

廃石こうボードの再資源化に関する実験的研究

An experimental study about recycling of plaster board

遠山 健治[†], 建部 英博^{††}
Kenji TÔYAMA, Hidehiro TATEBE

Abstract ; Plaster board is produced in large quantities in Japan. Therefore quantity of disposal increases, too. Therefore I examine recycling of plaster board. I crush a plaster board and plaster powder it. I use the plaster powder which I separate paper and plaster powder and took out. I add plaster powder and cement and water, and examine the thing which hardened as product. I do unconfined compression test and a flexure test of this plaster product. Furthermore, I measure an effect as a water retentive block. I suggest a superior product to water retentive power, than these test results.

1. 序論

1.1 研究の背景

石こうボードは、平成 12 年における年間生産量が約 460 万 t を超え、平成 17 年に至るまで生産量はほぼ横ばいとなっている。一方、解体現場等からは年間約 140 万 t 以上の廃石こうボードが排出されている。さらに、1999 年 6 月からは、廃棄物処理法に基づき、石こうボードは、管理型処分場で処分することとされ処理方法でも逼迫した状態となっており、不法投棄などの問題も起こっている。このような現状より、石こうボードのリサイクル促進の必要性はますます増大すると見込まれている。¹⁾²⁾

しかし、廃石こうボードは製品品質上及び生産効率上の問題からリサイクル先に困っているというのが現状である。現状では、新しい石こうボードを作る際に廃石こうボードから取り出した材料を再使用できる量が 1 割以下と定められているため、石こうボードに再使用するだけでは処理が追いつかないなどの理由がある。石こうボードの品質を保持しながら再使用量を増やすことは現在でも研究が進められているが、まだ実現には至っていない。そこで本研究ではこの廃石こうボードから出る石こうを別のものに再利用する方法を検討していくこととする。

[†] 愛知工業大学大学院建設システム工学専攻
^{††} 愛知工業大学工学部都市環境学科 (豊田市)

1.2 石こうボードについて

石こうボードは、1921 年から日本での生産が開始され、その後の需要の増加により、現在では年間 500 万 t にも迫る生産量になっている。断面構造は石こうをボード用原紙で挟み込む形で形成されており、用途によりパルプなどを混和することもある。耐火性、遮音性、施工性に優れ、安価であるため、主に建築の分野において大量に使用されている。年々増え続ける廃石こうに、処理場・処理費用の問題もかき、リサイクルを行う取り組みが進められている。現在取り組まれているリサイクル方法は、石こうボードへの再使用、肥料、土壌改良、汚泥固化などがあるが、品質面・価格面などの理由により、まだまだ促進されていないのが現状である。

1.3 研究目的

本研究では、廃石こうボードの処理により出される石こうの再資源化について検討する。その方法として、石こう・セメント・水を配合し、固化させたものについて検討していくこととする。そこで、これらの材料をどのように配合していくかを決定する。それを一軸圧縮試験や曲げ試験を行うことによりどの程度の強度が保障されるかを明らかにしていく。また、石こうの特徴である吸水力の高さを利用し、保水ブロックとして夏場の温度上昇を抑制する効果を検証していく。それらの実験・測定結果をもとに、石こうの再資源化に適したものの、有効な利用方法を提案することを目的とする。

2. 研究概要

2.1 石こうの性質

石こうは硫酸カルシウム (CaSO₄) の一般名である。建築材料、工芸品、金属鋳造型、歯科・外科医療具、食品などに用いられている。硫酸カルシウムには様々な形態があり、それぞれ結晶水の量が違う。

表 1 形態別の石こう (硫酸カルシウム)³⁾

形態	別名	示性式	結晶水 (%)
二水石こう	石こう	CaSO ₄ ·2H ₂ O	20.92
半水石こう	焼石こう	CaSO ₄ ·1/2H ₂ O	6.21
無水石こう	無水石こう	CaSO ₄	0



石こうは水和反応により固化する。(式 1) 石こうボード製造にもこの反応が利用されている。本研究では、この石こうボードを粉砕し、石こうを取り出し、低温加熱乾燥、粉末処理を行った再生石こうを使用する。この処理により再び水和反応により固化させることができる。

