

港湾工事で用いられた水砕スラグの 特性の経年変化

菊池喜昭¹

¹正会員 博士(工) 独立行政法人 港湾空港技術研究所 地盤・構造部 (〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1)
E-mail:kikuchi@pari.go.jp

水砕スラグの軽量性に注目し、港湾工事で水砕スラグを利用した事例が数多くある。既に施工後10年以上経つものがあり、水砕スラグの長期特性を把握できる状況にある。そこで、港湾工事で用いられた水砕スラグの地盤調査を行い、力学特性の経年変化を調査した。その結果、地下水面より下にある水砕スラグは固結する傾向にあること、港湾工事で用いた原位置における水砕スラグの物性値や力学特性には大きなばらつきがあること、水砕スラグの固結強度は390～610kN/m²程度あり、残留強度から求めた内部摩擦角は37°以上あること、固結した水砕スラグの透水係数は10⁻³cm/sec程度で、長期間経過しても大きくは変わらないこと、水砕スラグ層の間隙中を通過する水について求めたpHは9～10程度となること、などがわかった。

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

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。

嵩のある廃棄物で、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押さ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課題となる。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、砂に良く似た材料であるため地盤材料として利用されている。特に、平成元年に港湾工事で水砕

スラグ利用手引書¹が作られ、港湾工事中においても主として土圧低減用裏込め材として10年以上の実績を有する材料である。

この手引書は、水砕スラグを港湾工事中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、水砕スラグが固結する可能性のある材料であることを認められていたが、固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い。さらに、固結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。

実施工に用いられて10年以上が経った今日において実施工現場から水砕スラグを採取してその物性を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。そこで、港湾地域の二つのサイトにおいて地盤調査を実施し、原位置における水砕スラグの特性の把握と力学特性の経年変化について検討した。ここでは、本調査の結果明らかになった、固化特性、単位体積重量、透水係数の変化などについて報告する。

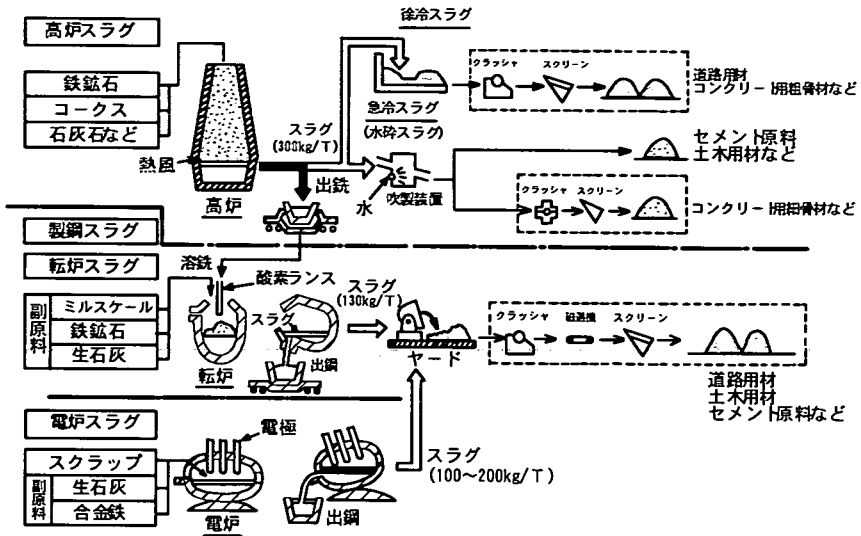


図-1 鉄鋼スラグの製造フロー²⁾

表-1 鉄鋼スラグの組成例²⁾

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

2. 水砕スラグの基本的性質

(1) 水砕スラグの製造方法

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溶融状態の銑鉄(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⁾。

高炉では、原料の鉄鉱石のほかに燃料のコークスと副原料の石灰石を投入し、コーク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-1²⁾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-1²⁾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ークスの灰分に由来し、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、高炉作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、鉄鉱石やコーク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²⁾。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、密度(溶銑の密度約6.5g/cm³、スラグの密度約2g/cm³)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。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、化学的特性は水砕スラグとはかなり異なるものである³⁾。

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、土工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⁴⁾。

(2) 潜在水硬性

高炉スラグを急冷して水砕化する際に、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細粒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

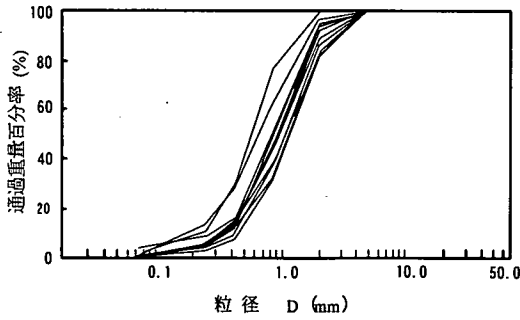


図-2 水砕スラグの粒度分布¹⁾

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⁾。

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っても次のような条件がそろって固結する⁵⁾。

- 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っ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通常の砂と同程度であるため、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(表-2)、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CO₂の影響で中和が起り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⁶⁾。しかし、水砕スラグの固結条件についてはいまだに不明の点が多く、現在も検討が進められている。

(3) 水砕スラグの物理的性質

水砕スラグは粒子内部に気泡を含んでいることが特徴である。溶融状態のスラグは炉内で強い還元雰囲気下であり、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

表-2 土工用に用いた水砕スラグの固結状況¹⁾

現場	環境	施工時期	施工後の材令	一軸圧縮強さ kN/m ²
HI	土中	1976.6	1ヶ月	245
				640
OK1	埋立	1979.3	7ヶ月	295
			12ヶ月	420
			24ヶ月	470
OK2	土中	1986.1	22ヶ月	345
	海中	1986.1	22ヶ月	150
	土中	1984.9	2年	90
	土中	1985.2	1.5年	2180
HI	土中	1985.2	6ヶ月	225
			12ヶ月	840
OK3	土中	1976.2	5年	550
	土中	1979.3	2年	1285
	土中	1979.12	14ヶ月	265
FU	埋立地の覆土	1984.9	3ヶ月	480
IB	土中	1981.6	6ヶ月	2070
OK4	土中	1985.4	7ヶ月	550

泡として残ることになる。

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、その粒度分布はおよそ図-2⁷⁾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/cm³である⁸⁾。既往の調査で、現場における乾燥単位体積重量を調べたところ、およそ8.0~11.0kN/m³の範囲にあり、間隙比に換算すると1.3~1.9程度の範囲にばらついていることが報告されている⁹⁾。

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

3. 水砕スラグの経時変化に関する既往の調査事例

(1) 現地調査事例

2. (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った。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。

