

〈特別研究課題〉 建築系廃棄物処理に関する
リサイクルの研究
助成研究者 名古屋工業大学 河辺 伸二



建築系廃棄物処理に関するリサイクルの研究

河辺 伸二

(名古屋工業大学大学院社会工学専攻)

Study on the Recycling of Building Materials including the Polyvinyl Chloride

Shinji Kawabe

(Nagoya Institute of Technology)

Abstract

Recently, large amount of building material including the polyvinyl chloride are used. The recycling method of these materials is very important. In this paper, the following two points were examined.

- 1) the development of recycling board from waste of building materials including the polyvinyl chloride.
- 2) the mechanical property of mortar mixed with PVC wallpaper carbide.

1. はじめに

近年、雨どいや給排水パイプ、壁紙など塩化ビニル製の建築材料が大量に使用されている。壁の乾式施工が普及して壁紙も大量に使用されており、日本で使用される壁紙の90パーセント以上は塩ビ壁紙であることや、施工時の端材や使用済み見本帳が大量に廃棄されることから、これらの有効利用が求められている。そこで、次に示す2点について、建築材料である壁紙と床材のリサイクルの方法を検討する。ただし、今回の研究範囲は、安定剤として鉛を使用していない塩ビ製品のリサイクルとする。

- 1) 塩化ビニルを含む建築仕上げ材料を用いたリサイクルボードの開発

マテリアルリサイクルの問題点を検討し、塩化ビニルを含む壁紙のリサイクルボードを開発する。

2) 廃塩化ビニル壁紙の炭化物混入モルタルの力学的特性

塩ビ製品の焼却残渣を用いたコンクリート二次製品を開発する場合のひとつの基礎資料として力学的特性を測定する。

2. 塩化ビニルを含む建築仕上げ材料を用いたリサイクルボードの開発

現在日本の壁紙総出荷量の約95%は塩化ビニルの壁紙であるが、10年以上もの長期使用に耐える塩ビ壁紙は、まだ使用済み製品の排出量も少ないため、これまでリサイクルはほとんど行われてこなかった。しかし、今後は築数十年を経た住宅、ビルディング等のリフォームや解体工事の増加に伴って、塩ビ壁紙の廃棄量も徐々に増えてくるものと予測され、壁紙リサイクルに対する社会的要請にどう対応するかが、大きなテーマ¹⁾となっている。

また、塩ビは加熱すると190℃程度で塩化水素を発生してしまい、ダイオキシンを形成する元になってしまう。そのため、リサイクルすることが難しく、化学分解後に組成変換して再生利用するケミカルリサイクルがほとんどである。さらに、塩ビ壁紙や塩ビ床材は紙や炭酸カルシウムなど他の物質との複合・多層製品であり、素材ごとの分別が困難である。

そこで本研究では廃棄された塩ビ壁紙や塩ビ床材をリサイクルボードとして再利用することは可能かどうかを検討するものとする。

本研究では、素材を分別することなくマテリアルリサイクルとして使用する手段と成りえるかどうかを重要であるとする。

3. 実験方法

3.1 リサイクルボードの作製方法

本研究のリサイクルボードの原料は、写真1に示すように塩ビ壁紙、塩ビ床材、塩ビ壁紙のサンプル帳、ペットボトルのふたの部分(P.P)、木屑を破碎したものを使用する。これらを100×100×3(mm)の型枠に入れ、熱間圧縮機により175℃で材料を溶解させつつ、10分間圧力を4MPa加える。この際、温度管理に気を配り、塩素ガスの発生を防止する。次に冷却機を用いて10℃で冷却させつつ、圧縮機により10分間圧力を4MPa加え、脱型する。この一連の流れを図1に示す。

