

固結粒状材料の割裂および一面せん断特性

山口大学大学院 学生会員 ○多久和学 香月大輔 吉川直孝

山口大学工学部 正会員 中田幸男 兵動正幸 吉本憲正 村田秀一

1.はじめに

粒子間に結合力を有する材料には、火山性土、カルカリアス堆積物に代表される海洋性堆積物などがあり、自然堆積地盤中に広範囲にわたり分布している。また、ゆるい砂地盤にセメンテーションを施す各種改良工法が広く実施されている。このように多岐にわたり存在する固結材料を工学的に取り扱う際、拘束圧が作用する条件下での材料の共通する強度特性を把握し、評価することが重要である。本研究では、より一般的かつ簡便性を有する評価を目指し、定圧一面せん断試験および割裂試験を実施した。その結果より、割裂強度とダイレタンシーおよび強度のダイレタンシー成分との間に密接な関係があることが確認された。

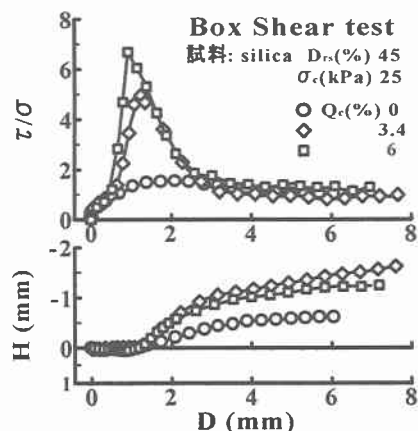
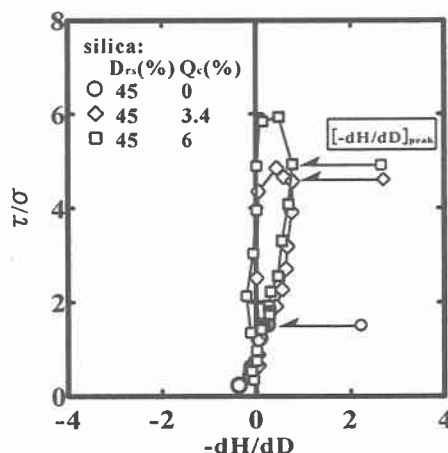
2.供試体作製および実験概要

今回、実験で用いた試料は、シリカ砂(粒径: 0.25~2.0mm)およびガラスビーズ(粒径: 0.85~1.0mm)であり、図中には silica および glass と記した。試料の物性値および供試体作成方法は吉川ら¹⁾で示されたものと同一である。また、実験には割裂試験および定圧一面せん断試験を採用した。割裂試験は、上下の载荷盤により、円盤状(直径: $D=50\text{mm}$, 供試体長さ: $L=20\text{mm}$)の供試体を直径方向に载荷して破壊させる実験である。一面せん断試験における供試体寸法は、 $D=60\text{mm}$, $H=20\text{mm}$ とした。载荷速度は、両実験とも 0.1mm/min で行った。

