

廃石膏ボード由来再生石膏の半水石膏含有率測定法の適用性と加熱透過法による新たな半水石膏製造技術の開発

Applicability of Measuring Methods for Gypsum Hemihydrate Content of Reclaimed Gypsums Derived from Waste Plasterboards and Development of New Gypsum Hemihydrate Production Technology by Heated Penetration Air

大分工業高等専門学校 都市・環境工学科 佐野 博昭

（研究計画ないし研究手法の概略）

1. 迅速密度測定法の研究

（研究計画の概略）

石膏ボード生産量の増加にともなって、建築現場等から排出される廃石膏ボードの量も年々増加している。（一社）石膏ボード工業会によれば、廃石膏ボードの年間排出量の推計から2038年には新築系排出量159千t、解体系排出量2,810千tに達するとされている。

このような状況の中、わが国では廃石膏ボード（二水石膏）を廃棄物化させない処理方法の開発が急務となっており、そのひとつとして、石膏を一度に大量消費することができる土木分野、中でも、地盤改良材としての適用性についての研究が積極的に行われており、これまでに廃石膏ボードを破碎・粉碎・分離・焼成して得られた二水、半水、無水の各石膏の地盤改良材としての適用性を検討してきた。これらの研究は、二水石膏を焼成したときに生成される半水石膏が、水と接触することによって半水石膏から二水石膏へと形態を変化させるときに生じる吸水や固化作用を積極的に利用しようとするものである。これまでの研究により、地盤改良材としての適用にあたっては、セメントの一部を半水石膏に置き換えることによってセメント単独の利用よりも工学的にも経済的にも有利な材料として利用できる可能性が高いことが報告されている。

地盤改良材としての適用性を論じる場合には、主として半水石膏を利用する機会が多いことから、廃石膏ボードを破碎・粉碎・分離した石膏粉（二水石膏）を加熱して半水石膏に転換する必要があり、加熱装置としては既存のロータリーキルン炉や新たに開発された加熱炉などが用いられている。

その一方で、廃石膏ボードから再生された石膏を使用している現場において、「搬入された半水石膏の品質が一定していない」、さらには、「半水石膏と呼べる状態なのか疑わしい」などの声を聞いており、いわゆる“生焼け石膏”問題が指摘されていることから廃石膏ボードより再生された石膏の品質に疑問を投げかける向きもある。

廃石膏ボードから再生された石膏の工学的有効性が報告されている一方で、技術力の乏しい一部の企業の製造による低品質の“生焼け石膏”が市場に出回るような事態が生じれば、廃石膏ボードから再生された石膏の有効利用に関する研究の信用は失墜し、今後予想される廃石膏ボード量の増大や管理型最終処分場の残余容量の低下を迎える時代において、大きな障害となることが十分に予想される。このような事態を避けるためには、再生石膏の有効利用技術の開発と併せて、品質管理技術の開発にも積極的に力を入れていく必要がある。

そこで、本研究では、再生石膏を主として地盤改良材として利用する観点から、再生石膏の簡易な品質判定法として密度に着目した半水石膏含有率を求める方法の有効性をより高め

るために、迅速密度測定法について検討している。

(研究手法の概略)

石膏の分析方法としては、「セッコウの化学分析方法 (JIS R 9101:1995)」に規定されており、土の分析方法とは異なる。この理由として、石膏の状態は結合水の量によって異なること、また、加熱温度によって性状が異なること、半水石膏は水を加えることによって二水石膏化し、固化してしまうことなどが挙げられる。

土質材料の土粒子の密度を求めるためには、通常、ピクノメーターが用いられているが、本研究では、セメントの物理試験方法に規定されている体積を測る上で水の代わりに鉱油を用いる「セメントの密度試験」に準拠して試験を行ってみることにした。

密度試験の方法としては、まず、ルシャテリエフラスコに鉱油を入れて室温20℃の恒温室内で鉱油の温度が安定するまで静置した。その後、ルシャテリエフラスコに試薬石膏を入れた後、再度、室温20℃の恒温室内で鉱油の温度が安定するまで静置（概ね24時間）し、鉱油の液面の目盛を測定した。続いて、土粒子の密度試験において脱気方法の1つとして利用されている超音波洗浄機（アズワン（株）製、USD-1R、発振方法：他励発振方式、周波数：28kHz、40kHz）を用いて、空気抜きを行った。超音波処理時間は、15秒、30秒、1分、2分、3分、5分および10分の7種類とした。超音波処理後、5分間振動を加えて空気の除去を行って一旦フラスコを水槽中に入れてそのままの状態ですら約1日間静置してから鉱油の液面の目盛を読み、再び超音波処理を繰り返して行い、合計5回の超音波処理を行った。

