

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.45 NO.2 June 2006

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 45 卷 第 2 号 (Vol. 45, No. 2), 2006年 6月 (June 2006)

目 次 (CONTENTS)

1. NOWPHAS波浪観測データを同化させた波浪推算法の開発とその特性の検討
..... 橋本 典明・河合 弘泰・永井 紀彦 3
(Development of Adjoint WAM Model to NOWPHAS Wave Observation Data
..... Noriaki HASHIMOTO, Hiroyasu KAWAI, Toshihiko NAGAI)
2. 気泡量の違いによる気泡混合処理土の透水・吸水特性の変化
..... 菊池 喜昭・永留 健・水谷 崇亮 29
(Permeability and Absorption Property Change of Light Weight Soil with the Change of the Fraction of Air Foam
..... Yoshiaki KIKUCHI, Takeshi NAGATOME, Taka-aki MIZUTANI)
3. アーク形の矢板とトラスを有する新形式二重矢板護岸構造の水平抵抗性能の評価
..... 菊池 喜昭・北詰 昌樹・水谷 崇亮・恩田 邦彦・平嶋 裕・木下 雅敬・森 玄 51
(Lateral Resistance of Arc Shaped Double Sheet Wall with Truss Structure
Yoshiaki KIKUCHI, Masaki KITAZUME, Taka-aki MIZUTANI, Kunihiko ONDA, Yutaka HIRASHIMA, Masanori KINOSHITA, Gen Mori)
4. ゴムチップ混合固化処理土のせん断時の破壊メカニズム
..... 菊池 喜昭・永留 健・御手洗 義夫 87
(Failure and Permeability Properties of Cement Treated Clay with Tire Chips under Shear Deformation
..... Yoshiaki KIKUCHI, Takeshi NAGATOME, Yoshio MITARAI)
5. 港湾工事に用いる高炉水砕スラグの硬化特性
..... 菊池 喜昭・中島 研司・木村 淳治・水谷 崇亮105
(Solidification of Granulated Blast Furnace Slag used for Port Construction
..... Yoshiaki KIKUCHI, Kenji NAKASHIMA, Junji KIMURA, Taka-aki MIZUTANI)
6. 深層混合処理工法による液状化抑制効果の検討及び改良深度を縮減した新しい格子配置の提案
..... 高橋 英紀・山脇 秀仁・北詰 昌樹・石橋 伸司135
(Effects of Deep Mixing Method on Liquefaction Prevention and Proposal on New Arrangement of Grid-type Improvement
..... Hidenori TAKAHASHI, Shuuji YAMAWAKI, Masaki KITAZUME, Shinji ISHIBASHI)
7. 耐海水性ステンレス鋼ライニングを施した海洋鋼構造物の電気防食特性
..... 宮田 義一・若林 徹・濱田 秀則169
(Cathodic Protection Characteristics of Marine Steel Structure Sheathed with Seawater Resistant Stainless Steel
..... Yoshikazu MIYATA, Toru WAKABAYASHI, Hidenori HAMADA)

港湾工事に用いる高炉水砕スラグの硬化特性

菊池 喜昭*・中島 研司**・木村 淳治***・水谷 崇亮****

要 旨

本報告は、港湾工事でケーソンの裏込めに高炉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結果、室内実験における高炉水砕スラグの硬化実験結果、高炉水砕スラグの硬化促進方法の検討結果、硬化した高炉水砕スラグのせん断特性評価方法の提案を報告するものである。

現地における追跡調査の結果から、高炉水砕スラグは時間の経過とともに硬化していくことがわかった。ただし、非常に時間がかかることも明らかとなった。そのため、室内において高炉水砕スラグを硬化させるための条件について検討し、海水条件下では、高炉スラグ微粉末を添加す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。また、硬化した高炉水砕スラグのせん断強さは c と ϕ で表せられること、残留せん断強さは ϕ で表すことができること、それらの強度定数は、低拘束圧の排水もしくは非排水三軸圧縮試験から求めればよいことを示した。

キーワード：高炉水砕スラグ，潜在水硬性，pH，現地調査，一軸圧縮試験，三軸圧縮試験，設計強度パラメータ

* 地盤・構造部基礎工研究室長
** 地盤・構造部基礎工研究室研究員
*** 前地盤・構造部基礎工研究室研究員(現中国地方整備局港湾空港部)
**** 地盤・構造部主任研究官(性能評価(基礎)担当)
〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 独立行政法人港湾空港技術研究所
電話：046-844-5057 Fax：046-844-0618 e-mail:kikuchi@pari.go.jp

Solidification of Granulated Blast Furnace Slag used for Port Construction

Yoshiaki KIKUCHI*

Kenji NAKASHIMA**

Junji KIMURA***

Taka-aki MIZUTANI****

Synopsis

The results of 18 months site observation from construction of granulated blast furnace slag(GBFS) backfilling in berth construction are reported and methods for accelerating the solidification of GBFS are discussed in accordance with the results of the series of laboratory tests for solidification of GBFS. Finally, evaluation methods for shear failure criteria parameters of solidified GBFS by using triaxial compression tests are proposed.

From the results of the site observation, GBFS is solidifying with time. It takes a long time to solidify the whole of GBFS, because GBFS observed was not fully solidified in 18 months. It means if GBFS is used with relied on its solidification, a treatment for accelerating the solidification of GBFS is needed. For discussing this point, the condition for solidifying GBFS is checked in series of laboratory tests. They clarify that adding micro powder of furnace slag to GBFS is effective for accelerating the solidification of GBFS under sea water. Failure criteria of solidified GBFS is explained with internal friction angle and cohesion intercept. Failure criteria for residual condition of GBFS is explained by internal friction angle only. These parameters can be estimated from a single triaxial experiment..

Key Words: granulated blast furnace slag, potential solidification acting with water, pH, site observation, unconfined compression test, triaxial compression test, design strength parameter

* Head, Foundations Division, Geotechnical and Structural Engineering Department

** Research Engineer, Foundations Division, Geotechnical and Structural Engineering Department

*** Former Research Engineer, Foundations Division, Geotechnical and Structural Engineering Department

**** Senior Research Engineer, Geotechnical and Structural Engineering Department

3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan Port & Airport Research Institute

Phone : +81-46-844-5057 Fax : +81-46-844-0618 e-mail:kikuchi@pari.go.jp

目 次

要 旨	105
1.はじめに	109
2. 高炉水砕スラグの硬化に関する既往の研究	109
3. 裏込めに用いた高炉水砕スラグの施工直後からの特性変化に関する調査	111
3.1 調査概要	111
3.2 調査結果	112
3.3 考察	116
4. 高炉水砕スラグの硬化に関わる室内試験	118
4.1 試験の概要	118
4.2 実験結果	120
5. 硬化した高炉水砕スラグのせん断特性	125
5.1 排水三軸圧縮(CD)試験による高炉水砕スラグ硬化後の強度の評価	125
5.2 硬化の有無によるせん断挙動の違い	127
5.3 一軸圧縮試験結果と低圧圧密三軸圧縮試験結果の応力ひずみ曲線形状の比較	128
5.4 一軸圧縮試験結果と超低圧排水非排水三軸圧縮試験結果との比較	129
6 硬化した高炉水砕スラグの設計強度定数の評価方法	131
7. 結論	132
8. おわりに	133
参考文献	133

1.はじめに

高炉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。しかし、1989年に制定された港湾工用水砕スラグ利用手引書では、高炉水砕スラグは硬化しないものとして取り扱うことを標準とした。ところが、港湾工事に実際に利用された高炉水砕スラグを施工後6年～12年後に地盤調査を行ったところ、強度には大変大きなばらつきがあるものの、全体として硬化していることが明らかとなった(菊池・高橋, 1998)。

ここでは、その後、高炉水砕スラグの硬化する性質を利用して、液状化対策として岸壁のケーソンの裏込めとして利用した際に、施工後18ヶ月間にわたる追跡調査を行なった結果をまず紹介する。この調査結果から、硬化するにはかなりの時間がかかることがわかった。そこで、室内試験において、高炉水砕スラグの硬化に及ぼす間隙水の状態の影響を調べた。そして、高炉水砕スラグを確実に硬化させ、また硬化にかかる時間を短縮するためには、どのような環境を用意したらよいかを検討した。具体的には、間隙水のイオン環境を変えた室内試験をそれぞれの条件で約4ヶ月～9ヶ月にわたって実施し、高炉水砕スラグの硬化と間隙水の環境の関係を検討した。最後に、硬化した高炉水砕スラグのせん断特性について検討し、設計上の強度評価手法について検討した。

2. 高炉水砕スラグの硬化に関する既往の研究

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)が作られたのは1989年のことである。この手引書は、それまでの研究成果を取りまとめて、高炉水砕スラグを港湾工事における裏込め材料として用いる場合の設計の考え方をまとめたものであり、水砕スラグの物理的性質、力学的性質、化学的性質について当時の知見が示されている。その際、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。また、単位体積重量の標準的な値を提案しているが実施工の状況は十分には把握されていなかった。さらに、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。

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(菊池・高橋, 1998)。この調査を実施した際の当該高炉水砕スラグの材齢は、6年から12年程度のものである。この際の高炉水砕スラグはほとんどが地下水面以下に存在したと思われる

るものであり、そのほとんどが硬化していると判断できた。このことから、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されている。また、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度、 N 値は大幅にばらつきがあり、それらと土被り圧の影響は明確には認められなかった。また、硬化した高炉水砕スラグについて地盤工学会基準(JGS0211-2000)(地盤工学会, 2000)にしたがって求めたpHは11程度であるが、間隙中を通過する水について求めたpHはそれよりはやや小さくpHが9～10程度であった。さらに、原位置で硬化した水砕スラグの内部摩擦角 ϕ_{d0max} 、 ϕ_{d0res} はどちらも比較的大きなばらつきがあることもわかった。硬化した高炉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。

この調査及びその後の多くの現場の調査結果を総合すると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が認められた(関東地方整備局, 2004)。しかし、高炉水砕スラグが硬化するのに要する時間、順序については詳しいデータがないのが実状である。

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。高炉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(鉄鋼スラグ協会, 1983)によると、高炉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 $[\text{SiO}_4]$ 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、このような高炉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 $[\text{SiO}_4]$ 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高炉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、雰囲気は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)は高炉水砕スラグの凝結(硬化)に及ぼす海水の影響を把握するために、海水をためた水槽に高炉水砕スラグを打設し、2年弱にわたる強度の変化を調べる実験をしている。彼らは、同時に、室内においても水槽の条件と類似の条件で作成した供試体を養生し、凝結度の変化を調べている。ただし、室内試験においては、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。以上の実験の結果から、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、中性水(海水のことか?)ではほとんど強度が大きくなりなしていないとしている。なお、参考文献では、養生水中の pH や各種のイオン濃度についての報告はされていないため、弱アルカリ海水がどのようなものであったかは不明である。

来山(2003)は高炉水砕スラグの水硬性が強度、透水性に及ぼす影響を調べるために、海水と水道水を養生水として用いて、長期養生試験を行っている。松田らは、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。このことは、水道水に比べて海水の場合に潜在水硬性の傾向が顕著ではないことを示している。

以上の結果はいずれも間隙水がアルカリ性の環境では高炉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、高炉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高炉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。気乾状態程度の水が存在すれば高炉水砕スラグの硬化には十分であるため、この条件は常に満たされている。
- 2) pH が 11 以上のアルカリ性の環境であること。これはガラス質から Ca^{2+} が溶出し、硬化反応を起こさせるのに必要な環境を作る。

一般に、少量の酸や塩基が加えられたときに、pH の変化を抑える役割をする溶液のことを緩衝液と呼ぶ。海水はこのような緩衝液のひとつで、大きな緩衝容量(クリスチャン, 1989)を持っている。このため、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考えられたため、港湾工事の設計では、高炉水砕スラグは硬化しな

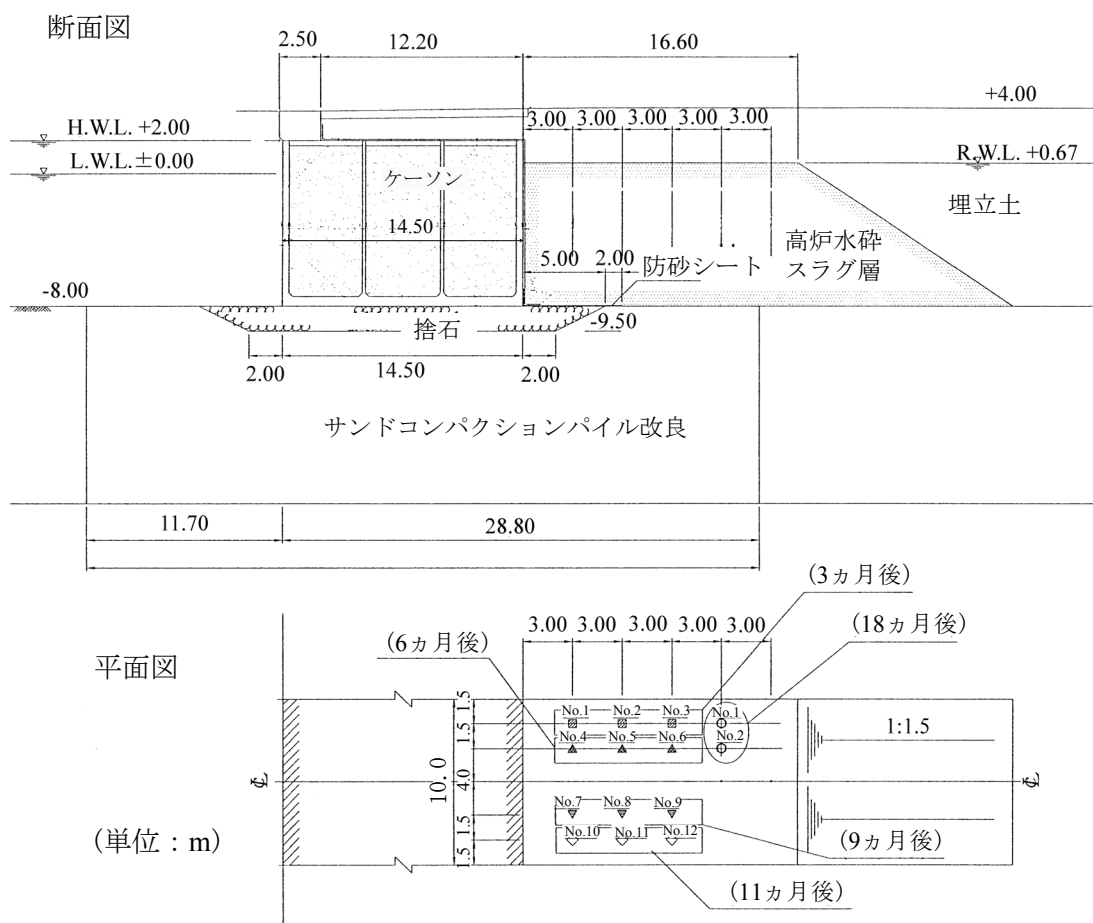


図-1 高炉水砕スラグ調査位置

いものとして取り扱うようにしたものと考えられる。

しかし、先に述べたように、港湾地域で用いられた高炉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・高橋, 1998)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、室内実験結果とは矛盾するかのような結果が得られている。

このようなことから、間隙水として海水を用いた場合の高炉水砕スラグの硬化の傾向についての検討はまだ不十分であり、同時に高炉水砕スラグの硬化に関する検討が不十分であることを意味していると考えられる。

ところで、1989年の手引書(沿岸開発技術研究センター)では、高炉水砕スラグは砂のような材料であり、内部摩擦角が35°以上あるものとしている。また、透水性が極めて高いことから液状化については検討しなくて良いとしている。このような考え方をとることによって比較的耐震性の高い港湾構造物を建設できるとされてきた。これに、さらに高炉水砕スラグが硬化することを考慮することにより、少なくとも震度法による設計法の段階ではより小さなケーソン断面で同等の耐震性を持つケーソンが設計できることになる(菊池ほか, 2005)。

ただし、高炉水砕スラグが硬化することを積極的に確実に設計に取り込むためには、高炉水砕スラグがより短時間で確実に硬化するように施工するような工夫が必要となると考えられる。

