

セメントで固結された砂への割裂試験の適用

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
山口大学大学院 学生会員 ○吉川直孝 香月大輔 山下智

1. まえがき スコリア、地山しらすなどの火山性堆積物、オーストラリア北西の大陸棚などに存在するカルカリアス堆積物、セメントなどにより改良された砂などの地盤材料は粒子同士が固結して存在する。本研究では、これらの材料の力学特性の把握を目的とし、固結構造の強さを定量的に把握するために、セメントで固結された砂の供試体に対して割裂試験を適用した。ここでは、割裂供試体と載荷盤の接触面積が割裂特性に与える影響について検討した。また、割裂強度に与える粒子の強度の影響について考察を行った。

2. 試験概要 今回用いた試料およびその物性値は文献¹⁾に示すものと同様である。平均粒径 D_{50} の近い Silica_{0.18-2.0} と Chiibishi の単粒子破碎強度 σ_m は、それぞれ 73.1, 34.8 MPa であり、Chiibishi のほうが低い値を示している。これら試料に、セメントを添加し供試体を作製した。セメント添加率 Q_c は試料との質量百分率で定義し、相対密度 D_{rs} は土粒子のみで計算した。割裂試験に用いた円盤供試体は、直径 $d = 50\text{mm}$ 、厚さ $t = 20\text{mm}$ とした。割裂試験は、平盤により供試体に載荷させる方法(以下、面載荷：Plane lading)および六角形断面の鋼材の角で載荷させる方法(以下、線載荷：Line loading)で行った。また、割裂試験後の供試体から得られる直径 3, 10mm 付近の不規則形状粒子塊に対して、単粒子破碎試験と同様の試験装置および試験方法²⁾で圧裂試験を行った。不規則形状粒子塊の直径は、載荷開始時の載荷点間距離から求めた。

3. 実験結果 図-1 は、面載荷条件下で Silica_{0.18-2.0} および Chiibishi 供試体($Q_c = 6\%$)に対して割裂試験を行った後の破壊の様子である。両供試体とも載荷点を結ぶ直線上に破壊面が形成されている。

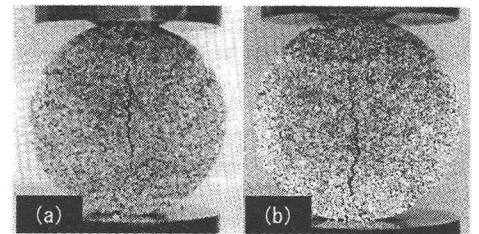


図-1 割裂試験後の割裂供試体の破壊面;
(a) Silica_{0.18-2.0}($Q_c = 6\%$, $D_{rs} = 45\%$);
(b) Chiibishi($Q_c = 6\%$, $D_{rs} = 45\%$)

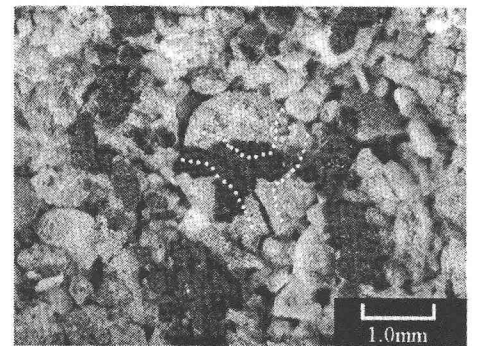


図-2 Chiibishi の割裂供試体($Q_c = 15\%$, $D_{rs} = 45\%$)の載荷点付近での粒子破碎の様子

今回用いた材料が岩石などに比べ比較的剛性の低い材料であるから、供試体と載荷盤の接触面積の増加により割裂強度が過大評価されることも考えられる。両供試体($Q_c = 6\%$)に対して面載荷および強制的な線載荷を行い、得られた軸荷重 P と軸変位 δ の関係を図-3 に示す。両供試体ともに面載荷条件下に比べ線載荷時の最大荷重の値が低下していること、線載荷条件下においては軸変位の値が面載荷時と比較して 3 ～ 4 倍に増加していることが見てとれる。線載荷条件下においては、載荷点に高い圧縮応力が集中することにより、載荷点周辺部の局所的な破壊によるピークが現れ、強度が低下したものと推察される。今回用いた材料においても、面載荷条件下では、中心付近に発生する引張応力が破壊の主要因と考えられる³⁾。面載荷条件下で得られた結果から、割裂強度は次式により求めた³⁾。