なお、粉砕した石こうボードは主に建物の天井部に使われていたもので、粉砕後 3mm ふるいを通過する粒度のもののみを使用することとする。また、硬化時の影響を及ぼす諸条件と対応は、以下の通りである。⁴⁾

硬化速度

高温の場合には早くなり、38℃ で最も早くなる。これ以上では硬化は遅くなり、86℃ 以上では水和しなくなる。

冬場の気温でも硬化は進むことは確認しているが、強度供試体の養生は条件を一定とするため気温 20℃ で行うこととする。

膨張と収縮

石こうは水と練り合わせたとき、0.1~0.2% 膨張する。しかし、型枠からはずした後、乾燥収縮 (0.03~0.09%) が起こるので注意が必要である。

本研究で検討する石こう製品では、1つ1つが小さなものであり、膨張・収縮の影響はほぼないと考えられる。過去 3 年の本研究室でつくられた供試体にはひび割れ等はみられていない。

攪拌時間

攪拌時間が長いほど強度は大きくなる。しかし、硬化時間も攪拌時間により、長くなる。

攪拌にはコンクリートミキサーを使用し、石こう 1kg に対し 1 分以上の攪拌を行うこととする。

2.2 実験・測定概要

本研究では廃石こうボードの再資源化の方法として、廃石こう・セメント・水を配合した製品を検討していく。この製品の性能を調べるため以下のような実験・測定を行う。

配合の決定

廃石こうを材料にまぜた配合はほとんど例がなく、独自の配合を選定していくこととした。石こう、セメントの重量比 5:5 からセメントの比率を減らしていった供試体を作成し、それらの強度を一軸圧縮試験により求める。その結果より配合比を決定していく。

一軸圧縮試験

決定した配合をもとに作成した供試体 (5×10cm) の養生条件 (表 2) を変え、一軸圧縮試験をし、最大一軸圧縮強度を求める。また、再資源化製品を着色をすることも考慮し、顔料との相性も一軸圧縮試験より検討する。

表 2 一軸圧縮試験養生条件

空中養生	型枠からはずした後、空中で養生した。
湿潤養生	型枠からはずした後、すぐに水中に入れ養生した。
空中養生後、湿潤養生	型枠からはずし、1ヶ月空中で養生した後、水中に入れ養生した。

曲げ試験

一軸圧縮試験と同配合で曲げ試験を行う。平板の曲げ試験供試体 (5×10×30cm) で試験をする。

夏季温度上昇抑制効果の測定

石こうの保水性を利用し、保水ブロックとして夏場の表面温度や気温上昇を抑制する働きの検証を行う。夏場の表面の温度をサーモカメラにより測定する。測定ではアスファルト、コンクリート平板、石こう使用平板の表面温度を比較する。

吸水・保水量の測定

夏季温度上昇抑制効果は長期持続することが望ましいが、石こうの保水能力であればそれを可能にできると考えられる。夏場に吸水した水分を炎天下に放置した際、どれだけ維持できるかを石こうを使用した平板の重量を測定することで比較する。

3. 廃石こう再資源化製品の試験・測定結果

3.1 配合の決定

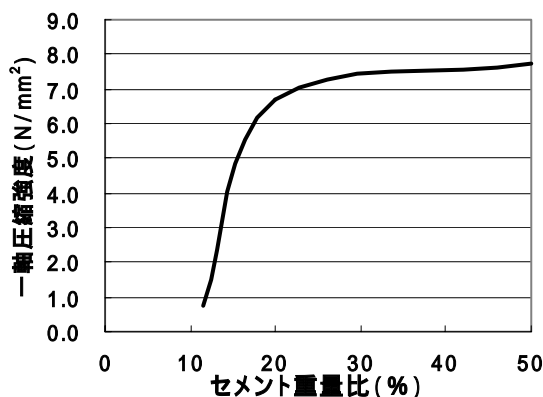


図1 配合するセメント量と一軸圧縮強度の関係 (空中養生7日)