3. 裏込めに用いた高炉水砕スラグの施工直後からの特性変化に関する調査

3.1 調査概要

本調査は、ケーソン背後に裏込めとして用いられた高炉水砕スラグについて、施工直後から18ヶ月間にわたる追跡調査を行ったものである(Kikuchi et al., 2004)。施工箇所の断面と調査位置の概略を図-1に示す。この裏込めは、ガット船により水中に直投されたものである。高炉水砕スラグ投入直後に裏埋め土砂も投入されている。この部分が完全に閉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、高炉水砕スラグは外海とは事実上遮断された状態にあったと考えられる。ボーリングおよび不攪乱試料のサンプリング、サウンディングを、施工後1ヶ月目から18ヶ月目まで図-1に示す地点で行った。なお、1ヶ月目は予備調査としてNo.6付近でサンプリングを行った。1ヶ月目と18ヶ月目を除き、各調査ごとに連続サンプリング2孔と1m

ピッチの標準貫入試験を1孔実施した。18ヶ月目については、1孔でサンプリングを、1孔で標準貫入試験を実施した。ボーリングは、ロータリー式ボーリングマシンを用いたケーシング掘りを行い、循環水としては海水を用いた。不攪乱試料のサンプリングは、ロータリー式三重管サンプラーを用いて行った。このサンプラーでは、未硬化試料のサンプリングは困難であり、初期には、試料の採集率が悪かった。乱さない試料については、土粒子の密度試験、含水比試験、湿潤密度試験などの物理試験と、一軸圧縮試験、三軸圧縮試験(CD)、三軸透水試験を行った。

なお、図-1中に示す、H.W.L., L.W.L., R.W.L.はそれぞれ朔望平均満潮面、朔望平均干潮面、設計上の残留水位を示す。また、これらを含むすべての水準の基準面を工事用基準面に取り、水準の基準をCDLで表す。

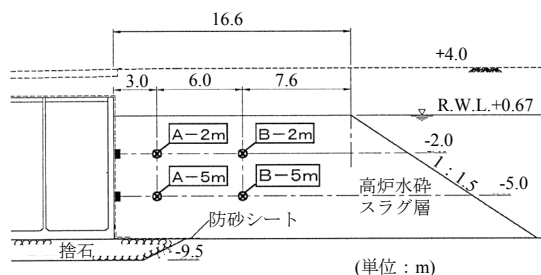


図-1 水質調査位置

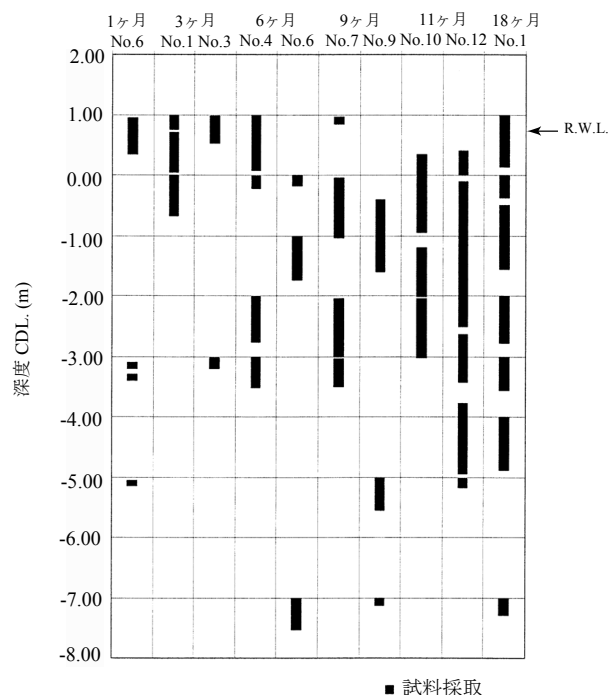


図-2 連続コアサンプリングの試料採取状況

図-2には、高炉水砕スラグ内での水質調査位置を示す。図-2に示す4点(A-2m, A-5m, B-2m, B-5m)で、施工後1ヶ月から6ヶ月まで毎月と施工後9ヶ月後と11ヶ月後にpH(ガラス電極法, JIS K-0102.12.1), 溶存酸素(隔膜電極法, JIS K-0102.32.3), 硫化物イオン濃度(硝酸銀滴定法, JIS K-0102.35.1), マグネシウムイオン濃度(キレート滴定法, JIS K-0102.51.1), 塩化物イオン濃度(メチレンブルー吸光度法, JIS K-0102.39.1), および水温を測定した。この地点の平面的な位置は図-1に示す対象域のセンターライン上である。なお、これらの高炉水砕スラグ内の水質と比較するために、港内の2地点(当該調査位置のケーソンの前面海域, および高炉水砕スラグの影響がまったく及ばないと想定される海域)でも同様の測定項目に対する調査を行った。

3.2 調査結果

(1) 試料の採取状況

図-3に今回の調査における一連の試料の採取状況を示す。この結果によると施工後3ヶ月では、ほとんどの試料が落下したため、採取出来ていないのに対し、時間の経過とともに採取率が良くなってきている。また、ボーリング時の観察との関連性を見ると、硬化したところであっても採取できないこともあるが、多くの場合、採取できる場所は硬化が始まっているところであり、硬化が不十分なところで試料が落下することが多かった。このため、試料採取できたところが硬化していたところであると考えて、採取できたところを見るとCDL±0.0mのあたりから高炉水砕スラグの硬化が始まり、次第に硬化の範囲が広がり、18ヶ月後には、R.W.L.付近からCDL-5.0m付近まで硬化している範囲が広がるような傾向となっている。

(2) 高炉水砕スラグの堆積時の物理状態

図-4に高炉水砕スラグの土粒子密度試験結果を示す。これらの試験結果は三軸圧縮試験用供試体成形時の削りかすから求めたものである。硬化の始まった試料については、硬化により気泡を内包する粒子が存在するおそれがあり、その結果土粒子密度を過小評価するおそれがある(菊池・高橋, 1998)が、削りかすを用いることで硬化に伴う土粒子密度の過小評価をなくすようにした。なお、土粒子密度には、試料採取時期の違いによる影響はなかった。図-4から土粒子密度の範囲は、2.73~2.87g/cm³, 平均で2.82g/cm³であったことがわかる。1989年の手引書(沿岸開発技術研究センター, 1989)では、高炉水砕ス

ラグの土粒子密度の平均は2.70g/cm³としているが、その後の多くの調査結果(菊池・高橋, 1998)からすると、土粒子密度の平均は2.80g/cm³程度となっており、今回用いた高炉水砕スラグの土粒子密度は一般的な高炉水砕スラグのものと一致している。なお、気泡をほとんど含まないと考えられる平均粒径12μm程度の高炉水砕スラグ微粉末の粒子密度は、2.86~2.94g/cm³程度である(日本工業

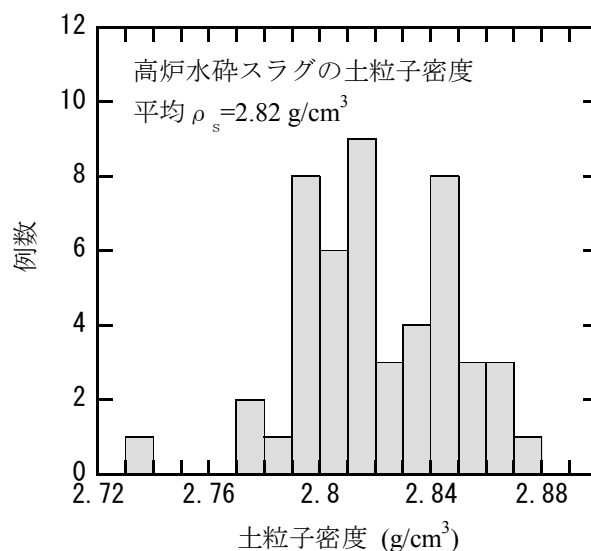


図-4 高炉水砕スラグの土粒子密度のばらつき

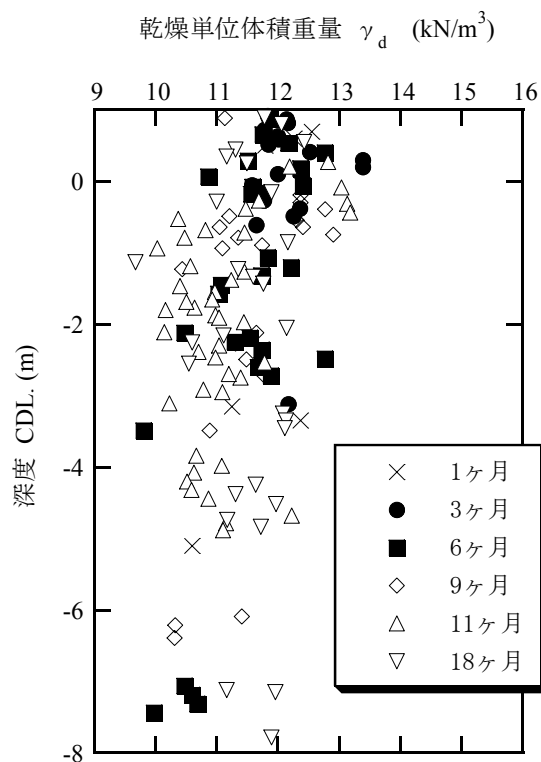


図-5 乾燥単位体積重量の深度分布

規格,1997)が、通常の形態で用いられる高炉水砕スラグの粒子には、気泡を内包しているため、密度が小さくなる。

図-5 に乾燥単位体積重量 γ_d の深度分布を示す。 γ_d は $9.5 \sim 13.5 \text{ kN/m}^3$ の範囲にあり、施工過程を反映してか、深くなると多少小さくなる傾向にある。すなわち、この工事では、高炉水砕スラグをガット船により水中に直投しており、水深が浅い方が水中落下する距離が短いため、落下エネルギーが大きく、密度が多少大きくなったものと考えられる。過去に調べた現地の高炉水砕スラグの乾燥単位体積重量は $9 \sim 14 \text{ kN/m}^3$ の範囲にあり、ほぼ同じ傾向にあった(菊池, 2003)。ただし、深度方向の単位体積重量分布はこれまでの調査と今回のもので傾向が異なっている。すなわち、参考文献(菊池, 2003)に示した結果では、全体的には、深度方向に乾燥密度が増加する傾向があるように見えるが、仔細に見ると密度変化の傾向はボーリング孔ごとに異なっており、必ずしも一定していない。

図-6 に飽和度を示す。図-6 からすると飽和度は比較的低く、18ヶ月程度では飽和度が十分には上がらない場合があるように見られる。

過去の高炉水砕スラグの現地調査の事例では、施工後6年たったが、飽和度の低いものでは70%程度のものであった(菊池, 2003)。この例は、今回のものに比べると飽和度は高いが、それでも不飽和な部分が存在していたことになる。このようなことからすると、高炉水砕

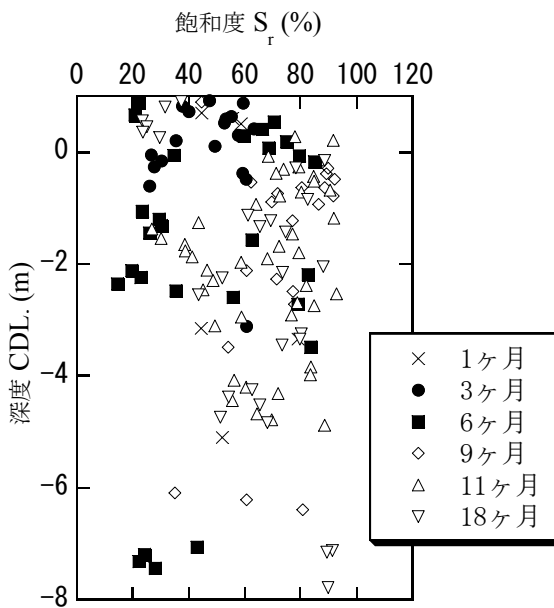


図-6 飽和度の深度分布

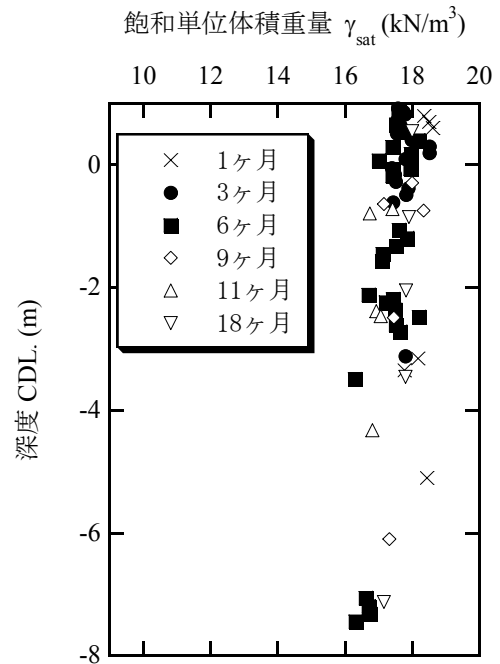


図-7 飽和単位体積重量の深度分布

スラグが飽和するにはかなりの時間を要することが考えられる。また、場合によっては、高炉水砕スラグは完全には飽和しないこともありうると考えられる。

このように、原位置にある高炉水砕スラグがどの程度の期間で飽和するかは不明であるが、最終的には飽和すると考え、図-5 の乾燥単位体積重量から飽和単位体積重量を求めると飽和単位体積重量は $16 \sim 19 \text{ kN/m}^3$ となる(図-7)。すなわち、水中単位体積重量は $6 \sim 9 \text{ kN/m}^3$ となる。この値は1989年の手引書(沿岸開発技術研究センター, 1989)で設計用値として謳われている水中単位体積重量 7 kN/m^3 よりもやや大きめの値となることがありうることを意味している。

(3) 透水係数の変化

採取した試料について三軸試験機による透水試験を実施した。図-8 に高炉水砕スラグの透水係数と試料採取深度の関係を示す。図中には、観察による硬化の程度についても示している。これを見ると硬化していないものが比較的大きな透水係数を示す傾向にあるが、硬化の有無による差はあまりなく、全体として透水係数は $10^{-3} \sim 10^{-2} \text{ cm/s}$ 程度である。これまで高炉水砕スラグは硬化に従って透水係数が低下するといわれてきた(沿岸開発技術研究センター, 1989)が、今回の結果は必ずしもこれまでの結果を支持するものではなかった。

(4) 排水三軸圧縮試験(CD試験)結果

図-9と図-10に代表的な排水三軸(CD)試験結果を示す。CD試験結果を見ると、硬化していない試料では、軸差応力の極大値の発現が明確ではないのに対し、硬化していたものについては、軸差応力の極大値が明確に現れる。また、せん断初期の応力ひずみ曲線の立ち上がりが急である。さらに、硬化した試料はダイレータンスーが大きく、全体的に体積圧縮ひずみが小さくなる傾向にある。また、軸ひずみで25%以上までせん断すると、軸差応力がほぼ一定値に落ち着くようになる。

(5) 標準貫入試験結果

標準貫入試験は、図-1に示すNo.2, No.5, No.8, No.11, および18ヶ月のNo.2の地点で実施した。その結果を取

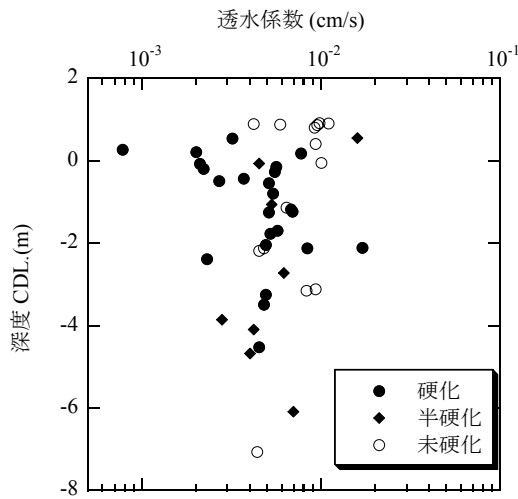


図-8 透水係数と深度の関係

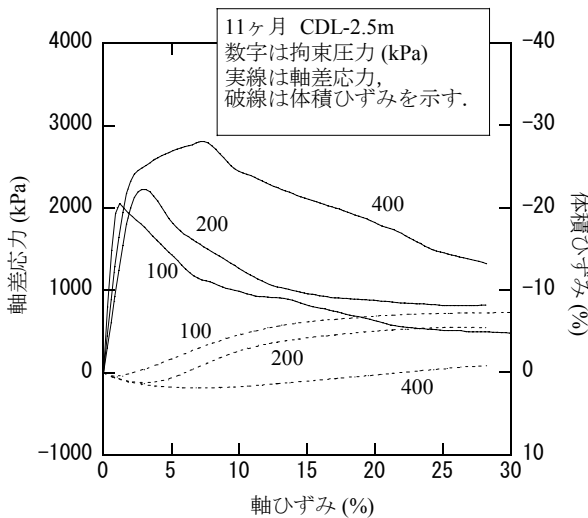


図-9 硬化した試料のせん断時の挙動

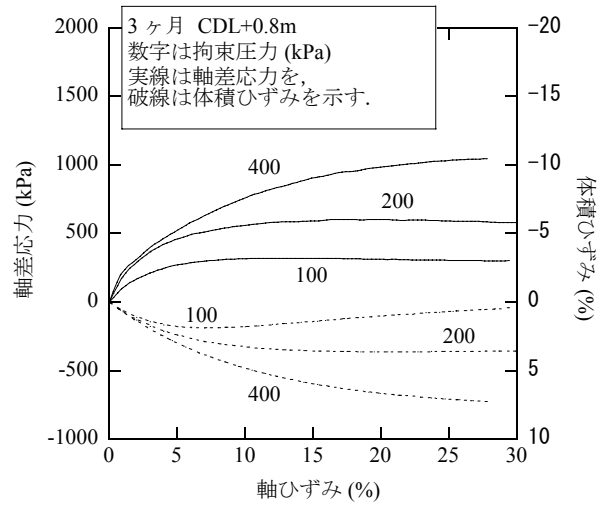


図-10 硬化していない試料のせん断時の挙動

りまとめたものを図-11に示す。この結果を見るとすでに施工後3ヶ月でN値が40を越える点がある。しかし、その一点を除けばN値は10以下と小さな値となっている。その後、経過時間の増加とともに全体的にN値は増加する。ここで注目すべきことは、CDL±0.0m付近からCDL-3.0m付近までは全体的にN値が大きく、それより上方でも下方でもN値は比較的小さいことである。この傾向は、硬化の傾向と類似しており、硬化の指標となる可能性のあることを示している。