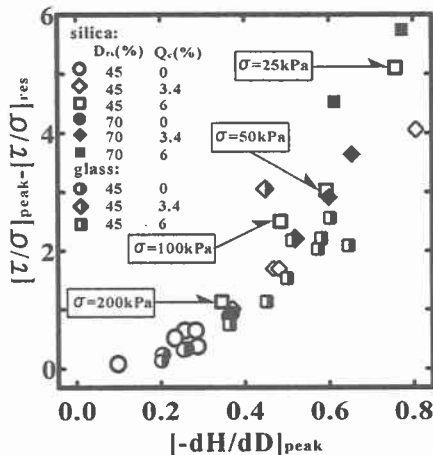
3.結果と考察

比較的低い垂直応力条件下での直接せん断時の固結材料の強度特性について調べるため、一面せん断試験を実施した。垂直応力 σ には材料の変形を計測しうる、もっとも低い垂直応力である 25kPa および $50, 100, 200\text{kPa}$ に設定した。図・1 は定圧一面せん断試験における silica 供試体($D_{rs}=45\%$, $Q_c=0, 3.4, 6\%$)の応力比 τ/σ せん断変位 D 垂直変位 H 関係を示したものである。図より、応力比のピーク $[\tau/\sigma]_{\text{peak}}$ を見てみると、固結材料と未固結材料との間に明確な差が見られ、固結材料において、顕著な正のダイレタンシーが確認できる。また、残留時応力比 $[\tau/\sigma]_{\text{res}}$ は固結、未固結に関らず $[\tau/\sigma]_{\text{res}} \approx 0.9$ とほぼ一定の値を示している。図・2 は、図・1 におけるストレス・ダイレタンシー関係を示したものである。セメント添加率が増加するに伴い $[\tau/\sigma]_{\text{peak}}$ は増加しているが $Q_c=6\%$ における $[\tau/\sigma]_{\text{peak}}$ はダイレタンシー比 $[-dH/dD]$ のピークと一致しないことがわかる。これは、一面せん断試験において、せん断中に主応力方向が回転するなどの影響に起因していると推察される。このような原因を差し引けば、低垂直応力条件下においても $[\tau/\sigma]_{\text{peak}}$ と $[-dH/dD]_{\text{peak}}$ が一致すると考えられる。図・3 は、垂直応力 $\sigma=25, 50, 100, 200\text{kPa}$ におけるピーク時ダイレタンシー比 $[-dH/dD]_{\text{peak}}$ と強度のダイレタンシー成分 $[\tau/\sigma]_{\text{peak}} - [\tau/\sigma]_{\text{res}}$ の関係をまとめたものである。この図より、 $[-dH/dD]_{\text{peak}}$ と $[\tau/\sigma]_{\text{peak}} - [\tau/\sigma]_{\text{res}}$ との間には良好な相関関係が確認できる。また、垂直応力の増加に伴い、 $[-dH/dD]_{\text{peak}}$ と $[\tau/\sigma]_{\text{peak}} - [\tau/\sigma]_{\text{res}}$ は、ともに減少している。試料に glass を用いた供試体においてもこの関係は成立しており、 $\sigma=25\text{kPa}$ という低垂直応力条件下において固結材料のダイレタンシーが強度と密接に関係しているといえる。また、この結果は、吉川らによる三軸圧縮試験結果¹⁾ともよく対応しており、不攪乱試料を用いた結果²⁾においても同様の傾向を示す。

図・4 は、silica 試料を用いた固結供試体($D_{rs}=45\%$, $Q_c=3.4, 6\%$)の割裂試験時における軸荷重 P と軸方向変位 δ 関係を示したものである。この図より、軸荷重はピークを示した後、急激に減少しており割裂破壊をしている様子が確認できる。これよ

図・1 $[\tau/\sigma]$ - D - H 関係

図・2 ストレス・ダイレタンシー 関係

図・3 $[\tau/\sigma]_{\text{peak}} - [\tau/\sigma]_{\text{res}} - [-dH/dD]_{\text{peak}}$ 関係

り得られた最大軸荷重 $P_{\max}$ から割裂強度 $[\sigma_t]_{\max}$ を以下の式(1)により算出した。

$$[\sigma_t]_{\max} = \frac{2 P_{\max}}{\pi D L} \dots (1)$$

ここに $[\sigma_t]_{\max}$: 割裂強度, $P_{\max}$: 最大軸荷重, D : 供試体直径, L : 供試体長さ, である。図・5 は、試料に silica および glass を用いたときの割裂強度 $[\sigma_t]_{\max}$ と一面せん断試験時 ($\sigma=25, 50\text{kPa}$) におけるピーク時ダイレタンシー比との関係を示したものである。この図を見ると、 $[\sigma_t]_{\max}$ の増加に伴い、ピーク時ダイレタンシー比が増加していることがわかる。図・6 は、一面せん断試験における垂直応力 σ を図・5 における割裂強度 $[\sigma_t]_{\max}$ で除した値である $\sigma/[\sigma_t]_{\max}$ とピーク時ダイレタンシー比との関係を示したものである。この図を見ると、 $\sigma/[\sigma_t]_{\max}$ の増加に伴い、ピーク時ダイレタンシー比は、一義的な減少傾向を示している。図・7 は、三軸圧縮試験¹⁾(拘束圧 0.1, 0.2, 0.5, 1.0, 2.0MPa)におけるピーク時ダイレタンシー比 $[-d\varepsilon_v/d\gamma]_{\text{peak}}$ と割裂強度に対する最大有効主応力の比である $p'_{\text{peak}}/[\sigma_t]_{\max}$ との関係を示した図である。この図を見ると、silica と glass の間に違いがみられるが、両試料において拘束圧の増加に伴いピーク時ダイレタンシー比が減少する傾向は、一面せん断試験結果と同様である。よって、拘束圧の増加に伴うダイレタンシーの低下の様子を割裂強度を用いて評価できるといえる。

固結供試体の微視的構造を考えると、粒子間の脆弱な接点は、供試体内にある確率で均等に分布していると推察できる。せん断時において破壊面近傍に存在するこのような脆弱な接点がまず破壊され、比較的堅固な接点で結ばれた粒子により団粒塊が生成されると考えられる。その団粒塊の相互の乗り越えにより大きな正のダイレタンシーが生じると推察される。割裂強度が大きい材料は、破壊面付近における粒子間の脆弱な接点の割合が小さく、せん断時には大きな団粒塊が生じやすくなると推察される。また、有効応力の増加により、このような団粒塊は損傷を受けるために、団粒塊のサイズが低下し、ピーク時ダイレタンシー比が減少すると考えられる。また、0.1MPa~2.0MPa の比較的広範な拘束圧条件下での三軸圧縮試験¹⁾および、今回行った一面せん断試験結果両方において強度のダイレタンシー成分をピーク時ダイレタンシー比から評価できたこと、およびダイレタンシーの有効応力依存性を割裂強度から評価可能であることから、割裂強度および残留強度が得られれば、その材料のダイレタンシー比およびせん断強度があらかじめ予測可能であることを示している。

