

港湾空港技術研究所 資料

TECHNICAL NOTE
OF
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

No.1088

September 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

菊池 喜昭

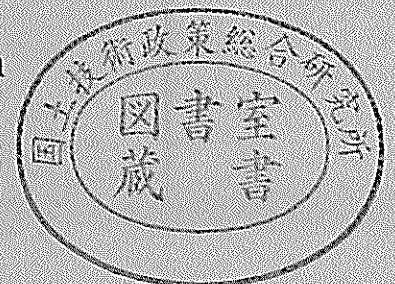
木村 淳治

水谷 崇亮

永留 健

独立行政法人 港湾空港技術研究所

Independent Administrative Institution,
Port and Airport Research Institute, Japan



目 次

要 旨	3
1. はじめに	4
2. 水砕スラグの固化に及ぼす間隙水の影響に関する検討	4
2.1 概要	4
2.2 実験方法	4
2.3 実験結果	5
2.4 考察	7
3. 固化した水砕スラグの設計強度設定手法に関する検討	8
3.1 実験方法	8
3.2 実験結果	9
3.3 考察	11
4. 結論	15
5. おわりに	16
参考文献	16
付録 A 固化処理をした石炭灰と粘性土のせん断強度特性	17
A.1 実験方法	17
A.2 実験結果	17
A.3 考察	21

Influence of pH and Ca^{2+} on Solidification of Granulated Blast Furnace Slag and Determination of Design Strength Parameters of the Solidified Slag

Yoshiaki KIKUCHI*
Junji KIMURA**
Taka-aki MIZUTANI***
Takeshi NAGATOME****

Synopsis

The effect of pore water on the solidification of granulated blast furnace slag, called slag hereafter, and the design parameter evaluation method of solidified slag are discussed in this paper.

The effects of pH and Ca^{2+} concentration on slag solidification are considered. Experimental results revealed that in the case of sea water as pore water, the pH was not enough high and the slag solidified. In the case of high pH NaOH pore water, the slag did not solidify over more than 90 days of curing, which is longer than the case sea water as pore water. These results show that not only a high pH but Ca^{2+} concentration affects slag solidification.

To evaluate design strength parameters, the results of consolidated undrained triaxial compression tests for solidified slag and consolidated drained triaxial compression tests for undisturbed in-situ solidified slag were examined. The shear resistance of the solidified slag is composed of not only a cohesive factor but a frictional factor even when the consolidation pressure is smaller than the unconfined shear strength. The results indicate that the peak shear strength parameter for design should be composed of c_d and ϕ_d .

Key Words: granulated blast furnace slag, potential solidification acting with water, pH, Ca^{2+} , design strength parameter

* Head, Foundations Division, Geotechnical and Structural Engineering Department

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

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

**** Trainee of Foundations Division, Geotechnical and Structural Engineering Department, originally Toa Corp.

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

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

菊池喜昭*
木村淳治**
水谷崇亮***
永留 健****

要 旨

本研究では、(1)水砕スラグの固結に対する間隙水の影響と(2)固結した水砕スラグの強度評価に関する検討を行った。

(1)については海水下で固化している現実を踏まえ、pH と Ca²⁺の存在の有無による固結の仕方の違いについて検討した。その結果、間隙水が海水の場合には、pH は高くないが、水砕スラグは固化する。間隙水が NaOH 溶液のように pH が高いだけではすぐには固結反応は始まらないことがわかった。このような結果の違いには間隙水中のカルシウムイオンの存在の影響が大きいと考えられる。

(2)については除荷を含む非排水三軸圧縮試験結果と原位置から採取した不攪乱試料を用いた排水三軸圧縮試験結果をもとに、固化した水砕スラグの強度特性について検討した。この結果、固化した水砕スラグを一軸圧縮強度以下で圧密三軸試験をすると、固化しないものに比べて初期強度、最終強度ともに大きくなることがわかった。また、固化した水砕スラグの残留内部摩擦角は、固化しない水砕スラグの内部摩擦角よりも大きいことが示された。また、固化した水砕スラグは低いせん断レベルから摩擦性のせん断特性を示す。以上を踏まえ、固化水砕スラグの排水せん断時における軸差応力最大時の強度 τ_d は、 c_d と ϕ_d の組み合わせとして考えることが適していると判断した。

キーワード：高炉水砕スラグ，潜在水硬性，pH，Ca²⁺，設計強度パラメータ

* 地盤・構造部基礎工研究室長

** 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)

**** 地盤・構造部基礎工研究室受託研修生(東亜建設工業(株))

〒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

1. はじめに

従来の高炉水砕スラグ(以下水砕スラグと呼ぶ)の手引書では、水砕スラグは固化しないものとして取り扱っている。これは、水砕スラグが潜在水硬性を有することは認めながらも、実際に固化するかどうかについて不明であったためである。しかし、これまでに港湾工事で裏込めとして用いられてきた水砕スラグの調査結果によると水砕スラグを港湾環境下で用いた場合には固結する事例が数多くある。このため、水砕スラグを裏込めに用い、積極的に固化させることにより土圧低減を図ったり、液状化対策として用いたりすることが考えられる。この際、水砕スラグが固結する条件が十分には解明されていないこと、固結した場合の強度評価手法が明らかとなっていないことが問題である。

本研究では、実験室内において、積極的に水砕スラグを固化させるメカニズムについて検討するとともに、固化した水砕スラグの力学的パラメータの設定法について検討する。

本研究の内容は大きく以下の二つに分かれる。

- (1) 水砕スラグの固化に対する間隙水の影響の検討
 - (2) 固結した水砕スラグのせん断抵抗に関する検討
- (1)については、主として、pHと Ca^{2+} の影響について検討する。(2)については、固結した水砕スラグの圧縮せん断時の力学的挙動について圧密非排水三軸圧縮試験による試験結果と原位置から採取した不攪乱試料の圧密排水三軸圧縮試験結果を中心に検討する。

2. 水砕スラグの固化に及ぼす間隙水の影響に関する検討

2.1 概要

水砕スラグの利用手引書((財)沿岸開発技術研究センター, 1989)によると水砕スラグは次の条件が満たされたときに固結するといわれている。

- 1) 水砕スラグが固結するのに十分な水が存在すること。この条件は常に満たされている。
- 2) pHが11以上の環境であること。これはガラス質から Ca^{2+} が溶出し、固化反応を起こさせるのに必要な環境を作る。

ところで、海水環境にある港湾の裏込めに用いられた高炉水砕スラグも固化することが知られている(菊池ほか, 1998)。海水は非常に高い緩衝能力を持っているため、pHが変化しにくい(概ね8)。このことは、アルカリ環境でなくても高炉水砕スラグが固化する可能性のあること

を示している。一方で、海水には Ca^{2+} が200mg/l程度含まれている。アルカリ環境において Ca^{2+} が溶出することにより固化するというメカニズムが水砕スラグの固化メカニズムであるとする、間隙水中に Ca^{2+} を有していることが固化を生じさせる誘引のひとつではないかと考えられる。

そこで、高炉水砕スラグをNaOH溶液、人工海水、セメント添加溶液などの間隙水中で養生し、スラグの経時的な強度の変化と間隙水のpH、 Ca^{2+} 濃度について調べた。

2.2 実験方法

実験に用いた高炉水砕スラグの粒子密度は $\rho_s = 2.815 \text{ g/cm}^3$ であり、最大密度 $\rho_{\text{max}} = 1.459 \text{ g/cm}^3$ 、最小密度 $\rho_{\text{min}} = 1.144 \text{ g/cm}^3$ である。粒度分布を図-1に示す。この実験では、水砕スラグを所定の間隙水中で養生し、養生日数7日、28日、90日、180日のときの一軸圧縮強さを求めるとともに、上澄み液のpHを求めた。用いた溶液は、表-1に示すように、セメントミルク(高炉セメントB種を使用)、人工海水、0.005規定の水酸化ナトリウム溶液である。なお、セメントミルク中のセメント量はスラグの乾燥重量に対するセメント重量の率として定義したものである。

実験では、まず、所定量の水砕スラグと溶液を用意する。目標とした水砕スラグの密度は、あらかじめ求めてある水砕スラグの粒子密度、最大密度、最小密度をもとに、相対密度がおおよそ80%となる密度($\rho_r = 1.396 \text{ g/cm}^3$)である。所定量の水砕スラグとは、プラスチックモールド容器の高さと体積の関係をあらかじめ求めておき、供試体の目標高さをあらかじめ10.5cmと設定し、その高さになったときの水砕スラグの体積が目標密度となるようにしたものである。溶液については、必要量よりも約 40 cm^3 多めに用意した。

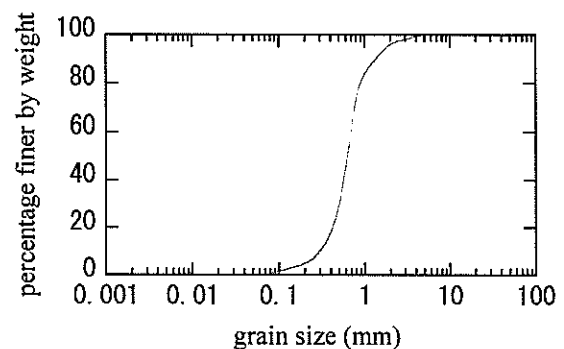


図-1 用いた水砕スラグの粒度分布

まず、溶液をソフトモールド(直径 5cm, 高さ 12cm)に入れ、そこへ乾燥した水砕スラグを少量ずつ入れ、そのたびに、容器をよく振り全体が均一になるように注意した。最終的にすべての水砕スラグを入れたところでもう一度容器をよく振り、さらに側方から振動をかけることにより密度を調整した。なお、ソフトモールドの容器上部には 30~40cm³ 程度の上澄み液が残った状態となっている。

その後、プラスチックモールドにキャップをし、これをビニールテープでしっかりと密封し、蒸留水中で養生した。養生中は、室温を約 20 度に保つことによって、養生温度がほぼ一定になるように配慮した。

所定の日数がたったところでモールドを解体し、上澄み液の pH を測定するとともに一軸圧縮強さを求めた。モールドを解体する際に試料が固まっているかどうかを手触りなどでわかるため、固化していないと思われるものについては一軸圧縮強度を測ることができないので、試料の残量を減らさないようにするため、解体しなかった。このため、実験条件によっては所定の日数での pH を測定していない場合がある。

表-1 に本実験で用いた溶液の条件と実験ケースの記号の関係を示す。

2.3 実験結果

図-2~図-5 に養生日数 7~180 日での一軸圧縮試験から求めたそれぞれの試験ケースの代表的な応力ひずみ関係を示す。この結果によると、図中のいずれの条件のものも破壊ひずみは 1%程度となっている。

図-6 は各溶液ごとに養生日数によって一軸圧縮強さがどのように変化したかを示したものである。養生日数 7 日では、6%以上の濃度のセメントミルク溶液のものしか固化が始まっていない。養生 28 日まではセメントミルク溶液のものではすべて固化が始まっている。しかし、

表-1 用いた溶液

記号	溶液	溶液の初期 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

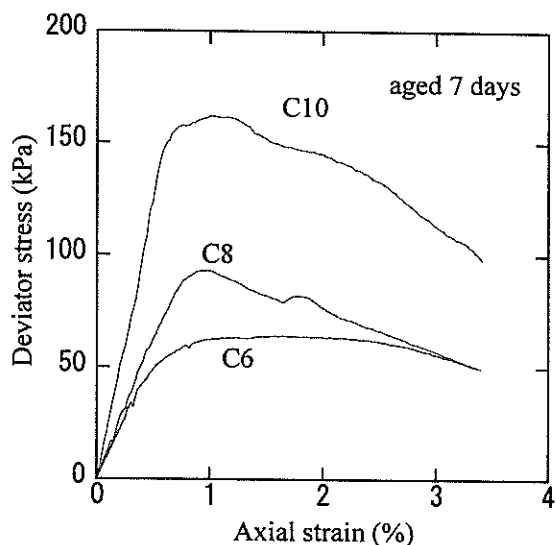


図-2 固結した水砕スラグの一軸圧縮試験結果(7日後)

