

セメントで固結された砂の一次元圧縮特性

山口大学工学部 正 中田幸男 兵動正幸 吉本憲正 村田秀一
山口大学大学院 学 ○香月大輔 吉川直孝

1. 序論

固結した粒状材料を用いて、これまでに材料の巨視的な力学特性に与える固結の影響の評価を行ってきた^{1), 2)}。ここでは、一次元圧縮特性に与える固結構造および粒子の物理的特性などの微視的な特性の影響に関する検討を目的として一連の試験を実施した。固結構造を有する粘性土の圧縮特性に関して、未固結の材料の正規圧縮線からの圧縮曲線の突出および明確な降伏を示した後の急激な圧縮などの特徴的な挙動を示すことがこれまでに数多く報告されている³⁾ものの、砂のような粒状材料においては本格的な検討例が少ない。また未固結の粒状材料の降伏やその後の圧縮挙動は粒子の破碎と密接に関係していることが指摘されている⁴⁾ことから、固結材料においても粒子の破碎を考慮し、様々な材料に共通する力学特性を評価することが重要と推察される。降伏後には、固結した材料は急激に圧縮されることが予想され³⁾、同時にこのことは、実地盤において降伏応力を越える過大な荷重が作用した場合に大きな沈下が生じる懸念を示唆しており、工学的にもその圧縮特性を適切に把握することは重要といえる。

2. 試料および試験

試験に用いた試料は、粒度分布の異なる3種類のシリカ砂（Silica_{0.85-2.0}, Silica_{0.18-2.0}, Silica_{0.11-0.6}）と沖縄で採取されたカーボネイト砂（Chiibishi）の計4種類である。各シリカ砂の名称の添え字は、最小・最大粒径を表している。図-1に試料の粒度分布を示す。Silica_{0.85-2.0}およびSilica_{0.11-0.6}は、共に粒径がそろった試料であり、それぞれが粒径の大きなものおよび小さなものとして特徴づけられる。また、Silica_{0.18-2.0}は比較的粒度組成が広範囲にわたっており、Chiibishiと類似した分布を示している。試料の物性は文献⁵⁾に示されており、Chiibishiは粒子形状が極めて複雑であること、またCaO₃を主成分としていることなどから、平均粒径 d_{50} の粒子の単粒子破碎強度 σ_{fm} は、Silica_{0.18-2.0}に比べて小さい。これらの試料に、文献⁶⁾に示されているものと同一の配合割合でセメントを混合し、直径50mm、高さ10mmの固結供試体を作製した。一次元圧縮試験は、鋼鉄製のリング内に供試体を設置し、0.1mm/minの速度で最大約80MPaの鉛直応力まで載荷して行った。

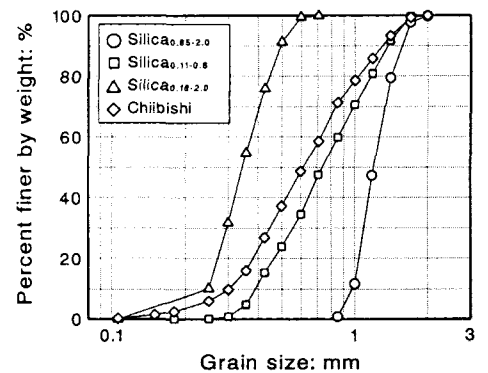


図-1 粒径加積曲線

3. 一次元圧縮特性に与える固結の影響

図-2は、Chiibishiの e - $\log \sigma_v$ 曲線およびその接線勾配である圧縮指数 C_c' と鉛直応力の関係を示している。ここで固結材料の初期間隙比は、セメント粒子の体積をその密度 $\rho_c = 3.10 \text{ g/cm}^3$ を用いて求め、間隙がセメント粒子によって置き換えられるとして求めた。図-2(a)より、セメント添加率 Q_c の増加に伴い初期の間隙比は減少し、図中に示した未固結材料の正規圧縮線NCLからわずかに突出するようになる。図-2(a)の点線で囲んだ部分を拡大した図-2(b)には、図-2(c)に示した圧縮指数 C_c' が0.3となるときの鉛直応力 $(\sigma_v)_{0.3}$

