

港湾技研資料

TECHNICAL NOTE OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH INSTITUTE
MINISTRY OF TRANSPORT, JAPAN

No. 915 Sept. 1998

水砕スラグの力学特性の経年変化

菊 池 喜 昭
高 橋 邦 夫

運輸省港湾技術研究所

目 次

要 旨	3
1. はじめに	3
2. 水砕スラグの基本的性質	4
3. 水砕スラグの経時変化に関する既往の調査事例	5
4. 現地調査の概要と結果	6
4.1 A現場での調査	6
4.2 B現場での調査	11
4.3 C現場での調査	14
5. 考察	15
5.1 固結強度と摩擦強度の分離	15
5.2 固結した水砕スラグの特性	19
6. 結論	21
7. 終わりに	21
参考文献	22
付録 水砕スラグの排水三軸圧縮試験時の応力ひずみ曲線と軸ひずみ体積ひずみ曲線	23

Change of Mechanical Characteristics of the Granulated Blast Furnace Slag according to Age

Yoshiaki KIKUCHI*

Kunio TAKAHASHI**

Synopsis

As almost ten years have passed from being published the manual for utilization of granulated blast furnace slag for port area, there are a lot of experiences of using this kind of material. At the beginning of the utilization of the material, there are a lot of unknown factors about the long term characteristics of the material. Solidification problem is one of the most interested unknown factors. In this study, geotechnical investigations have done in several sites and discussions as to the change of mechanical characteristics of the material in long term has done.

Followings are the conclusion from this study:

- 1) There are some large variance in mechanical characteristics of this material in-situ.
- 2) This material will solidify if it is under the water table.
- 3) The solidified strength is 0.87 - 18 kgf/cm², the internal friction angle is more than 37 degree in residual condition.
- 4) The permeability of the material in the solid state is 10⁻³cm/sec.
- 5) pH of the material is around 11, and pH of the pore water in the material is around 9 - 10.

Key Words : granulated blast furnace slag, shear strength, permeability, aging effect

* Chief, Foundations Laboratory, Geotechnical Engineering Division

(Port and Harbour Research Institute, Nagase 3-1-1, Yokosuka 239-0826, JAPAN

Phone +81-468-44-5024 Facsimile +81-468-44-0618 E-mail : kikuchi@phri.go.jp)

** Director, Niigata Investigation and Design Office, The First District Port Construction Bureau (Ex-Chief, Soil Dynamics Laboratory, Geotechnical Engineering Division)

水砕スラグの力学特性の経年変化

菊池喜昭*
高橋邦夫**

要 旨

平成元年に水砕スラグを港湾工事に利用する際の手引書が作られた。その後、水砕スラグの利用実績が豊富になってきている。中には施工後10年近く経つものもあり、水砕スラグの長期特性を把握できるような状況になってきた。特に、水砕スラグの固結については不明な点が多かったが、今回の地盤調査の結果、水砕スラグの経年変化について以下のような結論が得られた。

- 1) 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固結する傾向にある。
- 2) 原位置における水砕スラグの物性値や力学特性には比較的大きなばらつきがある。
- 3) 固結した水砕スラグの固結強度の範囲は0.87～18kgf/cm²程度である。残留強度から求めた内部摩擦角は37°以上ある。
- 4) 固結した水砕スラグの透水係数は10⁻³cm/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。
- 5) 固結した水砕スラグについて地盤工学会基準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はそれよりはやく小さくpHが9～10程度となる。

キーワード：水砕スラグ、せん断強度、透水係数、経年変化

1. はじめに

近年、廃棄物のリサイクルの観点から、これまでは処分されてきた材料に処理を加えることによって新しい材料として利用する技術の開発が盛んに行われるようになってきている。このような技術の一つの方向は費用とエネルギーをかけて高品質のものを作ることである。この種の技術は廃棄物のボリュームを小さくできるものについては有効であるが、嵩のある廃棄物の処理には適しているとは言いがたい。

嵩のある廃棄物の中でも、無機的で比較的土と良く似た材料については、なるべく少ない処理を施して、地盤材料として活用する技術の開発が望まれている。一般に、品質を高めるためには多くの処理を必要とするが、地盤材料として用いるためにはできるだけ費用を低く抑えることが求められるので複雑な処理はできないことが多い。そこで、主として強度を高めることで高品質化することが検討されてきており、これまでの技術開発の中で

は固化材(主にセメント)を添加して地盤を固化させることが良く行われてきた。このような処理を行った場合には、将来の強度低下とアルカリ性物質の移動が重要な問題となる。これらはいずれも長期的な観察を必要とするものであるため、開発途上の材料についてこれらの問題の解答を示すことは困難である。

水砕スラグは鉄鋼生産の際に発生する副産物の一つであり、砂に良く似た材料として地盤材料として利用されている。特に、平成元年に港湾工用水砕スラグ利用手引書が作られ、港湾工事においても10年近い実績を有する材料である。

水砕スラグも利用開始の初期には、劣化などの長期的特性は不明だったが、実施工に用いられて10年近くが経った今日において調査をし直すことによってその長期特性を把握できるようになった。この材料は、水の存在下でアルカリ性に富む環境におかれると、固結する特性を持っていることが既に知られていた。しかし、地盤材料として自然環境下においたときの長期的な変化につい

* 土質部基礎工研究室長

(〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 運輸省港湾技術研究所)

電話 0468-44-5024 ファックス 0468-44-0618 E-mail : kikuchi@phri.go.jp)

** 第一港湾建設局新潟調査設計事務所長 (前 土質部動土質研究室長)

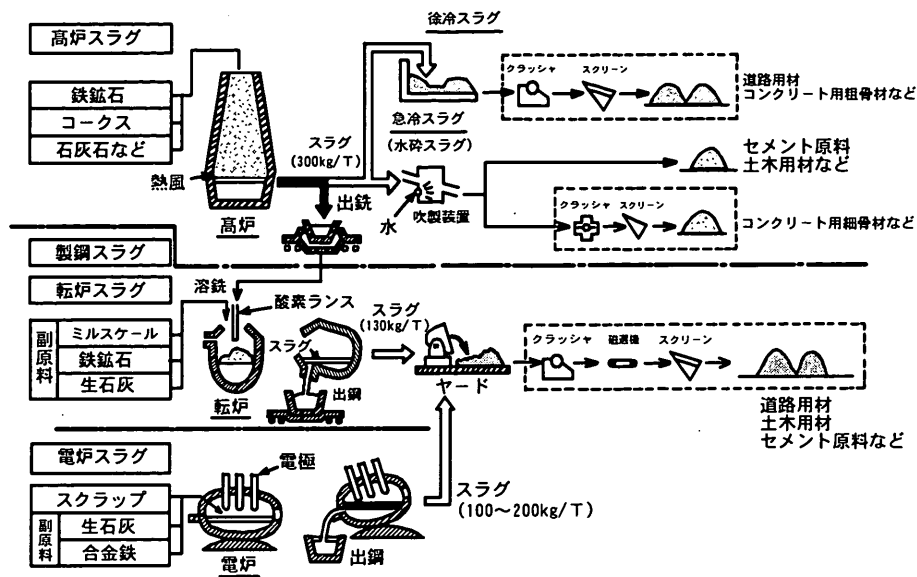


図-1 鉄鋼スラグの製造フロー

表-1 鉄鋼スラグの組成例

成分	高炉スラグ	山土	安山岩	普通ポルトランドセメント
SiO ₂	33.8	59.6	59.6	22.0
CaO	42.0	0.4	5.8	64.2
Al ₂ O ₃	14.4	22.0	17.3	5.5
T-Fe	0.3*	—	3.1*	3.0**
MgO	6.7	0.8	2.8	1.5
S	0.84	0.01	—	2.0***
MnO	0.3	0.1	0.2	—
TiO ₂	1.0	—	0.8	—

(注) *FeOとして **Fe₂O₃として ***SO₃として

ては不明な点が多かった。そこで、今回港湾地域のいくつかのサイトにおいて地盤調査を実施し、水砕スラグの経年変化について検討したので、その結果を報告する。

2. 水砕スラグの基本的性質

一般に水砕スラグと呼んでいるものは、高炉で鉄鉱石を原料に高温で熔融状態の銑鉄(溶銑)を製造する際に副生される高炉スラグのうち、高圧水を吹きつけて急冷して作られるものである。図-1²⁾には、鋼を生産する際に副生される各種の鉄鋼スラグの製造フローを示す。

高炉では、原料の鉄鉱石のほかに燃料の кокс と副原料の石灰石を投入し、ココスを燃焼させることによって発生した高温のCOガスで鉄鉱石を加熱・還元・溶解する。最終的に生成した銑鉄は炉底の湯溜に滴下する。高炉スラグはこの際に副生されるものであり、冷却方法の違いによって図-1に示すようにいくつかの種類に分けられるが、その化学組成はほぼ一定であり、表-1に

示すようなものである。これらのうち、SiO₂やAl₂O₃は鉄鉱石の脈石分やココスの灰分に由来し、CaOは石灰石に由来する。表-1に示した成分は比較的安定しているといわれているが、それは、高炉操業上の必要性から高炉スラグの成分が一定範囲におさまるように、鉄鉱石やココスの成分の変動にあわせて石灰石の量を調整しているためである。なお、溶銑と溶融している高炉スラグは、炉内ではどちらも流動性の良い液体であるが、比重(溶銑の比重約6.5、スラグの比重約2)が異なるため、この性質を利用して選別が行われる³⁾。

水砕スラグは、このようにして取り出された高炉スラグに高圧水を吹きつけて急冷することによって作られる。このとき、スラグの内部では急激な粘性の上昇がおき、原子配列に規則性の無い、ガラス構造を持った砂状のスラグができる。これが水砕スラグである。このため、化学的に不安定で、水と接触すると自身でCaOなどのアルカリ成分を溶出し、その刺激で水和物を生成して硬化する性質を持っている。この場合の固結にはアルカリ性の雰囲気が必要で、アルカリ性の雰囲気が維持できない場合には固結しないといわれている。このような性質を潜在水硬性と呼んでおり、ポルトランドセメントのように水と混ぜるだけで固結するものは自硬性と呼ぶことで区別されている⁴⁾。なお、高炉スラグを大気中でゆっくり冷やしたものは徐冷スラグと呼ばれており、化学的性質は水砕スラグとはかなり異なるものである⁵⁾。

水砕スラグのもうひとつの特徴は内部に気泡を含んでいることである。熔融状態のスラグは炉内で強い還元雰囲気化にあり、溶解・滞留している間に数十から数百ppmの窒素を溶解している。スラグが炉から出され酸化雰囲気

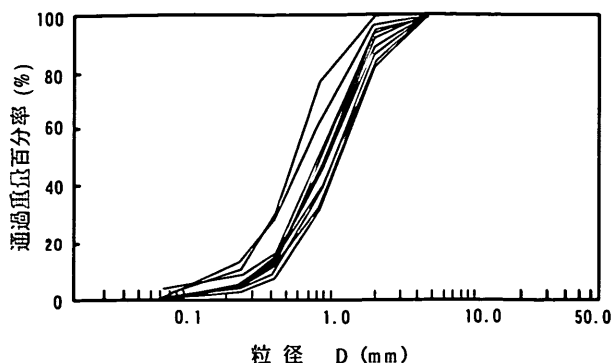


図-2 水砕スラグの粒度分布

気に触れると窒素は急激に放出され、発泡現象を呈する。この状態で急激に冷やされるため、内部に放出しきれないガスが溜まり、自らの圧力で膨張し気泡として残ることになる。水砕スラグの気泡内部のガスの成分は、約75%が H_2 であり、約25%が N_2 である。

高炉スラグは、溶銑1tあたり約300kg副生され、1993年には2200万トン生産されている。このうち、水砕スラグとして利用されるのが約3分の2で、残りが徐冷スラグとして用いられている²⁾。水砕スラグは、セメントの原料や骨材として利用されるほか、港湾では、土圧軽減用の裏込め材としての利用がしばしばなされている。

水砕スラグは工場から出荷されるときには砂状を呈しているが、その粒度分布はおおよそ図-2¹⁾に示すようなものである。また、水砕スラグは粒子内部に気泡を有しているが、内部で密閉された気泡が粒子の一部であると考えて土粒子密度を求めると、多少のばらつきはあるものの平均すると、 $2.7g/cm^3$ である²⁾。これまでの調査で、現場における乾燥単位体積重量を調べたところ、おおよそ $0.80 \sim 1.10t/m^3$ の範囲にあり、間隙比に換算すると $1.3 \sim 1.9$ 程度の範囲にばらついていることが知られている¹⁾。

潜在水硬性については室内での実験などから以下のことがわかっている。水砕スラグを早期に固結させるためには、アルカリの添加が不可欠であるが、水砕スラグ単味であつても次のような条件がそろつたと固結する¹⁾。

- 1) 水砕スラグ層に反応水が存在すること。
- 2) 水砕スラグ層にある程度の密度が保たれていること。
- 3) 水砕スラグ層の間隙水が静止した状態にあり、11程度のpHが維持されること。

1)の条件は一般に気乾状態の水砕スラグであつても満たされていると考えてよい。2)の条件は通常の施工条件では満たされているとしてよい。3)の条件については以下のように考えられる。すなわち、水砕スラグの透水係数は比較的高いため、間隙水が静止した状態にあるとは言い難いと考えられる。しかし、過去の調査結果では、残

表-2 土工用に用いた水砕スラグの固結状況

現場	環境	施工時期	施工後の材令	一軸圧縮強度 kgf/cm ²
HI	土中	1976.6	1ヶ月	2.5
			7ヶ月	6.5
OK1	埋立	1979.3	12ヶ月	3.0
			24ヶ月	4.3
				4.8
OK2	土中	1986.1	22ヶ月	3.5
	海中	1986.1	22ヶ月	1.5
	土中	1984.9	2年	0.9
	土中	1985.2	1.5年	22.2
HI	土中	1985.2	6ヶ月	2.3
			12ヶ月	8.6
OK3	土中	1976.2	5年	5.6
	土中	1979.3	2年	13.1
	土中	1979.12	14ヶ月	2.7
FU	埋立地の覆土	1984.9	3ヶ月	4.9
IB	土中	1981.6	6ヶ月	21.1
OK4	土中	1985.4	7ヶ月	5.6