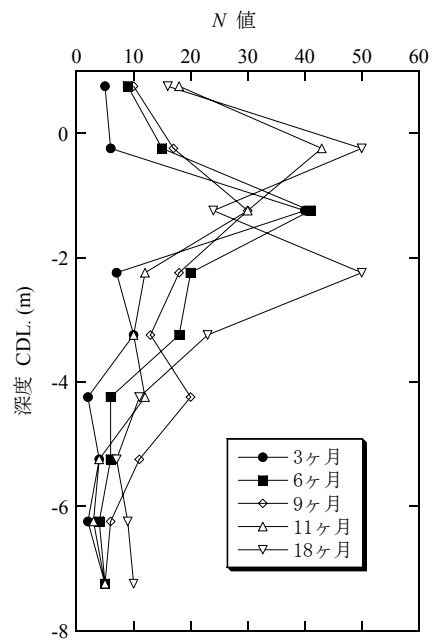


図-11 N値の深度分布

(6) 水質環境調査結果

この調査では、高炉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、図示はしていないが、当該ケーソン直前面の海水(No.1)、及び高炉水砕スラグ施工域とは埋立地をはさんで反対側となる点(No.2)において水質調査を行った。調査項目は、3.1で述べたように、pH、溶存酸素、マグネシウムイオン、硫化物イオン、塩化物イオン、水温である。

水温については、高炉水砕スラグ内、周辺海域ともにほぼ同じ温度であった。また、溶存酸素については、周辺海域では、一年間にわたり6~8mg/lであるのに対し、高炉水砕スラグ層内では、ほとんど0.5mg/l程度であり、高炉水砕スラグ層内が嫌気性となっていた。また、硫化物イオンについては、周辺海域ではほとんど検出されないが、高炉水砕スラグ層内では数10~数100mg/l検出された。一般に高炉水砕スラグからは、硫化物イオンが溶出し、これが酸素と結合し、 SO_4^{2-} を生成するという過程を経る。この反応のためにこのような現象が生じたものと思われる。

図-12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、高炉水砕スラグ層内のpHは、地点により多少差があるが、全体的に高くなる傾向にある。特に、CDL-2mと比較的浅い地点では、3ヵ月後までにpH12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が比較的低く、特に、A-5mの地点では、11ヵ月後にもpH8が測定されるくらいにpHの状態が不安定である。

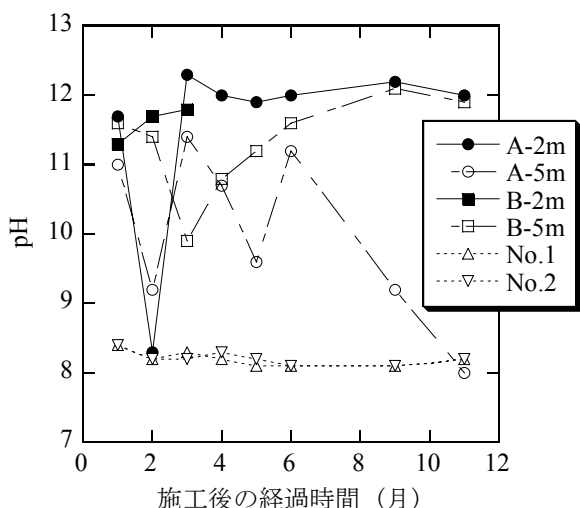


図-12 pHの変化

図-13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19000mg/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、高炉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ヶ月程度で海水が真水(雨水が起源か?)に置き換わったものと考えられる。

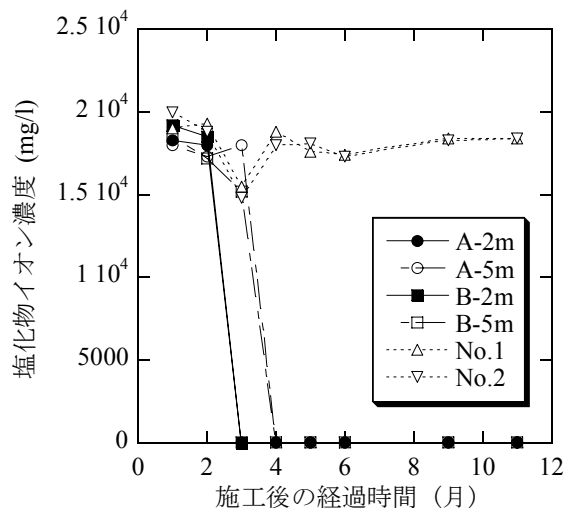


図-13 塩化物イオンの変化

図-14にマグネシウムイオンの変化を示す。一般に海水中には、 Mg^{2+} は約1300mg/l含まれている。周辺海域では、 Mg^{2+} 濃度はほぼ一定に保たれているが、高炉水砕スラグ中ではきわめて濃度が低い。 Mg^{2+} はアルカリ性環境では沈殿しやすい性質を持っており、比較的早い段階から高炉水砕スラグ層内のpHが高かったこともあり、塩化物イオンよりも早くにイオン濃度が低下したのではないかと考えられる。ただし、A-5mの地点は例外的に、半年以上たっても Mg^{2+} のイオン濃度が高い場合があった。この原因のひとつとして、pHの変化の影響が考えられ、海水環境下にあった際に沈殿したMgがpHの変化に伴って溶出したり沈殿したりしているものと考えられる。ただし、なぜpHが変化したかについては分からない。また、pHが変化したり、 Mg^{2+} 濃度が変化したりしたことから、この地点では間隙水が移動していた可能性がある。ただし、このことは、他の3つの観測地点の間隙水が停留していたことを意味するものではない。また、A-5m地点ではpHが変化したり Mg^{2+} 濃度が変化したりしているが、塩化物イオンがほとんど存在しなかったことから、この地点に海水の出入りがあったとはいえないのではないかと考えられる。

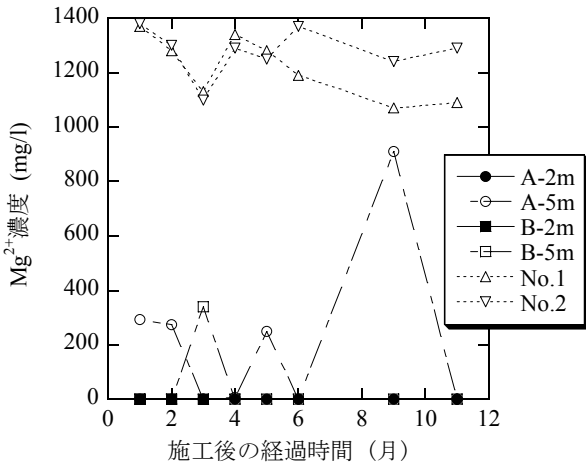


図-14 マグネシウムイオンの変化

以上のことを総合すると、(1)浅部から pH が上昇する傾向にある。(2)浅部から先に塩化物イオン濃度が低下し、4ヶ月程度で CDL-5m までは塩化物イオン濃度がほぼ 0 となる。(3)Mg²⁺濃度は pH の変化に伴って変化する。という傾向にあり、特に、(2)の理由から浅部では比較的早い段階で海水の濃度が低下する傾向にあること、また、深部で特にケーソンに近いところでは、水質が比較的变化しやすいことが想像される。

3.3 考察

(1) 高炉水砕スラグの硬化による見掛けのせん断強度

硬化した場合の高炉水砕スラグの排水三軸圧縮試験の応力ひずみ曲線は図-15 のようになっている。

そこで、硬化による見かけのせん断強度として、最大軸差応力 q_{max} と残留軸差応力 q_{res} の差 q_{cd} の半分を c_m と定義する。

この方法では、硬化によるせん断強度を過小評価する傾向となる。特に拘束圧が大きい場合には、その傾向が強くなる。すなわち、最大圧縮強度と残留圧縮強度の差を硬化によるせん断強度としているため、仮に硬化していたとしても最大圧縮強度に達する以前に残留圧縮強度相当のせん断を受けたあとでも硬化による強度を保持していなければ、硬化によるせん断強度とみなすことができないからである。

善ら(1990)は事前混合処理土について、最大軸差応力時の強度の評価を試みている。すなわち、事前混合処理土のせん断強度パラメータとして c_d と ϕ_d を組み合わせることを提案している。善らは、最大軸差応力時の内部摩擦角と未硬化時の内部摩擦角を比較してその両者にあま

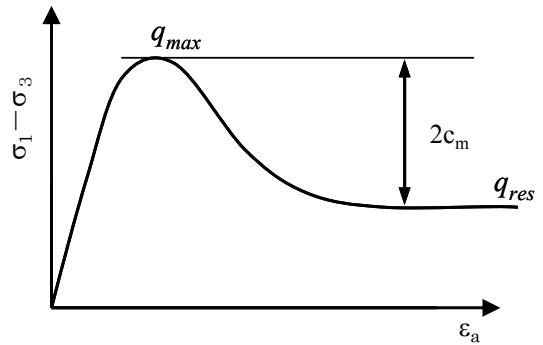


図-15 硬化した試料の応力ひずみ曲線のイメージ

り差がないことを考慮して、一軸圧縮強度 q_u から、 c_d を求める方法として $c_d = (q_u/2) \cdot \tan(\pi/4 - \phi_d/2)$ を示している。

さらに、善らは繰返し三軸試験を実施し、 q_u が 100kPa 以上であれば、事前混合処理土は液状化しないとした。

ここでは、その考え方を参考にして、 q_u に相当するものとして q_{cd} を考えることにする。そして、 $c_m = q_{cd}/2$ を硬化の指標とすることを考えることにする。

図-16 に材齢と c_m の関係を示した。この図では、3つの圧密圧力で求めた c_m を示している。仔細に見ると c_m は多少拘束圧の影響を受け、圧密圧力が高くなると 1000kPa を超えるような大きな c_m が得られにくい傾向にあったが、その点を除いて考えれば、比較的圧密圧力の影響を受けていないと判断できた。図-16 を見ると、時間の経過とともに c_m の大きなものが増えていき、小さなものが少なくなる傾向にある。善らの考え方を参考にして、 $c_m = q_{cd}/2 = 50\text{kPa}$ を一つの基準と見てみると実際上は

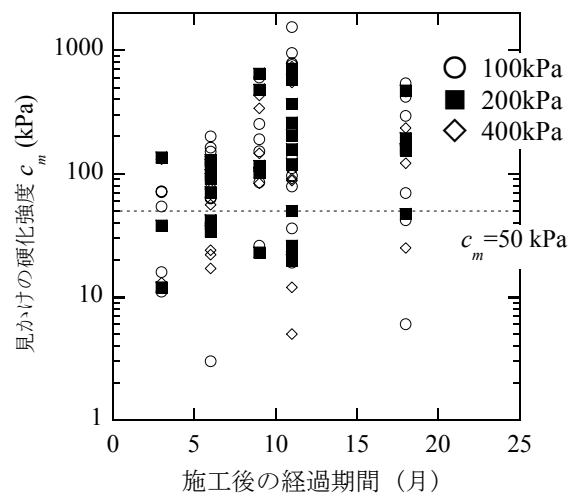


図-16 材齢と c_m の関係

硬化した高炉水砕スラグのかなりのもので c_m が 50kPa をかなり上回っている。

以下の整理では、 $c_m=q_{cd}/2=50\text{kPa}$ を硬化の判断基準とみなし、 c_m が 50kPa を超えるものを硬化しているとし、 $0 < c_m < 50\text{kPa}$ のものを半硬化と呼ぶことにする。なお、この判断は便宜的なものであるが、圧縮強度として q_u よりも小さめに評価する $q_{cd}=2c_m$ を q_u と同値なものであると考えることでやや安全側の考慮ができるものと考えられる。

(2) 試料の観察による硬化の程度の評価と N 値の関係

各サンプリング試料について試料の掘進長に対する採取率と半硬化と判断されたものも含む硬化していたと判断される試料の比率を表-1 に示す。試料が硬化していたかどうかは目視と指等で軽く押すことによって調べた。試料の採取率は時間とともに増加しているが 18 ヶ月後でも 50%程度であった。硬化率についても時間とともに増加しており、18 ヶ月後にはほぼ 40%に達している。ボーリング時のオペレーターの状態判断からすると実際には、強度が高く硬化していた可能性があったところであっても、サンプリング中に落下したために試料を採取できなかったところも多く、硬化していたところの割合は表に示される以上であったと思われる。

表-1 試料採取率と硬化率の推移

項目	3ヶ月	6ヶ月	9ヶ月	11ヶ月	18ヶ月
試料採取率(%)	12	21	25	45	54
硬化率(Bor.-1)(%)	0	16	22	23	39
硬化率(Bor.-2)(%)	0	10	18	52	—
平均硬化率(%)	0	13	20	38	39

注)全掘進長 9m に対して、18 ヶ月はサンプリングは 1 孔に対してのみ行われている。

表-2 N 値がある値を超える比率(%)

項目	3ヶ月	6ヶ月	9ヶ月	11ヶ月	18ヶ月
N 値 10 以上	22	44	78	67	78
N 値 15 以上	11	44	44	33	56
N 値 20 以上	11	22	22	22	44
N 値 25 以上	11	11	11	22	22
N 値 30 以上	11	11	11	22	22

また、 N 値の調査回数に対して N 値がある数字を超える比率について整理したのが表-2 である。この結果から、高炉水砕スラグによる地盤では、時間の経過とともに

N 値が増加する傾向にあることがわかる。また、試料採取できたところと N 値が大きいところとは比較的一致している。これらの結果から、高炉水砕スラグの硬化と N 値には何らかの相関性があることが窺える。

(3) 高炉水砕スラグの硬化の経時的変化

これまでのボーリング結果、 N 値の調査結果、コアの観察などからすると高炉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は含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理解される。このようなことから、高炉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。そこで、これま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。図-17 にその結果を示す。ここでは、地盤を硬化の程度によって 3 種類に分けている。このときの硬化の評価は 3.3(1)を考慮して図-15 に示したみかけの硬化強度 c_m を指標としている。すなわち、全く硬化していないと考えられる部分、半硬化状態にあると考えられる部分($0 \leq c_m \leq 50\text{kPa}$)、完全に硬化していると考えられる部分($c_m \geq 50\text{kPa}$)の 3 種類である。

ここでの高炉水砕スラグ層は CDL.-8m~+1m までの 9m である。残留水位は概ね CDL.+0.7m と考えられる。なお、残留水位は潮位によって変動するが、この現場では定期的には測っていない。しかし、サンプリング時の観測からすると残留水位は概ね上記の値であったと考えられる。

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 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、完全硬化領域は高炉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。

