

廃石膏ボード粉から再生された石膏の基本的性状と 密度を用いた品質管理法に関する一考察

A STUDY ON FUNDAMENTAL PROPERTIES AND QUALITY CONTROL METHOD
BY USING DENSITY OF GYPSUM AND BASSANITE RECYCLED
FROM CRUSHED WASTE PLASTERBOARD

佐野博昭*・山田幹雄**・吉武 篤***・渡邊洋三****

by Hiroaki SANŌ, Mikio YAMADA, Atushi YOSHITAKE and Youzou WATANABE

1. まえがき

石膏ボードは、1895年アメリカのAugustine Sackettによって発明されたSackett Boardを改良し、1902年に工業的に生産されるようになった建築材料で、日本では1921年に製造が開始された¹⁾。石膏ボードは、他の建築材料と比較して経済的であり、約21%に相当する結晶水が含まれていることから防・耐火性にも優れており¹⁾、切断の容易さ、施工の簡便さとあいまって建築内装材として広く利用されている。

石膏ボード生産量の増加にともなう、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。高度経済成長期に大量に建てられた建築物が近年になって解体時期を迎えているため、それらの壁や天井の下地材に用いられた石膏ボードも廃材として排出されている。(社)石膏ボード工業会によれば、廃石膏ボードの年間総排出量は、2038年には2,969千トンに達すると推計されている¹⁾。しかしながら、建築現場から発生する廃石膏ボードについては大部分が埋立処分されているのが現状である。さらに、廃石膏ボードは2006年6月以降管理型産業廃棄物として取り扱われており、その処理費用は今後増大するものと考えられる。

こうした現状の中、わが国ではリサイクルなど廃石膏ボードを廃棄物化させない処理方法の開発が急務となっている。そのひとつとして、石膏を一度に大量に消費することのできる土木分野での有効利用が注目されている。蓬萊ら²⁾は、石膏の適用先を地盤改良材に求め、半水石膏生産システムを開発するとともに、半水石膏の地盤改良材としての有効性を報告している。

今後、廃石膏ボード粉から再生された石膏のより一層の有効利用を促進するためには再生石膏の基本

*大分工業高等専門学校 教授 都市システム工学科 (〒870-0152 大分市大字牧1666番地), **福井工業高等専門学校 教授 環境都市工学科, ***有限会社 ダイソー環境開発 代表取締役, ****株式会社 大総 工事部長

的性状と品質管理法を検討しておく必要がある。

そこで、本研究では、再生石膏の基本的性状として加熱特性や物理・化学的特性を調べるとともに、密度に着目した新たな品質管理法を提案することとした。さらに、この品質管理法を既存のロータリーキルン炉で再生した石膏に適用し、その有効性について検討してみることにした。

2. 再生石膏の基本的性状

(1) 加熱にともなう再生石膏の形態変化

著者ら^{3),4)}は、これまでに廃石膏ボード粉から再生された石膏の地盤改良材としての適用性を検討するために一軸圧縮試験を行い、再生半水石膏を混合することによって改良土の一軸圧縮強さが増加すること、供試体作製直後は再生半水石膏を用いた方が再生二水石膏を用いた場合よりも大きな強度を示すが、養生28日では二水石膏混合土の強度は半水石膏のそれとほぼ同程度となることなどを報告してきた。

ここで、半水石膏や無水石膏を地盤改良材として用いるためには、二水石膏や半水石膏を所定の温度で加熱処理する必要がある。また、地盤改良材としての適用性を検討するために土質試験を行う際には種々の加熱操作が必要不可欠である。

土質試験の一例として、地盤工学会基準⁵⁾に準拠した土の含水比試験や土粒子の密度試験が挙げられ、これらの試験に際しては、炉乾燥温度110℃で一定質量になるまで炉乾燥する操作が必要となり、一定質量になるまでの時間は一般に18~24時間程度とされている。

通常、二水石膏は130~150℃の温度で半水石膏へ、さらに200℃で無水石膏へと形態が変化するとされている。そのため、土質試験に際して110℃で加熱操作を行った場合、二水石膏中の水分の一部が蒸発し、半水石膏や無水石膏へと形態が移行してしまうことが懸念される。