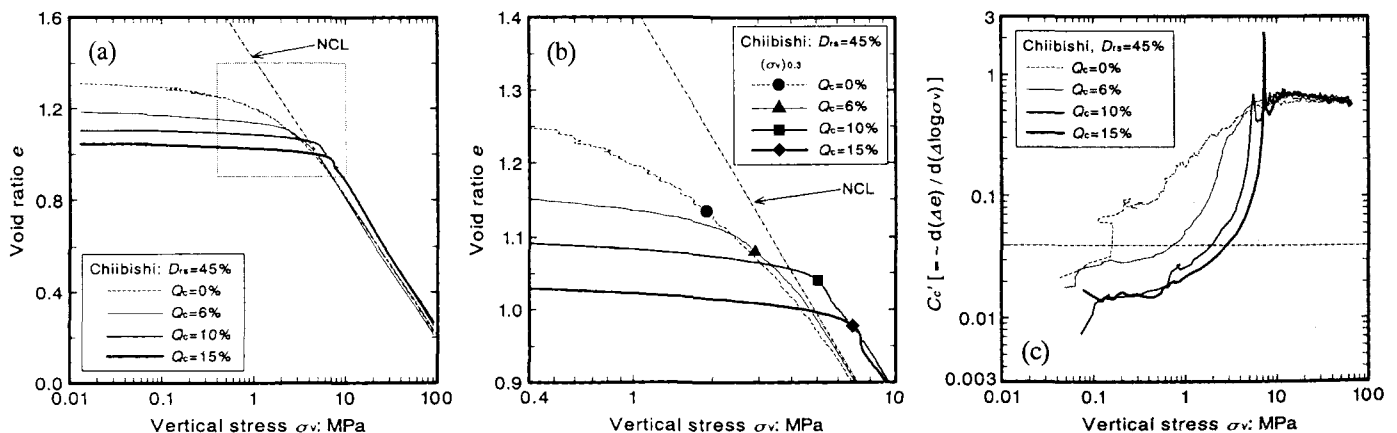


図-2 Chiibishi 供試体 ($D_n=45\%$) の一次元圧縮試験結果; (a) e - $\log \sigma_v$ 曲線; (b) 拡大図; (c) $\log C_c' - \log \sigma_v$ 関係

をプロットを用いて示している。この鉛直応力 $(\sigma_v)_{0.3}$ は、未固結材料においてCasagrande法から決定される降伏応力と対応することが報告されている。今回は固結材料においても、 $(\sigma_v)_{0.3}$ を降伏応力として捉えて検討を行った。図より $Q_c=15\%$ の固結材料の圧縮曲線の形状は、 $(\sigma_v)_{0.3}$ を越える応力域ではわずかながら右側に凸なこぶ状の折れ曲がりをしており、それ以降では急激に圧縮していることがわかる。また、図-2(c)に示した $C_c'=0.04$ となる応力以降において、各固結材料の C_c' の値は急増し始めることが確認できる。以上で示したような挙動は、固結した粘性土で一般的に認められる挙動であり、粒状材料においても同様の挙動が得られるといえる。しかし、固結した各シリカ砂の挙動の変化の傾向は粒度分布に依存して大きく異なっており、特に最も粒径の小さいSilica_{0.11-0.6}においては、 $Q_c=15\%$ の材料であっても未固結材料のNCLからの突出が認められなかった。

図-3は、降伏応力 $(\sigma_v)_{0.3}$ と割裂強度 $\sigma_t^{5),6)}$ の関係を示したものである。 $(\sigma_v)_{0.3}$ の増加傾向は、試料の種類によって異なっていることが確認できる。特にSilica_{0.85-2.0}の降伏応力は、最も固結構造の強いもので比較すると平均粒径の小さいSilica_{0.11-0.6}に比べて1.5倍程度大きい。図-4は、単粒子破碎強度で正規化した降伏応力 $(\sigma_v)_{0.3}/\sigma_{fm}$ と初期間隙比 e_0 の関係である。各材料の初期間隙比の減少はセメント量の増加によるものであり、初期間隙比の減少に伴って $(\sigma_v)_{0.3}/\sigma_{fm}$ の値は増加する傾向が認められる。 $(\sigma_v)_{0.3}/\sigma_{fm}$ の指標は、Nakataら⁴⁾が導入した接点荷重を受け持つ粒子の割合を表す指標 $(\sigma_t)_{50}/(\sigma_{sp})_{Cc=\max}$ と類似のものと捉えることもできる。今回は、降伏時に内部の1個の粒子に作用している応力を求めることができないが、 $(\sigma_v)_{0.3}/\sigma_{fm}$ の値が増加する傾向は、材料の微視的な構造が、より多くの粒子が接点荷重を均等に受け持つ構造へと変化していることを示唆している。図を細かく見ると、3種類のシリカ砂の $(\sigma_v)_{0.3}/\sigma_{fm}$ の増加割合は、平均粒径が最も大きいSilica_{0.85-2.0}で最大であり、平均粒径が最も小さいSilica_{0.11-0.6}で最小となっている。図-5は粒子の単位表面積あたりに付着するセメント質量 D_c/S_R と試料の平均粒径 d_{50} の関係を示したものである。 d_{50} が大きい材料ほど、砂粒子に付着するセメントの質量は顕著に増加する傾向が認められる。

4. 結論

砂のような粒状材料において、固結構造の発達に伴う一次元圧縮特性の変化は、降伏応力の増加や圧縮曲線が未固結材料の正規圧縮線から突出するなどの形で現れることが確認された。このような挙動の変化のメカニズムは、セメント粒子やその水和生成物が粒子間の接点およびその周囲に付着・固化することによって引き起こされる微視的な荷重伝達ネットワークの均質化にあると結論づけられる。