2.で述べたように、これまでの高炉水砕スラグの硬化に関する研究成果によれば、①水が存在すること、②pH が高いこととされていた。しかし、4.で述べるように、海水のように多くのイオンを含む環境では、pH が高くなっても硬化が始まることが示されている。4.では、間隙水として海水を用いた場合に硬化が始まるには約 3 ヶ月の期間を必要としていた。さらに、同じ研究では、アル

カリ刺激だけでは硬化が始まるのに6ヶ月を要した。このように、特別な処理をせずに高炉水砕スラグを硬化させるにはかなりの時間を要することがわかる。また、松田ら(2004)は、供試体内に間隙水を通水させて常時間隙水が移動している状態にあると硬化が起りにくいことを示している。

今回の一事例だけでは必ずしも十分な例証とはいえないが、今回の現場では、図-1に示すようにケーソン下部の捨石層を通して高炉水砕スラグは外海と接しているため、潮の干満によって間隙水の移動が激しい部分がある。3.2(6)で示した水質調査結果は海水の流入を証拠づけるものではないが、図-12と図-14に見られた水質の変化は、高炉水砕スラグの下部層で間隙水の移動があったことを物語るものである。

以上のことから、今回のような形でケーソンの背面に用いられる高炉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ありうことが予想される。

このため、高炉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確実に硬化させる方法を検討することが必要である。

4. 高炉水砕スラグの硬化に関わる室内試験

4.1 試験の概要

すでに述べたように、高炉水砕スラグが硬化するには①水が存在すること、②pH11程度以上のアルカリ性環境が維持されることが必要といわれている。

著者らは、このような結論のうち②の成立条件について疑問を感じていた。すなわち、これまでの多くの実験では、pHを高めるためにはセメントや消石灰系の刺激物を用いているケースが極めて多く(西ら, 1982; 徳光ら, 2001; 伊藤ら, 1971)、硬化の理由が本当にpHが高いことだけによるのかは疑問であると感じていた。また、図-1に示した条件では、裏込め層内の間隙水の塩化物イオン濃度が短期間に低くなるなど海水環境にあったといきれない面があるが、他の現場では、定常的に海水に

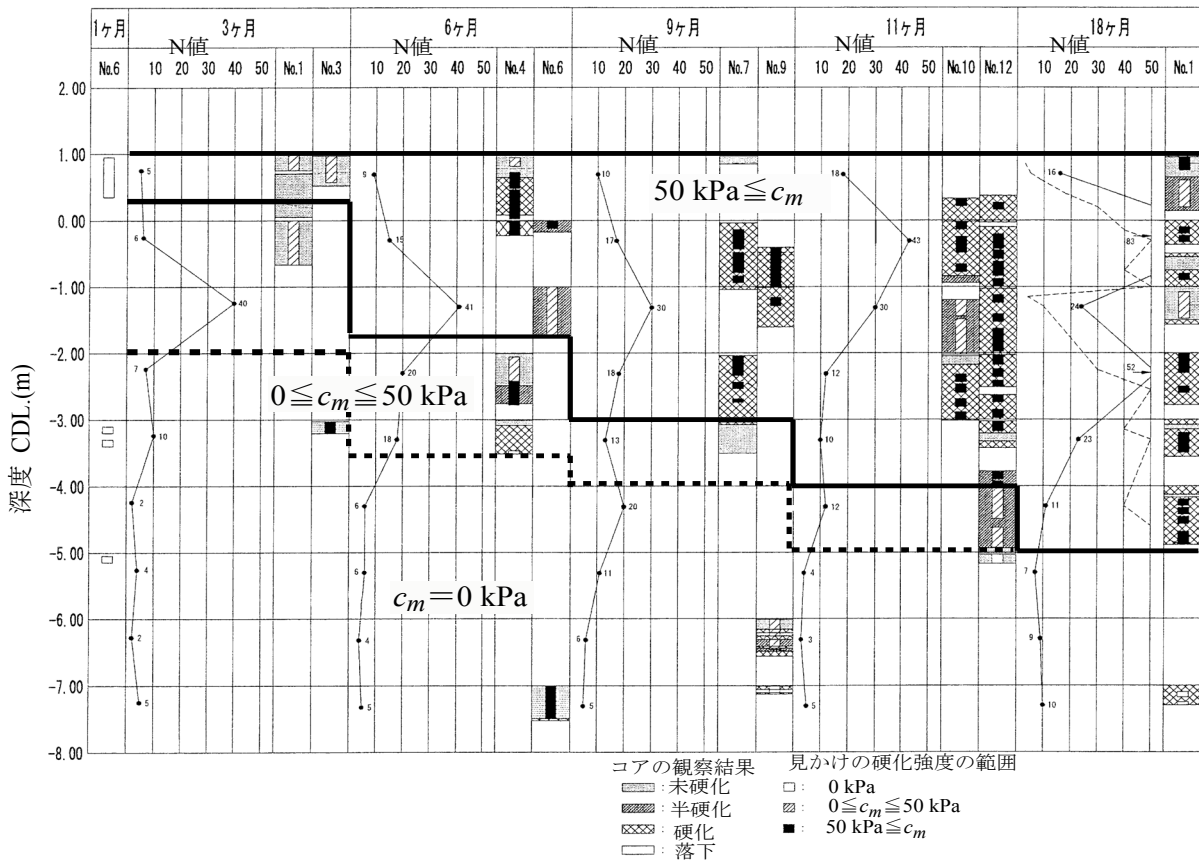


図-17 本調査における高炉水砕スラグの硬化進展状況

晒されていると考えられる場所のように pH があまり高くなくとも高炉水砕スラグの硬化が認められている場所があった。このようなことから、複雑なイオン環境を与えることによって pH が高くなくても高炉水砕スラグが硬化し始める条件を与えられるのではないかと考えた。また、3.3 で述べたように、高炉水砕スラグの硬化を期待した設計を行うためには、硬化を促進させるか、確実に硬化させる方法についての検討が必要である。

そこで、ここでは4シリーズの実験を実施し、高炉水砕スラグの硬化に及ぼす間隙水の影響について検討した結果を示す。

実験に用いた高炉水砕スラグは土粒子密度 $\rho = 2.82 \text{ g/cm}^3$ 、最小密度 $\rho_{\min} = 1.144 \text{ g/cm}^3$ 、最大密度 $\rho_{\max} = 1.459 \text{ g/cm}^3$ である。粒径加積曲線を図-18 に示す。

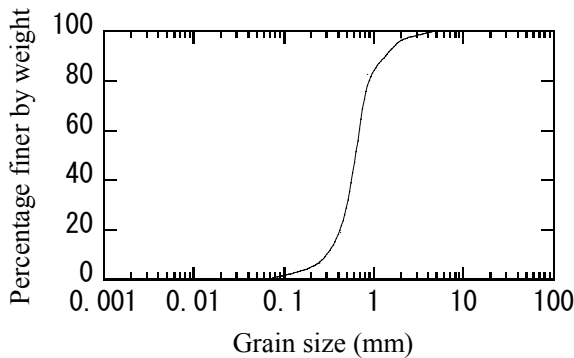


図-18 高炉水砕スラグの粒径加積曲線

シリーズ1(菊池・木村ら, 2004)では、間隙水の違いが高炉水砕スラグの効果に及ぼす影響を調べるために、表-3 に示すような間隙水の条件での養生実験を行った。ここで、セメントミルクの数字は、高炉水砕スラグの重量に対する高炉セメント B 種の重量の比率である。この実験では、高炉水砕スラグが少しでも硬化しやすい条件を与えるために、相対密度を 80% と高めの状態で試料を

表-3 シリーズ1で用いた間隙水

記号	間隙水の種類	間隙水の初期 pH
C2	セメントミルク 2%	12.5
C4	セメントミルク 4%	12.7
C6	セメントミルク 6%	12.8
C8	セメントミルク 8%	12.8
C10	セメントミルク 10%	12.8
ASW	人工海水	8.1
NaOH	0.005 規定 NaOH 水溶液	11.9

作製することにした。試料は、直径 5cm、高さ 12cm のソフトモールドに 10cm の高さに詰め、30cc 程度の上澄液を残して、20°C で密閉養生した。

シリーズ2では、低密度の高炉水砕スラグについて養生実験を行った。相対密度は 50% に設定した。この実験では、試料はシリーズ1と同じ種類のモールドに詰め、シリーズ1と同様に養生した。シリーズ1の実験結果から、硬化すると溶液中に自然にカルシウムイオンが溶け出すので、また、カルシウムイオンや塩素イオンの存在しない NaOH 溶液の場合が硬化が遅かった(図-19 と図-21)ので、カルシウムイオンや塩素イオンの有無によって硬化に差があるのではないかと考え、間隙水として、イオン交換水、人工海水、CaCl₂ 溶液、NaCl 溶液を用いて養生実験を行った。養生は 20°C で行い、ここでも多少上澄み液が残るようにして実験を行った。

表-4 シリーズ2で用いた間隙水

記号	間隙水の種類
海水	人工海水
水	イオン交換水
CaCl ₂	塩化カルシウム溶液(濃度 0.04mol/l)
NaCl	塩化ナトリウム溶液(濃度 2.46 mol/l)

シリーズ3では、添加物の効果について検討した(中島・菊池ら, 2005)。ここでは、添加物として高炉セメント B 種(セメント)と高炉スラグ微粉末 4000(微粉末)をそれぞれ高炉水砕スラグの重量の 10% 添加した。また、間隙水としては、イオン交換水(水)と人工海水(海水)を準備した。高炉水砕スラグの相対密度は 50% とした。養生条件はこれまでと同じく、上澄み液が多少上部に残るようにし、20°C で密閉養生した。

表-5 シリーズ3で用いた間隙水と添加物

記号	条件
WC	イオン交換水+セメント 10%
AC	人工海水+セメント 10%
WM	イオン交換水+高炉スラグ微粉末 10%
AM	人工海水+高炉スラグ微粉末 10%

シリーズ4では、シリーズ3の結果から、海水環境下で高炉水砕スラグの硬化を促進するには、高炉スラグの微粉末を添加するのが有望であることに着目し、高炉スラグ微粉末の添加量の違いが高炉水砕スラグの硬化特性に及ぼす影響について検討した。ここでは、高炉水砕ス

ラグの相対密度は50%とし、間隙水には人工海水を用いて、高炉スラグ微粉末を高炉水砕スラグの重量の2%から10%添加してシリーズ1と同様の方法で試料を養生した。

さらに、シリーズ4では、硬化に伴う強度定数の評価を行うために、硬化した試料に対し、一軸圧縮試験とCD試験、圧密非排水三軸圧縮(CU)試験を実施した。このうち、三軸試験については、どちらの排水条件のものに対してもセル圧230kPa、背圧200kPaとした。また、試験実施の事情から、CU試験は、高炉水砕スラグ微粉末10%、6%、2%配合したものに対してしか実施していない。

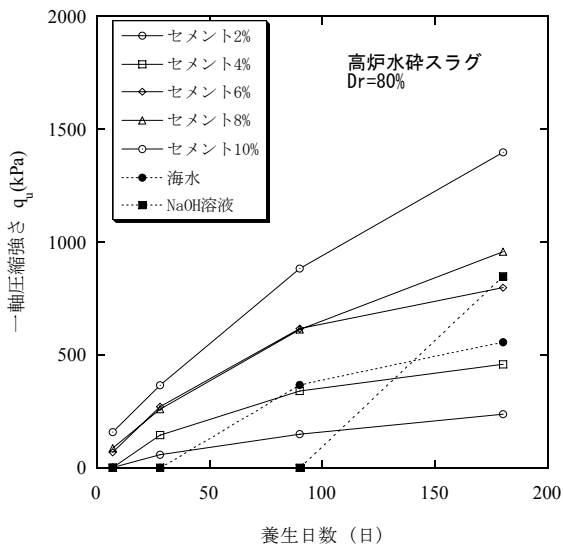


図-19 養生日数による一軸圧縮強さの変化(シリーズ1)

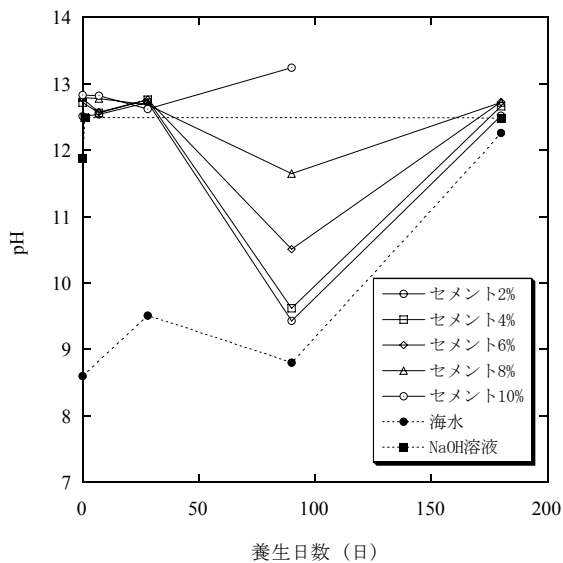


図-20 養生日数による pH の変化(シリーズ1)

4.2 実験結果

(1)シリーズ1

図-19に養生日数と一軸圧縮強さの関係を示す。セメント添加をしたものは、セメント量の違いによって強度の伸びが異なるが、いずれも早期から一軸圧縮強度が発現することがわかる。人工海水を間隙水としたものでは、90日目から一軸圧縮試験が出来るようになり、その後、急速に強度が増加していく傾向にあることがわかる。NaOH溶液のものは、90日目までは硬化せず、180日目になって初めて一軸圧縮試験が出来る程度に硬化した。ただそのときの強度の増加は急激であった。

この実験における pH の変化を図-20に示す。pH は供試体上部の上澄み液からサンプリングしたものについて調べた。なお、別途供試体下部から供試体内を通過した間隙水についても pH を測り、上澄み液の pH と比較したところ、ほぼ同じ pH となった。このことから、上澄み液の pH は供試体内部の pH を代表しているものと考えられる。人工海水では硬化が始まった時に pH が 11 に達していないことに注目すべきである。また、NaOH 溶液でははじめから pH は 11 をはるかに超えていたが、硬化が認められるのに大幅に時間がかかった。以上の結果は、pH が 11 以上であれば硬化するが、いつ硬化するかを明らかに出来ない(反応速度は pH だけでは説明できない)ことを意味している。また、人工海水では pH が 11 に達しなくても硬化する可能性があることを意味している。

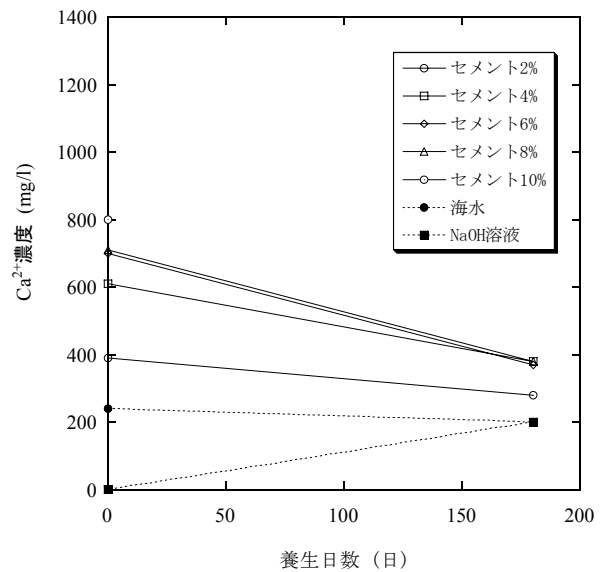


図-21 養生日数による Ca²⁺濃度の変化(シリーズ1)

図-21にはこの実験の際の上澄み液のカルシウムイオン濃度を示している。セメントを添加した場合と人工海水の場合には、もともと溶液にカルシウムイオンが存在するため、それぞれ比較的高濃度でカルシウムイオンが存在する。一方、NaOH 溶液にはカルシウムイオンが存在しない。実験の都合上、ここでは、180 日経過後、すなわちすべての条件で硬化が認められた後でしかカルシウムイオンが測られていないが、NaOH 溶液のケースでもカルシウムイオンが測定されており、どのケースでもカルシウムイオン濃度が 200~400mg/l に存在するようになってきている。以上のことから、硬化の際に高炉水砕スラグからカルシウムイオンが出るとともに、平衡濃度はせいぜい 200~400mg/l であるようである。