留水位以下のところの水砕スラグは固結している例が多く、その一方で、地表面近くで、水砕スラグが常に空気と接触している場合には、空気中の CO_2 の影響で中和が起こりpHの上昇が押さえられるため固結は起きにくいようである。このように、3)の条件は、施工済みの水砕スラグすべてについて満たされている条件ではないようである。

水砕スラグの透水係数については、固結しない場合には、 $10^{-1}cm/sec$ 程度であるが、固結すると $10^{-3}cm/sec$ 程度になると報告されている¹⁾。

3. 水砕スラグの経時変化に関する既往の調査事例

2. で述べたように、水砕スラグは、環境条件によっては固結する材料であり、実用化にあたっては、経時的な特性の変化を検討しておく必要があつた。このため、いくつかの調査が既に行われてきている。ただし、そのような調査はほとんどが施工後2年程度までのものであり、長期間経過後の調査は十分には行われてきていない。

表-2は土工用に用いた水砕スラグの固結状況の調査結果を示したものである¹⁾。OK1現場では施工後2年間にわたり都合3回の試験が実施されており、時間の経過とともに強度が増加する傾向にあつたことが伺える。その一方で、OK2現場の1984年9月に施工された現場での2年後の一軸圧縮強度で $0.9kgf/cm^2$ と表-2に示した結果の中では特別に値の低いものがある。このケースは、地表近くから採取された試料のデータであつたために、

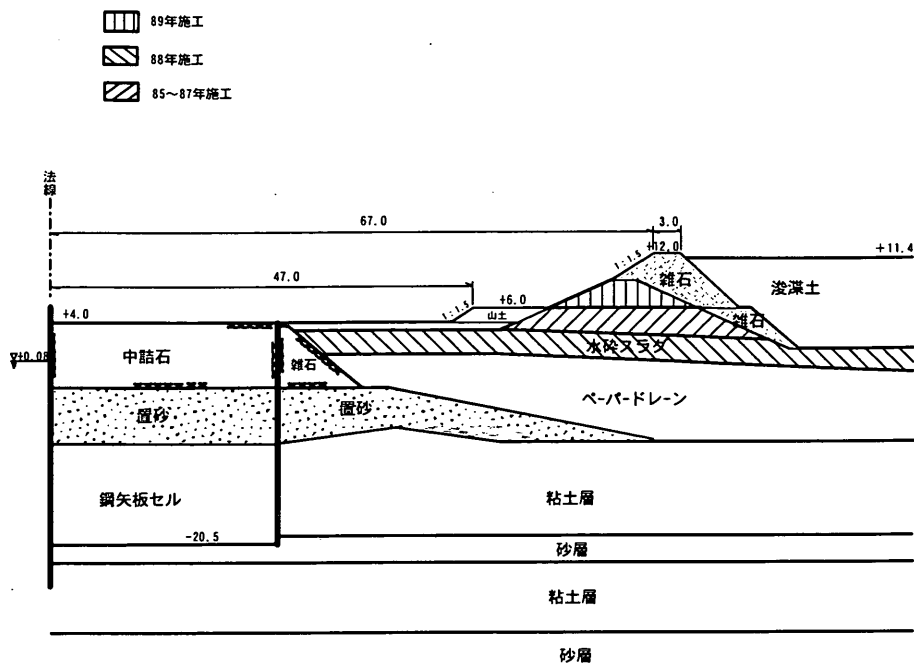


図-3 A 現場の標準断面

表-3 A 現場での調査項目

土粒子の密度試験
標準貫入試験
三軸圧縮試験
一軸圧縮試験
定水位三軸透水試験
間隙水の pH 試験
現地の水の pH 試験

固結があまり進行していなかったものと思われる。また、表-2の結果を見ると施工後の水砕スラグが固結することは明らかのようにあるが、発現する強度についてはばらつきが大きいことが懸念される。

佐藤らは室内において水砕スラグの経時変化を調べている。彼らはいくつかの方法で水砕スラグを締め固めて海水中で養生した。その結果、養生期間が長くなるにつれて固結し、せん断強度が増加することを示した。また、破壊包絡線から強度定数を内部摩擦角と粘着力に分けて求め、強度の増加は粘着力の増加によるものとし、内部摩擦角は変化しないと示した。また、固結につれて透水係数が低下し、1年間で約1オーダー透水係数が低下することが明らかとなった。締め固め方法によって多少異なるが、一年後の透水係数は $10^{-3} \sim 10^{-2} \text{cm/sec}$ の範囲であった。

西らは養生時のアルカリの影響が固結に及ぼす影響について室内で実験を行った。この結果によると弱アルカリ性の海水中で養生した水砕スラグはせん断強度が増加し透水係数が低下したが、真水中で養生したものでは、

せん断強度の増加が見られず透水係数の低下もなかった。

これらのことから、海水との接触のある環境の方が真水の場合よりも固結しやすいことがわかった。また、時間とともに透水係数が低下するのは固結する際にスラグの粒子間に水和物ができるためであると考えられる。

4. 現地調査の概要と結果

4.1 A 現場での調査

A 現場では、1985年から1989年にかけて3期7層に分けて水砕スラグを撒き出すことによって築堤が行われたところである。この現場の築堤断面の概略を図-3に示す。築堤の延長はほぼ900mである。この現場は、航路浚渫で出る土砂を処分するための沖合の埋立地である。当初計画では、+5mまで埋立てる予定であったが、土砂が予定より大量に発生したため、埋立地内に築堤して土砂処分容量を増やした。この堤は埋立地の軟弱地盤上の築堤であるため、軽量材料で築堤することが検討され、水砕スラグが築堤材料として選定された。築堤後、土砂処分が継続して行われ、今回の調査時点(1997年3月)においても埋立てが継続中であった。

この場所では、3箇所ボーリングを行い、表-3に示すような調査を行った。これらのボーリング箇所は護岸法線から約64mさがっており、それぞれ150mずつ離れている。図-4に3箇所の地層構成を示す。ここでBSとあるのは埋め戻し土であり、粘土混じりの砂礫地盤で

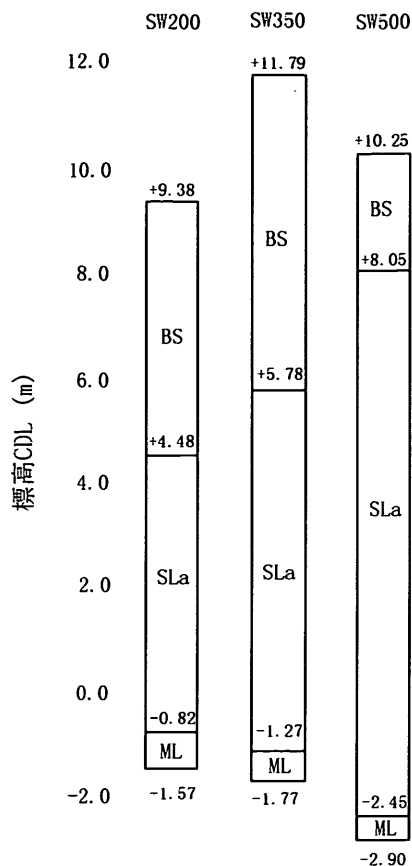


図-4 A 現場の地層構成

表-4 土粒子密度(A現場) (g/cm³)

コアの状態 求めたもの	木槌で 砕いた試料	乳鉢ですり つぶした試料
2.517	2.769	2.852

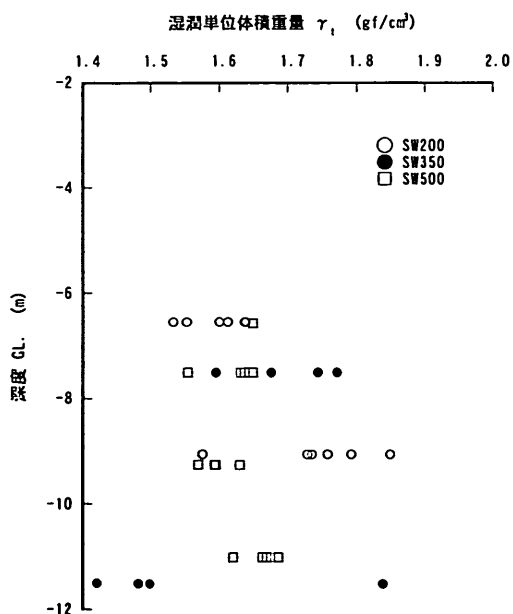


図-5 湿潤単位体積重量の深度分布(A現場)

ある。SLaと表記した部分が水砕スラグの層で、その下に、MLと表記したようにシルト層が続いている。この図を見てわかるように、地盤面の高さや水砕スラグの表れる位置がボーリング孔ごとに異なるが、これはボーリング孔と築堤の斜面の位置の関係が場所によって多少異なっていたことによる。なお、現場で採取したときの水砕スラグの色は暗青灰色であった。

今回の試料の一つについて土粒子密度を検討した。今回得られた水砕スラグは既に固結していたので、粒度分布を決定することは困難であった。同様に、砕かなくては測定できない土粒子密度についてもいくつかの値が出てくることになる。そこで、土粒子密度として、コアのままの見かけ比重と、木槌で砕いた試料と、乳鉢ですりつぶした試料について密度を測定した。これらの試験方法による結果の違いは、本来水砕スラグ中にある気泡と固結によって取り込まれて新しくできた閉塞された間隙のどこまでを粒子の体積の一部として考えるかの違いにあるとよい。結果は表-4に示すとおりである。これまでの調査の結果によれば新鮮な水砕スラグの平均的な土粒子密度は、2.7g/cm³と報告されており、また、粒子内に気泡をほとんど含まないと考えられる平均粒径12μm程度の高炉スラグ微粉末の粒子密度は2.86～2.94g/cm³程度である⁹⁾との調査結果がある。従って、木槌で砕いた試料の土粒子密度は新鮮な水砕スラグの平均的な密度に相当しており、乳鉢ですりつぶしたものは、気泡をあまり含まない密度に相当しているものと思われる。

図-5に湿潤単位体積重量の深度分布を示す。今回の調査では、地下水面の位置の調査をしていないが、ここに示す深度であれば、地下水面より低い位置にあったと考えてよい。図-5からすると、湿潤単位体積重量は1.4～1.9gf/cm³の範囲にあるが深度との相関性なしにばらついており、その程度も場所によって全く異なっている。通常的设计では、水中単位体積重量を0.7gf/cm³とすることからして、飽和単位体積重量を1.7gf/cm³と考えていることになる。今回の試料の湿潤単位体積重量は飽和単位体積重量よりは少し軽くなっている可能性もあり、一部飽和単位体積重量で1.7gf/cm³を越えていると考えるべきデータもあるが、平均的に見れば飽和単位体積重量で1.7gf/cm³を超えるような結果とはなっていないと考えて良いと思われる。

図-6に今回のサンプリングで得られた試料の湿潤単位体積重量と乾燥単位体積重量の関係を示す。図-6からわかるように、乾燥単位体積重量は0.9～1.4gf/cm³の範囲にあった。また、湿潤単位体積重量と乾燥単位体積重量には強い相関性が認められた。

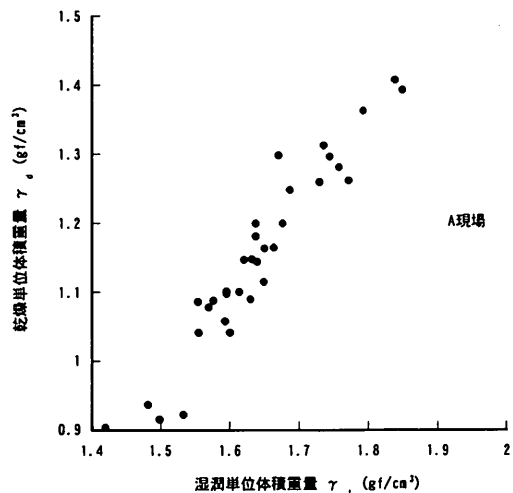


図-6 湿潤単位体積重量と乾燥単位体積重量の関係 (A現場)

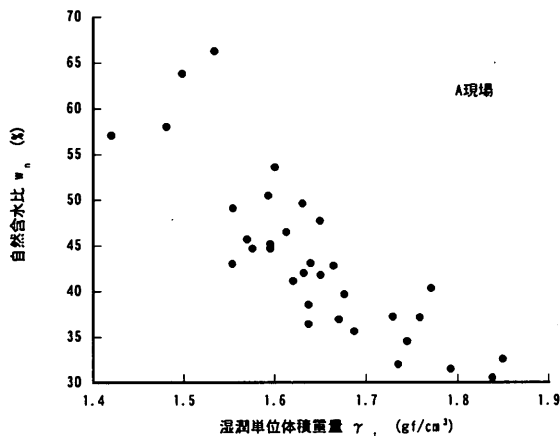


図-7 湿潤単位体積重量と自然含水比の関係 (A現場)

図-7に湿潤単位体積重量と含水比の関係を示す。水砕スラグの透水性を考えると、湿潤単位体積重量測定時までには多少水が抜けている可能性があるため、ここに示した含水比は自然含水比より多少低くなっていると考えられ、この点には注意が必要である。この結果を見ると、含水比は、およそ30～66%の範囲にあり、湿潤単位体積重量と緩い相関性を示していることがわかる。

以上の結果は、今回調査対象としている水砕スラグ層のもともとの材料は比較的均質であったと考えられるにもかかわらず出来上がった層としては均一ではないということを示している。他の調査結果などを見てみても、一般的に水砕スラグの層にはある程度のばらつきがあることは避けられないようである。また、いくつかの調査結果を比較する場合に、データ間にはそれなりのばらつきがあることを念頭に置く必要があることを意味している。