そこで、以下では、石膏の水分量に着目し、加熱試験により石膏を異なる温度で炉乾燥させたときの

質量の変化, すなわち水分量の変化を測定し, 石膏の形態の推移を石膏の化学式を考慮に入れて計算した質量から検討してみることにした。

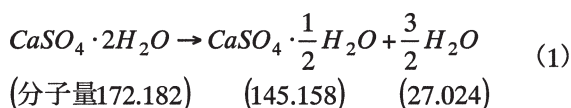
実験には, 大分市内の産業廃棄物中間処理施設に搬入され, 倉庫内に山積みされた廃石膏ボードを破砕機によって粉砕し, ボード用原紙を分離したものをを用いた。本論文では, 廃石膏ボード由来の二水石膏を「再生二水石膏」, 「再生二水石膏」を加熱処理して製造した半水石膏, 無水石膏をそれぞれ「再生半水石膏」「再生無水石膏」と称することにす。

破砕機の性能上, 再生二水石膏は最大粒径2.5mmの粒状となるので, これをふるい分けして0.85mmふるい通過分を試験に用いた。

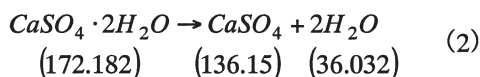
加熱試験の具体的な方法としては, 試料を室温状態で正確に10g計量し, 直径6cm, 高さ3cmのステンレス製容器に入れた。この際, 乾燥しやすいようにできるだけ薄く広げた。次に, この容器を恒温乾燥炉(ヤマト科学(株)製, DX601)の中に静置, 温度を40~160℃まで10℃間隔で調整し, 所定の温度で24時間加熱した。加熱終了後デシケータ内で室温にいたるまで冷ましてから, 質量を測定した。なお, JIS R 9101:1995⁶⁾に規定された石膏の水分量測定温度45℃も設定温度に加えることにした。また, 加熱試験はデータのばらつきを考慮に入れて各温度6つの試料に対して行った。

ここで, 二水石膏と半水石膏を加熱したときに所定の温度領域で以下の化学反応式に示す形態の変化が生じるとされている⁷⁾。なお, 化学式には分子量も併記してある(H=1.008, O=16.00, S=32.07, Ca=40.08)。

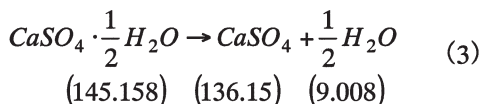
(1) 二水石膏から半水石膏へ



(2) 二水石膏から無水石膏へ



(3) 半水石膏から無水石膏へ



上式(1)~(3)を基にして, 二水石膏10gから生成される半水石膏の質量を計算すると8.43gとなり, 同様にして, 無水石膏は7.91g, 半水石膏10gから無水石膏9.38gが生成されることになる。

図1は, 加熱温度と再生石膏の質量との関係を示す。併せて, 図中に式(1)~(3)から求められた質量

の結果を一点鎖線で示す。

図より, 加熱温度の上昇にともなって試料の質量は減少していることがわかる。ここで, 再生二水石膏(記号○)は80℃で質量が僅かに減少し始め, 90℃で急激に質量が減少し, 100℃で一旦変化がなくなるが, 110℃でさらに減少する傾向, すなわち2段階の質量変化を生じていることがわかる。また, 110℃以降は温度が上昇しても質量はほとんど変化しないことがわかる。

一方, 再生半水石膏(△)では, 110℃で質量が減少しており, その後は温度の上昇にともなう質量の減少は認められなかった。

上記の現象を式(1)~(3)から得られた質量による石膏の形態変化と併せて考察すると, 「再生二水石膏は90℃24時間加熱で再生半水石膏」に, 「再生半水石膏は110℃24時間加熱で再生無水石膏」になっている可能性が示唆されたことになる。

これより, 一般的に二水石膏は温度130~150℃で半水石膏へ, さらに200℃で無水石膏へと形態が変化することが報告されているが, 今回の実験から, それよりも低い温度領域で形態変化が生じている可能性が高いことが明らかとなった。

ところで, 図1の実験に用いた石膏は廃石膏ボード粉から再生された石膏であり, 何らかの不純物を含んでいる恐れがある。そこで, 図1の結果をより明確にするために, 次の段階として市販の試薬石膏を用いて同様の検討を行ってみることにした。

実験に用いた試薬は, 硫酸カルシウム二水和物(関東化学(株)試薬, 鹿1級, 含有量98.0%以上)と焼石膏(関東化学(株)試薬, 鹿1級, 含有量99.0%以上)である。以下では, 表記を簡略化するために, 「硫酸カルシウム二水和物」を「試薬二水石膏」, 「焼石膏」を「試薬半水石膏」と称する。