セメントのみの供試体(7日養生での一軸圧縮強度約40N/mm²)⁵⁾に比べ、強度は大きく下回る結果となったが、廃石こうを使用する場合の強度はこれが限界である。セメント重量を増やせば、強度は増加しているが、セメント重量比が20%を超えたあたりからは、セメント重量比による強度の違いはほぼなくなった。再資源化の観点からもみて、セメント量を増やすことはあまり得策ではないと考え、石こうを全体重量の50%まで使用し、セメント量を最低限の量に抑える配合にすることとした。以降のすべての強度試験供試体には表3の配合を適応することとする。

表3 決定配合比

	石こう	セメント	水	顔料	
単位容積質量 (g/cm ³)	0.92	0.37	0.54	0.02	w/c
配合比 (%)	50.0	20.0	29.0	1.0	

顔料未使用供試体は顔料の質量分を他材料に同比率で分配
このほかにセメント重量に対し約0.28%の減水剤を使用

3.2 一軸圧縮試験

3.2.1 空中養生

表4 空中養生一軸圧縮強度試験結果

日	強度 (N/mm ²)		
	顔料なし	顔料(赤)	顔料(緑)
3	1.12	2.54	0.85
7	6.68	6.82	5.83
28	7.20	9.67	7.95
60	8.51	11.58	14.86
120	11.19	12.38	15.45

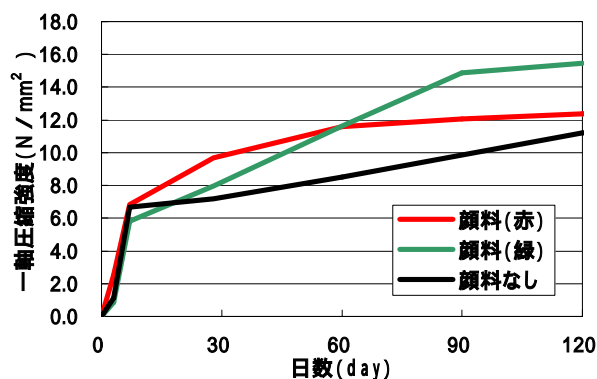


図2 空中養生一軸圧縮強度試験結果

セメントと比べると強度は低いという結果となった。このため、廃石こう利用製品は強度が必要とされる箇所への適応不可能であるといえる。この試験結果の範囲内の強度で適応できるものを検討する必要がある。

顔料の有無で比べると、顔料を使用した供試体のほうが、強度が出るまでの時間が早いことがわかる。顔料を使用した供試体は、約2ヶ月で最高強度に近い値が得られたのに対し、未使用の供試体は倍の4ヶ月程度の期間が必要であった。顔料は石こうと配合しても品質には影響を与えず、むしろ顔料を使用したほうが、材料内の水分が調整されるため有効であるといえる。

3.2.2 湿潤養生

表5 湿潤養生一軸圧縮強度試験結果⁸⁾⁹⁾

日	強度 (N/mm ²)	
	顔料なし	顔料(赤)
7	3.78	5.64
21	3.86	5.94
28	4.11	6.00
60	4.10	6.39

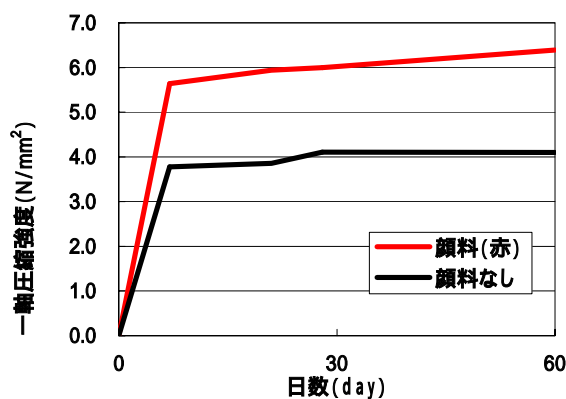


図3 湿潤養生一軸圧縮強度試験結果

図 3 の試験結果では、水中での硬化の進みが悪く、製作後はしばらく強度試験が不可能であったため、最初の計測が養生 7 日後になっている。その後の強度の増加もなく、空中で養生したものに比べ非常に小さい数値となった。これは、石こうの吸水率が高いが、水に対して強度面が弱いといった性質のためであると考えられる。水中で、石こうが水分を取り入れ、それがそのまま強度に影響したと思われる。ただし、強度は、水分を吸い続けても下がることはなく、一定の値にとどまった。水分により、強度増加はないものの劣化することもないといえる。

