

高炉水砕スラグの強度発現に及ぼす硬化履歴の影響

山口大学大学院 学生会員 ○中村奨哉 正 会 員 松田 博
正 会 員 原 弘行 学生会員 和田正寛

1. はじめに

銑鉄の製造過程で生産される高炉水砕スラグ（以下：水砕スラグ）は、粒度分布は自然砂に類似し、軽量性、高強度、高透水性などの特徴に加えて、水と反応して硬化する「潜在水硬性」を有している。また、工場で生産されるため、比較的均質で安定供給が可能である。これらの点から、水砕スラグは非常に優れた土木材料として考えることができる。また、著者らの研究グループでは、水砕スラグは硬化後、地震などの外的負荷によって破壊等が生じた場合においても、再び潜在水硬性を発揮して、強度が回復する自己修復能力を有することを確認している¹⁾。しかしながら、水砕スラグの自己修復機構のメカニズム解明やその定量的評価には至っていない。

本研究では一度硬化した水砕スラグを解砕～再養生し、水和反応と強度の関係について調べ、強度発現に及ぼす硬化履歴の影響について定量的に評価した。

2. 実験概要

本研究で用いた水砕スラグの物理特性および粒径加積曲線を、表 1 および図 1 に示す。水和物が生成していない水砕スラグ（以下：未水和スラグ）を直径 5cm、高さ 10cm のプラスチックモールドに相対密度 $Dr=80\%$ となるように詰め、供試体を作製した。供試体は 80°C の海水中において密閉したポリエチレン製の容器内で養生した。このとき、固液比を 1.4 とした。その後、所定の期間養生して硬化させた供試体を解砕し、再度同条件で養生した。本研究では、初回の養生期間を初回養生日数、解砕して再充填した後の期間を養生日数、両期間の和を積算日数と定義した。初回養生日数は 0, 14, 28, 56 日、養生日数は 0, 3, 7, 14, 28, 56, 84, 112 日とした。養生後の供試体に対し、一軸圧縮試験、強熱減量試験、サリチル酸・アセトン・メタノール混合溶液を用いた選択溶解法による水和反応率試験²⁾（以下：反応率試験）を実施した。反応率試験は次のようにして実施した。まず、サリチル酸 5.0g、アセトン 70ml、メタノール 30ml の混合溶液を養生後の水砕スラグ 1.0g とともに共栓付き三角フラスコに投入し、マグネットスターラーで 1 時間攪拌した後、1 日静置する。その後、孔径 $1\mu\text{m}$ の定量ろ紙を用いて吸引ろ過する。得られた残渣をろ紙とともにろ紙に移し、 850°C で約 1 時間強熱してろ紙を灰化させ、秤量した。この試験で得られる水和反応率は、全質量に対する水砕スラグ粒子表面に生成された水和物の質量百分率として求められるものである。なお、本実験では、海水を用いているため、乾燥過程で粒子表面に付着する塩分が溶解することを考慮し、塩分量補正も同時に行った。また、反応率の算出には式(1)、(2)を用いた。

$$R_i = \frac{m_h}{m_d \times (1 - IL/100) - m_{sa}} \times 100 \quad \cdots (1) \quad R = 100 - R_i \quad \cdots (2)$$

ここに、 R_i ：未反応率、 m_h ：強熱後の水砕スラグ質量、 m_d ：溶液浸漬前の水砕スラグ質量、 m_{sa} ：塩分質量、 IL ：強熱減量、 R ：水和反応率を示す。

3. 実験結果

図 2 に一軸圧縮強さの経時変化を示す。横軸は積算日数を示している。養生時間が増加すると一軸圧縮強

表 1 試料の物理特性

	Soil particle density $\rho_s (\text{g/cm}^3)$	Maximum void ratio $e_{\max}$	Minimum void ratio $e_{\min}$
Unhydrated slag	2.643	1.510	1.033
Genkai sand	2.678	0.872	0.516
Toyoura sand	2.646	0.999	0.623

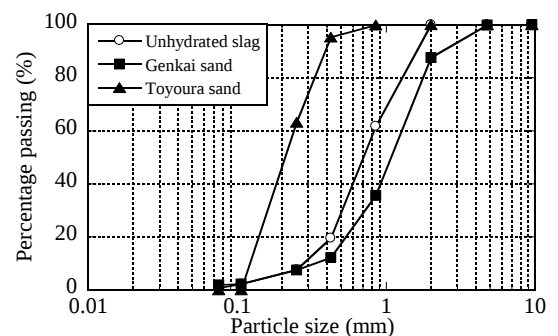


図 1 粒径加積曲線

さは増加しており，初回養生日数にかかわらず，再度養生することによって自己修復することがわかる．なお，硬化履歴を有する場合，未水和スラグ（初回養生日数 0 日）と比べて一軸圧縮強さは小さくなる傾向を示した．