今回の加熱試験での設定温度は, 半水石膏が無水石膏に変化すると一般的に言われている温度200℃を考慮に入れて220℃まで10℃ずつ上昇させるものとし, それぞれの温度で24時間加熱することにした。

図2は, 加熱温度と試薬二水石膏, 試薬半水石膏の質量との関係を示す。図より, 試薬二水石膏(記号●)を加熱すると, 80℃で急激に質量の減少が始まり(第1段階), 100℃でさらに減少し(第2段階), その後は温度の上昇に対して質量の変化がほとんどないことがわかる。

ここで, 図1と同様に化学式(1)~(3)から推察すると, 第1段階は二水石膏10gが半水石膏8.43gになる過程, 第2段階は二水石膏10gが無水石膏7.91gになる過程にそれぞれ対応しており, このことから, 試薬二水石膏は「80℃24時間加熱で半水石膏」に,

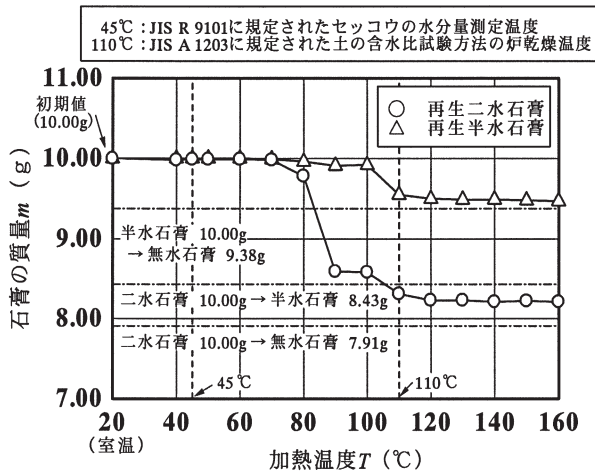


図1 加熱温度と石膏の質量との関係 (再生石膏の場合)

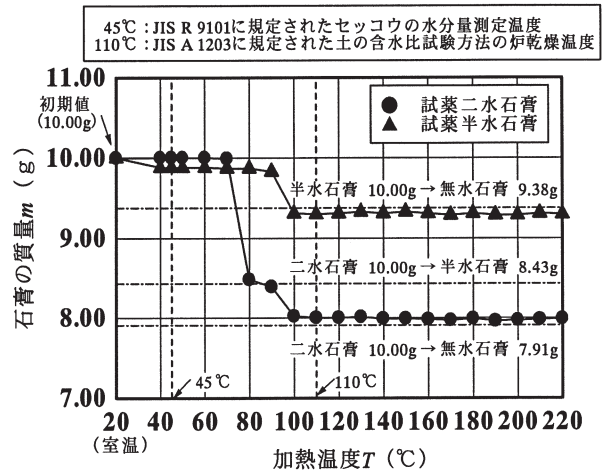


図2 加熱温度と石膏の質量との関係 (試薬石膏の場合)

「100℃24時間加熱で無水石膏」になっていることになる。

次に、試薬半水石膏(▲)に着目すると、100℃で急激に質量が減少しており、半水石膏10gが無水石膏9.38gになる過程と対応していることがわかる。また、この温度は、二水石膏が半水石膏に変化し、その後無水石膏に変化する温度とも一致していることになる。

つまり、「試薬二水石膏は80℃24時間加熱で半水石膏」に、「試薬半水石膏は100℃24時間加熱で無水石膏」になっている。

蓬萊ら²⁾は、石膏の質量と加熱温度との関係から、二水石膏を炉乾燥すると60℃程度から質量が急激に低下し、110℃を超えるとほぼ一定になると報告している。ただし、加熱時間についての記述は見当たらない。これより、60℃を超えると二水石膏から半水石膏に転化し始め、110℃以上において大部分が半水石膏に転化し終わっていると結論付けているが、この点については著者らとは異なる見解を示していることになる。

一方、先にも述べたように、今回の加熱試験は土質試験における含水比試験実施状況を参考にしたものであり、図1、図2の石膏の質量は加熱時間が24時間の結果を示している。しかしながら、これらの結果には加熱時間の長短による影響も含まれている可能性を否定できない。そこで、加熱時間の長短が石膏の形態変化に及ぼす影響を調べるために以下の実験を行った。

まず、試薬二水石膏を室温状態で正確に10g計量して容器に入れ、70℃の温度で24時間加熱して質量を測定し、この質量を初期値とした。次に、この容器を80℃に設定した恒温乾燥炉内で1、6、24時間加熱