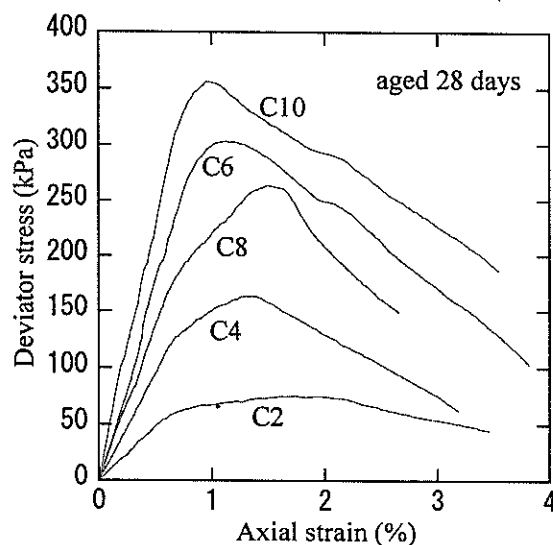


図-3 固結した水砕スラグの一軸圧縮試験結果(28日後)

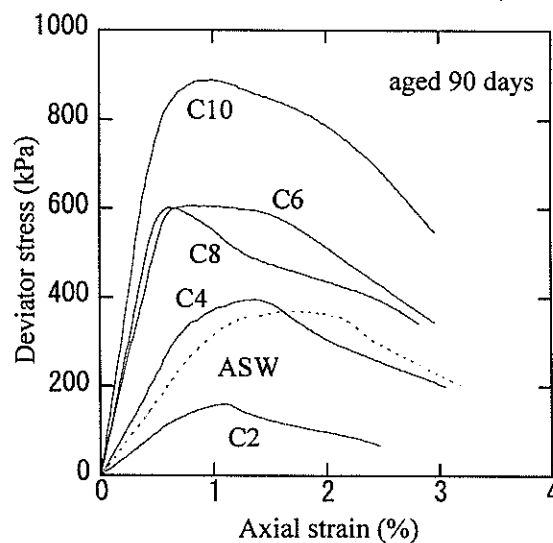


図-4 固結した水砕スラグの一軸圧縮試験結果(90日後)

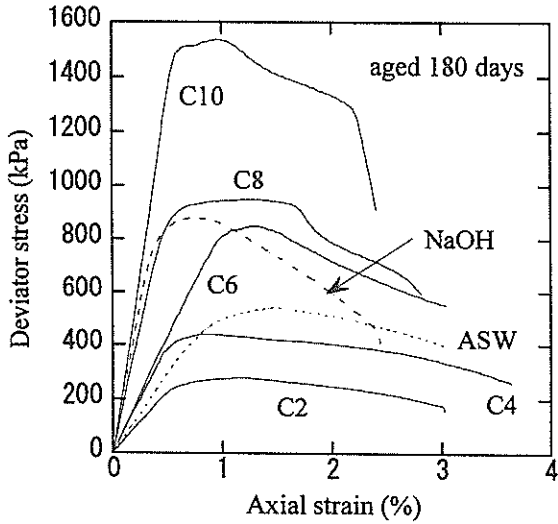


図-5 固結した水砕スラグの一軸圧縮試験結果(180 日後)

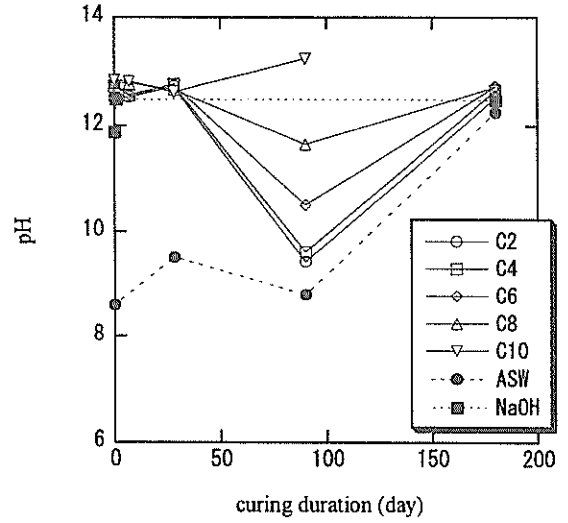


図-7 養生日数による溶液の pH の変化

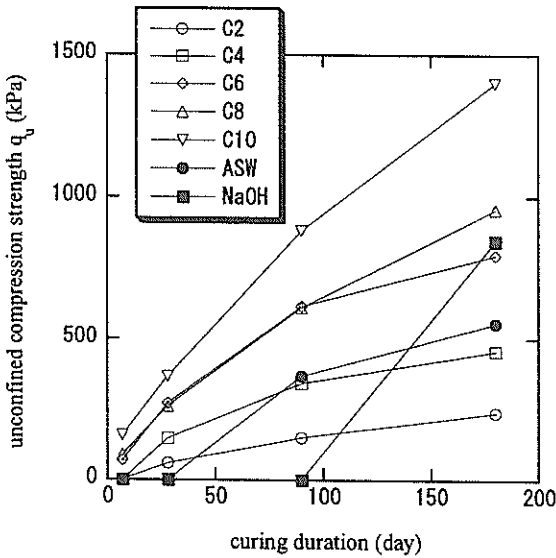


図-6 養生日数による一軸圧縮強さの変化

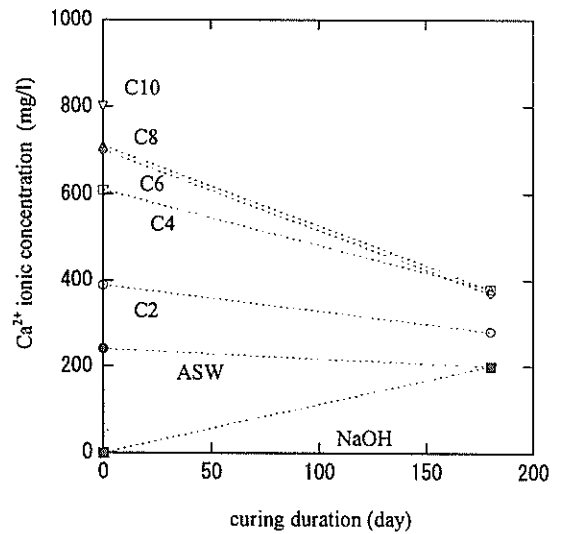


図-8 溶液中の Ca^{2+} 濃度の変化

人工海水と水酸化ナトリウム溶液では固化していない。養生 90 日までは人工海水溶液のもの固化が始まり、その一軸圧縮強さが C4 のものとほぼ同じ程度となり、その傾向は 180 日でも同じである。180 日までは NaOH 溶液の試料も固化した。その圧縮強さは、C6 とほぼ同じ程度である。

このように、セメントミルク溶液のものは養生の初期からある程度の圧縮強さを示すのに対し、人工海水や NaOH では、固結するのにある程度の時間を要する。しかしこれらの場合には、固結が始まると濃度の低いセメント溶液の場合よりも大きな固結強度を示すようになる。

図-7 は溶液の上澄みの pH の変化を示したものであ

る。セメント溶液の場合には、28 日までは、セメントの濃度によらずすべての濃度で初期の pH から変化していなかったものが、90 日たつとセメントの濃度によって pH に変化が現れ、180 日たつとまたもとの値に戻っていた。90 日の計測には何らかの問題があったのではないかと考えられる。人工海水については、90 日までは pH8.8 程度と比較的低い値を維持しているが、180 日たつと pH12.3 まで上昇している。海水は高い緩衝能力を持つが、水砕スラグの固化反応によって連続的に OH⁻ が産出され、海水の持つ緩衝能力がある段階で限界に達したためであると考えられる。NaOH については途中欠測があるが、pH はほとんど変化していない。

溶液中の Ca^{2+} の濃度について調べた結果を図-8 に示した。この結果を見ると、初期の溶液では、セメントミルクでは Ca^{2+} の濃度の範囲は 390~800mg/l であり、セメントの添加量が増えるにつれて Ca^{2+} の濃度が増加する傾向にある。人工海水では、初期の Ca^{2+} の濃度は 240mg/l であった。また、NaOH 溶液では、全く Ca^{2+} が検出されていない。180 日後の Ca^{2+} についてみると、セメントミルクのもの Ca^{2+} の濃度は 300~400mg/l に低下し、人工海水でも 200mg/l 程度に低下した。また、NaOH 溶液でも 200mg/l 程度であった。水砕スラグ溶液中の Ca^{2+} 濃度は 200~400mg/l 程度に落ち着くのではないかと推察される。特に、NaOH 溶液については検出された Ca^{2+} が水砕スラグ起源であることは間違いない。この場合の Ca^{2+} 濃度が 180 日段階での平衡的な Ca^{2+} 濃度であると想像される。

2.4 考察

2.4.1 間隙水の pH が固化に及ぼす影響

これまでの多くの現地調査の結果では、海水環境下で水砕スラグが固化することが見られていた(菊池, 2003; Kikuchi et. al, 2004)。このことから、海水環境でも水砕スラグは固化するものと考えられていたが、このことは実証されていなかった。

参考文献(鐵鋼スラグ協会, 1983)では水砕スラグの潜在水硬性について次のように記述されている。

水砕スラグの特性のひとつはガラス質であることであることは前述のとおりであるが、結晶質の徐冷スラグとは、その化学成分が同じでも化学的性質は大きく異なる。

一般にケイ酸塩の結晶は $[\text{SiO}_4]$ 4 面体が規則正しく配列しているため化学的には極めて安定した構造であるが、ガラス質は本来徐冷されれば安定した結晶になるものを急冷して得た一種の過冷融体ともいえるもので、分子が自由に動き廻っていた高温での状態がそのまま常温での構造の中に持ち込まれている。

したがってガラス質構造は結晶質構造に比較して不安定な状態にあり、化学的には反応性に富むと云うことであり、その点が徐冷スラグと著しく相違している。

この記述に引き続き、以下のように書かれている。

水砕スラグを硬化させる場合、アルカリ性物質(アルカリ刺激剤)の添加が必要であるが、アルカリ刺激剤の作用は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にある。ネットワークの切断が一旦始めると含有している CaO や MgO などのアルカリ性物質が溶出し、その雰囲気はアルカリ性に保

たれるので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む。

その後の固化メカニズムはポルトランドセメントの固化と同等なものであるとしている。

以上の点をまとめると、水砕スラグはガラス質をしているために、化学的に反応性に富む。何らかの刺激によって $[\text{SiO}_4]$ のネットワークを切断することにより、硬化反応が生じるとともに雰囲気はアルカリ性となり硬化の環境が安定する。硬化物はポルトランドセメントの硬化物とほぼ同じ構造を有しているということであろう。

今回の実験では、アルカリ性刺激だけでは硬化反応が生じるのに 3 ヶ月以上を有したことになる。それに対し、海水という pH は低い複雑なイオン環境の溶液の中では 3 ヶ月以内に硬化が始まった。また、6 ヶ月後には海水の pH も上昇していることを見ると海水の緩衝能力を超えるアルカリ性物質が溶け出したことが考えられる。

なお、固結強度の変化を見てみると、セメント添加をしたものははじめからセメント添加量に依存した形で強度が増加している。このことはセメントそのものの硬化がスラグの強度に影響を及ぼしたものと考えられる。しかし、pH ははじめから高かったにもかかわらず、セメント添加量によっては 3 ヶ月以降では人工海水や NaOH 溶液のものよりも強度が小さいものがある。

このようなことから以下のことが考えられる。

- ・セメントを添加した場合の初期の強度増加はアルカリ刺激による $[\text{SiO}_4]$ のネットワークの切断によるものではない可能性がある。
- ・初期にセメントの硬化によって強度が増加した場合には、全体の強度の伸びが不十分となる可能性がある。
- ・海水や人工海水には $[\text{SiO}_4]$ のネットワークを切断する能力があるようである。また、その反応速度は単純なアルカリ刺激よりも早い可能性がある。

2.4.2 溶液の Ca^{2+} イオンが固化に及ぼす影響

2.4.1 の考察からはアルカリ刺激が唯一の硬化反応の要因ではないことが示された。今回の溶液環境を見ると、 Ca^{2+} の存在が硬化に対して何らかの影響を持っている可能性が伺える。そのような観点から Ca^{2+} の変化と固化の関係について調べた結果は以下のとおりである。

