

港湾工事への水砕スラグの「水硬性」の活用

木村秀雄*・鈴木操**・高橋邦夫***

* (財) 沿岸技術研究センター 調査役

** 鉄鋼スラグ協会 技術委員会 港湾工事材料 WG リーダー

*** 水砕スラグの港湾工事事用材料活用技術研究委員会 委員長

粒状材料である水砕スラグは水硬性を有しており、経時的に水和して固結する性質がある。水砕スラグは固結することにより液状化に対する抵抗が増加し、裏込工に使用した場合には作用する土圧も小さくなる。従来、「港湾工事事用水砕スラグ利用手引書」では、固結に至っていない粒状材料として扱ってきた水砕スラグを、その後に蓄積された水硬性に関する知見から、この特徴を利用できるようにすることを目的にして共同研究を実施した。その成果を学識経験者からなる委員会での審議を経て、「港湾・空港における水砕スラグ利用技術マニュアル」として取り纏めた。

キーワード：水砕スラグ、水硬性、裏込め、埋立、SCP工、液状化、固結、 $c-\phi$ 材

1. はじめに

鉄鉄を製造する際に副産物として生じる高炉水砕スラグ（以下、「水砕スラグ」と記す）は天然の砂に比べ軽量であり、せん断抵抗角が大きいという優れた特徴がある。これらの特徴を活用して港湾や空港の工事に用いると以下のような効果が期待できる。

- ①裏込め、裏埋め : 土圧軽減、液状化改善
- ②埋立て、覆土、軽量盛土 : 載荷重軽減、液状化改善
- ③SCP工 : 改良地盤のせん断強度増

水砕スラグはその製造過程で大量の水によって急冷され、結晶を生成する時間的余裕がないまま凝固するためガラス構造の粒状体となる。この非結晶体は反応性が高く、水和反応によって経時的に固結する。水砕スラグは固結することによって、さらに液状化に対する繰返しせん断強度が増加し、裏込工や裏埋工に使用した場合には作用する土圧も小さくなる。

しかし、平成元年 8 月に刊行した「港湾工事事用水砕スラグ利用手引書」¹⁾（以下、「手引書」と記す）では、当時、固結に関する技術的な知見が不十分であったことから、水砕スラグを固結に至らない粒状材料として扱うに留めていた。

その後、水硬性に関する知見が蓄積されてきたことから、水砕スラグの水硬性を期待した利用ができるようにすることを目的として、平成 16 年から（独）港湾空港技術研究所・鉄鋼スラグ協会と共同研究を実施してきた。具体的には粒状材料としての扱いに加えて、粘着力 (c) とせん断抵抗角 (ϕ) の両方を有する材料としても扱えるものとして手引書を改訂作業に着手し、学識経験者からなる委員会の審議を経て、新たに「港湾・空港における水砕スラグ利用技術マニュアル」（以下、「マニュアル」と記す）として取り纏めた。

2. 最近の研究

手引書では、水砕スラグは水硬性を有するため、通常、時間とともに固結するとし、固結条件として；

- ①水砕スラグ層に反応水が介在すること。
- ②水砕スラグ層がある程度の密度に保たれていること。
- ③水砕スラグ層の間隙水が静止した状態にあり、pHが維持されること。

を挙げている。しかし、これらの固結条件についても当時は港湾構造物に対する水砕スラグの使用実績が少ないことからデータや事例による定量的な説明ができないものの、これまで土工用として用いられたものでは固結した事例が多く得られていると水硬性について言及して、その後の研究に期待したのである。以下に最近の注目すべき研究について概説する。

菊池ら^{2) 3)}は水砕スラグを岸壁の裏込めに用いた現場において、施工後 18 ヶ月間にわたり地盤調査、および水質調査を行い、標準貫入試験の結果から硬化の範囲の広がりや推定することが可能で、硬化過程での水砕スラグの強度はばらつきが極めて大きい、マクロに見れば硬化領域が広がっていくと考えられること、18 ヶ月後において 70%程度の領域が硬化していたことを示すとともに、硬化進展時の裏込めの地下水環境を明らかにした。また、室内実験を行い、水砕スラグの硬化に対する間隙水の影響として、主として pH と Ca^{2+} の影響について検討し、間隙水が海水の場合には pH が高くなくても水砕スラグは硬化すること、また、NaOH 溶液のように pH が高いだけではすぐに硬化反応は始まらないことを示した。そして、これらは間隙水中のカルシウムイオンの存在がこのような結果の違いをもたらす、海水、および NaOH 溶液の環境では硬化開始に時間がかかるものの、硬化が始まると十分な軸圧縮強度を示すと同時に間隙水の pH が上昇す