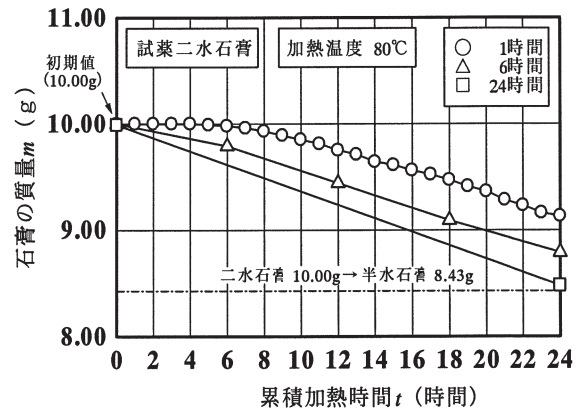


図3 累積加熱時間と石膏の質量との関係 (試薬二水石膏の場合)

し、加熱終了後デシケータ内で室温まで冷まし、質量の測定を行った。その後、この操作を繰り返し、累積加熱時間が24時間に達するまで加熱を行った。

図3は、試薬二水石膏の累積加熱時間と石膏の質量との関係を示す。併せて、図中に式(1)から求められた質量の結果を一点鎖線で示す。図より、試薬二水石膏を80℃で1~6時間加熱すると脱水現象は生じているものの完全に半水石膏には形態変化を生じていないことがわかる。

このことは、石膏の形態変化は加熱時の温度と時間によって決まるものであり、一概に温度のみで評価できないことを示唆するものである。

先にも述べたように、地盤工学の分野では、土の含水比を求める際には110℃で試料の乾燥質量が一定になるまで乾燥するとされており、一定質量になる目安の時間としては18~24時間程度となっていることから、石膏系安定処理土の含水比を求める際に

表1 再生石膏の基本的性状

石膏の種類		再生二水石膏	再生半水石膏
物理的性質			
水分*	45℃乾燥* (%)	0.1	0.0
	110℃乾燥** (%)	20.4	4.8
密度***	自然状態 (g/cm ³)	2.35	2.66
	45℃乾燥* (g/cm ³)	2.35	2.66
	110℃乾燥** (g/cm ³)	2.63	2.65
土粒子の密度** (g/cm ³)		3.02	—
液性限界 (%)		NP	—
塑性限界 (%)		NP	—
塑性指数		NP	—
砂分 (%)		99.5	100.0
シルト分 (%)		0.5	0.0
粘土分 (%)		0.0	0.0
均等係数		3.19	2.78
曲率係数		0.96	1.00
化学的性質			
pH(H ₂ O)*		7.0	6.8
pH(KCL)*		7.2	7.1
pH(H ₂ O)**		7.9	—
pH(KCL)**		7.7	8.2
電気伝導率** (mS/m)		202	—
強熱減量 (%)		3.4	2.0

*セッコウの化学分析方法, JIS R 9101:1995⁹⁾

**地盤材料試験の方法と解説⁵⁾

***セメントの物理試験方法, JIS R 5201:1997⁸⁾

は処理土中の石膏は無水石膏になっている可能性が高いことを十分に認識しておくことが重要となる。

(2) 再生石膏の物理・化学的特性

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)⁹⁾」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。

今回、石膏を地盤工学的材料として利用するために基本的性状を把握するに当たっては、「セッコウの化学分析方法 (JIS R 9101:1995)⁹⁾」と「地盤工学会基準⁵⁾」の両者を併せて検討する必要がある。

以下に試験を行うに当たって注意を要する項目として、「水分」「pH」「密度」の3つを挙げ、それぞれの測定方法について簡単に述べる。

a) 水分

天然セッコウおよび化学セッコウ、焼セッコウでは水分の定量方法として、「試料を45℃で恒量となるまで乾燥したときの減量をはかり、水分の付着率を求める⁹⁾」となっている。なお、水分の付着率は次式 (4) によって計算される⁹⁾。

$$\text{水分の付着率 } f.w. = \frac{m}{s} \times 100 \quad (4)$$

ここに、m: 減量 (g), s: 試料の質量 (g)

b) pH

pH試験では、液固比が地盤工学会基準では5mL/gであるのに対して、セッコウの化学分析方法では20mL/gとなっていることや試料を懸濁液状態にしてからの測定時間および試料の状態についての規定などが大きな違いとなっている。

c) 密度

土粒子の密度を求めるためには、通常、ピクノメーター⁹⁾が用いられているが、ここでは、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⁸⁾」に準拠して試験を行ってみることにした。