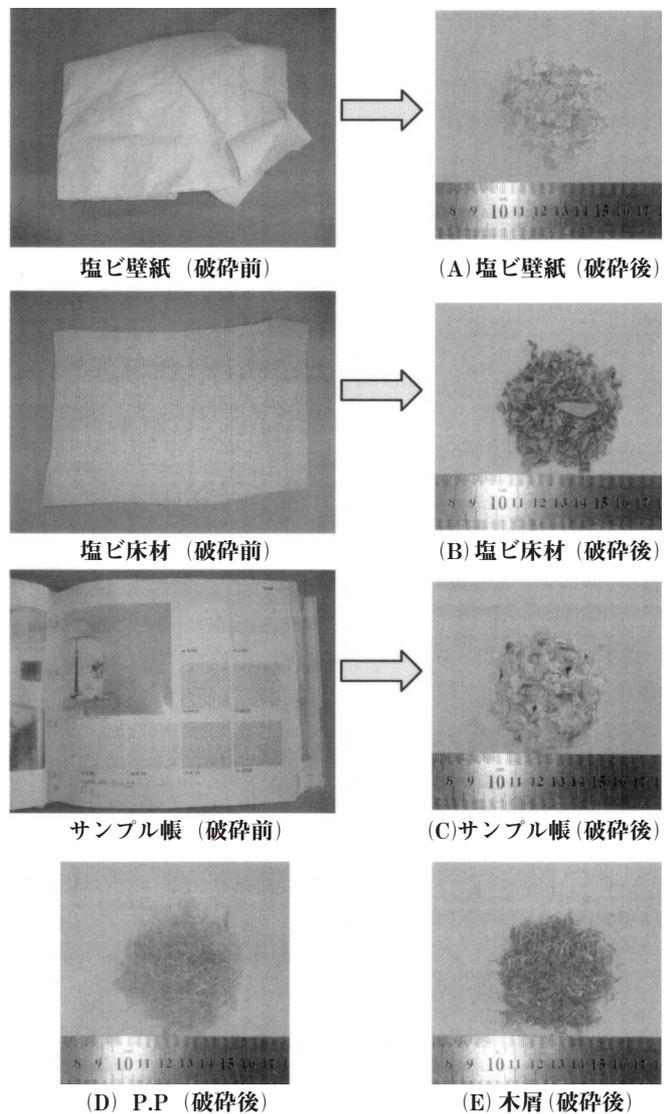


写真1 リサイクルボードの原料

複層ボードは、図2に示すように100×100×1(mm)の型枠を用いて作製したボードを3枚重ねて再度加熱圧縮、冷却圧縮したものである。

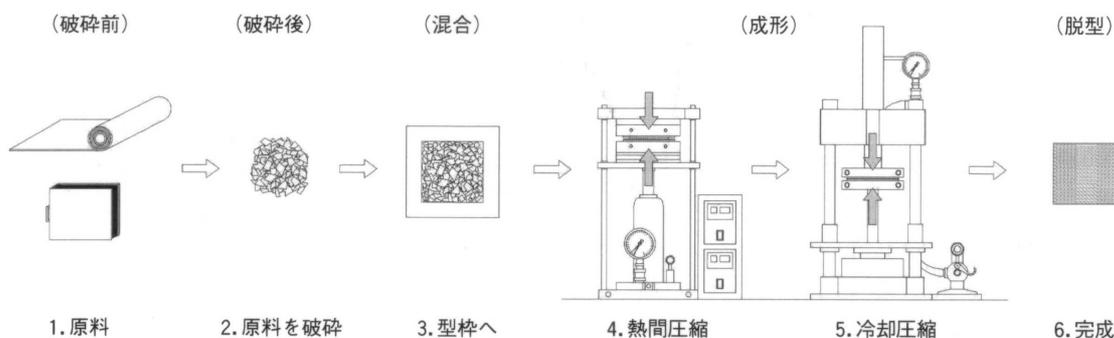


図1 リサイクルボードの作製方法

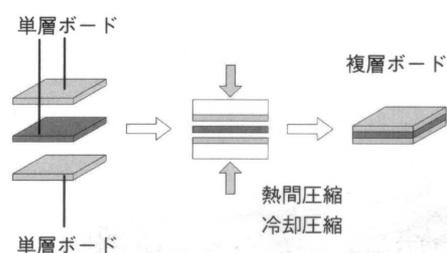


図2 複層ボードの作製方法

表1 調査条件

分類	番号	材料	質量比	分類	番号	材料	質量比
①	1	A:D	100:80	⑦	18	A:D	100:100
	2	A:D	100:100		19	A:B	100:140
	3	A:D	100:120		20	A:D	100:100
②	4	B:D	100:40		21	C:D	100:100
	5	B:D	100:60		19	B:C	140:100
	6	B:D	100:80		20	C:D	100:100
③	7	C:D	100:80	⑧	20	A:D	100:100
	8	C:D	100:100		21	A:D,E	100:100:100
	9	C:D	100:120		18	A:D	100:100
④	10	A:B	100:140		21	C:D	100:100
	11	B:C	140:100		20	C:D,E	100:100:100
	12	A:B:C	100:300:100		21	C:D	100:100
⑤	13	A:B:C:D	100:200:100:100				
	14	A:D,E	100:100:100				
	15	B:D,E	100:100:100				
	16	C:D,E	100:100:100				
	17	A:B:C:D,E	100:200:100:100:100				

A:塩ビ壁紙 B:塩ビ床材
C:サンプル帳 D:P.P
E:木屑
18~21:複層ボード

3.2 調査条件

リサイクルボードの調査を表1に示す。表中の分類①は塩ビ壁紙とP.Pを用いたリサイクルボードであり、P.Pの比率を変化させる。②は塩ビ床材とP.P、③はサンプル帳とP.Pを用いており、同様にP.Pの比率を変化させる。塩ビ床材は塩ビ壁紙やサンプル帳に比べ塩ビの含有量が多いため、④はP.Pを用いずに塩ビ床材の比率を大きくする。⑤は塩ビ壁紙、塩ビ床材、サンプル帳のみで作製した供試体番号12と、供試体番号12の塩ビ床材の一部をP.Pに変更した供試体番号13を比較している。⑥は木屑を混合したリサイクルボードである。

