

独立行政法人港湾空港技術研究所

港湾空港技術研究所 報告

REPORT OF
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH
INSTITUTE

Vol.49 No.2 June 2010

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN

INDEPENDENT ADMINISTRATIVE INSTITUTION,
PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

港湾空港技術研究所報告 (REPORT OF PARI)

第 49 卷 第 2 号 (Vol. 49, No. 2), 2010年6月 (June 2010)

目 次 (CONTENTS)

固結特性を有する粒状材を用いた SCP改良地盤の安定性に関する実験的検討 高橋英紀・森川嘉之 3	
(Experimental Study on Stability of Ground Improved by SCP Method Using Solidified Granular MaterialHidenori TAKAHASHI, Yoshiyuki MORIKAWA)	
高炉水砕スラグ硬化促進工法の現場適用性の検討 菊池喜昭・岡祥司・水谷崇亮 21	
(Examining Field Application of Solidification Acceleration method of Granulated Blast Furnace SlagYoshiaki KIKUCHI, Shoji OKA, Taka-aki MIZUTANI)	
One-Dimensional Model for Undertow and Longshore Current Velocities in the Surf ZoneYoshiaki KURIYAMA..... 47	
(戻り流れ速度・沿岸流速に関する数値モデル)栗山善昭	
Numerical Simulation of Cyclic Seaward Bar MigrationYoshiaki KURIYAMA..... 67	
(沿岸砂州の繰り返し沖向き移動に関する数値計算)栗山善昭	
Prediction of Cross-Shore Distribution of Longshore Sediment Transport Rate in and outside the Surf Zone Yoshiaki KURIYAMA..... 91	
(砕波帯内外における沿岸漂砂量の岸沖分布の推定)栗山善昭	
台風来襲時の東京湾羽田沖における底泥移動現象 中川康之・有路隆一.....107	
(Fine sediment transport process during a storm event induced by typhoon attack in Tokyo BayYasuyuki NAKAGAWA, Ry-ichi ARIJI)	
Hysteresis loop model for the estimation of the coastal water temperatures - by using the buoy monitoring data in Mikawa Bay, JAPAN - Hong Yeon CHO, Kojiro SUZUKI, Yoshiyuki NAKAMURA.....123	
(沿岸水温を推定するヒステリシスループモデルの開発 ー三河湾ブイモニタリングデータを活用してー) 趙烘輦(チヨホンヨン)・鈴木高二朗・中村由行	

高炉水砕スラグ硬化促進工法の現場適用性の検討

菊池 喜昭*・岡 祥司**・水谷 崇亮***

要 旨

本報告では、港湾工事でケーソンの裏込めに用いる高炉水砕スラグの硬化促進工法を現場に適用する場合の課題について検討した。

はじめに、硬化促進のための添加剤について検討した。高炉水砕スラグの硬化を促進するには、スラグ微粉末のほかに、水酸化カルシウムも有望であることが分かった。本研究では、硬化促進添加剤としてはスラグ微粉末に限って検討することにした。スラグ微粉末を高炉水砕スラグに添加する硬化促進工法を現場に適用する場合の課題として、施工時の材料分離、施工後の材料分離、混合状態の良否による強度発現傾向の違い、間隙水の移動が硬化に及ぼす影響、地下水の淡水化が硬化に及ぼす影響について実験室内で検討した。

検討の結果、高炉水砕スラグとスラグ微粉末の混合物は堆積後には分離する可能性が低い、施工時には分離する可能性があることが分かった。また、分離した場合には、硬化促進効果が低下する傾向があることが分かった。そこで、施工時の分離抵抗性を高めるため、「事前混合」処理を行うことを推奨する。「事前混合処理」とは、含水比 10%程度の高炉水砕スラグと 8~10%の高炉スラグ微粉末を混合し、一週間程度気中養生させる処理のことである。この処理をすることによって、施工時の材料分離が抑制されるほか、硬化促進効果が十分にあることが分かった。

「事前混合処理」を施した高炉水砕スラグは、海水下で硬化しやすく、淡水下では硬化しにくい、海水環境に 1.5 カ月以上置かれていれば、液状化対策に必要な硬化強度を発現することが分かった。

キーワード：高炉水砕スラグ，スラグ微粉末，硬化促進工法，海水，裏込め，液状化対策

* 地盤・構造部 部長

** 地盤・構造部 基礎工研究チーム 研究員

*** 地盤・構造部 主任研究官

Examining Field Application of Solidification Acceleration method of Granulated Blast Furnace Slag

Yoshiaki KIKUCHI*
Shoji OKA**
Taka-aki MIZUTANI***

Synopsis

Issues on the solidification acceleration method of granulated blast furnace slag (GBFS), which is used to the backfill of quay wall, were examined for the application of this method to the field.

At first, additives for the solidification acceleration of GBFS were examined. Not only micro powder of furnace slag but also calcium hydroxide ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) were promising material for the additives. But in this research, only micro powder of furnace slag was investigated for the additives for the solidification acceleration of GBFS, because the chemical contents of the powder is the same as GBFS and it will be less problems for the environment. The issues on the application of this method to the fields were the separation of the materials during pouring and after sedimentation, effects of the mixing condition and flow of the pore water, and the change of the quality of the ground water to the strength development of GBFS. These issues were examined in the laboratory.

The possibility of the material separation of micro powder of furnace slag and GBFS after sedimentation was found to be low, but that during pouring was high. And the material separation causes the reduction of the effect of solidification acceleration. Therefore to improve the resistance of the material separation, Prior Homogeneous Mixing Treatment (PHMT) is recommended. Procedure of PHMT is; Mixing the 8 to 10% of power furnace slag to GBFS with 10% water content ratio and the mixture is cured in the air for about a week. This treatment decreases the separation of the material during pouring and has no reduction of the ability of the solidification acceleration of GBFS.

GBFS with PHMT has a great tendency to solidify under sea water condition than pure water condition. It has enough strength for the counter measure for the liquefaction if it remained under sea water more than one and a half months.

Key Words: granulated blast furnace slag, micro powder of furnace slag, solidification acceleration, sea water, backfill, counter measure for liquefaction

* Director, Geotechnical & Structural Engineering Department
** Research Engineer, Foundations Group, Geotechnical Division, Geotechnical & Structural Engineering Department
*** Senior Research Engineer, Geotechnical Division, Geotechnical & Structural Engineering Department

目 次

要 旨	21
1. はじめに	25
2. 高炉水砕スラグの硬化に関する既往の研究	25
3. 高炉水砕スラグ硬化促進工法についての検討	28
3.1 各種添加物による硬化促進性の違い	28
3.2 高炉水砕スラグの硬化に及ぼす二酸化炭素の影響	29
4. 高炉スラグ微粉末を用いた高炉水砕スラグ硬化促進工法の現場適応性の検討	31
4.1 スラグ微粉末を用いた場合の施工時の材料分離と濁り	31
4.2 堆積後のスラグ微粉末の分離の可能性	33
4.3 スラグ微粉末が分離した場合の硬化の様子	34
4.4 間隙水の移動を伴う環境下での硬化促進工法による水砕スラグの硬化特性	36
4.5 淡水化の進行速度が変化する場合の硬化促進工法による水砕スラグの硬化特性	40
5. 結論	44
6. おわりに	45
参考文献	45

1. はじめに

高炉水砕スラグ（以下水砕スラグ）は水と反応して硬化する性質を持っている。この性質は、潜在水硬性として知られている。

これまでに港湾施設の裏込めに用いられた高炉水砕スラグはそのほとんどについて硬化していることがわかっている(菊池・中島・木村・水谷 2006)。しかし、施工直後から追跡調査を行った結果によると、硬化にはかなりの時間を要することがわかった(菊池・池上・山崎 2005)。

港湾において裏込めに用いた水砕スラグが必ず硬化するのであれば、その特長を生かして、液状化対策等に水砕スラグを利用できるようになる。しかし、上記のように、硬化はするものの、硬化に時間がかかり、また、硬化部分と未硬化部分とが混在する状況では、硬化する材料としての取り扱いが困難となるので、何らかの対応が必要となると考えられる。

そこで、硬化促進のために、高炉スラグ微粉末(以下スラグ微粉末)を添加したところ、特に海水環境下で、著しい硬化促進効果があることがわかった(菊池・中島・木村・水谷 2006)。

しかし、現場においてスラグ微粉末を添加するには、いくつかの技術的な課題が考えられること、また、スラグ微粉末以外に硬化促進効果の高い材料があるかどうかを検討することが必要である。

そこで本報告は、はじめに、水砕スラグの硬化促進に効果がある可能性のある添加物について、スラグ微粉末以外の材料について検討した結果を示す。また、大気から間隙水である海水中に溶け込む二酸化炭素が高炉水砕スラグの硬化に及ぼす影響を検討した結果を示す。

次に、実施時の硬化促進工法として、スラグ微粉末を用いることを考える。港湾工事の施工を実際に行う際、施工時、施工後のそれぞれの場合に課題となる事項について検討する必要がある。

施工時の問題としては、水砕スラグの投入時に起こる材料分離と濁りの問題について検討した。施工後は干満によってケーソンのマウンドを通じて、海水の出入りが生じ、この水流の影響により、添加物のスラグ微粉末と水砕スラグが分離する可能性があること、また締切り後雨水によって海水が淡水化する影響が懸念される。そこで、施工後の材料分離の可能性と、仮にスラグ微粉末が分離したときには硬化促進の程度がどのように変化するかについて検討した。その結果を踏まえ、小型土槽を用いて実際の現象を簡易に模擬して、水流を与えた場

合に水砕スラグの硬化の程度がどのように変わるか、さらに、海水から淡水化する期間を変えた場合の水砕スラグの硬化の程度がどのように変わるかを調べた。これらの検討結果をもとに、水砕スラグ硬化促進工法の実施工への適用方法を提案した。

2. 高炉水砕スラグの硬化に関する既往の研究

港湾・空港等の工事では、建設資材として、土、砂、石等の天然資材が大量に消費されることから、建設副産物や産業副産物等を活用するための技術開発が盛んに行われており、技術指針化されている(国土交通省港湾局 2004)。

水砕スラグは、鉄鋼生産に伴い副生する産業副産物の一つであり、天然の砂に比べて軽量、せん断抵抗角が大きいという物理的特性があるため、港湾用の土工用材料としても有用であることから、早くから有効利用について検討が行われており、1989年に港湾工用水砕スラグ利用手引書(沿岸開発技術研究センター、1989)が作られた。

この手引書がまとめられた時には、水砕スラグは硬化する可能性のある材料であることが認められていたが、硬化しないものとして設計することを標準とした。なお、硬化した水砕スラグの強度の長期的な特性についても明らかになっていなかった。

菊池・高橋(1998)は1997年に、港湾工事の裏込めおよび築堤に用いられた高炉水砕スラグ地盤の地盤調査を行った。この調査の結果から、港湾地域においては地下水面より下にある水砕スラグについては長期的には硬化する傾向にあると判断している。また、この調査では、原位置の水砕スラグの単位体積重量や硬化後の一軸圧縮強さ、 N 値の変化について検討している。この調査では、硬化した水砕スラグの透水係数は 10^{-3} cm/secのオーダーであり、長期間経過しても大きくは変わらないことも認められた。

その後の多くの現場の調査結果を総合し、港湾工事で用いられた高炉水砕スラグは概ね硬化していることを明らかにした(沿岸開発研究センター 2007)。

菊池・池上・山崎(2005)は、港湾工事でケーソンの裏込めに水砕スラグを用いた現場における施工から18ヶ月に渡る追跡調査を行った。

図-1に施工箇所の断面の概略を示す。この裏込めは、ガット船により水中に直投された。水砕スラグ投入直後に埋立土も投入された。この部分が完全に締め切られるには半年以上の時間差があったが、土砂投入が施工直後

に行われたため、水砕スラグは投入直後に外海とは事実上遮断された状態にあったと考えられる。

この調査では、定期的にボーリング、サンプリングをするとともに、図-2 に示す箇所で水質調査を行った。水質調査は、水砕スラグ層内の水質環境として図-2 に示す4点と、外域の海水環境の調査として、図示していないが、当該ケーソン直前面の海水(No.1)、及び水砕スラグ施工域から遠く離れた地点の海水(No.2)において行った。

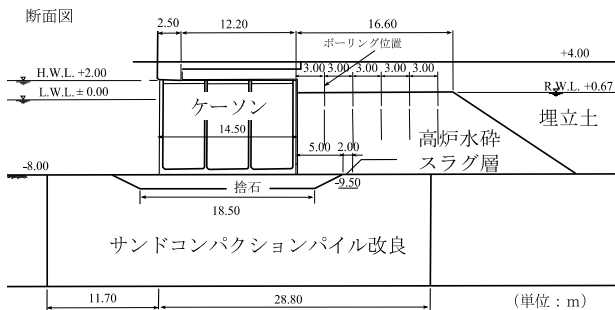


図-1 調査位置の断面図

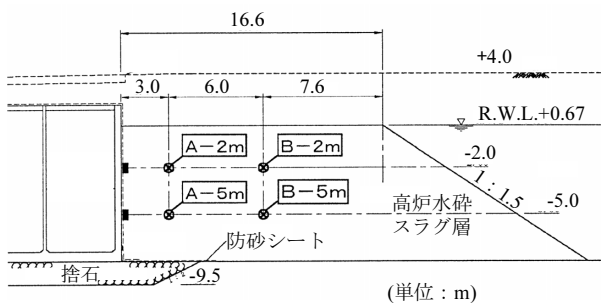


図-2 水砕スラグ水質調査位置

図-3 に各地点の pH の変化について示す。周辺海域における pH は概ね 8 となっている。それに対し、水砕スラグ層内の pH は、地点により多少差があるが、全体的に高くなる傾向がある。特に CDL.-2m と比較的浅い地点では、3 ヶ月後までに pH 12 くらいにまで上昇し、安定した状態となっている。一方、CDL.-5m 付近では pH が比較的 low 低く、特に、A-5m の地点では、11 ヶ月後にも pH 8 が測定されるくらいに pH の状態が不安定である。

図-4 に塩化物イオンの変化を示す。一般に、海水中には塩化物イオンは約 19,000 mg/L 溶けている。周辺海水中では、塩化物イオンはほぼ一定であるが、水砕スラグ層内では、浅部(CDL.-2m)では 3 ヶ月以降、深部(CDL.-5m)でも 4 ヶ月以降塩化物イオン濃度が低下している。このことからすると、CDL.-2m 付近では 3 ヶ月程度で、CDL.-5m 付近では 4 ヶ月程度で海水が雨水により真水に置き換わったものと考えられる。

