

セメントで固結された砂の割裂および一軸圧縮強度特性

山口大学大学院 学生会員 ○山下智 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

粒子同士が固結した自然地盤材料には、代表的なものとして火山性堆積物やカルカリアス堆積物などが挙げられる。これら材料の力学特性の評価に一軸圧縮試験が広く用いられているが、一軸圧縮強度は試料の粒子強度の影響を受ける¹⁾ことが指摘されており、本研究では簡便でかつ力学的により明確な割裂試験を実施し、割裂強度によって固結構造の強さの把握を試みた。また一軸圧縮試験を行い、各試料の物性の違いが割裂および一軸圧縮強度特性に与える影響について比較・検討を行ったところ、一軸圧縮強度に比べ、割裂強度は試料の単粒子破碎強度に因らないことから、割裂強度は固結構造の強さの評価に有用であると結論付けた。

2. 試料および試験概要

試料にはシリカ砂(Silica_{0.85-2.0}, Silica_{0.11-0.6}, Silica_{0.18-2.0})、カーボネイト砂(Chiibishi)、まさ土(Masado_{1.4-1.7}, Masado)を用いた。各試料の物性値を表1に示す。表中には材料の平均粒径 D_{50} における単粒子破碎強度 σ_m も付記した。各試料に所定のセメント添加率 Q_c ($Q_c=3.4, 4, 6, 7\%$)でセメントを混合し吉川ら²⁾と同様の供試体作製方法により固結供試体を作製した。養生期間は14日間とした。ここでセメント添加率 Q_c は試料との乾燥質量比とし、相対密度 D_r は試料のみで考慮した。表1より特にSilica_{0.18-2.0}とChiibishiは粒径の範囲に近いが単粒子破碎強度に差がある、Masadoは粒径の範囲が非常に広いことがわかる。割裂試験は直径 $d=50\text{mm}$ 、厚さ $t=20\text{mm}$ の円盤供試体、一軸圧縮試験は直径50mm、高さ100mmの円柱供試体を用いた。

表1 試料の物性

試料	粒径 (mm)	U_c	ρ_s (g/cm ³)	e_{max}	e_{min}	σ_m (MPa)
Silica _{0.85-2.0}	0.85-2.0	1.304	2.847	0.883	0.635	29.7
Silica _{0.11-0.6}	0.11-0.6	1.498	2.866	1.052	0.672	147.0
Silica _{0.18-2.0}	0.18-2.0	2.197	2.655	0.936	0.588	73.1
Chiibishi	0.075-2.0	2.401	2.821	1.574	0.983	34.8
Masado _{1.4-1.7}	1.4-1.7	1.102	2.600	1.216	0.847	16.1
Masado	-2.0	22.40	2.587	1.353	0.811	42.2

3. 試験結果

(1) 一軸圧縮試験結果：一軸圧縮試験より得られた各供試体($D_r=45\%$)の軸応力 σ_a と軸ひずみ ϵ_a の関係を図1に示す。いずれの供試体も軸応力が最大値を示した後大きく低下しており脆性挙動をとることがわかる。またSilica_{0.18-2.0}において、 $Q_c=3.4\%$ より $Q_c=6\%$ のほうが最大軸応力、即ち一軸圧縮強度 q_u が高く Q_c の増加に伴い q_u は増加することがわかる。

(2) 試料の物性が強度特性に与える影響：図2にセメント密度 D_c と割裂強度 σ_t の関係を示す。ここでセメント密度 D_c は供試体の単位体積当たりに占めるセメント添加量とした。割裂強度 σ_t は割裂試験での最大軸荷重 P_{max} を用いて式(1)より算出²⁾した。

$$\sigma_t = \frac{2P_{max}}{\pi dt} \dots\dots\dots(1)$$

ここで d は供試体直径、 t は供試体厚さを指す。図2より今回用いた固結材料のデータの多くが図中の網掛け内に存在することが確認できる。これよりセメント密度と割裂強度との相関性が確認できる。一軸圧縮強度 q_u においても同様にセメント密度との相関性が確認できた。これより、構造の持つ強さはセメント添加量に強く依存していることが認められる。しかし、Silica_{0.18-2.0} ($D_r=10\%$)はセメント密度の増加によって網掛け内の材料と同様に強度増加傾向がみられるが、相対的に低い割裂強度を示したのは相対密度が低いためだと考えられる。

