3
起泡剤	特殊界面活性剤系 希釈倍率 24 倍、発泡倍率 25 倍

２）使用調合（K0-10）

W/C (%)	空気量 (%)	密度*1 (g/cm^3)	ｾﾒﾝﾄ (kg/m^3)	起泡剤 (kg/m^3)	混練水 (kg/m^3)	希釈水 (kg/m^3)
82	59.5	0.64	353	1.03	264	23.69

*1 設定密度（湿潤密度）
*2 参考値：フロー値=180mm、圧縮強度=1.2N/mm^2

写真１　気泡の製造

写真２　気泡のｾﾒﾝﾄﾍﾟｰｽﾄへの練混ぜ

写真３　エアミルクのフロー試験

写真４　エアミルクの打設

２．２ 赤外線照射試験

本試験では、厚 50mm のポリスチレンフォームで作製した簡易断熱箱の一面開口部に試験体を取り付け、試験体外表面から 26cm の距離に赤外線ランプを設置し、照射試験を行った（写真 5）。ここで、試験体表面からランプ表面までの距離を 26cm としたのは、目安としてアスファルトがランプ照射 5 時間で 60℃に達する距離である。試験時間は、10 時間とし、前半 5 時間は赤外線ランプを照射、後半 5 時間は消灯し、データロガーにより温度を自動計測した。温度測定個所は、試験体の外側表面と内側表面、断熱箱内部および室内の 4 点とし、温度は熱電対により測定した。なお、室内温度は、エアコンにより約 25℃一定に保持した。

表 3 には、赤外線照射試験に供した試験体の一覧を示す。なお、試験体は、各 1 個ずつ作製し、照射試験に供した。

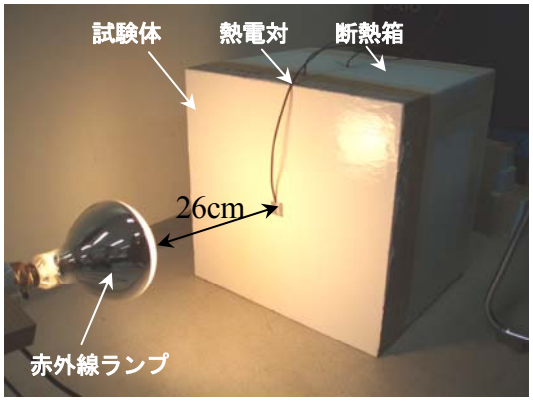
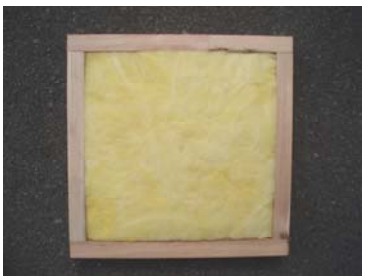


写真５　赤外線ランプ照射試験

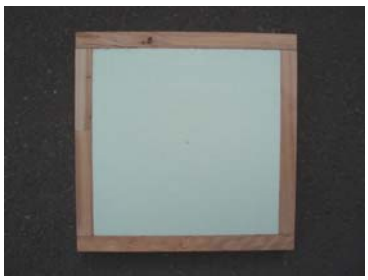
表３　赤外線照射試験に供した試験体一覧

No.1	合板裏面にグラスウール（厚 40mm）を充填
No.2	合板裏面にポリスチレンフォーム（厚 40mm）を充填
No.3	合板裏面にエアミルク（厚 40mm）を打設
No.4	合板裏面にアルミシートを張り付け
No.5	合板表面（赤外線照射側）にアルミシートを張り付け
No.6	合板（厚 9mm）単体
No.7	エアミルク（厚 30mm）単体
No.8	ポリスチレンフォーム（厚 50mm）単体

合板単体（No.6）



ｸﾞﾗｽｳｰﾙ充填（No.1）



ﾎﾟﾘｽﾁﾚﾝﾌｫｰﾑ充填（No.2）

ｴｱﾐﾙｸ打設（No.3）

ｱﾙﾐｼｰﾄ張り付け（No.4,5）

ﾎﾟﾘｽﾁﾚﾝﾌｫｰﾑ単体（No.8）

３．実験結果および考察

図 2 に各試験体の赤外線照射試験結果を示す。また、図 3 には、各部位の最高温度の測定値を示す。なお、図 3 中には、既報の各種基材（コンクリート板、集成木板、金属板）の試験結果も参考までに併記している。