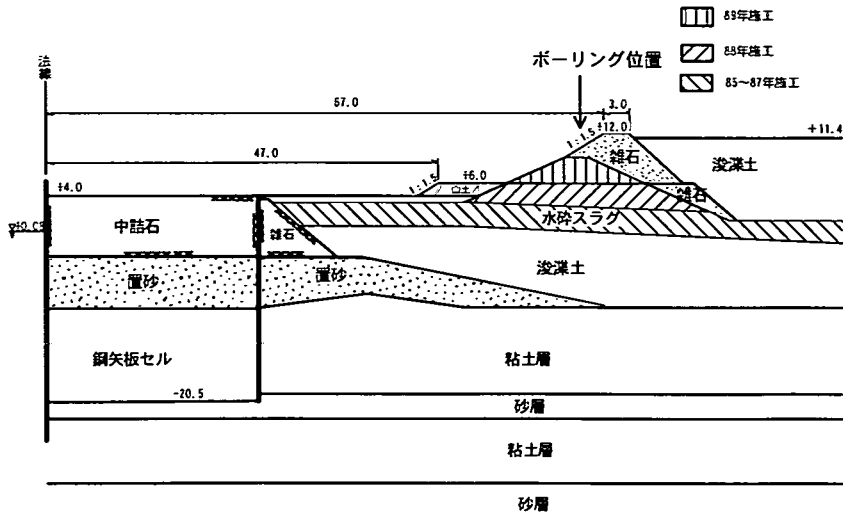


図-3 A現場の標準断面

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。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ったことが伺える。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90kN/m²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ったために、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。

(2)室内における調査

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であるとし、内部摩擦角は変化しないとした。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10⁻³~10⁻²cm/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

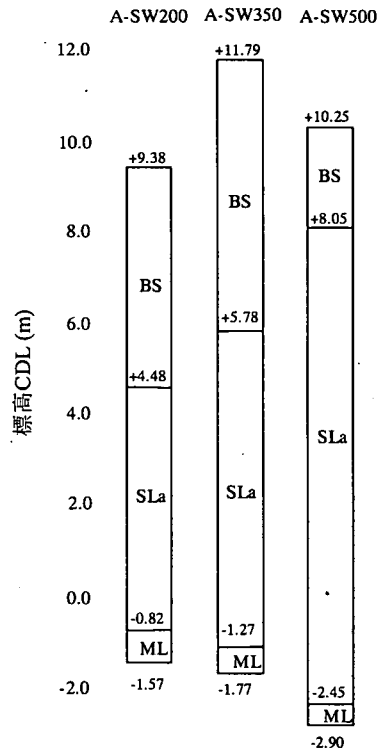


図-4 A現場の地層構成

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。

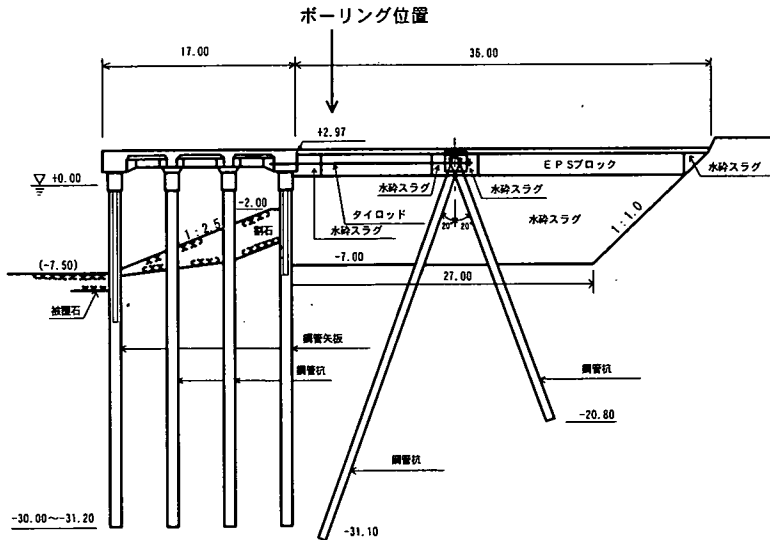


図-5 B現場の標準断面

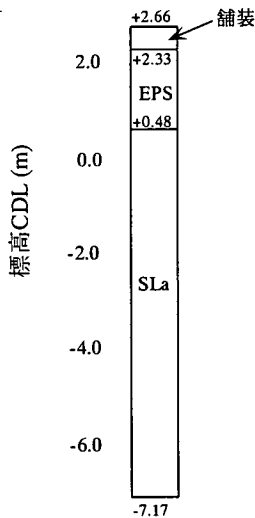


図-6 B現場の地層構成

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箇所で行ったボーリングを行い、標準貫入試験、連続コアサンプリング、間隙水のpH調査を行った。室内試験では、土粒子の密度試験、一軸及び排水三軸圧縮試験、三軸透水試験、間隙水のpH試験を行った。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と表記したように浚渫土による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り、ほとんど全層に渡り固結していることが観察されている。また、図-4に示すように、それぞれのボーリング孔の名称をA-SW200、A-SW350、A-SW500として区別する。

なお、今回サンプリングでは、標準貫入試験を行うために試料採取できなかったところを除き、ほぼ全長に渡り試料が採取できた。この試料の目視観測の結果によると、A-SW200の上層部分CDL.+3mから+4m付近で固結の程度がやや低い部分があったが、その部分を除けば、ほぼ全層にわたり固結が認められた。

4. 現地調査の概要と結果

(1) 地盤調査の概要

a) 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陸上で撒き出すことによって築堤が行われた。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

b) 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水中投入によって施工した現場である。図-5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月に実施した。従って、施工後およそ6年経ったところでの調査である。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-6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-5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った。

この現場でのボーリングは1孔であり、標準貫入試験と1mのサンプリングを交互に繰り返した。室内試験では、土粒子密度試験、一軸及び排水三軸圧縮試験、透水試験、間隙水のpH試験を実施した。なお、サンプリング時の供試体の状況の観察からは、CDL-1m付近では十分には固結していない状況が見られたが、他の部分ではかなり固結が進展していた。

(2) 物理的性質

今回得られた試料の一部について土粒子密度を検討した。ここで試験し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。また、固結によって閉塞した空隙の可能性があることや粒子内の空隙をどのように考慮するかによって土粒子密度としていくつもの値をとりうる。そこで、土粒子密度として、コアのままの試料と、木槌で砕いた試料と、乳鉢ですりつぶした試料を用いて土粒子密度を測定した。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空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いつてよい。結果を表-3に示す。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/cm^3 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 $12\mu\text{m}$ 程度の高炉スラグ微粉末の粒子密度は $2.86\sim 2.94\text{g/cm}^3$ 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

表-3 土粒子密度 (g/cm^3)