図-8に一軸圧縮強度の深度分布を示す。ここでは、3

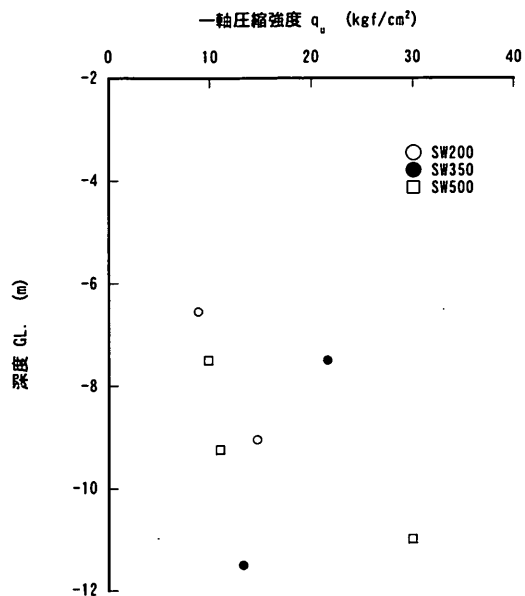


図-8 一軸圧縮強度の深度分布 (A現場)

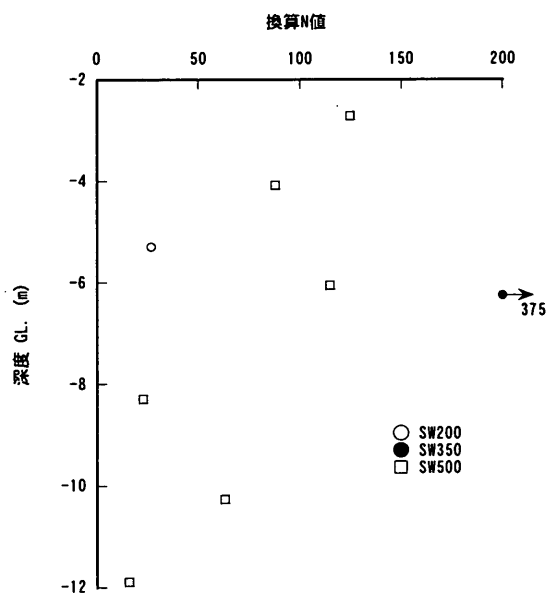


図-9 換算N値の深度分布 (A現場)

本のボーリング孔のデータをまとめて示している。データ数そのものがやや少ないがデータはばらついていない。しかし、強度は最低でも10kgf/cm²はあり、大きなものでは30kgf/cm²にまで達している。

図-9に標準貫入試験の結果得られたN値の深度分布を示している。ここでは、地盤が固かったため、打撃回数が50回に達しても貫入量が30cmに満たない場合があった。その場合には、次式に示すようにその時の貫入量から割り戻して30cm貫入するのに必要な打撃回数をもってN値として示した(換算N値)。

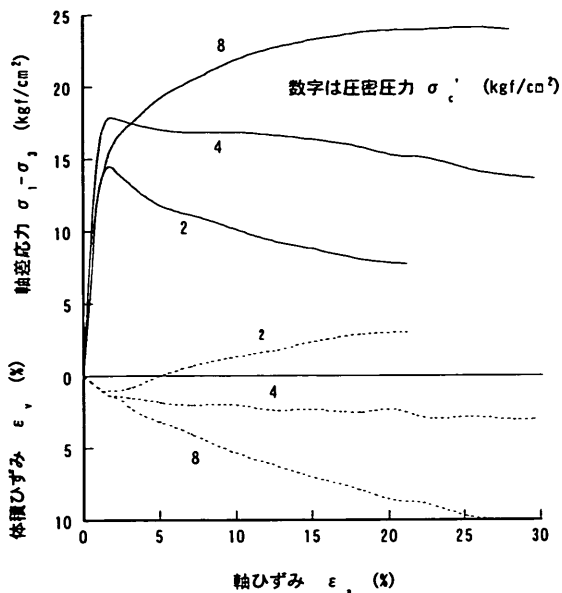


図-10 応力ひずみ関係の例

$$N = \frac{n}{d_n} \times 30 \quad (1)$$

ここに、

N : 換算 N 値

n : 標準貫入試験の打撃回数 (ここでは, 50)

d_n : n 回の打撃によるサンプラーの貫入量 (cm) である。

従って、図-9の中での N が 50 を越えているものは、換算 N 値を用いたものである。ボーリング孔によっては連続的にサンプリングを実施して三軸試験を中心に実験したところもあるので、多少データ数が少なくなっている。いずれにせよ一軸圧縮強度と同様 N 値には大きなばらつきがある。

三軸圧縮試験は、ほぼ同じ深度の試料に対して圧密圧

力を3種類変えて実施した。供試体は、サンプラーから得られた試料をトリミングした、 $\phi 5\text{cm}$ 、高さ 10cm のものを使用した。実験では、背圧を 2.0kgf/cm^2 とし、有効圧密圧力 σ'_c は、 $2.0, 4.0, 8.0\text{kgf/cm}^2$ とし等方状態で180分間圧密した。圧密終了後、軸圧縮速度 $0.2\%/min$ で、排水圧縮せん断を行った。一軸圧縮試験の結果から、この水砕スラグは固結がかなり進んでいることがわかったため、固結によるせん断特性と摩擦材料としてのせん断特性の両方が観察できるように、圧密圧力の範囲を広くとることにした。また、大きな固結強度を持つ場合の残留強度を把握するために、最大軸ひずみが25%程度になるまで圧縮することにした。

図-10に、ある深度の試料について実施した三軸試験の結果得られた応力ひずみ関係の例を示す。 $\sigma'_c = 2.0, 4.0\text{kgf/cm}^2$ の場合には、ひずみの小さいところで最大強度に達し、その後強度が低下しているのに対し、 $\sigma'_c = 8.0\text{kgf/cm}^2$ の場合には、最大強度が発現するには大きなひずみを要していることがわかる。圧密圧力の小さいところでのピーク強度の存在は固結が進んでいることによるもので、圧密圧力が大きくなると圧密時に粒子の再配列がおきて固結が壊れたり、粒子間の摩擦力によって発揮されるせん断強度が固結強度を上回ったりするために最大強度発現のために必要なひずみが大きくなるものと考えられる。また、残留強度を求めるために、軸圧縮量の大きなところまで圧縮しているが、図-10に見られるように必ずしも残留状態に達したところまでの圧縮はできていない。三軸試験による限りは完全な残留状態は期待できないので、本報告でいうところの残留強度は試験機的能力の許す範囲で残留状態に近い状態での強度を調べたことになっている。

図-11に三軸試験の結果得られた圧密圧力 σ'_c とピーク強度 q_p 、残留強度 q_{res} の関係を示す。これらの図の中で

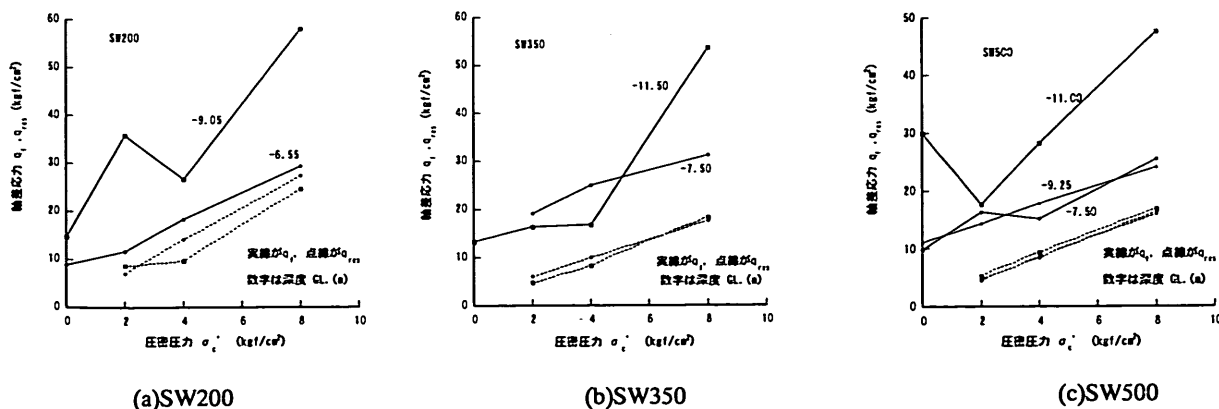


図-11 ピーク強度と残留強度(A現場)

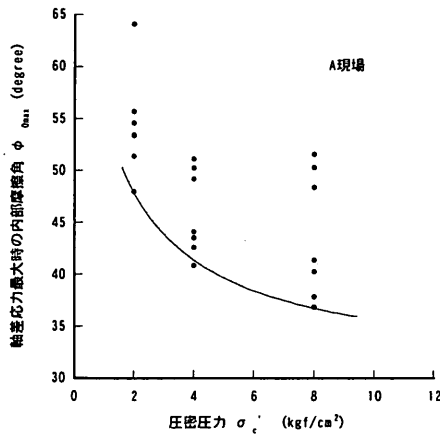


図-12 ピーク強度時の内部摩擦角 ϕ_{0max} (A現場)

表-5 A現場の水砕スラグの強度定数

強度定数	c_d (kgf/cm ²)	ϕ_d (°)
ピーク強度時	2.1	30.5
残留強度時	0.34	35.8

圧密圧力 σ_c' が 0 kgf/cm^2 のデータは一軸圧縮試験の結果によるものである。図-11を見るとピーク強度は大きくばらついているが、残留強度のばらつきは比較的小さくしかも圧密圧力に比例する形で増加する傾向にあることがわかる。これらの結果は、水砕スラグが原位置では固結していたが、圧縮せん断された後は、摩擦材料としてせん断力に抵抗していることを示している。

図-12に圧密圧力 σ_c' と主応力比 σ_1/σ_3 から単純に求めた内部摩擦角のうち軸差応力最大時のもの ϕ_{d0max} との関係を示す。ただし、主応力比から単純に求めた内部摩擦角 ϕ_{d0} は次式で表わされる。

$$\sin \phi_{d0} = \frac{\sigma_1/\sigma_3 - 1}{\sigma_1/\sigma_3 + 1} \quad (2)$$

この式から分かるように、便宜的に ϕ_{d0max} として示されているものは実は主応力比を変形させたものであることに注意されたい。

図-12によると ϕ_{d0max} は $40 \sim 65^\circ$ とその値が大きく、しかもばらつきが大きい結果となっている。また、圧密圧力の増加によって多少減少する傾向が見られる。ただし、 ϕ_{d0max} の大小は実際には主応力比の大小であるので、実際の現象として考えると固結の程度に応じてかなり大きな応力比が得られていることを意味している。図中には、この結果から考えられるもっとも安全側の強度を実線で示した。この線を式(3)で表わした場合の強度定数を、表-5にピーク強度時の定数として示す。

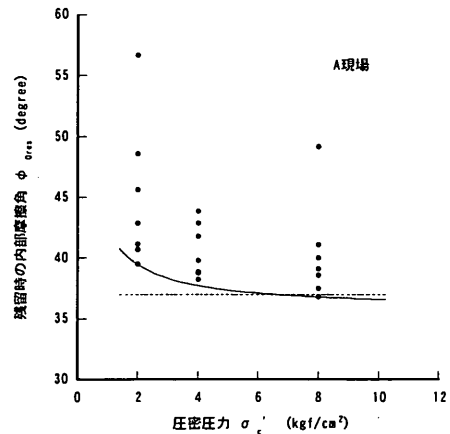


図-13 残留強度時の内部摩擦角 ϕ_{0res} (A現場)

$$\tau_{max} = c_{dmax} + \sigma' \tan \phi_{dmax} \quad (3)$$

図-13には、圧密圧力と残留時の内部摩擦角 ϕ_{d0res} の関係を示した。供試体を十分に変形させた時のデータとはなっていないものもあるため、データはやや上方にばらついていると考えられる。このことを考慮して安全側の数字を考えると圧密圧力が 8 kgf/cm^2 以下では、内部摩擦角 ϕ_{d0res} として 37° は期待できる。図中の点線は、 $c_{dres}=0$ 、 $\phi_{dres}=37^\circ$ とした場合の ϕ_{d0res} を示している。実線で示した関係を式(4)で表わした場合の強度定数は、表-5の残留強度時の定数として示したとおりである。このように c_{dres} は極めて小さく、破壊後の水砕スラグは摩擦材料として取扱うことができる。

$$\tau_{res} = c_{dres} + \sigma' \tan \phi_{dres} \quad (4)$$

なお、以上の結果は、破壊強度が固結強度によって求められているのか、摩擦強度によるものであるかについての区別をせずに示したものである。また、表-5に示した強度定数はこの材料に対しての一貫性のある定数とはなっていない。固結強度と摩擦強度を分離して求めようとする観点からは、ピーク強度と残留強度の両方を考慮することが必要であると考えられる。この点については、5. で詳述する。

次に透水試験の結果を示す。透水試験は定水位法で実施した。透水試験は一例しか実施していないが、その結果得られた透水係数 k_{15} は、 $1.3 \times 10^{-3} \text{ cm/sec}$ であった。この値は新鮮な状態での透水係数に比べると小さいが、既往の研究などで固結した場合の水砕スラグの透水係数として言われている値とほぼ同じオーダーであった。このことは固結して長期間経っても透水係数に大幅な変化はないことを示している。

