

一般廃棄物溶融スラグの力学的特性

沼田淳紀¹・筒井雅行²・長谷部正彦³・清木隆文⁴・伊藤良治⁵・岩城圭介⁶

¹正会員 博（工） 飛島建設株式会社 技術研究所（〒270-0222 千葉県野田市木間ヶ瀬 5472）

²正会員 工修 飛島建設株式会社 技術研究所（〒270-0222 千葉県野田市木間ヶ瀬 5472）

³正会員 工博 宇都宮大学教授 工学部建設学科（〒321-8585 栃木県宇都宮市陽東 7-1-2）

⁴正会員 博（工） 宇都宮大学助教授 工学部建設学科（〒321-8585 栃木県宇都宮市陽東 7-1-2）

⁵飛島建設株式会社 土木技術部（〒102-8332 東京都千代田区三番町二番地）

⁶正会員 飛島建設株式会社 技術研究所（〒270-0222 千葉県野田市木間ヶ瀬 5472）

宇都宮市の大谷石採掘跡では、採掘跡陥没の安全対策の一つとして、一般廃棄物溶融スラグで廃坑を埋め立てることが考えられている。埋め立てに当たっては、溶融スラグの環境安全性の確認と力学的特性の把握が重要になる。本論文は、このうち溶融スラグの力学的特性を示す。まず、溶融スラグの物理的性質を示し、次に締固め特性と透水性、さらには中密な供試体より求めたせん断特性と圧縮変形特性を示す。これらの結果、粒子は各粒径とも鋭く尖り粒子破碎が生じやすく変形が長期間に及ぶ可能性があるなど使用にあたってはこの点を考慮する必要があること、中密の溶融スラグのせん断特性は中密な砂に類似していること、圧縮変形特性は粘性土や粗粒材料と同様に載荷圧と間隙比の関係が片対数紙上でほぼ2本の直線で近似できることなどが明らかになった。

キーワード：溶融スラグ，締固め，せん断，圧縮変形，粒子破碎

1. はじめに

宇都宮市の大谷石採掘跡では、陥没に対する安全対策の一つとして、溶融スラグで廃坑を埋め立てることが考えられている。溶融スラグは、一般廃棄物の焼却灰を高温で溶かし冷却したもので、ダイオキシンは高温処理により熱分解され、重金属などの有害物質は高温でほぼ分離され微量がスラグ中にガラス固化される。このため、一般的には安全な材料であり、路盤材などの建設材料にも使われるようになってきている。使用にあたっては、このような環境安全性の確認がまず重要になる。また、溶融スラグを採掘跡の廃坑の埋め立てに用いる場合には、埋め立てによる残柱への影響や埋め立て効果等を評価するための力学的特性の把握が重要である。

本論文では溶融スラグの力学的特性について把握するために、締固め透水試験、圧密非排水および排水三軸試験、三軸試験機を用いた圧縮変形試験、長期圧縮変形試験を実施した。

2. 溶融スラグの物理的性質

用いた溶融スラグは、宇都宮市クリーンパーク茂原で排出された一般ごみ溶融スラグであり、水砕されている。**表-1**に物理的特性の一覧表を、**図-1**に粒度組成を示す。いずれの試験も JIS に従い実施した。

溶融スラグの最大粒径は 9.5mm であり、均等な粒径で、細粒分含有率は 1% と僅かであり粘土分を全く含まない材料である。試料は、地盤工学会の地盤材料の工学的分類（JGS 0051-2000）¹⁾によると礫質砂（SG）となる。粒度組成の図中には、港湾基準²⁾に示される均等な粒径の場合の「液状化の可能性あり」（範囲B）と、「特に液状化の可能性あり」（範囲A）の範囲を併記した。溶融スラグの粒度組成は、「液状化の可能性あり」の範囲にあり、液状化の生じやすい粒度組成であるといえる。ただし、一般的には採掘跡のような地下空洞部では地震時に大きな地震動や大きな繰返しせん断変形が生じる可能性が低いので、材料としては液状化の生じやすい特性を持って

表-1 溶融スラグの物理的性質

項 目		記 号	単 位	溶融スラグ
含水比	含水比	W	%	3.2
密度 (粒径9.5mm以下)	土粒子の密度	ρ_s	g/cm^3	2.692
最大・最小密度 (粒径2.00mm以下)	最大乾燥密度 (最小間隙比)	ρ_{dmax} e_{min}	g/cm^3	1.597 0.686
	最小乾燥密度 (最大間隙比)	ρ_{dmin} e_{max}	g/cm^3	1.249 1.155
粒度組成	最大粒径	D_{max}	mm	9.5
	礫分含有率	P_G	%	30
	砂分含有率	P_S	%	67
	細粒分含有率	P_f	%	1
	粘土分含有率	P_C	%	0
	60%粒径	D_{60}	mm	1.6
	50%粒径	D_{50}	mm	1.3
	30%粒径	D_{30}	mm	0.88
	10%粒径	D_{10}	mm	0.48
	均等係数	Uc		3.3
	曲率係数	Uc'		1
地盤材料の工学的分類 (JGS 0051-2000)				礫質砂 (SG)