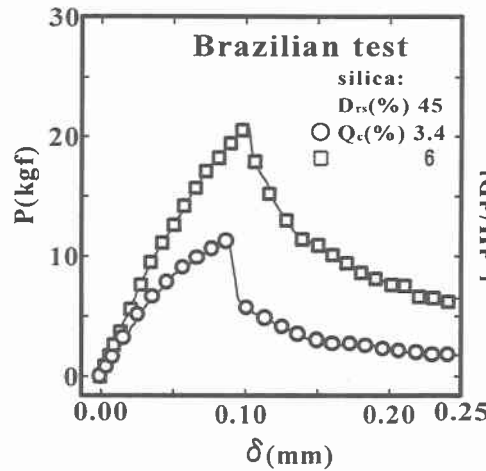
4.まとめ

- ・一面せん断試験により垂直応力が作用する条件下において固結材料の強度のダイレタンシー成分とピーク時のダイレタンシー比には試料の違いによらない一義的な相関関係が確認された。
- ・垂直応力および有効主応力の増加に伴うダイレタンシーの低下の様子を材料の割裂強度に対する垂直応力および有効主応力の割合を用いて、今回用いた全ての供試体で評価することができた。
- ・割裂強度を用いて固結材料のダイレタンシー比および拘束圧作用条件下でのせん断強度を予測することが可能である。

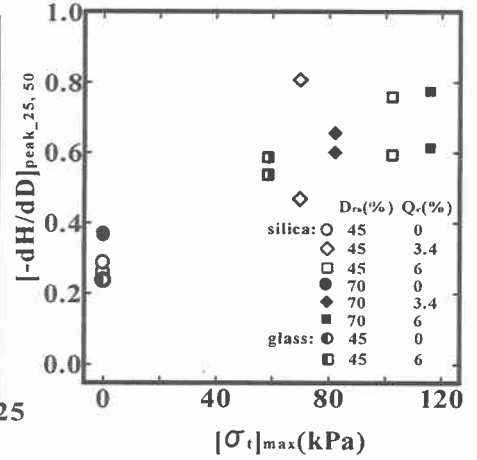
参考文献

1) 吉川直孝, 香月大輔, 中田幸男: ダイレタンシーに着目した固結粒状材料の三軸圧縮挙動, 土木学会中国支部第 54 回研究発表会, 2002, (投稿中)

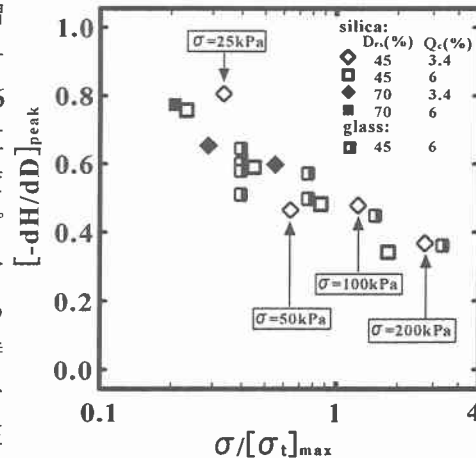
2) Cuccovillo, T. & Coop, M. R.: On the mechanics of structured sands, *Geotechnique* 49, No.6, pp.741-760, 1999



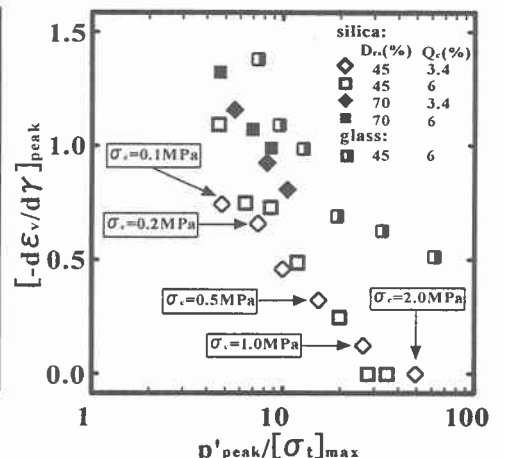
図・4 δ-P 関係



図・5 $[-dH/dD]_{\text{peak}_{25, 50}} - [\sigma_t]_{\max}$ 関係



図・6 $[-dH/dD]_{\text{peak}_{25, 50}} - \sigma/[\sigma_t]_{\max}$ 関係



図・7 $[-d\varepsilon_v/d\gamma]_{\text{peak}} - p'_{\text{peak}}/[\sigma_t]_{\max}$ 関係