	コアの状態 で求めたもの	木槌で砕いた 試料	乳鉢ですりつぶした試料
A現場	2.517	2.769	2.852
B現場	2.381	2.803	2.828

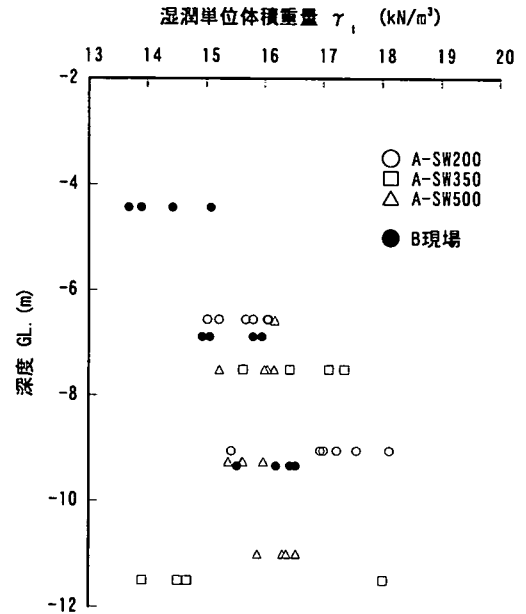


図-7 湿潤単位体積重量の深度分布

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-7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、いずれも地下水面より低い位置であったと考えてよい。図-7のように、湿潤単位体積重量は $13\sim 19\text{kN/m}^3$ の範囲にあり、深度の増加によって湿潤単位体積重量が増加しているようにも見えるが、深度がGL-11m付近でも-4m付近とほとんど変わらない単位体積重量であったところもあるというように、単位体積重量は非常に大きくばらついている。

図-8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 γ_w と乾燥単位体積重量 γ_d の関係を示す。図-8からわかるように、 γ_d は $9\sim 14\text{kN/m}^3$ の範囲にあった。この図には、土粒子密度が 2.8g/cm^3 とした時に、飽和度が100%、85%、70%のときの γ_w と γ_d の関係(実線)と土粒子密度が 2.6g/cm^3 、飽和度100%のときの γ_w と γ_d の関係(点線)もあわせて示し

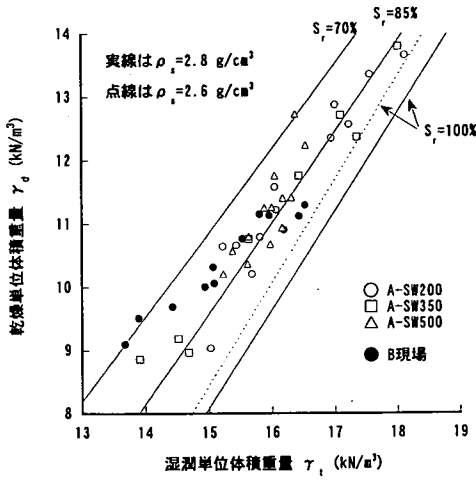


図-8 湿潤単位体積重量と乾燥単位体積重量の関係

ている。これらの関係を見ると、 0.2g/cm^3 程度の土粒子密度の違いによる γ_w と γ_d の関係の変化に比べて、飽和度が数10%変化することによる γ_w と γ_d の関係の変化のほうがはるかに大きいことがわかる。このことからわかるように、サンプリング後に湿潤単位体積重量を測定した時には水砕スラグは不飽和であった。後述べるように、固結した水砕スラグの透水係数は 10^{-3}cm/sec 程度であり、この値は通常の砂とほとんど変わらない。水砕スラグが水中において不飽和であった可能性は否定できないが、上述のことを考えると、サンプリング中に間隙水が流れ出したことが考えられる。

そこで、土粒子密度を 2.8g/cm^3 であると仮定して、 γ_d から飽和単位体積重量 γ_{sat} を計算し、その深度分布を示したのが、図-9である。この結果を見ても、全体の傾向としては、 γ_{sat} が深度とともに増加しているように見えるが、ボーリング孔ごとに仔細に見ると、深度の増加につれて γ_{sat} の増加していないものもあり、一概に深度方向に γ_{sat} が増加するとはいえない。また、過去の水砕スラグの圧縮性に関する研究成果によると深度GLが-4mから-12mまでの間の上載圧の違いによる圧縮ひずみは高々3%であり、そのことによる乾燥単位体積重量の変化量は 0.5kN/m^3 以下である。このようなことを考えても、図-9に示された γ_{sat} の違いは土被り圧の違いによるものではなく、施工時の初期の間隙比のばらつきの影響が強く残っているものと考えられる。

なお、これまでの手引書では、水中単位体積重量として 7kN/m^3 を標準とすることができるとしてきているが、今回の調査結果はその値を上回る可能性のあることを示している。

以上のように、今回調査対象としている水砕スラ

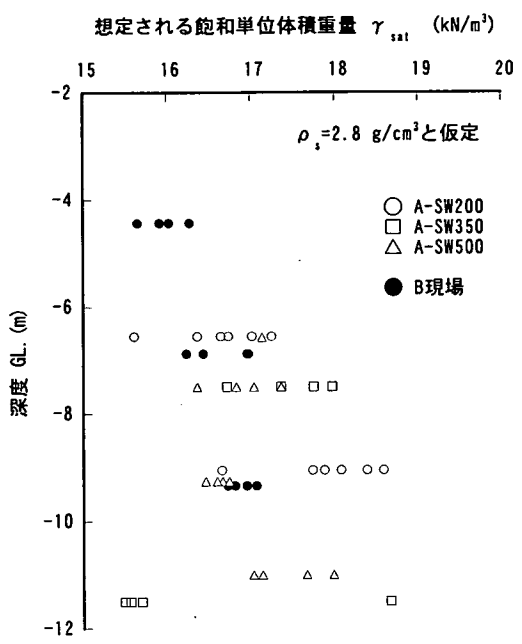


図-9 仮定して求めた飽和単位体積重量の深度分布

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密度が均一ではなかった。

港湾工事においては、水砕スラグに限らず、土砂は大量に急速に投入されるため十分な施工管理は困難である。水砕スラグに限らず一般の地盤材料においても、裏埋め土については一般的にこのような単位体積重量のばらつきが生じていることが考えられる。

(3) 力学特性

a) 一軸圧縮強さとN値

図-10に一軸圧縮強さの深度分布を示す。ここでは、A現場とB現場の結果をまとめて示している。いずれの現場においても $800\sim 1000\text{kN/m}^2$ 程度の一軸圧縮強さのものが多く、中には 3500kN/m^2 といった大きな値を示すものもあり、圧縮強度のばらつきは比較的大きなものであることがわかった。