▽参考文献

- 1) 香月大輔, 中田幸男, 兵動正幸, 吉本憲正, 村田秀一: ダイレクシーに着目したセメント固化粒状土のせん断強度特性の評価, 第5回地盤改良シンポジウム論文集, pp. 147-152, 2002.
- 2) Katsuki, D. and Murata, H.: Dilatancy and Strength for a Bonded Granular Material, 12th Asian Regional Conference, 2003. (投稿中)
- 3) Leroueil, S. and Vaughan, P. R.: The general and congruent effects of structure in natural soils and weak rocks, Géotechnique, Vol. 40, No. 3, pp. 467-488, 1990.
- 4) Nakata, Y., Kato, Y., Hyodo, M., Hyde, A. F. L. & Murata, H.: One-dimensional compression behaviour of uniformly graded sand related to single particle crushing strength, Soils and Foundations, Vol. 41, No. 2, pp. 39-51, 2001.
- 5) 山下智, 中田幸男, 兵動正幸, 香月大輔, 吉川直孝, 吉本憲正, 村田秀一: 粒子強度および供試体形状の異なるセメント固結砂の割裂特性, 第55回土木学会中国支部研究発表会発表概要集, 2003. (投稿中)
- 6) 吉川直孝, 中田幸男, 兵動正幸, 香月大輔, 山下智, 吉本憲正, 村田秀一: 試料の物理的性質に着目したセメント固結砂の割裂強度特性の検討, 第55回土木学会中国支部研究発表会発表概要集, 2003. (投稿中)

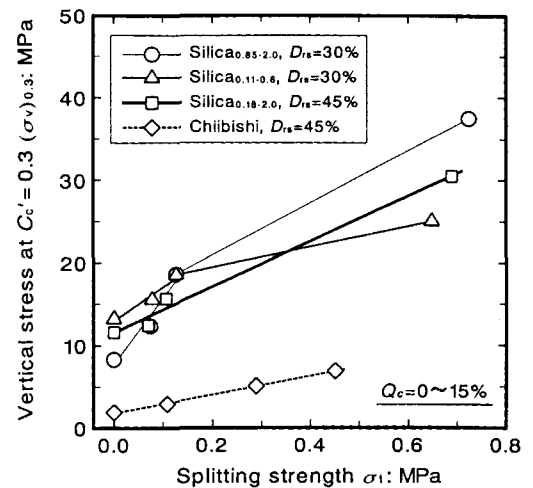


図-3 降伏応力 $(\sigma_v)_{0.3}$ と割裂強度 σ_t の関係

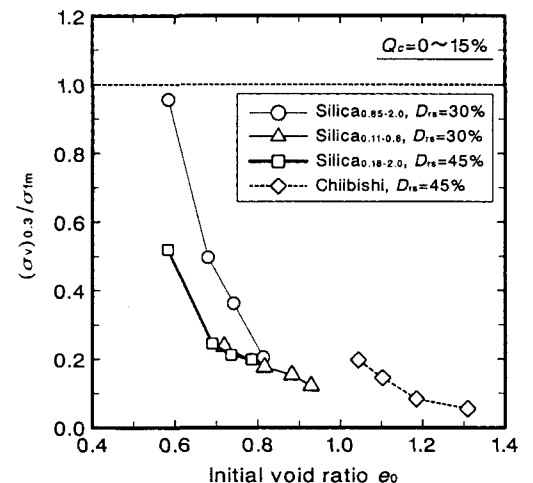


図-4 単粒子破碎強度により正規化された降伏応力 $(\sigma_v)_{0.3}/\sigma_{fm}$ と初期間隙比 e_0 の関係

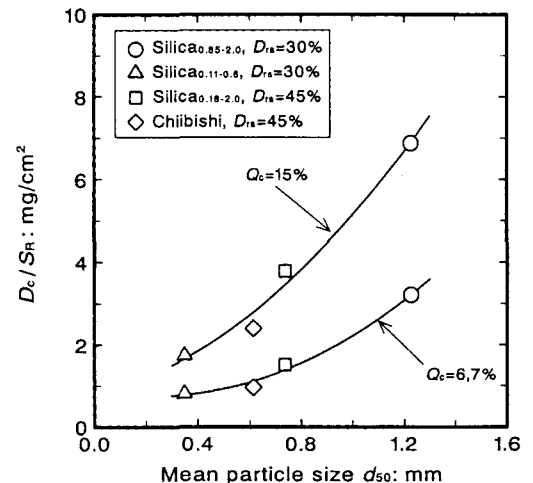


図-5 粒子の単位表面積あたりに付着するセメントの質量 D_c/S_R と平均粒径 d_{50} の関係