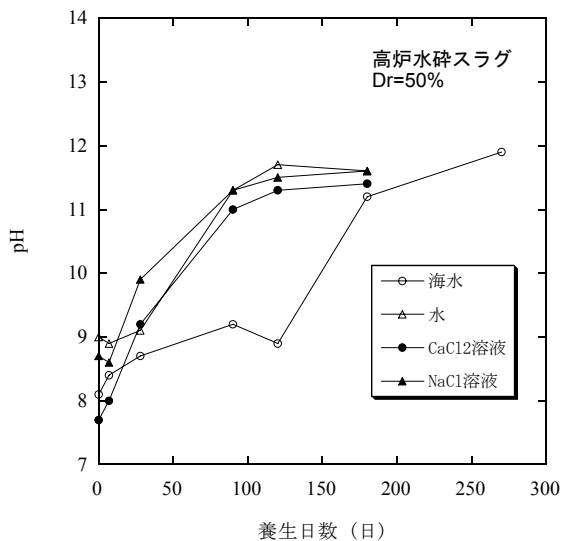


図-22 養生日数による pH の変化(シリーズ 2)

(2)シリーズ 2

シリーズ 2 では、間隙水が海水のものについては 270 日、他の条件のものについては、180 日養生したが、硬化が認められたのは、海水の条件のものだけであった(図-24)。

このシリーズにおける pH の変化を図-22 に示す。海水以外の条件のものはほぼ同じように pH が上昇するが、pH が 11 を超えるのには、100 日程度の時間を要している。一方、海水の条件のものは、他の条件のものに比べて pH の上昇が遅く、180 日で初めて pH が 11 を超えている。

図-23 には、カルシウムイオン濃度の時間変化を示す。CaCl₂ は水によく溶けるため、間隙水が CaCl₂ 溶液のものはカルシウムイオン濃度が非常に高い。海水中には、300mg/l 程度のカルシウムが溶けているため、水や NaCl

溶液の条件のものに比べるとカルシウムイオン濃度は高くなっている。CaCl₂ 溶液の結果を見ると、pH が比較的高く、カルシウムイオンが多く存在していても硬化しやすくなる訳ではないことがわかる。

シリーズ 1 とシリーズ 2 の実験の結果からは、間隙水が同じ人工海水でも密度が高い方が硬化しやすいこと、pH だけでは硬化の指標とならないこと(図-22)、Ca²⁺濃度も硬化の指標ではないこと(図-23)が言えると思われる。

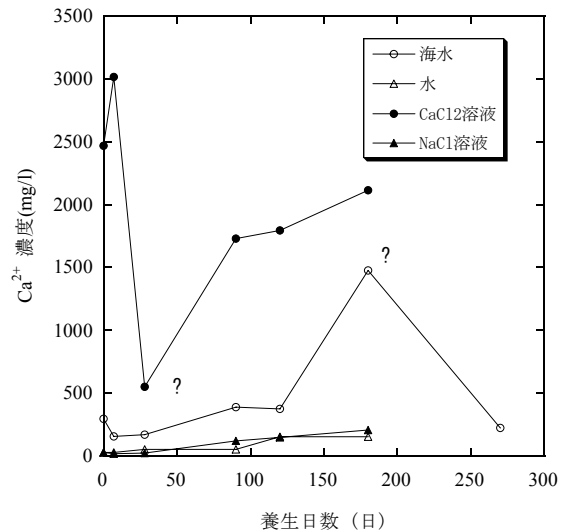


図-23 養生日数による Ca²⁺濃度の変化(シリーズ 2)

(3)シリーズ 3

図-24 に一軸圧縮強さの変化を示す。セメントを添加した場合には、養生の初期から一軸圧縮強度が発現する。このことはシリーズ 1 でも見られたことである。また、セメント添加の場合に間隙水が人工海水よりもイオン交換水のほうが強度の増加が大きいことがわかる。

一方、高炉スラグ微粉末を添加したときは、間隙水が人工海水の場合で 28 日目から、イオン交換水の場合には、90 日目から一軸圧縮強度が確認できた。このように初期の強度発現が遅く、イオン交換水に比べて人工海水の場合のほうが強度の増加が速いことがわかる。しかも、いずれの間隙水の条件のものもその後の強度増加傾向は著しく、180 日目までにセメント添加の場合の強度を超えている。以上のように、高炉スラグ微粉末を添加した場合には、間隙水が海水のほうが明らかに硬化しやすく、また初期硬化は生じにくいものの養生日数が進むにつれて、硬化強度がセメント添加の場合よりも大きくなる傾向が見られた。

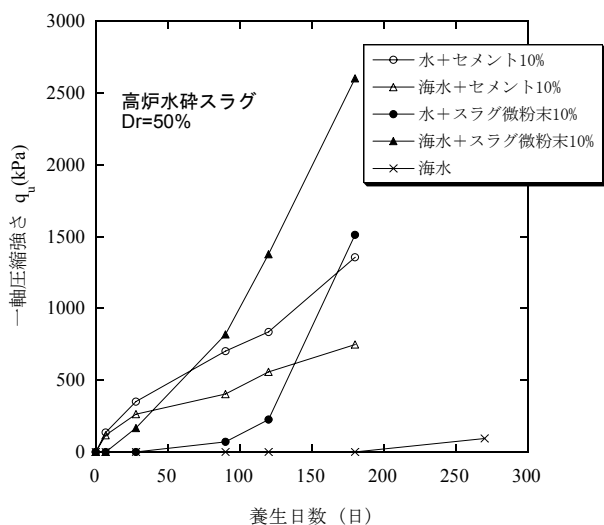


図-24 養生日数による一軸圧縮強さの変化(シリーズ2&3)

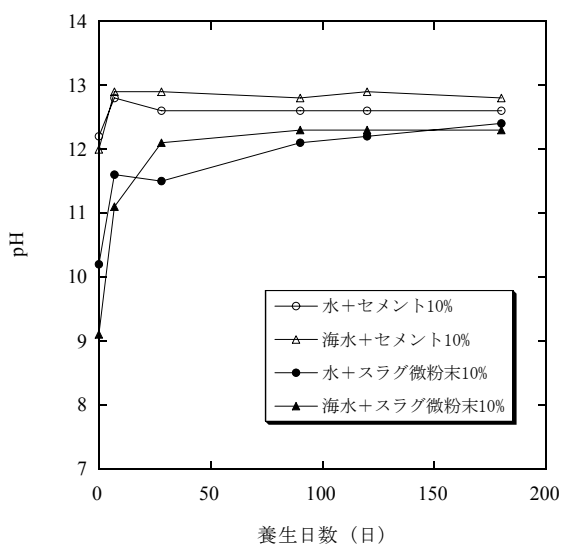


図-25 養生日数による pH の変化(シリーズ3)

図-25 に pH の時間変化を示す。pH は常にセメント添加のものの方が大きいですが、いずれのケースにおいても少なくとも pH11 は超えており、pH11 を超えるかどうかで硬化するかどうかの判断が出来ないことを示している。

菊池・箕作ら(2005)は、高炉水砕スラグを現地に埋立て、2. で示したのと同様に施工後の高炉水砕スラグの硬化についての追跡調査を行った。この実験では、新鮮な高炉水砕スラグのほかに長期材齢(2 年在庫)の高炉水砕スラグを用いた実験も実施している。長期材齢の高炉水砕スラグは微粒分を含んでいるためか、硬化が早い傾

向にあった。

この結果と今回の結果は同じ傾向を持っており、高炉水砕スラグの微粒子が含まれることで硬化を促進する効果がありそうである。

(4)シリーズ4

図-25 にシリーズ4での一軸圧縮強度の時間変化を示す。高炉スラグ微粉末の量が 8%以上の場合には、ほぼ同じような強度変化の傾向を示しており、6%以下の場合には、添加量の違いによって強度発現の程度も異なる傾向にあった。なお、参考のため、シリーズ3の時の高炉スラグ微粉末 10%添加の実験結果も示した。この比較から、再現性はそれなりにあることがわかるであろう。

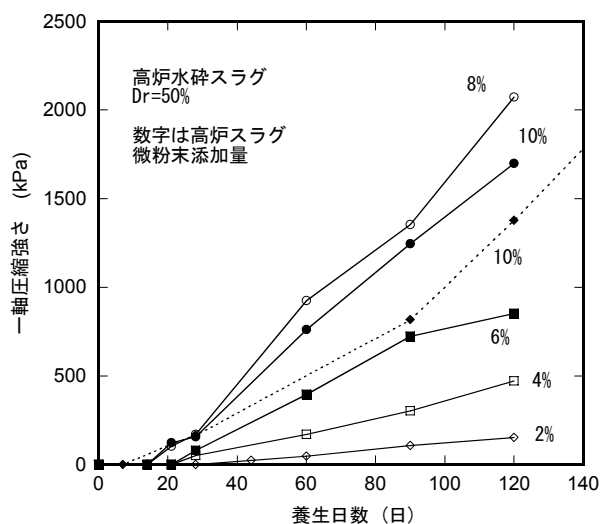


図-26 高炉スラグ微粉末の添加による一軸圧縮強さの時間変化の様子

図-27 に pH の時間変化を示した。計測は、供試体が硬化してからしか測定が無く、そのデータでは、pH は 12 を超えている。シリーズ3の添加率 10%のデータもあわせて載せた。pH についても再現性があるとすると、いずれの添加率のケースも pH は養生日数 20 日程度で pH が 12 近くまで上昇するようであり、添加率による pH の差は無いようである。このことから改めて pH だけから高炉水砕スラグの硬化は議論できないことがわかる。

図-28 には、シリーズ3とシリーズ4の結果から間隙水がイオン交換水の場合と海水の場合と添加物がセメントの場合と高炉スラグ微粉末の場合の組み合わせによって高炉水砕スラグの硬化強度がどのように異なるかをまとめた。間隙水にイオン交換水を用いた場合には、高炉スラグ微粉末を添加しても強度の増加はほとんど期待できないのに対して、間隙水が海水の場合には、高炉スラ

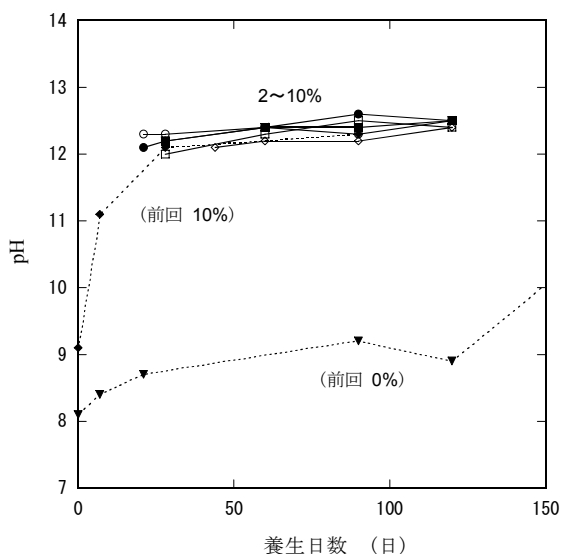


図-27 高炉スラグ微粉末の添加量の違いによる pH の時間変化

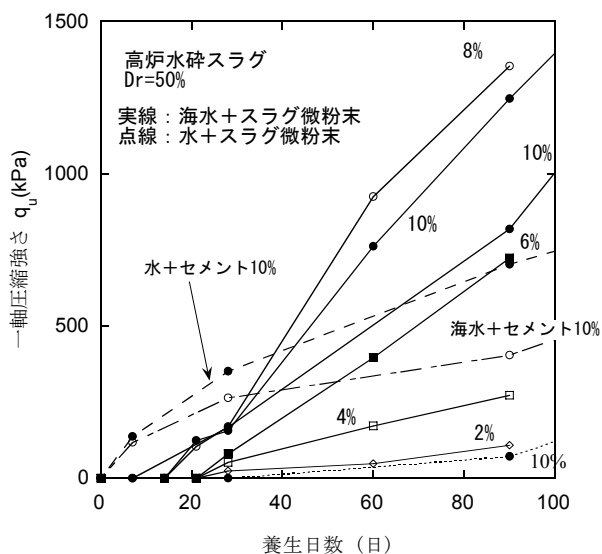


図-28 高炉スラグ添加の場合とセメント添加の場合の強度変化の違い

グ微粉末添加による強度増加の傾向が著しいことがわかる。

このシリーズでは、一軸圧縮強度と三軸圧縮強度の関係を比較するために実験を随時行ってきた。

図-29 は養生日数 60 日の際の一軸圧縮試験結果の例である。この結果からわかるように、添加量の少ないものは、単に圧縮強度が低いばかりでなく、せん断剛性も小さい傾向にある。

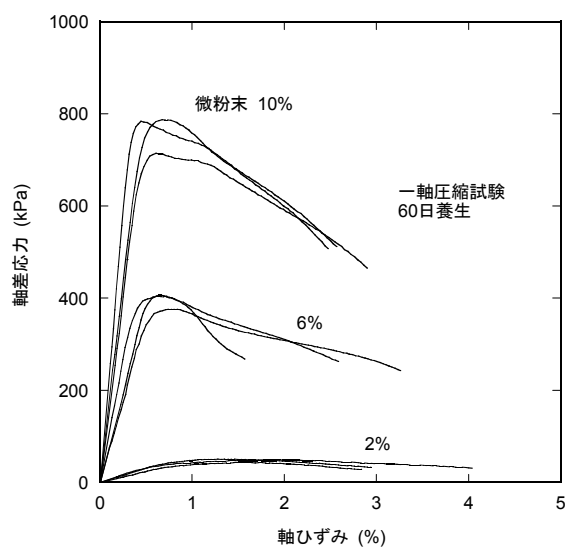


図-29 一軸圧縮試験結果(養生 60 日)

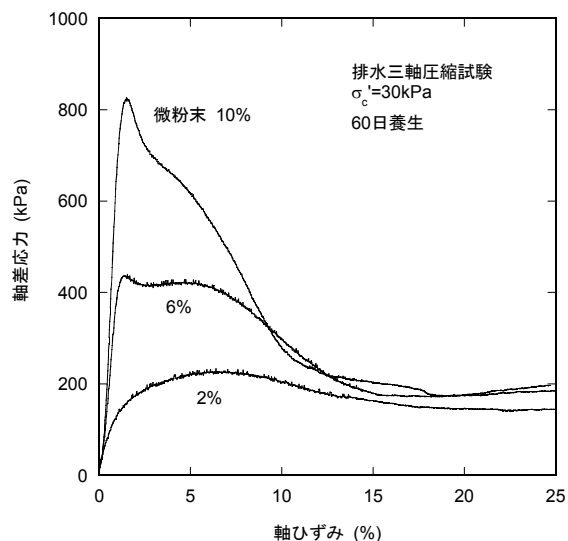


図-30 CD 試験の応力ひずみ曲線の例(養生 60 日)

図-30 には CD 試験の応力ひずみ関係を示す。この実験では圧密圧力を 30kPa と小さくしているため、残留強度はおよそ 180~200kPa と小さめであるが、それでも高炉スラグ微粉末 2% 添加したものの一軸圧縮強度よりも残留強度が大きくなっている。そのことに注意してみると、一軸圧縮強度が CD 試験の残留強度よりも大きなものでは、一軸圧縮試験の圧縮強度と CD 試験の最大強度とがほぼ等しい値となっている。

一軸圧縮試験の結果得られた最大軸差応力と CD 試験の結果得られた最大軸差応力の関係を図-31 に示す。ここで、CD 試験の圧密圧力は 30kPa であり、仮に内部摩

擦角が、 45° 、 50° だとすると、それぞれ破壊時の軸差応力は 144kPa と 196kPa となる。図中にはそれらの線も示してある。後に示すように、硬化した高炉水砕スラグの CD 試験時の残留時の内部摩擦角は、概ね 45° 以上で、大きなものでは、 55° に達していた。このようなことから、CD 試験では、図-31 に示す 2 本の点線以下の最大軸差応力になることはない。このため、一軸圧縮試験における最大軸差応力が $144\sim 196\text{kPa}$ のレベル以下の場合には、CD 試験の結果得られる最大軸差応力は必ず一軸圧縮試験時の最大軸差応力よりも大きくなる。図-31 に