透水試験時に通過水の pH についても試験を行った。この試験では蒸留後脱気した水を用いたが、あらかじめ

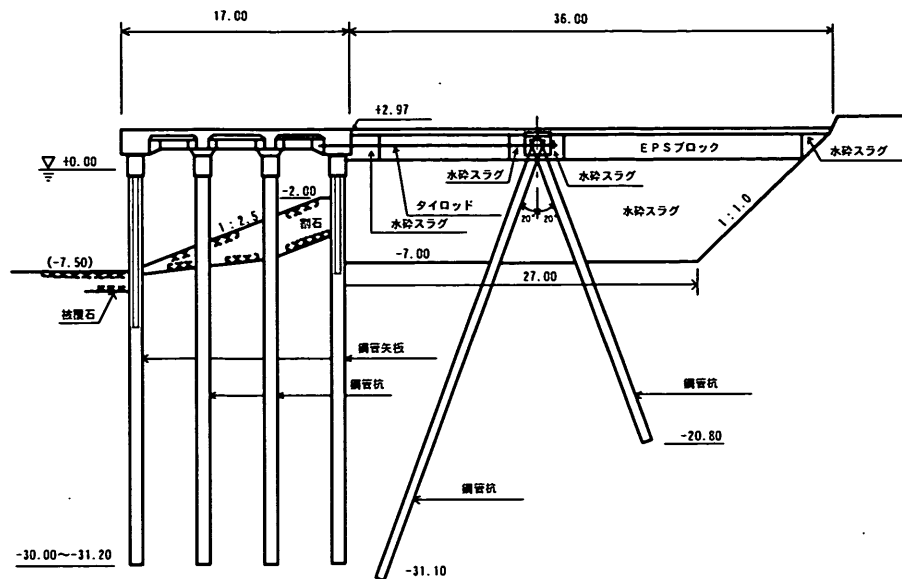


図-14 B 現場の標準断面

測定したこの水のpHは8.1であった。この水を供試体内を通過させ、供試体から流出する水のpHを測定したところ、pHは9.2とややアルカリ性になっていた。なお、地盤工学会基準JGS T 211 - 1990「土のpH試験方法」に準拠して、この透水試験に用いた供試体の削りくずから求めたpHは11.2であった。

現地においても水砕スラグの間隙水のpHがどのようなであったかを確認するために、現地水のpH試験も実施し

た。現地では、ボーリング孔内に水位管を設置して、まず、孔内の水位が落ち着いたら一度採水しpHをはかり、その後水位管内の水を2回くみ上げボーリング孔周辺にあったと考えられる水を強制的にしみ出させることによってそのpHを測定した。くみ上げた水の量は0.0157m³である。pHの測定はくみ上げ後水位が落ち着いてからとそのさらに4時間後の2回測定を行った。くみ上げ前のpHは8.6、くみ上げ後のpHはいずれも10.5であった。くみ上げ前のpHはボーリング作業による水の影響があったと考えられるが、くみ上げ後のpHはほぼ周辺の間隙水のpHを表わしていると考えられる。

以上の結果を総合して考えると水砕スラグのpHは長期間放置後もほぼpH11程度の状態にあるが、自由水として間隙中にある水は、比較的滞留していたとしても水砕スラグのpHよりも小さいこと、短期間のうちに水砕スラグの層を通過した間隙水のpHはさらに小さくなることがわかった。

4.2 B 現場での調査

B現場は、地震によって軽微な被害があったので、構造物の安全性を向上させるために、背後の土圧を軽減させる目的で1990年度に水砕スラグを施工した現場である。図-14にこの現場の構造物の断面の概略を示す。ここでのボーリング調査は1997年の2月に実施された。従って、施工後およそ6年経ったところでの調査となった。ボーリング箇所は岸壁法線から24.5m下がったところである。ボーリング箇所の地層構成を図-15に示す。天端は、2.66mであり、表面の舗装に続いて約2mの厚さ

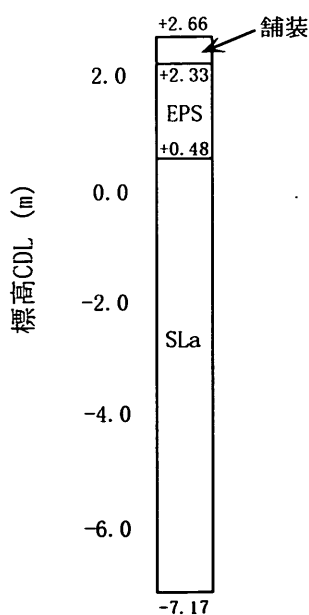


図-15 B 現場の地層構成

表-6 B現場での調査項目

土粒子の密度試験
標準貫入試験
三軸圧縮試験
一軸圧縮試験
透水試験
間隙水の pH 試験

表-7 土粒子密度 (B現場) (g/cm³)

コアの状態 求めたもの	木槌で 砕いた試料	乳鉢ですり つぶした試料
2.381	2.803	2.828

でEPSブロックが敷設されている。水砕スラグは残留水位面より下に施工されており、ボーリング深度は-9.83mまで達しているが少なくともこの深さまでは水砕スラグの層が続いていた。図-14に示した断面からするとほぼこの深さまで水砕スラグで置き換えられていることになっている。ボーリング時の観察によると水砕スラグは全体的に固結しており、色は緑灰色から暗青灰色といったところであった。また、所々に岩のように硬質になっているところがあると報告されている。

この現場でのボーリングは1孔であり、表-6に示すような試験を実施した。

土粒子の密度試験については4.1と同様の試験を実施し、表-7のような結果を得た。表-4と比べると結果には多少の差はあるが、ばらつきの範囲であると考えられる。

図-16に湿潤単位体積重量の深度分布を示す。湿潤単

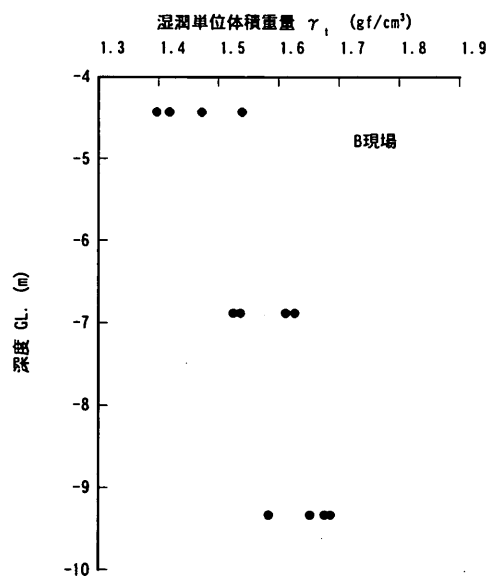


図-16 湿潤単位体積重量の深度分布 (B現場)

位体積重量は、深度方向にわずかに増加しているようにみえる。B現場の湿潤単位体積重量は、1.4~1.7gf/cm³の範囲にあり、A現場よりは少し小さめであった。

湿潤単位体積重量と乾燥単位体積重量の関係を図-17に示す。この関係に強い相関性があることについては図-6の結果と同様である。なお、乾燥単位体積重量の範囲は、0.9~1.2gf/cm³の範囲にあった。図-6と図-17を見比べるとわかるが、これらの図に示されているγ_wとγ_dの関係は両現場でほぼ同じ関係にある。

図-18に湿潤単位体積重量と含水比の関係を示す。含水比は40~50%の範囲にあった。この関係はばらつきが大きくあまり相関性が無いようにみえる。図-7と比べると特に湿潤単位体積重量の小さいところの含水比が小さめとなっている。

図-19に一軸圧縮強度の深度分布を示す。この試験では一軸圧縮試験は1深度あたり1試料しか実施していない。そのため、データ数が少ないのではっきりしたことは言いにくいだが、ここでの水砕スラグの一軸圧縮強度は7kgf/cm²を上回っているようである。

図-20に標準貫入試験の結果得られたN値の深度分布を示す。ここでもN値として換算N値を用いている。データ数が少ないのではっきりしたことは言いにくいだが、やはりばらつきは相当にあるようである。

三軸圧縮試験についても、A現場と同様の方法で実験を実施した。この現場の三軸試験でも、水砕スラグは固結がかなり進んでおり、固結によるせん断特性と摩擦材料としてのせん断特性の両方が観察された。図-21に三軸試験の結果得られた圧密圧力σ_c'とピーク強度、残留強度の関係を示す。圧密圧力が0kgf/cm²というのは一軸圧

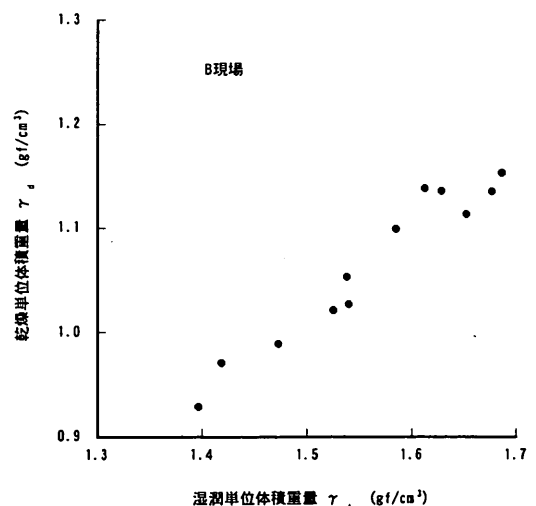


図-17 湿潤単位体積重量と乾燥単位体積重量の関係 (B現場)

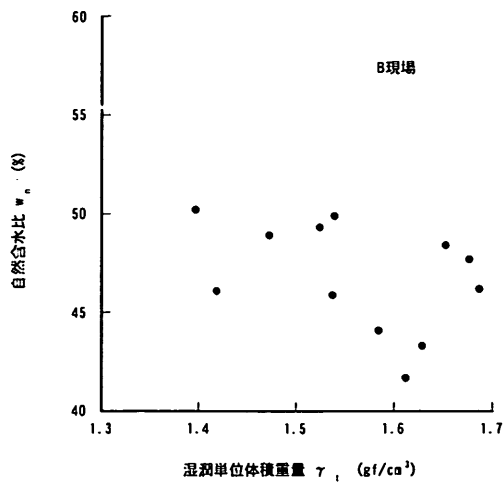


図-18 湿潤単位体積重量と自然含水比の関係(B現場)

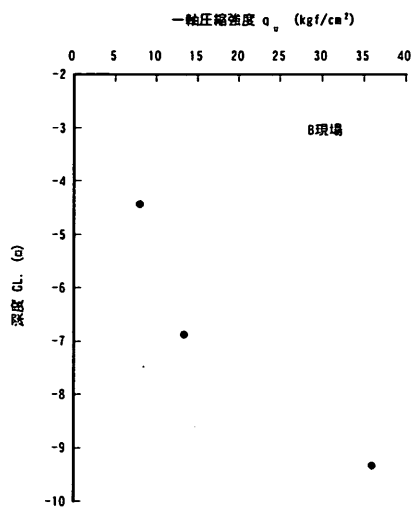


図-19 一軸圧縮強度の深度分布(B現場)

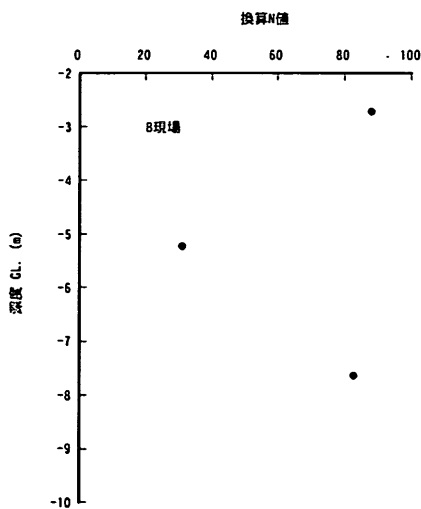


図-20 換算N値の深度分布(B現場)

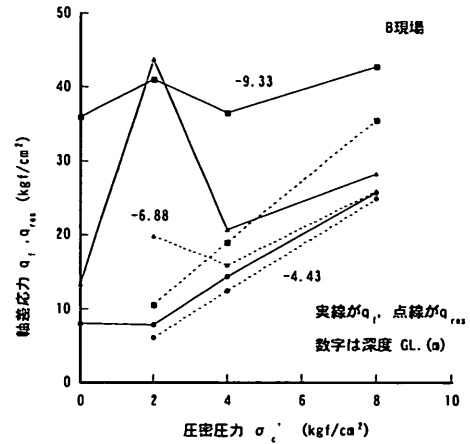


図-21 ピーク強度と残留強度(B現場)

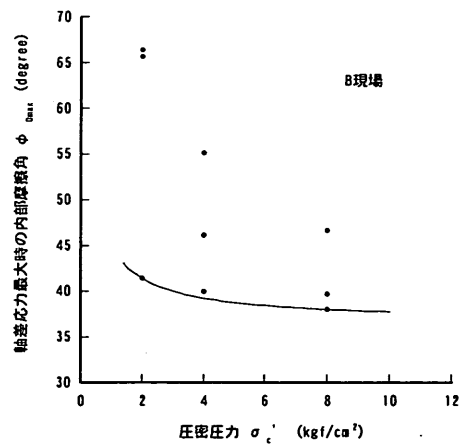


図-22 ピーク強度時の内部摩擦角 ϕ_{0max} (B現場)

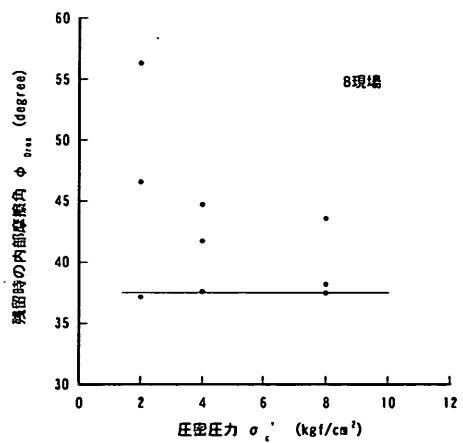


図-23 残留強度時の内部摩擦角 ϕ_{0res} (B現場)