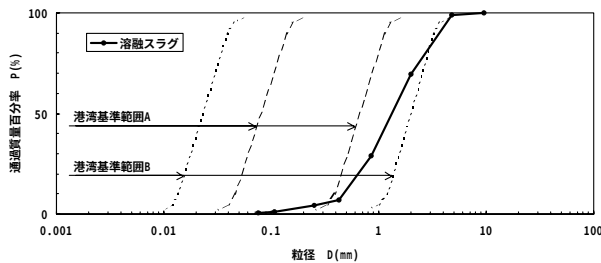


図-1 溶融スラグの粒度組成

いても外力が小さい可能性があり、廃坑埋め立て部での液状化は実際には生じにくいと考えられる。

写真-1に、溶融スラグの顕微鏡写真を粒径0.42mmから0.105mmの各粒径ごとに示す。多くの粒子は尖鋭な角を持ったガラスの破片状で、そのような粒子の中に針状のものが存在し、各粒子には微細な粒子が全く付着していないことが分かる。このような傾向は粒径にかかわらず同様であり、図には示していないが、これより大きな粒径や粒径0.075mm以下についても同じである。

3. 締固め透水特性

溶融スラグの締固め透水特性を求めるために、JIS 1210とJIS 1218に準拠し締固め透水試験を実施した。締固め試験は、試料の含水比を自然含水比、絶乾状態、含水比=6%に調整し、直径100mm、体積1000cm³のモールドを用いて、質量2.5kgのランマーを落下高さ30cm、3層、



写真-1 溶融スラグの顕微鏡写真

突固め回数を各層25回、50回、75回（締固めエネルギー：550kJ/m³ (1Ec)、1100kJ/m³ (2Ec)、1650kJ/m³ (3Ec))として実施した。1Ecで締固めを行ったものについては、その供試体を用いて定水位透水試験を行った。

図-2に締固め透水試験結果を示す。図中には最大密度試験より得られた最大密度を併記した。溶融スラグは均等な粒径の全く粘土分を含まない礫質砂であるため、粒子が水を保つことができなく、一般に求められるような上に凸な突固め曲線は得られない。締固め密度は締固めエネルギーが増加するごとに増加し、その値は最大密度試験より得られた最大乾燥密度よりも大きいことがわかる。締固めエネルギーの増加により密度が増加することや、最大密度試験より得られた最大乾燥密度より締固

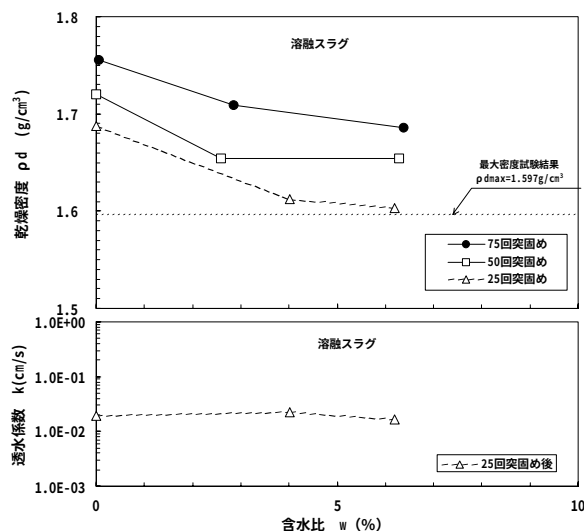


図-2 締固め透水試験結果

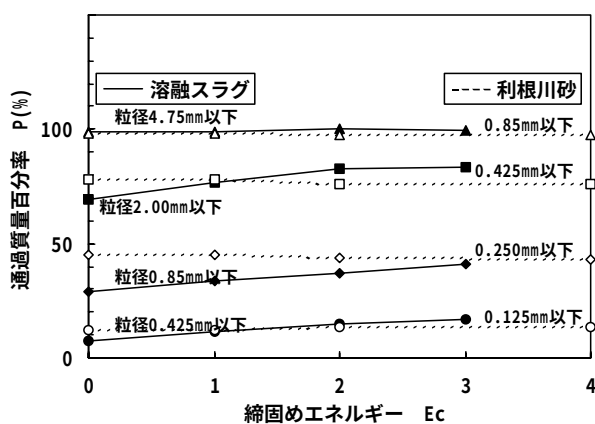


図-3 締固め試験後の各粒径における通過百分率の変化

め後の乾燥密度が大きな値を示すのは、粒子の破碎の影響が考えられる。透水係数は、乾燥密度が変化しているにも関わらず、概ね $k=2 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$ である。