分類⑦、⑧は図2に示す複層ボードであり、供試体番号18、20は塩ビ壁紙、供試体番号19、21はサンプル帳を使用している。

3.3 曲げ試験

JIS A 1408 (建築用ボード類の曲げ及び衝撃試験方法) に基づき試験を行う。供試体は上記の方法で作製したリサイクルボードを95×50×3(mm)にカットし、気乾状態にする。圧縮引張試験機により二等分点一線荷重方式曲げ試験を行う。荷重の速度は1~3分で最大荷重に達するものとする。各種類3個ずつ測定する。その際次の事項を求める。

- 1) 曲げ破壊荷重(N)
- 2) 曲げ強さ(N/mm²)

JIS Z 8401(数値の丸め方)によって有効数字3桁まで求める。

$$\sigma_b = \frac{3PL}{2bt^2} \quad \sigma_b: \text{曲げ強さ(N/mm}^2\text{)} \quad L: \text{スパン(mm)} \quad P: \text{曲げ破壊荷重(N)}$$

$$b: \text{供試体の幅(mm)} \quad t: \text{供試体の厚さ(mm)}$$

- 3) スパン中央部の破壊時の最大たわみ量(mm)
- 4) 曲げ-たわみ曲線

[荷重(10点以上)ースパン中央のたわみ量]

供試体番号2、5、8の曲げ-たわみ曲線を例として図3に示す。

- 5) 曲げ弾性係数(N/mm²)

曲げ-たわみ曲線の直線部分から次式より算出し、JIS Z 8401によって有効数字3桁まで求める。

$$E_b = \frac{(P_2 - P_1)L^3}{4bt^3(d_2 - d_1)}$$

E_b : 曲げ弾性係数(N/mm²)

$P_2 - P_1$: 直線部分の荷重の増加量(N)

$d_2 - d_1$: 直線部分のたわみの増加量(mm)

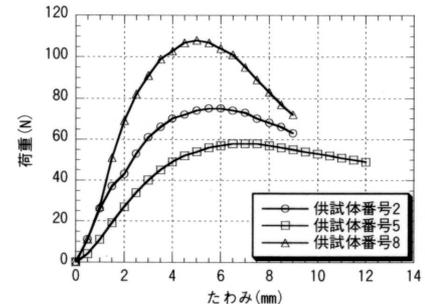
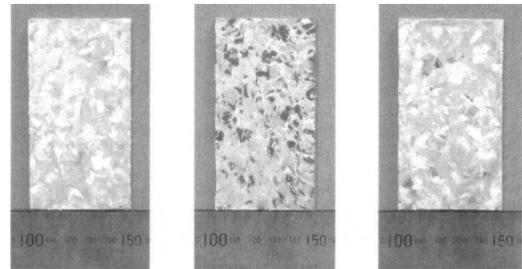


図3 曲げ-たわみ曲線



1) 供試体番号2 (2) 供試体番号5 (3) 供試体番号8

写真2 作製したリサイクルボード

4. 実験結果

4.1 単層ボード

写真2に示すように、ボードとして成形することに成功した。その後曲げ試験を行い、各供試体3個ずつ測定した値の平均値を図4、5、6に示す。グラフ中の番号1～21は供試体番号を示している。

分類①はP.Pの比率を大きくすることで曲げ強さが増加した。②は①や③に比べ曲げ強さ、曲げ弾性係数は小さく、最大たわみ量は大きくなった。また、P.Pの比率を大きくすることで曲げ強さ、曲げ弾性係数が増加し、最大たわみ量は減少した。写真2(2)供試体番号5に示すように黒い斑点のあるボードとなった。③も②と同様にP.Pの増加と共に曲げ強さ、曲げ弾性係数が増加した。①、②に比べ曲げ強さ、曲げ弾性係数が大きく、最大たわみ量が小さいことも特徴である。ボードの外観は、サンプル帳を使用しているので様々な色や文字が表面に現れた。

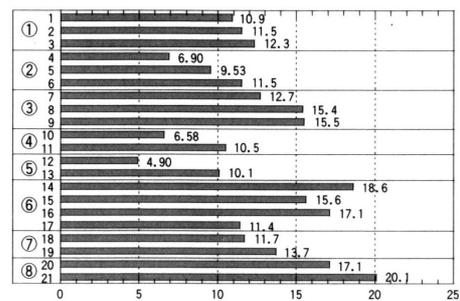


図4 各供試体の曲げ強さの平均値 (N/mm²)

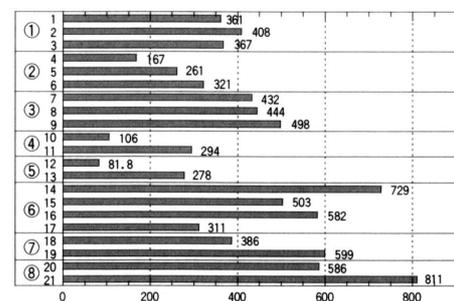


図5 各供試体の曲げ弾性係数の平均値(N/mm²)