表1は、再生石膏の基本的性状を示す。まず、水分は、半水石膏では110℃乾燥によって4.8%含有されていることになる。また、二水石膏を材料として用いるに当たっては、110℃乾燥させると半水および無水石膏化してしまうことより含水比、水分量の評価については注意を要する。

次に、土粒子部分の質量を求めるに当たっては110℃の炉乾燥が行われるが、先の石膏の加熱試験で述べたように、石膏では水分量を求める際の乾燥温度が異なる。このため、セメントの密度試験⁸⁾により求めることとし、試料としては自然状態、45℃乾燥状態、110℃乾燥状態の3つの方法に対して試験を行ってみることにした。

再生二水石膏、再生半水石膏ともに自然状態と45℃乾燥では2.35g/cm³、2.66g/cm³となり、状態の違いによらずほぼ同じ値が得られた。一方、110℃乾燥を行うと、再生二水石膏2.63g/cm³、再生半水石膏2.65g/cm³となり、再生二水石膏は再生半水石膏になっていることになる。

土質試験法に準拠して求めた土粒子の密度に着目すると、3.02g/cm³となり、無水和物の密度 (2.96g/mL, 20℃)⁹⁾に近い値となっている。参考までに、関東化学株式会社・試薬 (鹿1級) の安全データシート¹⁰⁾においては、硫酸カルシウム二水和物 (含有量98.0%以上) の密度: 2.32g/cm³ (20℃) となっている。

pHは、セッコウの化学分析方法では7.0、土質試験

法では7.9となり、石膏はほぼ中性の材料であることがわかる。

以上の結果より、石膏の基本的性状を求めるに当たって、試験の方法や試料の状態によって得られる結果が大きく異なることが明らかとなった。このことは、今後、石膏の基本的性状を求める際に用いた試験の方法や試料の準備方法を明記することが必要となるであろう。

3. 密度を用いた再生石膏の品質管理法の提案

二水石膏、半水石膏、無水石膏の量を定量的に求めるためにはX線回折分析などが有効であるが、この分析機器は非常に高価であり、また、取り扱いに際しても高度な知識を必要とするとともに熟練を要する。このため、必要に応じて外部の機関に分析を依頼すると、分析に要する費用、結果を得るまでの期間に不利な面がある。

先にも述べたように、石膏の形態によって基本的性状は異なるが、物理的指標のひとつである密度が石膏の形態によって大きく異なっており、これを管理指標のひとつに使うことが可能であると推察される。そこで、以下では、密度の値から石膏の量を推定する方法について検討してみることにした。

通常、廃石膏ボード粉から再生された石膏の中には二水石膏、半水石膏、無水石膏が混在しているが、以下では、計算条件を単純化するために二水石膏と半水石膏のみが存在していると仮定する。

ここで、二水石膏の密度を ρ_G 、半水石膏の密度を ρ_B とし、加熱された廃石膏ボード粉中に二水石膏と半水石膏がG:B (G+B=10) の割合で混在していたとすると、この試料の密度 $\rho_{(G+B)}$ は次式で表される。なお、 m_s は土粒子の質量、 V_s は土粒子の体積を表す。

$$\rho_{(G+B)} = \frac{m_s(G+B)}{V_s(G+B)} = \frac{m_{sG} + m_{sB}}{V_{sG} + V_{sB}} \quad (5)$$

ここで、二水石膏の密度 ρ_G 、半水石膏の密度 ρ_B は、その定義より、次式で表される。

$$\rho_G = \frac{m_{sG}}{V_{sG}}, \quad \rho_B = \frac{m_{sB}}{V_{sB}} \quad (6)$$

式(6)より、

$$V_{sG} = \frac{m_{sG}}{\rho_G}, V_{sB} = \frac{m_{sB}}{\rho_B} \quad (7)$$

式(7)を式(5)に代入すると、

$$\rho_{(G+B)} = \frac{m_{sG} + m_{sB}}{\frac{m_{sG}}{\rho_G} + \frac{m_{sB}}{\rho_B}} \quad (8)$$