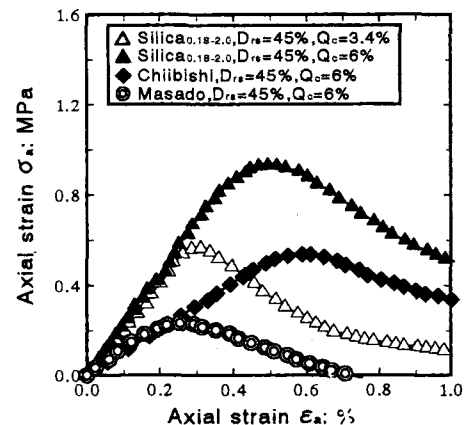


図1 軸応力 σ_a —軸ひずみ ϵ_a 関係

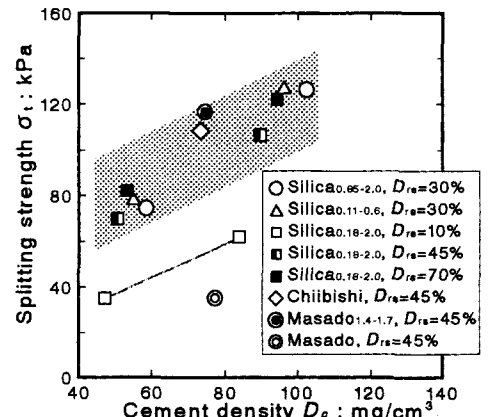


図2 割裂強度 σ_t —セメント密度 D_c 関係

また Masado が他の材料に比べて割裂強度が低いのは試料の粒度分布の範囲が広いことによる影響が考えられる。図 3 には Silica_{0.18-2.0} における割裂強度 σ_t および一軸圧縮強度 q_u と試料のみで考慮した間隙比 e_s の関係を示す。これより e_s が低い供試体ほど両強度が増加していることがわかる。以上で示されたセメント密度および相対密度の増加による強度増加は、セメントの接着面積および接点数の増加によるものと考えられる。次に図 4

