炉乾燥温度の違いが廃石膏ボード由来再生半水石膏固化体の含水比試験結果に及ぼす影響

大分工業高等専門学校　学生会員　○松尾　悠平　大分工業高等専門学校　学生会員　西野　夏生
大分工業高等専門学校　正会員　佐野　博昭　香川高等専門学校　正会員　小竹　望
徳山工業高等専門学校　正会員　桑嶋　啓治

１．まえがき

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。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地盤改良材としての適用性についての研究が行われている。

ここで，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，廃石膏ボードを破砕・粉砕・分離した石膏粉（再生二水石膏）を加熱して再生半水石膏に転換する必要があるが，著者らは加熱時の温度と時間の組合せにより石膏形態が異なることを既に報告している[1]。さらに，これらの知見を基にして，石膏安定処理土の含水比推定式の提案も行っている[2]。

石膏安定処理土の含水比推定式の実験的検証を行うためには，所定の温度で石膏安定処理土の含水比試験を行う必要があるが，そのためには，まず，半水石膏に加水して固化した二水石膏（以後，半水石膏固化体と称する）の含水比特性を把握しておく必要がある。

そこで，本研究では，半水石膏固化体の含水比推定式を構築するとともに，再生半水石膏固化体に対して異なる温度条件下で含水比試験を行ったのでその結果について報告する。

２．半水石膏固化体の含水比推定式の構築

半水石膏を地盤改良材として用いる場合，次式(1)に示すような反応が生じている。

$$CaSO_4 \cdot \frac{1}{2}H_2O + \frac{3}{2}H_2O \rightarrow CaSO_4 \cdot 2H_2O \qquad (1)$$

この状態での含水比を模式図として示したのが**図-1**である。図より，半水石膏固化体は二水石膏（固体）と間隙水（液体）とから構成されており，半水石膏固化体の含水比は,「間隙水（液体）／〔二水石膏（固体）〕×100(%)」で表されることになる。

半水石膏固化体の含水比を実験的に評価するために含水比試験を行う場合，通常，「土の含水比試験方法（JIS A 1203: 2009）」[3]に準拠して恒温乾燥炉で（110±5）℃，すなわち，105～115℃の温度で加熱する操作が行われている。

ここで，著者ら[1]は，石膏の熱的特性として，「二水石膏は90℃24時間加熱で半水石膏」に，「半水石膏は120℃24 時間加熱で無水石膏」になっているということを報告していることより，半水石膏 $CaSO_4 \cdot 1/2H_2O$ に水を混合してできた二水石膏 $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ に対して（110±5）℃で含水比試験を行うと，$3/2H_2O$ の水が蒸発した半水石膏 $CaSO_4 \cdot 1/2H_2O$ と $2H_2O$ の水が蒸発した無水石膏 $CaSO_4$ とが混在した状態となっており，半水石膏固化体の含水比を正確に評価できない。

そこで，以下では，半水石膏固化体に対して含水比試験を行った場合の含水比推定式を構築する。なお，炉乾燥温度 T は，石膏の形態変化が生じる温度を考慮に入れて，T=70，90，120℃の 3 種類とした。

ここで，「土の含水比試験方法（JIS A 1203: 2009）」[3]では，含水比を「（110±5）℃の炉乾燥によって失われる土中水の質量の，土の炉乾燥質量に対する比。質量百分率で表す。」と定義しているが，半水石膏固化体に対しては，（110±5）℃以外の温度で炉乾燥して算出した土中水の質量の土の炉乾燥質量に対する比の質量百分率も広義の意味で含水比と称することにする。

表-1 は，半水石膏固化体の含水比推定式の構築に必要な式量をまとめて示す。

質量が m[g]の半水石膏に m_w[g]の水を加えたとすると，前出式(1)より，$CaSO_4 \cdot 1/2H_2O$: 1[g]に対して $3/2H_2O$: 27.024/145.158=0.1862[g]が吸水され，$CaSO_4 \cdot 1/2H_2O$: m[g]に対しては，0.1862m[g]の水が取り込まれたことになる。これより，半水石膏固化体の質量は，二水石膏（固体）が（m+0.1862m）[g]，間隙水（液体）が（m_w-0.1862m）[g]，合計（m+m_w）[g]となる。

ここで，半水石膏固化体に対して炉乾燥温度 T=70℃で炉乾燥を行うと，間隙水（液体）の質量（m_w-0.1862m）[g]が蒸発し，石膏形態は二水石膏のまま変化がないことになる。

次に，炉乾燥温度 T=90℃で炉乾燥を行うと，間隙水

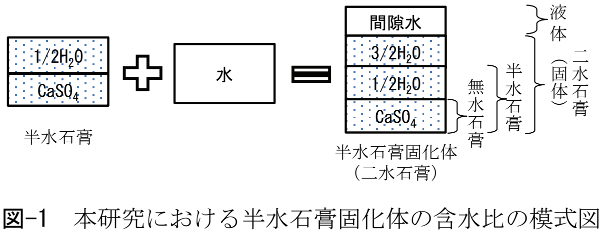

図-1　本研究における半水石膏固化体の含水比の模式図

（液体）の質量 m_w[g]が蒸発し，石膏形態は二水石膏から半水石膏に変化する。

さらに，炉乾燥温度 T=120℃で炉乾燥を行うと，間隙水（液体）の質量 m_w[g]に加えて，$CaSO_4 \cdot 1/2H_2O$: 1[g]に対しては $1/2H_2O$: 9.008/145.158=0.0621[g]，$CaSO_4 \cdot 1/2H_2O$: m[g]に対しては，0.0621m[g]，合計で質量（m_w+0.0621m) [g]の間隙水（液体）+結晶水が蒸発し，石膏形態は二水石膏から無水石膏に変化することになる。なお，炉乾燥温度 T=（110±5）℃で炉乾燥を行うと，石膏形態は二水石膏と半水石膏の 2 種類が存在する状態になっている 2)。