この結果より、養生は湿潤状態で行うことは好ましくなく、可能な限り乾燥した状態で行うことが望ましいといえる。

3・2・3 空中養生後、湿潤養生

表 6 空中養生後、湿潤養生一軸圧縮強度試験結果

	日	強度 (N/mm ²)		
		顔料なし	顔料(赤)	顔料(緑)
地上	28	7.20	9.67	7.95
水中	1	4.78	5.63	5.23
	3	4.54	6.04	5.83
	7	4.70	6.77	6.82
	28	5.10	6.12	6.25
	60	4.93	6.47	6.07
	90	5.12	6.18	5.70

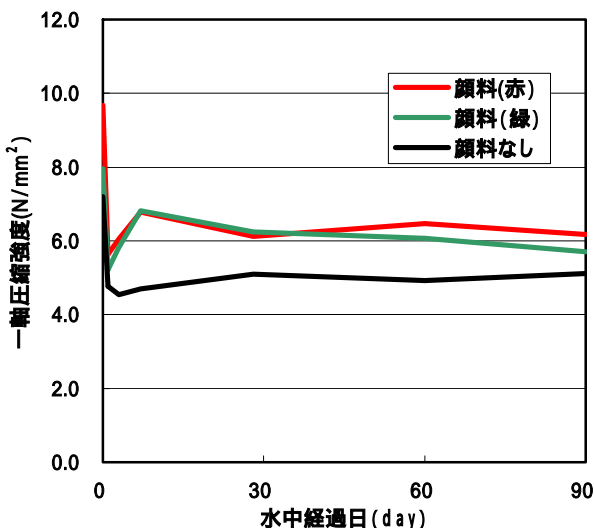


図 4 空中養生後、湿潤養生一軸圧縮強度試験結果

湿潤養生と同様、乾燥後も水に触れた場合強度の低下がみられる。低下は水中投入後すぐに起こり、強度は激減するが、約 1 週間で強度は安定し、その後一定の値をとる。今までの養生条件での測定と同じく顔料の有無で

は、顔料があったほうがやや強度が高く維持される。水中投入後の強度は湿潤養生での値に近く、水に対する強度は空中養生期間には関係がないといえる。

このことにより、湿潤状態にある場所で石こう製品を適応する場合は、強度が落ちてしまうため、負荷のかからない場所に使うという注意が必要である。

3・3 曲げ試験

表 7 空中養生曲げ試験結果

日	強度 (N/mm ²)	
	顔料なし	顔料(赤)
14	2.55	2.62
28	2.52	3.52
60	3.78	3.62

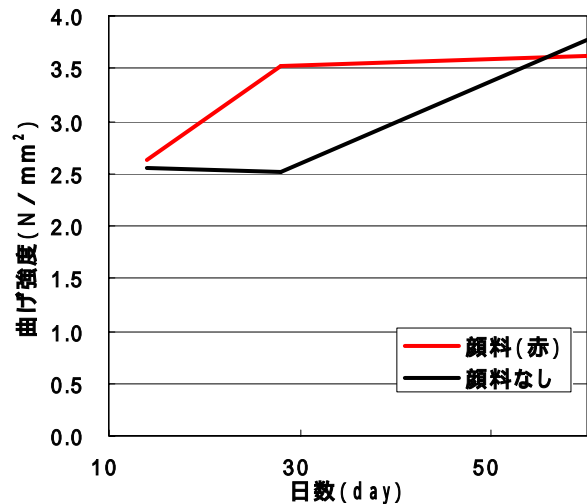


図 5 空中養生曲げ試験結果

曲げ強度は約 3.5N/mm² という値となった。顔料の有無で比べても、一軸圧縮試験の結果に似て、顔料を入れた供試体のほうが短い養生で強度が出ている。曲げ試験では供試体が大きいため養生に時間がかかってしまう。そのため顔料の水分調整効果がよく出ている実験結果といえる。ただ、顔料使用による曲げ強度の最大値の差はなく、曲げ試験の場合顔料による強度の増加にまではいたらないという結果になった。