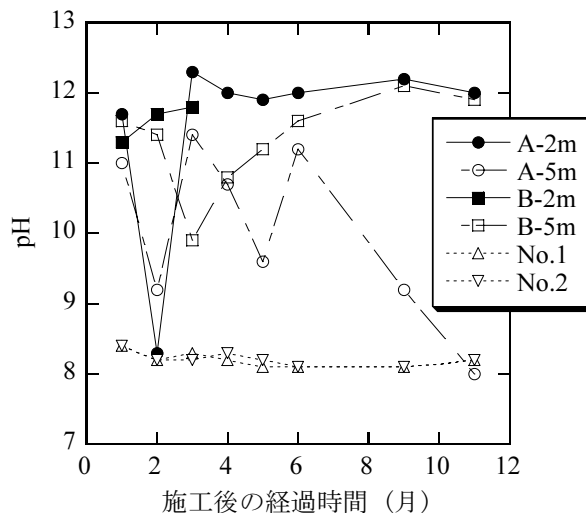


図-3 施工後の pH の変化

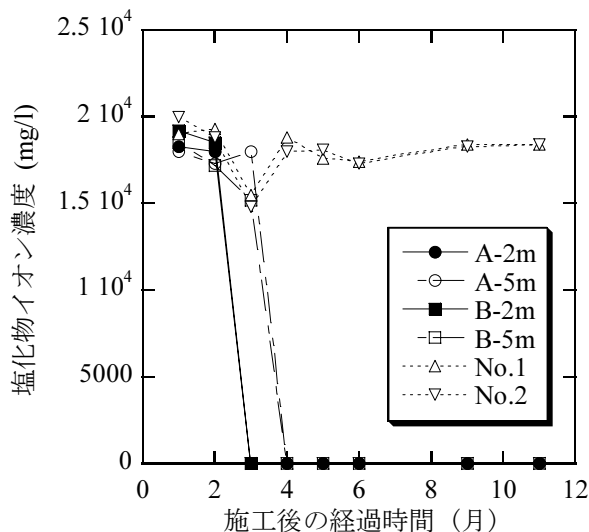


図-4 施工後の塩化物イオンの変化

図-5 にこの地点での地盤調査結果をもとに硬化領域の広がりについて図化した結果を示す。ボーリング結果、コアの観察などからすると水砕スラグが硬化する範囲は時間とともに増加するものの、硬化している部分に挟まれて硬化していないところがあることや硬化強度には比較的大きなばらつきがあることが確認された。このようなことから、水砕スラグは非常に複雑な形で硬化部分と非硬化部分とが混在しているものと考えられる。このため、硬化層と非硬化層とに分類することは比較的難しいが、硬化領域がだんだんと広がり硬化していると判断できる層ができていくことは明らかであると考えられる。硬化領域の広がりについてみると、3 ヶ月程度で残留水位付近～CDL.±0m 付近から完全硬化層が現れる。

このとき、半硬化領域は完全硬化領域の下の CDL.-2m 付近まで広がっていると考えられる。その後硬化領域はだんだんと広がり 18 ヶ月後には、完全硬化領域は水砕スラグ層の上面から CDL.-5m 付近にまで達する。しかし、その下の約 3m 区間については部分的にしか硬化が観察されていない。

以上のことから、今回のような形でケーソンの裏込めに用いられる水砕スラグにおいては、広い範囲が硬化するにはそれなりの期間が必要であること、また、ケーソン下端部に近いところは硬化の発現が遅くなることがありうることが予想される。

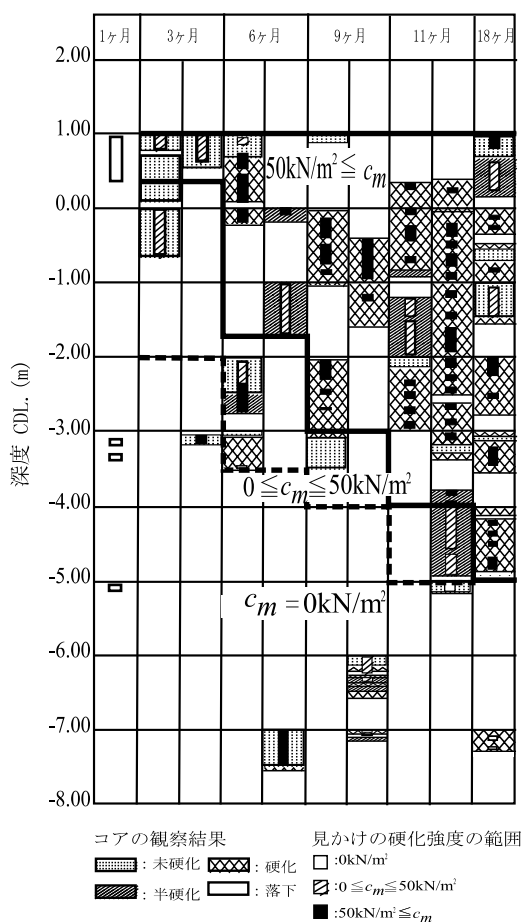


図-5 裏込めに用いた水砕スラグの硬化進展状況

そのため、水砕スラグの硬化を期待した設計を行うためには、何らかの方法によって硬化を促進させるか、確実に硬化させる方法を検討することが必要である。

高炉水砕スラグの硬化メカニズムについても多くの研究がなされているが、いまだに不明な点がある。水砕スラグの硬化特性は、潜在水硬性と呼ばれている(沿岸開発技術研究センター, 1989). 参考文献(鐵鋼スラグ協会, 1983)によると、水砕スラグの特性のひとつはガラス質で

あることであり、結晶質としては安定なケイ酸塩 [SiO₄] が、結晶質構造に比較して不安定な状態にあり、化学的な反応性に富んでいるということである。また、このような性質の水砕スラグを硬化させる場合、アルカリ刺激剤を添加してガラス構造を形成している [SiO₄] のネットワークを切断することが必要であるとされている。ネットワークの切断が一旦始まると水砕スラグが含有している CaO や MgO などのアルカリ性物質が溶出し、雰囲気アルカリ性に保たれるためネットワークの切断は継続され、ガラスの水への溶解が進み、その後は、ポルトランドセメントの硬化と同等なメカニズムで硬化が進んでいくとしている。

西ら(1982)は水砕スラグの凝結(硬化)に及ぼす海水の影響を検討した。ここでは、海水のほかに海水に消石灰を添加した弱アルカリ海水も間隙水として用いている。その結果、アルカリ度の高い養生水を用いるほど潜在水硬性が発揮されやすく、通常の海水ではほとんど強度が大きくならないとしている。

来山(2003)は水砕スラグの水硬性が強度、透水性に及ぼす影響を調べている。松田ら(2004)は、約一年間養生し、所定期間ごとに圧密排水三軸試験を実施し、強度定数の変化を調べている。それらの結果によると、養生水が海水の場合も水道水の場合も強度定数の変化量や変化の傾向はほぼ等しく、粘着力 c_d は一年の間に緩やかに上昇し続け、内部摩擦角は 180 日目くらいまでは上昇するもののその後は一定となる結果が得られている。

以上の結果はいずれも間隙水がアルカリ性の環境では水砕スラグは硬化するが、海水の場合には、アルカリ性の環境に比べて硬化しにくいことが示されている。この結果は、水砕スラグの利用手引書(沿岸開発技術研究センター, 1989)に記載されている以下に示すような水砕スラグの硬化条件を裏付けるものとなっている。

- 1) 高炉水砕スラグが硬化するのに十分な量の水が存在すること。
- 2) pH が 11 以上のアルカリ性の環境であること。

つまり、海水中では、pH が変化しにくい(概ね pH が 8)ので、港湾環境では 2)の条件が満たされていることが不確実であると一般には考えられている。

しかし、先に述べたように、港湾地域で用いられた水砕スラグについて施工後 6~12 年ほど経過した時の地盤調査をしたところ、硬化したと考えられる事例が見られた(菊池 2003)ほか、海水と接触する環境下で用いられた高炉水砕スラグが硬化した事例は多く見られており、従来の室内実験等における研究結果とは矛盾するかのよう結果が得られている。

菊池ら(2004)は、pH と海水が水砕スラグの硬化に及ぼす影響を調べた。その結果によると、水砕スラグは海水環境下では pH が低くても硬化すること、逆に pH が高いという理由だけではいつ硬化が始まるかは明確ではないことを示した。

さらに、菊池・中島・木村・水谷 (2006)は室内実験を実施し、水砕スラグの硬化に及ぼす間隙水の影響について、間隙水として、イオン交換水(IEW), 人工海水(ASW)を、アルカリ添加剤として高炉セメント、スラグ微粉末を用いて供試体を作製、養生し、水砕スラグの経時的な一軸圧縮強さの変化や、間隙水の pH に着目した室内実験を行った。その結果、海水条件下では、高炉スラグ微粉末を添加させることが高炉水砕スラグの硬化促進に有効であることがわかった(図-6)。

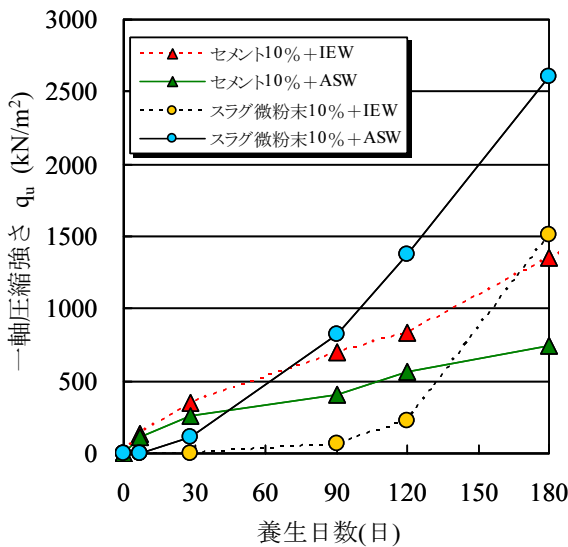


図-6 セメント添加とスラグ微粉末添加の場合の硬化促進効果

3. 高炉水砕スラグ硬化促進工法についての検討

3.1 各種添加物による硬化促進性の違い

水砕スラグにスラグ微粉末を添加した場合とセメントを添加した場合とで硬化促進の効果がどのように異なるかを図-6 に示した。セメントを添加した場合にはすぐに硬化反応が生じるが、スラグ微粉末では2週間以上たってから硬化が始まる傾向にあることがわかった。

スラグ微粉末以外によりよい材料があるかどうかを検討するため、ここでは、石灰系地盤用固化材1種類(消石灰(Ca(OH)₂))とマグネシウム系地盤用固化材2種類(酸化マグネシウム(MgO), 水酸化マグネシウム(Mg(OH)₂))を添加した場合の水砕スラグの硬化特性について検討した

(菊池ら 2009)。

用いた水砕スラグは $\rho_s = 2.845 \text{ g/cm}^3$, $\rho_{\text{dmax}} = 1.508 \text{ g/cm}^3$, $\rho_{\text{dmin}} = 1.175 \text{ g/cm}^3$, $D_{15} = 0.28 \text{ mm}$, $D_{50} = 0.38 \text{ mm}$ である。図-7 に粒径加積曲線を示す。

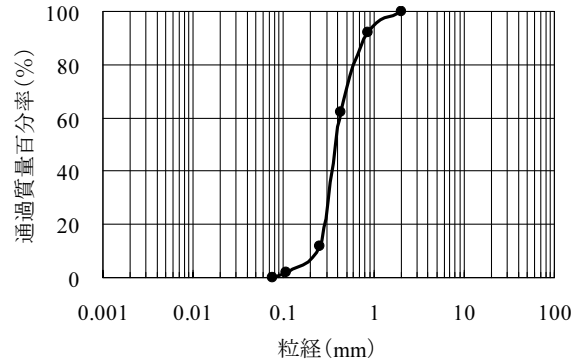


図-7 用いた水砕スラグの粒径加積曲線

間隙水としては、人工海水(pH8.2)とイオン交換水(pH7.0)の2種類を用いた。実験では、直径5cm, 高さ13.5cmのソフトモールドに122.54gの人工海水またはイオン交換水と、それぞれ13.61gの固化材を入れて良く混ぜたところに、乾燥質量272.31gの水砕スラグを入れてキャップをして密閉した後で、全体が均質になるように良く振り、固体の高さが10.5cmとなるように調整した。このようにして供試体を準備すると、間隙水が30cm³ほど上澄みとして残った。このようにして供試体を準備すると、水砕スラグのみの相対密度は約50%となる。また、それぞれの固化材の添加率は、水砕スラグに対して質量比で5%となる。この供試体を20℃の定温とした室内に設置した水槽中で90日間養生し、適宜上澄み液のpHと一軸圧縮強さを調べた。

図-8 に pH の時間変化を示す。いずれのケースもCa(OH)₂を添加した場合にpHが高く、Mg(OH)₂を添加した場合には、pHが低めである。ただし、いずれのケースでもpHは12前後以上に上昇しており、高炉水砕スラグが硬化しやすいといわれているpH11を十分に超えている。このような傾向は、スラグ微粉末やセメントを添加した場合と同様であった。

図-9に一軸圧縮強さの時間変化を示す。間隙水を人工海水とした場合には、Ca(OH)₂を添加した場合とMg(OH)₂を添加した場合に顕著に硬化が進む。しかし、MgOではあまり圧縮強さが増加しない傾向にある。また、Mg(OH)₂の場合には、初期圧縮強さの発現が遅れる傾向にある。間隙水がイオン交換水の場合には、MgOを添加した場合に圧縮強さが高く、ついでCa(OH)₂とMg(OH)₂で圧縮強さが発現する。ただし、人工海水の場合に比べ

て、圧縮強さは小さく、硬化の開始も遅い傾向にある。

これらの結果からするとスラグ微粉末やセメント添加の実験で見られたように、添加物によって硬化促進効果が現れやすい間隙水に違いがあることがわかる。また、港湾の裏込めに用いる場合には、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ も有望であることがわかる。マグネシウム系の固化材の場合には、硬化の開始が遅い、強度が小さいなどの理由で硬化促進の効果はあまり期待できない。