上記の状態を考慮に入れて，炉乾燥温度 T=70，90，120℃で含水比試験を行った場合の半水石膏固化体の含水比 w_T は次式(2)～(4)によって求められる。

①炉乾燥温度 T=70℃の場合の含水比 $w_{T=70℃}$

$$w_{T=70℃} = \frac{m_w - \frac{27.024}{145.158}m}{m + \frac{27.024}{145.158}m} \times 100 = \frac{m_w - 0.1862m}{1.1862m} \times 100 \quad (2)$$

②炉乾燥温度 T=90℃の場合の含水比 $w_{T=90℃}$

$$w_{T=90℃} = \frac{m_w}{m} \times 100 \quad (3)$$

③炉乾燥温度 T=120℃の場合の含水比 $w_{T=120℃}$

$$w_{T=120℃} = \frac{m_w + \frac{9.008}{145.158}m}{\frac{136.15}{145.158}m} \times 100 = \frac{m_w + 0.0621m}{0.9379m} \times 100 \quad (4)$$

３．異なる炉乾燥温度による再生半水石膏固化体の含水比試験結果

含水比試験にあたっては，廃石膏ボード由来再生二水石膏の 2mm ふるい通過分試料を炉乾燥温度 T=90℃で 24 時間炉乾燥することによって半水石膏化した。この試料 200g を加水率 W=125%に調整してプラスチック製の軽量型枠（内径 5cm，高さ 10cm）に流し込み，温度 20℃の条件で所定の時間空気中養生を行った後，脱型して一軸圧縮試験を行った。ここで，加水率 W(%)とは，加えた水の質量の再生半水石膏の質量に対する比を百分率で示したものである。一軸圧縮試験後，固化した供試体をできるだけ細かく砕いた試料を含水比試験に供した。また，炉乾燥温度 T は 70，90，110℃の 3 種類とし，いずれも炉乾燥時間は 24 時間とした。

図-2 は，加水率 W=125%の場合の炉乾燥温度 T と石膏形態を考慮に入れた含水比 w_T との関係を示す。図中には，併せて，前出式(2)～(4)によって求めた w_T も示す。図より，炉乾燥温度の高低によって含水比の値が大きく異なっており，炉乾燥温度 T を 70℃とした場合（石膏形態：二水石膏），実測含水比 $w_{T=70℃}$は 89.6%となるのに対して，T を 110℃（半水石膏＋無水石膏）とすると $w_{T=110℃}$=128.2%となり，炉乾燥温度によって

表-1　半水石膏固化体の含水比推定式の構築に関係する式量

ケース	関係する式量*
石膏固化体	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$=172.182 $CaSO_4 \cdot 1/2H_2O$=145.158 $CaSO_4$=136.15 $2H_2O$=36.032 $3/2H_2O$=27.024 $1/2H_2O$=9.008

*Ca=40.08，O=16.00，H=1.008，S=32.07

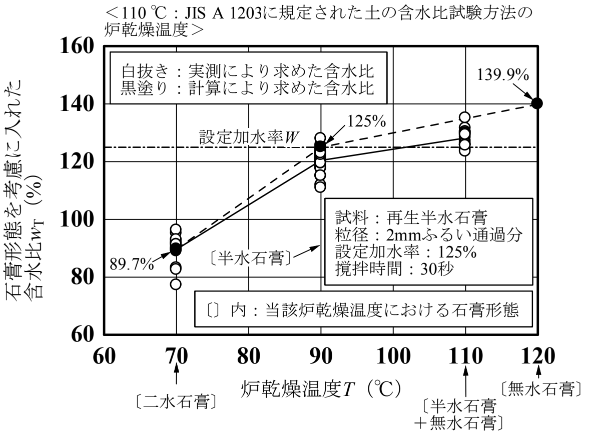

図-2　炉乾燥温度と含水比との関係（設定加水率 125%）

含水比が大きく異なることがわかる。なお，含水比 $w_{T=90℃}$は，加水率 W と同じものを表している。

また，含水比試験から得られた実測含水比（記号○）と式(2)～(4)から計算により得られた含水比（●）とがほぼ一致しており，今回提案した半水石膏固化体の含水比推定式の有効性が確認できたことになる。

４．まとめ

本研究では，半水石膏固化体の含水比推定式を提案し，その有効性が明らかとなった。

謝辞：本研究を遂行するにあたり，「全国 KOSEN 廃石膏ボードリサイクルネットワーク（会長：佐野博昭)」関係各位には貴重なご助言をいただいた。ここに，深甚なる謝意を表する。

参考文献

1) 佐野博昭，山田幹雄，稲積真哉，由見真治朗，吉武 篤，渡邉洋三：密度法を用いた廃石膏ボード由来再生石膏の半水石膏含有率の推定，土木学会論文集 C（地圏工学)，Vol. 70，No. 1，pp. 44-52，2014.

2) 佐野博昭，山田幹雄，小竹 望，稲積真哉，桑嶋啓治：廃石膏ボード由来再生石膏を添加・混合した安定処理土の含水比推定式の提案，地盤工学ジャーナル，Vol. 10，No. 4，pp. 603-610，2015.

3) （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－二分冊の 1－，「第 3 編 物理試験 第 3 章 含水比試験」，pp. 104-114，2009.