締固めによる粒子破碎が考えられたことから、自然含水比で締固めた試験後の試料について粒度組成を調べた。図-3に、締固め試験後の各粒径における通過百分率の変化を示す。図には比較のために、一般的な砂として利根川砂³⁾で同様の実験を行った結果を併記した。利根川砂の詳細については文献³⁾を参照されたい。利根川砂は、この程度の締固めエネルギーの範囲内では粒度組成がほとんど変化しないのに対し、溶融スラグは締固めエネルギーの増加にともない粒子破碎が生じ細粒化する様子が分かる。したがって、溶融スラグは一般的な砂に比べて破碎性が高く、このため締固めエネルギーの増加にともない乾燥密度が増加し、最大密度試験より得られた最大乾燥密度よりも 1 Ec 以上のエネルギーで締固めた後の乾燥密度の方が大きくなるという特徴があることがわかる。

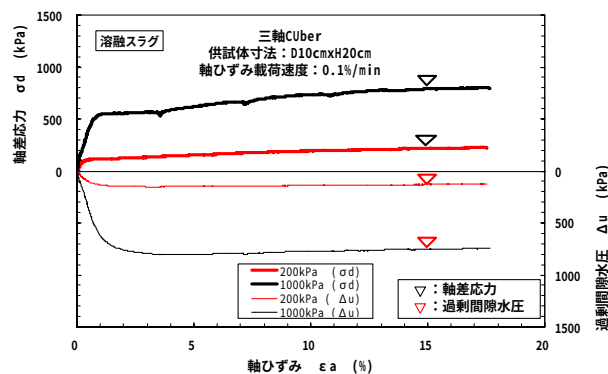


図-4 Cúber 試験より求められた軸ひずみに対する軸差応力と過剰間隙水圧

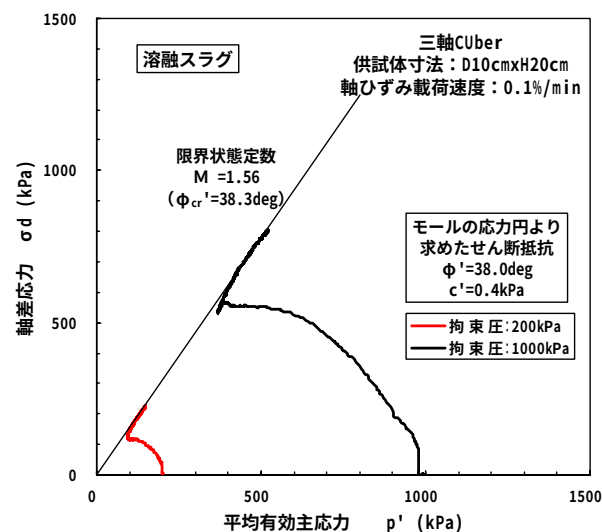


図-5 Cúber 試験より求められた有効応力経路図

4. せん断特性

(1) 圧密非排水せん断特性

溶融スラグの圧密非排水せん断特性を求めるために三軸試験機を用いて地盤工学会基準 JGS 0523-2000¹⁾に準拠し圧密非排水三軸圧縮試験(Cúber試験)を実施した。供試体は、実際の廃坑への溶融スラグの投入を想定し、予めセットしたモールドに漏斗を使い試料を投入した。このようにして得られる相対密度は、約 65% である。三軸試験の供試体寸法は直径 10cm × 高さ 20cm で、試料の飽和化を行った後にそれぞれの拘束圧で圧密を 1 時間実施後(1 次圧密はほぼ終了)、軸ひずみ載荷速度 0.1%/min の変位制御で試験を実施した。初期有効拘束圧は、200kPa と 1000kPa である。なお、溶融スラグの粒子が鋭利であり針状の粒子も存在することからメンブレンが破れないようにメンブレンと溶融スラグの間には薄いプラスチックフィルムを挟みさらにメンブレンの外側にはシリコン

樹脂を塗布した。これは結果的にメンブレンペネトレーションの影響⁴⁾を緩和することに寄与している。

図- 4 に軸ひずみに対する軸差応力 σ_d と過剰間隙水圧 Δu の関係を示す。過剰間隙水圧は載荷初期より発生し、軸ひずみ 3~4%でピークとなりその後減少し始めている。この間軸差応力は常に増加傾向にある。

図- 5 に有効応力経路図を示す。平均有効主応力 p' は式(1)より求めた。

$$p' = \frac{\sigma_d}{3} + \sigma_{c0}' - \Delta u \quad (1)$$

ここで、 σ_{c0}' ：初期有効拘束圧 (kPa)