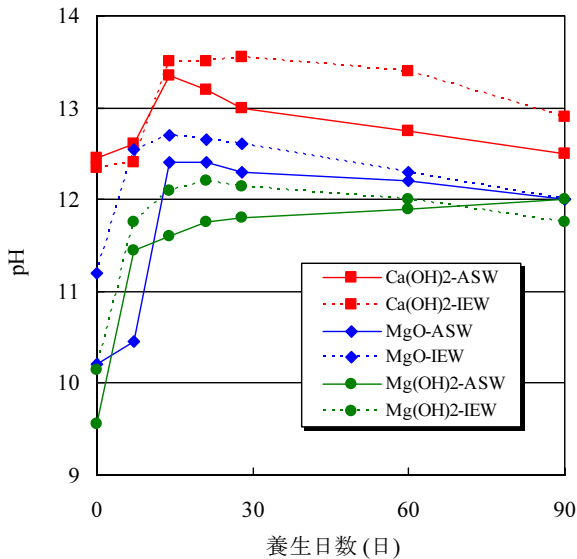


図-8 pHの経時変化

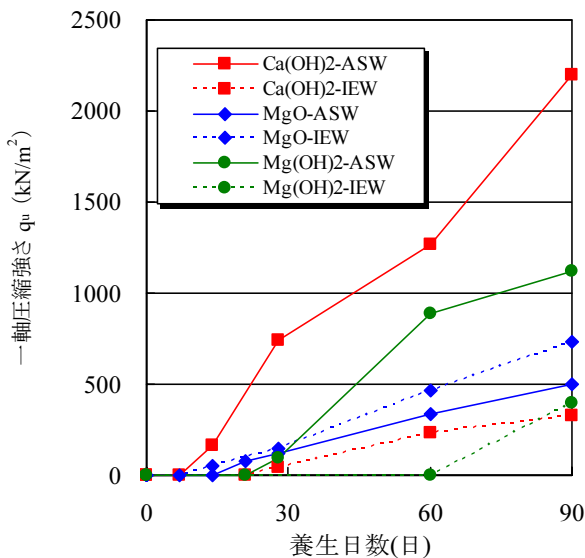


図-9 一軸圧縮強さの経時変化

3.2 高炉水砕スラグの硬化に及ぼす二酸化炭素の影響

図-5に示した現地での高炉水砕スラグの硬化状況をみ

ると地下水面付近から硬化が始まっていることが分かる。これ以外の現場においても、硬化は比較的浅いところから開始している事例が多い(沿岸開発技術研究センター, 2007)。

地下水面近傍から硬化が始まることの要因の一つとして、空気中の二酸化炭素が硬化に影響を与えていることが考えられる。それはカルシウムイオンに二酸化炭素を吹き付けると炭酸カルシウムが生じるというメカニズムである可能性がある。

そこで、二酸化炭素が硬化促進に及ぼす影響について検討した。この実験では、早期の硬化が期待される、水砕スラグにスラグ微粉末を7.5%均質に混合した「均質混合」水砕スラグと、水砕スラグのみの供試体を作製し、二酸化炭素環境下、窒素環境下、大気環境下で養生し、硬化強度の違いを比較検討した。

実験に用いた水砕スラグは土粒子密度 $\rho=2.808 \text{ g/cm}^3$ 、最小密度 $\rho_{\min}=1.199 \text{ g/cm}^3$ 、最大密度 $\rho_{\max}=1.562 \text{ g/cm}^3$ である。粒径加積曲線を図-10に示す。平均粒径 $D_{50}=0.74\text{mm}$ である。

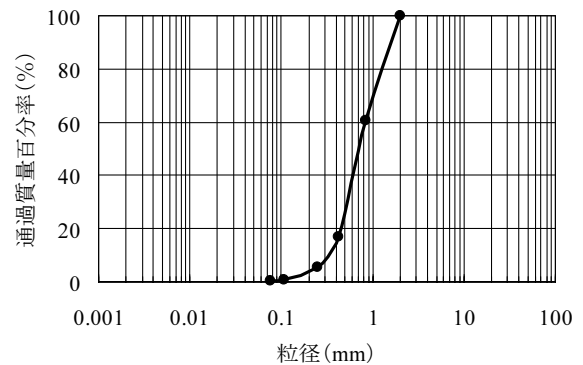


図-10 水砕スラグの粒径加積曲線

スラグ微粉末は $\rho_s=2.89\text{g/cm}^3$ である。間隙水は人工海水を使用した。

直径5cm、高さ13.5cmのソフトモールドに試料が8cmの高さになるように詰めた。このとき、高炉水砕スラグおよび「均質混合」試料はあらかじめ含水比を10%にし、所定量をソフトモールドに入れ、試料が被る程度に人工海水を流しこみ、千枚通しで一定回数突いた。このようにして3層で地盤を作製し、最終的に、上澄み液が100cc程度残るようにした。このときの上澄み液の厚さは5cm程度である。それぞれの供試体の相対密度は47%となった。これらのソフトモールドは上澄みの上面が気体に触れるように蓋をしないで置き、二酸化炭素と、窒素を流す条件の供試体については、気体を流すためのホースのついた密閉容器に入れ、容器の中が大気圧と等しい状態の圧力

のそれぞれの気体で充満され、循環を維持した状態とした養生を行った。大気条件の場合には、蓋をしない状態で実験室内に静置させた。

なお、それぞれの気体中の二酸化炭素の量を考えると、窒素環境下では二酸化炭素が全く含まれておらず、大気中では、0.03%の二酸化炭素が含まれており、二酸化炭素中で養生したものは、100%二酸化炭素と接触する状態にあった。

所定の養生時期ごとに、上澄み液のpH測定と山中式標準型簡易土壌硬度計(以下山中式硬度計)で貫入硬度を供試体上面と供試体上面から4cmの深さのところ(中間部)で測定した。

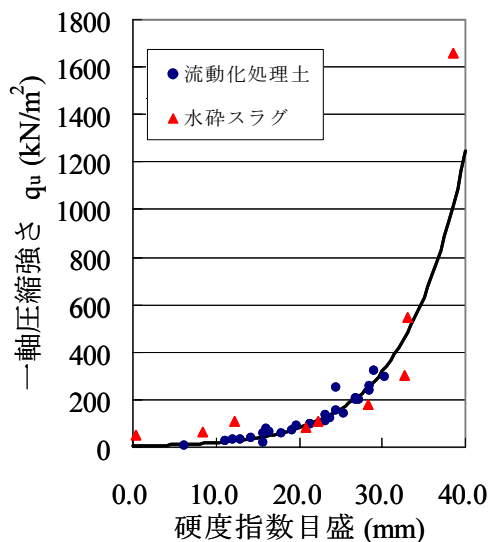


図-11 山中式硬度計の貫入量と一軸圧縮強さの関係

山中式硬度計は測定器の先端についている円錐を地盤中に貫入させて、地盤の支持力強度を推定するものであり、その指標として硬度指数目盛を用いている。これまで流動化処理土を用いて、硬度指数目盛と一軸圧縮強さの関係について検討されてきている(土木研究所 2007)。図-11には硬度指数目盛と流動化処理土の一軸圧縮強さのほかに、今回、我々が調べた水砕スラグの一軸圧縮強さと硬度指数目盛も示した。水砕スラグの場合には、硬化がまだらに進行することがあるため、図-11に示した一軸圧縮強さと硬度指数目盛の関係には多少ばらつきがあるが、全体の傾向としては、流動化処理土と似た関係にあることが分かる。そこで、ここでは、図-11に示した近似曲線を用いて硬度指数目盛から一軸圧縮強さを推定することにした。

各気体を用いた養生試験は56日間実施した。この間、均質混合した水砕スラグでは供試体の硬化が見られたが、

水砕スラグだけの供試体では、硬化が見られなかった。そこで、均質混合処理した水砕スラグについてのみ強度の変化とpHの変化について議論する。

図-12に上面と中間部で均質混合した水砕スラグの換算一軸圧縮強さの時間変化を示す。図-12によると、気体の違いによる換算一軸圧縮強さの結果は、上面、中間部ともに窒素養生が一番強く、次いで大気養生、二酸化炭素養生となった。また、上面と中間部を比較すると中間部のほうが強度の発現が遅いが、養生56日経過するとほぼ同じ強度が発現することがわかる。これらの結果からすると、二酸化炭素は水砕スラグの硬化には全く寄与していないことが分かる。

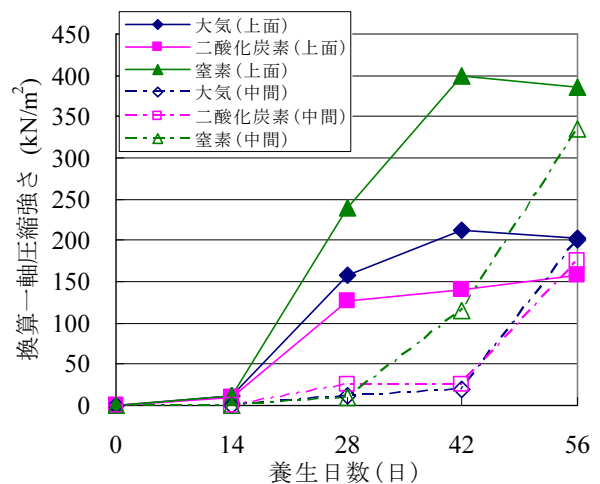


図-12 換算一軸圧縮強さの経時変化

図-13にpHの時間変化を示す。図-13のpHの結果からは、窒素養生と大気養生ではpHは11~12であったが、二酸化炭素養生はpH6程度であった。このように二酸化炭素の環境下では、水砕スラグは弱酸性の環境下となる。しかし、図-12と図-13を見比べてみても、また、それぞれの気体中の二酸化炭素濃度を考えてみても、二酸化炭素が水砕スラグの硬化を促進しているわけではなく、またpHが低いことが水砕スラグの硬化を妨げているとも言えない。

また図-14、図-15に56日後のそれぞれの供試体の外観を示す。図-14の供試体の概観を見ると、窒素、大気養生の供試体では、従来の観察と同様に、時間とともに青灰色になる様子が見られた。一方、二酸化炭素養生のものについては上面付近から層状に黒く変色していた。この黒く変色した部分は必ずしも硬化しているわけではなく、黒い部分の変色は硬化に関係していないものと思われる。図-15の水砕スラグのみの供試体については、(b)、(c)とも図-14に比べて変色の程度が弱くなっていた。

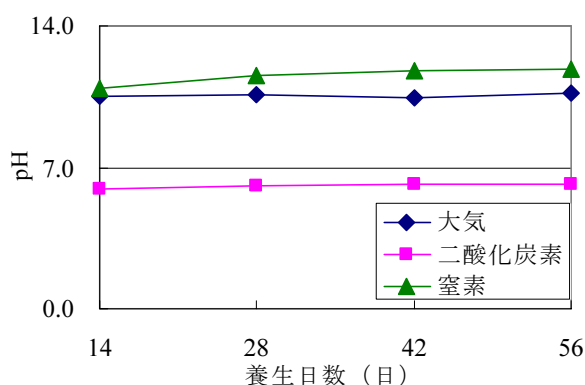
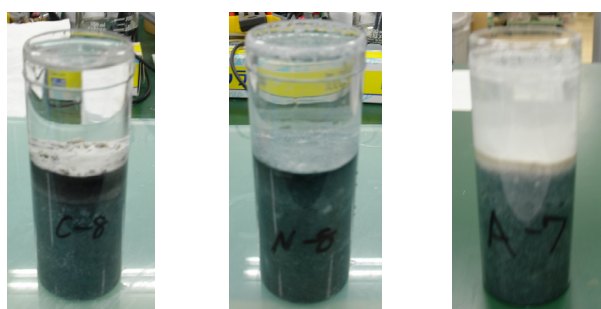
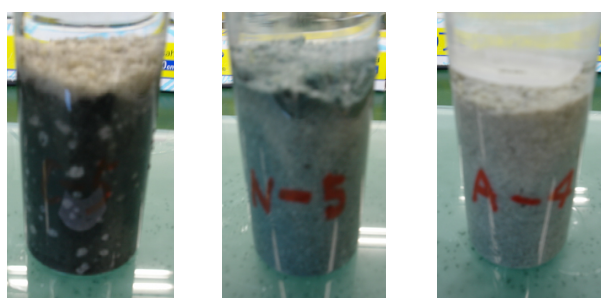


図-13 pHの経時変化



(a)二酸化炭素 (b)窒素 (c)大気

図-14 56日後の供試体の様子 (均質混合)



(a)二酸化炭素 (b)窒素 (c)大気

図-15 56日後の供試体の様子 (水砕スラグのみ)

4. 高炉スラグ微粉末を用いた水砕スラグ硬化促進工法の現場適用性の検討

これまでの研究成果から、スラグ微粉末あるいは水酸化カルシウムを添加すると海水条件下での高炉水砕スラグの硬化が促進されることが分かった。これらの添加物はいずれも粉末状である。

粉末状の材料と水砕スラグのような砂のような材料を混合して水中に投入しようとする施工時に材料分離する可能性があるほか、水流によっても材料分離すること

が考えられる。

また、ケーソンの裏込めの環境下では、マウンドなどを通じて水流が生じるため、間隙水が停留状態にはないことになる。さらに、図-4に示したように、当初は海水環境にある場合でも長期的には淡水化する状況にある。

硬化促進工法を実用に供するためには、以上のような環境条件で、水砕スラグがどのように挙動するかを把握することが必要である。

そこで、ここでは、硬化促進のための添加剤についてはスラグ微粉末に絞って、以下の5項目について検討を行った。ここで、添加剤をスラグ微粉末に限って検討するのは、スラグ微粉末は水砕スラグと同じ場所で生産されるため、材料の調達が簡便であることと、水砕スラグとスラグ微粉末はもとが同じ材料であるため、化学成分が複雑化しないことによるものである。

- 1) 施工時の材料分離の可能性
- 2) 施工後の水流による材料分離の可能性
- 3) スラグ微粉末が分離した場合の水砕スラグの硬化特性
- 4) 水流が水砕スラグの硬化に及ぼす影響
- 5) 地下水の淡水化が水砕スラグの硬化に及ぼす影響

4.1 スラグ微粉末を用いた場合の施工時の材料分離と濁り

これまでの研究より、水砕スラグの硬化促進工法として、海水環境下ではスラグ微粉末を均質に混ぜれば有効であることがわかっている。この工法を「均質混合」処理と呼ぶこととする。

ここで用いることを検討しているスラグ微粉末は比表面積が $5000 \sim 7000 \text{ cm}^2/\text{g}$ のものである。この ρ_s はおおむね 2.85 g/cm^3 であるので、スラグ微粉末が球状をしており、細孔がないとすると直径はおおよそ $4 \mu\text{m}$ となる。このため、スラグ微粉末と水砕スラグを混合したものを実際に現場で施工する場合、両者が分離し、スラグ微粉末の影響で濁りが発生することが懸念される。

この対策として、含水比10%の水砕スラグと8%程度のスラグ微粉末を均質に混合し一定期間気中養生することで、水砕スラグとスラグ微粉末の間に、弱い水硬性を發揮させることによって付着させ、材料分離、それに伴う濁りの発生を抑制することを検討した。ここでは、この処理を「事前混合」処理と呼ぶこととする。