高濃度のセメント溶液では、イオン化していない CaO が多量に含まれており、これが早期の固結の促進をした(セメント協会, 1983)と考えられる。他方人工海水の場合には、溶液の pH が低いのみならず、C2 よりも Ca^{2+} が少ない。人工海水では初期の強度の増加はないものの、90 日以降では C4 とほぼ同じ圧縮強さを示した。人工海

水には大量の Mg^{2+} が存在しており、 Ca^{2+} と類似の挙動をすると類推されるこのイオンが固結と何らかの関係を持っているものと考えられる。NaOH 溶液のものが固結の開始が最も遅かったが、固結するとかなり大きな強度を有するようになるとともに、溶液中の Ca^{2+} 濃度も他の溶液とほとんど変わらなくなっていた。NaOH 溶液の場合には、溶液中にもともと Ca^{2+} 、 Mg^{2+} などのイオンがないため、固化するためには、アルカリ刺激によって水砕スラグから Ca^{2+} を溶出させることが必要となるが、これに時間がかかるため今回のような結果になったのではないかと思われる。特徴的なことは、180 日たってすべての供試体が固化するようになると、溶液の pH がほぼ同じ値になるとともに、 Ca^{2+} の濃度もほぼ同じ値となることである。

今回の結果だけでは Ca^{2+} が硬化に強い影響を持っているとはいえないが、硬化が始まった後には Ca^{2+} の濃度がほぼ一定になることが明らかになったといえよう。

3. 固化した水砕スラグの設計強度設定手法に関する検討

港湾工事に用いられる水砕スラグは最終的には固結するものとして取り扱える。この場合、設計上問題となるのは、固結したあとの強度の評価法である。これまでの研究では、水砕スラグの排水三軸圧縮試験時の応力ひずみ曲線から、最大軸差応力と残留軸差応力の差の半分を固結強度とする便法が示されている(菊池, 2003)が、このような方法では、水砕スラグの持つ粒状的な強度を適切に評価できない。そこで、ここでは、圧密非排水三軸圧縮試験を行うことによって水砕スラグの強度特性を評価することを検討した。

なお、固化して用いられる地盤材料は水砕スラグに限ったものではなく、事前混合処理土、各種の粘性土系のセメント混合処理土、固化処理石灰灰などがある。これら、母材が異なることによる固化後の処理材料の力学的挙動の違いは重要であるので、これらの材料に関する試験結果を付録 A に示す。

ここでは、水砕スラグについて非排水三軸圧縮試験を実施し、その力学挙動を検討した。なお、固化による固結構造を維持すると考えられる低圧密領域と固結構造が圧密によって破壊されると考えられる高圧密領域の二種類の条件で圧密を行った後、三軸圧縮試験を行った。

3.1 実験方法

母材として用いた水砕スラグ($\rho_s=2.815g/cm^3$, $\rho_{min}=\dots$)

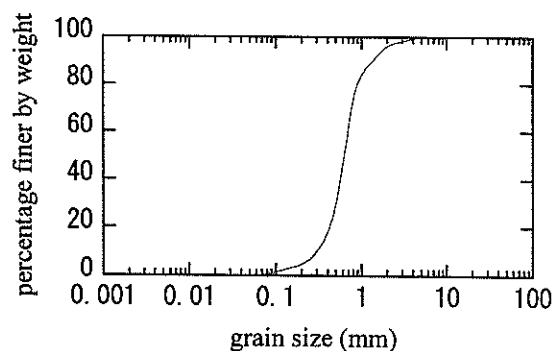


図-9 水砕スラグの粒度分布

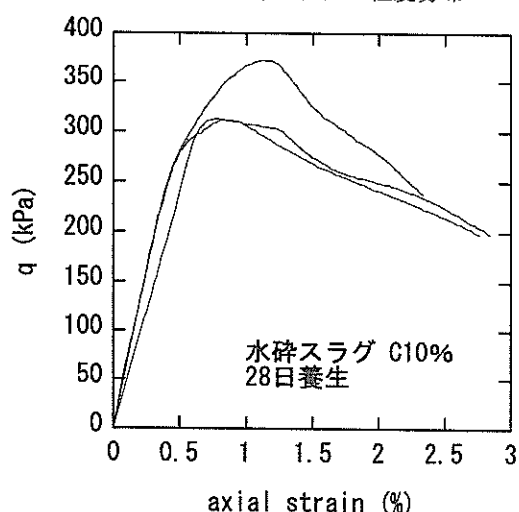


図-10 水砕スラグの一軸圧縮試験結果(28日)

($1.144g/cm^3$, $\rho_{max}=1.459g/cm^3$)の粒度分布を図-9に示す。

水砕スラグは $Dr=80\%$ となるように振動によって締固めている。水砕スラグの固結強度がすぐに発現するよう、ここでは、水砕スラグに対する重量比で 10% の高炉セメント B 種($\rho_s=3.04g/cm^3$)を添加している。

試料の養生は以下のようにして行った。最初の 1 週間はモールド内で密閉状態で養生し、残りの 3 週間は脱型し水中養生した。この際、練混ぜ水、養生水とも蒸留水を用いた。養生期間は 28 日、養生温度は $20^\circ C$ である。

せん断試験として、非排水三軸圧縮試験を実施した。供試体径はモールドと同じ 50mm とし、供試体成形時は端面の成形だけを行っている(高さ 100mm)。用いた背圧は 200kPa、有効圧密圧力は、100, 200, 500, 1000, 2000kPa とした。圧密にはろ紙を用いて側方排水とし、圧密時間は 12 時間以上を原則とした。せん断速度は $0.1\%/min$ とした。なお、三軸試験とは別に一軸圧縮試験を実施し、 q_u をあらかじめ求めている。図-10に一軸圧縮試験結果を示す。平均 q_u は 320kPa である。

3.2 実験結果

図-11 と図-12 に水砕スラグの非排水三軸試験結果の中から代表的なものについて応力ひずみ曲線と応力径路を示す。これらの図のうち、図-11 は有効拘束圧 100kPa のもので、せん断初期には固化の効果が失われていないと考えられるものである。一方、図-12 は有効拘束圧 2000kPa のときのもので、固結の効果が圧密によって失われている可能性があるものである。

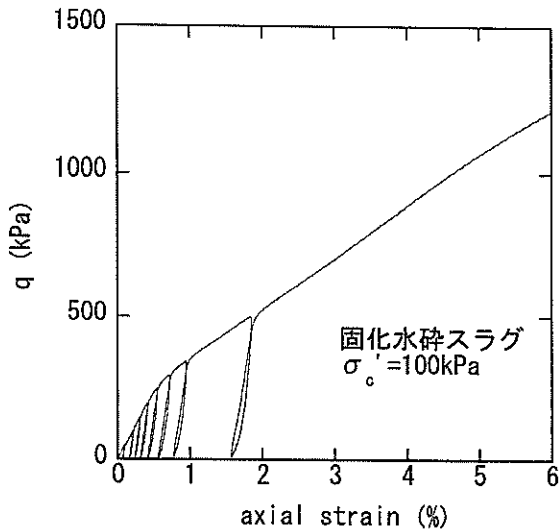
図-11 と図-12 を見ると、いろいろと特徴的なことがある。まず、拘束圧の低いもの(固結の効果のあるもの)については、過圧密の場合と非常によく似た挙動をしていることがわかる。すなわち、せん断の初期の間隙水圧の上昇が小さいこと、軸差応力の増加が大きいことなど

である。

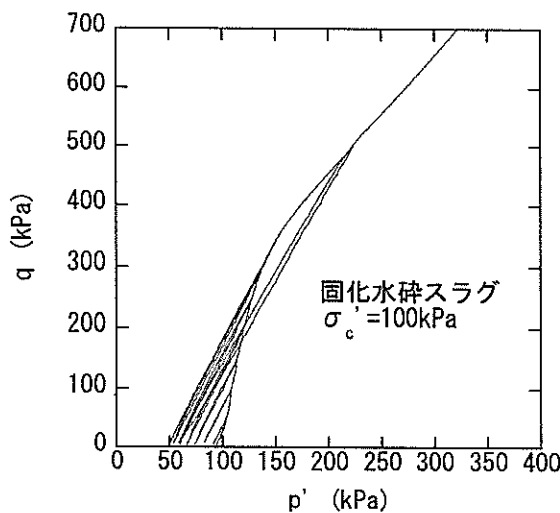
これらの試験では、せん断の途中で軸差応力の除荷を行い、間隙水圧の変化などを見ているが、一軸圧縮強度以下のせん断力を与えたあとでの除荷であっても間隙水圧の上昇が見られており、せん断初期といえども弾性的な挙動だけではなく塑性的な挙動を併せ持っていることがわかる。

以上に示したように、実験では途中で除荷を含む実験を実施しているが、途中の除荷の影響は引き続き载荷ではほとんどない。そこで、以降では除荷過程の挙動を特に示さないものもある。

図-13 に拘束圧の違いによって応力ひずみ関係がどのように変化したかを示す。これを見ると、圧密圧力

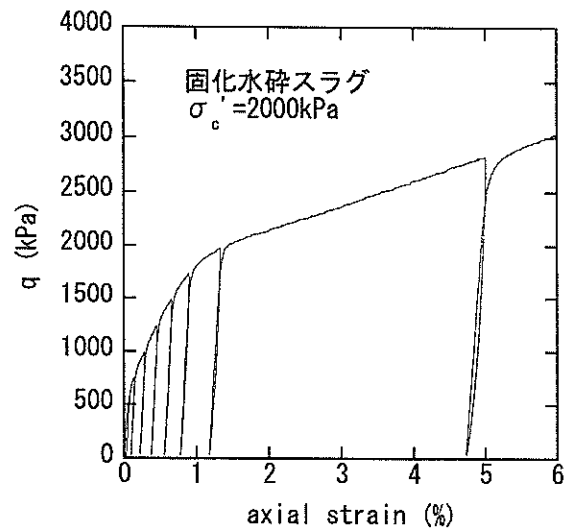


(a) 応力ひずみ関係

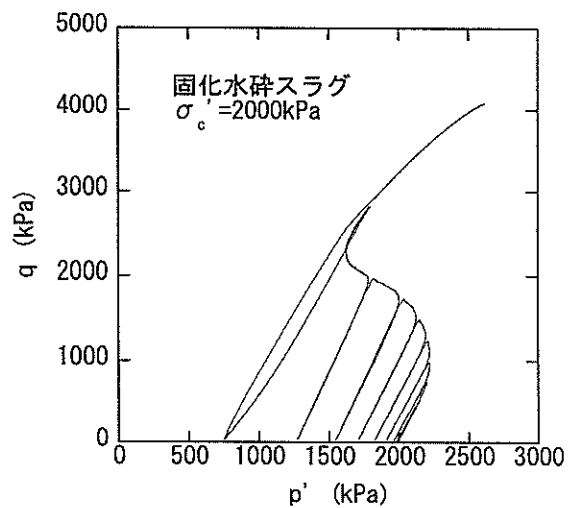


(b) 応力径路

図-11 固化水砕スラグの挙動($\sigma'_c = 100\text{kPa}$)



(a) 応力ひずみ関係



(b) 応力径路

図-12 固化水砕スラグの挙動($\sigma'_c = 2000\text{kPa}$)

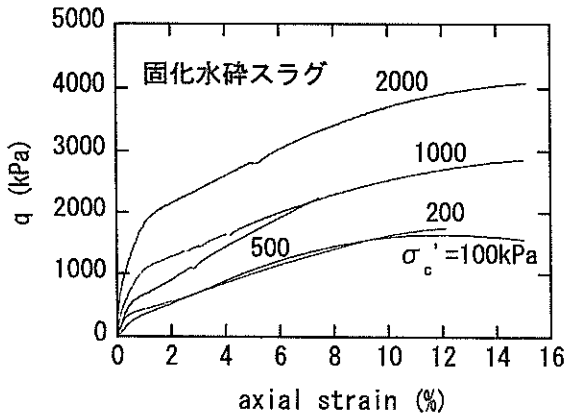


図-13 固化水砕スラグの応力ひずみ関係

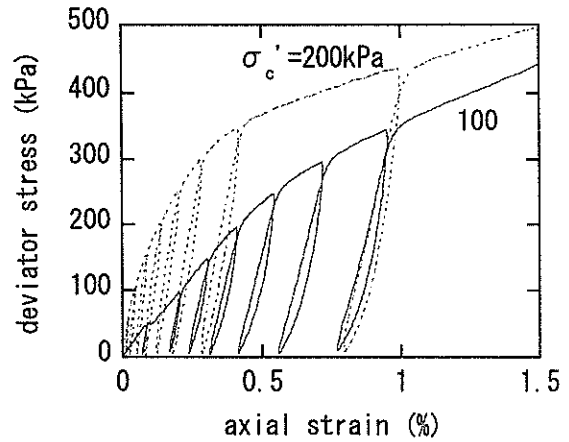
100kPa と 200kPa とで、せん断の初期には多少の違いが見られるが、大変形に達するとほぼ同じ応力ひずみ関係を示していることがわかる。一方、圧密圧力が 500kPa を超えると、せん断初期の立ち上がりはほぼ圧密圧力に比例するように変化し、特に圧密圧力 1000kPa 以上では、圧密圧力の増加に伴って軸差応力が増大する傾向が見られる。