有効応力経路は、載荷初期より収縮傾向を示し有効応力が減少するが、限界状態線近くで膨張傾向に転じその後は限界状態線に沿って平均有効主応力が回復し、軸差応力も大きくなっている。このような傾向は、中密な砂と同様である。なお、図中には限界状態定数 M 、軸ひずみ 15%における軸差応力でモールの応力円より求めた内部摩擦角 ϕ と粘着力 c' も示した。限界状態定数 M より式(2)から求めた限界状態におけるせん断抵抗角 ϕ_{cr}' は 38.3degであり、モールの応力円より求めた内部摩擦角 $\phi=38.0deg$ とほぼ一致している。

$$M = \frac{6 \sin \phi_{cr}'}{3 - \sin \phi_{cr}'} \quad (2)$$

(2)三軸圧密排水せん断特性

同様に、圧密排水せん断特性を求めるために地盤工学会基準JGS 0524-2000¹⁾に準拠し圧密排水三軸圧縮試験(CD試験)を実施した。供試体の作製方法、飽和方法、圧密方法は、CUber試験と同様であるが、供試体寸法は直径 7.5cm×高さ 15cmであり、CUber試験とは異なった試験装置を用いた。この装置では、供試体の中央から上下に 5cmずつ離れた位置にターゲットが貼付けられ 2つのターゲットの相対変位を求めることで供試体の局所的な微小ひずみを知ることができる^{5),6)}、さらに、ターゲットとほぼ同じ高さ位置に微小な加速計が取り付けられ、三軸試験装置の軸に軽い打撃を与え僅かなねじれ振動を発生

させることで加速度計設置区間のせん断波速度が計測可能になっている⁶⁾。せん断剛性 G は式(3)より求めた。

$$G = \rho V_s^2 \quad (3)$$

ここで、 ρ ：供試体密度 (kg/m³)

V_s ：せん断波速度 (m/s)

局所ひずみ計測は、供試体を非排水状態にし、 1×10^{-5} 以下の軸ひずみを与えて初期の変形係数 E_0 を求めた。変形係数 E とせん断剛性 G の関係は式(4)によって表される。

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (4)$$

ここで、 ν ：ポアソン比

CD試験の供試体は、このように供試体周囲に種々の計器を貼付けたのでシリコン樹脂の塗布は行っていない。軸ひずみ載荷速度は試料の透水性が大きいことから 1%/min とし、変位制御で試験を実施した。軸差応力を載荷中は、軸変位とともに供試体からの排水量を計測し、式(5)よりポアソン比 ν を求めた。

$$\nu = - \left[1 - \frac{\left(\frac{V_0 - \Delta V_i}{(H_0 - \Delta H_i)\pi} \right)^{1/2}}{\frac{V_0}{H_0}} \right] \left(\frac{1}{1 - \frac{\Delta H_i}{H_0}} \right) \quad (5)$$

ここで、 V_0 ：供試体初期体積(cm³)

ΔV_i ：各軸変位における排水量(cm³)

H_0 ：供試体初期高さ(cm)

ΔH_i ：軸変位量(cm)

図- 6 に軸ひずみに対する軸差応力と体積ひずみの関係を示す。体積は常に収縮傾向にあり、応力ひずみ関係はひずみ硬化型である。軸ひずみ 15%までの最大の軸差応力を使いモールの応力円より求めた内部摩擦角と粘着力は $\phi_d=33.4deg$ 、 $c_d=17.7kPa$ であり、 N 値が 4~10 程度の緩い砂の内部摩擦角 30~35deg、または、乾いた角ばった粒子の粒度の良い砂の 34deg⁷⁾と概ね一致し、熔融スラグの内部摩擦角が砂と同程度であることがわかる。なお、図中の点線は割線の変形係数 E_{30} である。