図-11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)。

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

ここに、N: 換算N値, n: 標準貫入試験の打撃回数

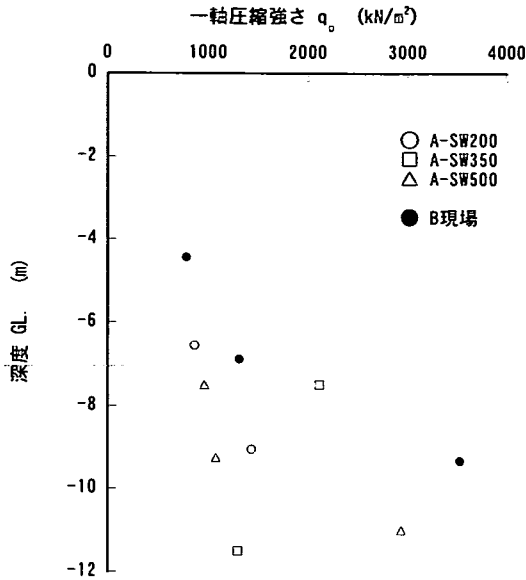


図-10 一軸圧縮強度の深度分布

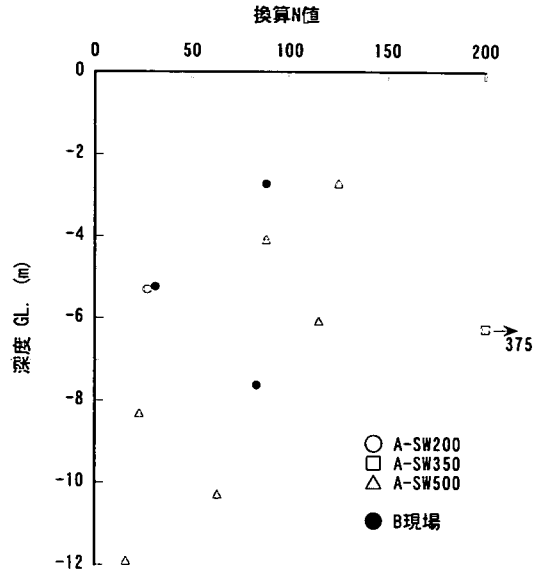


図-11 換算N値の深度分布

(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-11の中の 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、データ数はあまり多くないが、A、B現場とも N 値は50を上回るものがほとんどであり、 N 値にも大きなばらつきがある。

これら二つの図を見ると、図-10では、一軸圧縮強度が深度とともに多少増加しているように見え、図-11では、 N 値が深度によらず一定か、深度とともに多少減少しているかのように見える。しかし、これらの結果の持つ意味は、今後この種の調査結果を増やすことで結論を得るべきことであると思う。

b) 圧密排水三軸圧縮試験

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、直径5cm、高さ10cmのものを使用した。この試験では、背圧を200kN/m²とし、有効圧密圧力 σ'_c は、200、390、780kN/m²とし等方状態で180分間圧密した。その後、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、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-12に、A現場(A-SW500)のGL-9.25m付近の深

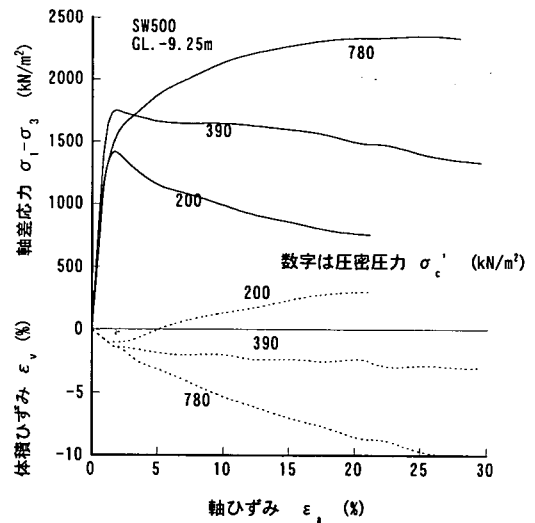


図-12 応力ひずみ関係の例

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。 $\sigma'_c = 200, 390$ kN/m²の場合には、ひずみの小さいところで最大軸差応力に達し、その後軸差応力が低下しているのに対し、 $\sigma'_c = 780$ kN/m²の場合には、最大軸差応力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と考えられる。一方、 $\sigma'_c = 780$ kN/m²の場合には圧密中の粒子の再配列によって粒子間の固結が切れた可能性があり、また、粒子間の摩擦によるせん断強度が固結強度を上回った可能性があるために最大せ

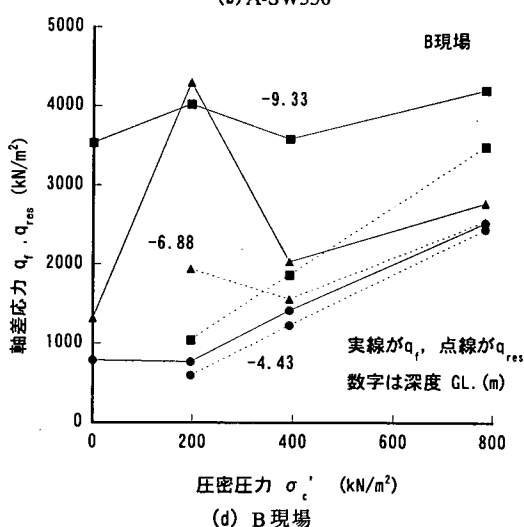
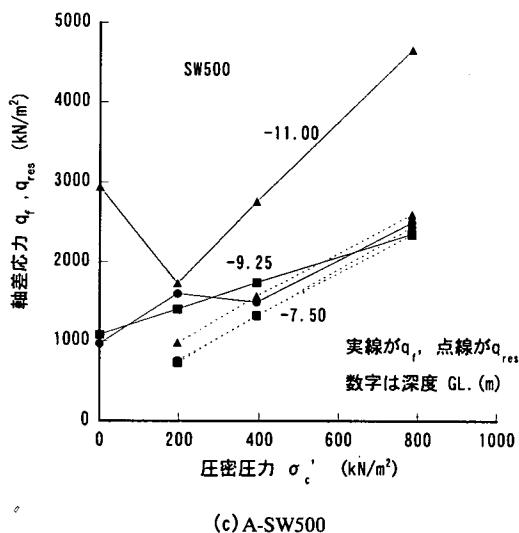
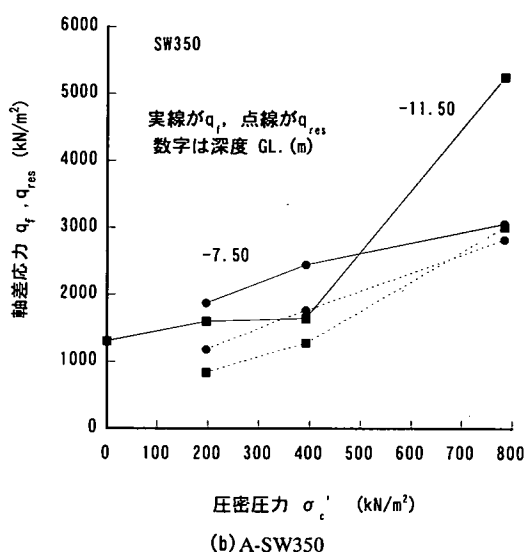
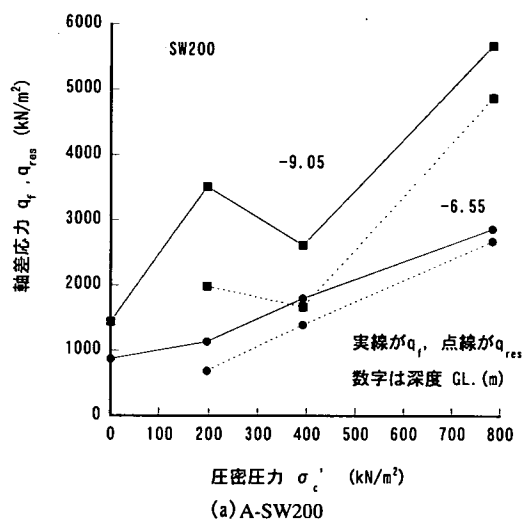


