

破碎と硬化を施した高炉水砕スラグの透水特性の時間依存性について

九州大学大学院 学 ○永田 真也 学 李 泰衍 正 石藏 良平 F 安福 規之

1.はじめに

高炉水砕スラグは銑鉄の製造過程で生成される副産物である。年間約 1900 万トン生産されており、鉄鋼スラグ（徐冷スラグ、スラグ、転炉系スラグ、電気炉系スラグ）のうち、51.9%を占める¹⁾。セメント材料としての利用がほとんどであり、地盤改良材としての利用が少ないのが現状であり、高炉水砕スラグの利用率向上のため、基礎的研究が必要である。高炉水砕スラグは水和反応により硬化する潜在水硬性を有するため、時間の経過とともに硬化する。本研究では未硬化時の高透水性と硬化後の高強度に期待して、低置換サンドコンパクションパイル工法（以下、低置換 SCP 工法）への適用を目指している。図-1 に示すように未硬化時、硬化過程には透水性を活かして排水経路となり圧密を促進し、硬化過程から硬化後には杭自体の高強度化が期待できる。しかし、実際の試験施工では打設後約 6 ヶ月で急激な透水性の低下が確認され、高炉水砕スラグ単体での施工が難しいことが明らかになっている²⁾。高炉水砕スラグを締固め杭として使用した場合、打設時に発生する粒子破碎が原因であると考えられる。また、硬化の過程ではアルカリ度が高まり、安全に利用するため、炭酸化によって pH を中和する必要がある。本研究では、炭酸化および粒子破碎が透水特性に与える影響について検討する。

2. 試料の物理特性と試験条件

表-1 には、高炉水砕スラグの物理特性を示す。試料は高炉水砕スラグを毎分回転数（rpm）が 0（未破碎）、400、800、および 1200 の回転破碎混合機を使用し、4 つの異なる粒子サイズに破碎したものを用意した。図-2 には、破碎回数に応じた粒径加積曲線を示す。rpm が増加するにつれて平均粒径が減少していることが分かる。また、試料を 5 x 10 cm の円筒型のプラスチックモールドに詰め、500 ml の蒸留水または炭酸水で、0、7、14、28 および 60 日の硬化日数で養生した。したがって、実験条件は表-2 に示すとおりである。初めに各破碎条件での単粒子強度とブレーン空気透過試験により表面積を検討した。炭酸化による影響を観察するため pH 試験を行い、その後透水試験を行った。透水試験方法として供試体をプラスチックモールドから取り出し、透水試験装置に取り付け、脱気装置に 24 時間置いた。その後、定水位透水試験を実施した。

3. 実験概要と結果

キーワード 高炉水砕スラグ 透水性 pH

連絡先 〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡 744 番地 WEST2 号館 1108-2 TEL 092-802-3382

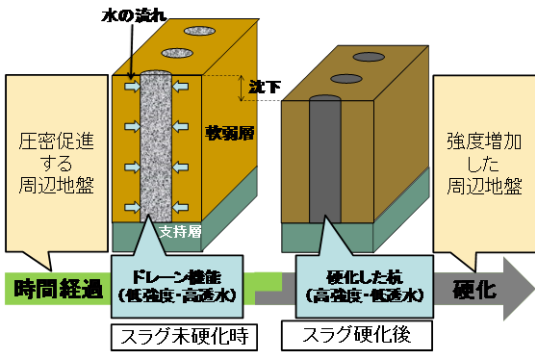


図-1 低置換 SCP 工法への適用概略図

表-1 試料の物理的性質

$\rho_s(\text{g/cm}^3)$	2.82
$\rho_{dmin}(\text{g/cm}^3)$	0.805
$\rho_{dmax}(\text{g/cm}^3)$	1.185
$D_{50}(\text{mm})$	0.85
U_c	2.63

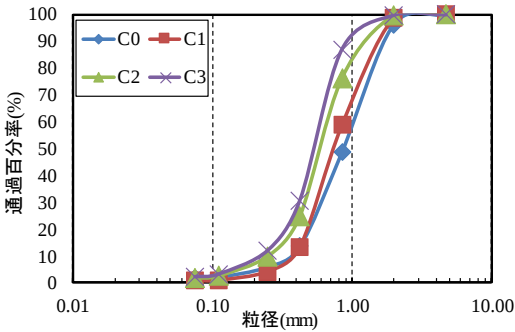


図-2 破碎回数に応じた粒径加積曲線

表-2 破碎および養生方法

試験条件	破碎条件(rpm)	養生条件	養生日数(日)
C0w	0	蒸留水	0, 7, 28, 60
C3w	1200		
C0c	0	炭酸水 (250g CO ₂ : 500ml 水)	0, 7, 14, 28, 60
C1c	400		
C2c	800		
C3c	1200		