表-8 B現場の水砕スラグの強度定数

強度定数	$c_d(\text{kgf/cm}^2)$	$\phi_d(^{\circ})$
ピーク強度時	0.47	36.7
残留強度時	0	37.5

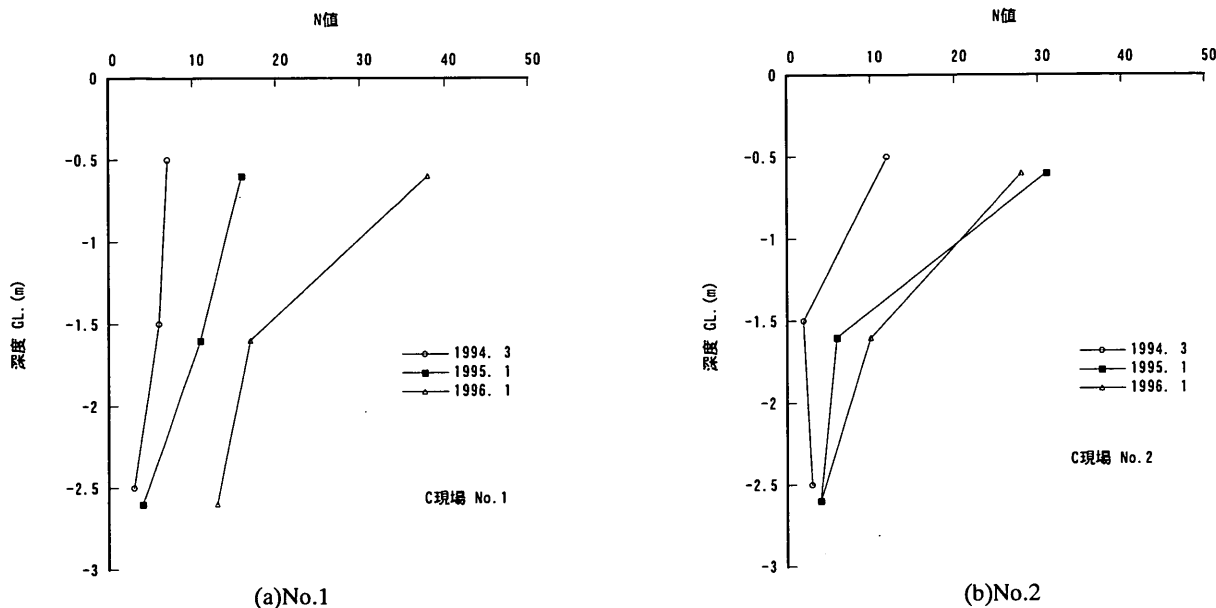


図-24 N値の変化(C現場)

縮試験の結果である。データはいずれもばらついているが、残留強度のばらつきは比較的小さくなっている。この試料の場合にも、原位置では固結しており、せん断の初期には固結した材料としての挙動を示すが、せん断が進むと固結が破壊され、摩擦性材料に変化するといえる。

図-22に ϕ_{d0max} と圧密圧力 σ'_c の関係を、図-23に ϕ_{d0res} と圧密圧力 σ'_c の関係を示す。図-22はピーク強度に対するもので、図-23は残留強度に対するものである。いずれの場合もデータの上方向へのばらつきは大きなものがあるが、最も低い強度を示したものについて式(3)と式(4)に従って取りまとめた場合の強度定数は表-8のようになる。この場合にはピーク強度の粘着項 c_{dmax} があまりにも小さいように見えるが、これは、深度-4.43mの試料の試験結果が圧密圧力4.0kgf/cm²程度で正規圧密状態となり、圧密圧力に応じて強度が増加する傾向を示したためである。すなわち、今回実施したすべての三軸圧縮試験の結果の中でもっとも小さい圧縮強度であっても5kgf/cm²は確保されており、ピーク強度は十分に大きなものであったが、ここで示したような整理法ではそのことが適切に評価できていないものと考えられる。残留強度については c_{dres} は0とみなすことができ、 ϕ_{d0res} の拘束圧依存性は考慮する必要が無い結果となった。すなわち、 $\phi_{d0res} \cong \phi_{dres}$ であるが、この値はA現場の結果とほぼ同じであった。

次に透水試験の結果を示す。透水試験は、定水位法で実施した。透水試験は一例しか実施していないが、その結果得られた透水係数 k_{15} は、 1.4×10^{-3} cm/secであった。この値はA現場の調査結果とほぼ同じ値であった。

この試験でも透水試験時に通過水のpHについても試験を行った。透水試験に用いた水は蒸留後脱気したもので作成時にはpHは8.0であった。この水を通水した後で供試体から流出する水のpHは10.8であった。なお、この透水試験に用いた供試体の削りくずから求めたpHは11.4であった。このように間隙水や水砕スラグのpHの傾向はA現場の場合とほぼ同じであった。

4.3 C現場での調査

C現場は、空港内の地下道改良工事に伴って誘導路の路盤材として水砕スラグを用いた現場である。施工は1993年12月に実施され、施工の3ヶ月後と1995年1月と1996年1月の3回追跡調査が実施された。この現場は路盤としての施工でもあったため、これまでのサイトと異なり転圧を施してある。工事の記録によると搬入時の水砕スラグの湿潤単位体積重量は、1.024gf/cm³で、施工後の単位体積重量を現場密度試験で調べたところ、湿潤単位体積重量は1.20~1.25gf/cm³となっていた。また、施工直後の転圧面でのCBR試験結果は、23%と27%であった。このサイトは陸上部であり、調査対象とした水砕スラグの大半は地下水位より上方にあった。このサイトでは、主に標準貫入試験と、現場CBR試験、密度試験が行われた。なお、現場CBR試験と密度試験はボーリング孔とは別にピットを掘削して実施したものである。

図-24にそれぞれ近傍で3回ボーリング調査を実施した結果得られたN値の深度分布の変化について示す。既に述べてきているように、水砕スラグが固結する場合の固結の程度にはポイントごとのばらつきがかなり大きい

表-9 C現場の密度試験の結果

	湿潤単位体積重量 γ_t (gf/cm ³)		乾燥単位体積重量 γ_d (gf/cm ³)		自然含水比 w_n (%)		試験方法
3ヶ月後	1.351	1.345	1.193	1.184	13.6	13.6	砂置換法(現場)
1年後	1.371	1.371	1.186	1.163	15.6	17.9	ノギス法(室内)
2年後	1.464	1.491	1.340	1.270	9.2	17.4	ノギス法(室内)

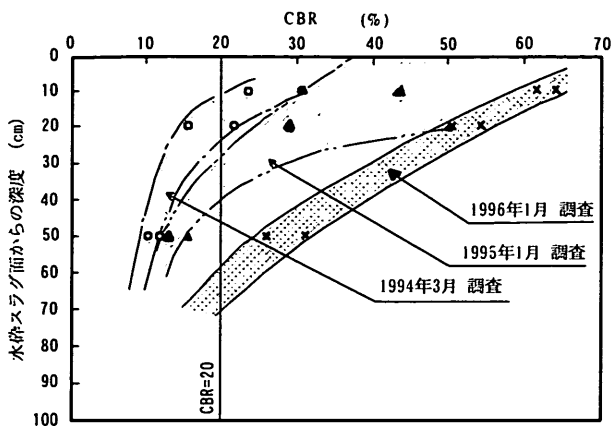


図-25 CBR 値の変化

ようであるので近傍でのボーリング調査結果がそのまま同じ材料の変化とはいいいにくいところがあるが、これらの箇所では、表層に近いほど時間とともにN値が増加する程度が大きいようである。

表-9に密度試験の結果を示す。この調査を行った深度は地下水面よりもかなり上のほうにあったため、A現場やB現場の調査結果に比べ含水比がかなり小さくなっているのが特徴である。

また、現場CBRについての追跡調査の結果は、図-25に示すとおりであり、時間の変化とともにCBR値が大きくなっている。N値の増加とあわせて考えるとこの箇所の水碎スラグの強度が増加していることを物語っているものと考えられる。

ただし、ピットでのサンプリング時の様子は以下のものであった。すなわち、2年後の調査の際に水碎スラグのコアをサンプリングするために、サンプラーを水碎スラグの層に押込もうとした場合の抵抗はそれまでの抵抗に比べてかなり大きく、困難をきたした。しかしそれをサンプラーから取り出そうとしたところバラバラに崩れてしまい、いわゆる固結した状態にはなっていなかった。また、ボーリングの結果からは、地下水面より下の水碎スラグの色は暗緑青灰色と、A現場やB現場の調査の場合と同じような色をしていたようであるが、地下水面より上では褐灰色となっていた。これらのことからすると

水碎スラグはわずかな水分で固結する性質があるというものの、十分な固結を期待するならばCO₂からの遮断といった意味も含めて地下水面よりは下方にある場合のみ十分な固結を期待できるものと考えられる。ただし、固結が不十分であっても剛性の増加などは期待できるようである。

5. 考察

5.1 固結強度と摩擦強度の分離

4.1と4.2に示したように、A現場とB現場で採取した水碎スラグは固結していた。ある程度以上の固結強度を持つ供試体では、排水三軸圧縮試験を実施すると軸差応力はせん断の途中で最大値を示し、その後ある一定の軸差応力に漸近する様子が見られた。

図-26に固結していたと考えられる水碎スラグの応力ひずみ関係のイメージ図を示す。図-26に示すような応力ひずみ曲線は過圧密な地盤材料の排水三軸圧縮試験を実施した場合にも得られる。これを応力空間で示すと図-27に示すようになっている。つまり、ピーク強度を示す破壊線と残留強度を示す破壊線があり、強度定数にいうところのcの成分が大きくなるほどピーク強度と残留強度に開きが出てくることになる。そこで、ピーク強度から残留強度への強度の低下率が固結の程度の指標になっていると考えられる。ここで強度低下率 I_B として以下の式のような定義をすることにする。

$$I_B = \frac{(q_{\max} - q_{res})}{q_{\max}} \quad (5)$$

ここに、

I_B : 強度低下率

q_{\max} : 最大軸差応力

q_{res} : 残留時の軸差応力

である。

このような定義の強度低下率 I_B は、Bishop¹⁰⁾が脆性の程度を表わす指標として用いたものであるが、ここでは、固結の程度の指標としてこのようなものが利用できると

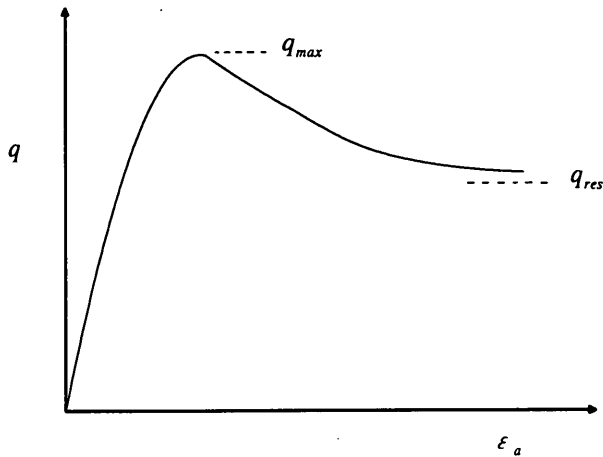


図-26 脆性的な応力ひずみ関係

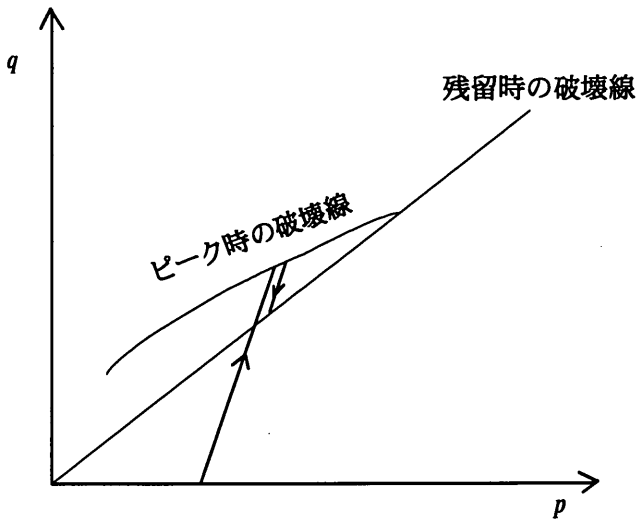


図-27 脆性的な土の応力経路

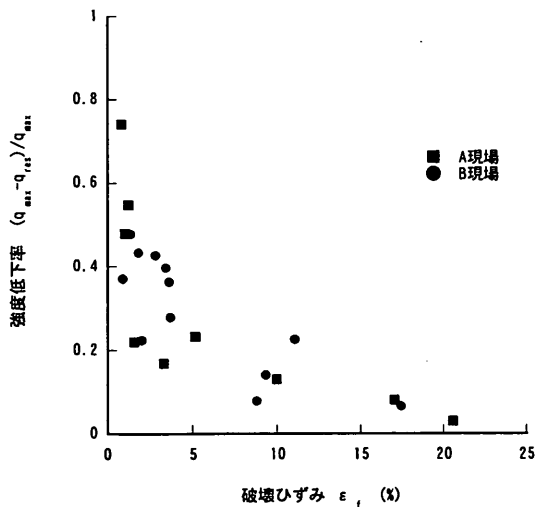


図-28 強度低下率と破壊ひずみ

考えた。

図-28に三軸圧縮試験で得られた破壊ひずみ ϵ_f と強度低下率 I_b について示す。ただし、三軸試験では最大軸ひずみ量には実験上の制約があり、また、ひずみが大きくなってくると三軸試験結果の信頼性も落ちてくるので、ここで用いた q_{res} は必ずしもBishopの定義する残留強度と同じものにはなっておらず、軸ひずみがおよそ25%程度に達したところでの軸差応力を残留時の軸差応力として用いていることに注意する必要がある。図-28を見ると破壊ひずみが小さい場合には、強度低下率が著しく大きいですが、破壊ひずみが大きい場合には、強度低下率は0.2以下と非常に小さくなっていることがわかる。このように、破壊ひずみの大小と固結による応力ひずみ関係の脆性化とはある関係がある。特に、破壊ひずみが5%より小さくなると破壊ひずみの変化に対して強度低下率の変化の程度が大きくなっていることがわかる。