ここでは、「事前混合」処理した水砕スラグを、どの程度気中養生すれば濁りの発生を抑制できるかについて、目視と濁度計を用いて検討した。

実験に用いた水砕スラグ、スラグ微粉末は3.2で使用し

たものと同様である。

実験に使用した濁度計は最大測定容量が3,000mg/l であり、水中微粒子の混入度を光の透過光量の変化として測定するもので、発光部に発光ダイオード、受光部にフォトトランジスターを用い電圧で計測する装置である。

濁りの発生については微粒子の影響が強く、測定する物質についても特性が異なるため、まずスラグ微粉末のみを浮遊させた溶液を作製し、濁度計の検定を行った。検定は1000ml のビーカーに1000ml の蒸留水を入れ、スラグ微粉末を装置の最大測定容量3g(3,000 mg/l)を上限に0.01g, 0.1g, 0.3g, 0.5g, 1.0g, 1.5g, 2.0g, 2.5g, 3.0g投入し、攪拌して、初期電圧を計測することで濁度と電圧の関係の検定線を引き、図-16に較正曲線を示す。

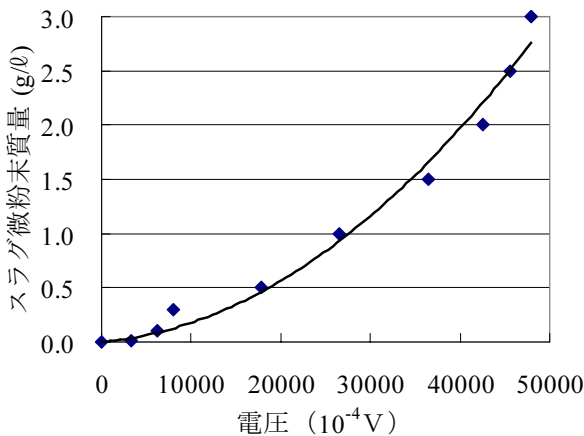


図-16 較正曲線

濁度の測定のための試料は水砕スラグに10%の含水比となるように人工海水を混ぜ、そこに水砕スラグの乾燥重量の7.5%のスラグ微粉末を混ぜたものを用意し、所定の日数気中養生したものを用いた。気中養生している均質混合水砕スラグの測定日は0日、3日、7日、10日、14日とした。

この材料を、1000ml の蒸留水を入れたビーカーの中に、スラグ微粉末が3.0gが含まれる重量の事前混合水砕スラグを投入し、よくかき混ぜ、濁度の変化を30分間測定した。このときの濁りの状況を示すために、攪拌直後と攪拌から30分間静置した後の様子を写真撮影した。

なお、ここで、試料をよく攪拌したのは、水流の激しいところでの施工や、水面投入のような微粉末が舞い上がりやすい施工法を考慮してのことである。

表-1に所定の養生日数の混合直後および30分後の養生材の蒸留水投入状況を示す。

表-1 混合直後及び30分後の養生材の投入状況

	混合直後	混合30分後
養生0日		
養生7日		
養生14日		

表-1 から投入かき混ぜ直後は白濁していたが、30分経過すると沈降し透明になってきていることがわかる。また養生日数が経過するにつれて、かき混ぜ直後、30分後ともに濁りが少なくなっていることが目視でも確認できる。これは養生日数の増加とともに水砕スラグとスラグ微粉末の間で水硬性が発現し始めるために、両者が付着し、分離しにくくなっていくためと考えられる。

図-17に養生日数による濁度の経時変化を示す。養生0日の試料は、水砕スラグとスラグ微粉末の間の反応はほとんどないものと考えられ、事実上の「均質混合」に相当するものと考えてよい。このとき、スラグ微粉末と水砕スラグの間の反応が全く生じていなければ、濁度計は3,000mg/l に近いものを示すことになると考えられるが、実際は1,980 mg/l となった。この違いについては、今後検討が必要である。養生日数が経つにつれて濁度は減少し、養生日数10日と14日では攪拌直後でも300 mg/l 以下となっており、濁りはほとんど生じない結果となった。養生7日程度では、攪拌直後の濁度は400 mg/l 程度となるが、静置30分後まで待てば、ほとんど濁らない状態となっている。

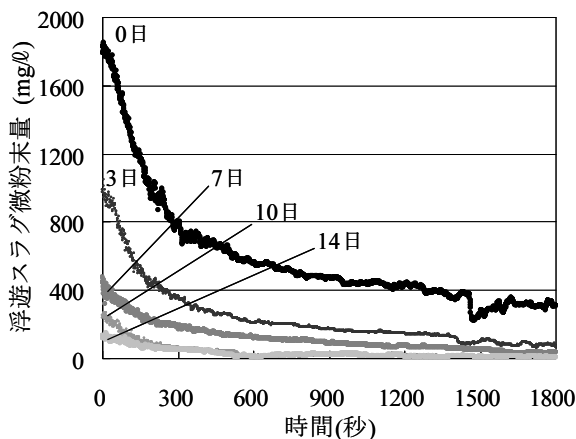


図-17 濁度の経時変化

また混合直後と 30 分後の浮遊スラグ微粉末量の値をプロットした図を図-18, その値を表-2 に示す. 図-18 から 7 日以降で曲線の傾きが緩やかになっており, 表-2 の値から 7 日の混合直後の濁度 461 mg/l は濁度計の最大値 3,000 mg/l のスラグ微粉末の濁度結果の 1/6 程度, 養生 0 日と比較しても 1/4 程度の濁度低減効果があることがわかった.

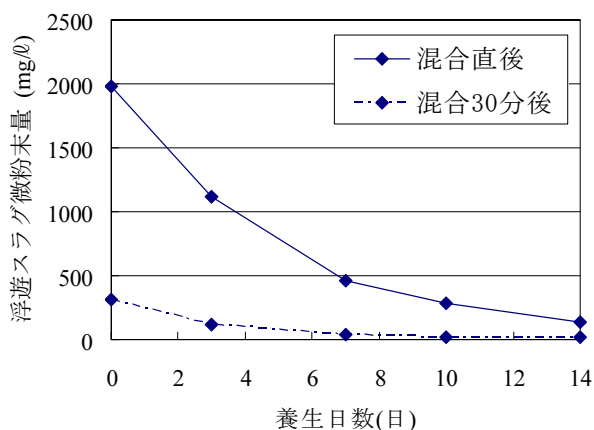


図-18 養生日数による混合直後と 30 分後の濁度の変化

表-2 養生日数による混合直後と 30 分後の濁度の値 (mg/l)

	0 日目	3 日目	7 日目	10 日目	14 日目
混合直後	1980	1118	461	281	139
混合 30 分後	310	113	37	18	17

以上の結果から, 均質混合したままでは材料分離が生じ濁りも発生することになるが, 事前混合処理をして一週間程度以上養生すれば濁りが 2 割程度まで低下し, 材料分離が抑えられ, 水砕スラグとスラグ微粉末の分離が

抑えられるものと考えられる.

4.2 堆積後のスラグ微粉末の分離の可能性

ここでは, 均質混合処理した水砕スラグが施工時は均質に施工されたとし, 施工後硬化するまでの間に, 干満の影響等水流の影響により, スラグ微粉末と水砕スラグが分離する可能性について検討した(菊池ら 2009).

この検討で用いているスラグ微粉末の直径はおおよそ $4\mu\text{m}$ である. 水砕スラグは図-7 に示したものであり, D_{15} はおおよそ 0.25mm である. スラグ微粉末の D_{85} が $4\mu\text{m}$ だとすると, 水砕スラグの D_{15} とスラグ微粉末の D_{85} の比 (D_{15}/D_{85}) は 60 以上となる. この条件では, 均質に混合し施工が行われた場合でも, 干満等による水流によって細粒分だけが移動してしまうことが懸念される(石原 2001; 土質工学会 1985).

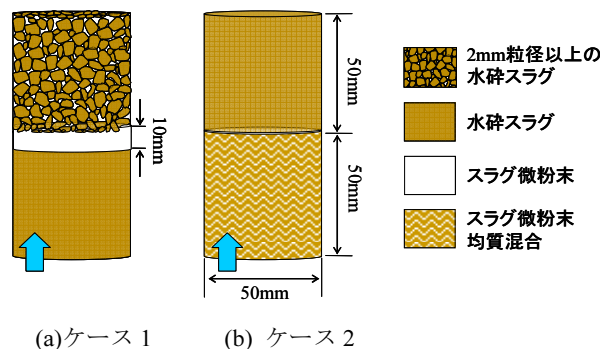
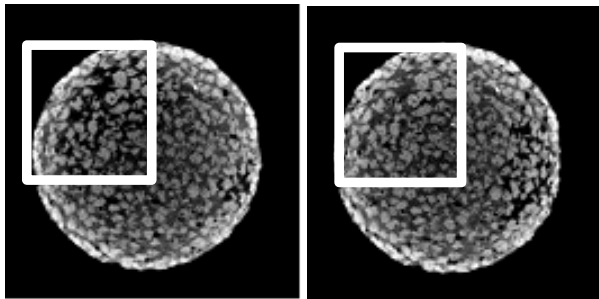


図-19 通水実験の供試体の状況

この実験では, 図-19 に示すような 2 種類の実験を行った. ケース 1 では, スラグ微粉末の層を作り, その上に水砕スラグの粗粒分だけの層を作製し, 下方から通水する実験を行った. ケース 2 では, 水砕スラグにスラグ微粉末を質量比で 20% 混ぜたものを下層として, 上層は水砕スラグよりなる層を作り, 同様に下層から通水する実験を行った. 用いた水砕スラグは 3.1 で用いたものと同じものである. なお粒径 2mm 以上の水砕スラグの物性は $\rho_s=2.736\text{g}/\text{cm}^3$, $\rho_{d\text{max}}=1.374\text{g}/\text{cm}^3$, $\rho_{d\text{min}}=1.142\text{g}/\text{cm}^3$ であった. 通水実験は三軸圧縮装置を用いて行っており, 動水勾配は供試体下面の間隙水圧を上昇させる形で作用させた. なお, 拘束圧は最大動水勾配のときにも粒子骨格が移動しないように作用させた. なお, 通水前後の供試体の水平断面を非破壊で確認するために X 線 CT 装置(菊池・水谷・永留・畠 2006)を用いた.

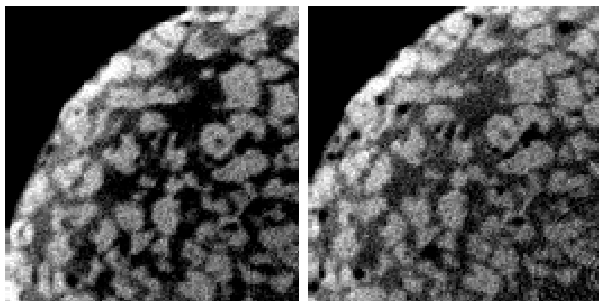
ケース 1 では, 供試体下面と上面の間で $50\text{kN}/\text{m}^2$ の間隙水圧の差をつけて強制的に通水した. このときの, 通水速度は, おおよそ $300\text{m}/\text{day}$ であった. 図-20 にケース 1

の下から 90mm の高さでの水平断面における通水前と 250cm³ 通水させた後の CT イメージを示す。また、このうち枠で囲った部分の拡大図を図-21 に示す。これらのイメージからわかるように、この条件では動水勾配 50 とした場合、スラグ微粉末の粒子の移動が観察された。



(a)通水前 (b) 通水速度 300m/day(通水後)

図-20 ケース 1 の水平断面の CT イメージ

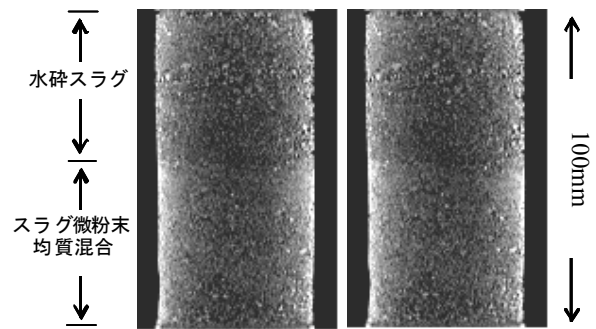


(a)通水前 (b) 通水速度 300m/day(通水後)

図-21 ケース 1 の水平断面 (拡大図)

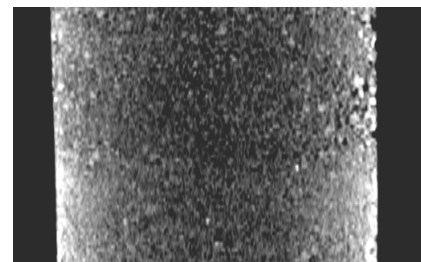
図-22 に X 線 CT 装置で観察したケース 2 の実験における供試体の鉛直断面を示す。このケースでは、供試体上下面の圧力差は、10 kN/m² から 20, 30, 40 kN/m² と増加させて通水を行なった。このとき、圧力差を 40 kN/m² としたときの通水速度はおおよそ 120m/day であった。また、この実験中の全通水量はおおよそ 600cm³ であった。図-22 では通水前と通水速度 120m/day の通水後のイメージを示している。この試験では、供試体の下半分には、通常の水砕スラグのほかにスラグ微粉末を混在させているために、図-22 では下半分の密度が高いため白く映っている。さらに、層の境界付近を拡大して示したのが、図-23 である。上層と下層の濃淡の違いは通水速度を 120m/day まで上昇させてもほとんど変わっていないことがわかる。このことから、ここで用いた通水速度において、スラグ微粉末の移動が生じている可能性はあるが、スラグ微粉末と水砕スラグとが完全に分離するような現象はおきていないと考えられる。

なお、ここで用いた動水勾配は非常に大きなものである。現実的と思われる重力式岸壁において裏込めに水砕スラグを用いたときの水砕スラグ内での通水速度を別途求めたところ、最大でも数 m/day 以下の速度であり、ここで実験として示したものの数十分の 1 以下である。このように、ここに示したような通水条件は港湾の裏込めではまず生じない。このようなことから、施工時に分離が生じなければ、水砕スラグとスラグ微粉末との分離はほとんど生じないものと考えられる。

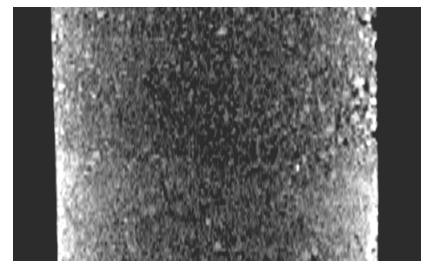


(a)通水前 (b) 通水速度 120m/day(通水後)