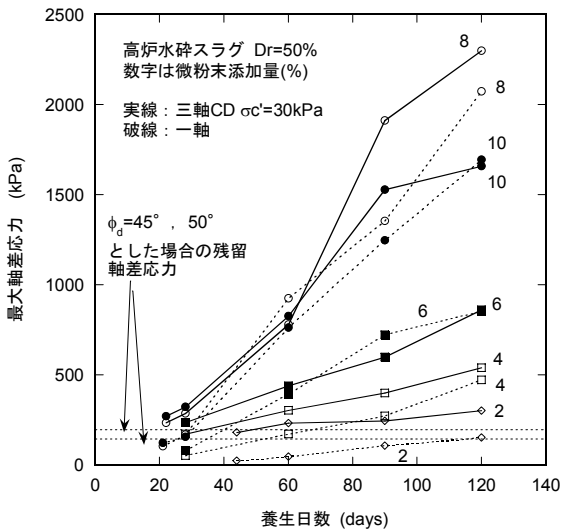


図-31 一軸圧縮試験と三軸 CD 試験での最大軸差応力の比較

は、一軸圧縮試験の最大軸差応力とそのレベルを超えれば、どちらの試験における最大軸差応力もほぼ同じレベルとなっていることが示されている。

図-32 には $\overline{\text{CU}}$ 試験の応力ひずみ曲線の例を示す。 $\overline{\text{CU}}$ 試験では、負の過剰間隙水圧が発生するために、せん断に伴って大きな軸差応力が発生する。その理由は図-33 に示す応力径路からもわかる。つまり、 $\overline{\text{CU}}$ 試験ではせん断に伴い平均主応力が大きくなりそれにあわせて軸差応力が増加しているが、内部摩擦角に関係のある、応力径路の勾配 q/p' はほぼ一定か、せん断とともにやや下がる

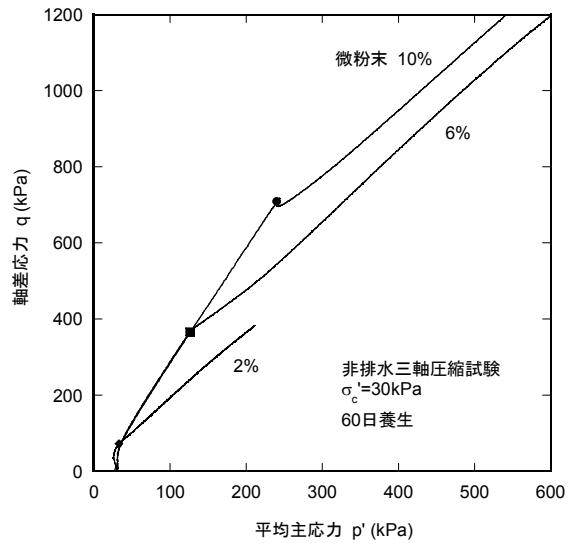


図-33 養生日数 60 日の時の非排水三軸試験の応力径路

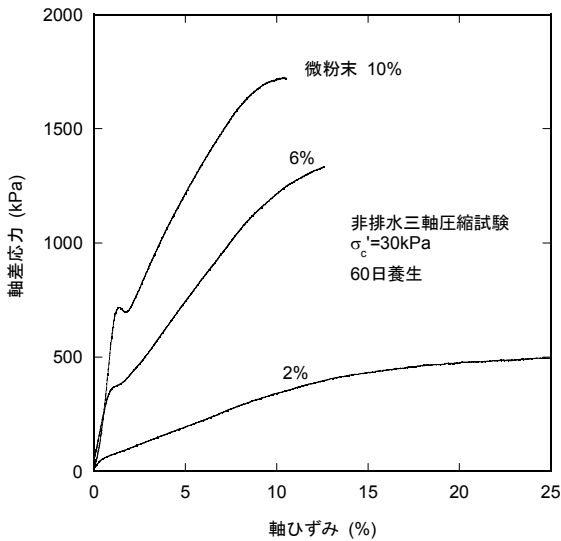


図-32 非排水三軸圧縮試験の応力ひずみ曲線(養生 60 日)

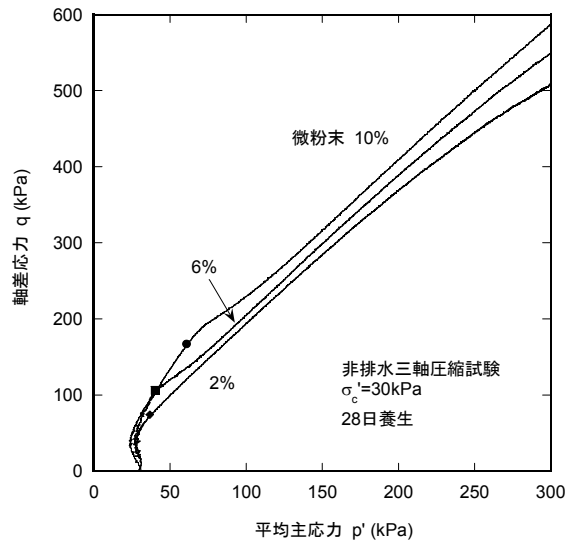


図-34 養生日数 28 日の時の非排水三軸試験の応力径路

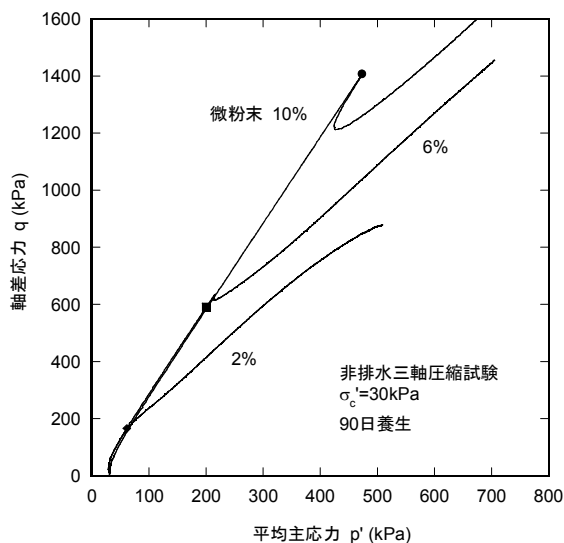


図-35 養生日数90日の時の非排水三軸試験の応力径路

傾向にある。特に注目すべきことは、最大主応力比 $(\sigma'_1/\sigma'_3)_{max}$ の際の応力点である。これらの点の軸差応力とその点に到るまでの応力ひずみ関係は一軸圧縮試験の最大軸差応力や応力ひずみ関係によく似た傾向を持っており、非排水三軸圧縮試験の主応力比最大点と硬化強度特性との関連性を示唆するものである。

図-34 と図-35 には養生日数28日と90日ときの応力径路を示した。これらの図にも応力比最大の点を示してあるが、図-31の比較と同じように、主応力比最大点と一軸圧縮強度とはほぼ同じ値となっていることが注目される。

5. 硬化した高炉水砕スラグのせん断特性

5.1 排水三軸圧縮(CD)試験による高炉水砕スラグ硬化後の強度の評価

既往の研究(菊池, 2004)や 3. で述べた現地調査では、圧密圧力を変えた CD 試験を多数実施した。それらの結果を整理することによって、硬化した高炉水砕スラグのせん断特性について検討する。

3.2(4)でも示したように、硬化した高炉水砕スラグの応力ひずみ曲線は図-36の実線のような形状となる。

ここでは、図-36のようにして硬化強度を推定することにする。すなわち、残留強度時には、強度は残留内部摩擦角 ϕ_{d0res} によって決まり、最大軸差応力時には、内部摩擦角は ϕ_{d0res} であるとし、それを上回る強度を粘着力項 c_d としてみるという考え方をとることにする。残留内部摩擦角 ϕ_{d0res} は具体的には、軸ひずみが25%以上になるまで圧縮することによって、残留状態とみなせる程度まで

せん断することにより求める。ここで、 ϕ_{d0} は次式のように定義する。なお、このような定義による ϕ_{d0} は主応力比の別表現となっている。

$$\sin \phi_{d0} = \frac{(\sigma'_1 - \sigma'_3)}{(\sigma'_1 + \sigma'_3)} \quad (1)$$

また、添え字の $_{res}$ はそれぞれの残留状態であることを示す。

なお、排水三軸圧縮試験からは、最大圧縮強度 q_{max} と残留圧縮強度 q_{res} が求まる。その差を q_{cd} とする。試験結果からは、見かけの硬化強度として $c_m = q_{cd}/2$ が求まる。もし、最大強度発現時と残留強度発現時の内部摩擦角が等しく、 ϕ_{d0res} と表すことにすれば、最大強度圧縮強度 q_{max} は(2)式で表せられる(図-37)。

$$q_{max} = (\sigma'_{1max} + \sigma'_3) \sin \phi_{d0res} + 2c_d \cos \phi_{d0res} \quad (2)$$

また、残留圧縮強度 q_{res} は(3)式で表される。

$$q_{res} = (\sigma'_{1res} + \sigma'_3) \sin \phi_{d0res} \quad (3)$$

(2)式と(3)の差が $2c_m$ となり、 $\sigma'_{1max} - \sigma'_{1res} = q_{cd} = 2c_m$ であるので、 c_m と上述の硬化による粘着項 c_d との間には、(4)式の関係がある。

$$c_d = c_m \cdot \tan(\pi/4 - \phi_{d0res}/2) \quad (4)$$

この方法では、硬化によるせん断強度を過小評価する傾向となる。特に拘束圧が大きい場合には、その傾向が強くなる。すなわち、最大圧縮強度と残留圧縮強度の差を硬化によるせん断強度としているため、仮に硬化していたとしても最大圧縮強度に達する以前に残留圧縮強度相当のせん断を受けたあとでも硬化による強度を保持していなければ、硬化によるせん断強度とみなすことができないからである。

図-38 に軸ひずみがほぼ25%に達したときの平均有効主応力と軸差応力の関係を示す。ここで残留強度であ

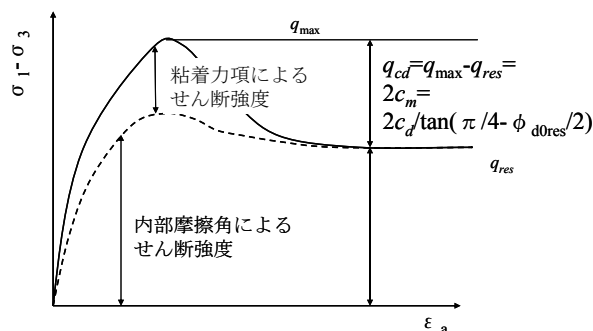


図-36 硬化した試料の応力ひずみ曲線のイメージ

ると定義した 25%軸ひずみ時点での強度は完全には残留強度にはなっていない可能性があるが、ここでは残留状態であると考えことにする。この結果を見ると、このときの内部摩擦角 ϕ_{d0} は最低でも 35° を確保しており、大きいものでは 50° に達している。また、材齢の若いものを黒塗りの記号で、材齢のたったものを白抜きの記号で示しているが、材齢の増加とともに残留時の軸差応力が増大しているものが増える傾向にあることがわかる。

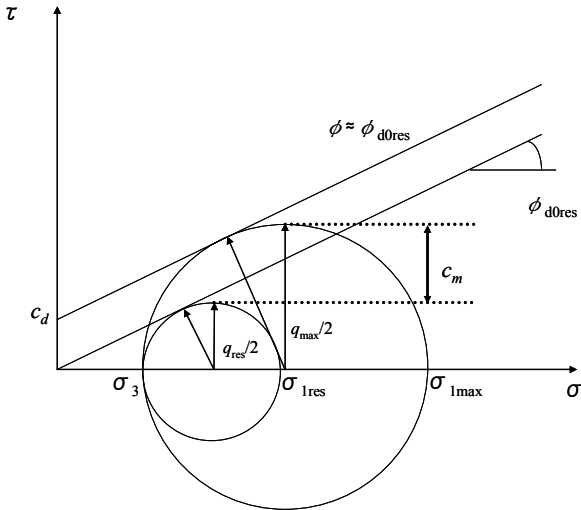


図-37 c_m と c_d の関係

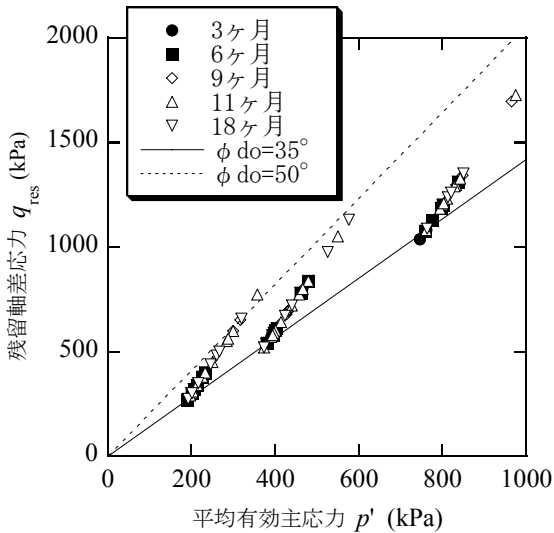


図-38 残留時の応力状態

図-39 に最大軸差応力時の平均有効主応力と軸差応力の関係を示す。ここでも材齢によって記号を分けている。この結果から、材齢6ヶ月までと材齢9ヶ月以上のものを比較するとどの材齢でも最大軸差応力時の ϕ_{d0} が

35° 程度のももあるが、材齢がかさむにつれて非常に大きな最大軸差応力を示すものが増える傾向にある。特に、9ヶ月目以降の結果については、圧密圧力400kPaの場合であっても内部摩擦角 35° の場合の破壊時の軸差応力をはるかに超えるものが増え、硬化がますます進む傾向にあることがわかる。

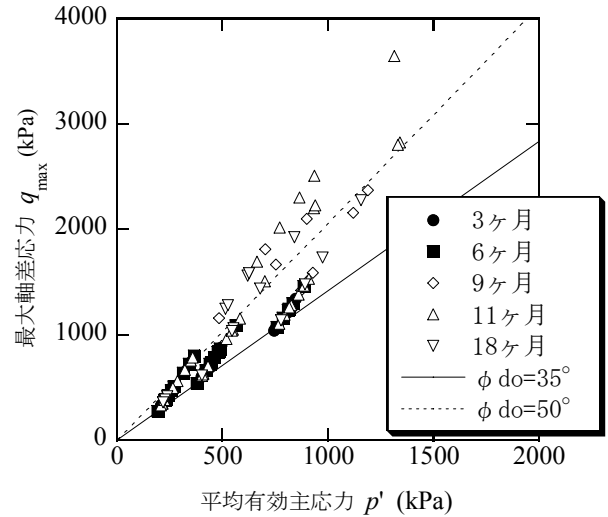


図-39 軸差応力最大時の応力状態

図-38と図-39を比較してみると、最大軸差応力 q_{max} あるいは q_{cd} が大きいほど残留内部摩擦角が大きくなる傾向にあるのではないかと考えられる。ところで、その一方で、高炉水砕スラグの内部摩擦角には強い拘束圧依存性がある。

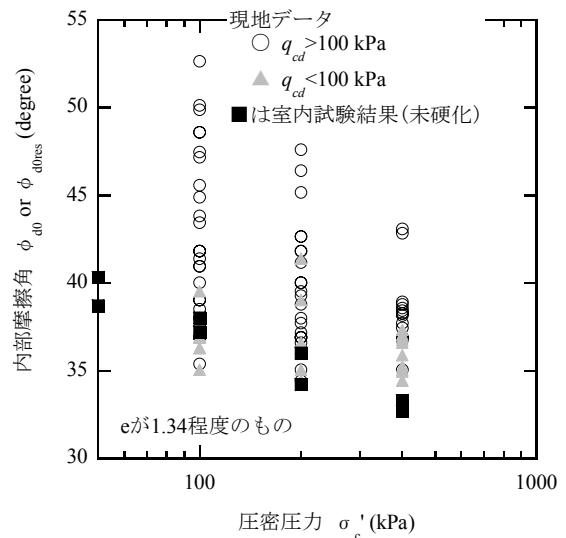


図-40 高炉水砕スラグの残留内部摩擦角の比較

そこで、硬化しているか否かで残留内部摩擦角 ϕ_{d0res} が異なるかどうか調べるために、**図-40**に未硬化の高炉水砕スラグと今回の現地試験の結果得られた残留摩擦角と拘束圧の関係を示す。ここで、未硬化の高炉水砕スラグのデータは手引書(沿岸開発技術研究センター, 1989)に記載されていたものであり、間隙比1.34程度のものについてプロットしなおしたものである。なお、硬化が進んでいた高炉水砕スラグの平均の間隙比は1.346であった。**図-40**を見ると、全体的に、今回の現地における硬化した高炉水砕スラグの内部摩擦角のほうが大きいこと、また、同じく硬化した高炉水砕スラグであっても q_{max} と q_{res} の差である q_{cd} が大きくなると内部摩擦角も大きくなる傾向にあることがわかる。