ることを明らかにした。

篠崎ら⁴⁾は室内試験によって水砕スラグの硬化に及ぼす粒度(粒子破碎), 拘束圧, アルカリ刺激, 温度等の影響を示すとともに, 液相中のイオン濃度に着目して粒子接触点数と一軸圧縮強度との関係を明らかにした。また, 地盤改良工法への適用性を確認するため, 試験施工を行い, 硬化・透水性の経時変化を追跡し, 粒径と間隙比から求めた単位体積当りの接触点数と一軸圧縮強度には現場でも室内試験での結果と同様の相関性が認められること, SCP工法におけるスラグ杭は締固めに伴う粒子破碎により, 施工後3ヶ月で著しい硬化と透水性の低下が生じることを明らかにした。

3. 水砕スラグ利用技術マニュアルの概要

マニュアルは手引書に, 既述した最新の知見を加えて改訂し, 以下の構成とした。

1. 総則
 - 1.1 適用範囲
 - 1.2 用語の定義
2. 製造方法と化学的特性
 - 2.1 製造方法
 - 2.2 成分および形状
 - 2.3 水硬性
3. 物理的特性
 - 3.1 粒度分布
 - 3.2 密度および単位体積重量
4. 力学的特性
 - 4.1 締固め特性
 - 4.2 透水性
 - 4.3 沈下特性
 - 4.4 せん断特性
5. 動的特性
 - 5.1 変形特性
 - 5.2 液状化特性
6. 環境への影響
 - 6.1 水砕スラグからの溶出
 - 6.2 海洋生物への影響
7. 設計法
 - 7.1 設計の基本方針
 - 7.2 設計に用いる諸定数
 - 7.3 裏込めに用いる場合の設計
 - 7.4 裏込め以外の用途に用いる場合の設計
 - 7.5 サンドコンパクションパイル工を対象とした設計法
8. 施工
 - 8.1 水砕スラグの品質管理
 - 8.2 使用上の留意点
 - 8.3 施工後の確認調査

参考資料

1. 水砕スラグの工学的性質に関する参考資料
2. 設計計算例
3. 使用事例

上記のうち, 特筆すべき事項や新たに章を起こした事項について, 以下に概説する。

3.1 諸特性について

(1) 化学的特性(水硬性)

水砕スラグの固結速度, および固結強度は, 粒子の細粒化やアルカリ刺激剤の添加などによって促進することが可能である。固結に影響する因子として, 粒度, アルカリ刺激, 在庫期間, 養生温度, 海水中の溶存イオン, 間隙水の移流・拡散, スラグ微粉末の添加などを挙げて詳細に解説した。

(2) 物理的特性(単位体積重量)

製鉄所における溶銑温度の変化などにより水砕スラグの土粒子密度が手引書の当時と比べてやや大きくなったことから, 後述する設計に用いる諸定数の根拠とした最近の調査データについて詳述した。

(3) 力学的特性(透水性とせん断強度)

水砕スラグは細粒分が少ないために未固結の状態では高い透水性を有するが, 固結に伴って透水性は低下する。このため, 表-1に示すように未固結状態と固結状態とで透水係数を区別した。特にSCP工に使用した場合, 締固めに伴う粒子破碎の影響によって, 裏込め等に用いた場合より固結に伴う透水性の低下が顕著となることから, これを区別して示した。

表-1 水砕スラグの透水係数

用途 固結状態	裏込め, 埋立て等	SCP工
未固結	$k=1 \times 10^0 \sim 1 \times 10^{-2}$ (cm/s)	
固結	$k=1 \times 10^{-2} \sim 1 \times 10^{-3}$ (cm/s)	$k=1 \times 10^{-6} \sim 1 \times 10^{-7}$ (cm/s)

固結した水砕スラグのせん断強度特性については, 菊池ら²⁾の研究成果から, 図-1に示すように固結した水砕スラグが残留強度に達した場合には, 強度は残留せん断抵抗角 ϕ_{d0res} によって与えられ, 最大軸差応力はこのせん断抵抗角 ϕ_{d0res} による成分と粘着力 c_m による成分からなるとした。

なお, 残留せん断抵抗角 ϕ_{d0res} は軸ひずみが25%以上になるまで圧縮し, 残留強度に達したとみなせるとして求めるものとした。

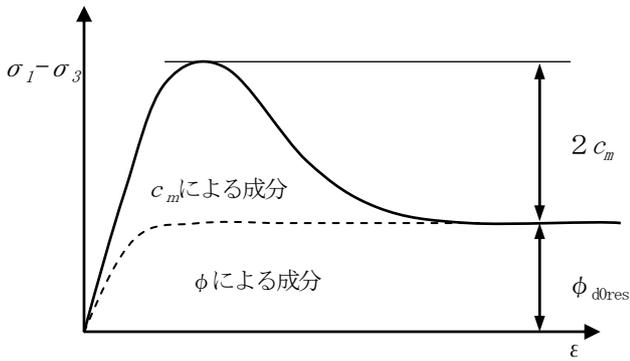


図-1 固結した水砕スラグの応力ひずみ曲線 (模式図)