図-13 ピーク強度と残留強度

ん断強度は摩擦性のせん断抵抗によって発現されたものと考えられる。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-12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の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-13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} (軸ひずみ25%のときの強度) の関係を示す。これらの図の中で圧密圧力 σ'_c が 0 kN/m^2 のデータは一軸圧縮試験の結果によるものである。図-13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、残留状態では、摩擦材料としてせん断力に抵抗することを示している。

図-14に圧密圧力 σ'_c と主応力比 σ'_1/σ'_3 から求められる軸差応力最大時の内部摩擦角 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。

$$\sin \phi_{d0} = \frac{\sigma'_1/\sigma'_3 - 1}{\sigma'_1/\sigma'_3 + 1} \quad (2)$$

図-14には、A現場の結果とB現場の両現場の結果が示してある。図-14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。ところで、この二箇所では施工

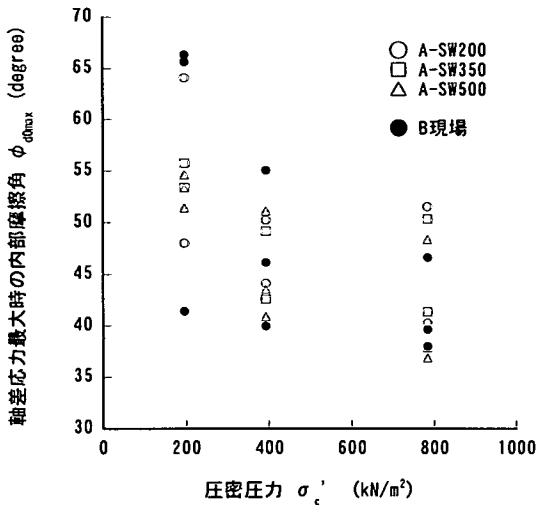


図-14 ピーク強度時の内部摩擦角 ϕ_{d0max}

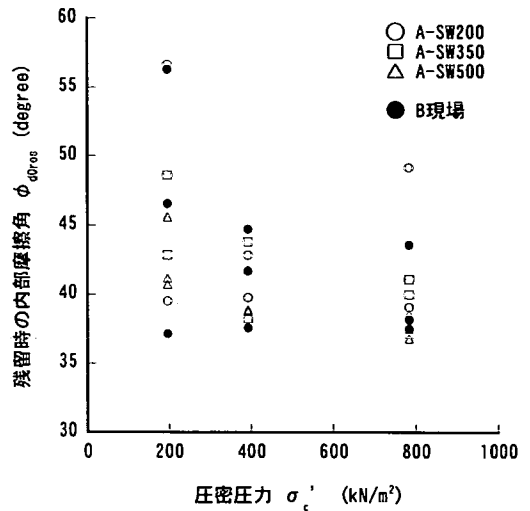


図-15 残留強度時の内部摩擦角 ϕ_{d0res}

法が多少異なっており、また、図-8からもわかるように、乾燥密度も異なっている。しかし、この結果を見ると、施工法の違いや乾燥単位体積重量の違いは ϕ_{d0max} にほとんど影響がないようである。

図-15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。十分に残留状態に達していないと考えられるものもあるため、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 780kN/m^2 以下では、内部摩擦角 ϕ_{d0res} として 37° は期待できる結果となっている。

図-16に乾燥密度と ϕ_{d0max} , ϕ_{d0res} の関係を示す。ここで、(a)は圧密圧力が 200kN/m^2 のときのもので、(b)は圧密圧力が 780kN/m^2 のときのものである。これらの結果を見ると圧密圧力が 200kN/m^2 の時には、 ϕ_{d0} がかなりばらついており、 γ_d との間に強い相関があるとは思われないが、圧密圧力が 780kN/m^2 の時には、 ϕ_{d0max} , ϕ_{d0res} と γ_d との相関性が見られる。このことは、圧密圧力が低い場合には、 ϕ_{d0} が γ_d によらずに決まっていることを示している。図-23で示すように γ_d と固結強度にも相関性は見られないことから、圧密圧力の小さい条件下では、 ϕ_{d0max} と ϕ_{d0res} に固結の影響が現れているものと考えられる。その一方で、圧密圧力が高い場合には、固結していた影響が消えてきているものと考えられる。

なお、以上に示した ϕ_{d0} は、破壊強度が固結による強度か摩擦による強度かについての区別をせず、軸差応力最大時と残留状態のときの応力比を内部摩擦角 ϕ_{d0} として表したものである。固結による強度成分と摩擦による強度成分を分離して求めようとする場合には、ピーク強度と残留強度の両方の持つ意味について