④はP.Pを使用せず、塩ビ床材の樹脂によりリサイクルボードを形成している。そのため他のボードに比べ曲げ強さ、曲げ弾性係数が小さく、最大たわみ量が大きいことが特徴である。供試体番号10は塩ビ壁紙、供試体番号11はサンプル帳を使用しているが、その違いも大きく表れている。⑤の結果を見ると、明らかにP.P使用時の曲げ強さが増している。⑥は木屑を混合することによる曲げ強さの増加は確認できたが、様々なものが混ざり過ぎ、やや美観に欠けるボードになった。

4.2 複層ボード

分類⑦、⑧は複層ボードであり、加熱圧縮すると樹脂同士が溶け合い、接着剤を使用せずに作製することができた。また、先ほど述べたように木屑を用いたリサイクルボードは美観に欠けるので、⑧のように複層ボードの間に挟むことにより外観を改善している。曲げ強さの小さいボードを多少用いても、複層とすることで曲げ強さを損なうことなくリサイクルボードを作製することが可能であった。

5. 考察

図7、8、9は塩ビ壁紙、塩ビ床材、サンプル帳の塩ビ含有率をそれぞれ30%、40%、10%とし、各供試体の塩ビ含有率を算出して、曲げ強さ、曲げ弾性係数、最大たわみ量との関係を表したものである。塩ビ含有率が増加するにつれ、曲げ強さ、曲げ弾性係数は減少し、最大たわみ量が増加している。この結果は塩ビの特性上妥当である。

このことから塩ビ製品をリサイクルボードとして再利用するためには曲げ強さなどの強度の面に問題がある。塩ビ製品が少量ならばある程度の強度は出せるが、リサイクルという点では塩ビ製品を多量に含むボードが良い。そのため、強度をあまり必要としない用途に使用することが望まれる。塩化ビニルには耐酸性、耐アルカリ性、耐水性、電気絶縁性が良く、耐候性に優れる、難燃性であるなどの特性があり、この特性を活かせば様々な用途に使用することが可能だと思われる。

6. 小結

本研究では塩化ビニルを含む建築仕上げ材料を用いたリサイクルボードの作製と曲げ試験による物性の測定を行った。

- 1) 塩ビ壁紙、塩ビ床材、サンプル帳、P.P、木屑を用いたリサイクルボードを作製できた。
- 2) 塩ビ壁紙、塩ビ床材、サンプル帳ではサンプル帳が最も曲げ強さの大きいリサイクルボードが作製できる。

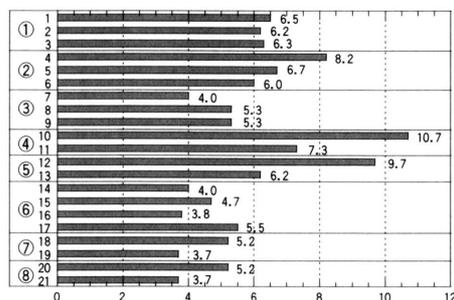


図6 各供試体の最大たわみ量の平均値 (N/mm²)