なお、セメントの密度試験に準拠した方法では、試験に用いるセメント量は100gであるが、石膏の密度は、例えば普通ポルトランドセメントの密度よりも小さいことから、試料の量を85gに調整した。

2. 加熱空気流中での再生石膏の乾燥特性の研究

(研究計画の概略)

現場で、再生半水石膏を地盤改良材として利用する際、半水石膏が不完全な“生焼け石膏”の状態であることが問題となっており、半水石膏の所定の品質確保に至っていない。これは、廃石膏ボード由来二水石膏を半水石膏へ転換する既存装置では、再生石膏の混合および加熱空気との熱接触に不均一が生じ、現状では再生二水石膏を完全に半水石膏に転換できていないためであると考えられる。

そこで、本研究では実際の加熱装置で廃石膏の焼きむらの原因になると考えられる、廃石膏加熱時の(1)質量の影響、(2)粒子径の影響および(3)加熱空気流の影響を調査し、廃石膏由来二水石膏の半水石膏転換特性の評価を行い、再生石膏の新たな加熱処理システムの設計開発につながる知見を得ることを目的とした。本研究では、3種類の粒度にふるい分けした二水石膏を恒温乾燥炉と加熱透過試験機で加熱試験を行い、両者から得られた石膏の乾燥特性の結果を報告する。

(研究手法の概略)

本研究では比較的短時間かつ簡単な操作で二水石膏の半水石膏転換の評価が可能である加熱法を用いることにした。この方法は加熱時の任意の温度で生じる石膏の形態変化、すなわち、石膏の質量の変化量から石膏の含有量を推定することが可能である。

Table 1 Experimental condition of particle

二水石膏	粒子径 d_p (μm)	初期質量 M_{pi} (g)
粒子A	75~125	
粒子B	250~425	

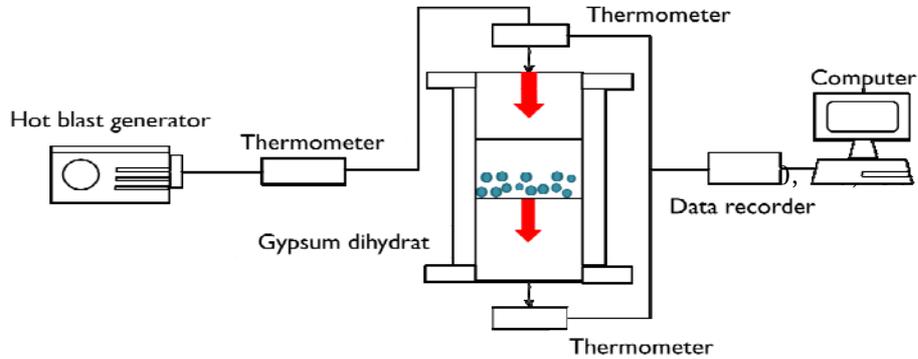


Fig.1 Experimental device of the heat air flow

粒子C	850~2000	
-----	----------	--

ここで、二水石膏 ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) を加熱すると、結晶水の分子全体の3/2を失って、半水石膏 ($\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$) へと変化するので二水石膏から84.3%の半水石膏が生成される計算となる。この計算結果と二水石膏を加熱した際の石膏の質量を比較することで、全ての二水石膏が半水化できているかを調べることができる。

次に、本研究では二水石膏の半水石膏への転換に対する粒子径や質量の影響を調査する。**Table 1**に実験で使用した二水石膏の粒子径 d_p と初期質量 M_p を示す。ここで、二水石膏は表のようにJISステンレス製の標準ふるいを使用して d_p を75~125 μm 、250~425 μm 、850~2000 μm の3種類の粒度に分けた。

以下では、表記を簡略化するため、順に粒子A、粒子B、粒子Cと称する。さらに、廃石膏の初期質量を10g、20g、30gに変化した。ただし、後述する加熱透過試験では $M_{pi}=10\text{g}$ のみで実験を行った。