図-14 はせん断初期の応力ひずみ関係を拡大したものである。ここでは、低圧密圧力のもとと高圧密圧力のもとに分けて示した。

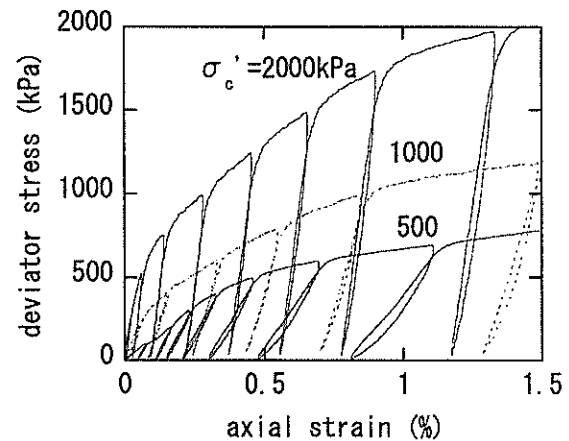
図-14(a)を見ると、初期の曲線の立ち上がりは圧密圧力の影響を受けているように見えるが、せん断が進むにつれて軸差応力の差が小さくなる傾向にある。また、除荷過程でのせん断剛性は、圧密圧力の影響をあまり受けていないようである。

図-14(b)は高圧密圧力側の結果である。図-14(a)と比べると縦軸のスケールが大きく違っていることに注意されたい。すなわち、曲線の初期の立ち上がりは低圧のものよりはるかに大きくなっており、圧密圧力の影響を強く受けている。また、一軸圧縮強さをはるかに超えるような圧力で圧密すると、荷重履歴内での弾性係数が圧密圧力の影響を受ける様子がわかる。

図-15 に応力径路を示す。σ'c=100, 200kPa では、応力径路の初期の立ち上がりが際立っているほか、σ'c=500kPa までは、内部摩擦角が大きくなる傾向が出てくる。また、σ'c=200kPa までは最大応力比に到ったときの応力条件がほぼ等しい結果となった。この値は、固化水砕スラグの一軸圧縮強度とほぼ等しいものである。なお、水砕スラグは砂状の物質でもあるため、破壊線に達した後は、破壊線上を有効応力を増加させながらたどる傾向にある。



(a) 圧密圧力が低い場合



(b) 圧密圧力が高い場合

図-14 固化水砕スラグの応力ひずみ関係(せん断初期)

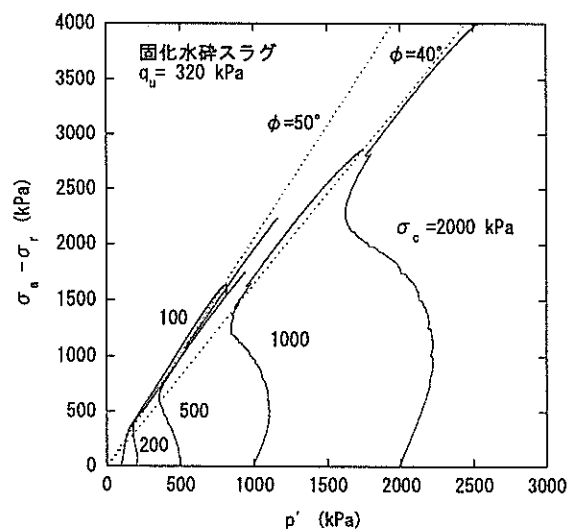


図-15 固化水砕スラグの応力径路

3.3 考察

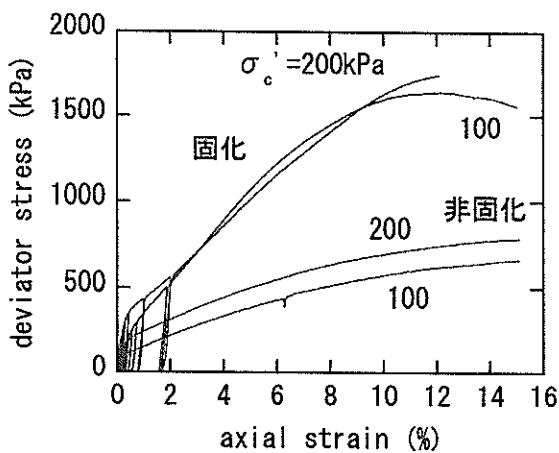
3.3.1 固化の有無によるせん断挙動の違い

比較のために、ほぼ同じ相対密度で固化していない水砕スラグの圧密非排水三軸圧縮試験も行った。ここでの比較は、一軸圧縮強度以下の圧密圧力下での圧縮試験結果について述べる。

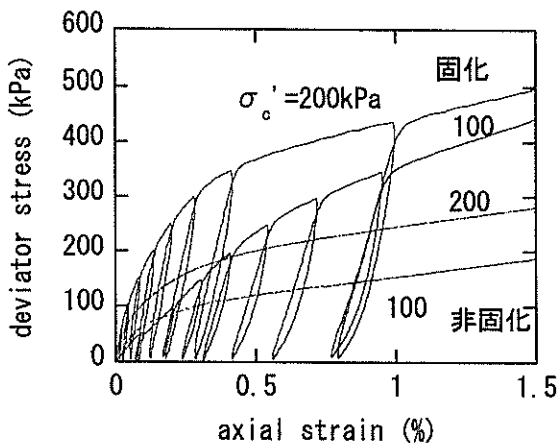
図-16 に応力ひずみ関係の比較の図を示す。(a)の全体を見ると、非固化のものは固化のものに比べてせん断抵抗が小さいこと、また、非固化のものはせん断強度そのものが拘束圧に依存しているのに対し、固化したものは部分的に異なる点もあるが、全体的な傾向としては拘束圧によらずほぼ一定であることがわかる。

一方、(b)に示したせん断初期の挙動に着目すると、固化したものはせん断の初期から非固化のものに比べてせん断強度の立ち上がり大きいことがわかる。

これらの違いは明らかに固化によるものであり、固化



(a) 全体



(b) 初期部分

図-16 固化の有無による応力ひずみ関係の変化

によって初期強度、最終強度ともに増加したことがわかる。

同様に、応力経路についても固化の影響がどのように出ているか示したのが、図-17である。この結果を見ると、軸差応力 100kPa 程度までは、固化非固化の違いによる応力経路の違いは顕著ではなく、その後差が生じてくる。特に、固化非固化で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、固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。

3.3.2 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、低圧圧密の三軸圧縮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から一軸圧縮試験結果を評価することの可否について検討する。ここで言う低圧三軸圧縮試験とは圧密圧力が 200kPa 以下と、今回の試験条件で固結が破壊しない程度の圧密をかけた非排水三軸圧縮試験の事を指す。

図-18 に比較の結果を示す。非排水三軸圧縮試験では、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傾向にある。その場合には、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。

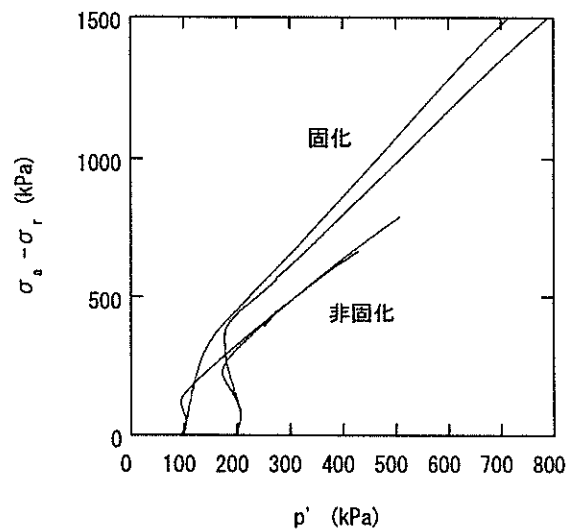


図-17 固化の有無による応力経路の違い

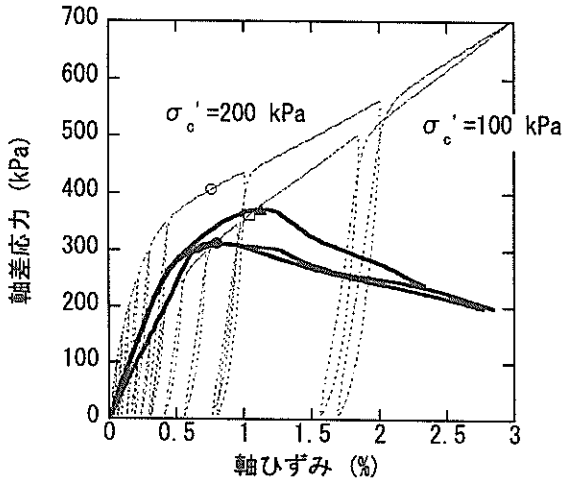


図-18 一軸圧縮試験結果と低圧三軸圧縮試験結果の比較(水砕スラグ)

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 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が急となっているが、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。また、図-18には一軸圧縮試験の軸差応力最大時(▲, ●)と CU 試験の応力比最大時(O, □)の点をそれぞれ記号で示した。これらの点は応力ひずみ曲線状で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 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。

水砕スラグの一軸圧縮試験では、供試体の透水性が高いため、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、図-18に示した3つの試験の応力経路は図-19のようなものであると考えてよいと思われる。これを見ると、それぞれの試験で応力経路はだいぶ異なっていることがわかる。つまり、これらの試験では、応力経路が異なるにもかかわらず、応力ひずみ関係にはあまり差がないことがわかる。このことは、せん断初期から 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生じていることを示していると考えてよい。

図-19には、一軸圧縮試験の軸差応力最大時の応力点(●, ▲)、残留時の応力点(■)、三軸圧縮試験時の最大応力比の応力点(O, □)も示した。一軸圧縮試験は3回実施しており、軸差応力最大時の点が3点あるが、そのうちの2点はほぼ同じ値で●で示されており、もう1点は▲で示されている。これらの点が多少ばらついている

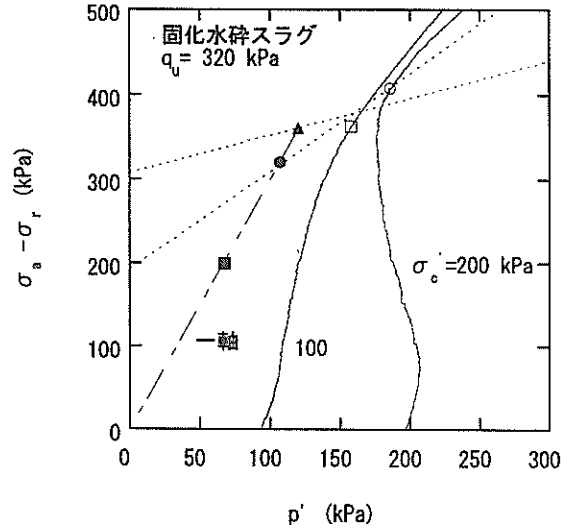


図-19 低圧圧密三軸と一軸圧縮試験の応力経路

原因としては、供試体ごとの固結の程度の違いによるものもあると思われるが、仮にこれらの点が同じ意味合いを持つ点であるとする、これらの点は多少の拘束圧依存性を持った点であると考えられる。ただし、その依存の程度は、内部摩擦角に比べると小さく、その拘束圧依存性の範囲は、図中の2本の点線には含まれる範囲であると考えてよい。