図-22 ケース 2 の鉛直断面の CT イメージ



(a)通水前



(b)通水速度 120m/day(通水後)

図-23 図-22 に示した断面の中央高さ付近の拡大画像

4.3 スラグ微粉末が分離した場合の硬化の様子

4.1と4.2の検討結果から、スラグ微粉末と水砕スラグを均質に混合した試料は施工時には分離する可能性があるものの、堆積すれば、その後の分離はほとんど生じる可

能性がないことが分かった。

また、仮にそれらが分離しないまでも、スラグ微粉末の混合の仕方が悪く、水砕スラグとスラグ微粉末の混合が不十分である場合にどのように強度発現をするかは重要な課題である。そこで、スラグ微粉末が不均質に混合されている条件を想定した供試体を作製、養生し、一軸圧縮試験を行い、不均質な混合の影響について検討した(菊池ら 2009)。

水砕スラグの硬化のメカニズムの考え方にもよるが、従来から言われているように、硬化するには pH が高いことが必要で、硬化している部分の pH がいずれも高いことを考えると、どこか 1 箇所が硬化を始めると、そのような場所を核として硬化が促進されることが考えられる。仮にそのような現象を示すのであれば、スラグ微粉末と水砕スラグを丁寧に混ぜなくてもすむ可能性がある。このようなことが許されるのであれば、施工時の効率が大幅に上がり大変助かることになる。

実験に用いた水砕スラグ、スラグ微粉末は 3.1 と同じものを使用した。間隙水は人工海水とした。

実験に使用した供試体は、水砕スラグ分だけで相対密度 50% とすることを目標にした。また、人工海水の質量は水砕スラグの質量の 45% の質量とし、高炉スラグ微粉末の質量はいずれのケースとも水砕スラグの質量の 7.5% とした。ここでは、混合方法として、①水砕スラグの 7.5% の質量のスラグ微粉末を水砕スラグに均質になるように混合したもの(均質混合)、②水砕スラグに水砕スラグの 7.5% の質量のスラグ微粉末と水砕スラグに対する含水比 10% の人工海水を均質になるように混合し、一週間気中養生することによりスラグ微粉末を水砕スラグ表面に付着させたもの(事前混合)、③、④スラグ微粉末と水砕スラグを層状に重なるようにしたもの(層状混合(スラグ微粉末の層の数により一層と二層がある。図-24 参照))の 4 種類とした。なお、比較のために、高炉スラグ微粉末を添加しないもの(無添加)についても実験を行った。

層状混合は水砕スラグとスラグ微粉末が分離した場合、またはある程度分離しても硬化促進に影響がない場合、施工性が上がることを想定したものである。事前混合は、水砕スラグとスラグ微粉末を少量の人工海水で混合後、所定期間養生したものである。

図-25 に養生開始後 60 日たったときのそれぞれの供試体の外観を示す。表面からの観察では、均質混合と事前混合では、全体がほぼ均等に硬化しているようであったが、層状混合では、水砕スラグ微粉末の部分だけが硬化しており、水砕スラグの部分はほとんど硬化していない

ようであった。また、水砕スラグのみの場合にはまったく硬化していなかった。

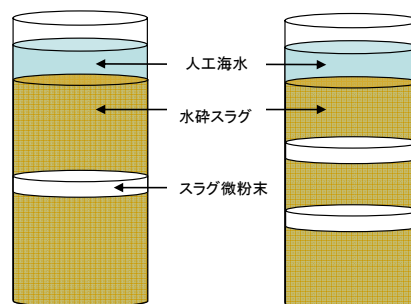


図-24 層状混合の場合の供試体作製状況

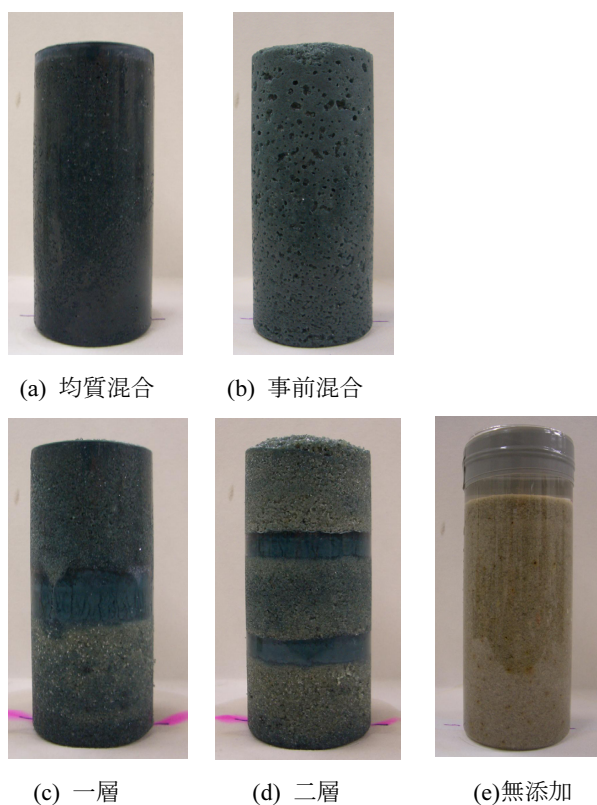


図-25 60 日養生後の供試体の様子

図-26 にそれぞれの養生条件での一軸圧縮強さの変化を示す。この結果によると、均質混合のものと事前混合のものでは、2 週目から 200kN/m² 程度の一軸圧縮強さを発現し、養生期間の増加とともに圧縮強さが増加した。ただし、圧縮強さの増加は均質混合の方が大きく、事前混合のものは均質混合に比べると圧縮強さの増加の程度が小さい。

層状混合では、いずれのケースも養生 28 日で初めて供試体が自立し、50kN/m² 程度の圧縮強さとなるが、その後も圧縮強さの伸びは著しくなく、養生 90 日で 200～

250kN/m²程度となった。無添加のものは60日間では硬化しなかった。このように均質に混合した場合には大きな圧縮強さが出るが、層状混合の場合には、大きな圧縮強さが期待できない。

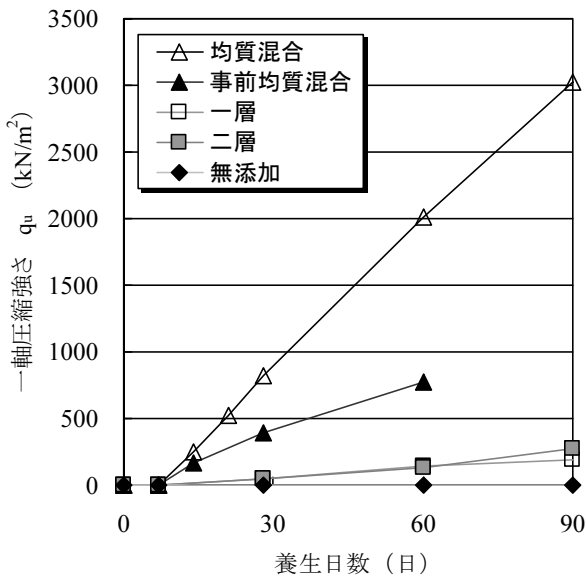
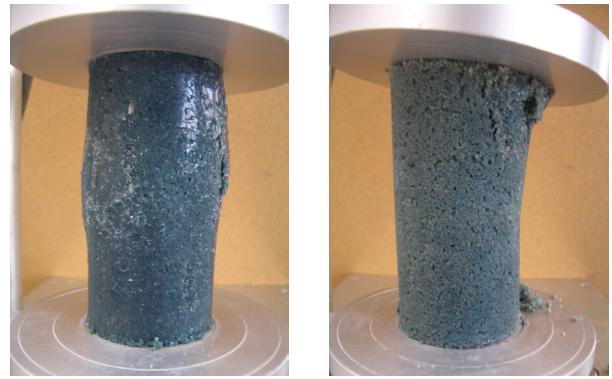


図-26 養生日数による一軸圧縮強さの変化

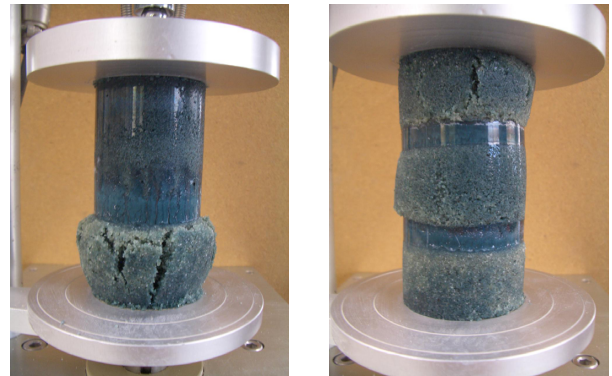
図-27に一軸圧縮試験時の各供試体の変形の様子を示す。均質混合の場合には、供試体の中心部で樽状になっており、一般的な均質材料のような変形を生じている。事前混合では、主として上部のほうで変形しているが、全体として供試体内の圧縮に対する抵抗性の差はあまりないようである。ところが、層状混合の場合では、スラグ微粉末がないところだけが変形しており、明らかに、スラグ微粉末の有無によって強さが異なっている。結局、この場合にはスラグ微粉末以外の部分のところの強さで圧縮強さが決まっていると思われる。このようなことから、スラグ微粉末を水砕スラグによく混ぜて用いないと、スラグ微粉末から離れたところでは硬化が非常に遅れることになることがわかった。

以上の実験の結果、水砕スラグとスラグ微粉末が均質に混合していないと水砕スラグ硬化促進効果が低下することがわかった。水砕スラグとスラグ微粉末を別々に層状に施工する場合、液状化対策として水砕スラグの硬化を期待するときの必要最低一軸圧縮強さは100kN/m²程度である(善ほか1990)ので、60日程度の養生期間を取ればかろうじて必要強度を満足する可能性はあるものの、硬化の信頼性が著しく低下することがわかる。また、事前混合と均質混合を比べると、均質混合の方が硬化促進効果が大きくなる傾向にあることがわかった。



(a) 均質混合(CASE1)

(b) 事前混合(CASE2)



(a) 一層(CASE3)

(b) 二層(CASE4)

図-27 一軸圧縮試験時の破壊の様子

4.4 間隙水の移動を伴う環境下での硬化促進工法による水砕スラグの硬化特性

4.3より、水砕スラグを硬化させるためには、スラグ微粉末を均質混合することが有効であることがわかった。ところで、水砕スラグが硬化するためには、間隙水が移動しないことが必要であるといわれている。たとえば、来山(2003)は、水砕スラグに定常的に海水を流したところ(平均通水速度0.6m/dayと0.02m/day)、硬化現象の発現が抑制されたことを示している。本論文の図-6、図-9、図-12や図-26はいずれも小さなモールドで作製した供試体で、間隙水の移動がない状態での実験結果であり、間隙水の移動がある場合には、圧縮強さが低下するか場合によっては硬化が期待できないということも懸念される。

そこで、ここでは、スラグ微粉末の混合方法をいくつか選び、それらの混合条件下で水砕スラグ内に生じる水流条件を変化させた中規模の模型実験を行い、スラグ微粉末の配合方法と水砕スラグ内の水流とが硬化現象の発現にどのように影響するか検討した。

実験に用いた水砕スラグは、3.1で用いたものと同じものである。用いた試料は、4.3と同条件で配合した均質混合試料と事前混合試料および類似の方法で準備し

た層状混合試料，無添加試料である．用いた土槽はいずれも幅 30cm，高さ 50cm，奥行き 30cm のアクリル製で，土槽の底版から 3cm のところに給排水用のバルブを取り付けてある．いずれのケースとも，模型地盤を高さ 30cm に調整して作製した．

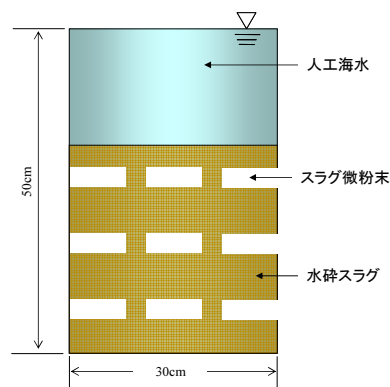
いずれの混合方法においても，模型地盤作製中に水砕スラグとスラグ微粉末が分離，または混合しないように十分注意して作製した．具体的には，水位を作製途中の模型地盤の地表面とほぼ同じレベルとさせておいて，湿润状態の試料を 5cm の厚さで敷き，そこへ静かに人工海水を加えて水位を表面付近にするという作業を繰り返した．層状にスラグ微粉末を作る実験では，ある層をスラグ微粉末だけにすると，通水が著しく阻害されるため，**図-28(a)**に示すように井桁状にスラグ微粉末を入れた．

この際，スラグ微粉末はあらかじめ人工海水を混ぜてスラリー状にしたものを用いた．ここでは，スラグ微粉末は 3 層に分けて入れてあり，それぞれの層の下面の土層下面からの高さは 3cm，16cm，26cm とした．スラグ微粉末の層厚は 3cm である．なお，この場合のスラグ微粉末の量は均質混合の場合と同じように水砕スラグの重量の 7.5% になるようにした．いずれの地盤も模型地盤の目標相対密度は水砕スラグ分のみで 50% になるようにした．なお，間隙水には人工海水を用い，**図-29** に示すように模型地盤面よりさらに 20cm 上方まで上澄みが残るようにした．

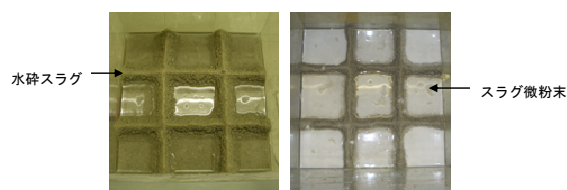
この実験では，実現場では干満などの影響により水流があることを考慮して，静水状態(間隙水の入替えを一切しない)での実験と，フロー条件(3 日に一度，土槽下端付近の一点から土層中の間隙水と同量の人工海水をゆっくりと注入する)の実験を実施した．なお，無添加のものについては，静水状態の実験のみを実施した．**図-29** に模型実験の断面のイメージ図を示す．

各ケースとも模型地盤を作製後，室温 20℃ の条件の下で 2 ヶ月間養生した．養生日数期間が経過したところで，以下の 2 項目の実験を行った．

- ①山中式硬度計で強度の分布を測定した．山中式硬度計による強度の測定は，1 断面あたり 25～81 点で，4～10 断面で行った．これらの計測点数の粗密は試料の状態によって適宜変化させた．
- ②各模型地盤から直径 5cm，高さ 10cm の供試体を採取し，透水試験(三軸圧縮試験機を使用，有効拘束圧 $\sigma_3 = 50 \text{ kN/m}^2$ ，動水勾配 20)と一軸圧縮試験を行った．