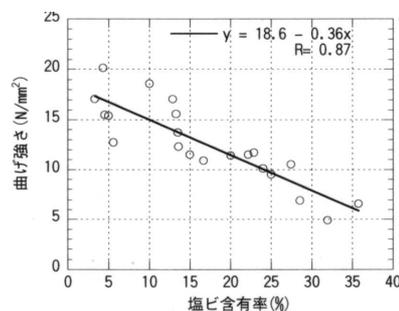


図7 塩ビ含有率と曲げ強さの関係

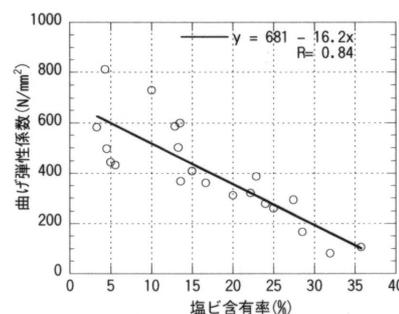


図8 塩ビ含有率と曲げ弾性係数の関係

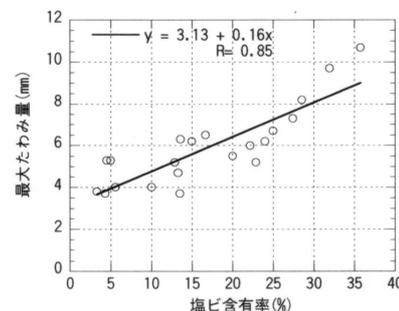


図9 塩ビ含有率と最大たわみ量の関係

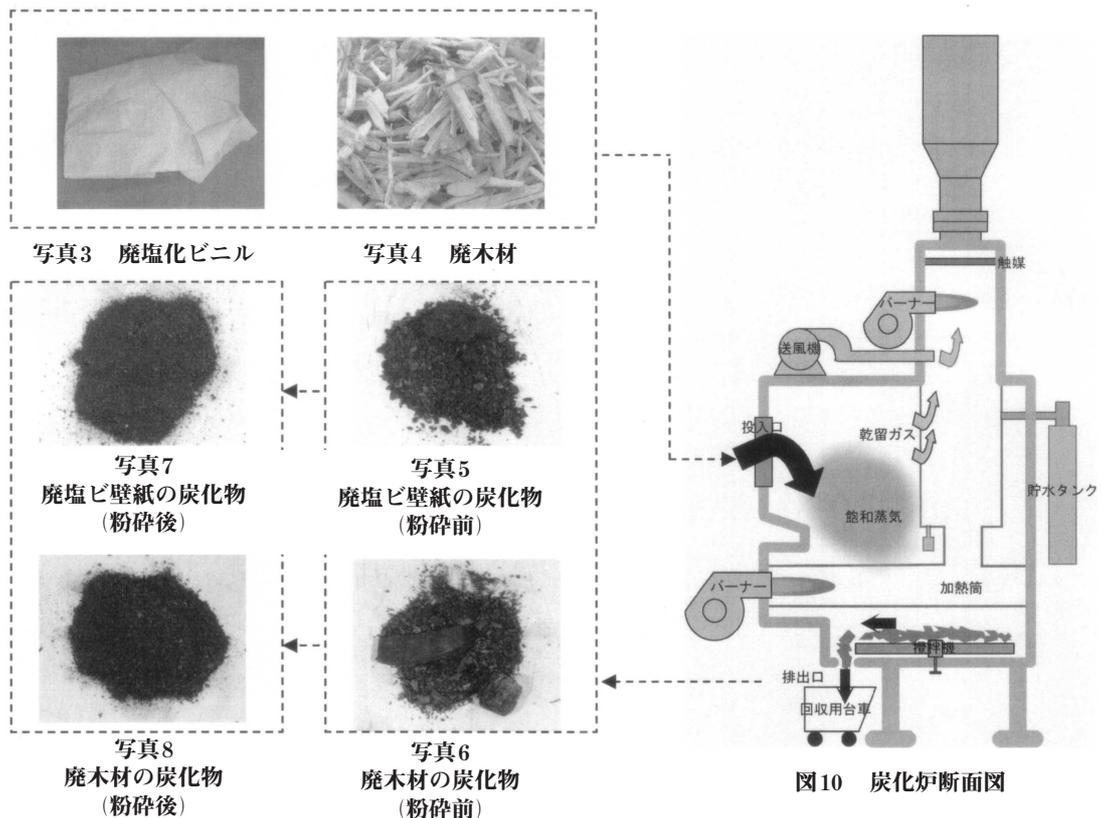
- 3) 曲げ強さの弱いボードでも複層ボードとすることで曲げ強さ向上の可能性はある。
- 4) 塩ビ壁纸、塩ビ床材の配合率が大きいほど、塩ビ含有率が大きくなり、リサイクルボードの曲げ強さは低下し、たわみ量の大きい軟らかいものになる。
- 今後は、塩ビ含有率を増し、かつ曲げ強さが向上するリサイクルボードを検討する。もしくは強度を必要としない部位へのリサイクルボードの適用を考えたい。

7. 廃塩化ビニル壁纸の炭化物混入モルタルの力学的特性

壁纸はほとんどの建築物、建築現場で使用されており、壁纸の使用量は年々増加している。近年のドライウォールの増加に伴い、その排出量は膨大に増えている。壁纸の中でも塩化ビニル壁纸の使用量が特に増加している。塩化ビニル壁纸は、経済性に富み、機能的に難燃性や耐水性がよく、優れた建築材料である。塩化ビニル壁纸の使用量の増加にともない施工現場で排出する切端などの建築廃材の量も増えている。

今日、塩化ビニル壁纸のリサイクル方法が重要視されている。この壁纸が塩化ビニルを含んだ建築材料のため、現在の処理方法は廃棄に頼っており、リサイクルはあまり行われていないのが現状である。しかし、廃塩化ビニル壁纸の需要率は上り続けており、リサイクル方法が益々重要な課題になっている。

そこで、この廃塩化ビニル壁纸のリサイクルの1つの方法として、壁纸を炭化して炭として使用する方法を検討する。廃塩化ビニル壁纸を燃焼するとダイオキシン等の有害物質が発生する。そこで本研究は図10に示す炭化炉を用いて、水蒸気を使用して蒸し焼きにした炭化物を作製する。写真3と4に示す廃塩化ビニル壁纸や廃木材を図10に示す炭化炉に投入し、炭化を施すと写真5と6に示す炭化物になる。本研究は、この炭化物を混入したモルタルを作製し、置換率と圧縮強度、ヤング係数、比強度の測定を行う。



8. 炭化炉³⁾

8.1 炭化の流れ

図10に炭化炉の仕組みを示す。実際の炭化炉の外観を写真9に、内部の加熱筒を写真10に示す。写真3と4に示す処理物を投入口から炭化炉に投入する。炉内の加熱筒により処理物が熱され、飽和蒸気を噴霧しながら炭化作業が始まる。作業中は攪拌作業を行いながら炭化する。2,3時間ほどで炭化作業が終了し、その後1,2時間冷却して回収となる。