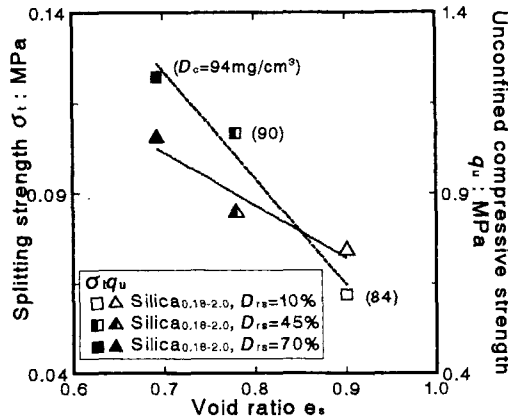


図 3 σ_t , q_u —間隙比 e_s 関係

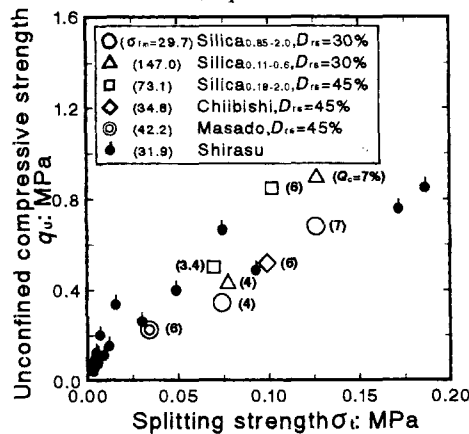


図 5 一軸圧縮強度 q_u —割裂強度 σ_t 関係

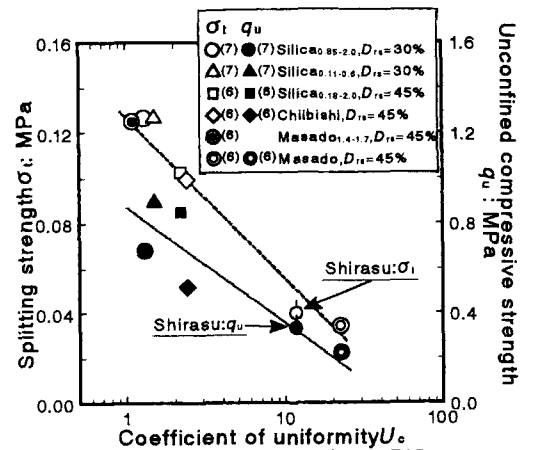


図 4 σ_t , q_u —均等係数 U_c 関係

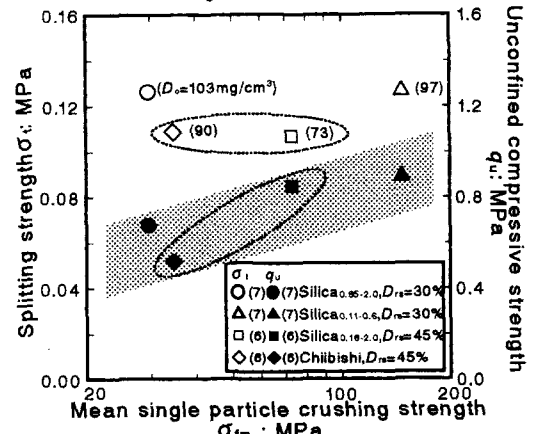


図 6 σ_t , q_u —単粒子破碎強度 σ_{tm} 関係

と比較的条件に近い供試体において割裂強度および一軸圧縮強度と均等係数 U_c との関係について示す。これより割裂および一軸圧縮強度は均等係数の高い供試体ほど低下するといえる。ここでもっとも均等係数の高い Masado は比較的粒径の大きい粒子のまわりに粒径の小さい粒子が集まって存在する傾向にあることが顕微鏡による観察から確認できた。粒径の異なる 2 つの粒子間の接着面積はより小さい粒子サイズに依存し、また粒径が小さい粒子ほどその接点数は少ないと推察される。この固結構造の不均一性により固結構造の比較的弱い箇所から徐々に破壊が進行する結果強度が低下すると考えられる。一方均等係数の低い試料は粒径が揃っており、 U_c の高い材料に比べ均一な固結構造を有していることから比較的強い強度を発揮したと考えられる。また図 5 に示す割裂強度と一軸圧縮強度の関係より、割裂強度の増加に伴い一軸圧縮強度も増加していることが確認できる。さらに粒度分布の近い Silica_{0.18-2.0} と Chiibishi の $Q_c=6\%$ 供試体に着目すると、割裂強度はほぼ同値を示しているが、一軸圧縮強度は σ_{tm} の高い Silica_{0.18-2.0} の方が高いことがわかる。なお、図 4、図 5 上に比較値として不攪乱状態のしらすのデータ^{3), 4)}もプロットしているが、どちらの図も今回の試験結果と概ね似た傾向にあることがわかる。さらに図 6 に示す割裂強度および一軸圧縮強度と単粒子破碎強度の関係から、単粒子破碎強度の低い材料の一軸圧縮強度は低下する傾向にあるのに対し、割裂強度は粒子の破碎のしやすさには依存しないことが確認できる。

4. まとめ

今回用いた比較的構造の弱い固結材料において①割裂強度および一軸圧縮強度はセメント添加量に強く依存すること、土の密度が高いおよび粒径の揃った材料ほど割裂強度は高くなることが認められた。②粒子の破碎による強度の低下が生じにくいことから割裂強度は固結構造の強さを定量的に評価する上で有用である。

【参考文献】1) Ismail, M.A., Joer, H.A., Randolph, M.F., M.F. & Meritt, A.: "Cementation of porous materials using calcite", G. otechnique 52, NO.5, pp.313-324, 2002

2) 吉川直孝, 香月大輔, 中田幸男, "セメントで固結された砂への割裂試験の適用", 第 55 回土木学会中国支部研究発表会概要集, 2003 (投稿中)

3) 村田秀一, 山内豊聡: "乱さないしらすの強度特性の要因について", 土質工学会論文報告集, vol.17, NO.3, pp.81-91, 1977

4) 中田幸男, 兵動正幸, 加登文学, 村田秀一: "破碎性材料の力学特性", 地盤工学会誌, 第 48 巻, 第 10 号 別刷 pp31-34, 2000