以上のことは、非排水三軸圧縮試験における応力比最大の点が固結強度の成分と摩擦強度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と考えてよいと思われる。

なお、ここでは試験をしていないが、一軸圧縮強度よりも小さな圧密圧力で圧密した排水三軸圧縮せん断試験における軸差応力最大の点は、拘束圧の影響を比較的弱く受けると考えてよいだろう。

3.3.3 正規化した応力経路について

応力経路を圧密圧力で正規化したものを、図-20に示す。

図-20をみると圧密圧力の小さい、100, 200, 500kPaのものは圧密圧力の違いによって正規化した応力経路に違いが見られる。しかし、高圧密圧力のものでは、圧密圧力の違いによる応力経路の違いは小さい。これは、圧密圧力の小さいところでは、挙動が固化の影響を強く受けており、摩擦性の挙動の影響が小さいためであると考えられる。また、最終的な応力比についてみると圧密圧力が500kPa以下の場合と1MPa以上の場合とは異なっている。この図には、未固化の水砕スラグに対する拘束圧200kPaの実験結果も示している。この曲線は1000kPa, 2000kPaの圧密圧力の試験結果によく一致して

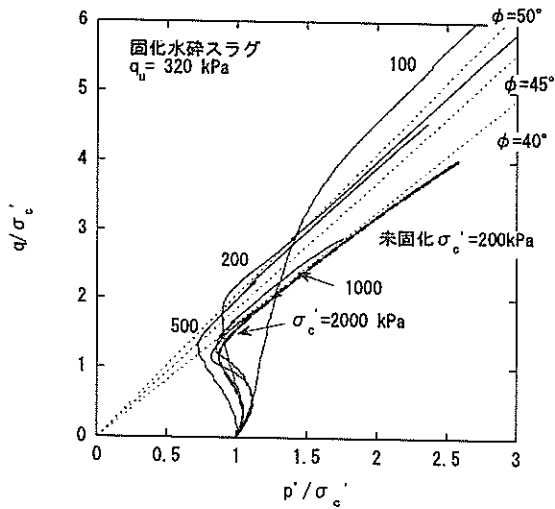


図-20 固化水砕スラグの正規化した応力経路

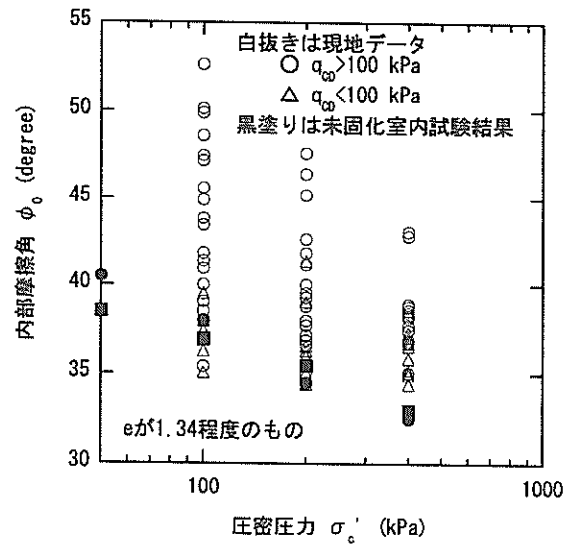


図-22 現地の固化した水砕スラグの残留内部摩擦角

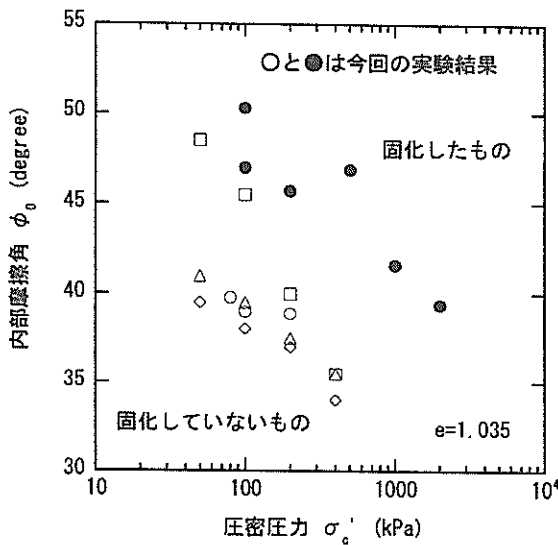


図-21 固化の有無による(残留)内部摩擦角の違い

いる。

3.3.4 水砕スラグの残留時の内部摩擦角

まず、残留摩擦角について検討する。図-21に固化したものと固化していないものについて圧密圧力と内部摩擦角の関係について示した。図中の●は今回の実験の結果であり、固化させた場合の試験結果である。○は同様に今回の試験結果であるが、固化させていないものである。□、△、◇は既往の調査結果((財)沿岸開発技術研究センター, 1989)による固化していない場合の試験結果である。これらの結果を見ると、内部摩擦角は固化することによって5度程度増加するようである。

そこで、久里浜港における現地調査結果について比較した結果を図-22に示す。現地の水砕スラグの平均の間

隙比は1.34であった。そこで、現地の内部摩擦角と比較するために既往の室内試験結果((財)沿岸開発技術研究センター, 1989)についてもほぼ同程度の間隙比のもので比較している。

現地の試験結果については、ある程度の固化は認められたものの固化の程度に差があったので、固化の程度の差によって二つのグループに分けて示している。ここでは、グループ化は以下のようにして行った。現地から採取した不かく乱試料は圧密排水三軸圧縮試験を行ったものである。圧密排水三軸圧縮試験を行うと、せん断途中で最大せん断応力状態に達する。このときの軸差応力を q_{max} とする。この試験では、15%以上の軸ひずみを生じるまでせん断を実施した。すると最終的な軸差応力は q_{max} よりも小さくなる。この、最終的な軸差応力を q_{res} とする。図中に示した q_{cd} は $q_{cd} = q_{max} - q_{res}$ のことである。 q_{cd} は排水三軸圧縮試験のときの簡便な固結強度評価手法である(Kikuchi et al., 2004)。これからもわかるように q_{cd} が小さいものは比較的固化の程度が小さく、 q_{cd} が大きなものには固化の程度が比較的大なものであると考えてよい。全体として、固化強度が大なものほど内部摩擦角が大きくなる傾向があるが、その傾向は必ずしも判然としないようである。

残留内部摩擦角は固結強度に対する圧密圧力の小さなものほど大きくなる傾向が見られるので、圧密圧力を q_{cd} で除したものと残留内部摩擦角の関係を示したのが図-23である。この図によればデータのばらつきはかなり小さくなるのがわかる。

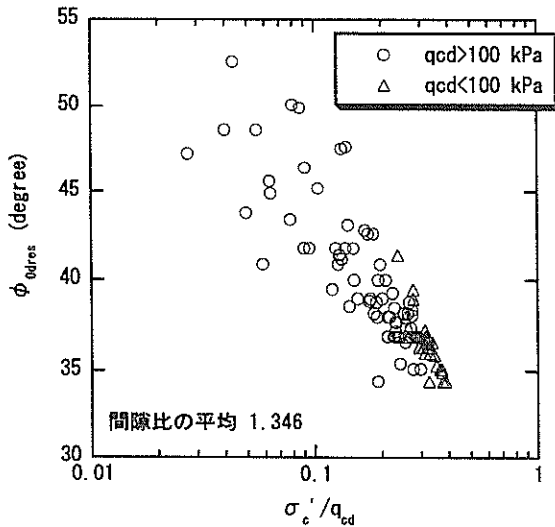


図-23 残留内部摩擦角と σ'_c/q_{cd} の関係

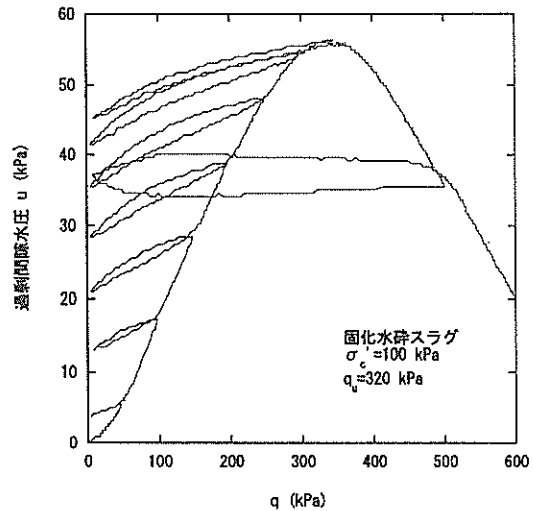


図-24 固化的水砕スラグの繰返し三軸圧縮時の軸差応力と過剰間隙水圧の関係

3.3.5 水砕スラグの固結の特性

すでに 3.3.1 で見たように、固化した水砕スラグのせん断特性は固化する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強度にのみよるものではないと考えられる。

これまでの考察(菊池, 2003)では、排水三軸圧縮試験時の軸差応力最大時の強度が摩擦性のせん断抵抗なのか固結によるせん断抵抗なのか不明であると考えてきた。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るはずである。弾性変形だけが生じるのであれば、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。この問題に対する今回の実験の答えは図-24 に示すものである。この図は軸差応力と過剰間隙水圧の関係を示したものである。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示している。固結によって過剰間隙水圧の上昇の程度は減少していることを考えると一軸圧縮強度程度の軸差応力が生じている時に固結の影響がないわけではないがそのことを定量化するのはここまでの試験結果では困難である。

純粋に固結強度ではないとするもうひとつの理由は、図-14 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弾性的な挙動は見られず、塑性的な挙動をしていることである。

3.3.6 固化した水砕スラグの設計強度定数の設定方法

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設定する方法について検討をする。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。そのためには、データの蓄積が必要であり、そのためには、標準的な仕様を定めることが必要である。そこで、ここでは、標準的な仕様を設定しようとするものである。

これまでの検討の結果は以下のようにまとめられる。

- (1) 現地の試料の圧密排水三軸圧縮試験結果では、ピーク強度が大きなものほど残留時の内部摩擦角が大きくなるという傾向が見られていた。そのときの実験では、軸ひずみが 25% 程度を残留状態としていたが、軸差応力が減少中のものが数多く見られた。今回の非排水三軸圧縮試験では、軸ひずみが 10% 程度の時の内部摩擦角はほぼ安定的に把握できている。これらのことを考えると、残留状態の内部摩擦角の把握方法としては非排水三軸圧縮試験が適していると考えられる。
- (2) 排水条件下での最大せん断応力の把握には排水三軸圧縮試験が適している。今回の実験でわかったように、低圧で圧密した三軸圧縮試験であれば最大軸差応力、破壊時の軸ひずみについては一軸圧縮試験結果とほとんど変わらない結果を得ることができる。なお、破壊ひずみは 1% 程度以下である。
- (3) 固結の影響はせん断のすべての段階において見られる。また、せん断初期といえどもそのせん断抵抗の中に粒状体としての抵抗成分を含んでいる。

以上のように、固化した水砕スラグのせん断強度には固結と粒状体としての性質をあわせて勘案する必要がある。また、排水圧縮を受ける場合には、1% 程度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

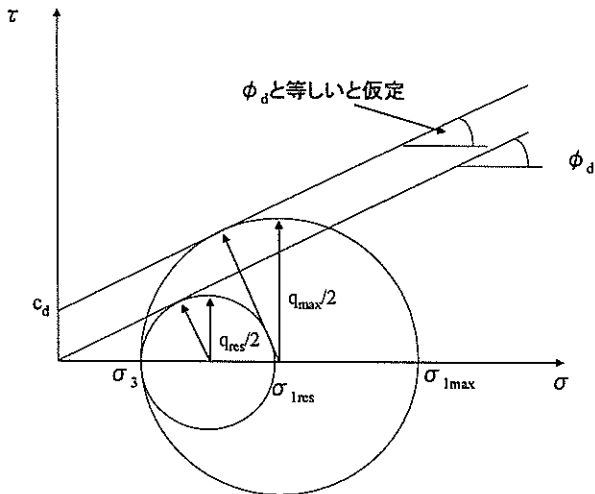


図-25 強度定数の設定のイメージ

では、最大せん断強さ時の強度定数を設定するのが望ましいと考えられる。

そこで、固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-25)。

$$\tau_d = c_d + \sigma' \tan \phi_d \quad (1)$$

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を用いることを提案する。このとき、残留内部摩擦角を求める方法としては、圧密非排水三軸圧縮試験を用いることが望ましいが、排水三軸圧縮試験であっても大きな軸ひずみまでのせん断を行い、残留強度状態を把握できれば良い。

c_d については、最大軸差応力の把握が必要となるため、一軸圧縮試験もしくは圧密排水三軸圧縮試験が必要となる。

過去の現地調査の事例からすると、固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。その意味からは、圧密排水三軸圧縮試験が最も有望である。