(a) 層状混合の場合の模型地盤の側面



(b) スラグ微粉末を作製する状況

図-28 層状混合の概要

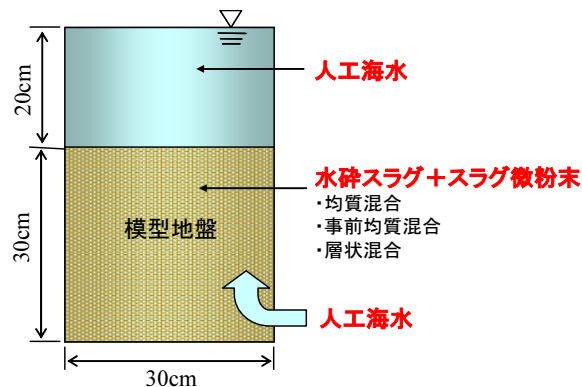
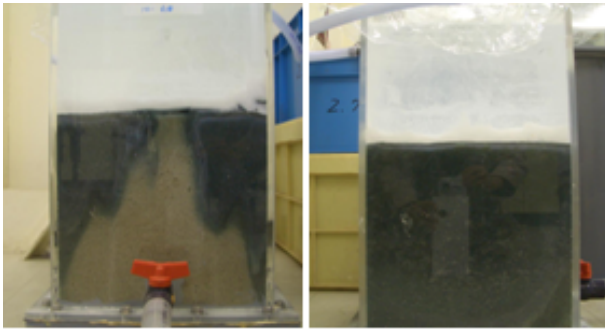


図-29 模型実験の断面のイメージ

実験中の地盤の様子を外から眺めていると，静水状態に置いた均質混合や事前混合の場合には，全体が青灰色に変わっていくのに対し，層状混合では，スラグ微粉末の部分と水砕スラグ部分とで変色の仕方が異なり，スラグ微粉末のところが強く青灰色になる．無添加のものは色の変化が少ない．

一方，フロー条件のものについては，**図-30** に例として示した均質混合の場合のように，通水バルブの周辺とその上方のみあまり変色せず，そのほかの部分は青灰色に変わっていく傾向が見られた．

養生期間(60 日)終了後解体して，スラグの強度分布を調べるとともにコアを採取し透水実験を行った．



(a) 正面 (b) 側面

図-30 均質混合のフロー状態試験での養生 60 日目の試料の様子

過去の現地調査結果(菊池・池上・山崎 2005)や、4.3の層状混合のときの一軸圧縮試験結果から考えて、硬化した水砕スラグの強度分布は著しく変動することが考えられたので、硬化強度を一軸圧縮試験ではなく、3.2で使用した、高い密度で全体的に地盤の硬度を調べることができ、測定が簡易な山中式硬度計で調べた。今回の実験でも図-11 で得られた結果から一軸圧縮強さを推定した。

481	631	631		
724	724	551		
551	551	631	631	551
631	366	551	631	724
631	631	724	631	551

図-31 均質混合(静水条件)の場合の土層下面から 12cm のところの推定一軸圧縮強さ分布 (kN/m²)

図-31 には、均質混合試料を静水状態で養生したものの土槽底面から 12cm の面における山中式硬度計から推定した一軸圧縮強さの計測結果を示す。なお、図中には灰色の部分が右上にあるが、この部分は、一軸圧縮試験をするためにブロック上に試料を残していた部分であるため、測定をしていない部分である。この結果によると、この面内で、最大 724kN/m²、最小で 366kN/m²とばらついている。ただし、このばらつきは均等にばらついてお

り、場所によって弱いところが集中しているというばらつき方ではない。

419	419	419	319	279	366	481	481	551
551	551	631	319	551	481	419	551	419
631	551	631	551	631	419	419	551	481
631	551	724	724	551	724	631	551	551
724	631	631	419	47	94	631	481	481
631	82	62	71	82				
481	82	54	41	47				
141	82	47	41	36				
62	47	62	47	47				

図-32 均質混合(フロー条件)の場合の土層下面から 12cm のところの推定一軸圧縮強さ分布 (kN/m²)

図-32 には、均質混合試料をフロー条件で養生した場合の土槽底面から 12cm の面における山中式硬度計から推定した一軸圧縮強さの計測結果を示す。図示してあるように、海水は土層下面付近のこの図の下中央付近から海水を流入させていた。なお、この図の右下の四角い部分は一軸圧縮試験をするために供試体を採取した部分であり、山中式硬度計による支持力強度の測定をしなかった部分である。

この結果によると、この面内で、最大 724kN/m²、最小で 36kN/m²とばらついている。この場合にはただ強度がばらついているだけでなく、強度の発現する程度が面内で偏っている。図中で、薄灰色で囲ってある部分は、全体的に強度が小さく、平均で 60kN/m²であるのに対し、やや濃い灰色で囲った部分は、550kN/m²を超え、さらにその外側の部分は、279~551kN/m²の一軸圧縮強さと推定されている。このように、通水した場合には、強度が均等にばらついているのではなく、場所によって弱いところや強いところが集中するという形のばらつきとなっている。

図-33 は事前混合試料のフロー条件のものについて土層下面から 12cm のところについて同様の方法でまとめたものである。ここでも、海水の流入入口付近では強度が小さくなっている。その外側には強度の高い部分があるが、その出現の仕方は多少均質混合の場合とは異なっている。ただし、ここで注意したいことは、4.3 で示したように、モールド中で静水状態で養生した場合には、均

質混合試料のほうが大きな一軸圧縮強さを示したのに対し、フロー条件では、均質混合と事前混合で強度にはあまり差がなく、どちらかという、事前混合のほうが全体的には大きめの強度を示したことである。

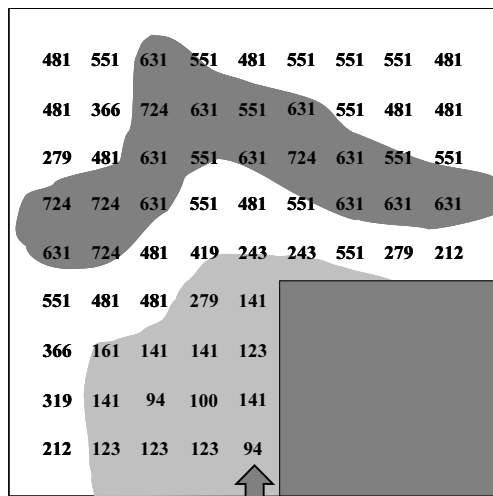


図-33 事前混合(フロー条件)の場合の土層下面から12cmのところの推定一軸圧縮強さ分布 (kN/m²)

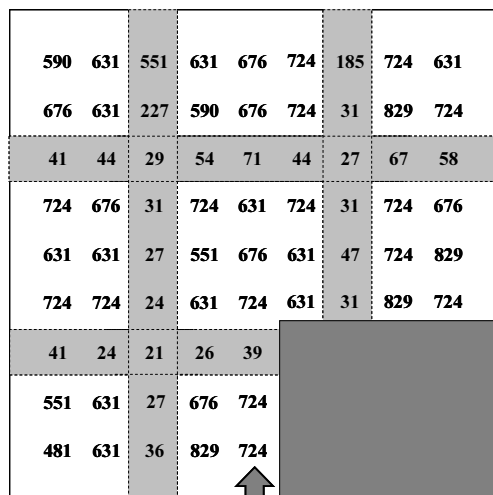


図-34 層状混合(フロー条件)の場合の土層下面から16cmのところの推定一軸圧縮強さ分布 (kN/m²)

フロー条件での層状混合の強度分布測定の一例を図-34に示した。これは、土層下面から16cmの高さのところの、スラグ微粉末の丁度上面に位置するところでの強度推定結果である。これによると層状混合の場合には、スラグ微粉末部分では十分に大きな強度が期待できるが、それに隣接した水砕スラグ部分では、推定一軸圧縮強さが50kN/m²程度と著しく小さな強度しか発現していなかったことがわかる。なお、スラグ微粉末層の中間の

水砕スラグだけの層における推定一軸圧縮強さは40kN/m²程度であった。層状混合のフロー条件では、均質混合、事前混合のフロー条件試験で見られたような、面内で場所による強度の違いは見られなかった。これは、スラグ微粉末の透水係数が著しく小さいため、水の流れが均質混合などの場合とは大きく異なっていたためであると考えられる。

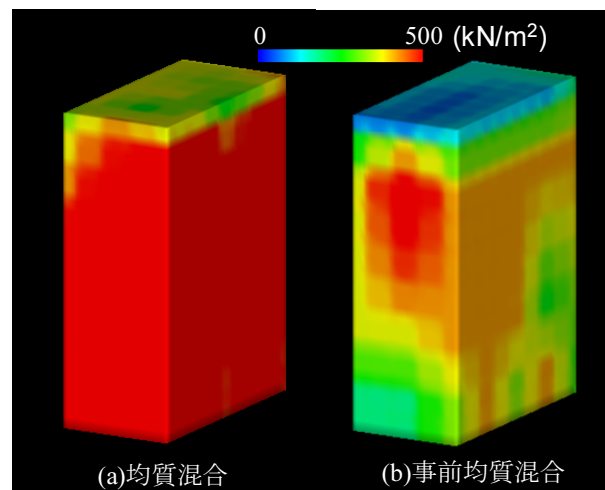


図-35 静水条件の場合の推定一軸圧縮強さの分布

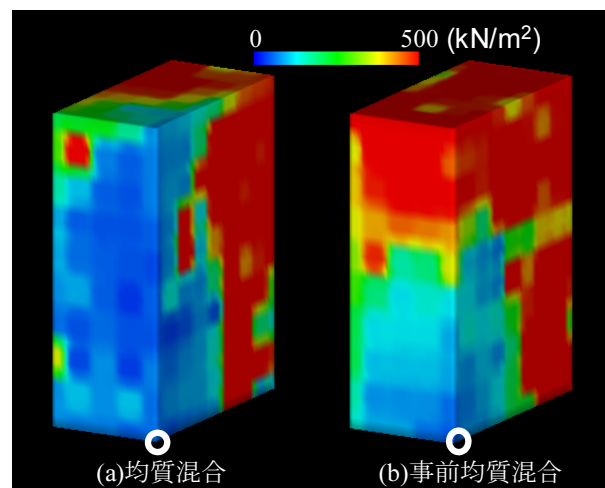


図-36 フロー条件の場合の推定一軸圧縮強さの分布

推定した一軸圧縮強さから、等値線計算ソフトを用いて、各土層の推定一軸圧縮強さの分布を求めた。その結果を図-35、図-36に示す。図-35は静水条件の場合、図-36はフロー条件の場合の強度分布である。これらの図はいずれも土層の半分の結果だけを示している。つまり、図-36の場合、○印に示すように図中に示している土層の下面の右端付近から海水を供給していたことになる。

図-35、図-36 どちらの図においても、(a)は均質混合の結果、(b)は事前混合の結果である。この図では、強度が高いほど赤く示してあり、一軸圧縮強さで $0\text{kN/m}^2 \sim 500\text{kN/m}^2$ までの間をグラデーションで示している。

以上の結果から、静水状態の場合には均質混合の方が事前混合よりも大きな強度を発現するが、フロー条件では両者の強度に著しい差がなくなることがわかる。また、フロー条件では、供試体内の強度の分布のばらつきが大きくなり、この場合、海水供給側では強度の発現が少なく、海水供給側の反対側で強度が大きく発現する傾向にあることがわかる。特に、事前混合のほうが強度を発現する領域が広いことが特徴として見られる。

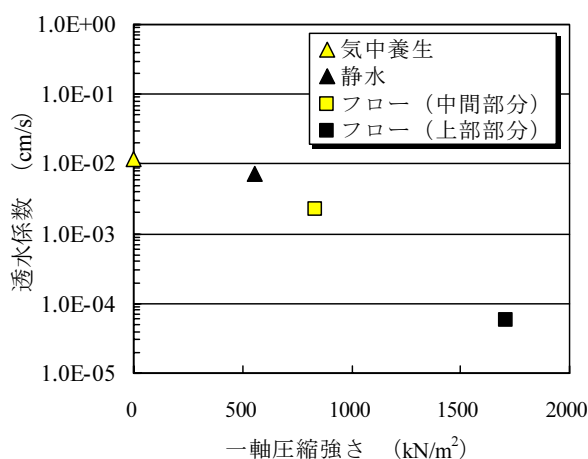


図-37 一軸圧縮強さと透水係数の関係

図-37 に事前混合地盤から採取した供試体の一軸圧縮強さと透水係数 k の関係を示す。スラグ微粉末を混合させた試料の場合、一軸圧縮強さが大きくなるにつれて透水係数が低下する傾向にあり、一軸圧縮強さが 1700kN/m^2 程度になると、硬化していない試料と比較して2オーダーほど透水係数が低下した。

図-36 の硬化した部分は、実験期間中に徐々に硬化が進んだ部分であると考えられる。これらの部分では硬化の進展とともに透水係数が低下したと思われる。そこで、この実験における海水の流入状況についてシミュレーション解析を行ったところ、水砕スラグの硬化が見られない場合でも海水は主として土層の海水供給側を中心に流れ、背面側の透水係数が下がるとその傾向が著しくなることがわかった。このようなことから、図-36 に示した結果は、間隙水の移動速度の影響を強く反映した結果であると考えられる。特に、事前混合の場合は、間隙水の移動がまったくないと硬化しにくい、間隙水の移動が遅いときに硬化しやすくなる材料であるらしいということがわかる。

4.5 淡水化の進行速度が変化する場合の硬化促進工法による水砕スラグの硬化特性

これまでの研究より、水砕スラグを港湾のような海水環境下で用いる場合に硬化促進させるには、スラグ微粉末を混ぜることが有効であり、混合方法、水流の有無で硬化の程度が異なることがわかった。ここでは、硬化促進を図った水砕スラグを裏込めに用いることを前提に検討を進める。

2.で水砕スラグを用いた現場での調査を紹介した。その調査の中で、図-5 に示されるように、裏込め内の間隙水の塩分がいずれ除去されることが分かった。これは、埋立地の平均地下水位と平均海面との差から、埋立地に降る雨が次第に地下に浸透し、埋立地内の海水を押し出すためであると考えられる。

そこで、水砕スラグを裏込めに用いた場合の塩分濃度の変化について、図-1の現地調査の断面をもとにモデル化したFEM浸透流解析を行い、裏込め部が雨水によって淡水化する様子を検討した。