このような現象が生じた理由としては、せん断の初期には固結によるせん断抵抗と摩擦性材料としてのせん断抵抗の両方がせん断抵抗として働いているが、せん断終期には固結によるせん断抵抗はなくなり摩擦によるせん断抵抗のみが働いていたと考えるのが一般的であると思われる。

Mohr - Coulomb の破壊基準に従うとした場合の土の強度定数は粘着力 c と内部摩擦角 ϕ の二つで表わされ、 ϕ はせん断面に作用する垂直応力に比例するせん断抵抗の大きさを表現する定数であり、 c はそれ以外のせん断抵抗を表現する定数であると理解されていると思われる。実際には、 c と ϕ の決定法についてはいろいろなものがあり、その決定法ごとに c と ϕ の持つ意味合いは微妙に異なっている。一般的には、 c と ϕ は、ある範囲の応力レベルで得られる破壊包絡線を直線近似したときの直線の傾きに関係するのが ϕ であり、 τ 軸との切片が c とされる。一般に、 ϕ は拘束圧に依存することが知られており、たとえばれきや碎石などの材料では粒子破碎の影響により ϕ が拘束圧の増加とともに著しく減少する。このような効果を簡便に考慮するために、捨石マウンドの支持力推定に用いる捨石の強度定数は捨石そのものは完全な摩擦材料であると考えられるにもかかわらず、 c と ϕ の両方の定数を用いて強度を表現している¹¹⁾。

ところで、今回の報告で取扱ったような固結した水砕スラグでは、粒子間のセメンテーションによって c が発揮していると考えられ、 c の持つイメージが比較的具体性を持っていると思われる。

さて、ここで、粒子間にセメンテーションが生じている場合について、せん断中の応力ひずみ曲線とせん断強

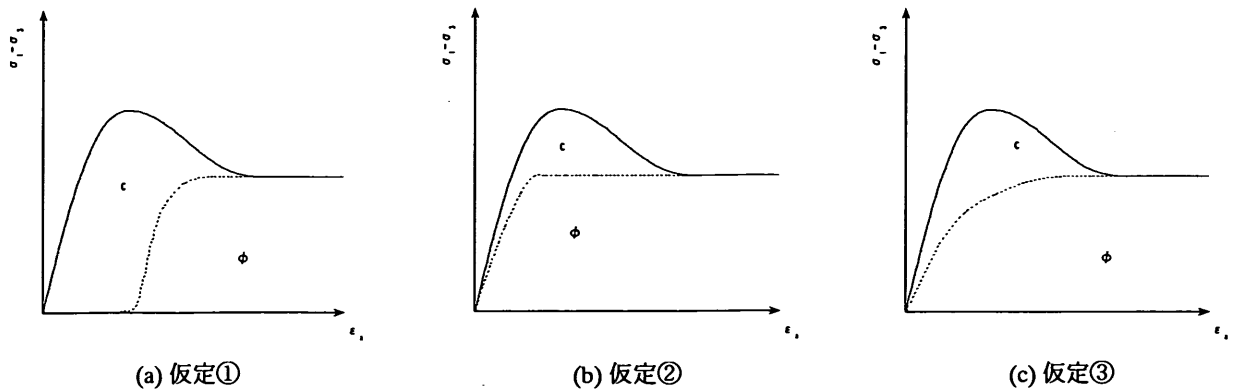


図-29 cとφの強度に及ぼす寄与の程度

度に及ぼすcとφの寄与度について考えてみる。セメンテーションが生じている粒子間のセメンテーションは粒子間の相対移動が極めて小さい状態で切れるものと考えられる。φは単なる粒子間の摩擦抵抗だけではなく、粒子のかみ合わせによっても変化する定数であると考えてよいので、φの成分がせん断抵抗として寄与するには粒子間のそれなりの相対移動を必要とすると考えてよい。このように考えると、せん断初期にはせん断抵抗に寄与している成分としてはcの項が非常に大きく、φの項はほとんど寄与していないものと考えられる。この相対関係はcとφの相対的な大きさ、拘束圧などに依存すると考えられ、1本の三軸試験の結果からだけでは簡単には分離できないものと考えられる。

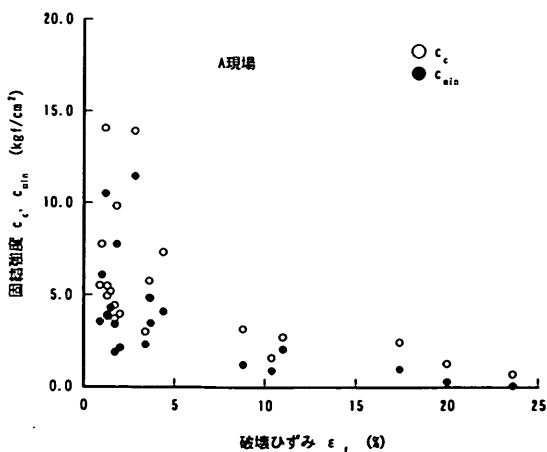
今回の試験では、供試体ごとのばらつきが大きく、それぞれの試験で用いた試料はみな違うものと考えなくてはならなかったため、1本の三軸試験の結果からcとφを分離することが求められるが、何らかの仮定をしない限り

り分離はできない。そこで、以下の3つの仮定について検討してみる。

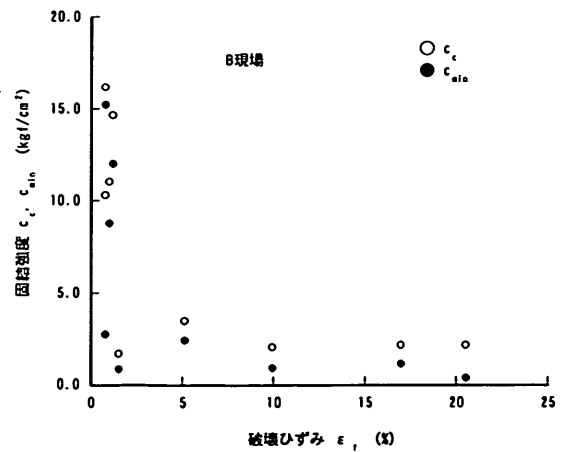
- ①最大軸差応力が発揮しているときにはせん断抵抗に及ぼすφの寄与が全くない。(図-29(a))
- ②最大軸差応力が発揮しているときにはせん断抵抗に及ぼすφが残留時と同じだけ寄与している。(図-29(b))
- ③cの有無に関わらずφの寄与による応力ひずみ関係はある一定の曲線で近似できる(例えば双曲線近似¹²⁾)。したがって、得られた応力ひずみ曲線上の軸差応力と近似曲線から得られる軸差応力の差はcの成分によるものであるとする。(図-29(c))

以上のような仮定をした場合、得られるcは①>③>②となることは自明であろう。①と②は一般的に考えられるほとんど両極端の考え方であると思われる。

ところで、③の仮定を今回どのように適用したかについて少し説明する。応力ひずみ曲線の双曲線近似を用い



(a) A現場



(b) B現場

図-30 固結強度と破壊ひずみの関係

る場合には、せん断初期の弾性係数とせん断終期の強度が必要となるが、固結していない場合の初期弾性係数は求められなかったため、ここでは、今回の実験で得られた初期弾性係数を用いた。また、せん断終期の強度としては残留強度相当の強度を用いた。このようにして決定したモデルの応力ひずみ曲線と実際に得られた応力ひずみ曲線を比較して c を決定した。

このように、③の仮定はやや複雑であるが、このような仮定の信頼性が①や②の仮定に比べてはるかに高いとは言えないところがある。いずれにせよ、①のような仮定は、今回用いた材料では到底考えることができないと思われるので、ここでは、②と③の仮定の違いについて検討してみる。なお、②の仮定は固結強度のほぼ最小値が得られる仮定であるので、ここではこの仮定によって求められた固結強度を c_{min} と表わすことにする。また、③の仮定によって求められた固結強度は c_c と表わすことにする。

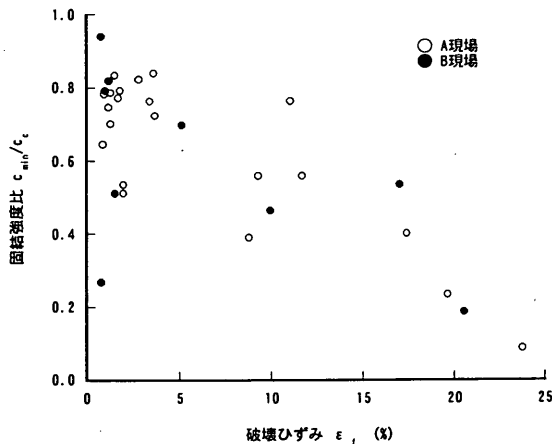


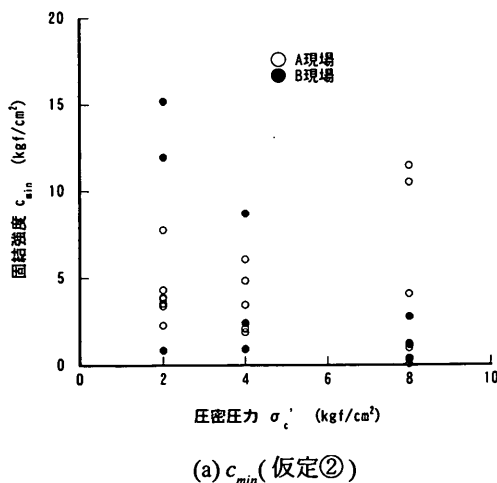
図-31 固結強度比と破壊ひずみの関係

図-30にA現場とB現場に分けて、 c_{min} と c_c と破壊ひずみ ϵ_f の関係を示す。いずれの現場の結果についても c_{min} と c_c の傾向についてあまり違いがないことがわかる。図-31には二つの推定された固結強度の比 c_{min}/c_c と破壊ひずみの関係を示す。破壊ひずみが小さい場合は c_{min}/c_c のばらつきが大きいのが全体的には c_{min}/c_c は大きな値を示している。しかし、破壊ひずみが大きくなると c_{min}/c_c が小さくなる傾向にあることがわかる。これは、破壊ひずみが大きい場合には、図-28にも示したように強度低下率が小さく、残留強度とピーク強度がほとんど同じであるために、得られた応力ひずみ曲線の形状に関係なく c_{min} が非常に小さく求められてしまうためであると考えられる。

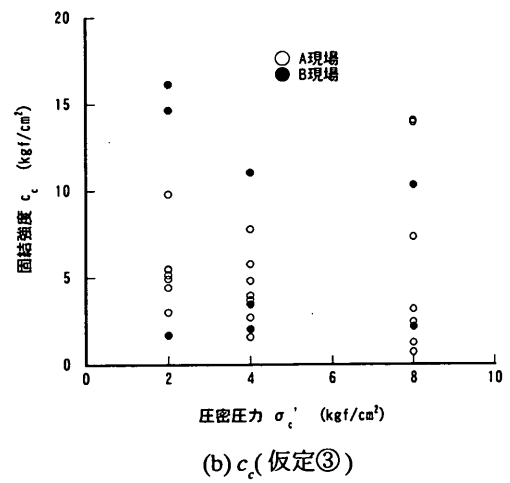
それぞれの推定された固結強度と圧密圧力の関係を図-32に示す。 c_{min} も c_c も圧密圧力との関係では大きくばらつく傾向にあり、個々の供試体を持っていた固結強度はそれぞれ異なっていたことが伺える。ところで、圧密圧力が大きい場合の固結強度については、圧密の過程やピーク強度に達するまでのせん断の過程で固結強度を失ってしまうことが考えられるので、実際には固結強度を有していたとしても求められなかったものがあると考えられる。このような固結強度の過小評価は c_{min} について著しいと考えられる。

以上のように、 c_{min} として求めた固結強度は場合によっては過小評価をしている可能性があるが、 c_{min} が固結強度を適切に評価していると考えられるものだけを取り出して、固結強度として評価できれば一応の信頼性は保たれると考えられる。また、 c_{min} と ϕ_{res} の組み合わせを固結した水砕スラグの強度定数だと考えれば、この材料の強度特性を統一的に解釈することが可能となる。

そこで、以降では、破壊ひずみが10%より小さい場合



(a) c_{min} (仮定②)



(b) c_c (仮定③)

図-32 固結強度と圧密圧力の関係

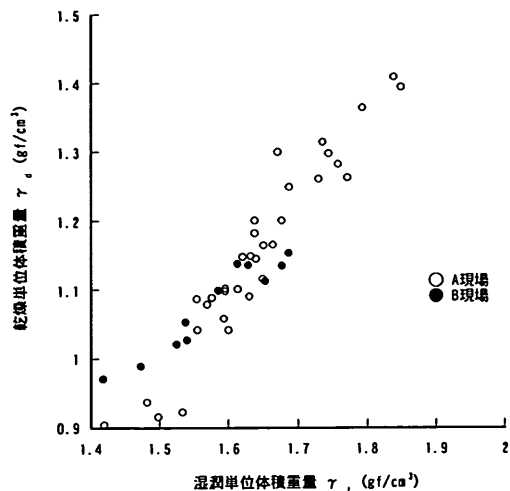


図-33 湿潤単位体積重量と乾燥単位体積重量の関係

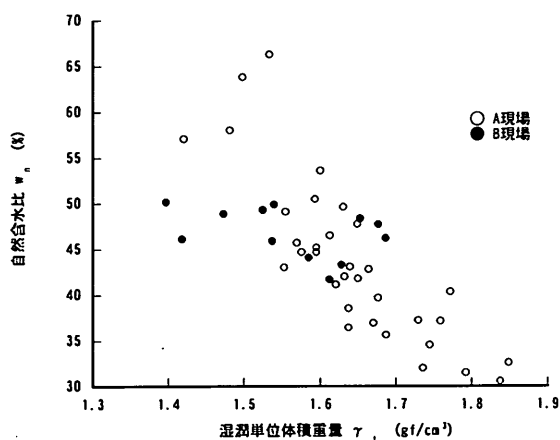


図-34 湿潤単位体積重量と自然含水比の関係

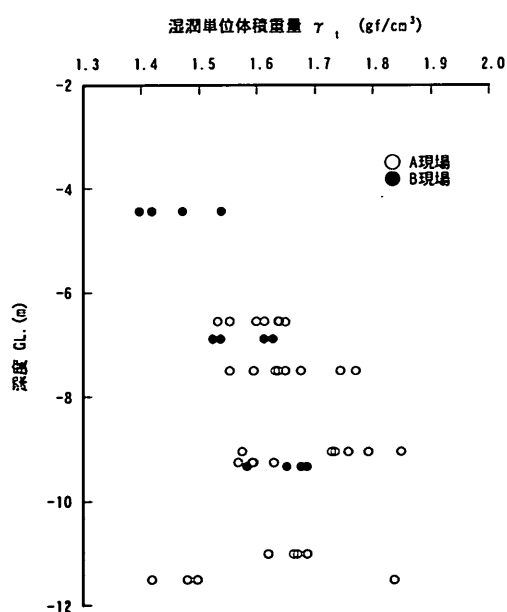


図-35 湿潤単位体積重量の深度分布

の c_{min} だけが固結した水砕スラグにおける強度を表現できているものとして議論を進めていくことにする。

5.2 固結した水砕スラグの特性

ここでは、水砕スラグが固結していたと考えられる A と B の現場の調査結果についてまとめて検討する。

図-33に湿潤単位体積重量 γ_1 と乾燥単位体積重量 γ_d の関係を示す。各現場においてこれらの二つの量は極めて強い相関を示していたが、図-33からもわかるように二つの現場の間でもその関係はほぼ等しいことがわかる。