(4) 動的特性 (液状化特性)

水砕スラグは固結状態によって液状化特性が大きく異なる。繰返し非排水三軸試験では固結状態によって以下の3種類の破壊形態に分類される⁹⁾。

- ①液状化
- ②遷移段階 (過剰間隙水圧からは液状化していると判断されるが、液状化破壊せず中間的な状態を示す)
- ③ネッキング破壊 (図-2)

ネッキング破壊 (液状化しない) をすると考えられる一軸圧縮強さは概ね 60~80 (kN/m²) であり、完全に固結した水砕スラグのそれは 100 (kN/m²) 以上を示すことから、完全に固結した水砕スラグは液状化しない。



図-2 固結した水砕スラグのネッキング破壊

3.2 環境への影響について

- 海水への水砕スラグ投入時の、
- ①石灰分の溶出 (pHの上昇作用)
 - ②溶出水と炭酸との反応 (中和作用)
 - ③溶出水と海水中のマグネシウムとの反応 (緩衝作用)
 - ④海水での希釈

という海水の pH に影響を与えないメカニズムを解説し、広島県因島海域で行われた浅場造成試験⁷⁾、三河湾で行われた干潟造成試験⁸⁾での調査結果、島根県中海での大規模な覆砂工事⁹⁾を紹介し、海洋生物への影響についても言及した。特に干潟造成試験については、参考資料の中で詳細に紹介した。

3.3 設計法について

設計の基本方針は、

- ①完全に固結した水砕スラグは液状化しない。
- ②水砕スラグの水硬性を期待して使用する場合、φ材から c-φ材に移行する材料として扱う。
- ③水砕スラグを SCP 工の材料として使用する場合、(現時点では) φ材として設計する。

とし、設計に用いる諸定数は表-2 に示す通りである。

設計定数		特性値
単位体積重量	湿潤	14.5 (kN/m ³)
	飽和	17.5 (kN/m ³)
せん断抵抗角		38°
粘着力 (固結した場合)		25 (kN/m ²)

設計対象を、

- ①裏込めに用いる場合 (背後地盤が液状化/非液状化)
- ②裏込め以外の用途に用いる場合
- ③SCP 工 (砂質土地盤/粘性土地盤)

に場合分けして解説した。

これらの中で、裏込めに用いる場合の土圧の計算では、水砕スラグの固結状態によって、水砕スラグの土圧は粘着力を考慮した c-φ材として算定できるとしている¹⁰⁾。この時の安定性の照査は、図-3 に示すように、水砕スラグからの土圧に対する構造物の安定と、対象とする構造物と裏込めの水砕スラグを含めた全体の滑り出しに関する行おうとした⁶⁾。

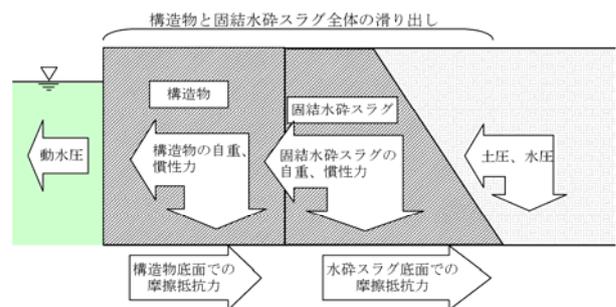
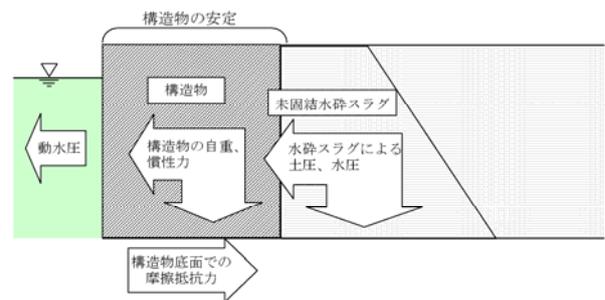


図-3 裏込めに水砕スラグを用いた場合の安定性の照査

また、SCP工(粘性土地盤)では締固め中の粒子破碎の影響によって水硬性が顕著に発現することから、固結した改良杭への応力集中や透水性の低下によるドレーン効果の低下が懸念されるため、低置換率の地盤改良への適用を避け、原則として高置換の改良に適用するとした。なお、この時の飽和单位体積重量の特性値は既往の調査結果から裏込めなどに使用した場合の特性値より大きい $\gamma_{satk}=18.5(kN/m^3)$ とした。