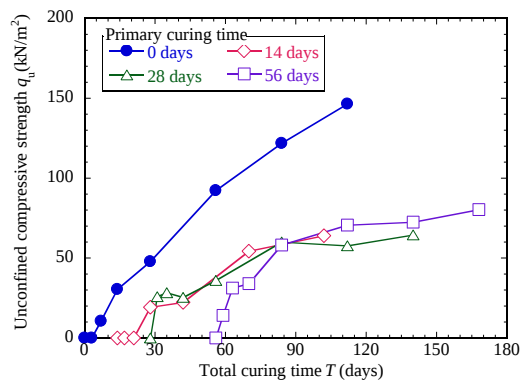


図 2 一軸圧縮強さの経時変化

図 3 に水和反応率の経時

変化を示す．水和反応率は硬化履歴の有無によらず一様に増加する傾向を示しており，解砕過程が水和反応の進行に及ぼす影響は小さいことがわかる．図 4 に一軸圧縮強さと養生後の水和反応率増分の関係を示す．未水和スラグは $\Delta R=0.8\%$ 付近で自立するのに対して，硬化履歴を有する場合，未水和スラグと比して少量の水和反応率の増加で強度発現する傾向を示している．

図 5 に一軸圧縮強さと養生日数の関係を示す．図中の近似曲線は式(3)を用い，最小二乗法で近似したものである．

$$q_u = A\sqrt{t} \quad \dots (3)$$

いずれのケースも相関係数は 1 に近く，非常に良い近似となった．図 6 に初回養生日数と A_n/A_0 の関係を示す．ここに A_0 は未水和スラグでの式(3)の A の値， A_n は硬化履歴を有する場合の A の値である．添え字の n は初回養生日数を意味する．また図中の破線の内，下側の破線は硬化履歴を持つケースの A_n/A_0 の値の平均値であり，今回の実験条件の範囲では，硬化履歴を持つ場合，初回養生日数を変化させても A_n/A_0 に大きな変化はみられず，未水和スラグの約 6 割程度の値を示した．

4. まとめ

本研究では，一度硬化した水砕スラグを解砕～再養生し，その水和反応と強度について調べ，強度発現に及ぼす硬化履歴の影響について検討した．その結果，水砕スラグは硬化履歴の有無によらず，水和反応が進行することによって強度が回復し，自己修復することがわかった．硬化履歴がある水砕スラグは未水和スラグと比較し，水和反応が進行すると早期に強度発現し，初回養生日数にかかわらず 6 割程度の強度を示すことが明らかとなった．

【参考文献】

- 1) 和田正寛，松田博，原弘行，石蔵良平，新舎良典，井川尚之：せん断破壊した高炉水砕スラグの再硬化特性，第 10 回環境地盤工学シンポジウム発表論文集，No.150, pp.159-162, 2013.
- 2) 近藤連一，大沢栄也：高炉水砕スラグの定量およびセメント中のスラグの水和反応速度に関する研究，窯業協会誌，Vol.77，pp.39-46，1969

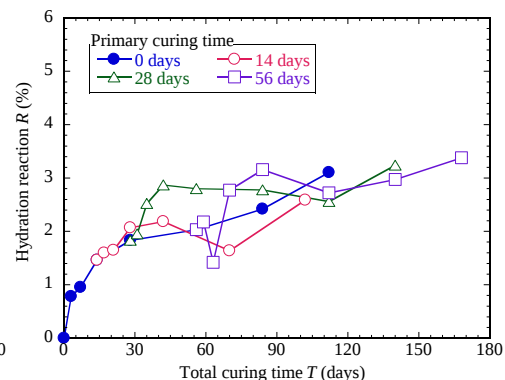


図 3 水和反応率の経時変化

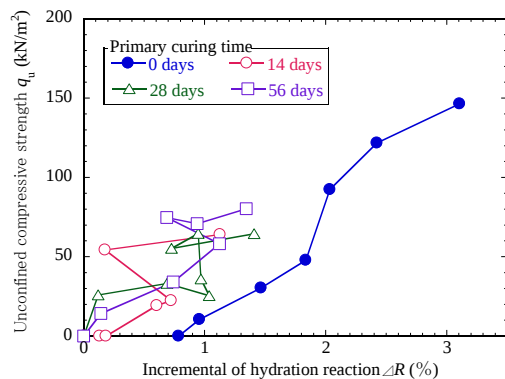


図 4 一軸圧縮強さと水和反応率の関係

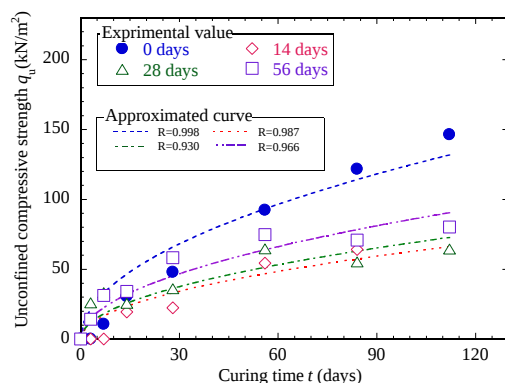


図 5 一軸圧縮強さと養生日数の関係

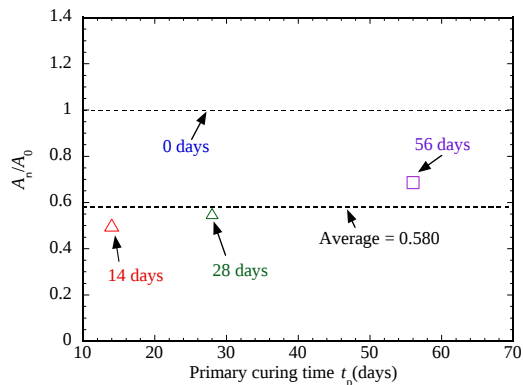


図 6 初回硬化日数と A_n/A_0 の関係