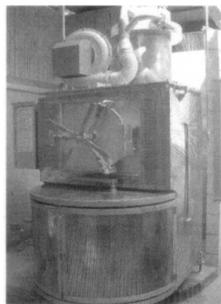


写真9 炭化炉外観

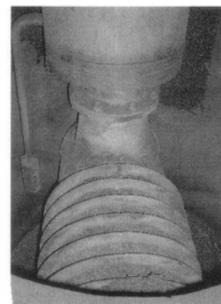


写真10 炭化炉内部

8.2 炭化の仕組み

炭化とはCO₂を固定することであり、炭化の方法は有機物を酸素なしの密閉空間もしくは閉じ込められた炉に外部から加熱し、炉内物質の熱分解を促進し、Cの固定化を図ることで行われる。このような処理方法を外熱式炭化法と呼び、市場の炉の99%がこの外熱式炭化法である。しかしこの外熱式炭化法の場合には、熱分解の過程で必ず密閉炉内に可燃性ガスCOが発生するので、その対策が必要である。

今回使用する炭化炉の仕組みでは炉内に飽和蒸気を噴霧することによって、タールの発生を抑制しながら多孔質で良質な炭化物を生成する。外熱式と蒸気の複合作用のため、熱効率がよく爆発の危険性がなく、シンプルで安全性が高い。発生する乾留ガスをバーナーで燃焼し無煙化させ、金属触媒で無臭にさせる。炉内に攪拌機を備え付けており、生成された炭化物を自動で攪拌させ、上質でムラのない炭化物に仕上げる。

8.3 炭化炉の利点

- ・廃棄物として処理するものを資源とし有効利用できる。
- ・焼却ではなく炭化しているのでCO₂や排ガスの排出を抑制でき、地球温暖化防止に貢献する。
- ・処理前と処理後で容量が1/5～1/10に減量できる。
- ・無酸素状態雰囲気下での炭化であるので、ダイオキシン類が抑制される。
- ・炭化にかかる時間が圧倒的に短い。

表2 調合表

供試体名	W/C (%)	単位質量(kg/m ³)			
		水	セメント	砂	炭化物
N	45	292	649	1298	—
WC10	45	292	649	1169	22.5
WC20	45	292	649	1039	45.1
WC30	45	292	649	909	67.5
PVCC10	45	292	649	1169	37.5
PVCC20	45	292	649	1039	75.0
PVCC30	45	292	649	909	112.3

9. 実験概要

炭化された廃塩化ビニル壁紙がモルタルの細骨材としての使用可能性を検討する。w/c=45%のモルタルに骨材として砂と炭化物を内割りで混入する。炭化物は、廃塩化ビニル壁紙の炭化物と、廃木材の炭化物(以下、木炭粉と呼ぶ)として置換の供試体を作製する。圧縮強度試験を行い、力学的特性を検討する。

表3 骨材の物性

骨材の種類	最大寸法 (mm)	絶乾密度 (g/cm ³)	表乾密度 (g/cm ³)	粗粒率	吸収率 (%)
木曽川産砂	5	2.53	2.56	2.79	1.00
木炭粉	—	0.45	—	—	—
塩ビ壁紙炭化物	—	0.75	—	—	—

9.1 使用材料

セメントは普通ポルトランドセメント、骨材は細骨材として木曾川産砂と木炭粉、塩化ビニル壁紙の炭化物を表2に示す調合で使用する。木炭粉・塩化ビニル壁紙の炭化物の粒度を合わせるために写真5と6に示す炭化物を写真7と8に示すように粉碎して使用する。また、骨材の物理的特性を表3に、塩化ビニル壁紙の炭化物・木炭粉の含水率変化を図11に示す。炭化物は含水率を統一するため乾燥させてから使用する。

9.2 供試体の作製

表2の調合表に示すように炭化物を細骨材に対して、10%・20%・30%の体積置換を行う。φ50×100mmの円柱型枠に詰め、テーブルバイブレータによる10秒間の締め固めを行う。翌日キャッピングを行い、さらに翌日脱型を行う。養生期間は7日間と28日間で行う。

9.3 圧縮強度試験

万能試験機を用い、JIS A 1108に基づき載荷し荷重を測定し、圧縮強度を求める。ひずみゲージを供試体に貼り、ひずみ測定器にてひずみを計測し、ヤング係数を求める。

9.4 比強度

圧縮強度を密度で除した比強度を求める。 $N/mm^2 \div g/cm^3 = 10^3 m$ となり、単位は長さとなる。

10. 実験結果

10.1 7日間強度試験結果

図12～14に7日間養生における圧縮強度・ヤング係数・比強度と置換率を示す。図12から木炭粉混入モルタルは普通モルタルに比べ、圧縮強度が低下している。塩化ビニル壁紙の炭化物混入モルタルにおいては、普通モルタルの圧縮強度に比べて少し大きい。図14に示す比強度は、圧縮強度が普通モルタルより劣っていた木炭粉混入モルタルにおいても普通モルタルの比強度と同等の比強度が出ており、塩化ビニル壁紙の炭化物混入モルタルにおいては普通モルタルを上回っていることが分かる。しかし、ヤング係数は塩化ビニル壁紙混入モルタルと木炭粉混入モルタルは普通モルタルより小さい結果となった。