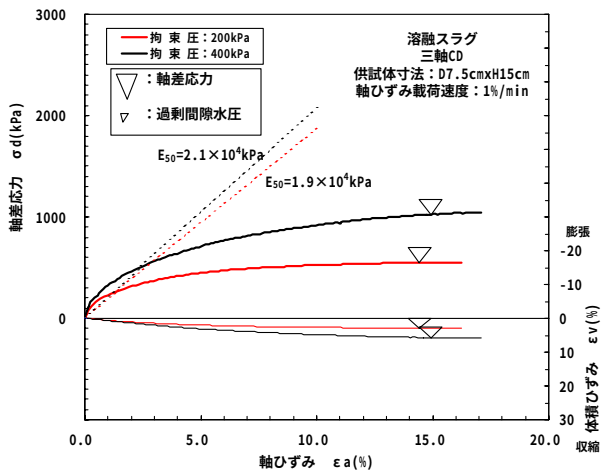


図-6 CD 試験より求められた軸ひずみに対する軸差応力と体積ひずみ

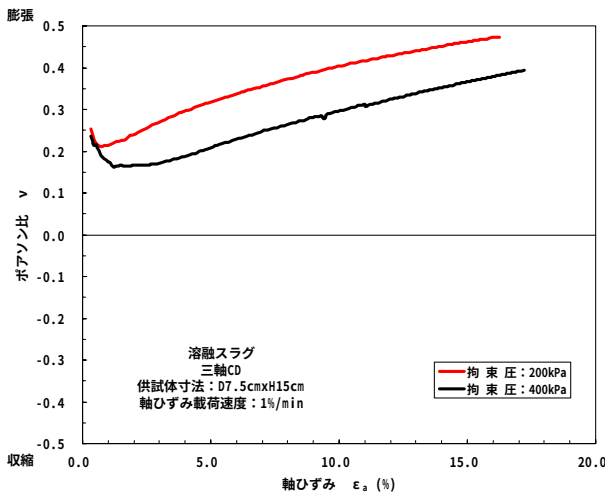


図-7 CD 試験より求められた軸ひずみに対するポアソン比

図-7 に軸ひずみに対するポアソン比の関係を示す。軸ひずみ1%前後で、200kPa と 1000kPa のそれぞれの拘束圧に対し 0.2 と 0.15 程度の最小の値を示し、その後大きくなり軸ひずみ 15%の時点で 0.45 と 0.35 程度となっている。拘束圧の大きな場合の方がポアソン比は小さくなっており、軸ひずみ 5%以下の範囲では、拘束圧 200kPa では $\nu=0.2\sim0.3$ 、拘束圧 1000kPa では $\nu=0.15\sim0.2$ 程度である。

図-8 に、局所変位より求めた初期せん断剛性 G_0 とせん断波速度より求めたせん断剛性を比較して示す。せん断波速度から式(3)よりせん断剛性を求めた。局所ひずみから直接的には変形係数 E_0 が求められるが、非排水条件のため等体積状態となるのでポアソン比 $\nu=0.5$ を仮定し、式(4)より変形係数 E_0 を初期せん断剛性に換算して図中に示した。せん断波速度より求めたせん断剛性はやや大

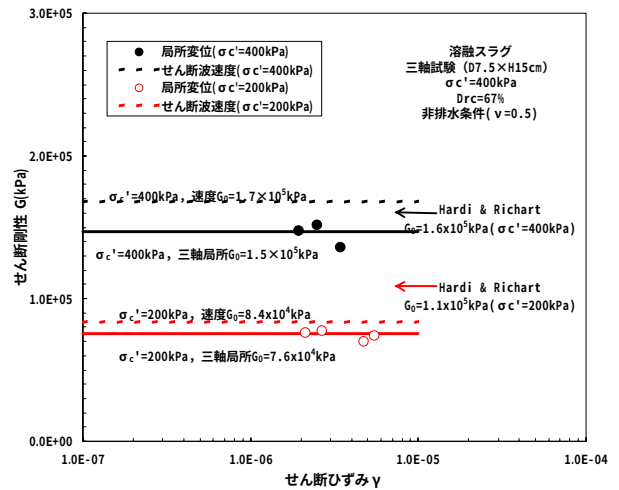


図-8 局所変位より求めた初期せん断剛性とせん断波速度より求めたせん断剛性の比較

きめであるが局所ひずみより求めたせん断剛性とほぼ一致していることがわかる。Hardin and Richart⁸⁾は角ばった粒子からなる砂に対して式(6)を提案した。

$$G_0 = 330 \times 98 \frac{(2.97 - e)^2}{(1 + e)} \left(\frac{\sigma_c'}{98} \right)^{0.5} \quad (6)$$

ここで、 e ：間隙比

σ_c' ：有効拘束圧(kPa)

これより求められる初期せん断剛性は、 1.1×10^5 kPa と 1.6×10^5 kPa であり、溶融スラグの値とほぼ一致している。したがって、溶融スラグの概略の初期せん断剛性を推定する場合には角ばった砂より求められた式(6)が参考になる。

5. 圧縮変形特性

(1)三軸試験より求めた圧縮変形特性

せん断試験と同様の方法で供試体を作製し、Cuber 試験と同じ三軸試験装置を用いて、等方の拘束圧による圧縮変形試験を実施した。圧密過程に入る段階までは Cuber 試験と全く同じ手順である。圧密時間は各 600 分とし、拘束圧は 20kPa から 1800kPa まで載荷した後 15kPa まで除荷した。