3・4 夏季温度上昇抑制効果の測定

測定開始時に平板に散水を行い十分に水を吸わしたものと(雨天後を想定)散水を行わないものを比較している。散水は 45mm 降雨と同等の量を吸水させている。(測定期間 2006 年 8 月 21 ~ 25 日、8 月 21 日測定開始前に散水)

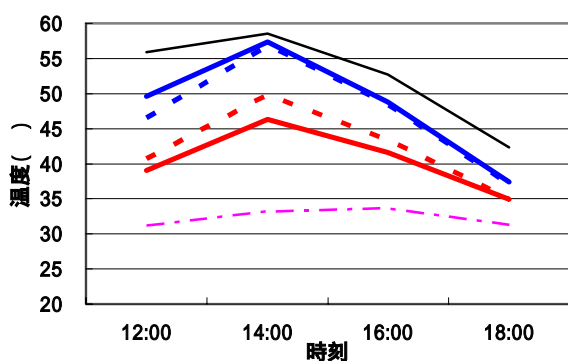
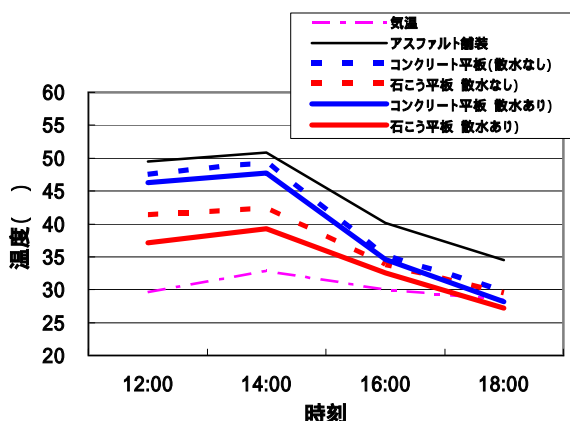


図6 コンクリート、石こう平板表面温度比較
(上・測定開始から2日目/下・測定開始から5日目)

コンクリートと石こうではその表面温度に 10 の差がみられた。また、散水を行った場合、散水直後は両平板とも温度は大きく低下するが、コンクリートは1日もすれば水分が蒸発して効果を失ってしまう。それに比べ、石こうでは保水が十分におこなわれ、保水効果は5日程度続き、温度低下が長期的にみられるという結果となった。

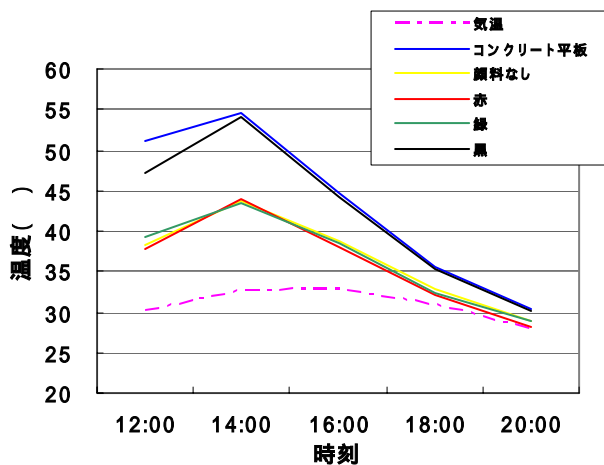


図7 平板色別表面温度比較

夏場の直射日光を浴びるような場所では、色による反射量の違いで表面温度は大きく変わる。黒く着色した石こう平板はコンクリート平板とほぼ同じ温度と石こう平板としては高い温度となったが、それ以外の色では顔料なしの白色の平板と変わらない温度となった。表面温度の観点からセメント用顔料は、黒系の色でなければ顔料の色の種類については特に考慮することなく使用することができるといえる。