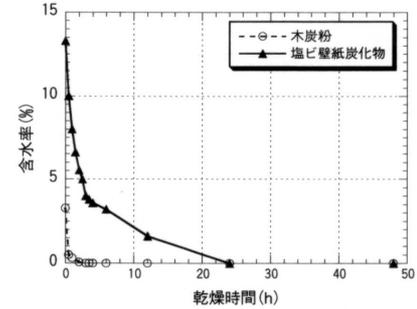


図11 炭化物の含水率と乾燥時間

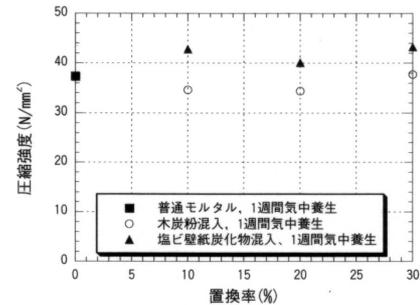


図12 炭化物の置換率と圧縮強度

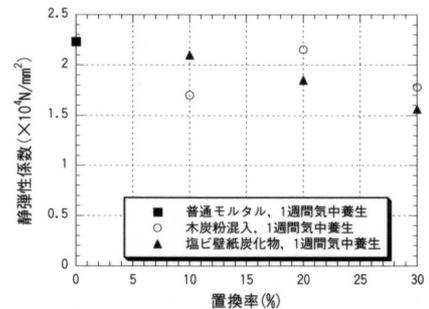


図13 炭化物の置換率とヤング係数

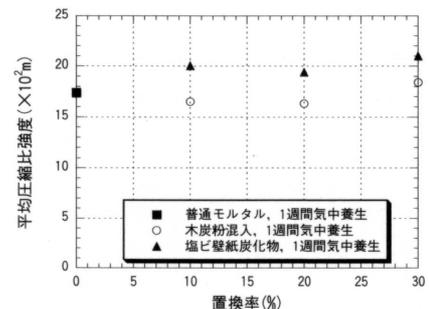


図14 炭化物の置換率と比強度

10.2 28日間強度試験結果

図15～17に28日間養生における圧縮強度・ヤング係数・比強度と置換率を示す。図15に示すように木炭粉混入モルタルの圧縮強度は普通モルタルの供試体の圧縮強度と比べ、どの置換率でも圧縮強度が下がっていることが分かる。塩化ビニル壁紙の炭化物混入モルタルにおいては20%置換時に若干の強度低下があるものの、その他の10%・30%置換供試体の圧縮強度は普通モルタルの供試体と同程度の圧縮強度が出ていることが分かる。図17に示すように木炭粉混入モルタルの比強度は、圧縮強度が落ち込んでいた10%置換では普通モルタルの供試体の比強度より劣っているが、20%・30%置換においては同程度の比強度になっており、圧縮強度は弱くても同程度の比強度になることが分かる。また、塩化ビニル壁紙の炭化物混入モルタルの比強度は、圧縮強度がやや弱くなっていた20%置換で同程度、10%・30%置換においては、普通モルタルの比強度より強まり、圧縮強度が同程度なので比強度は上回る結果を得た。

図16から木炭粉混入モルタルのヤング係数は普通モルタルに比べて下がっているが、置換率に比例して上がっている。しかし、塩化ビニル壁紙の炭化物混入モルタルのヤング係数は置換率が大きいほど低下している。

10.3 材齢期間による圧縮試験結果

図18と19に7日間養生と28日間養生の材齢期間による圧縮強度と比強度を示す。図18に示す圧縮強度から全体的に7日間養生圧縮強度より28日間養生圧縮強度が増していることが分かる。しかし、木炭粉混入モルタルでは普通モルタルに比べて養生期間による強度上昇率が小さいことが分かる。さらに塩化ビニル壁紙の炭化物混入モルタルにおいては、木炭粉混入モルタルの圧縮強度上昇率よりさらに小さい結果となっていることが分かる。

比強度においても同様に、7日間養生と28日間養生の差が、木炭粉や塩化ビニル壁紙の炭化物を置換することによって、普通モルタルに比べて材齢期間による比強度の上昇率が小さくなっていることが分かる。

