

## 飽和・不飽和状態における高炉水砕スラグの硬化メカニズムに関する実験的検討

山口大学大学院 学生会員 ○那須 英斗  
山口大学大学院 正会員 原 弘行

## 1. はじめに

高炉水砕スラグ（以下、水砕スラグ）は、形状・粒径分布が天然砂に非常に類似しているが、軽量かつ透水性がよく天然砂よりも優れた土質定数を有している。さらに、アルカリ刺激剤と反応して自身から化学物質を溶出し、水和物を生成して強度発現する潜在水硬性を有する。そのため、地盤工学的に有効な土木材料と考えられているが、港湾工事への適用事例は数多く報告されているのに対し、陸上構造物への適用事例は少ない。現在まで陸上構造物への適用性を検討するために、山口県宇部市に造成した高炉水砕スラグの試験盛土のモニタリングが実施されている<sup>1)</sup>。水砕スラグは数カ月で大きな強度発現が確認されたが、室内試験では1年以上経過しても自立すらしめないことも認められ、現場で発揮される硬化挙動とは大きく異なる場合がある。両者を比較したところ、試験盛土の飽和度は養生初期で30~50%程度であったのに対し、室内試験の殆どは飽和状態で検討されている。よって、両者の結果の乖離には、飽和度が影響していると考えた。昨年度の研究<sup>2)</sup>では、飽和度が低いものが優れた水硬性を示すことを確認したが、詳細な硬化機構については明らかになっていない。そこで、本研究では飽和度を変化させた水砕スラグに対して力学試験と併用して各種機器分析を実施することで、飽和度が異なる高炉水砕スラグの硬化機構について考察した。

表-1 水砕スラグの物理特性

土粒子密度 $\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	2.72
最大間隙比 $e_{max}$	1.222
最小間隙比 $e_{min}$	0.828

## 2. 実験概要

本実験で用いた水砕スラグの物理特性を表-1に示す。本実験では、高炉スラグ微粉末を質量比10%で添加し、硬化を促進させた。設定した飽和度は、10, 20, 30, 50, 80, 100%に加え、固液比1:1.2で浸漬させるケースも実施した。供試体の作製方法は、飽和と不飽和の場合で異なり、不飽和供試体は、内径5.0cm、高さ10.0cmのプラスチックモールドの中に所定の含水比に調整した試料を相対密度90%となるように詰め、飽和供試体は、浸漬容器中にプラスチックモールドを入れ、試料を水中落下法によって充填した。室温20°C、養生期間を7~112日とし、所定の期間養生後、一軸圧縮試験、機器分析としてX線CT撮影と熱重量(TG)分析を行った。

## 3. 実験結果

図-1に一軸圧縮強さの経時変化を示す。同図より、時間の経過に伴って一軸圧縮強さは増加する傾向があり、その傾向は飽和度によって差異があることが確認できる。養生初期では飽和度が小さいものが高い強度を発揮する傾向にあるが、養生84日には飽和度が高い供試体についても硬化が進行し、飽和度80%は養生112日時点で飽和度30%に次いで3番目に高い一軸圧縮強さを示した。また、飽和度10%については養生14日以降、飽和度20%については養生56日以降の強度増加はほとんどみられなかった。

X線CTでは、物質の密度によってX線の吸収係数が異なるため、その差を計測することができる。得られたX線CT画像をグレースケール画像に変換し、黒色を空気、灰色を水和物、白色を水砕スラグとして判断し、256階調のグレースケールの内から閾値を決定して三値化した。写真-1に養生112日における異なる飽和度の任意断面の三値化画像を示す。飽和度10%と30%を比

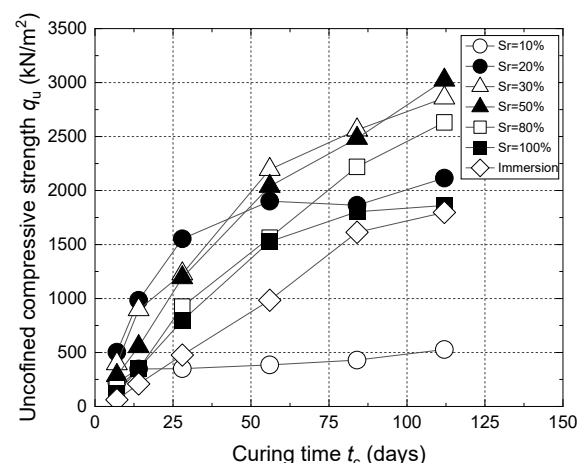
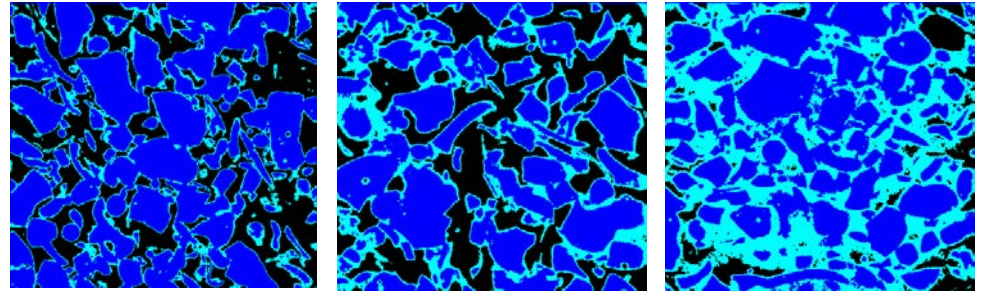