図-34に湿潤単位体積重量 γ_1 と自然含水比 w_n の関係を示す。各現場においてこれらの二つの量は γ_1 と γ_d の関係に比べるとややゆるい関係にあったが、図-34からもわかるように B 現場の γ_1 が小さいところで w_n がやや小さくなる傾向が見られた。確かなことはわからないが w_n が小さめに出ているところはやや不飽和になっていたことが考えられる。

図-35に湿潤単位体積重量 γ_1 の深度分布を示す。データはばらついているが、全体的には深度の増加とともに、 γ_1 が増加する傾向にあることが伺える。

次に、強度について検討する。一軸圧縮強度と 5.1 で検討した固結強度にはどのような関係があるだろうか。今回用いた固結した水砕スラグの場合には、透水係数が比較的大きいことから一軸圧縮試験時には負の間隙水圧は残っていなかったと考えて良いと思われる。その場合には、一軸圧縮試験で得られた圧縮強度は固結強度によるものであると考えられる。ただし、一軸圧縮試験の結果で 5.1 で求めた c_{min} に対応するものは $q_u/2$ であるとした。このような観点から、 c_{min} と $q_u/2$ に関して乾燥単位体積重量 γ_d との関係を示したのが図-36である。いずれの現場のデータもばらつきは大きいですが、全体的な傾向としては γ_d が増加するに従って c_{min} も $q_u/2$ も増加する傾向にある。また、 c_{min} と $q_u/2$ の値について比較すると、やや c_{min} の方が $q_u/2$ よりも小さめではあるが、ほぼ同じような値を示している。そこで、以降の議論では c_{min} と $q_u/2$ がほぼ同等のものであるとして議論を進めていくことにする。

図-37に c_{min} と $q_u/2$ の深度分布を示す。既に見てきているように、これらの強度は十分に大きいものであるが、強度は大変ばらついている。ただし、非常にゆるい関係ではあるが、深度とともに強度が増加する傾向はわずかながらあるようである。図-35で見たように γ_1 は深度の増加にしたがって増える傾向にあったが、 γ_1 と c_{min} や $q_u/2$ との間にはゆるい関係しか見出せなかったために、このような結果が示されたものと考えられる。

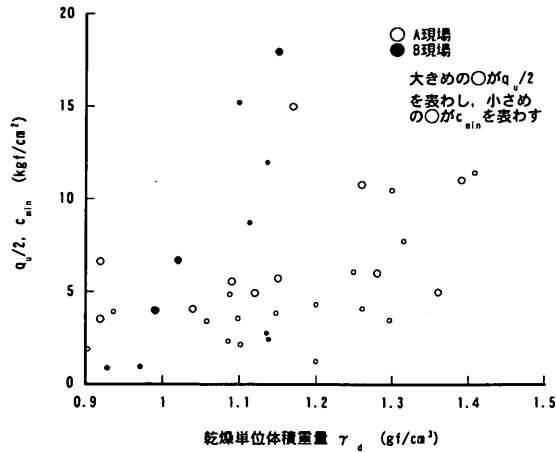


図-36 固結強度と乾燥単位体積重量の関係

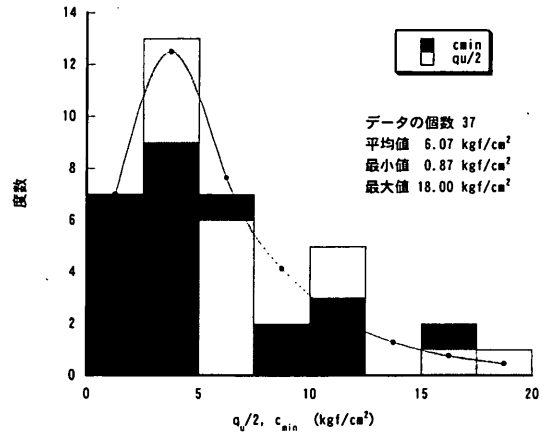


図-38 固結強度のヒストグラム

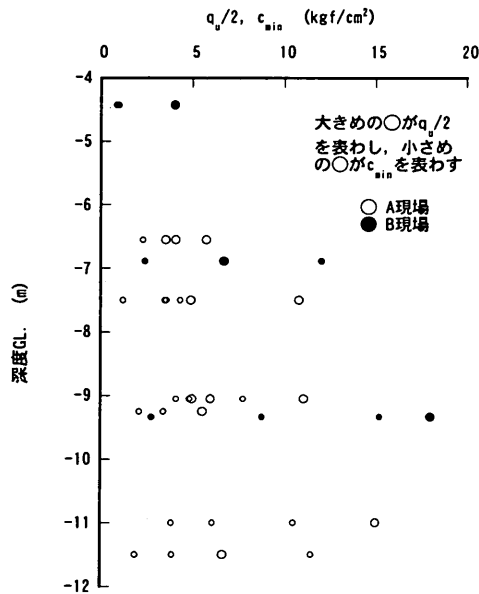


図-37 固結強度の深度分布

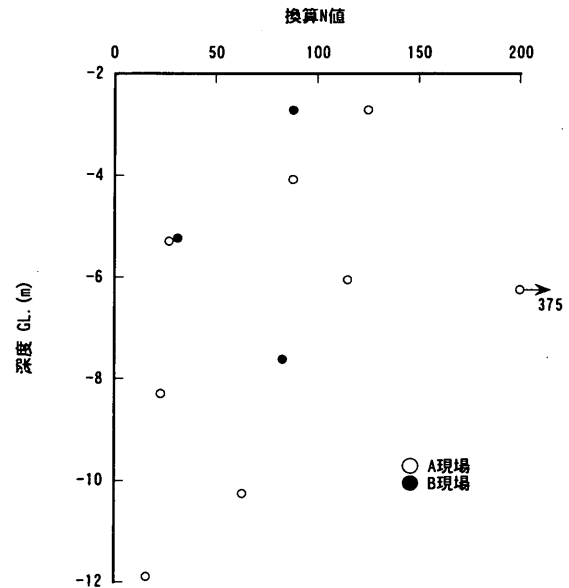


図-39 換算N値の深度分布

図-36や図-37に示されたように、固結した水砕スラグの強度にはばらつきがあり、ほかの情報から強度を精度よく推定することは困難であるようなので、強度のばらつき具合を確認しておく。図-38には c_{min} と $q_u/2$ の両者の頻度分布を示した。データの個数は全部で37個であり、両者を同等とみなして考えるとデータの分布形状は対数正規分布によく合うことが分かった。図中には実線で、最適な対数正規分布の曲線も示した。得られた強度の最大値は 18.00kgf/cm^2 、最小値は 0.87kgf/cm^2 、対数正規分布から求められた平均値は 4.76kgf/cm^2 、これらのデータから推定される平均値の95%信頼範囲は、 $3.75\sim 6.04\text{kgf/cm}^2$ であった。

図-39にはN値の深度分布を示す。固結強度同様にばらつきがあることが分かる。

固結の程度について経年変化の影響を考えると、表-2に示したような過去の2年以内の材齢での調査結果と今回得られた強度とを比較してみる。図-40は固結強度と調査時までの経過時間の関係を示したものである。いずれの結果もばらつきが大きくなっているが、ばらつきの範囲を見てみると、最小値についてはあまり変化がないようであるが、最大値としては大きくなる傾向にあるようである。このようなことから、これまでの状況では、固結強度はやや大きくなる傾向にあるようであり、経年変化によって劣化が進んでいるようなことは全く無いことがわかった。

残留時の強度は摩擦材料としての強度が得られていると考えられる。図-41に残留強度と圧密圧力の関係を示す。ここには三軸圧縮試験を実施したすべてのデータを

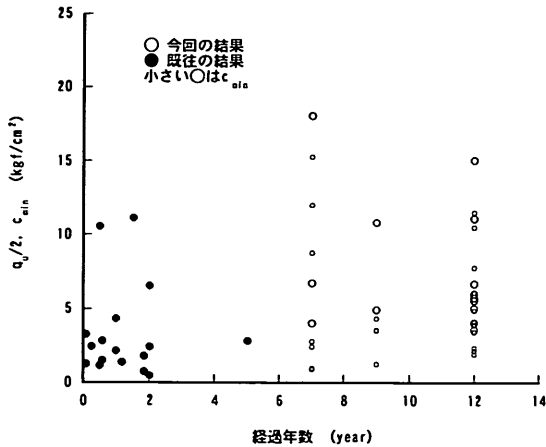


図-40 固結強度の経時変化

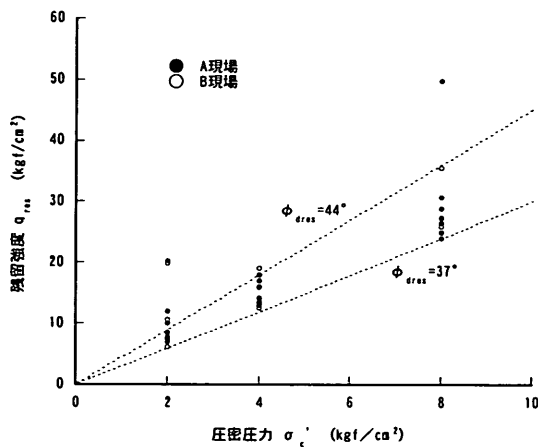


図-41 残留強度と圧密圧力の関係

載せてある。既に述べたように、真の意味での残留強度ではないので、本来の残留強度の意味からするとやや大きめの強度を示していると思われるが、実用的に考えれば、この図に示す強度はほぼ残留強度とみなして差し支えない強度である。図中に示した点線は、データのばらつきを大まかに示したものであるが、内部摩擦角 ϕ_{dres} になおすと、 $37^\circ \sim 44^\circ$ の範囲にあることになる。

新鮮な状況での水砕スラグの三軸試験の結果では水砕スラグは粒子破碎の影響のため内部摩擦角に拘束圧依存性が見られたり、固結した水砕スラグの残留強度からではそのような傾向は判然とはしなかった。新鮮な状態での水砕スラグの内部摩擦角は、拘束圧や間隙比によって多少変化するが、概ね $32^\circ \sim 44^\circ$ の範囲にあり、今回の残留強度はそれを上回っている。これらのことを考えると固結した水砕スラグの内部摩擦角的な摩擦特性についても固結や経年変化の影響はないものと考えてよいようである。

なお、固結した水砕スラグのピーク強度は、 c_{min} と ϕ_{dres}

の二つの強度定数を用いて推定し、残留強度は、 $c=0$ として ϕ_{dres} のみの強度定数を用いて推定すればよい。

6. 結論

平成元年に水砕スラグを港湾工事に利用する際の手引書が作られた。その後、水砕スラグの利用実績が豊富になってきている。中には施工後10年近くたつものもあり、水砕スラグの長期特性を把握できるような状況になってきた。特に、水砕スラグの固結については不明な点が多かったが、今回の地盤調査の結果、水砕スラグの経年変化について以下のような結論が得られた。

- 1) 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固結する傾向にある。
- 2) 原位置における水砕スラグの物性値や力学特性には比較的大きなばらつきがある。
- 3) 固結した水砕スラグの固結強度の範囲は $0.87 \sim 18 \text{ kgf/cm}^2$ 程度であり、平均的には $4 \sim 6 \text{ kgf/cm}^2$ の強度が期待できる。残留強度から求めた内部摩擦角は 37° 以上ある。
- 4) 固結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。
- 5) 固結した水砕スラグについて地盤工学会基準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 はそれよりはやく小さく pH が $9 \sim 10$ 程度となる。

7. 終わりに

今回の報告だけでは情報の収集量としては必ずしも十分とは言えないが、いくつかの事例から6.に示したようなことがわかった。水砕スラグに限らず、新しく開発した材料については以上のような経時変化の調査が大変重要である。新しく開発されている材料についてのデータの収集とその公開については関係各位のご協力を切にお願いする。また、この報告が今後の固化した地盤材料の経年変化の調査の参考となることを期待する。

なお、水砕スラグの現地調査に際して各港湾建設局の担当者の皆様、鉄鋼スラグ協会技術委員会道路・土工分科会主査の小林延郎氏はじめ協会の委員の皆様、興亜開発(株)富田龍三氏に多大のご協力をいただきました。本論文をまとめるにあたり、土質部善功企部長、水上純一主任研究官、動土質研究室山崎裕之室長とのディスカッションが大変参考になりました。記して感謝の意を表します。