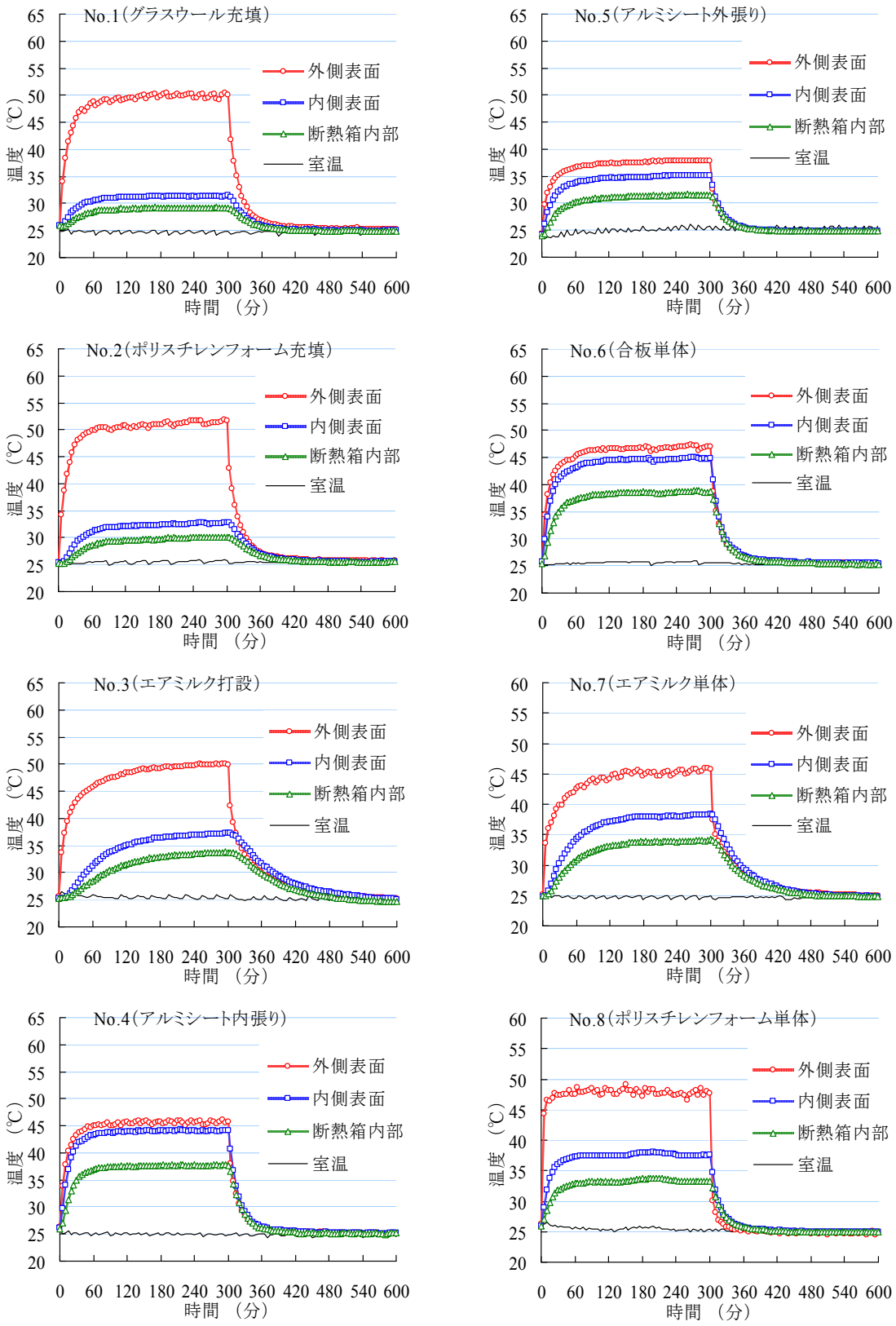


図２　各試験体の赤外線照射試験結果

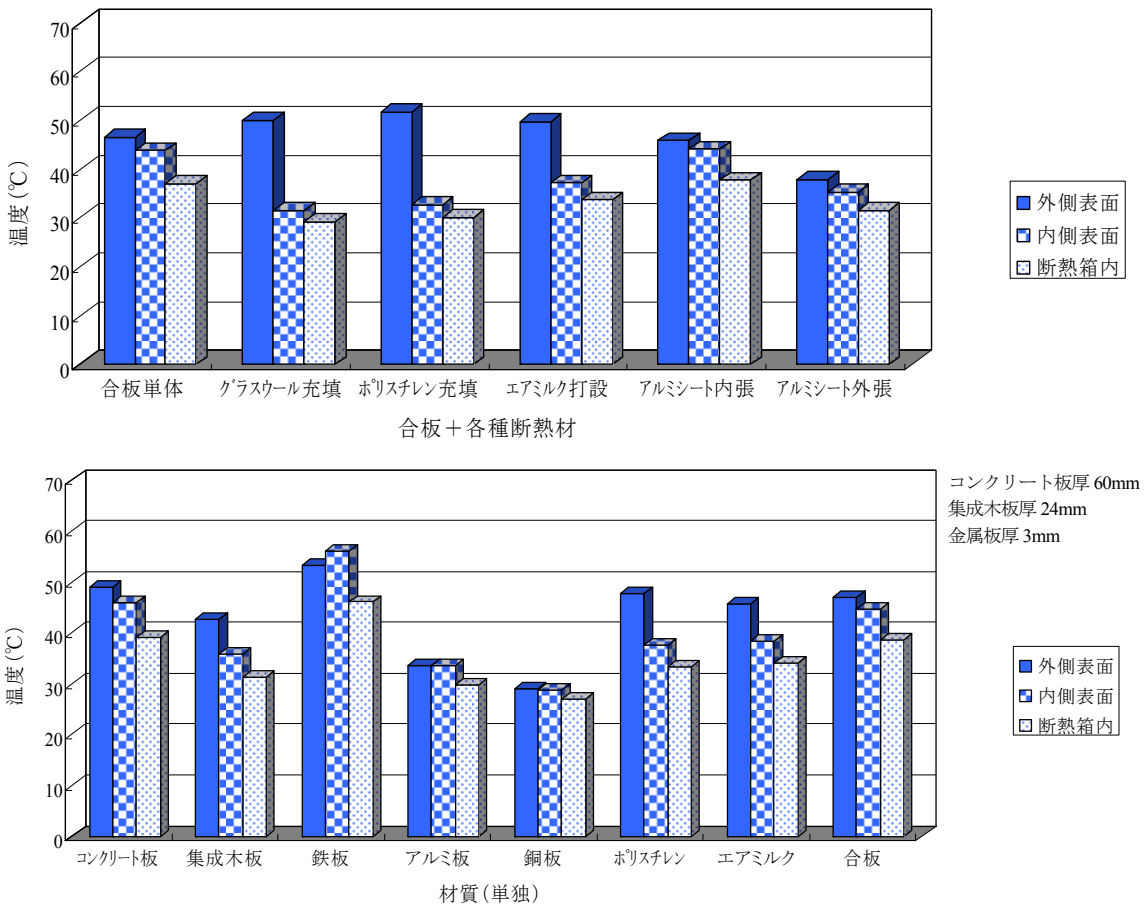


図３　各試験体における各部位の最高温度の測定値

材質の影響に関しては、熱伝導率の小さいポリスチレンフォーム、エアミルク、集成木板などは、外側表面に対して内側表面温度の顕著な低下により断熱箱内部の温度低減効果が大きくなっている。また、アルミ板や銅板のように表面に光沢のある金属については、熱線に対する反射率が大きいために外側表面温度の顕著な低下により断熱箱内部の温度低減効果が大きくなっていることが分かる。前者は断熱効果、後者は遮熱効果の特徴をよく表している。

本実験結果に関しては、合板単体の場合と比べて、グラスウール、ポリスチレンフォーム充填工法およびエアミルク打設工法の場合には、その断熱効果により断熱箱内部の温度低減に十分に有効であり、グラスウールおよびポリスチレンフォームについては、その効果はほぼ同程度であるが、エアミルクの場合は、その効果が若干小さいようである。ただ、エアミルクは、安価かつ無機不燃材料であり、さらに打設工法により隙間無く充填できるなどのメリットがあるものと思われる。アルミシート張り付け工法については、内張りの場合にはほとんど効果が無く、外張りの場合には、アルミ板と同様にその遮熱効果によって断熱箱内部の温度低減に有効であるが、アルミシートの外張りが実用的であるかどうかは判断できない。

４．まとめ