3・5 吸水・保水量の測定

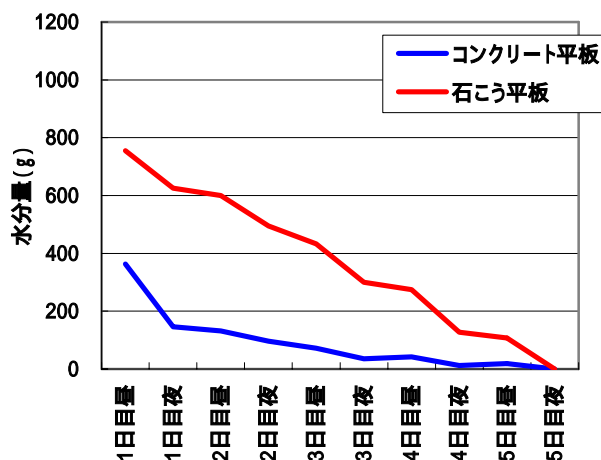


図8 水分保有量変化

これは測定1日目に平板に吸水させ、測定5日目に平板の水分がほぼ0となったとしたときの水分保有量の変移を表したグラフである。(測定期間2006年8月21~25日)石こうとコンクリートでは初期の水分量自体が大きく違う。さらにその後、コンクリートはすぐに水分が蒸発し、散水翌日以降は水分がほぼない状態となっているのに対し、石こうは毎日ほぼ同じ割合で減少し、水分を長期にわたって保有していることがわかる。

4. 廃石こう製品の検討

4・1 廃石こうを材料とした製品の特徴

ここまでの試験結果を参考にして、廃石こうを再資源化を検討する。本研究により明らかとなった廃石こうを材料とした製品の特徴は以下の通りである。

強度について

- ・ 最大一軸圧縮強度は 10~15N/mm²程度であるため、この強度下で使用を限定する必要がある。
- ・ 水にさらされる場所での使用は 5 N/mm²程度までの強度低下がある。
- ・ 水による強度低下は空中養生終了後も起こる。

- ・ 減水剤、顔料により、若干強度を増すことができる。また、水分の調整を行うことにより養生期間の短縮が期待できる。
- ・ 最大曲げ強度は 3.5N/mm²程度。

保水ブロック効果について

- ・ 石こうはコンクリートより温度上昇が少ない。夏季昼間で約 10 の温度差。
- ・ 水分を含んだ場合はさらに 3 程度の温度低下がある。
- ・ 水分の吸水量は同寸法のコンクリート平板の約 2 倍。30×30×5cm 平板で約 800 g。
- ・ 保水効果は夏の晴れた日でも 5 日程度持続する。

その他に、石こうには以下のような特徴がある。

(1) 軽量性

石こうの比重はコンクリートに使われるような骨材に比べ低い。そのため、石こうを材料として出来上がったものは軽量となる。表 8 に平板の密度を測定した結果を示す。

表 8 平板の密度・重量比較

	密度 (g/cm ³)	平板の重量(kg)
石こう平板	1.49	6.71
コンクリート平板	1.98	8.91

平板は 30×30×5(cm)とする。

(2) 低価格

材料の大半をしめる石こうは、処理費用をかけて処分しようとしているものである。そのため、石こう自体はノーコストであるといえる。そのほかの材料もセメントは安価であるし、顔料・減水剤も使用量が少ないため大きな負担にはならない。本研究で使用した各材料の単価、これより試算される石こう平板 (30×30×5cm) の値段を表 9 に示す。表 9 より、平板 1 枚は約 62～138 円という値段となる。

表 9 石こう平板の材料単価と石こう平板の値段試算

	石こう	セメント	水	顔料	減水剤
kg 単価 (円/kg)	-	21	-	390	295
平板 1 枚の重量 (kg)	5.18	2.84	1.31	0.06 ~ 0.19	0.008
平板 1 枚の単価 (円)	-	59.6	-	24.9 ~ 75.5	2.26

平板は 30×30×5(cm)とする。

顔料は使用量等により値段が変わる。

4・2 磨石こうを材料とした製品の検討

4・2・1 屋上緑化効果をねらった石こう平板

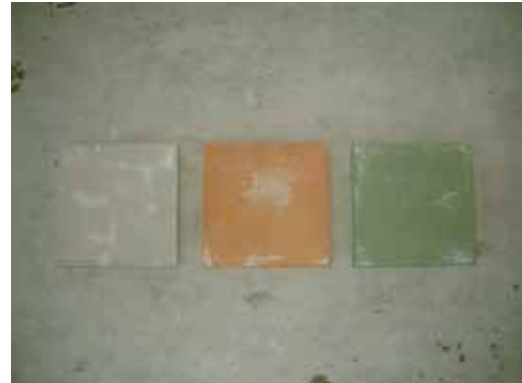


図 9 石こう平板

平板の JIS 推奨規格 (表 10) よりは強度面では多少劣っているが、その適応場所により使用も可能ではないかと考えている。軽量、保水効果という有効性能もみられる。この特徴をいかすため、強度を必要としない家庭庭園等になら顔料を入れ、景観面も考慮した製品として使用ができるのではないと思われる。