図-1 一軸圧縮強さの経時変化

キーワード 高炉水砕スラグ、飽和度、X線CT、TG分析

連絡先 〒755-8611 山口県宇部市常盤台2-16-1 TEL0836-85-9325

較すると、飽和度 10%では水和物が粒子表面付近のみに生成されているのに対し、飽和度 30%では粒子間を架橋するように水和物が生成されていることが確認できる。



(a) 飽和度 10%

(b) 飽和度 30%

(c) 飽和度 100%

写真-1 養生日数 112 日における異なる飽和度の任意断面の三値化画像

飽和度が 100%の場合では、さらに多くの水和物が生成

され、間隙のほとんどを水和物が充填しているようにみえる。このことから飽和度が高くなるにつれて水和物の生成量は増加していると考えられる。

本研究では、30~600°Cにおける質量減少率を  $\Delta H$  とし、水和反応の進行度の指標とした。

図-2は養生 14, 112 日における  $\Delta H$  を示したものである。飽和度によらず、養生日数の経過とともに  $\Delta H$  も増加する傾向を示した。養生 14 日では、飽和度 80, 100%はほとんど水和が進行していないが、飽和度が 50%以下では急激な水和反応の進行がみられた。しかし、以降の水和反応の進行は飽和度が高いときほど急激に進行している。このことから、養生初期の水和速度は飽和度が低い方が速いと考えられる。また、養生 112 日では飽和度が高いものほど水和反応が進行し、水和物が多く生成されている。これは X 線 CT 撮影の結果とも符合する。

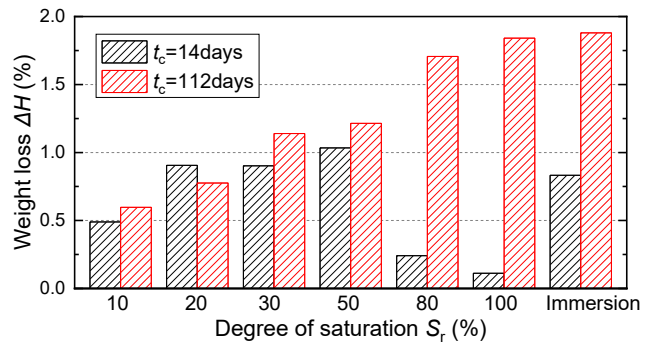


図-2 養生 14, 112 日における質量減少率  $\Delta H$

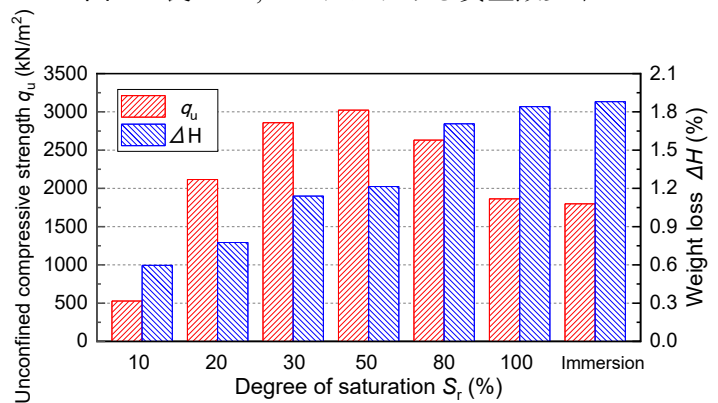


図-3 各飽和度の質量減少率  $\Delta H$  と一軸圧縮強さ  $q_u$

図-3 に養生 112 日における各飽和度の質量

減少率  $\Delta H$  と一軸圧縮強さ  $q_u$  を示す。同図より、50%以上の飽和度では水和物の量が増加しても必ずしも強度増加がみられなかった。このことから、水和反応の進行度と強度は必ずしも相関しないことが示された。これは、生成される水和物の密度やその分布状況が異なっていることが原因と考えられる。

#### 4. まとめ

本実験から得られた知見は以下のとおりである。

- (1) X 線 CT 撮影, TG 分析の結果から、飽和度によって水和物の生成量に差異があり、飽和度が高くなるほど生成量が増加する傾向を示した。また、養生初期では飽和度が低いほど水和反応が進行しており、水和速度が速いと考えられる。また、長期養生後では飽和度が高いほど  $\Delta H$  が高い傾向がみられた。
- (2)  $\Delta H$  と一軸圧縮強さの関係から、水和反応の進行度と水砕スラグの強度は必ずしも比例しないことが示唆された。これは水和物の密度や飽和度による水和速度の差異などが影響している可能性がある。

#### 参考文献

- 1) 原弘行, 松田博, 本田秀樹, 篠崎晴彦, 和田正寛, 中西淳: 施工から 16 年が経過した高炉水砕スラグ試験盛土の土質特性の調査, 材料, Vol.69, No.1, pp.9-14, 2020.
- 2) 那須英斗, 原弘行: 異なる飽和度で養生した高炉水砕スラグの硬化挙動, 第 74 回土木学会中国支部研究発表会, 2022