この際、圧密圧力をどのように設定するかが問題となる。すでに述べてきているように、比較的小さな固結強度を持つ試料では、高压で圧密せん断することにより、

固結強度を見逃すおそれがある。また、圧密圧力が大きくなるとわずかではあるが、最大圧縮強度を大きく見積もる傾向にある。さらに、求められる内部摩擦角が圧密圧力の影響を受けている。そこで、試験を実施しやすく、比較的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。

具体的には、圧密圧力 100kPa 程度で圧密した上で排水三軸圧縮試験を実施すれば良い。固結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ても良い。

最終圧縮量はなるべく大きくとることが必要である。できる限り、軸差応力がほぼ一定となるまでの試験を行う。

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固結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、残留内部摩擦角は次式で求める。

$$\sin \phi_d = \left(\frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{\sigma'_1 + \sigma'_3} \right)_{res} \quad (2)$$

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が、図-23 が参考になる。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、 c_d を次式で求める。

$$c_d = \left(\frac{q_{max} - q_{res}}{2} \right) \tan \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\phi_d}{2} \right) \quad (3)$$

なお、残留状態では、 ϕ_d だけを考えるのが良いであろう。

4. 結論

本研究で検討したのは次の二点である。

- (1)水砕スラグの固結に対する間隙水の環境の影響
- (2)固結した水砕スラグの強度評価に関する検討

(1)については海水環境下で固化している現実を踏まえ、pH と Ca^{2+} の存在の有無による固結の仕方の違いについて検討した。(2)については除荷を含む非排水三軸圧縮試験をするとともに原位置での不攪乱試料を用いた排水三軸圧縮試験結果についても検討した。

(1)に関する主たる結論は以下のとおりである。

- 1) 海水環境では pH は高くないが、水砕スラグは固化する。NaOH 溶液のように pH が高いだけではすぐには固結反応は始まらない。
- 2) 1)のような結果の違いには間隙水中のカルシウムイオンの存在の影響が大きいと考えられる。
- 3) セメント添加した場合にすぐに固化するのは水砕スラグの本来の固化反応ではない可能性がある。
- 4) 海水及び NaOH の環境では固化が始まるのに時間がかかるが固化が始まると十分な固結強度を示すとともに、間隙水の pH が上昇する。

(2)に関する主たる結論は以下のとおりである。

- 1) 固化した水砕スラグを一軸圧縮強度以下で圧密三軸試験をすると、固化しないものに比べて初期強度、最終強度ともに大きくなる。
- 2) 一軸圧縮強度よりも低い圧力で圧密した固化した水砕スラグから推定される排水最大圧縮強さに至る前の応力ひずみ関係と排水最大圧縮強さは応力径路の影響をほとんど受けない。
- 3) 固化した水砕スラグの残留内部摩擦角は、固化しない水砕スラグの内部摩擦角よりも大きい。固化した水砕スラグの残留内部摩擦角は σ_c/q_{cd} に依存して変化する。
- 4) 固化した水砕スラグは低いせん断レベルから摩擦性のせん断特性を示す。
- 5) 固化水砕スラグの排水せん断時における軸差応力最大時の強度 τ_d は、 c_d と ϕ_d の組み合わせとして考えることが適している。残留状態では、 ϕ_d だけを考えるのが良い。

5. おわりに

これまでの研究の結果、水砕スラグの溶液環境が固化に及ぼす影響について新たな知見が得られた。しかし、まだ、いくつかの課題が残されている。ひとつの課題は、 Ca^{2+} の影響について検討を深めることである。pH としては中性でより多くの Ca^{2+} を含むイオン環境での試験を今後行って行きたい。もうひとつは、固液比の影響に関する検討である。今回の実験は溶液の量が比較的少ない条件での実験であった。この条件は、間隙水の移動が少ない、イオン濃度が高くなりやすいといった条件であり、水砕スラグとしては固化しやすい条件となっている。より現実の現象に近づけるため、溶液の量の多い実験を今後追加していく予定としている。これらの結果を元に、水砕スラグを積極的に固化させる環境についての結論を見出したい。

固結後の強度評価についても一定の結論が得られたが、今回の結論の妥当性、汎用性について確認する必要がある。そのためには、固結強度の異なる水砕スラグを多数集めて実験を行う必要がある。その実験では、一軸圧縮試験と圧密排水三軸圧縮試験、圧密非排水三軸圧縮試験の三種類の実験をセットにして行うことが必要となる。

(2004年5月14日受付)

参考文献

- Kikuchi, Y., M., Ikegami, Y., Yamazaki(2004): Field Investigation on the property change of granulated blast furnace slag used for backfilling of quay wall, Int. Symp. on Engineering Practice and Performance of Soft Deposits, pp.263-268.
- 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.
- 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.
- (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, 38 p.
- セメント協会(1983): 高炉水砕スラグの実体, コンクリート技術者のためのセメント化学雑論, pp.43-46.
- 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.

付録 A 固化処理をした石炭灰と粘性土のせん断強度特性

固化して用いられる地盤材料は水砕スラグに限ったものではなく、事前混合処理土、各種の粘性土系のセメント混合処理土、固化処理石炭灰などがある。

ここでは、母材がシルト質の場合と粘土質の場合について、非排水三軸圧縮試験を実施し、その力学挙動を検討した。なお、水砕スラグの場合と同様に、固化処理土の固結構造を維持すると考えられる低圧密領域と固結構造が圧密によって破壊されると考えられる高圧密領域の二種類の条件で圧密を行った後、非排水三軸圧縮試験を行った。

A.1 実験方法

母材として用いたのは、石炭灰 ($\rho_s = 2.270\text{g/cm}^3$, $w_L = 31\%$) と川崎粘土 ($\rho_s = 2.706\text{g/cm}^3$, $w_L = 52\%$, $w_P = 23\%$) である。粒度分布を図-A1 に示す(参考のため、水砕スラグの粒度分布も示す)。

用いた固化材は高炉セメント B 種である。試料は十分脱気した高含水比(石炭灰で $w_0 = 65\%$, 粘土で $w_0 = 110\%$) の母材に母材の土粒子重量に対して 10% の重量のセメントを添加し、モールドにつめて 28 日間水中養生 (20°C) したものをを用いた。

すべての試料の養生は以下のようにして行った。最初の 1 週間はモールド内で密閉状態で養生し、残りの 3 週間は脱型し水中養生した。練混ぜ水、養生水とも蒸留水を用いた。

せん断実験は、非排水三軸圧縮試験を実施した。供試体径はモールドと同じ 50mm とし、供試体成形時は端面の成形だけを行っている(高さ 100mm)。用いた背圧は 200kPa、有効圧密圧力は、100, 200, 1000, 2000kPa とした。圧密にはろ紙を用いて側方排水とし、圧密時間は 12 時間以上を原則とした。用いたせん断速度は 0.1%/min

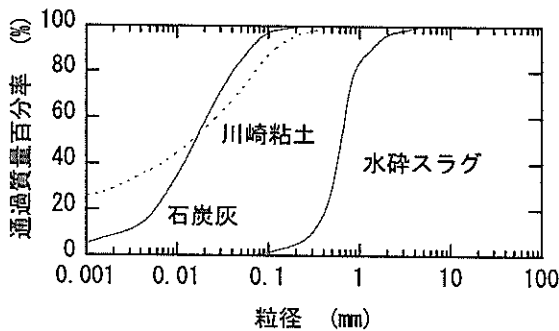


図-A1 石炭灰と粘土の粒度分布

である。なお、三軸試験とは別に一軸圧縮試験を実施し、 q_u (それぞれの平均 q_u は、固化石炭灰 570kPa, 固化粘土 470kPa) をあらかじめ求めている。図-A2 と図-A3 にそれぞれの一軸圧縮試験結果を示す。

A.2 実験結果

図-A4 に固化処理石炭灰と固化処理粘土、固化水砕スラグについての圧密圧力と間隙比の関係を示す。この結果を見ると、固化粘土は低圧密圧力下では間隙比が高く、 $\sigma'_c = 600\text{kPa}$ 付近に顕著な降伏点が見られる。固化石炭灰では顕著な降伏点の存在は見られなかった。しかし、これまでの知見からすると、セメントで固化した場合の一軸圧縮強度と圧密降伏応力の比 q_u/p_c は概ね 1 である(沿岸開発技術研究センター, 1999a, 1999b)ので、固化粘土、固化石炭灰とも圧密圧力 200kPa までは固結が圧密によ

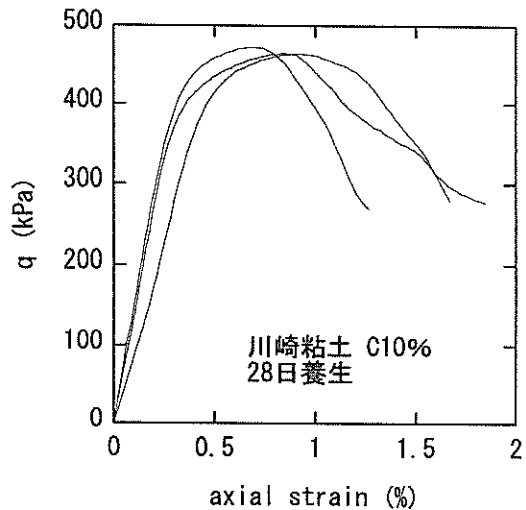


図-A2 固化処理粘土の一軸圧縮試験結果(28日養生)

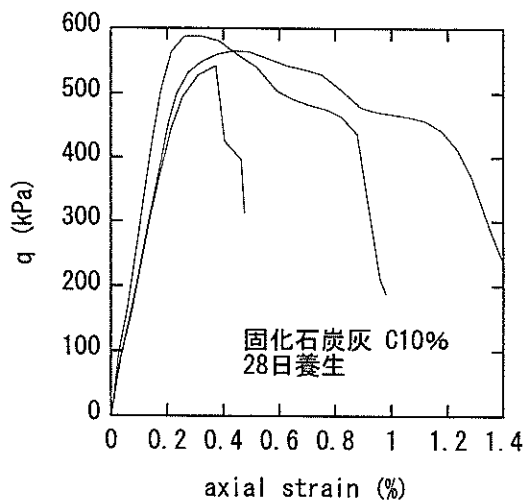


図-A3 固化処理石炭灰の一軸圧縮強度(28日養生)

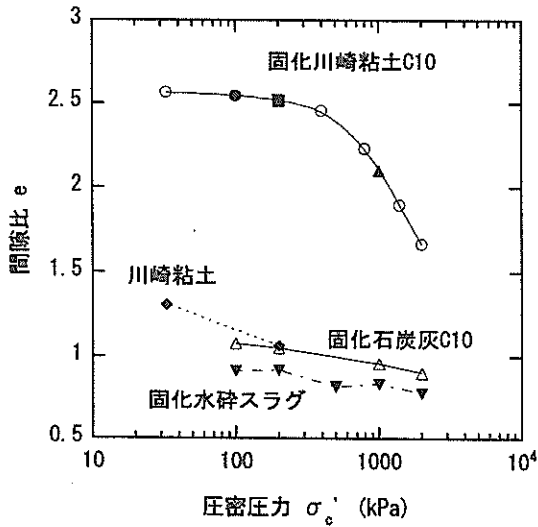
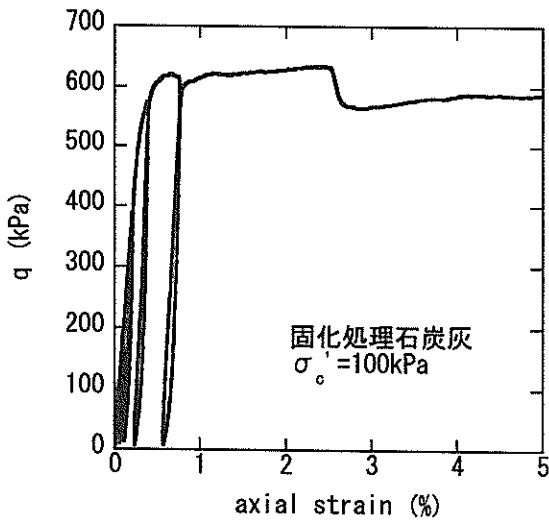