近年、都市部でのヒートアイランド現象対策のひとつとして屋上緑化があげられている。しかし、メンテナンスコストなどの理由によりなかなか推進されない状況となっている。しかし、屋上緑化の代わりにこの石こう平板を敷き詰めれば、管理はほとんどいらない。表 9 より石こう平板の単価は非常に安価であり、実際の屋上緑化に要する費用を比較すると (表 11) かなりの削減が可能である。

緑化と石こう平板の温度上昇抑制効果の比較であるが、少量の降雨さえあれば、置いておくだけで屋上緑化のような温度上昇抑制効果が得られると考えた。ほぼ同程度の気温の日に実際の緑化部分と図 6 でのデータを比較した。(図 10) 実際の緑化にはおよばないものの、コンクリート等実際の建物に使用される物質と比べれば最も緑化に近い値が得られた。

また、屋上緑化のもうひとつの問題点が積載荷重である。屋上緑化では、一般住宅で 60kg/m²、ビルなどの建物でも 130 kg/m²程度の荷重しか載せられないという規準 (建築基準法施行令第 85 条) が一般的である。石こう平板なら厚さ 4cm の平板を一般住宅に、ビル等の建物なら厚さ 6cm までの平板を設置可能となる。

最近は緑化が困難な場所を保水ブロックで代替する例も報告されている。もともと緑化を行う予定だったような場所は、上に大きな荷重が加わることもないと思われるので、石こう平板を代替するには適していると思われる。

表 10 平板曲げ強度推奨仕様¹⁰⁾

	厚さ	
	30mm	60mm
普通平板	4.0	4.0
透水平板	-	3.0

単位 : (N/mm²)

表 11 緑化と石こう平板での費用比較¹¹⁾

	施工時材料コスト (1m ² あたり)	維持管理コスト (1m ² あたり)
実際の緑化	約 15000 円	2000 円/年
石こう平板	約 1100 円	耐久性は未確認であるが、基本的には 0 円

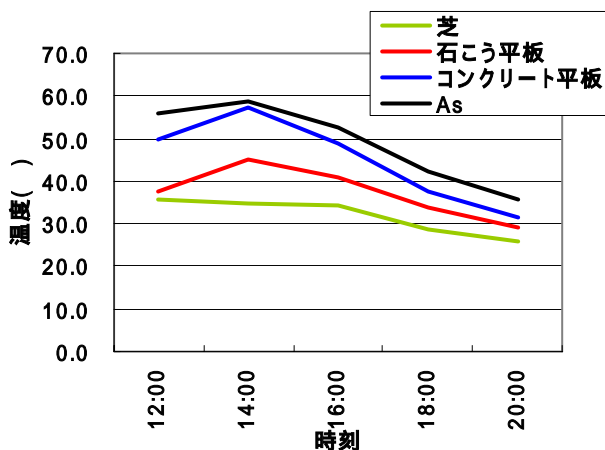


図 10 緑化との温度比較¹²⁾

4・2・2 石こうレンガ

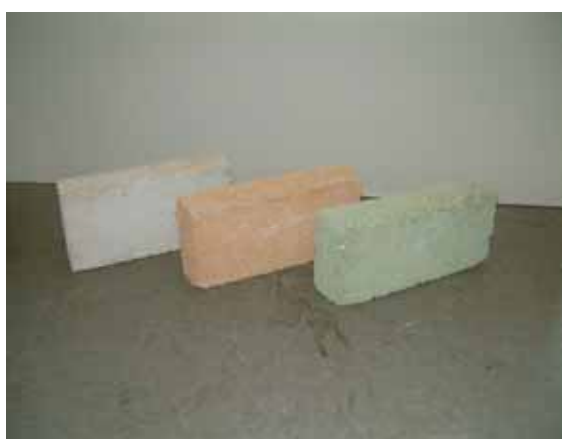


図 11 石こうレンガ

石こうレンガの特徴は軽量であることである。普通レンガ 2.4kg/個に対し、石こうレンガは 1.3kg/個と 1 個あたり 1kg の重量差があるからである。レンガ製造の際の焼きの過程も省略でき、これらにより施工・運搬が容易