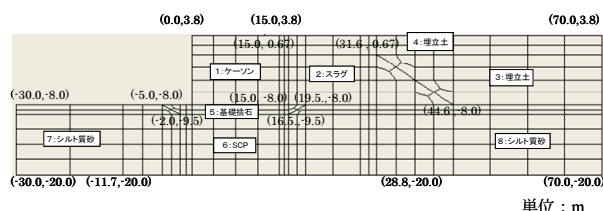


図-38 解析断面

表-3 入力定数

名称	材料番号	透水係数 $k_x(\text{cm/s})$	比貯留係数 $S_s(1/\text{cm})$	間隙率 n
ケーソン	1	1.00×10^{-10}	3.00×10^{-09}	-
スラグ	2	1.00×10^{-02}	6.00×10^{-07}	0.5
埋立土	3	1.00×10^{-04}	5.00×10^{-07}	0.5
埋立土	4	1.00×10^{-04}	5.00×10^{-07}	0.5
基礎捨石	5	1.00	5.00×10^{-08}	0.3
SCP	6	1.00×10^{-05}	1.00×10^{-06}	0.5
シルト質砂	7	1.00×10^{-06}	1.00×10^{-05}	0.5
シルト質砂	8	1.00×10^{-06}	1.00×10^{-05}	0.5

解析に用いた断面を図-38に示す。解析に用いた入力定数を表-3に示す。この解析では、現地における材料の透水係数を調査していないため、透水係数は一般的な値を用いることにした。干満による間隙水の移動を考慮し境界条件は、海水面の平均水位は 1.0m 、 $H.W.L : Y=2.0\text{m}$ 、 $L.W.L : Y=0\text{m}$ とし sin波(1日2周期)の干満を与えた。埋立

て側の水位は、地表面CDL.+3.8mで一定とし、初期状態以降は淡水が供給されるものとして解析を行った。

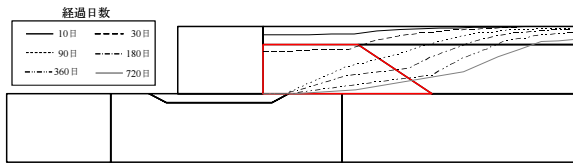


図-39 淡水化面の経時変化

淡水化面の経時変化を図-39に示す。凡例の数字は日数である。図は凡例に示した日数が経ったときの埋立土部分と水砕スラグ部に見られる海水と淡水の境界面を示している。10日では水砕スラグ部まで達せず、30日以降からは、天端部から基礎碎石部（マウンド）に向けて淡水部分が広がっていく。また法尻部分は海水が残りやすい傾向にある。

以上の解析の結果から、裏込め内の淡水化は上部から下部に向けて生じ、また、ケーソン直背後のほうがケーソンから離れた所よりも淡水化が早いことが分かった。

ここでの実験ではこのような現象を簡易にシミュレートできる実験条件を構築し、裏込めの淡水化が水砕スラグの硬化に及ぼす影響について検討することにした。

今回の実験では、4.4の結果から、水砕スラグとスラグ微粉末($\rho_s=2.89\text{ g/cm}^3$)は、均質混合と同等の硬化を示し、濁りの影響も少ない「事前混合」したものを用いた。作製方法は4.3、4.4と同様である。このシリーズの実験は実験実施上の都合から2度に分けて行われたため、水砕スラグは同じ製造場所のものではあるものの時期の異なる2種類のものを用いた。各ケースの条件を表-4に示す。このうち、Case1とCase4、Case2とCase3がそれぞれ同じ水砕スラグの実験結果である。表-5には母材となる水砕スラグの土粒子密度と事前混合処理した水砕スラグの土粒子密度、事前混合処理した水砕スラグの最大最小密度を示す。図-40に事前混合処理した水砕スラグの粒径加積曲線を示す。

図-41に模型実験の断面のイメージ図を示す。

土槽はアクリル製で、幅80cm、高さ50cm、奥行き50cmである。この土槽に、水砕スラグを港湾工事のケーソンの裏込材として用いることをイメージし、まず、事前混合水砕スラグを5cmずつ湿潤堆積法で作製し、その上部に相馬硅砂4号 ($\rho_s=2.644\text{ g/cm}^3$, $\rho_{dmax}=1.618\text{ g/cm}^3$, $\rho_{dmin}=1.342\text{ g/cm}^3$) を水中落下で投入して模型地盤を作製した。このとき用いた水は、Case4以外については人工海水である。Case4では蒸留水を用いた。事前混合水砕スラグ

の相対密度は約47%であった。

地盤作製後、実験中にpH、塩分濃度の変化を調べるため6本の採水パイプを①～③の箇所の奥行き方向中央部にそれぞれ2本ずつ挿入し、設置した。それぞれのパイプは図中に○で示した採水口の位置まで挿入してある。

表-4 実験ケースと通水条件

ケース	条件
Case1	海水を流し続ける
Case2	1.5ヶ月間海水、その後0.5ヶ月で徐々に淡水化
Case3	0.5ヶ月で淡水化、その後1.5ヶ月蒸留水
Case4	蒸留水で地盤作製（海水は事前均質混合作製時のみ）

表-5 実験ケースの試料の諸物性と通水条件

ケース	密度(水砕スラグ) $\rho_s(\text{g/cm}^3)$	密度(事前均質混合) $\rho_s(\text{g/cm}^3)$	最大乾燥密度 $\rho_{dmax}(\text{g/cm}^3)$	最大乾燥密度 $\rho_{dmin}(\text{g/cm}^3)$
Case1	2.808	2.817	1.440	1.142
Case2	2.835	2.882	1.381	1.060
Case3	2.835	2.882	1.381	1.060
Case4	2.808	2.817	1.440	1.142

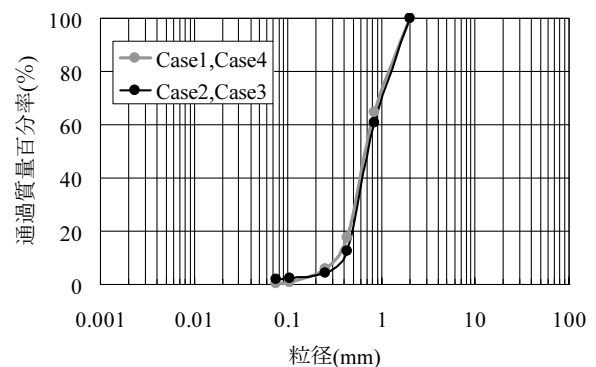


図-40 事前混合処理した水砕スラグの粒径加積曲線

この地盤に対し、定常的に水流が発生するように、図-41に示すように、図の右上の給水部から給水し、左下の排水部から排水させた。通水量は排水側のタンクの水水位と排水部に設けたバルブの開度で調整した。このとき、給水部からの水の供給量は、作製した地盤(図-41)の間隙の体積分の水が、14日で完全に置き換わる量となるように調整した。具体的には、この地盤の間隙の体積約82ℓが14日間で置き換わるように、通水量を6ℓ/dayとした。この流量は現地の地下水の置換速度をそのままシミュレ

ートしたのではなく、どちらかという、より速い速度で地下水が移動し、より早く地下水の置換が生じる状態を作っている。その理由は、4.4の実験結果から、スラグ微粉末を添加した水砕スラグは、海水環境に置かれていれば、2ヶ月で硬化することが明らかであるため、それより短い期間に淡水化する条件での硬化の程度を把握することが必要と考えたためである。そこで、淡水化する期間を2カ月以内とした。このため、すべての実験条件で通水期間を2カ月としたものである。

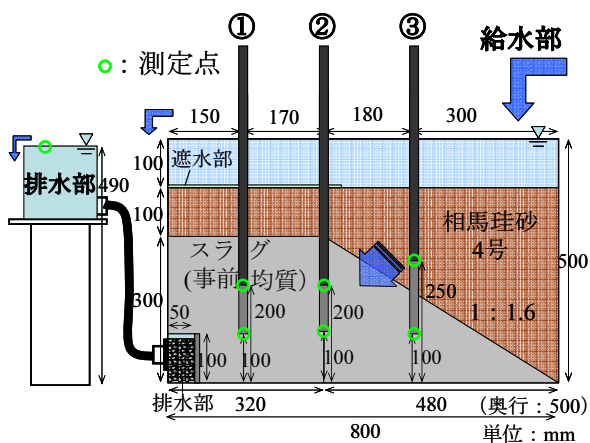


図-41 模型実験のイメージ図

通水実験は室温 20℃の条件の下で行った。ただし、実験室は完全な恒温室ではなく、窓やシャッターがある環境であったため、多少なりとも外気温の影響を受けていた可能性がある。

通水期間中、所定の期日ごとに、地盤中に立てた採水パイプの採水口から所定深度の間隙水を約 30cc 採水し、pH と塩分濃度を測定した。また、2ヶ月の実験期間終了後、水砕スラグの強度分布を測定した。この測定も 4.4 と同様に硬化した水砕スラグの強度分布の変動を詳細に把握するため山中式硬度計を用いた。

山中式硬度計による強度の測定は、上下左右とも 3cm 間隔とし、鉛直方向に全部で 10 水平断面、1 水平断面あたり傾斜部分も含めて 120~264 点測定した。さらに硬化した部分からいくつかのコアを採取し、施工後に硬化した水砕スラグの通水状況を把握するため三軸透水試験を実施した。

図-42 に各ケースの①-10 の位置の塩分濃度の時間変化を示す。①-10 は図-41 に示すように、排水側の採水パイプ①の土槽底面から 10cm の高さの位置で採水したということの意味する。それぞれのケースで、淡水を流し始めた時期は表-4 のとおりである。この位置では淡水を

流し始めてから1週間くらいすると淡水化の影響が生じ始め、影響が出始めてからは3日程度で完全に淡水化することが分かる。他の測定点でも淡水化が始まってから完全淡水化までにかかる時間は同様であった。また、今回採水した範囲では、解析で見られたような法尻部で塩分が残る状況を観察することはできなかった。

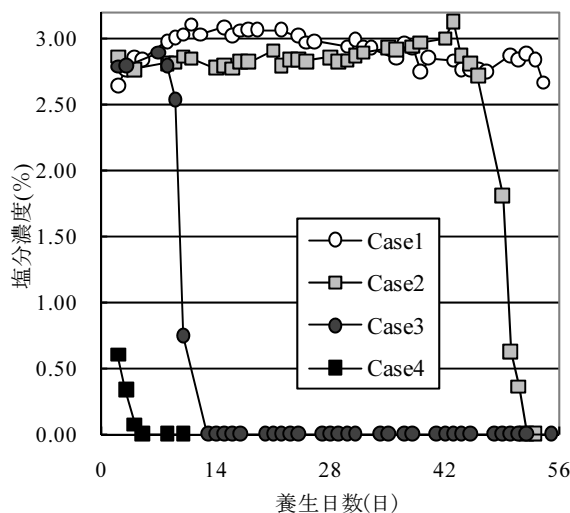


図-42 養生日数による塩分濃度の変化 (①-10)

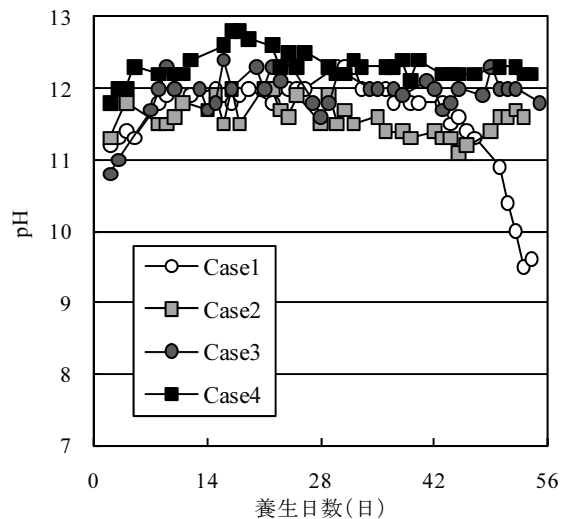


図-43 養生日数による pH の変化 (①-10)

図-43に各ケースの排水部付近(①-10)でのpHの時間変化を示す。ほとんどのケースで全期間にわたりpHは11を超えているが、Case1ではpHの低下が観察されている。

図-44は法尻付近(③-10)におけるpHの時間変化をケースごとに示したものである。この場合には、Case1, Case2で比較的早い段階でpHの低下が観察されている。

図-43 に比べると Case1, Case2 とも図-44 のほうが早くに pH が低下する傾向がみられた。これは、図-44 の地点が、給水部から供給された海水が水砕スラグとの接触時間が短い段階のものであるため、緩衝能力が残っており、このため比較的早い段階から pH が下がったものと考えられる。また、Case2 では、最後の 2 週間は淡水を流したために、pH が上昇する傾向となった。

これらの結果は、長い期間海水が水砕スラグ層内を流れると海水の緩衝作用のために pH が低下する可能性があることを意味している。

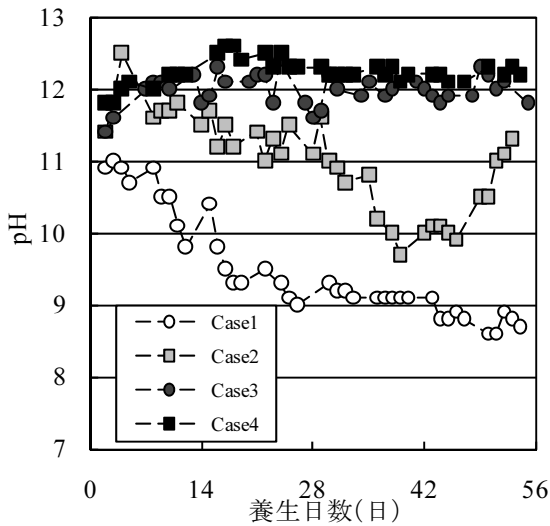
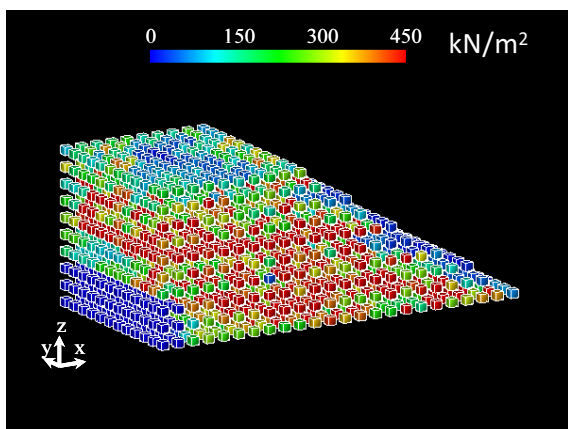
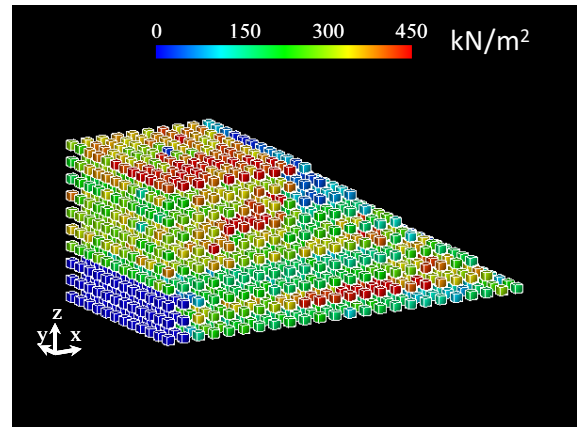