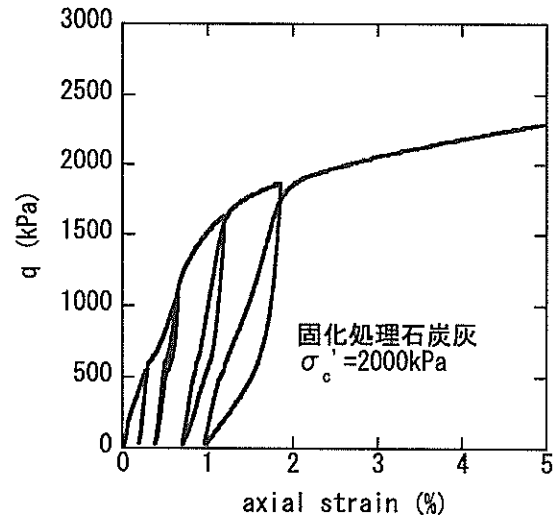
図-A4 圧密圧力と間隙比の関係

って破壊されない状態(ここでは過圧密と呼ぶ), 1000kPa 以上では固結が破壊された状態(ここでは正規圧密と呼ぶ)となると考えられる. 固化的水砕スラグでは, 供試体の違いによる間隙比の違いがあるため, $e-\log p$ 関係はばらついたものとなっており, 図だけでは降伏圧力の判定が難しいが, 間隙比の計算結果からすると圧密圧力 0.5MPa あたりから間隙比が小さくなっており, このあたりを境に降伏したものと考えられる.

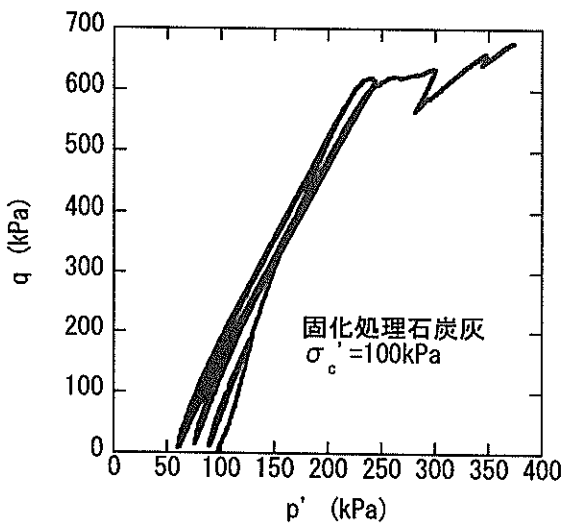
図-A5 から図-A8 に固化的石炭灰, 固化的川崎粘土の非排水三軸試験結果の中から代表的なものについて応力ひずみ曲線と応力径路を示す. これらの図のうち, 図-A5, A7 は有効拘束圧 100kPa のもので, せん断初期には固化的効果の効果が失われていないと考えられるものである. 一方, 図-A6, A8 は有効拘束圧 2000kPa のときのもので, 固



(a) 応力ひずみ関係

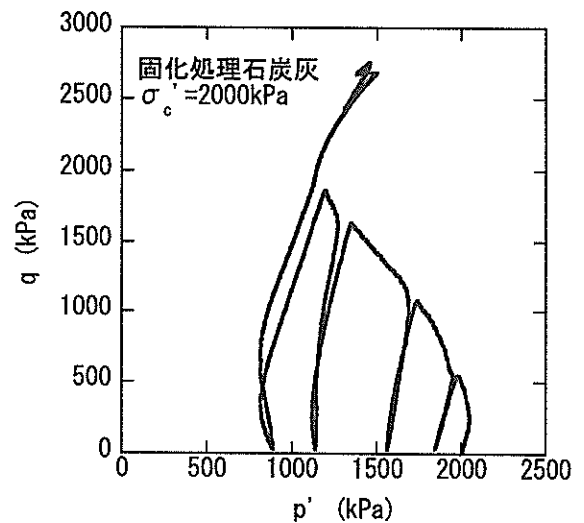


(a) 応力ひずみ関係



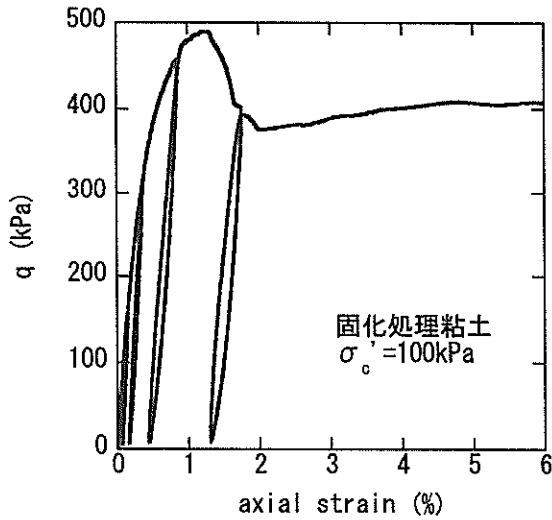
(b) 応力径路

図-A5 固化的石炭灰の挙動($\sigma'c = 100\text{kPa}$)

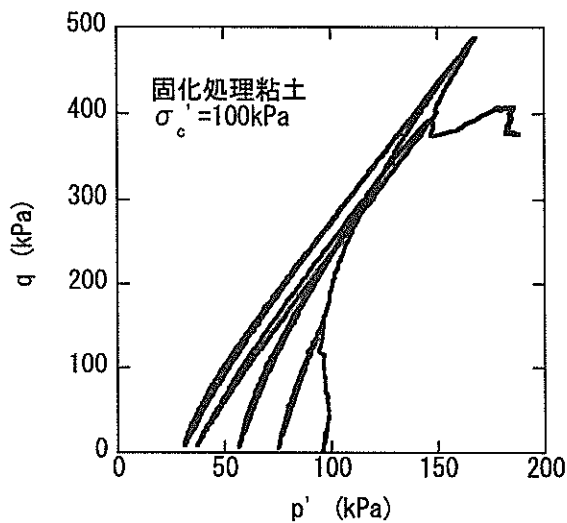


(b) 応力径路

図-A6 固化的石炭灰の挙動($\sigma'c = 2000\text{kPa}$)

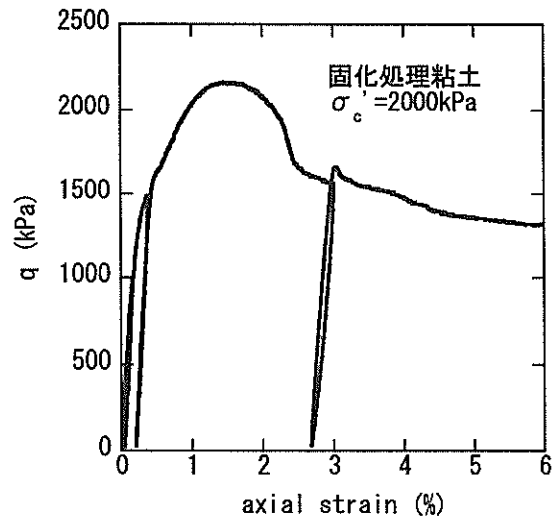


(a) 応力ひずみ関係

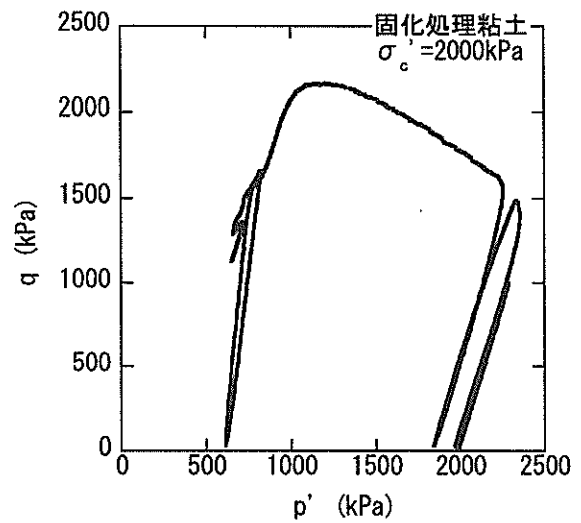


(b) 応力径路

図-A7 固化処理粘土の挙動($\sigma'_c = 100\text{kPa}$)



(a) 応力ひずみ関係



(b) 応力径路

図-A8 固化処理粘土の挙動($\sigma'_c = 2000\text{kPa}$)

結の効果が圧密によって失われていると考えられるものである。

図-A5 から図-A8 を見ると、いろいろと特徴的なことがある。まず、拘束圧の低いもの(固結の効果のあるもの)については、過圧密の場合と非常によく似た挙動をしていることがわかる。すなわち、せん断の初期の間隙水圧の上昇が小さいこと、軸差応力が急激に増加することなどである。また、全体として、母材の特性の影響を強く受けており、一口に固化処理土といっても母材が異なると挙動は大幅に異なるので、母材ごとに物性の評価を変えなくてはならないことがわかる。

これらの試験では、せん断の途中で軸差応力の除荷を行い、間隙水圧の変化などを見ているが、固化土の一軸

圧縮強度以下のせん断力を与えたあとでの除荷であっても間隙水圧の上昇が見られており、せん断初期といえども弾性的な挙動だけではなく塑性的な挙動を併せ持っていることがわかる。

以上に示したように、実験では途中で除荷を含む実験を実施しているが、途中の除荷の影響は引き続き载荷ではほとんどない。そこで、以降は除荷過程の挙動は特に示さないことにする。

図-A9 と図-A10 に固化石炭灰と固化粘土について圧密圧力の違いによって応力ひずみ関係がどのように変化したかを示す。

これらの図を見るとそれぞれで特徴的なことがある。ひとつは、固化粘土の場合には、比較的小さなひずみで

最大軸差応力が生じ、その後軸差応力が低下することである。固化石炭灰の場合には、最大軸差応力に達するのに大きな軸ひずみを要している。正規圧密の石炭灰では、 ϵ_a が2%~10%付近まで勾配はゆるくなるものの直線的に軸差応力が増加しているのが特徴的である。二つ目は、せん断初期の立ち上がりの違いである。固化粘土や固化水砕スラグでは、固結保持領域では、初期のせん断剛性に圧密圧力の違いが見られないものの、正規圧密領域に達すると拘束圧に依存して初期のせん断剛性が大きくなっている。一方、固化石炭灰では、初期のせん断剛性は過圧密、正規圧密を問わずほぼ等しい。

図-A11に固化粘土の応力経路を示す。 $\sigma'_c=100$ と200kPaの場合には、過圧密的な挙動を示している。一方、 $\sigma'_c>1000$ kPaでは、せん断初期に間隙水圧がほとんど上がらないような挙動をしている。このような挙動は固化処理をしない正規圧密粘土の場合とはかなり異なったものである。図中には、残留時の想定内部摩擦角の線を引いているが、正規圧密領域では、 ϵ_a が1%程度でこの応力比に達し、その後軸差応力最大時にほぼ最大軸差応力に達

している。その後、正規圧密領域では p' 、 q とも減少しながら残留破壊線に漸近する様子が見られる。

図-A12に固化石炭灰の応力経路を示す。固化石炭灰では、過圧密領域では、せん断初期にあまり間隙水圧が上昇しないような形でせん断が進み、残留破壊線を越えた後、軸差応力が大きくなりながら残留破壊線に漸近する。正規圧密領域でも残留破壊線を越えた後、軸差応力が増加しながら破壊線に漸近する。正規圧密領域では、せん断初期から間隙水圧が上昇し、残留破壊線を越えたあたりで応力経路が反転し有効応力が増加に転じるようになる。正規圧密領域で残留破壊線と交差するのは、 ϵ_a で2%程度のところであり、図-A9と比較すると、このあたりを境に軸差応力の増加傾向に変化が見られている。