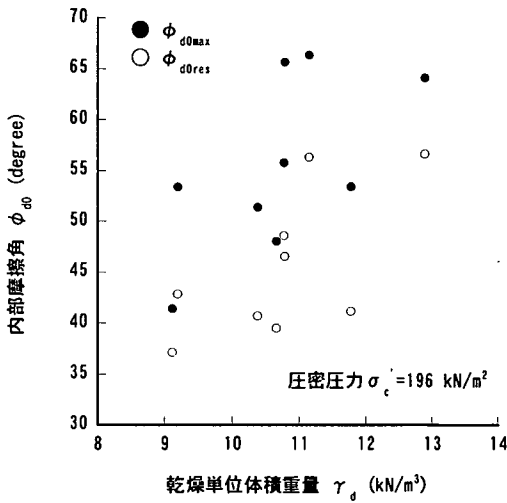
考察を加えることが必要である。この点については、5. で詳述する。

(4) 透水試験と pH

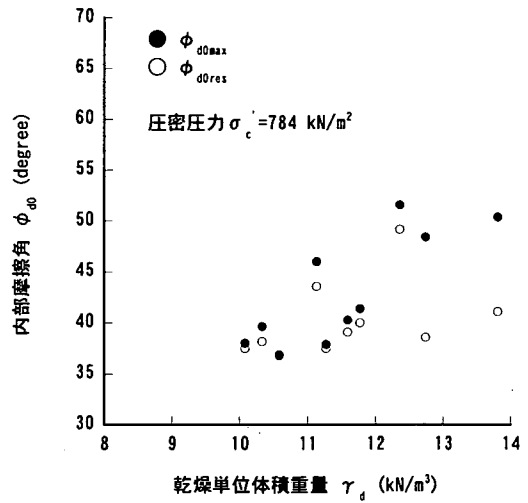
A 現場の試料と B 現場の試料のそれぞれ一例 (A-SW500 GL-6.5m と B 現場の GL-7m) について、透水試験を定水位法で実施した。その結果得られた透水係数 k_{15} は、A 現場で $1.3 \times 10^{-3}\text{cm/sec}$ 、B 現場で $1.4 \times 10^{-3}\text{cm/sec}$ であった。これらの値は新鮮な状態での透水係数に比べると小さいが、既往の研究⁹⁾などで固結した場合の水砕スラグの透水係数として言われている値とほぼ同じオーダーであった。このことは固結して長期間経っても透水係数に大幅な変化はないことを示している。

これらの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、あらかじめ測定したこの水の pH は 8.0 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、A 現場のものについては pH は 9.2、B 現場のものでは pH は 10.8 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」⁹⁾ 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 A 現場のもので 11.2、B 現場のもので pH は 11.4 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、A 現場では現地水の 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とところで一度採水し pH をはかり、その後水位管内の水を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回くみ上げボーリング孔周辺にあったと考えら



(a) 圧密圧力 200kN/m² の場合



(b) 圧密圧力 780kN/m² の場合

図-16 内部摩擦角 ϕ_{d0} と乾燥単位体積重量の関係

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。各回でくみ上げた水の量は0.0157m³である。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。

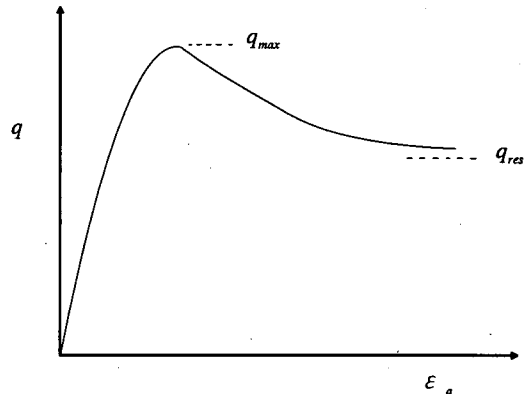


図-17 脆性的な応力ひずみ関係

5. 考察

(1) せん断強さの固結による成分と摩擦による成分の分離

4. に示したように、A現場とB現場で採取した水砕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-17に固結していたと考えられる水砕スラグの応力ひずみ関係のイメージ図を示す。固結している材料では、圧縮初期には固結による強度を発揮し、弾性的なひずみが先行し、その後、少しずつ固結部分が壊れていき、最終的には摩擦成分によって強度が発揮されるものと考えられる。この材料では、ピーク強度は

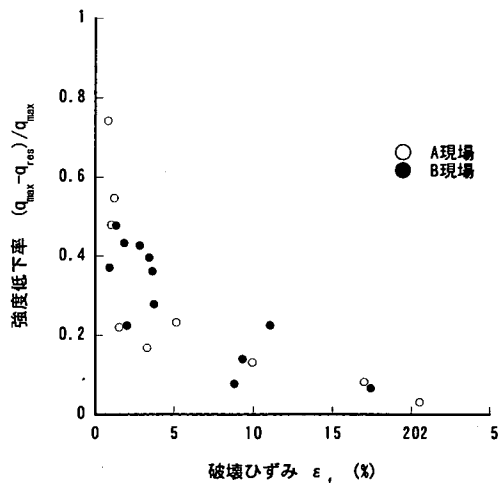


図-18 強度低下率と破壊ひずみ

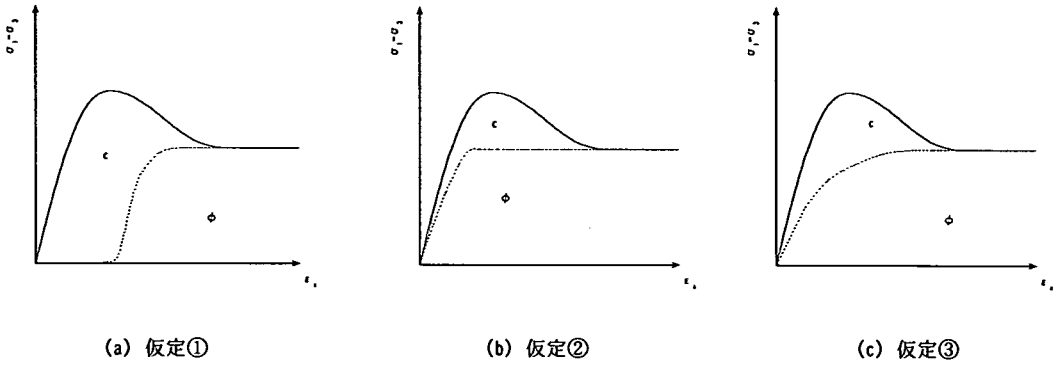


図-19 cとφの強度に及ぼす寄与の程度

固結による成分を含む強度であり、残留強度は摩擦成分のみの強度であると考えられる。このため、固結の成分が大きい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。

$$I_B = \frac{(q_{max} - q_{res})}{q_{max}} \quad (3)$$

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考えた。

図-18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。図-18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、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。

このような現象が生じた理由としては、大きな固結強度を持つ材料では、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

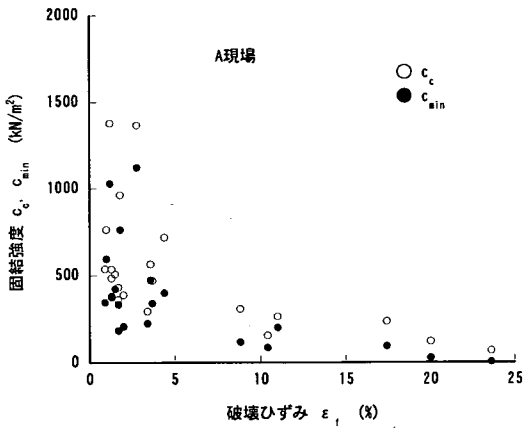
発揮され、せん断終期には固結によるせん断抵抗はなくなり摩擦によるせん断抵抗のみが発揮されることができると考えられる。