が得られ、 $m_{sG} : m_{sB} = G : B$ より、 $m_{sG} = m_{sB} \frac{G}{B}$ となり、これを式(8)に代入すると、

$$\rho_{(G+B)} = \frac{\frac{m_{sB}}{B} \frac{G}{\rho_G} + m_{sB}}{\frac{m_{sB}}{B} \frac{G}{\rho_G} + \frac{m_{sB}}{\rho_B}} \quad (9)$$

が得られ、これを整理してBおよびGを求めると、次式(10)、(11)が得られる。

$$B = 10 \frac{\rho_B \rho_{(G+B)} - \rho_G}{\rho_{(G+B)} \rho_B - \rho_G} \quad (10)$$

$$G = 10 - B \quad (11)$$

すなわち、事前に二水石膏の密度 ρ_G と半水石膏の密度 ρ_B を求めておき、さらに、所定の条件下で加熱された廃石膏ボード粉の密度 $\rho_{(G+B)}$ を求めたとすると、式(10)、(11)より、加熱された廃石膏ボード粉中の二水石膏と半水石膏の割合G:Bを計算により求めることができ、廃石膏ボード粉中に含まれている半水石膏や二水石膏の量を推定することが可能となる。

先にも述べたように、この方法は、廃石膏ボード粉中に二水石膏と半水石膏のみが含まれているという仮定のもとで導出された式であり、廃石膏ボード粉中にさらに無水石膏が含まれている場合に適用できないことになる。

そこで、次の段階として、二水石膏、半水石膏、無水石膏が含まれていると仮定した場合の式を誘導してみることにした。

なお、二水石膏、半水石膏、無水石膏が含まれた場合の推定式も上記と同様の考え方により導出できるが、今回は紙面の都合により誘導過程は割愛するものとし、以下に得られた式のみを示す。

無水石膏の密度を ρ_A とし、二水石膏と半水石膏と無水石膏が配合割合G:B:A (G+B+A=10)で混合していたと仮定すると、次式(12)、(13)が求められる。

$$B = 10 \frac{\rho_B \rho_{(G+B+A)} - \rho_G}{\rho_{(G+B+A)} \rho_B - \rho_G} + A \frac{\rho_B \rho_G - \rho_A}{\rho_A \rho_B - \rho_G} \quad (12)$$

$$G = 10 - B - A \quad (13)$$

上記の方法が適用可能であるかどうかを実験的に検討するために、二水石膏と半水石膏を所定の割合(0:10~10:0の6種類)で混合した試料の密度を実験と計算により求めてみることにした。なお、計算に

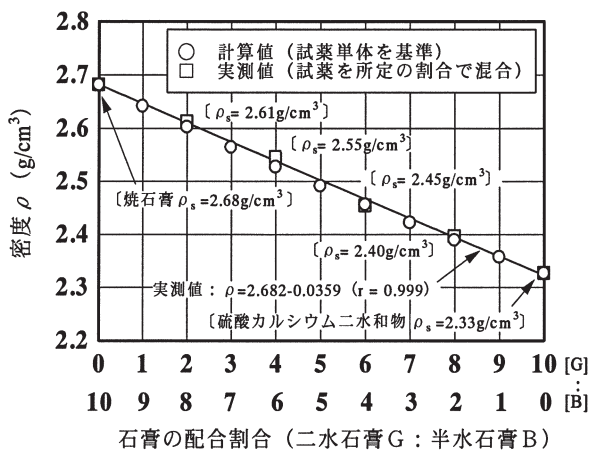


図4 石膏の配合割合と密度との関係

当たっては、セメントの密度試験に準拠した方法により求めた密度（試薬二水石膏 2.33g/cm^3 、試薬半水石膏 2.68g/cm^3 ）を用いた。

図4は、石膏の配合割合（二水石膏G:半水石膏B）と密度との関係を示す。図より、実験により求めた密度の値（記号□）と計算により求めた値（○）とはほぼ一致しており、このことより、先に示した計算式（10）、（11）によって密度を推定することは十分に可能であると考えられる。

4. 既存のロータリーキルン炉を用いた廃石膏ボード粉の再生化技術の検討

前章までに用いた再生石膏は、大分市内の中間処理施設に搬入して破砕した廃石膏ボード粉（再生二水石膏）を長崎県諫早市に設置されている加熱装置を用いて半水化したものであった。この理由としては、現時点で大分市内の中間処理施設に二水石膏を加熱して半水石膏を製造する施設がなかったことによるものである。

ここで、中間処理施設には多くの企業が焼却炉を設置していることより、この既存の炉を用いて二水石膏から半水石膏が製造できるかどうかを検討することは増え続ける廃石膏ボードの有効利用技術の開発において重要な課題であるといえる。