はじめに粒子応力を得るために単粒子強度試験を実施した。図-3 には単粒子強度と D_{50} の関係を示す。単粒子強度は、 $\sigma = F_{\max} / A(\text{mm}^2)$ から計算される。粒子サイズが非常に小さいため、粒子は、面積が $A = (D_{50})^2(\text{mm}^2)$ と想定した。結果として、線形の負の相関を示し、粒子サイズの減少に伴い、応力 (MPa) が増加した結果となった。図-4 には、養生日数と pH の関係を示す。炭酸水で養生した場合、7 日程で pH が急激に低下し、中和反応を示した。一方で、蒸留水で養生した場合、破碎試料では 28 日まで pH が低下した。したがって、炭酸水で養生することにより、pH を効果的に減少させることができると考えられる。また、破碎試料と未破碎試料を比べると、破碎の程度が大きいほど、炭酸水での中和反応が大きいことがわかった。これは表面積が増加し水和反応が促進されたためだと考えられる。次に、表面積と透水性の関係について考察した。ブレーン空気透過試験により 0.075 mm 未満の粒子の比表面積を評価し、0.075 mm を超える粒子に関しては球体とみなして比表面積を評価した。その後、合計した比表面積に乾燥密度を掛けることにより表面積を求めた。図-5 には、表面積と透水係数の関係を示す。各養生日数において、表面積の増加に伴い透水性が低下していることが分かる。粒子破碎に伴う細粒分の増加が間隙を小さくし、また表面積が増加し水和反応を促進させたと考えられる。図-6 には、養生日数と透水係数の関係を示す。各養生日数において rpm が増加し、破碎の程度が大きくなると、透水性が低下することがわかった。また、養生日数 7 日にかけて急激な透水性の低下が確認された。図-4 に示した pH の低下と同様の傾向を示していることから、水和反応により、ケイ酸カルシウム水和物および炭酸カルシウムを形成することにより間隙が小さくなっているのではないかと考えられる。

4. 結論

本研究では、平均粒径が大きくなるにつれ、単粒子強度が小さくなることが分かった。また、炭酸水により pH を効果的に中和できることが分かった。透水試験では、粒子破碎の程度に比例して透水性の低下が確認され、炭酸水での養生の場合も、蒸留水での養生に比べて透水性が低下する結果となった。また、表面積の増加に伴い水和反応が促進される傾向が明らかになった。

【参考文献】1)鉄鋼スラグ協会：鉄鋼スラグ統計年報，鉄鋼スラグ協会，2015.7.

2)篠崎晴彦 他：高炉水砕スラグの硬化特性と地盤改良工法への適用，土木学会論文集 C，Vol.62 No.4,pp858-869,2006.12

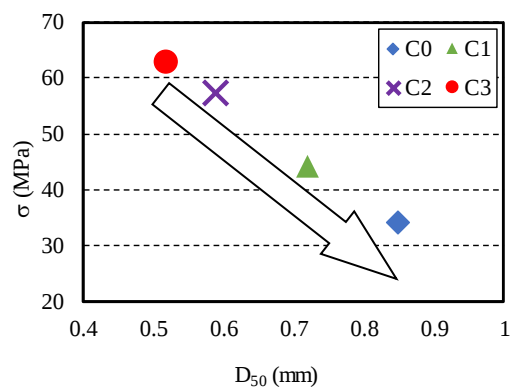


図-3 D_{50} と単粒子強度の関係

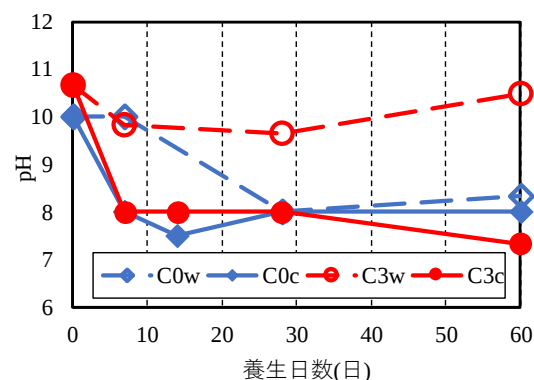


図-4 養生日数と pH の関係

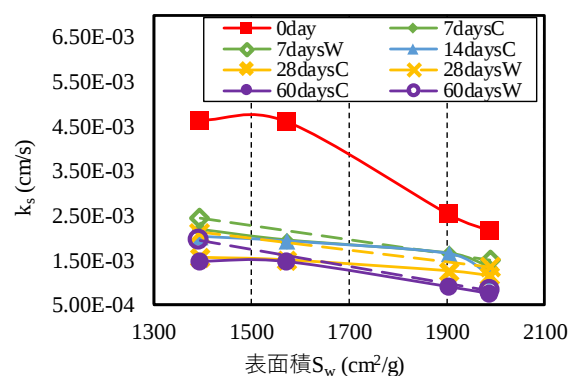


図-5 表面積と透水係数の関係

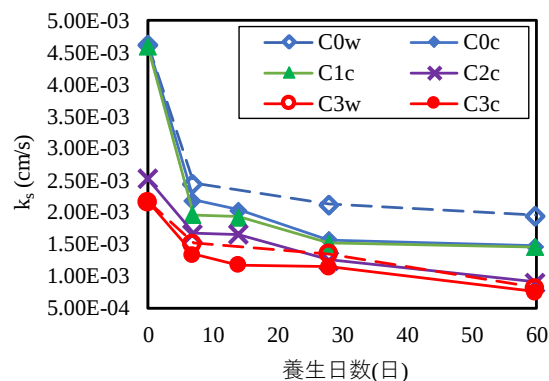


図-6 養生日数と透水係数の関係