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せん断面に作用する直応力によらない強度が発揮されていると考えられる。ここでは、そのような強度成分をcと表記して、議論を進める。

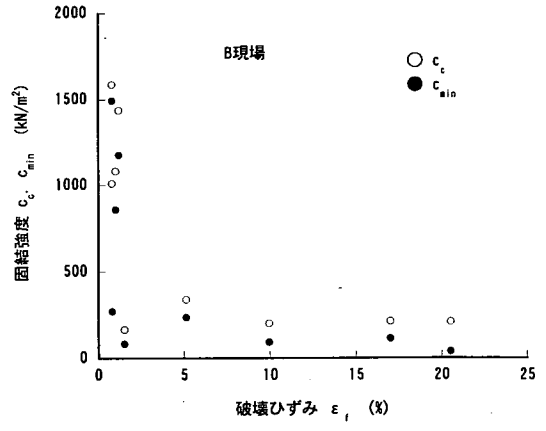
粒子間にセメンテーションが生じている場合のせん断中の応力ひずみ曲線とせん断強度に及ぼすcとφの寄与度について考えてみる。セメンテーションが生じている粒子間のセメンテーションは粒子間の相対移動が極めて小さい状態で切れるものと考えられる。φは単なる粒子間の摩擦抵抗だけではなく、粒子のかみ合わせによっても変化する定数であると考えてよいので、φの成分がせん断抵抗として寄与するには粒子間のそれなりの相対移動を必要とすると考えてよい。このように考えると、せん断初期にはせん断抵抗に寄与している成分としてはcの項が非常に大きく、φの項はほとんど寄与していないものと考えられる。

今回の試験では、供試体ごとの固結強度のばらつきが大きいため、それぞれの試験で用いた試料はみな違うものとする必要がある。そこで、1本の三軸試験の結果からcとφを分離することを試みた。この場合、何らかの仮定を必要とする。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-19(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-19(b))
- ③固結の有無に関わらず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¹¹⁾)。したがって、得られた応力ひずみ曲線



(a) A 現場



(b) B 現場

図-20 固結強度と破壊ひずみの関係

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-19 (c))

以上のような仮定をした場合、得られる c の大きさは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。 ϕ の寄与による応力ひずみ曲線の双曲線近似を用いる場合には、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いので、ここでは、今回の実験で得られた初期弾性係数を用いた。この初期弾性係数には固結の影響が含まれており、やや過大評価をしている可能性がある。せん断終期の強度としては残留強度相当の強度として、軸ひずみが25%以上となったときの強度を用いた。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いがたい。

ϵ_f が特に小さい場合を除けば、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れ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-20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-21には二つの推定された固結強度の比 c_{min}/c_c

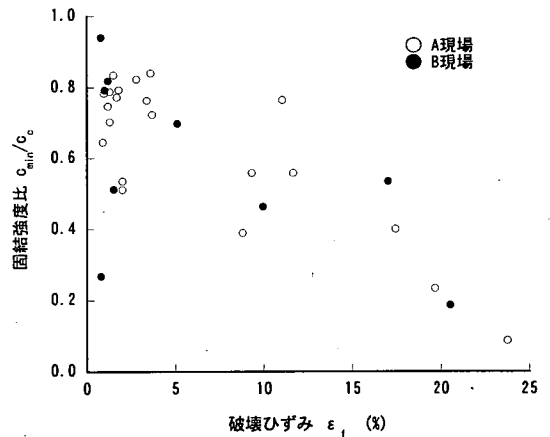


図-21 固結強度比と破壊ひずみの関係

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と全体的には 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。これは、破壊ひずみが大きい場合には、図-18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。

それぞれの推定された固結強度と圧密圧力の関係を図-22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、個々の供試体が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

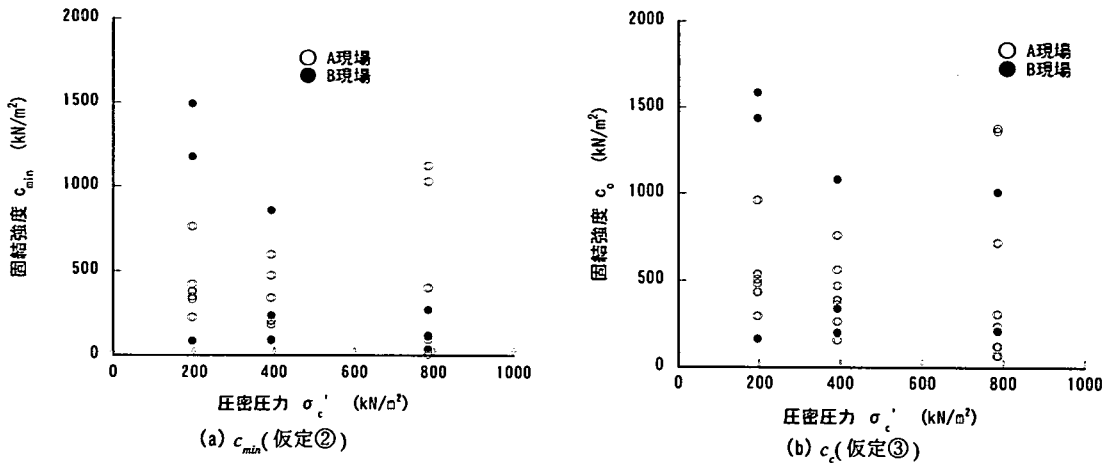


図-22 固結強度と圧密圧力の関係

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_{dres} 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5%より小さい場合の 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。

(2) 固結した水砕スラグの特性

一軸圧縮強さと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ほとんど残っていないと考えられて良いと思われる。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。そこで、5. (1)で求めた c_{min} に対応するものは一軸圧縮試験の結果では $q_u/2$ 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 との関係を図-23示した。いずれの現場のデータもばらつきは大きい、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、 c_{min} の方が $q_u/2$ よりも小さめではあるが、ほぼ同様な値を示している。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。