(1998年6月30日受付)

参考文献

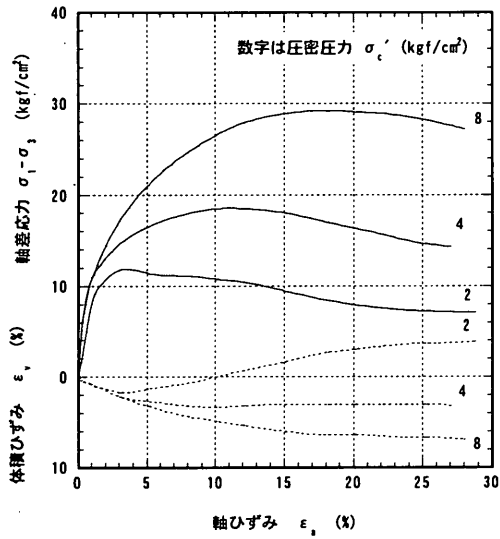
- 1) (財)沿岸開発技術研究センター, 鉄鋼スラグ協会: 港湾工用水砕スラグ利用手引書, 71p., 1989.8
- 2) 鉄鋼スラグ協会: 鉄鋼スラグの特性と有用性, 1994.9
- 3) 廃棄物学会: 廃棄物ハンドブック, p.827, 1996
- 4) 鉄鋼スラグ協会: 水砕スラグ「土工材料としての技術資料」, p.64, 1983.12
- 5) 文献3)参照, p.828
- 6) 佐藤康文・衣斐隆志・福田勇治: 地盤改良材としての高炉水砕スラグの土質工学的性質とその経時変化について, 第37回土木学会年次講演会講演概要集第Ⅲ部門, pp. 601 - 602, 1982.
- 7) 西 勝・佐藤康文・山田史郎・南部光広・後藤 毅: 高炉水砕スラグの土質特性, 第17回地盤工学研究発表会, pp. 2653-2656, 1982.
- 8) 日本工業規格: コンクリート用高炉スラグ微粉末JIS A6206 - 1997 解説, p.解5, 1997.
- 9) (社)地盤工学会編: 第3編化学試験, 土質試験の方法と解説, pp.125-129, 1990.
- 10) Bishop, A. W. : Shear strength parameters for undisturbed and remoulded soil specimens, Stress-Strain Behaviour of Soils (Proc. of the Roscoe memorial symposium), p.47, 1971.
- 11) 水上純一・小林正樹: マウンド用捨石材の大型三軸試験による強度特性, 港湾技研資料 No. 699, 23p., 1991.
- 12) 山田恭央: 土の変形・強度特性 - 基礎理論を中心として -, わかりやすい土質力学原論 [第1回改訂版], (社)土質工学会, p.42, 1992.

付録 水砕スラグの排水三軸圧縮試験時の応力ひずみ曲線と軸ひずみ体積ひずみ曲線

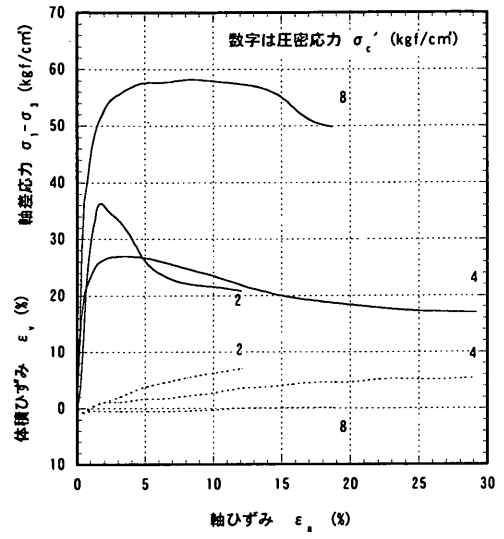
以下に、A現場とB現場から採取された固結した水砕スラグの三軸圧縮試験の結果得られた応力軸ひずみ曲線と体積ひずみと軸ひずみの関係の図を示す。なお、これらの三軸試験に用いた供試体の条件は付表-1に示すとおりである。

付表-1 三軸試験を実施した供試体の一覧

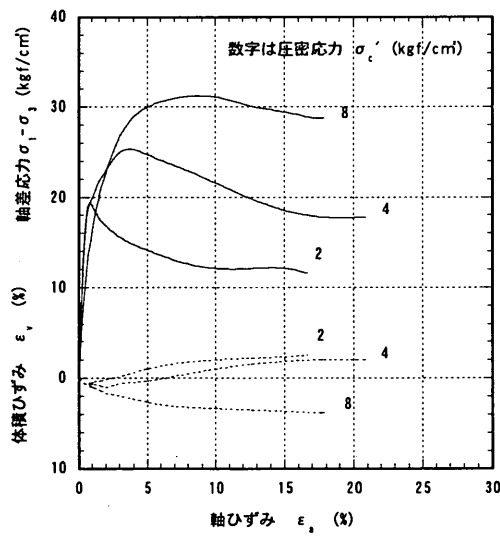
現場	ボーリング グ孔	深度 GL. (m)	圧密圧力 σ_c' (kgf/cm ²)	湿潤単位体 積重量 γ_t (gf/cm ³)	乾燥単位体 積重量 γ_d (gf/cm ³)	図番号
A	SW200	-6.10~-7.00	2	1.553	1.086	付図-1
			4	1.613	1.101	
			8	1.637	1.182	
A	SW200	-8.55~-9.55	2	1.735	1.314	付図-2
			4	1.575	1.088	
			8	1.729	1.260	
A	SW350	-7.00~-8.00	2	1.595	1.098	付図-3
			4	1.744	1.297	
			8	1.676	1.200	
A	SW350	-11.00~-12.00	2	1.481	0.937	付図-4
			4	1.42	0.904	
			8	1.838	1.408	
A	SW500	-7.00~-8.00	2	1.637	1.200	付図-5
			4	1.554	1.042	
			8	1.632	1.149	
A	SW500	-8.45~-10.00	2	1.593	1.058	付図-6
			4	1.595	1.102	
			8	1.569	1.079	
A	SW500	-10.39~-11.50	2	1.62	1.148	付図-7
			4	1.687	1.249	
			8	1.67	1.299	
B	T1	-3.93~-4.93	2	1.396	0.929	付図-8
			4	1.418	0.971	
			8	1.539	1.027	
B	T1	-6.38~-7.38	2	1.628	1.136	付図-9
			4	1.612	1.138	
			8	1.537	1.053	
B	T1	-8.83~-9.83	2	1.584	1.099	付図-10
			4	1.652	1.113	
			8	1.676	1.135	



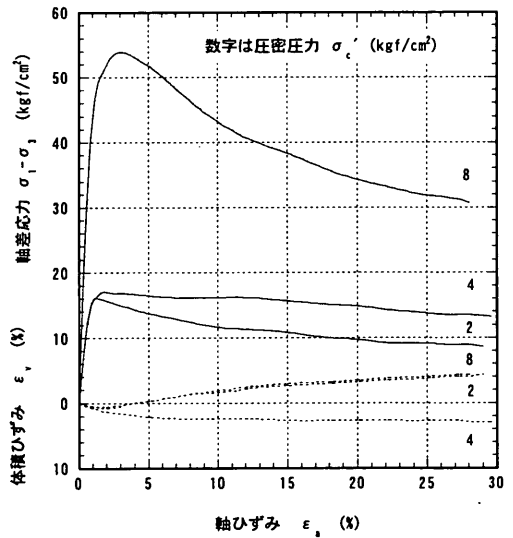
付図-1 SW200(-6.10 ~ -7.00m)



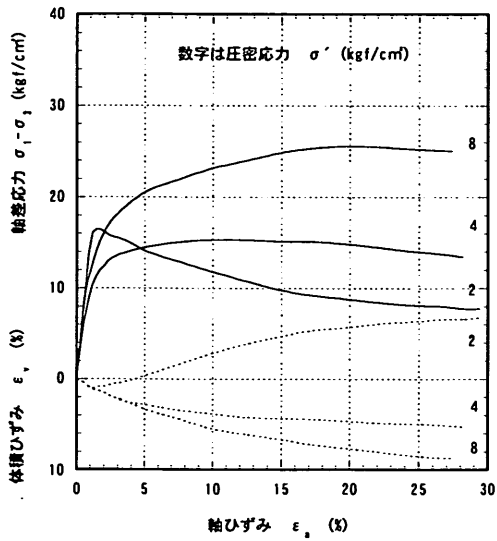
付図-2 SW200(-8.55 ~ -9.55m)



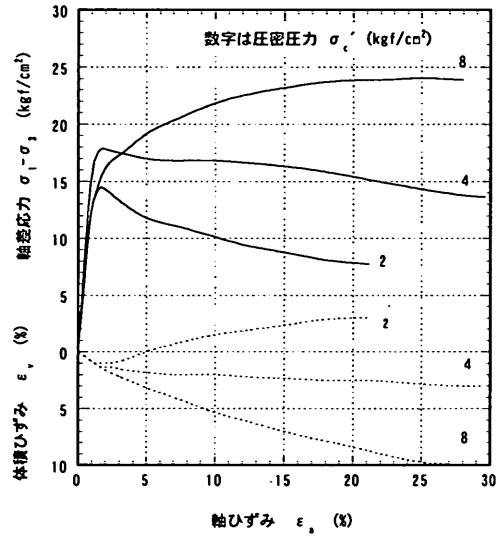
付図-3 SW350(-7.00 ~ -8.00m)



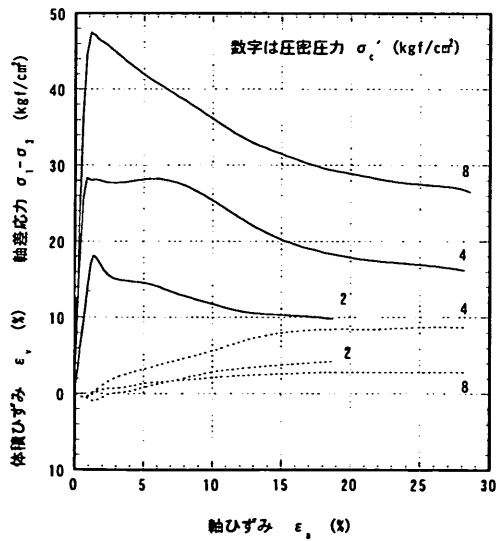
付図-4 SW350(-11.00 ~ -12.00m)



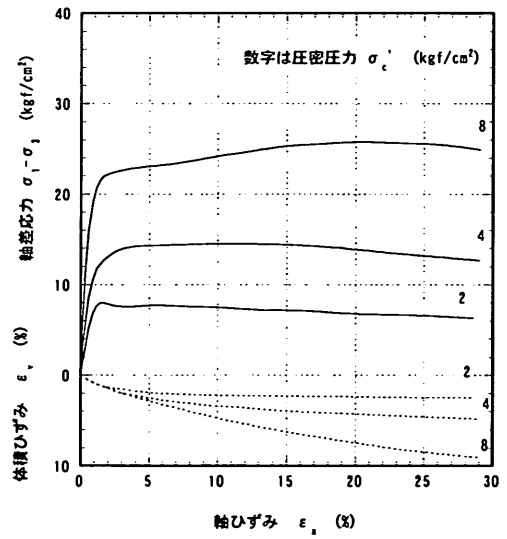
付図-5 SW500(-7.00 ~ -8.00m)



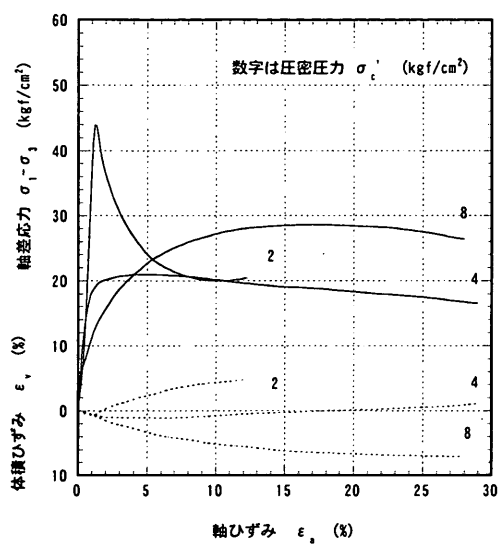
付図-6 SW500(-8.45 ~ -10.00m)



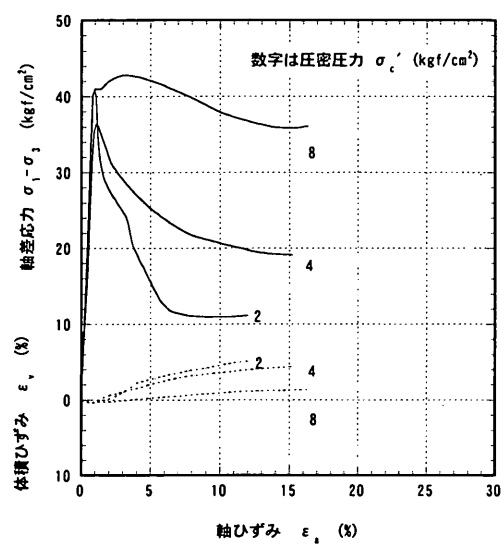
付図-7 SW500(-10.39 ~ -11.50m)



付図-8 T1(-3.93 ~ -4.93m)



付図-9 T1(-6.38 ~ -7.38m)



付図-10 T1(-8.83 ~ -9.83m)

港湾技研資料 No.915

1998.9

編集兼発行人 運輸省港湾技術研究所

発行所 運輸省港湾技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号

印刷所 阿部写真印刷株式会社

Published by the Port and Harbour Research Institute
Nagase, Yokosuka, Japan

Copyright ©(1998)by P.H.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Director General of P.H.R.I.

この資料は、港湾技術研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本資料の全部又は一部の転載、複写は、港湾技術研究所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。