恒温乾燥炉による加熱試験

任意の加熱温度での二水石膏の半水石膏への転換特性を、恒温乾燥炉を用いた加熱実験で調査した。本実験では加熱温度、石膏の初期質量と粒子径を変化させた。

加熱試験は、まず、各粒子径での二水石膏の質量 $M_{pi}=10\sim 30\text{g}$ をそれぞれ正確に計量し、直径60mm、高さ30mmのステンレス製容器に入れた。次に、この容器を恒温乾燥炉の中に静置し、加熱温度110 $^{\circ}\text{C}$ 、130 $^{\circ}\text{C}$ 、150 $^{\circ}\text{C}$ でそれぞれ加熱時間を変化させて加熱した。加熱終了後にデシケータ内で室温にいたるまで30分間冷ましてから、電子天秤を用いて加熱後の質量 M_{ph} を測定した。

加熱透過試験

二水石膏の半水石膏への転換に対する加熱空気流の影響を調べるために加熱空気による透

過試験を行った。Fig.1に加熱透過試験装置の概略を示す。

試験装置は加熱源に熱風発生機を使用し、ステンレス配管を通して加熱空気を二水石膏の加熱試験部へ導いた。試験部はステンレス配管とふるいを用いて製作し、二水石膏を静置させた状態で加熱空気流を透過させることが可能になっている。ここで、熱風発生機出口部で温度設定が可能であるが、ステンレス配管を通過した際に熱風の温度が低下することを考慮し、ステンレス配管に断熱材を巻いた。そして試験装置入口部と試験装置出口部に熱電対を設置して熱風の温度を測定した。本実験では試験装置入口部の温度 T_{in} が、 110°C 、 130°C 、 150°C になるように設定した。

実験は熱風発生機より発生した加熱空気を二水石膏に透過させることで二水石膏を加熱して半水化させる。本実験でも加熱後に取り出した石膏をデシケータで30分冷ました後に精密電子秤で加熱後の質量 M_{ph} を測定した。また、使用粒子は恒温乾燥炉の実験と同様にTable 1の粒度A、B、Cの三種類の石膏である。

1. 迅速密度測定法の研究

迅速密度測定法から得られた知見

Fig.2に超音波処理条件として周波数28kHz、処理時間15秒の場合の超音波処理回数と密度との関係を示す。図より、超音波処理回数が1回の場合、密度のばらつきが大きいことがわかる。しかしながら、超音波処理回数が2回になると密度の差がほとんどなく、その後、超音波処理回数を増やしても密度に大きな変化が認められなかった。

Fig.3に超音波処理条件として周波数28kHz、処理時間1分の場合の超音波処理回数と密度との関係を示す。図より、超音波処理回数が1回の場合、密度のばらつきがほとんどなく、さらに超音波処理回数を増やしても密度の値の変動はなく、ほぼ一定の値を示していることになる。なお、処理時間が3分よりも長くなると、密度のばらつきが大きくなったり変動が大きくなったりすることから、最適な超音波処理時間が存在するようであり、今回の実験からは30秒～2分が妥当であると判断できる。

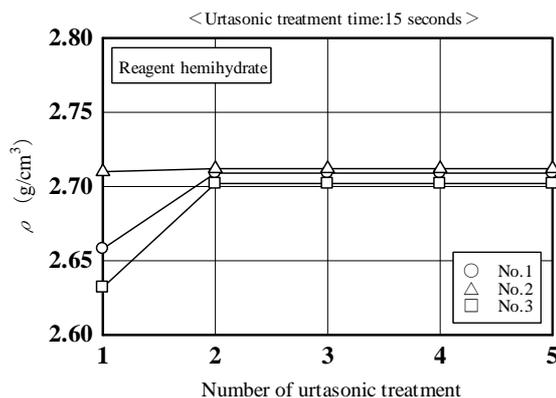


Fig.2 Relationship between the number of urtasonic treatment and the particles density with reagent hemihydrate(treatments time: 15 seconds)

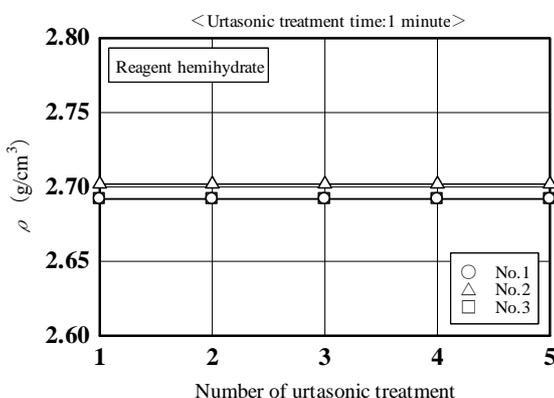


Fig.3 Relationship between the number of urtasonic treatment and the particles density with reagent hemihydrate(treatments time: 1minute)