図-9 に圧密過程における経過時間と排水量の関係を

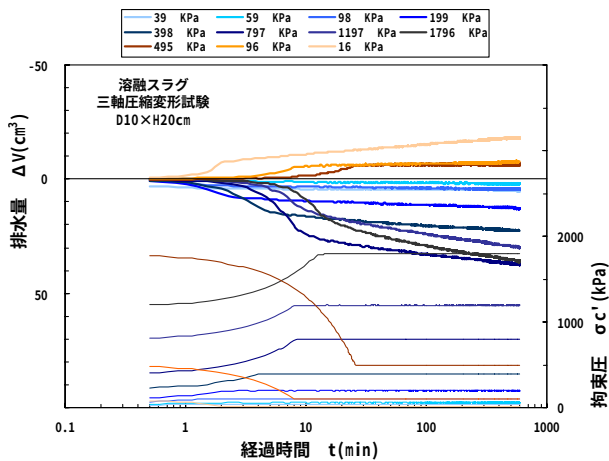


図-9 三軸試験装置より求めた圧密過程における経過時間と排水量

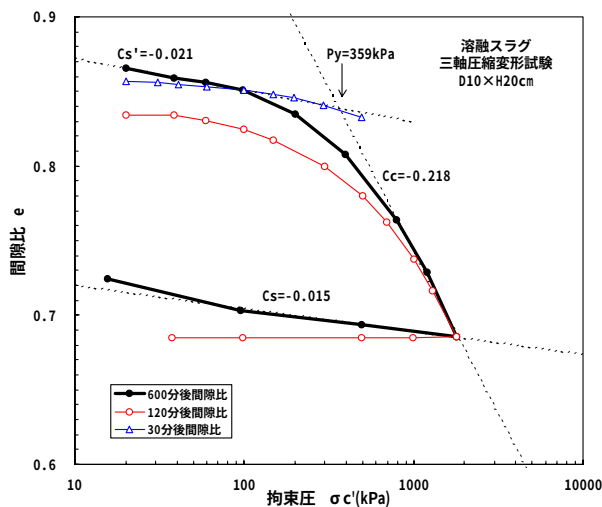


図-10 三軸試験装置より求めた拘束圧と間隙比

示す。図中には、载荷した拘束圧も併記した。一次圧密は終了しているが、特に大きな拘束圧を载荷した場合には600分経過後も排水量が一定の値に収束していないことがわかる。これは、拘束圧の増加にともない粒子破碎が進行的に生じるためだと考えられる。

図-10に圧密時間を600分とした時の拘束圧と間隙比の関係を示す。圧密時間30分と120分とした場合のこれらの関係も併記した。圧密時間が長いものほど間隙比の変化量が多いことがわかる。圧密時間600分の間隙比をみると粘性土と同様に、载荷初期では拘束圧の増加による間隙の変化量が少ないが拘束圧が大きくなると、ある領域からは間隙比の変化量が急増し、除荷領域では载荷初期と同じような勾配で間隙比が大きくなっていることがわかる。

三浦ら⁹⁾は、粗粒材料についても粘性土と同様に圧縮

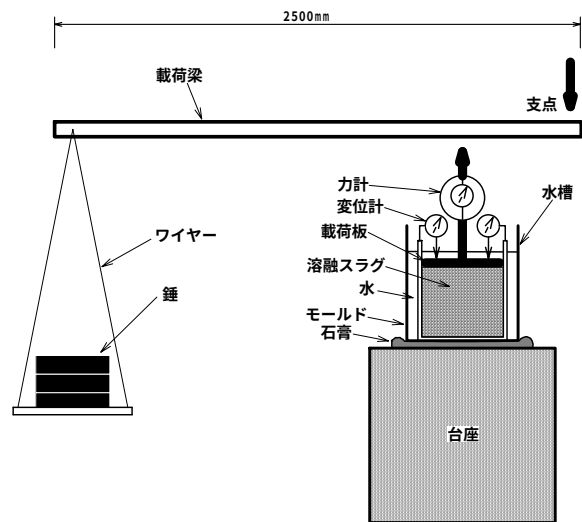


図-11 長期圧縮変形試験装置

応力と間隙比の関係は正規圧密領域と過圧密領域に匹敵した領域が存在し、除荷時と再载荷時の関係は図中で互いにほぼ平行であることを示した。このような過圧密領域と正規圧密領域に匹敵した領域が存在する理由として、それぞれが非粒子破碎領域と粒子破碎領域に対応としている。加えて森ら¹⁰⁾は、このような現象が実際のフィルドムロックゾーンの計測結果からも確認されることを示した。これと全く同じ現象が溶融スラグでも確認され、圧縮変形関係が、片対数紙上の拘束圧と間隙比関係上で過圧密領域と正規圧密領域に分けられる2本の直線に近似できることがわかる。図中には、それぞれを近似した場合の勾配と、等価先行圧縮応力を示した。

(2)長期圧縮変形試験より求めた圧縮変形特性

図-9に示したように、三軸試験より求めた圧縮変形試験では、圧密時間600分では間隙比変化量が完全に終了していないことが認められた。そこで、約3ヶ月間の長期圧縮変形試験を行い長期的な変形特性を確認した。

図-11に長期圧縮変形試験に用いた試験装置の模式図を示す。模式図では、供試体部分を誇張して描いている。長さ2.5mの梁を用い、梁の一端に錘を吊るし、てこの原理を用いて供試体を圧縮した。供試体寸法は、直径10cm×高さ10cmで剛なモールド内にCuber試験と同様な方法で溶融スラグを相対密度が65%になるように投入した。モールドと溶融スラグとの間には、摩擦除去のために厚さ0.2mmのテフロンシートを3枚挟んだ。モールド下端