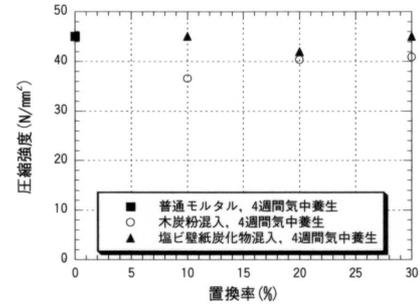


図15 炭化物の置換率と圧縮強度

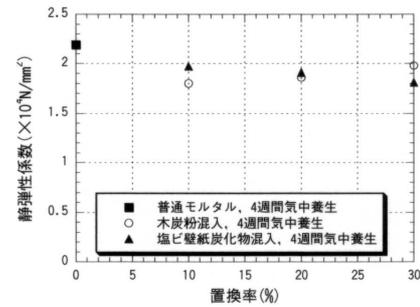


図16 炭化物の置換率とヤング係数

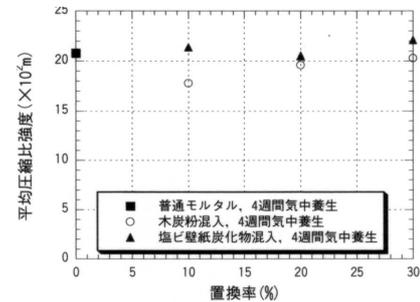


図17 炭化物の置換率と比強度

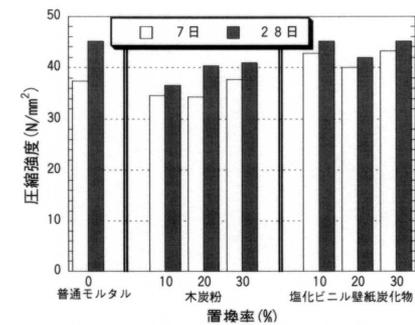


図18 材齢期間による圧縮強度

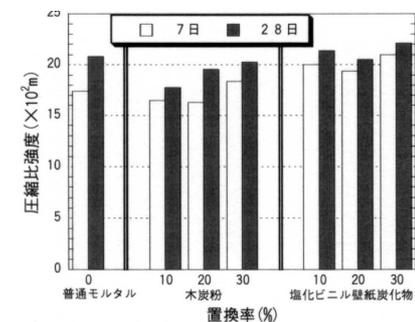


図19 材齢期間による比強度

11. 考察

塩化ビニル壁紙の炭化物を細骨材と置換して混入した結果、7日間養生、28日間養生ともに普通モルタルの圧縮強度を上回り、細骨材として利用可能に思われる。しかし、今回はw/c=45%のモルタルで実験を行っており、30%置換までが限界であった。また、w/cを固定せず細骨材と木炭粉を100%置換させた供試体を作製したところ写真11のように硬化しない結果となった。

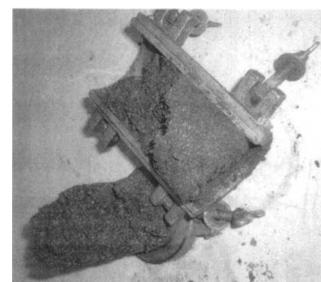


写真11
炭化物100%置換のモルタル

12. 小結

炭化炉にて炭化された廃塩化ビニル壁紙、廃木材の炭化物をモルタルに内割りで混入し、力学的特性を測定し、以下のことが分かった。

- 1) 7日間強度測定の結果は、塩化ビニル壁紙の炭化物混入モルタルにおいては圧縮強度・比強度ともに普通モルタルを少し超える結果となった。また、木炭粉混入モルタルの圧縮強度は普通モルタルの圧縮強度より上がっているとは言えない結果となったが、比強度は普通モルタルの比強度を上回る結果となった。
- 2) 28日間強度測定の結果は、塩化ビニル壁紙の炭化物混入モルタルにおいては普通モルタルの圧縮強度と同程度の結果となり、比強度においては普通モルタルの比強度を上回る結果となった。また、木炭粉混入モルタルの圧縮強度は普通モルタルの圧縮強度を下回る結果となった。しかし、比強度は普通モルタルの比強度と同程度の結果を得た。
今後は、廃塩化ビニル壁紙の炭化物で細骨材との置換率がさらに向上するよう検討する。

13. まとめ

建築材料である壁紙と床材のリサイクルの方法について下記の2点について検討した。

- 1) 塩化ビニルを含む建築仕上げ材料を用いたリサイクルボードの開発
- 2) 廃塩化ビニル壁紙の炭化物混入モルタルの力学的特性

謝辞

本研究は、(財)日比科学技術振興財団、株式会社サンゲツ、名古屋工業大学永田謙二先生、株式会社トピア、日本コンクリート株式会社との共同研究で行いました。記して謝意を表します。

本研究の成果は、2007年度日本建築学会東海支部研究発表会（2008年2月開催）に発表し、2008年度日本建築学会大会（2008年9月開催）に発表予定である。

参考文献

- 1) 小山明男、菊池雅史、他2名：叩解法を用いた塩化ビニル系廃材の再資源化技術開発、日本建築学会大会学術講演梗概集A、pp.521-524、2007.8
- 2) リサイクルビジョン：塩ビ工業・環境協会、塩化ビニル環境対策協議会、2007
- 3) カーボンワン：株式会社オールメンテナンス、株式会社悠コーポレーション、2007