そこで、本研究では、既存の加熱装置（ロータリーキルン炉、直径1m、長さ6m、勾配1.7%、最高加熱温度 900°C ）を用いて廃石膏ボード粉の再生化に取り組むことにした。

当該中間処理施設では、通常、ロータリーキルン炉を木材チップの炭化炉として用いており、キルン外側鉄皮温度が約 630°C の高温で燃焼している。炉内の温度調整を行うためには、炉内の入口側のバーナーの温度を制御することによって温度が計測され、

表2 ロータリーキルン炉で加熱した再生石膏の密度および推定石膏含有率

加熱温度 ($^\circ\text{C}$)	回転速度 (Hz)	密度 (g/cm^3)	推定石膏含有率(%)	
			二水石膏	半水石膏
140	30	2.61	17.8	82.2
	40	2.65	8.7	91.3
	50	2.65	8.2	91.8
150	30	2.63	13.2	86.8
	40	2.60	19.4	80.6
160	30	2.63	12.7	87.3
	40	2.61	17.8	82.2
	50	2.63	12.7	87.3
170	30	2.63	13.0	87.0
	40	2.62	14.2	85.8

この計測温度をもとにバーナーの温度を再調整することによって炉内の温度を所定の温度に収めている。

先にも述べたように、石膏は、加熱温度によって結晶水の量が異なり、それにもよって石膏の形態が異なることから、加熱時の温度管理が非常に重要な要因となる。しかしながら、通常、ロータリーキルン炉内の温度分布状況は測定されていないので、炉内の温度分布を測定する装置の設置を要する。

そこで、温度管理が可能となるように既存のロータリーキルン炉に改良を加えてみることにした。

まず、炉内の温度を計測するために熱電対を4箇所固定した。ここで、熱電対は、被覆熱電対DP型（三光電気工業（株）製、+脚：クロメル、-脚：アルメル）を用い、炉壁に固定したパイプの中にケーブルを通し、ロータリーコネクタを通じて炉内から取り出すことにした。なお、4個の熱電対により計測された温度は記録計（（株）キーエンス製、TR-V500）に連続的に入力した。

このように改良を加えたロータリーキルン炉を用いて異なる温度条件下で予備実験を繰り返し、石膏の最適再生条件を模索してやることにした。

1回当たりにロータリーキルン炉内に投入する再生二水石膏の量は約5kg程度とし、キルンの加熱温度を $140\sim 170^\circ\text{C}$ 、回転速度は $30\sim 50\text{Hz}$ とした。ここで、加熱温度と回転速度は、前出図1、図2で示した加熱試験およびキルンを用いた予備試験の結果を参考にして設定した。なお、加熱温度は、炉内で再生二水石膏が転動することによって高温状態に接する時間が短いことなどを考慮に入れて高めの温度とした。

約5kgの再生二水石膏を炉に投入し、出口から再生半水石膏の排出が開始されるまでの所要時間は5~9分、排出の終了までに12~29分の計17~38分を要した。

今回の予備実験は、加熱温度や回転速度を組み合わせてることによって二水石膏を半水石膏化することになり、加熱された石膏の中に含まれる二水石膏や無水石膏の割合をできるだけ小さくすることにある。ここで、先に提案した再生石膏の密度から、二水石膏と半水石膏の比を計算により求める式(10)、(11)を用いることとした。なお、石膏の密度はセメントの密度試験に準拠した方法で行った。

表2は、ロータリーキルン炉で加熱した再生石膏の密度および推定石膏含有率を示す。ここで、加熱温度とはロータリーキルン炉の設定温度を示す。

表より、測定された密度は、 $2.60\sim 2.65\text{g/cm}^3$ にあり、いずれも半水石膏の密度である 2.68g/cm^3 にほぼ近い結果が得られたことになる。密度の結果から石膏含有率を計算すると、二水石膏含有率 $8.2\sim 19.4\%$ 、半水石膏含有率 $80.6\sim 91.8\%$ となった。

ここで、表2の結果より得られた半水石膏化率の高い条件（加熱温度： 140°C 、回転速度： 50Hz ）から得られた石膏についてX線回折分析を行い、計算により求めた半水石膏化率と比較した。