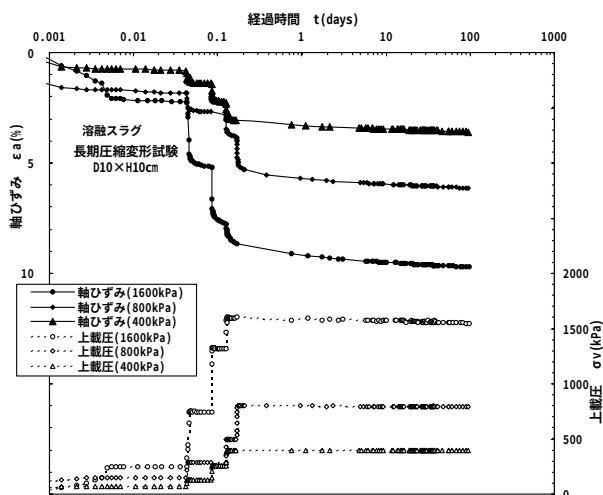


図-12 長期圧縮変形試験装置より求めた圧密過程における時間と排水量 (1600kPa)

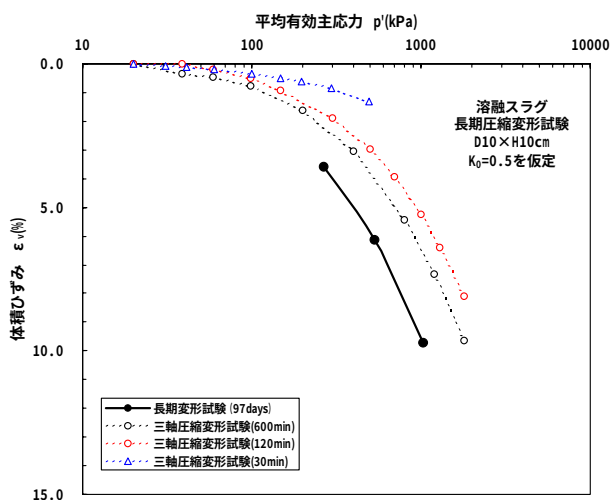


図-13 長期圧縮変形試験装置より求めた平均有効主応力と間隙比

と載荷板には小さな孔が開いており通水が可能になっている。このような供試体を水槽に入れ、水に浸けた状態で試験を実施した。載荷した上載圧は、400kPa, 800kPa, 1600kPa である。

図-12 に経過時間と軸ひずみとの関係を示す。約3ヶ月経過後、圧縮変形は概ね終了しているが、完全には一定値となっておらず、圧縮変形がかなり長期に及ぶことが分かる。

図-13 に、長期圧縮変形試験より求められた97日経過後の体積ひずみと平均有効主応力の関係を示す。平均有効主応力は、静止土圧係数 $K_0=0.5$ と仮定して求めた。また、図中には比較のために図-10 に示した三軸圧縮変形試験結果も併記した。縦軸は、それぞれの供試体の初

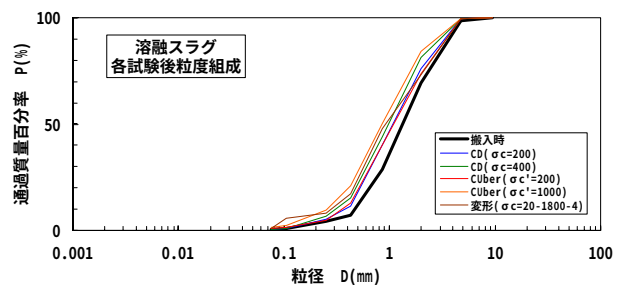


図-14 セン断および圧縮変形試験後と搬入時の粒度組成

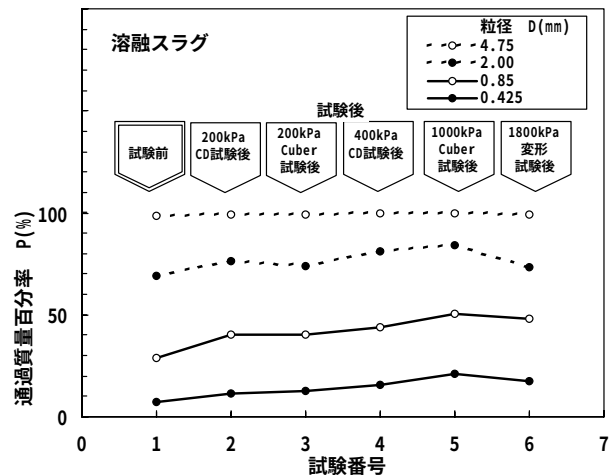


図-15 セン断および圧縮変形試験後と搬入時における通過百分率の変化

期密度が若干異なっているので、比較しやすいように体積ひずみにした。過圧密領域と正規圧密領域が存在し正規圧密領域の変形量が多いという傾向は、圧密時間に関わらず同様であるが、圧密時間の増加とともに体積ひずみが大きくなっていることが分かる。したがって、長期的な圧縮変形量を求めるためには、3ヶ月を超えるかなり長期な試験を行う必要がある。

6. 粒子破碎性

締固め試験結果で前述したように、溶融スラグは破碎しやすい材料である。そこで、図-14 にせん断試験と圧縮変形試験 (圧密 600 分) 後の試料の粒度組成を示す。いずれの試料も試験前よりも粒度組成が細粒側に移行していることが分かる。