この結果では、 q_{cd} の大きなものほど同じ圧密圧力で ϕ_{d0res} の増大が大きい傾向にありそうなので、圧密圧力を q_{cd} で除したものと残留内部摩擦角の関係について比較した(**図-41**)。 **図-41**によれば、データのばらつきは小さくなった。このようなパラメータで残留内部摩擦角の増加程度を表すことができそうである。

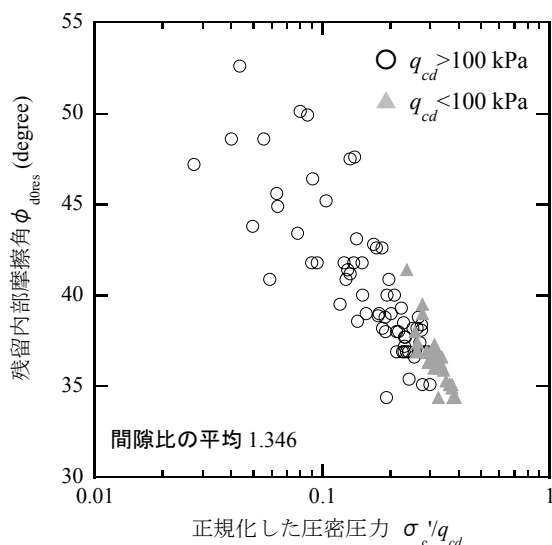


図-41 残留内部摩擦角と σ_c/q_{cd} の関係

図-42には拘束圧と**図-36**の定義で求めた硬化による粘着項 c_d の関係を示す。この結果を見ると、拘束圧が100kPaと低圧の場合に非常に大きな c_d を示すものがあり、データの存在する範囲は非常に大きい。このようなデータの広がり範囲に比べると、 c_d に及ぼす拘束圧の影響は大きくない結果となっている。

また、**図-42**では、材齢ごとに異なる記号でプロットし、材齢の違いによる c_d の変化を示している。これによると6ヶ月目までは最大で100kPaだった c_d が18ヶ月目

までには最大が800kPaを超えている。このように、6ヶ月目を過ぎるあたりから非常に硬化の進んだところが現れてきていることがわかる。

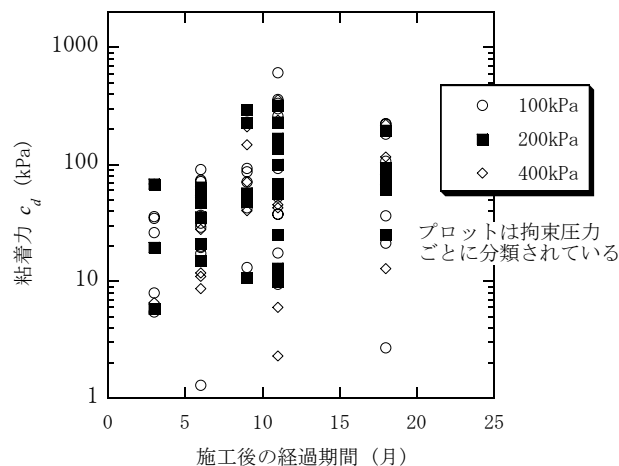


図-42 材齢と c_d の関係

5.2 硬化の有無によるせん断挙動の違い

硬化した効果を実験で見込むためには、硬化後の高炉水砕スラグの力学特性を数値化することが必要となる。

そこで、これまでの実験結果から最も早期に硬化しやすい、高炉セメントを10%添加させた高炉水砕スラグ($D_f=80\%$)を用いて一軸圧縮試験、圧密非排水三軸圧縮(\overline{CU})試験を行い、硬化している高炉水砕スラグのせん断特性を考察した。 \overline{CU} 試験は実験に多少時間がかかるので、養生期間を28日以上にすることによって試験期間の強度変化があまり無いようにした。28日養生後の平均一軸圧縮強さは320kPa、破壊ひずみは1%程度であった。 \overline{CU} 試験では、何度か除荷を含む繰返し載荷試験を実施したが除荷の存在による処女応力レベル応力径路の形状にはあまり差がないと判断されたため、**図-44**と**図-47**では除荷過程の曲線は省略した。

なお、参考のために硬化していない高炉水砕スラグについても \overline{CU} 試験を実施した。

図-43に硬化した高炉水砕スラグと未硬化高炉水砕スラグの \overline{CU} 試験時の応力ひずみ関係の比較の図を示す。図を見ると、未硬化のものは硬化したものに比べてせん断抵抗が小さいこと、また、未硬化のものはせん断強度そのものが拘束圧に依存しているのに対し、硬化したものは部分的に異なる点もあるが、全体的な傾向としては拘束圧が異なっても応力ひずみ関係に差がないことがわかる。また、せん断初期の挙動に着目すると、硬化したものはせん断の初期から未硬化のものに比べてせん断強

度の立ち上がりが大きいことがわかる。これらの違いは明らかに硬化によるものである。

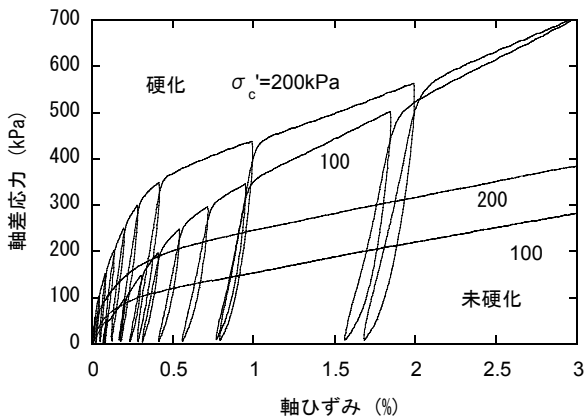


図-43 硬化の有無による応力ひずみ関係の変化(\overline{CU})

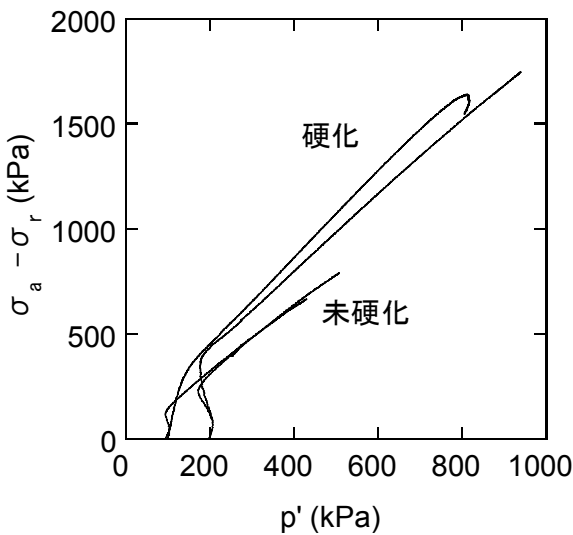


図-44 硬化の有無による応力径路の違い

同様に、応力径路についても硬化の影響がどのように出ているか示したのが、図-44である。この結果を見ると、軸差応力 100kPa 程度までは、硬化の有無の違いによる応力径路の違いは顕著ではなく、その後差が生じている。特に、硬化の有無によって変相線の位置が異なり、また、その後の径路も大きく異なる結果となっている。また、内部摩擦角も大きく異なるものとなっている。

これらの結果は、硬化の影響は必ずしもせん断初期にだけ現れるものではなく、大変形後もその影響が残っていることを示している。

以上のように、硬化した水砕スラグのせん断特性は硬化しないものと全せん断過程において異なっているが、

その影響はいわゆる固結のみによるものではないと考えられる。つまり、純粋に固結性のせん断抵抗であれば、弾性変形だけが生じ、ダイレータンスーは生じず、結果として過剰間隙水圧は生じないと考えられる。

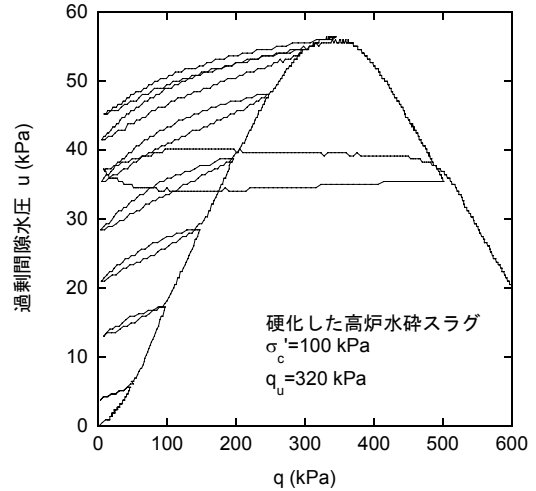


図-45 硬化水砕スラグの繰返し三軸圧縮時の軸差応力と過剰間隙水圧の関係(\overline{CU} 試験)

図-45 に除荷を含む \overline{CU} 試験の結果得られた、軸差応力と過剰間隙水圧の関係を示した。これを見ると一軸圧縮強度に達するまでに圧密圧力の 50% に達する過剰間隙水圧が生じているばかりでなく、せん断の途中の除荷時にも残留間隙水圧が生じている。このことは、 q_u 以下のあらゆるせん断レベルで摩擦性のせん断抵抗が生じていることを意味している。

純粋に固結性のせん断抵抗ではないとするもうひとつの理由は、図-43 に見られるように、せん断初期における除荷時の挙動から見ても、せん断の初期から塑性的な成分を含んでいることである。

以上のように、硬化した高炉水砕スラグのせん断時の挙動は硬化の影響を受けてはいるものの、粒状体としての特性も併せ持っていることがわかる。

5.3 一軸圧縮試験結果と低圧圧密三軸圧縮試験結果の応力ひずみ曲線形状の比較

ここでは、硬化した高炉水砕スラグについて、低圧圧密の \overline{CU} 試験結果と一軸圧縮試験結果とを比較することにより三軸圧縮試験結果と一軸圧縮試験結果を比較することの意味について検討する。ここで言う低圧圧密 \overline{CU} 試験とは圧密圧力が 200kPa 以下と、今回の試験条件で硬化した効果が消えないと考えられる程度の圧密圧力をかけた \overline{CU} 試験の事を指す。

図-46 に軸差応力と軸ひずみの関係について比較した結果を示す。 $\overline{\text{CU}}$ 試験では、破壊線に近づいた後でせん断に伴って過剰間隙水圧が低下し、有効応力が増加するため、せん断に伴って軸差応力が増大する。この試験でもその影響が出ており、軸ひずみ 1% となっても引き続き軸差応力が増加し続けている。

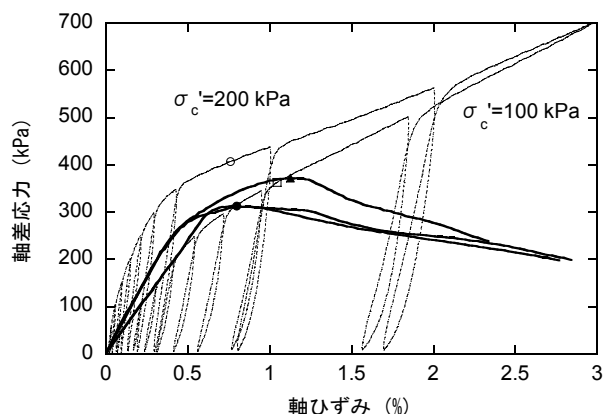


図-46 一軸圧縮試験結果と低圧非排水三軸圧縮試験結果の比較

しかし、それ以前の応力ひずみ曲線についてみると、特に $\sigma'_c = 100 \text{ kPa}$ では、一軸圧縮試験の結果と $\overline{\text{CU}}$ 試験の結果がほぼ一致している。 $\sigma'_c = 200 \text{ kPa}$ の結果では、初期の曲線の立ち上がり急となっているが、曲線から推定される降伏点の軸差応力は一軸圧縮試験の q_u とほぼ等しいものとなっている。

図-47 には一軸圧縮試験の軸差応力最大時(▲, ●)と $\overline{\text{CU}}$ 試験の応力比最大時(○, □)の点をそれぞれ記号で示した。これらの点は図-46 に示したように応力ひずみ曲線上の比較的似通った点に位置している。これらの結果を見ると、一軸圧縮試験における q_u と $\overline{\text{CU}}$ 試験における応力比最大の点はほぼ同じ意味を持つ点であると考えられる。

硬化した水砕スラグでも透水係数は 10^{-3} cm/s 程度と透水性が高いため、一軸圧縮試験では供試体は排水条件でせん断を受けていると考えられ、内部に負圧がほとんど働いていないと考えてよいと思われる。このことから、一軸圧縮試験の応力径路は図-47 の一点鎖線のようなものであると考えてよいと思われる。このように、それぞれの試験で応力径路は異なっているが、応力ひずみ関係にはあまり差がない。このことは、せん断初期から軸差応力が q_u 程度までのせん断時には、拘束圧に依存しないせん断抵抗が支配的に生じていることを示していると考えてよいと思われる。

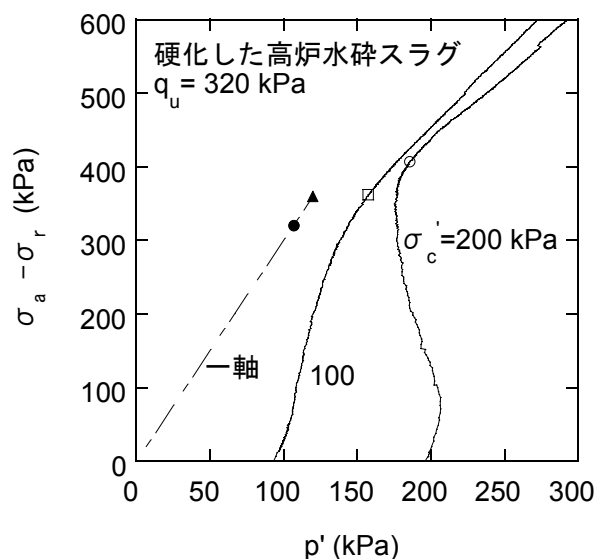


図-47 低圧 $\overline{\text{CU}}$ と一軸圧縮試験の応力径路

なお、 $\overline{\text{CU}}$ 試験の応力比最大の点での軸差応力は一軸圧縮試験の最大軸差応力よりやや大きくなっている。これは、有効応力が大きな状態にあるためであり、これらの結果には拘束圧依存性の影響がでていることを意味している。

以上のことは、 $\overline{\text{CU}}$ 試験における応力比最大の点が固結性のせん断抵抗の成分と摩擦性のせん断抵抗の成分の両方を含んだせん断強度をあらわした点であることを示している。

5.4 一軸圧縮試験結果と超低圧排水非排水三軸圧縮試験結果との比較

これまでの検討から、硬化した高炉水砕スラグ強度特性として次のことが言える。

- 1) 硬化しても粒状体としての特徴を有する。
- 2) 硬化によって残留時の内部摩擦角が大きくなる。
- 3) 低圧排水三軸圧縮試験の最大軸差応力は一軸圧縮試験時の最大軸差応力よりも大きくなる。これは粒状体としての特徴による強度の応力依存性によるものである。
- 4) 一軸圧縮試験時の最大軸差応力点と $\overline{\text{CU}}$ 試験時の応力比最大点とはほぼ同じ意味を持つ点である。

1), 2), 3) を考えると硬化した高炉水砕スラグの強度定数を決定するには、三軸圧縮試験が必要となり、また、そのときの拘束圧としてはできるだけ低圧をかけることが必要であると考えられる。そこで、シリーズ 4 では養生過程において、一軸圧縮試験と超低圧 ($\sigma'_c = 30 \text{ kPa}$) の CD 試験と $\overline{\text{CU}}$ 試験を実施して、それらの試験結果を比較し

た。

CD 試験については、5.1 に示した方針に従って残留内部摩擦角 ϕ_{d0res} と粘着力項 c_d を求めた。CU 試験については、応力比最大時が CD 試験時の軸差応力最大時や一軸圧縮試験時の軸差応力最大時と同様に粘着力項 c' が最大に発揮されているときであると考え、そのときにある内部摩擦角 ϕ_0' と c' が同時にせん断抵抗に寄与しているものとする。

図-48 に主応力比から求めた内部摩擦角 ϕ_0' のせん断による変化について示す。図-48 からわかるように、 ϕ_0' は最大値を示した後に、せん断の進行とともに徐々に低下していく傾向にある。ここで、 ϕ_0' が最大値となった直後は ϕ_0' が急速に低下するが、その後は緩やかな低下傾向になる。そのときの平均主応力に対する内部摩擦角の低下の傾向は、同図中の硬化していない高炉水砕スラグの内部摩擦角の拘束圧依存性とほぼ類似の傾向となっている。