本研究では、多層構成木質系パネルの通気層部分にエアミルクを断熱材として打設する工法の適用性について、赤外線ランプ照射による簡易試験により、各種断熱工法との比較検討を行った。その結果として、断熱材として一般的なグラスウールおよびポリスチレンフォームとの比較では、エアミルクの断熱性は若干劣るものの、エアミルクが安価かつ無機不燃材料であり、打設工法により隙間無く充填できるメリットを考えると、エアミルクの断熱材としての適用は十分に有効であることが分かった。また、エアミルクが適度の質量と多孔質組織を有するために、多層構成木質系パネルを床および壁材として用いる場合に、遮音および吸音材としての有効利用も想定できる。今後、この点に関しても実験的検討を進めていく予定である。

謝辞

最後に、本実験にあたって、熊本大学工学部の甲斐定夫技術専門職員、森山裕輔、野俣亜沙美（当時、同大学大学院自然科学研究科博士前期課程）および古賀勇志、立石文香、松岡由利子（当時、同大学工学部建築学科卒研生）諸氏、ならびに熊本県産業技術センターの中村哲男氏に協力をいただきました。また、NPO 法人廃棄物再資源化研究会、フォレスト㈱、フジコンケミカル㈱、住友大阪セメント㈱には、資材提供ならびに技術支援をいただきました。ここに記して謝意を表する。

参考文献

１）立石文香ほか：熊本県産木材を活用した多層複合構成材の開発　その１．床パネルの構造性能の実験方法、日本建築学会九州支部研究報告、第 48 号、pp.177-180、2009.3

２）野俣亜沙美ほか：熊本県産木材を活用した多層複合構成材の開発　その２．床パネルの構造性能の実験結果、日本建築学会九州支部研究報告、第 48 号、pp.181-184、2009.3

３）松岡由利子ほか：熊本県産木材を活用した多層複合構成材の開発　その３．各種断熱工法、日本建築学会九州支部研究報告、第 48 号、pp.185-188、2009.3