

水砕スラグの潜在水硬性と強度特性に関する実験的研究

横浜国立大学大学院都市イノベーション学府 学生会員 ○ 辻本 真
 横浜国立大学都市イノベーション研究院 正会員 菊本 統

1. 背景と目的

水砕スラグは水と反応して経時的に硬化する潜在水硬性をもつ。しかし、潜在水硬性のメカニズムは複雑で、その効果は土構造物の設計に反映されていない¹⁾。本報では、潜在水硬性の発現過程において溶出現象と析出現象に着目して pH 計測, XRD による結晶構造分析および空隙率測定を行い、強度との関連を調べるとともに、潜在水硬性の発現メカニズムを考察した。

2. 供試体作製方法および養生条件

水砕スラグ（土粒子密度 $\rho_s = 2.69 \text{ g/cm}^3$ ，最大間隙比 $e_{\max} = 1.42$ ，最小間隙比 $e_{\min} = 0.91$ ）を内径 50 mm，高さ 120 mm のモールドに空中落下法で投入して，高さ 100 mm，相対密度 90%の供試体を作製した。その後，モールドに養生水を入れて真空圧をかけて飽和させ，上澄み液を 30 cm³ 確保した状態で 40 °C で所定期間，養生した。養生条件を表 1 に示す。養生水は人工海水，蒸留水，水酸化ナトリウム水溶液の 3 種類である。添加剤は高炉スラグ微粉末 4000（比表面積 3500~5000 cm²/g，土粒子密度 $\rho_s = 2.80 \text{ g/cm}^3$ ）を使用し，乾燥重量で全体の 15 %になるように添加した。なお，微粉末を添加した試料は $e_{\max} = 1.20$ ， $e_{\min} = 0.67$ である。

3. 実験結果

pH の経時変化を図 1 に示す。図には養生水の上澄み液を 2 回測定した平均値を示した。既往研究²⁾では，養生水の pH11 以上であることが潜在水硬性の発現の必要条件と報告されているが，図ではどの養生条件でも早期に pH が 11 を超えることが分かる。よって，養生水の種類によらず pH は高まるため，アルカリ添加剤を加える必要は必ずしもないと言える。これは水砕スラグが含有する酸化カルシウムが水と反応して水酸化カルシウムを生成した後，水酸化カルシウムが溶出して pH が高まるためと考えられる。

次に，30 日養生後の試料の XRD による結晶構造解析の結果を図 2 に示す。試料は養生後の供試体の中心部分をハンマーで砕いた後，アセトンで水和停止して用いた。なお，コランダム（corundum）は定量操作のために測定前に混合した試料である。

図より，いずれの養生条件でも非晶質である C-S-H が結晶化したトバモライト（tobermorite）が同定されたことから，C-S-H の析出が示唆された。また，No.2 を除く条件ではカルシウムアルミニウム水和物(CaO-Al₂O₃-H₂O)と炭酸カルシウム(CaCO₃)が同定された。カルシウムアルミニウム水和物は水砕スラグに含まれる Ca²⁺と Al³⁺により析出される水和物で，炭酸カルシウムは既往の研究³⁾でも報告されている析出物である。No.2 で同

表 1 養生条件

Case	Type of curing water	Addition rate of ground GBFS [%]
No.1	Artificial seawater	15
No.2	Artificial seawater	0
No.3	Distilled water	15
No.4	Aqueous sodium hydroxide (pH=11)	15

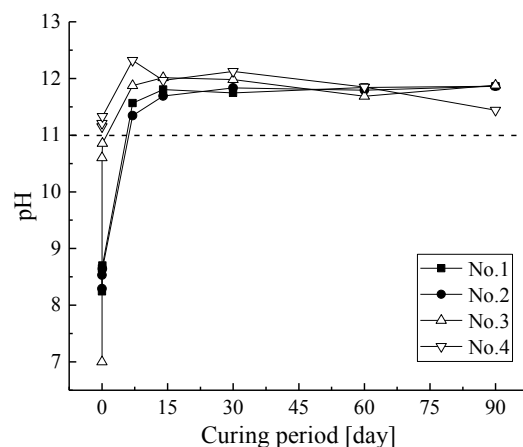


図 1 pH の経時変化

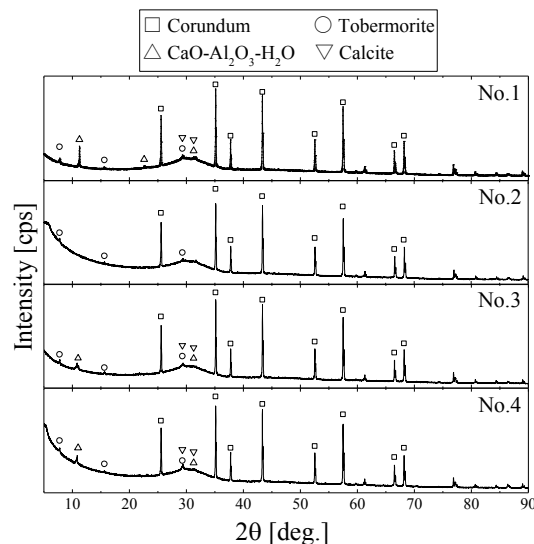


図 2 XRD による水和物の同定

キーワード：潜在水硬性，水砕スラグ，空隙率

連絡先 〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-5 土木工学棟 TEL 045-339-4038