迅速密度測定法の研究のまとめ

本研究では、再生石膏を主として地盤改良材として利用する観点から、再生石膏の簡易な品質判定法として密度に着目した半水石膏含有率を求める方法の有効性をより高めるために、迅速密度測定法について検討を行った。以下に得られた結果を列挙する。

- (1)超音波処理条件として周波数28kHz、処理時間1分とした場合、超音波処理回数が1回で密度のばらつきがほとんどなく、超音波処理回数が2回以降、密度の値の変動はない。
- (2)最適な超音波処理時間が存在し、30秒～2分が妥当である。
- (3)超音波洗浄機を用いることによって迅速に密度の測定を行うことが可能となり、「密度法を用いた半水石膏含有率推定法」により半水石膏含有率の評価が可能である。

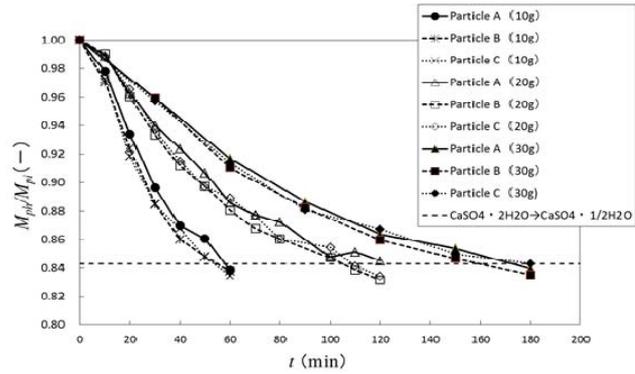


Fig.4 Relations with the heating time and the mass ratio as the heating temperature is 130°C

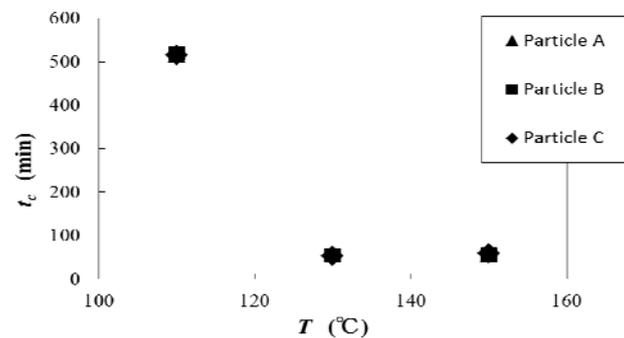


Fig.5 Relationship between the time of the change in hemihydrate of gypsum and the heating time using the drying furnace

2. 加熱空気流中での再生石膏の乾燥特性の研究

恒温乾燥炉による加熱試験から得られた知見

Fig.4に二水石膏の加熱前後の質量割合 M_{ph}/M_{pi} と加熱時間 t との関係を示す。ここで、加熱温度 $T=130^{\circ}\text{C}$ 、質量 $M_{pi}=10\sim 30\text{g}$ であり、図中の破線は二水石膏が半水石膏に転換する質量を表している。

図より、加熱時間の増加とともに二水石膏の質量は徐々に減少して半水石膏へ転換することがわかる。また、初期質量が増加すると二水石膏が半水石膏へ転換する時間が長くなることが確認できる。一方、粒子径による変化はほとんど見られない結果が得られた。

Fig.5に粒度A～Cの二水石膏が半水石膏に転換する時間 t_c と加熱温度 T との関係を示す。図より、加熱温度が 130°C と 150°C の条件では半水化に必要な時間が54～58分であることが確認された。これに対して、加熱温度が 110°C の条件では二水石膏が半水石膏へ転換するために520分の時間がかかっている。このことから、短時間で二水石膏を半水石膏へ転換させるためには $130\sim 150^{\circ}\text{C}$ の加熱温度が必要ではないかと考えられる。一方、粒子径の変化による加熱温度と半水化時間の変化は見られなかった。

加熱透過試験から得られた知見

Fig.6に試験装置入口部の温度 $T_{in}=150^{\circ}\text{C}$ に設定した場合の二水石膏の加熱後の質量割合 M_{ph}/M_{pi} と加熱時間 t との関係を示す。ここで、石膏の初期質量 $M_{pi}=10\text{g}$ であり、図中の破線は半水石膏への転換質量を表す。図より、石膏の質量割合は加熱時間の増加とともに減少する傾