X線回折結果（走査範囲 $2\theta=5\sim 25^\circ$ ）より、二水石膏のピーク（ $2\theta=11.6^\circ$ ）と半水石膏のピーク（ $2\theta=14.7^\circ$ ）の面積を比較したところ、 $12111\text{deg}\cdot\text{cps}$ と $80817\text{deg}\cdot\text{cps}$ となり、これより二水石膏が 13.0% 、半水石膏が 87.0% 含有されていることになり、計算で求めた二水石膏の含有率 8.2% 、半水石膏 91.8% と比較すると、概ね同様の結果が得られたことになる。なお、今回は $2\theta=5\sim 25^\circ$ における検証であったが、 2θ が 25° 以上においても二水石膏や半水石膏および無水石膏のピークが存在するため、今後は走査範囲 2θ をさらに広げて詳細な検討を行う必要がある。

これより、密度を用いた石膏含有率の推定手法の妥当性がある程度確認されたものと考えられる。

以上の結果より、密度から半水石膏化率をある程度評価することが可能となった。また、X線回折の結果からもこれを裏付けることができた。これより、今回用いた既存のロータリーキルン炉に対して半水石膏を生成する上での最適な加熱条件（加熱温度 140°C 、回転速度 50Hz ）が設定できたことになる。

一方、今回提案した密度を用いた品質管理法を適用するに当たっては、通常品質管理においては密度を指標として用い、さらに、定期的にX線回折分析による管理を行うことによって一定品質の再生石膏を安定的に供給することが可能となるであろう。

5. まとめ

本研究では、再生石膏の基本的性状を述べるとともに、その中で密度に着目した新たな品質管理法を

提案し、さらに、ロータリーキルンで再生二水石膏を加熱して得られた再生半水石膏に対しての適用事例について検討を行った。本研究により得られた主要な結果を以下に列挙する。

(1) 加熱温度と質量との関係より、二水石膏は $80\sim 90^\circ\text{C}$ で半水石膏へ、さらに、 $100\sim 110^\circ\text{C}$ で無水石膏へと形態変化が生じる。

(2) 石膏の密度を求めるに当たっては、セメントの密度試験が有効であり、試料の乾燥状態によって結果が異なる。

(3) 密度を用いた石膏含有率の推定手法の妥当性が確認され、再生石膏の品質管理法のひとつとして有効である。

謝 辞

本研究を遂行するに当たり、新日鐵高炉セメント（株）九州支店・本田欣也氏には貴重なご助言をいただいた。また、各種の室内試験および結果の整理には大分工業高等専門学校 専攻科 機械・環境システム工学専攻修了生・岡野寛雄氏（現・熊本大学大学院）ならびに都市システム工学科 卒業生・三浦望氏（現・小野田ケミコ（株））のご協力をいただいた。ここに、深甚なる謝意を表す。

本研究の一部は、平成20年度大分県循環型環境産業創出事業費の補助を受けて実施した。

参考文献

- (1) (社)石膏ボード工業会：<http://www.gypsumboard-a.or.jp>
- (2) 蓬萊秀人, 亀井健史, 小川靖弘, 志比利秀：半水石膏生産システムの開発とその地盤工学的意義-廃石膏ボードの再生-, 地盤工学ジャーナル, Vol.3, No.2, pp.133-142 (2008)
- (3) 岡野寛雄, 佐野博昭, 吉武 篤, 渡邊洋三, 山田幹雄：廃石膏ボード粉から再生された石膏の地盤改良材としての適用性について, 土木学会第64回年次学術講演会講演概要集, III-236, pp.471-472 (2009)
- (4) 岡野寛雄, 佐野博昭, 吉武 篤, 渡邊洋三, 山田幹雄, 三浦 望：廃石膏ボード粉から再生された石膏の形態の違いが石膏混合土の強度, 変形特性に及ぼす影響, 平成21年度土木学会西部支部研究発表会講演概要集, III-65, pp.457-458 (2010)
- (5) (社)地盤工学会 地盤調査法改訂編集委員会編：地盤材料試験の方法と解説 (2009)
- (6) (財)日本規格協会：セッコウの化学分析方法, JIS R 9101:1995 (1995)
- (7) 無機マテリアル学会編：セメント・セッコウ・石灰ハンドブック, 技報堂出版 (1996)
- (8) (財)日本規格協会：セメントの物理試験方法, JIS R

5201:1997 (1997)

- 9) 関東化学（株）：焼石膏製品安全データシート（2007）
- 10) 関東化学（株）：硫酸カルシウム二水和物製品安全データシート（2008）

（2010年11月4日受付 2011年2月10日受理）