3.4 施工について

(1) 品質管理

水砕スラグは製造者の発行する試験成績書によって品質を確認できる。なお、製造者は定期的に有害物質の溶出試験、成分分析を実施しており、溶出試験報告書、製品安全データシート(MSDS)の発行も製造者に求めることができる。

(2) 使用上の留意点

水砕スラグは天然砂と同様の外観を呈するが、保管時・施工時・施工後において適切に利用されるかを事前に確認すべきである。これには鉄鋼スラグ協会から刊行されているガイドライン¹⁰⁾が利用できるが、主な使用上の留意点は以下の3点である。

- ①使用時の留意点(保護具の装着)
- ②固結に関する留意点
- ③高pH水の溶出に関する留意点

これらの内、③については、水砕スラグによる埋立地に排水管を設置すると高pHの間隙水が管の継目から管内に流入し、海域へ排出される可能性がある。具体的な対策を例示し、必要に応じたモニタリングを推奨した。

(3) 確認調査

裏込めや覆土に用いた水砕スラグの固結状況は、ボーリングと採取試料の強度試験によって確認できる。強度試験は三軸圧縮試験によることを基本とするが、固結した水砕スラグは強度のばらつきが大きいので、複数の三軸圧縮試験結果からは破壊基準線を包絡線によって決定することが困難な場合が多く、せん断特性の節で示した方法で残留せん断抵抗角 ϕ_{dres} と粘着力 c_d を得るとした。

なお、液状化の判定のみを行うのであれば、既述したように一軸圧縮試験だけでも判定できる。

3.5 参考資料について

港湾の施設の技術上の基準の性能規定に伴い、ケーソン式係船岸の変動状態の安定計算例を、背後地が液状化しない場合と液状化する場合とで示した他、多くの使用事例を挙げて利用者の便宜を図っている。

4. おわりに

土工用水砕スラグはグリーン購入法の特定調達品に指定され、循環型社会の形成の一端を担っている。

今回のマニュアル改訂により、水砕スラグの水硬性に期待した利用が可能になり、より経済的で合理的な港湾構造物が得られることが期待される。とはいえ、硬化過程での水砕スラグの強度は空間的なばらつきが極めて大きく、硬化時間も長いことも事実であり、より確実性の高い固結促進工法の開発が望まれている。

5. 謝辞

マニュアルの取り纏めでは(独)港湾空港技術研究所地盤・構造部 北詰地盤改良研究室長、菊池基礎工研究室長、山崎土質研究室長には特段のご指導を賜りました。

また、水砕スラグの港湾工用材料活用技術研究委員会では委員の方々から多くの貴重なご助言を頂きました。ここに記して厚く御礼申し上げます。なお、マニュアルは今秋、沿岸技術ライブラリーとして発刊の予定です。

参考文献

- 1) (財)沿岸開発技術研究センター:港湾工用水砕スラグ利用手引書, 1989.
- 2) 菊池喜昭・池上正春・山崎浩之:港湾構造物の裏込めに用いた高炉水砕スラグの経時変化に関する調査, 土木学会論文集, 第799号/Ⅲ-72, pp.171-182, 2005.
- 3) 菊池喜昭・木村淳治・水谷崇亮・永留健:高炉水砕スラグの硬化に及ぼすpH, Ca^{2+} の影響, 土木学会論文集, 第799号/Ⅲ-72, pp.195-200, 2005.
- 4) 篠崎晴彦・松田博・坂井悦郎・小野幸一郎・鈴木操・中川雅夫: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, Vol62, No.4, pp.858-869, 2006.
- 5) 篠崎晴彦・松田博他:高炉水砕スラグの硬化が液状化特性に及ぼす影響, 第40回地盤工学研究発表会 平成17年度発表講演集, No.294, D-07, pp.587-588, 2005.
- 6) (財)沿岸技術研究センター, 事前混合処理技術マニュアル, 1999.
- 7) 国土交通省中部地方整備局・愛知県水産試験場・(株)日本海洋生物研究所:干潟造成適性調査報告書, 2006.
- 8) 宮田康人・沼田哲始・高橋達人・豊田恵聖・佐藤義夫:広島因島における浅場造成試験, 第3回海環境と生物および沿岸環境修復技術に関するシンポジウム発表論文集, pp.153-158, 2004.
- 9) 宮田康人・沼田哲始・高橋達人・豊田恵聖・佐藤義夫:高炉水砕スラグ覆砂材の開発, (社)日本鉄鋼協会社会鉄鋼工学会 2002年春季シンポジウム論文集, pp.24-27, 2002.
- 10) 鉄鋼スラグ協会:鉄鋼スラグ製品の管理に関するガイドライン, 2007.