図-15 に、図-14 より粒径 4.75, 2.00, 0.85, 0.425mm の各粒径の通過質量百分率を読み取り、それぞれの通過質量百分率と各試験との関係を示す。圧密後せん断を行ったものは、大きな拘束圧のものほど粒子破碎を起こし

細粒化が進んでいることが分かる。一方、等方圧密を最大拘束圧 1800kPa まで実施した三軸圧縮変形試験後の試料の破碎の程度は、1000kPa の拘束圧で実施した CuBer 試験後のものよりも低く、等方圧縮に加えせん断が作用するとさらに粒子破碎が進行することがわかる。

7. まとめ

実験結果より明らかになった溶融スラグの特徴をまとめると以下の通りである。

- (1) 含水比と乾燥密度の関係は、通常の締固め曲線のようなピークが存在せず、絶乾状態のものが最も密になった。また、溶融スラグの粒子は鋭く尖り破碎性の大きな材料であるため、乾燥密度は締固めエネルギーが大きなものほど大きくなる。
- (2) 締固め後の透水係数は、締固め密度に依存せずほぼ一定値で、 2×10^{-2} cm/s 程度であった。
- (3) 中密な状態の排水および非排水せん断特性は、中密な砂と同様な傾向を示す。
- (4) 中密な状態のせん断剛性は、Hardin and Richart が角ばった粒子の砂に対して提案した式からの推定値と概ね一致した。
- (5) ポアソン比は拘束圧の大きな場合の方が小さく、軸ひずみ 5% 以下の範囲では、拘束圧 200kPa では $\nu=0.2 \sim 0.3$ 、拘束圧 1000kPa では $\nu=0.15 \sim 0.2$ 程度である。
- (6) 圧縮変形は、圧密時間 3 ヶ月でほぼ一定値に漸近するが、完全には一定値にならず、溶融スラグの圧縮変形特性を把握するには 3 ヶ月以上の試験が必要になると考えられる。
- (7) 圧縮変形特性は、粘性土と同様に過圧密領域と正規圧密領域に匹敵する領域が存在し、両者の関係はほぼ片対数紙上で 2 本の直線で近似可能である。
- (8) 以上、中密な状態の溶融スラグの特性は、中密な砂とほぼ同様の特性を持っているといえる。ただし、粒子は鋭く尖り破碎性が高いので次の点を特に注意する必要がある。①圧縮変形が長期にわたるので、これを考慮に入れた試験方法と予測を行うこと。②粒子破碎により溶融スラグの比表面積が増加するので、使用にあたってはこの点を考慮すること。

謝辞：なお、本研究は「観光都市・大谷の再生委員会、埋戻し・地盤等技術専門部会」で実施したものである。関係各位に心より感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 地盤工学会：土質試験の方法と解説, 902p., 2000.3.
- 2) 日本港湾協会：第 13 章地盤の液状化, 港湾の施設の技術上の基準・同解説(上巻), pp.281-288, 1999.4.
- 3) 沼田 淳紀, 染谷 昇, 田雑 満孝, 國生 剛治：細粒な土に対する最小間隙比定義方法の提案, 第 11 回日本地震工学シンポジウム, pp.665-670, 2002.11.
- 4) 田中 幸久：メンブレンペネトレーション, 土と基礎, 42-10(441), pp.51-52, 1994.10.
- 5) 千葉 隆仁, 山下 聡, 土岐 祥介：三軸試験と中空ねじり試験による砂の繰返し変形特性, 「地盤および土構造物の動的問題における地盤材料の変形特性一試験法・調査法および結果の適用一」に関する国内シンポジウム, 土質工学会, pp.181-186, 1994.1.
- 6) 國生 剛治, 吉田 保夫, 平岡 良介, 桑原 弘昌, 瀬下 雄一：土槽貫入実験によるまさ土の液状化強度の評価(その 2) —土槽からの不攪乱試料の三軸試験による検討—, 第 34 回地盤工学研究発表会, pp.127-128, 1999.7.
- 7) 地盤工学会：地盤調査・土質試験結果の解釈と適用例, pp.348-349, 1998.3.
- 8) Hardin, B. O. and Richart, F. E.: Elastic wave velocities in granular soils, *Journal of SMF division, Proceedings of ASCE*, SM1, 3407, pp.33-65, 1963.2.
- 9) 三浦 哲彦, 村田 秀一, 安福 規之, 赤司 六哉：粗粒材料の材料定数と応力ひずみ特性, 土と基礎, 33-6(329), pp.13-18, 1985.6.
- 10) 森 吉昭, 内田 善久, 中野 靖, 吉越 洋, 石黒 健, 太田 秀樹：現場転圧された粗粒材料の高応力下における圧縮性状と材料定数, 土木学会論文集, No.687/III-56, pp.233-247, 2001.9.