図-24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

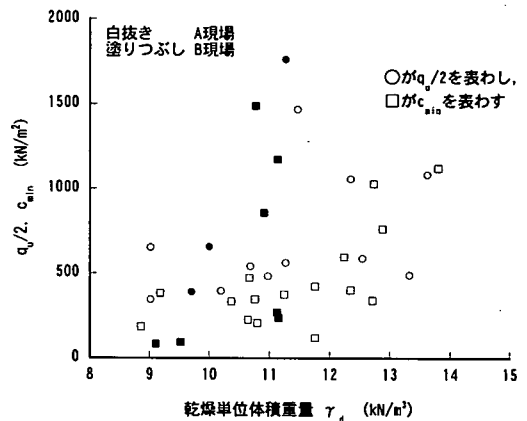


図-23 固結強度と乾燥単位体積重量の関係

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があるようである。図-9で見たように γ_{sat} は深度の増加にしたがって増える傾向にあったが、 γ_d 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。

以上のように、固結強度と単位体積重量や深度との関係、A現場とB現場間での現場の違いによる発現強度の違いには明確な差がないので、本報告におけるすべての条件下での c_{min} と $q_u/2$ が同等に扱えると考え、図-25には得られているすべての 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35個である。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1760kN/m²、最小値は85kN/m²、対数正規分布から求められた平均値は510kN/m²、これらのデータから推定される平均値の95%信頼範囲は、390~610kN/m²であった。

固結の程度について経年変化の影響を考えるため

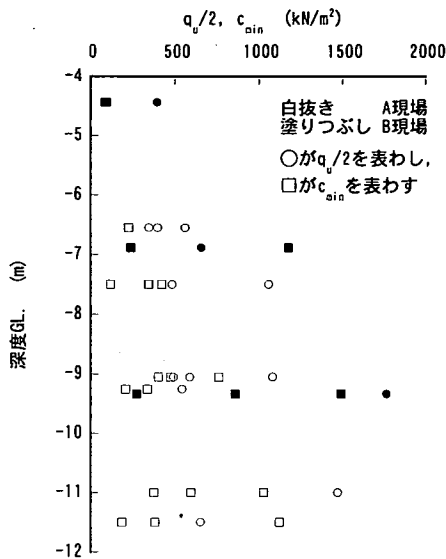


図-24 固結強度の深度分布

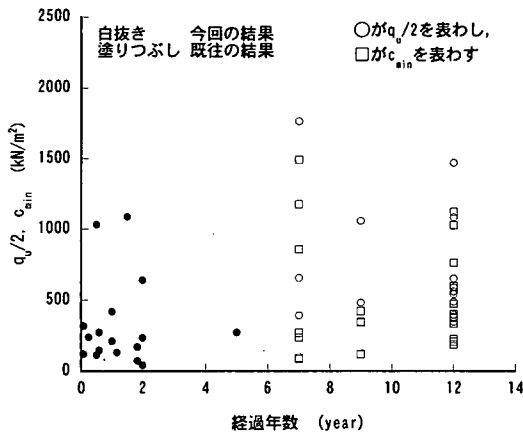


図-26 固結強度の経時変化

に、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-26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い、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く、最大値が大きくなっていく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、固結強度は経過時間とともに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-27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

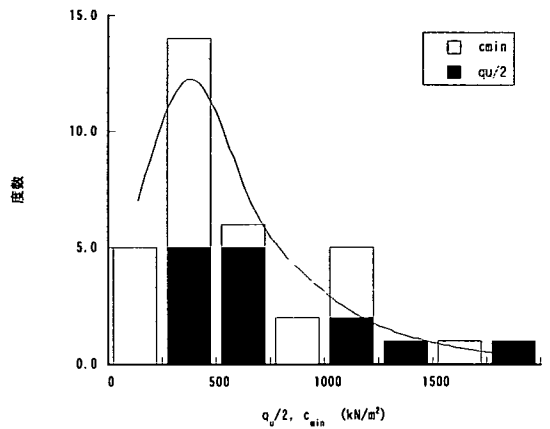


図-25 固結強度のヒストグラム

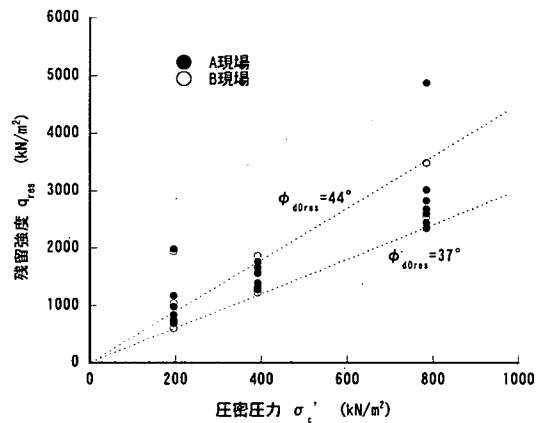


図-27 残留強度と圧密圧力の関係

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、データのばらつきの範囲を大まかに示したものであるが、内部摩擦角 ϕ_{dores} 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か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、拘束圧と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。

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年以上たつものもあり、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) 今回地盤より採取した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ものであり、そのほとんどが固結していると判断できるものであった。このことは、地下水面より下にある水砕スラグについては長期的には固結する傾向にあることを示すものである。
- 2) 港湾工事のような大規模施工による場合には、原位置の水砕スラグの単位体積重量や一軸圧縮強度、 N 値は大幅にばらついており、土被りの影響は顕著ではない。
- 3) 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はそれよりはやや小さくpHが9～10程度となる。
- 4) 原位置で固結した水砕スラグの内部摩擦角 ϕ_{d0res} 、 ϕ_{d0res} はどちらも比較的大きなばらつきがある。
- 5) 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。
- 6) 固結した水砕スラグの最大せん断強さを

$$\tau_{peak} = c_{min} + \sigma \tan \phi_{d0res} \quad (4)$$

で表したときに、 c_{min} は平均的には390～610kN/m²が期待できる。残留時のせん断強さは

$$\tau_{res} = \sigma \tan \phi_{d0res} \quad (5)$$

で表すことができる。式(4)、(5)の内部摩擦角 ϕ_{d0res} は37°以上ある。

7. 終わりに

今回報告した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。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高橋邦夫港湾空港技術研究所理事、旧運輸省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。記して感謝の意を表します。

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：港湾工事に水砕スラグ利用手引書、71p., 1989.
- 2) 鉄鋼スラグ協会：鉄鋼スラグの特性と有用性、1994.
- 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.
- 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) 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.

(2002.10.3 受付)

AGING EFFECT TO MECHANICAL CHARACTERISTICS OF THE GRANULATED BLAST FURNACE SLAG USED IN THE PORT CONSTRUCTION

Yoshiaki KIKUCHI

There are a lot of experiences of using granulated blast furnace slag for port area. At the beginning of the utilization, 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. It is clarified from this study that there are some large variance in mechanical characteristics of this material in-situ and this material will solidify if it is under the water table, its solidified strength is 85 - 1760 kN/m² and the internal friction angle is more than 37 degree in residual condition. The permeability of the material in the solid state is 10⁻³cm/sec.