定されなかった要因は、高炉スラグ微粉末を添加しておらず、化学反応速度が遅くなったためと考えられる。

空隙率の経時変化を図3に示す。空隙率は、ハンマーで1 cm 角程度に砕いた試料片の表乾重量、表乾状態の体積、絶乾重量から算出した。高炉スラグ微粉末を添加したケースに着目すると、時間が経つにつれてどのケースでも空隙が同程度、充填されており、水和物の析出を確認できる。一方、高炉スラグ微粉末を添加しないケースにおいても、90 日目時点では高炉スラグ微粉末を添加したケースと同程度の空隙率の減少を確認できる。この結果は、微粉末の添加によらず、水和物が形成されて空隙は充填されることを示す。

一軸圧縮強度の経時変化を図4に示す。図には一軸圧縮強度を2回測定した平均値を示した。高炉スラグ微粉末を添加したケースに着目すると、30 日目時点では人工海水で養生した No.1 の強度が最も高い。しかし、60 日目以降では No.1 と No.4 は同程度の強度を示しており、No.3 も含めて長期養生後の強度は概ね同様の値になるものと予想される。空隙率の減少量と一軸圧縮強度の関係を示した図5に着目すると、空隙率の減少量（すなわち水和物の析出量）と一軸圧縮強度には明確な正の相関関係を見て取れる。一方、高炉スラグ微粉末を添加しないケースでは、90 日目時点で水和物は析出しているにもかかわらず、強度はほとんど発揮されないことを確認できる。これより、高炉スラグ微粉末の添加の有無による強度発現の違いは、潜在水硬性により形成される析出物の量ではなく、試料の粒状体としての構造特性、すなわち粒子の配位数（接触点数）によるものと推測する。すなわち、養生期間を経て析出される水和物が粒子間の接触点付近に形成されることを考えると、水砕スラグ粒子の周辺に高炉スラグ微粉末が多く存在し、多数の粒子が接触しあっている微粉末添加試料（図6）のほうが、明瞭に強度は増加するものと考えられる。

4. まとめ

水砕スラグは養生条件によらず早期に好適な pH に変化し、C-S-H の析出とそれに伴う空隙の充填が確認された。高炉スラグ微粉末を添加したケースでは養生水によらず空隙が同程度、埋まり、30 日目までは養生水により強度が異なるものの、最終的に一定の強度に収束することが分かった。高炉スラグ微粉末を添加しないケースでは水和物の析出による空隙の充填が確認されたが強度は発現せず、その要因は粒子間の配位数にあることを推察した。

参考文献

(1)鉄鋼スラグ協会:高炉水砕スラグ・土工用材料としての技術資料, 18 p, 2009. (2)(財)沿岸技術研究センター:港湾・空港における水砕スラグ利用技術マニュアル, 120 p, 2007. (3)亀川ら:微視的観察に基づく水砕スラグの一軸圧縮強度発現に関する一考察, 第 37 回地盤工学研究発表会, pp687-688, 2002.

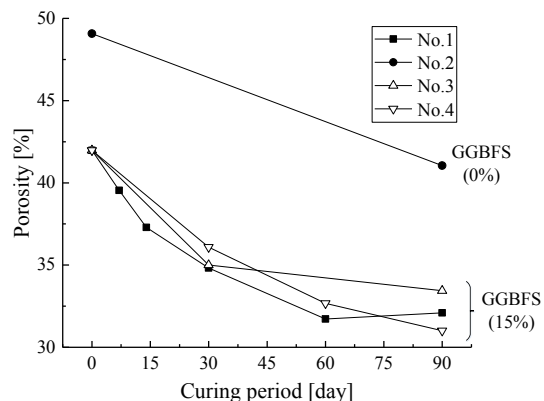


図3 空隙率の経時変化

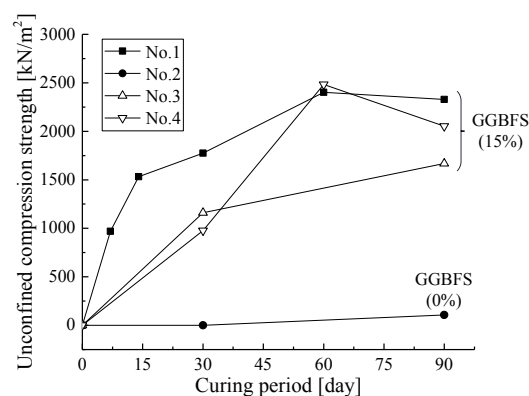


図4 一軸圧縮強度の経時変化

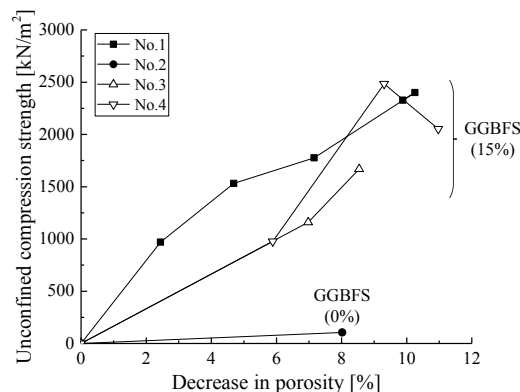


図5 空隙率の減少量と一軸圧縮強度の関係

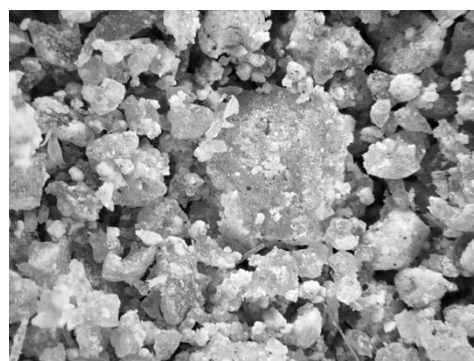


図6 水砕スラグに高炉スラグ微粉末を添加した様子