図-44 養生日数による pH の変化 (③-10)

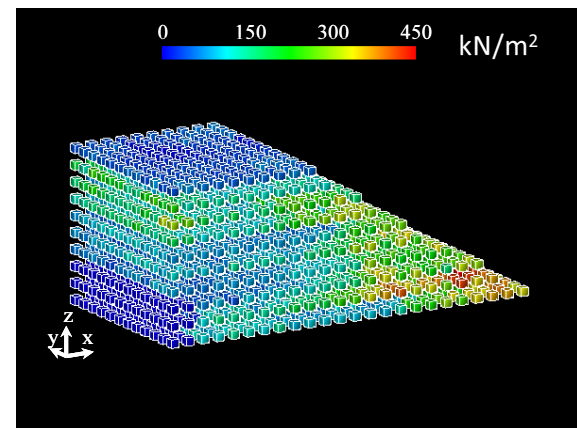
次に、この結果から、通水養生 2 ヶ月が経過したところで各試験ケースの土槽を解体し、一定の高さごとに模型地盤を掘削、測定点を定め山中式標準型土壌硬度計を差し込み測定した。図-12 に示した曲線を用いて推定した一軸圧縮強さで換算した結果を図-45 に示す。なお、各図の左下の青く表示されている部分は、排水部であり、ここには水砕スラグはない。



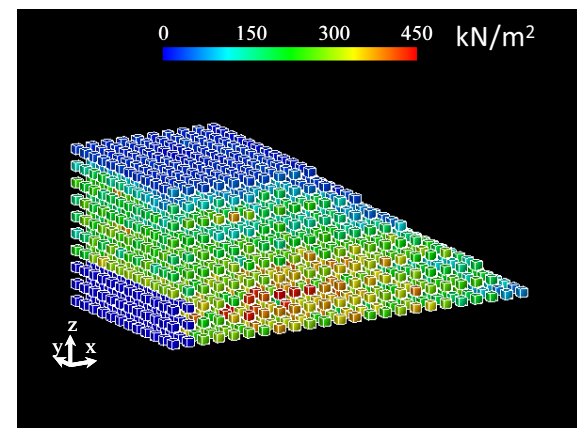
(a) Case 1



(b) Case 2



(c) Case 3



(d) Case 4

図-45 硬度計による各測点の換算一軸圧縮強さの分布 (三次元)

図のカラーチャートで示しているように、ここでは一軸圧縮強さで 0~450 kN/m² をグラデーションで示している。一般に一軸圧縮強さが 100 kN/m² あれば液状化対策として有効である(善ほか 1990)と言われている。図の青黄緑から赤い部分は一軸圧縮強さに換算した強度が

100 kN/m² 以上であり、十分な硬化がみられていると判断して良い部分である。なお、各ケースの最大圧縮強さは Case1 から順番に、1060 kN/m²、550 kN/m²、500 kN/m²、493 kN/m²であった。図からわかるように、Case1 は概ね硬化しており、強度も高い。Case2 では最大圧縮強さでは劣るものの、広い範囲で硬化していることがわかった。Case3, Case4 については硬化している部分もあるが、硬化が不十分と思われる個所が多い。

さらに、施工後に硬化した水砕スラグの透水係数を把握するため三軸透水試験を実施した。実験に使用した供試体は、Case1, Case2の硬化している部分を土槽からブロックサンプリングし、直径5cm、高さ10cmにトリミングしたものである。この供試体を三軸試験機にセットし、拘束圧50 kN/m²で2時間圧密し、供試体下部の圧力水頭を上部よりも10cm高くして供試体下部から上部へ通水した。また、事前に行った未硬化の事前混合の水砕スラグについても同様の圧密、通水条件で実験を行った。また、Case1とCase2の供試体については、通水実験終了後拘束圧を除去して、一軸状態で圧縮試験を実施し、圧縮強さを求めた。

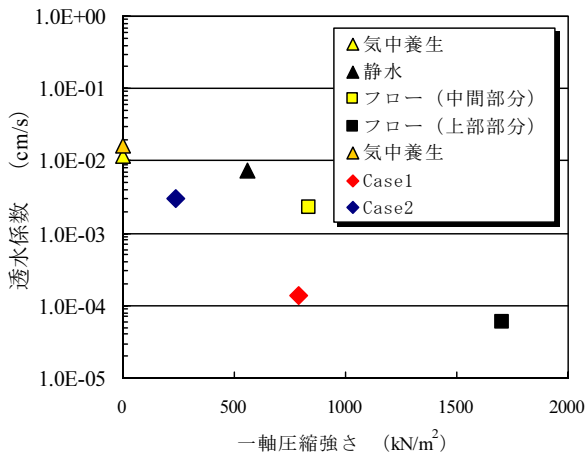


図-46 一軸圧縮強さと透水係数の関係

図-46はこれらの実験結果から、一軸圧縮強さと透水係数の関係としてまとめたものである。なお、この図には、同じ方法で一軸圧縮強さと透水係数の関係を求めた、図-37のデータも重ねて示した。これらの結果をみるとスラグ微粉末を混合した試料の場合には、硬化とともに透水係数が低下する傾向があるようである。この結果は、従来水砕スラグだけで裏込めを施工した時には硬化しても透水係数にあまり大きな変化がなかった(菊池、池上、山崎 2005)ものとは傾向が一致しない。また、図-37の傾向と今回のものとも透水係数と一軸圧縮強さの関係は多少食い違いがあるようである。このように、水砕スラグ

の硬化と透水係数の低下についてはまだ不明な点があるため、さらに検討が必要である。ただし、10⁻⁴cm/s程度の透水係数は通常の砂と同程度の透水係数であるので、硬化したとしても砂と同等の透水係数があるものとして取り扱ってよいものと考えられる。

本研究から、水砕スラグの硬化に、水砕スラグ中の間隙水の淡水化の影響があることがわかった。港湾の裏込めの間隙水はいずれ淡水化すると考えられるが、淡水化までに1ヵ月半程度あれば、事前混合水砕スラグは十分に硬化することがわかった。しかし、それよりも短時間で淡水化すると早期には強度を発揮しないことがありうる。また、これまで水砕スラグは、アルカリ環境下でないといわれていたが、海水環境下であるCase1については、pHが低下するにもかかわらず、強度の発現は最も良かった。

5. 結論

本報告では、港湾工事でケーソンの裏込めに水砕スラグが硬化するものとして用いる場合を想定し、室内実験における硬化促進工法の検討を行った。スラグ微粉末を添加すると、特に海水環境下で、著しい硬化促進効果があることがわかっているが、スラグ微粉末のほかにCa(OH)₂も硬化促進用添加物として有望であることがわかった。また今回の検討では、水砕スラグの硬化に影響があると思われた二酸化炭素が硬化には直接影響していないことを確認した。

次に、スラグ微粉末を用いた硬化促進工法を現場で適用する場合を考え、施工時の問題、施工後の現地の海水環境下での環境条件の影響等、種々の課題について検討を行った。

施工時において、スラグ微粉末を混合した水砕スラグを投入する場合の両者の分離や濁りを避けるためには、この論文で事前混合と呼んでいる、水砕スラグの10%の海水と7.5%程度のスラグ微粉末を混合し気中で1週間程度養生した材料を用いればよいことが分かった。この処理を行うことにより、施工時の分離や濁りの問題が改善することが確認された。

施工後硬化するまでの現地の海水環境下での環境条件の影響については以下のことがわかった。

- (1)スラグ微粉末を添加したことによる硬化促進効果が適切に得るためには、水砕スラグとスラグ微粉末が均質に混合していることが必要である。
- (2)干満などによる水流の影響による堆積後のスラグ微粉末の水砕スラグからの分離についてはほとんど生

しない。

- (3)事前混合処理をした場合には、水砕スラグ層内の間隙水が移動しても硬化特性があまり変わらない。
- (4)事前混合処理した水砕スラグは、間隙水が海水から淡水に変化する場合でも、海水環境下に1ヵ月半程度あれば液状化対策として要求されている程度としては十分に硬化する。

以上の結果から、水砕スラグの硬化促進工法として以下のものを提案する。

水砕スラグの硬化促進を期待する場合には、「事前混合」処理をする。この処理は、水砕スラグに海水を混ぜ、含水比10%としたものに、スラグ微粉末を8~10%添加し、よく攪拌する。これを気中にて1週間から2週間程度養生するものである。この事前混合処理した水砕スラグを岸壁あるいは護岸背後の海中に投入し、埋立土を施工する。ここでの要点は、投入時には海水環境であることである。

以上の施工をすることによって比較的短期間に水砕スラグの硬化を期待できるようになる。

6. おわりに

これまでの港湾における多くの実績と港湾空港技術研究所における研究の結果、水砕スラグは長期においては海水環境下で用いても硬化することが明らかであり、さらに硬化を促進させるために少量の水砕スラグ微粉末を均質に混合するとよいことが分かっている。本論文では、水砕スラグとスラグ微粉末と混合し、投入前に一週間気中養生させる「事前混合」処理で施工すれば、実施工時におこる濁りの発生を抑制し、施工後の干満の影響からくる水流の発生による、スラグ微粉末の分離もなく、また、閉め切り後に雨水により淡水化する場合においても、均質混合した水砕スラグと同等の硬化促進が得られ、液状化対策に有効であることを示した。

残された課題は、現地において試験施工を行い高炉スラグ微粉末の原位置での硬化を実際に確認することであると考えている。各地方整備局等現場技術者による積極的な検討を期待する。

本論文の実験の一部は内山明日香女史(元関東学院大学大学院生, 現鹿島建設(株))が修士修了研究として実施したものである。また、その関連の研究内容については当時研修生であった佐藤宇紘氏(元港湾空港技術研究所研修生, 現熊本大学工学部)によるところが大変に大きい。記して謝意を表します。

(2010年1月27日受付)

参考文献

- 石原研而(2001):土質力学, p.83.
- (財)沿岸開発技術研究センター(1989): 港湾工用水砕スラグ利用手引書, 38p.
- (財)沿岸技術研究センター(2007): 港湾・空港における水砕スラグ利用技術マニュアル, pp.34-36.
- 菊池喜昭・高橋邦夫(1998): 水砕スラグの力学特性の経年変化, 港湾技研資料, No.915, 26p.
- 菊池喜昭(2003): 港湾工事で用いられた水砕スラグの特性の経年変化, 土木学会論文集 No.736/III-63, pp.287-296.
- 菊池喜昭・木村淳治・水谷崇亮・永留健(2004): 高炉水砕スラグの固結に及ぼす pH, Ca²⁺の影響と固結水砕スラグの設計強度設定手法の検討, 港湾空港技術研究所資料, No.1088, 22p.
- 菊池喜昭・池上正春・山崎浩之(2005): 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 No.799/III-72, pp.171-182.
- 菊池喜昭・中島研司・木村淳治・水谷崇亮(2006): 港湾工事に用いる高炉水砕スラグの硬化特性, 港空研報告第45巻第2号, pp.105-133.
- 菊池喜昭・水谷崇亮・永留健・梶俊郎(2006): マイクロフォーカス X 線 CT スキャナの地盤工学への適用性の検討, 港空研資料 No.1125, 21p.
- 菊池喜昭・内山明日香・佐藤宇紘・規矩大義・西村大司(2009): 港湾工事に於ける高炉水砕スラグの硬化促進工法, 第8回環境地盤工学シンポジウム, pp.311-318.
- 来山尚義(2003): 低置換率 SCP 工法における高炉水砕スラグの適用に関する研究, 山口大学博士請求論文, 55p.
- 国土交通省港湾局(2004): 港湾・空港等整備におけるリサイクル技術指針,
<http://www.mlit.go.jp/kowan/recycle/>
- 善功企・山崎浩之・佐藤泰(1990): 事前混合処理土工法による処理土の強度・変形特性, 港湾技術研究所報告, 第29巻第2号, pp.85-118.
- 鐵鋼スラグ協会(1983): 水砕スラグ「土工用材料としての技術資料」, pp.63-64.
- 土質工学会(1985): 薬液注入工法の調査設計から施工まで, p.3.
- 土木研究所(2007): 流動化処理土利用技術マニュアル, 技法堂出版, p15.
- 西勝・佐藤康文・南部光広(1982): 埋立地盤材料として

の高炉水砕スラグの強度特性, 土と基礎, 第 30 巻第
12 号, pp.41-48.

松田博・来山尚義・高宮晃一・村上剛敏・中野恭夫(2004):
高炉水砕スラグの地盤材料材としての適用性に関する
基礎的研究, 土木学会論文集 No.764/ III-67,
pp.85-100.

港湾空港技術研究所報告 第49巻第2号

2010.6

編集兼発行人 独立行政法人港湾空港技術研究所

発行所 独立行政法人港湾空港技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号
TEL. 046(844)5040 URL. <http://www.pari.go.jp/>

印刷所 株式会社 大 應

Copyright © (2010) by PARI

All rights reserved. No part of this book must be reproduced by any means without the written permission of the President of PARI.

この資料は、港湾空港技術研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部または一部の転載、複写は港湾空港技術研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

CONTENTS

Experimental Study on Stability of Ground Improved by SCP Method Using Solidified Granular Material	Hidenori TAKAHASHI, Yoshiyuki MORIKAWA 3
Examining Field Application of Solidification Acceleration method of Granulated Blast Furnace Slag	Yoshiaki KIKUCHI, Shoji OKA, Taka-aki MIZUTANI 21
One-Dimensional Model for Undertow and Longshore Current Velocities in the Surf Zone	Yoshiaki KURIYAMA 47
Numerical Simulation of Cyclic Seaward Bar Migration	Yoshiaki KURIYAMA 67
Prediction of Cross-Shore Distribution of Longshore Sediment Transport Rate in and outside the Surf Zone	Yoshiaki KURIYAMA 91
Fine sediment transport process during a storm event induced by typhoon attack in Tokyo Bay	Yasuyuki NAKAGAWA, Ry-ichi ARIJI 107
Hysteresis loop model for the estimation of the coastal water temperatures - by using the buoy monitoring data in Mikawa Bay, JAPAN -	Hong Yeon CHO, Kojiro SUZUKI, Yoshiyuki NAKAMURA 123