向を示す。また、粒度A（小粒子）から粒度C（大粒子）へと粒子径が大きくなると質量割合の傾きが大きくなる。さらに、図からわかるように粒子径が大きい粒度Cで二水石膏が半水石膏へ転換する時間 t が最も早く、粒度B、粒度Aと粒子径が小さくなると半水化に要する時間が2~36分へと長くなることがわかった。この結果は加熱時間が150℃の条件だけではなく、130℃、110℃の時も同様の傾向が確認された。

Fig.7に各粒子径ごとの半水化時間 t_c と試験装置入口部の温度 T_{in} との関係を示す。図より、各温度で半水化は出来ているが加熱温度が高いほど半水化に達する時間が早いことがわかる。また、同一の加熱温度で見ると粒子径が大きい粒度Cで半水化時間が大きく減少することが確認できた。

さらに、粒度Cは加熱温度が110℃と150℃の半水化時間に大きな変化が見られなかったが、粒度Aは110℃と150℃では半水化時間に変化が見られた。このように、加熱透過試験結果から加熱空気流と粒子径が二水石膏の半水化に大きく影響していることがわかった。

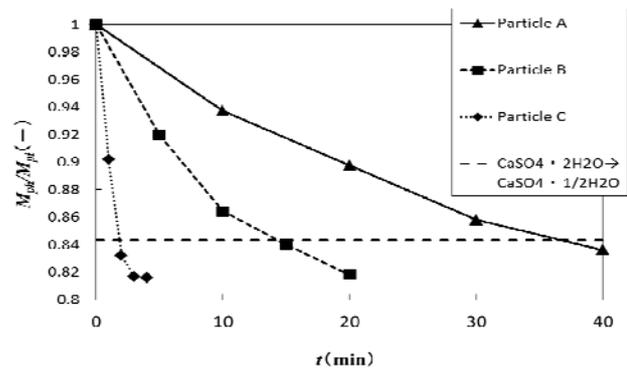


Fig.6 Relations with the heating time and the mass ratio as the heating temperature is 150℃

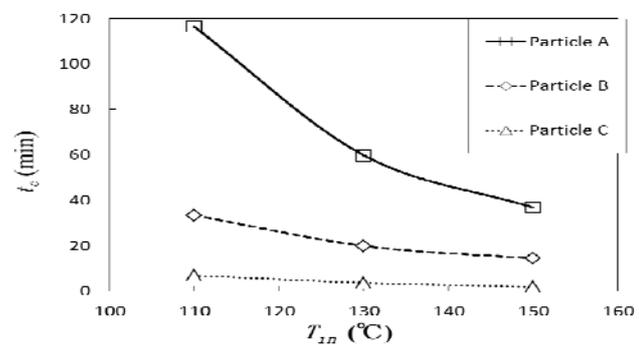


Fig.7 Relationship between the time of the change in hemihydrate of gypsum and the heating time using the heat air flow

加熱空気流中での再生石膏の乾燥特性の研究のまとめ

廃石膏の焼きむらの原因と考えられる因子を調べるために、廃石膏ボード由来再生二水石膏の加熱試験を行った結果を以下に示す。

- (1) 恒温乾燥炉による実験結果から質量が増加すると加熱時間も増加する。
- (2) 恒温乾燥炉実験では粒子径の大きさは半水化に関係していなかったが、加熱透過試験では粒子径による変化が見られた。このことから加熱空気中で二水石膏をハンドリングする際に粒子径の大きさが影響すると考えられる。
- (3) 恒温乾燥炉実験では初期質量が10gの二水石膏を半水石膏に転換するために最も短くても50分以上掛かっているのに対し、加熱透過試験では最も早いものが2分で半水化している。この結果より二水石膏を効率よく半水化させるためには、加熱空気流が大きく影響する。
- (4) 上記(1)~(3)の結果より二水石膏を半水化させるためには、質量、粒子径、加熱空気流の3つの因子が非常に重要であることが判明し、半水石膏の品質を向上させるための再生石膏の新たな加熱処理システムには、これらの因子を制御可能な乾燥装置の開発が必要であるといえる。

(発 表 論 文)

- (1) 松尾悠平, 藤井 楓, 佐野博昭, 尾形公一郎, 川原秀夫: 廃石膏ボード由来再生石膏の迅速密度測定法, 平成27年度土木学会西部支部研究発表会講演概要集, (2015) (発表予定)
- (2) 猪原健史, 尾形公一郎, 佐野博昭, 川原秀夫: 廃石膏粉体の乾燥特性に関する研究, 混相流シンポジウム2015講演論文集, (2015) (発表予定)