このため、CU 試験の場合には、どの応力レベルで内部摩擦角を設定するかが問題となる。ただし、ここで本当に目的とするのは、ある応力レベルで期待できるせん断強さを表現することである。ある内部摩擦角 ϕ_0' と c' が同時にせん断抵抗に寄与しているものとするという立場に立てば、 ϕ_0' が大きければそれだけ c' が小さく設定されるので、せん断強度の推定に及ぼす影響は小さいものと考えられること、また、高炉水砕スラグのせん断破壊は実際には比較的応力レベルの小さいところで起きることが考えられる。ところで高炉水砕スラグの ϕ_0' は図-48 に示すように、拘束圧の影響によって減少しているため、 ϕ_0' が拘束圧の影響によって減少している

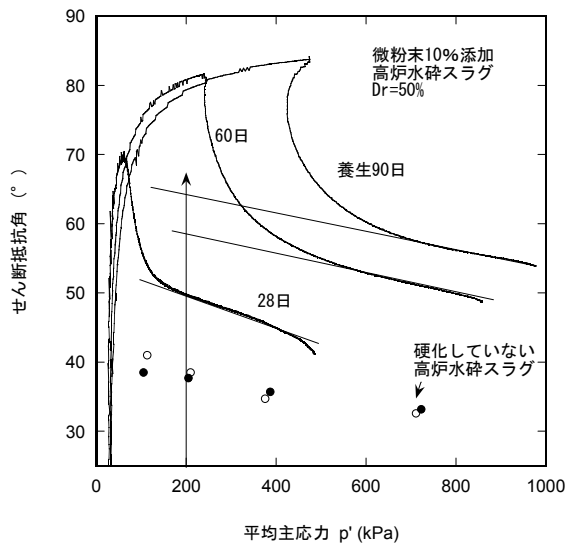


図-48 せん断抵抗角の変化

思われる部分(あるいはその外挿部分)のうち $p'=200\text{kPa}$ のところでの ϕ_0' を用いるべき内部摩擦角とした。

今回の実験で得られた、CD 試験から求めた ϕ_{d0res} と c_d 、CU 試験から求めた ϕ_0' と c' と微粉末添加量、養生日数の関係を表-6 と表-7 に示す。

これらの破壊基準と試験結果とを比較した例を示したのが、図-49 と図-50 である。図-49 は高炉スラグ微粉末 10% 添加したときのもので、養生 90 日ときの破壊基準は多少食い違っているが、一軸圧縮試験時の最大軸差応力、CD 試験時の最大軸差応力、CU 試験時の有効

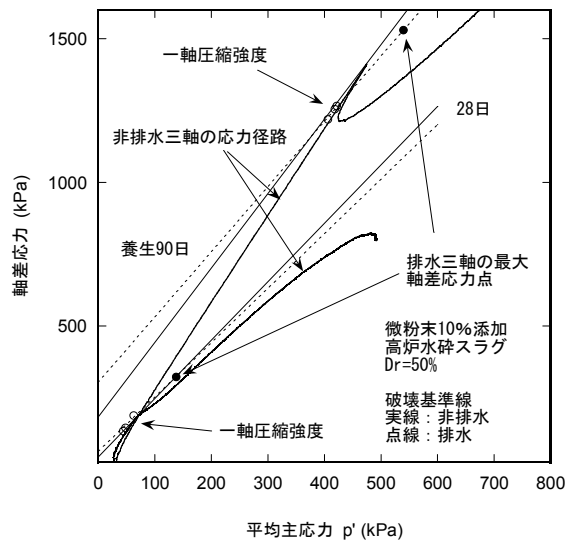


図-49 高炉スラグ微粉末 10% 添加時の破壊基準と各せん断試験結果

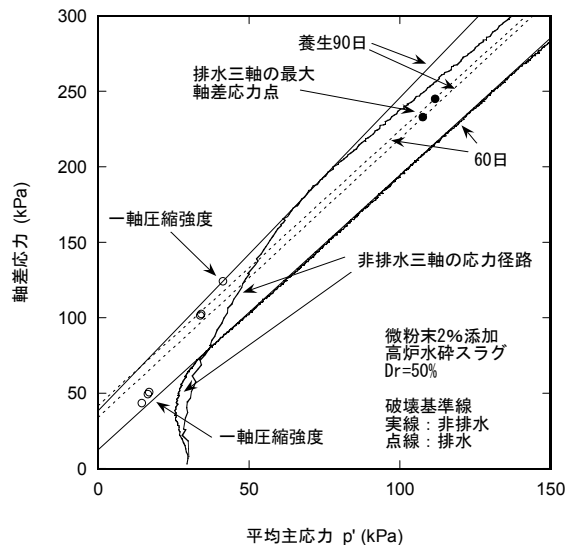


図-50 高炉スラグ微粉末 2% 添加時の破壊基準と各せん断試験結果

には、データの蓄積が必要である。そのためにも、施工

表-6 ϕ_{d0res} と c_d の養生日数による変化

	微粉末 10%		微粉末 8%		微粉末 6%		微粉末 4%		微粉末 2%	
	ϕ_{d0res} (°)	c_d (kN/m ²)	ϕ_{d0res} (°)	c_d (kN/m ²)	ϕ_{d0res} (°)	c_d (kN/m ²)	ϕ_{d0res} (°)	c_d (kN/m ²)	ϕ_{d0res} (°)	c_d (kN/m ²)
22	45	27	45	20	—	—	—	—	—	—
28	46	35	47	24	43	23	40	15	—	—
44	—	—	—	—	—	—	—	—	43	11
60	50	115	53	93	49	48	48	25	45	18
90	55	195	54	267	49	79	48	44	44	22

表-7 ϕ_0' と c' の養生日数による変化

	微粉末 10%		微粉末 6%		微粉末 2%	
	ϕ_0' (°)	c' (kN/m ²)	ϕ_0' (°)	c' (kN/m ²)	ϕ_0' (°)	c' (kN/m ²)
28 日	49	25	47	16	—	—
44 日	—	—	—	—	45	3
60 日	58	95	53	56	44	7
90 日	65	150	57	84	50	22

応力比最大点とも、表-6、表-7 に示した線上に乗っている。

図-50 は高炉微粉末 2% のケースについて示したものである。養生日数 60 日ときの一軸圧縮試験時の最大軸差応力は、CD 試験の残留軸差応力よりも小さなものであったが、表-6、表-7 で示した破壊基準と比べるとよくあっており、特に、 \overline{CU} 試験から求めた破壊基準上にあることがわかる。

本来、 ϕ や c は同等と思われる複数の供試体をいくつかの圧密圧力条件でせん断して求めるべきであるが、ここでは、いずれも 1 つの供試体から ϕ や c を求めようとしている。しかも、硬化強度はこの供試体ごとに少しずつばらつきがある。このようなことを考慮に入れると、今回のような強度設定法及び、 c と ϕ の決定値は硬化した高炉水砕スラグの強度特性を比較的うまく表しているものと考えられる。

6 硬化した高炉水砕スラグの設計強度定数の評価方法

ここでは、施工後サンプリングを行って、その材料の持つ設計上の力学定数を確認する場合の試験方法を前提として検討をする。設計上の強度定数は、本来であれば、施工する前に予測可能であることが望ましい。そのため

後サンプリングをして強度定数を求める方法の標準的な仕様を定めることが必要である。

これまでの硬化した高炉水砕スラグのせん断特性について検討した結果、①硬化した高炉水砕スラグの \overline{CU} 試験や CD 試験を行うと、ピーク強度(あるいは最大応力比)が大きくなるほど残留時の内部摩擦角が大きくなるという傾向があること、②せん断のあらゆる過程で摩擦性のせん断抵抗が発揮されていること、③低拘束圧の \overline{CU} 試験の主応力比最大になるまでは、摩擦性の影響は比較的

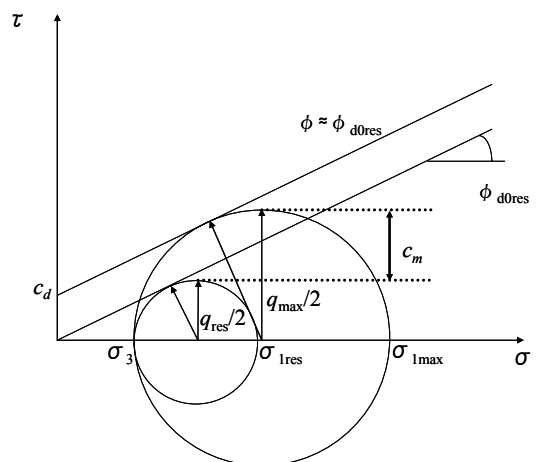


図-51 強度定数の設定のイメージ(排水三軸圧縮試験の)

場合)

小さいこと、④CD 試験では、かなり小さな拘束圧を選定しない限り拘束圧の影響を強く受け、最大軸差応力を過大に見積もる可能性が高いこと、⑤CD 試験では、軸ひずみが 25%程度となっても軸差応力が減少中である場合があること、⑥ $\overline{\text{CU}}$ 試験では、せん断が進むにつれて有効応力が増加し、内部摩擦角が減少し続けることがわかった。

排水圧縮を受ける場合には、硬化強度が高いときで 1%程度の軸ひずみで最大せん断強さを示すこと、低いときでも数%の軸ひずみで最大せん断強さを示すことから、設計強度定数として、最大せん断強さ時の強度定数の設定方法を確立しておく必要があると考えられる。

最大せん断強さ時の硬化した水砕スラグの強度定数は、事前混合処理土と同様に次式であらわせられるものとする(図-51)。

$$\tau_d = c_d + \sigma' \tan \phi_d \quad (5)$$

ここで、 τ_d : 最大排水せん断強度、 c_d : 排水条件での粘着項、 σ' : 想定している面に作用する有効垂直応力、 ϕ_d : 排水条件での内部摩擦角である。

ϕ_d としては、残留時の内部摩擦角($=\phi_{d0res}$)を用いることを提案する。この計算では、残留時には $c_{dres}=0$ であると仮定する。

$\overline{\text{CU}}$ 試験から強度定数を求めるときは、 $R_{max}=(\sigma_1'/\sigma_3')_{max}$ のときに、 c' と ϕ' が完全に発揮されていると考え、次式でせん断強さが求められるとすればよい。ただし、残留時には、次式のうち $c'=0$ とすればよい。

$$\tau_d = c' + \sigma' \tan \phi' \quad (6)$$

ここで、 τ_d : 最大排水せん断強度、 c' : $\overline{\text{CU}}$ 試験で有効応力基準によって求めた粘着項、 σ' : 想定している面に作用する有効垂直応力、 ϕ' : $\overline{\text{CU}}$ 試験で有効応力基準によって求めた残留内部摩擦角である。

過去の現地調査の事例からすると、硬化を始めたときの水砕スラグのせん断強度は非常に大きくばらつく。このため、水砕スラグの強度定数を二つ以上のせん断試験から求めることは困難となるケースが多い。そこで、ひとつの試験から ϕ_d と c_d の双方が求められる試験を実施することが望ましい。

この際、試験を実施しやすい程度に低圧の圧密圧力での三軸圧縮試験を適用することが望まれる。これは、①高圧で圧密せん断することにより、硬化強度を見逃すおそれがあること、②求められる内部摩擦角が圧密圧力の影響を受けていることによるものである。実務的には、

圧密圧力 30kPa 程度で圧密した上で $\overline{\text{CU}}$ 試験か CD 試験をすればよい。硬化の程度がやや弱いと想定される場合には、より小さな圧密圧力を用いると強度の推定精度が良くなると思われる。また、最終圧縮量はなるべく大きくとることが必要である。CD 試験の場合には軸差応力がほぼ一定となるまでの試験を行うようにするのがよい。

残留時のせん断抵抗については、内部摩擦角そのものについては硬化したことの影響が残っているものの、せん断抵抗はすべて摩擦性のものであると考えられるので、CD 試験の場合には、残留内部摩擦角は次式で求める。

$$\sin \phi_{d0res} = \left(\frac{\sigma_1' - \sigma_3'}{\sigma_1' + \sigma_3'} \right)_{res} \quad (7)$$

$\overline{\text{CU}}$ 試験の場合には、(7)と同等の式の定義で求められる ϕ_0' から、 $p'=200\text{kPa}$ 程度のところの ϕ_0' を推定すればよい。

ところで、実際に作用している土被り圧と三軸圧縮試験に用いた圧密圧力が大きく異なる場合には、圧密圧力による内部摩擦角の補正が必要となる。この補正のための情報は現状では十分ではない。

また、最大軸差応力時には、残留時の内部摩擦角が十分に作用するものと考えて、CD 試験時には、 c_d を次式で求める。

$$c_d = \left(\frac{q_{max} - q_{res}}{2} \right) \tan \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\phi_d}{2} \right) \quad (8)$$

$\overline{\text{CU}}$ 試験時には、 R_{max} のときの R_{max} と σ_3' から c' を次式で求める。

$$c' = \frac{\sigma_3'}{2 \cos \phi_0'} \left((1 - \sin \phi_0') R_{max} - (1 + \sin \phi_0') \right) \quad (9)$$

7. 結論

本報告では、港湾工事でケーソンの裏込めに高炉水砕スラグを用いた現場において、施工から 18 ヶ月に渡る追跡調査を行った結果を報告するとともに、室内実験において高炉水砕スラグを硬化させる実験を行い、硬化を促進させる方法について検討した。さらに、圧縮せん断試験を実施することにより、硬化した高炉水砕スラグのせん断特性を評価する方法を提案した。

現地における追跡調査の結果は、高炉水砕スラグは時間の経過とともに硬化していくことを示していたが、硬化には非常に時間がかかることも明らかになった。そのため、室内において高炉水砕スラグを硬化させるための条件について検討するとともに、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。また、硬化した高炉水砕スラグの硬化強度は c と ϕ で表せられること、残留強度は ϕ で表すことができること、それらの強度定数は、低拘束圧の排水もしくは非排水三軸圧縮試験から求めればよいことを示した。

8. おわりに

本論文では、港湾工事に用いられている高炉水砕スラグが硬化していることから、この材料が硬化することを期待して利用される場合のことを考え、硬化促進のための方策を検討し、海水環境下では高炉スラグ微粉末を添加すると効果があることを示した。

残された課題は、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、微粉末を効率よく添加させるためには施工をどのように行なうことが適切であるかを検討することなど、現地における実証実験を必要とするものである。整備局等現場技術者による積極的な検討を期待する。

本論文のうち、3. に示した現地調査に関わる分については、国土交通省関東地方整備局横浜港湾空港技術調査事務所(旧運輸省第二港湾建設局横浜調査設計事務所を含む)に資料をご提供いただくとともに、同所のご発注による「港湾構造物へのリサイクル材料(裏込・裏埋)活用開発調査技術検討会」((財)沿岸開発技術研究センター(当時))での議論を参考にさせていただいています。関係者、委員会の各位に感謝いたします。

(2006年2月17日受付)

参考文献

- 伊藤林平・亀井敏雄(1971)：高炉水砕の地盤改良工事への適用性について、土と基礎、第21巻第12号、pp.37-43.
- 関東地方整備局(2004)：水砕スラグ(裏込め・裏埋め材)技術資料、55p.
- 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・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・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, Ca^{2+} 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・箕作幸治・小野幸一郎・鈴木操・藤井郁男(2005)：高炉水砕スラグ埋立地盤の地盤特性の経時変化(その1.固結の経時変化特性)、第60回土木学会年次講演会、pp.147-148.
- 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.
- クリスチャン(1989)：分析化学 I 基礎、p.175.
- (財)沿岸開発技術研究センター(1989)：港湾工事用水砕スラグ利用手引書、38p.
- 地盤工学会(2000)：土質試験の方法と解説—第一回改訂版—、pp.159-165.
- 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郷土・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.
- 徳光直樹・嘉成明子・仲山智佳子(2001)：高炉スラグ微粉末の水和反応速度に及ぼす添加剤の影響、秋田高専研究紀要、pp.44-48.
- 中島研司・菊池喜昭・水谷崇亮・村田智佳(2005)：高炉水砕スラグ微粉末を添加した高炉水砕スラグの硬化現象、第40回地盤工学研究発表会、pp.579-580.
- 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.
- Kikuchi, Y.・M., Ikegami・Y. Yamazaki(2004): Field Investigation on the property change of granulated blast furnace slag used for backfilling of quay wall, Proc. of Int. Symp. on Engineering Practice and Performance of Soft Deposits, pp.263-268.

港湾空港技術研究所報告 第45巻 第2号

2006.6

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 ニッセイエブロ株式会社

Copyright© (2006) 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。