になる。

また、石こうレンガの材料コストは、顔料ありで約 30 円/個、顔料なしでは約 15 円/個となり石こう平板同様低価格となっている。しかし、石こう使用量は約 1kg/個であるため大量に作られなければ、廃石こうの多量の排出をまかないきれないという問題点もある。

4・2・3 石こう植木鉢



図 12 石こう植木鉢

吸水性を利用し、植木鉢として利用する。石こうが水分を保水するため、植木鉢自体に水分を蓄え、植物への水やりの回数を減らすことが特徴の製品となる。従来の植木鉢は植物を植えた土が乾燥すれば水をあたえなければいけないが、この植木鉢であれば土の乾燥を大幅に遅らせることができるものと考えられる。また、この石こう植木鉢に関してもこれまでの 2 製品と同様に、低価格であること、軽量であること、成型後は空中養生しておくだけで完成することなどの特徴を合わせ持っている。ただし、石こうレンガ同様、大量に作られなければ、廃石こうの多量の排出をまかないきれないという問題点もある。

5.まとめ

本研究で得られた廃石こう製品のもつ特徴は以下の通りである。

- ・ 養生期間が長いほど強度は増す。しかし、強度は高

- いとはいえないので使用箇所は限定される。
- ・ 水による強度低下がある。ただし、長期間水中にあっても、一定以下の強度にまでしか落ちない。
- ・ 保水平板（ブロック）としてヒートアイランド現象対策が期待できる。
- ・ 軽量なため運搬なども効率よく行える。
- ・ 廃棄物のため、完成製品の値段は安価である。

これらより、屋上緑化などに代替する石こう平板、石こうレンガ、石こう植木鉢を再資源化の手段として提案した。特に屋上緑化代替石こう平板は石こうの使用量、完成後の平板の効果など優れた結果を得ることができた。今後は、石こう製品の耐久性など長期的な観点からみたとき、本研究での効果がどう変化するかなどを明らかにしていけば、石こう製品をよりよいものにできると考えられる。

参考文献

- 1．社団法人石膏ボード工業会統計
- 2．廃石膏ボードのリサイクルの推進に関する報告書，環境省，東京，2004
- 3．長祥隆：セメント・セッコウ・石灰ハンドブック，無機マテリアル学会，p 138-159，東京，1995
- 4．大沼正吉：石膏石灰便覧，技報堂，p 111-112，東京，1961
- 5．小林一輔：コンクリート工学，森北出版，p 16，東京，1975
- 6．桑原利秀：顔料および絵具，共立全書，p 94 - 102・p 112 - 117、東京，1948
- 7．朝倉鑛造：工業材料規格便覧，朝倉書店，p 254 - 255，東京，1977
- 8．小島泰之・近藤教人・安井悟：廃石膏ボードのリサイクルに関する研究，愛知工業大学工学部都市環境学科道路研究室論文，2004
- 9．朝日涼太・杉本将：廃石膏ボードのリサイクルに関する研究，愛知工業大学工学部都市環境学科道路研究室論文，2005
- 10．日本工業規格プレキャスト無筋コンクリート製品 JIS - A5371，日本規格協会，p 17 - 21，2000
- 11．知っておきたい屋上緑化の Q & A，鹿島出版会，p 38 - 47，東京，2003
- 12．遠山健治・佐竹浩幸：透水性および排水性舗装における夏季舗装表面温度上昇抑止ならびに車両騒音軽減に関する研究，愛知工業大学工学部都市環境学科道路研究室論文，2004
- 13．日本工業規格普通れんが JIS - R1250，日本規格協会，p 1 - 3，1951

(受理 平成19年3月19日)