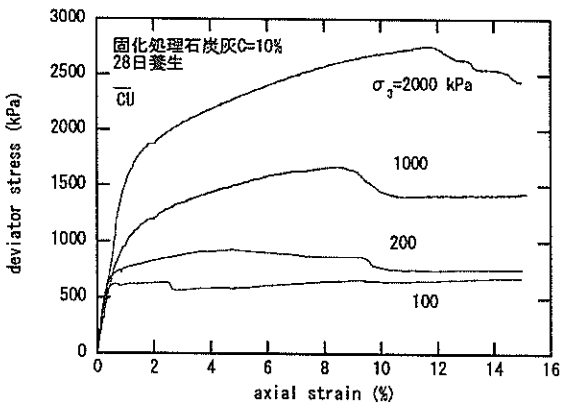


図-A9 固化石炭灰の応力ひずみ関係

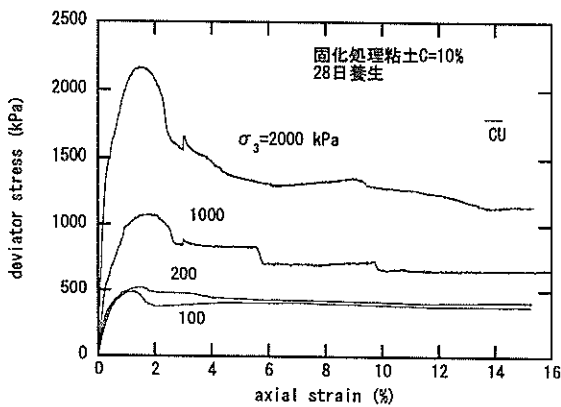


図-A10 固化粘土の応力ひずみ関係

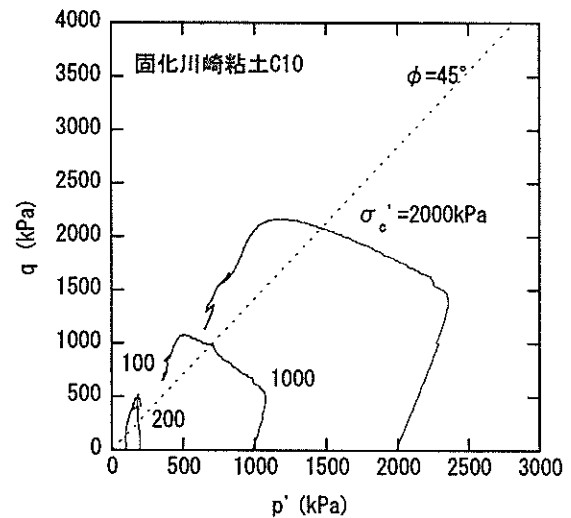


図-A11 固化粘土の応力経路

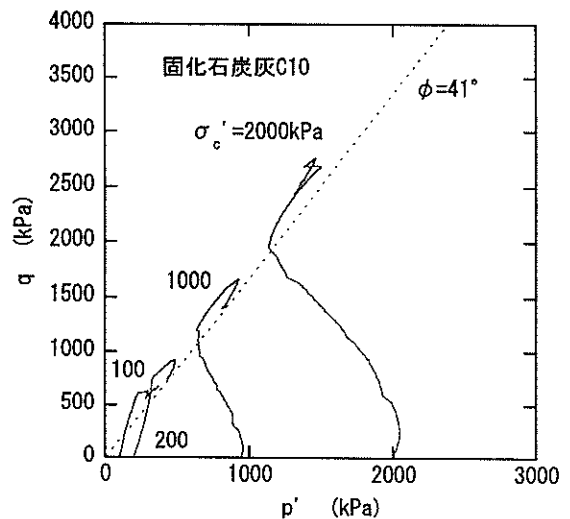


図-A12 固化石炭灰の応力経路

A.3 考察

A.3.1 一軸圧縮試験結果と低圧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、低圧の三軸圧縮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から一軸圧縮試験結果を評価することの可否について検討する。ここで言う低圧三軸圧縮試験とは拘束圧が200kPa以下と、今回の試験条件で固結が破壊しない程度の圧密をかけた三軸圧縮試験の事を指す。

図-A13には、固化粘土の比較をしている。この結果では、拘束圧によらず一軸圧縮試験における q_u まではほぼ同じ挙動をしているが、三軸圧縮試験では q_u に相当する点を過ぎてからも軸差応力が多少増加する。また、ピ

ーク後については拘束圧が高いほど軸差応力が大きくなる傾向にある。

図-A14には、固化石灰灰での比較を示す。固化石灰灰では、 q_u 程度までは一軸と三軸圧縮試験の結果に差がない。しかし、三軸圧縮試験結果同士を比較すると、拘束圧が高いほど軸差応力が大きく出る傾向が一貫しており、試験結果に拘束圧の影響があることが伺える。図-A13と比べると拘束圧依存性がある傾向がより顕著である。

A.3.2 正規化した応力経路について

応力経路を圧密圧力で正規化したものを、図-A15と

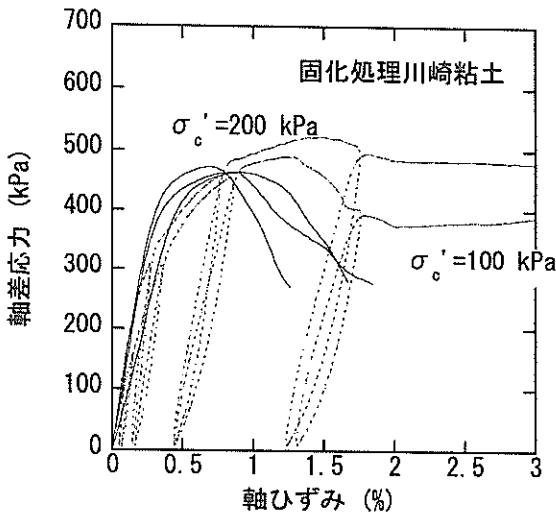


図-A13 一軸圧縮試験結果と低圧三軸圧縮試験結果の比較(固化粘土)

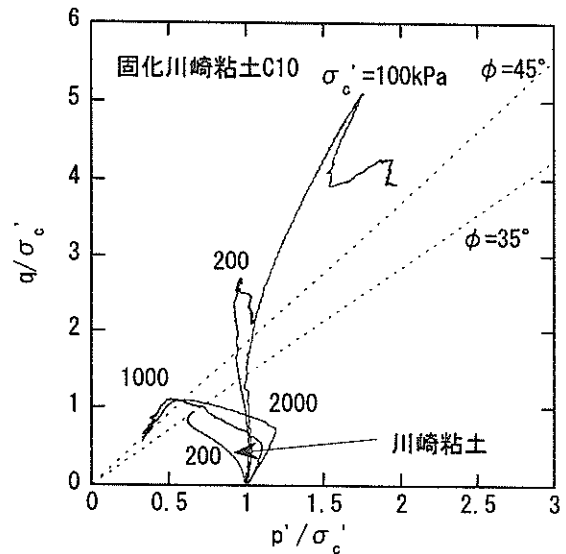


図-A15 固化粘土の正規化した応力経路

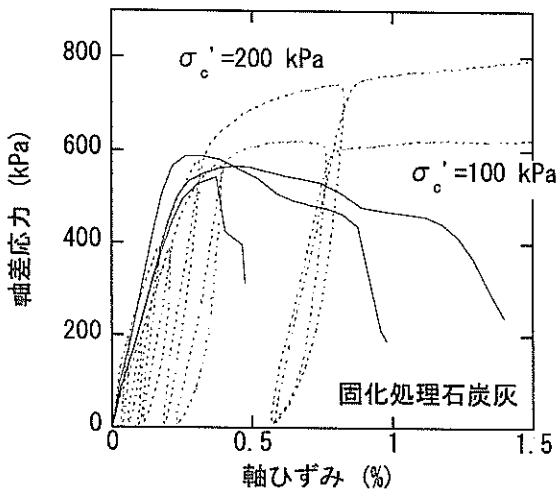


図-A14 一軸圧縮試験結果と低圧三軸圧縮試験結果の比較(固化石灰灰)

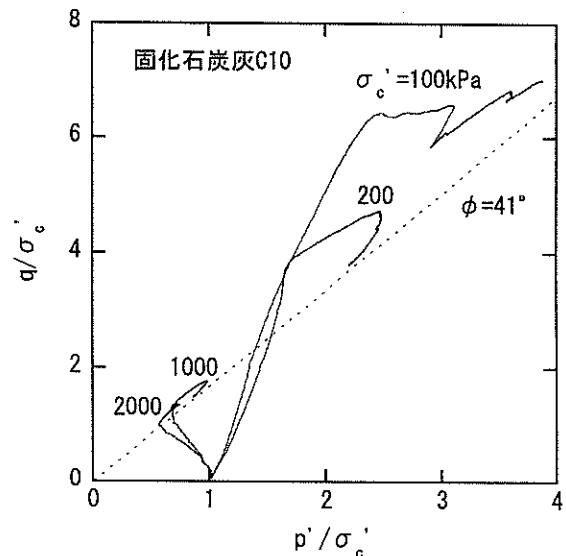


図-A16 固化石灰灰の正規化した応力経路

図-A16に示す。図-A15は固化粘土、図-A16は固化石炭灰である。

図-A15には比較のために、母材の粘土の三軸圧縮試験結果も載せている。この結果を見ると、固化粘土の残留破壊線の内部摩擦角が母材の内部摩擦角よりもかなり大きくなっていることがわかる。これまで、セメントで固化処理をした砂の内部摩擦角はセメントを添加しても変わらない((財)沿岸開発技術研究センター, 1999b)とされているが、善ら(1997)の原論文によると、砂の場合でもセメント固化によって内部摩擦角の増加が見られており、他の研究(矢島ほか, 1997)でも内部摩擦角が増大する傾向となっている。しかし、笠間(2004)によると固化処理後の内部摩擦角は固化処理前と変わらないとする研究成果も多くあるとしている。このように固化後の内部摩擦角については議論のあるところであるが、今回の結果は、粘性土と水砕スラグにおいては確実に内部摩擦角が増大する結果となっている。このような挙動は今後とも注意していくべき点である。いずれにせよ、固化による内部摩擦角の増加メカニズムは今のところよくわかっていない。また、正規圧密領域にまで圧密した固化粘土がせん断初期に間隙水圧が上昇しなかった点については、今後追加検討を要している。

図-A16の固化石炭灰の正規化応力径路についてみると、過圧密の場合にはせん断初期の応力径路はどちらも直線的になっており、応力径路が折れ曲がる点と図-A9に示したせん断剛性が急激に低下する点とが一致していることがわかる。また、その後は、平均主応力が大きくなりながら残留強度線に近づいている。正規圧密の場合の正規化した応力径路はどちらもほぼ同じであることがわかる。以上のように、固化石炭灰では、応力径路は過圧密と正規圧密では異なるものの、どちらの領域にあるかで概ねの挙動は一致している。なお、今回の残留破壊線から求められる内部摩擦角はおよそ 41° であるが、過去に行ったセメントを6%配合した場合の固化処理石炭灰の残留時の内部摩擦角も 41° となっており(菊池ほか, 2003)、セメントの配合には依存しないようである。

以上見てきたように、母材の違いによって固化処理土の力学的挙動はかなり相違が生じるようである。この点について今後さらに検討を進め、固化処理土の力学現象の解明に努めたい。

参考文献

- (財)沿岸開発技術研究センター(1999a)：軽量混合処理土工法技術マニュアル。
(財)沿岸開発技術研究センター(1999b)：事前混合処理工

法技術マニュアル。

菊池喜昭, 木村淳治, 水上純一, 小椋卓実(2003)：固化処理をした石炭灰のせん断強度特性とその長期安定性, 港空研資料 No.1038.

善功企, 山崎浩之, 佐藤泰(1990)：事前混合処理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.

矢島寿一, 永岡 高, 谷崎誠二(1997)：正規・過圧密セメント改良段せん断特性と破壊基準, 土木学会論文集 N0.561/III-38, pp.205-214.

笠間清信(2004)：固結力を有する土の力学モデルの構築とその高強度化に関する研究, 九州大学学位請求論文。

港湾空港技術研究所資料 No.1088

2004.9

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 あんざい

Copyright © (2004) 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。