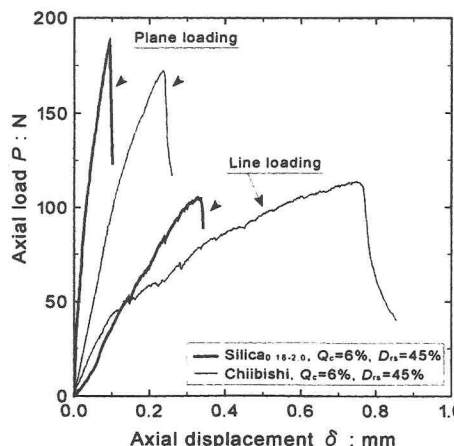


図-3 割裂試験における面および線載荷時の軸荷重 P と軸変位 δ との関係

$$\sigma_t = \frac{2P}{\pi dt} \quad (1)$$

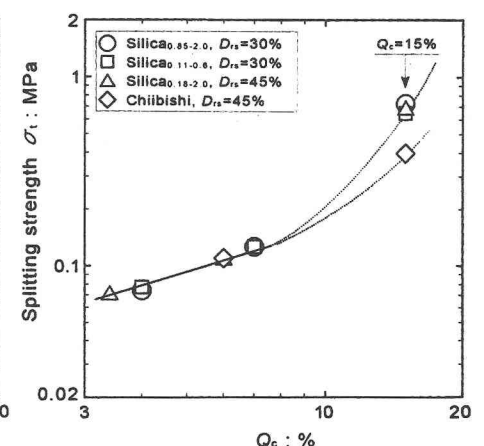


図-4 割裂強度 σ_t とセメント添加率 Q_c との関係

ここで、 σ_t は割裂強度、 P はピーク時の軸荷重、 d は供試体直径、 t は供試体厚さである。

図-4 に割裂強度 σ_t とセメント添加率 Q_c との関係を示す。 $Q_c \leq 7\%$ の供試体において、試料に依らずセメント添加率と割裂強度は一義的な関係にあり、固結構造の強さを定量的に評価できると考えられる。しかし、固結構造の比較的強い $Q_c = 15\%$ の供試体においては、Silica_{0.18-2.0} 供試体に比べ、Chiibishi 供試体の割裂強度が低い値を示している。これは、図-2 に示すように Chiibishi 供試体の載荷点付近で粒子の破碎が確認されたことから、Silica_{0.18-2.0} に比べ Chiibishi の粒子の単粒子破碎強度が低いことに起因していると考えられる。

図-5 に、Silica_{0.18-2.0} および Chiibishi の直径 10mm 付近の不規則形状粒子塊に対して圧裂試験を行った結果、図-6 に同直径の Silica_{0.18-2.0} ($Q_c = 6\%$) の粒子塊において観察された破壊の様子を示す。図より、両粒子塊とも図中に矢印で示した載荷点を結ぶように破壊していることが観察でき、不規則形状粒子塊の破壊においても引張応力が破壊の主要因と考えられる⁴⁾。平松ら⁵⁾、神田ら⁴⁾の報告から、圧裂強度の算定に次式⁴⁾を用いた。

$$(\sigma)_{cluster} = \frac{P}{d^2} \quad (2)$$

ここで、 $(\sigma)_{cluster}$ は不規則形状粒子塊の圧裂強度、 P は破壊荷重、 d は載荷点間距離である。破壊荷重の決定に際して、図-5 に示すように粒子塊の圧裂試験による軸荷重 P と軸変位 δ の関係は多様であることから、載荷中の粒子塊を観察し、破壊面が確認された直前のピークの中からそれまでに最大値を示した点を破壊荷重とした。

図-7 に各試料の粒子塊の圧裂強度 $(\sigma)_{cluster}$ の平均値と平均粒径 d_0 との関係を示す。また、各供試体の割裂強度 σ_t および Silica、Chiibishi の単粒子破碎強度 σ_{tm} も記した。図中には、 $Q_c = 15\%$ の Chiibishi の圧裂強度も示しているが、その粒子塊の破壊の様子は載荷点付近が潰れ平らになる様子が確認された。このことから、引張による破壊ではなく圧縮による端面の破壊が発生していると考えられ、式(2)を用いてよいか検討の余地がある。このため、 $Q_c = 15\%$ の供試体においては試料により圧裂および割裂強度が大きく異なっているのに対し、比較的固結構造の弱い $Q_c = 6\%$ の供試体においては試料の違いに依らず割裂強度および圧裂強度の差は見受けられない。固結構造の強さが試料の単粒子破碎強度に近づくと圧裂、割裂強度ともに粒子の強度の影響を受けると推察される。

4.まとめ 今回用いた材料において、粒子の強度に比べ固結構造の弱い供試体については、割裂試験により得られる強度が固結構造の強さの把握を行う上で有用であると考えられる。

参考文献：1)山下智，中田幸男，兵動正幸，吉本憲正，村田秀一：セメントで固結された砂の割裂および軸圧縮強度特性，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）2)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，土と基礎，Vol. 48, No. 10, Ser.No. 5, pp. 31-34, 2000. 3)平松良雄，岡行俊，木山英郎：岩石の圧裂試験に関する研究，日本鉱業会誌/85, 969, pp. 8-14, 1969. 4)神田良照，八嶋三郎，下飯坂潤三：不規則形状粒子の破碎における寸法効果とエネルギー法則，日本鉱業会誌 86, No. 982, pp. 847-852, 1970. 5)平松良雄，岡行俊，木山英郎：非整形試験片による岩石の引張り強さの迅速試験，日本鉱業会誌，Vol. 81, No. 932, pp. 1024-1030, 1965.

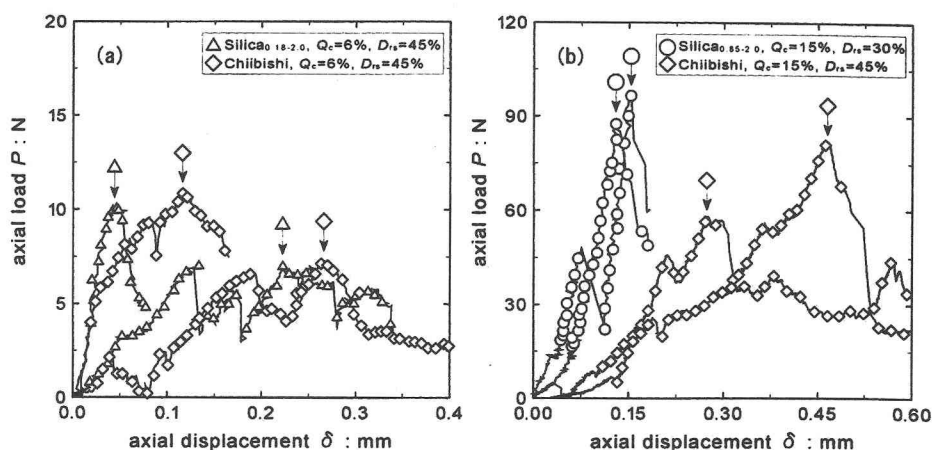


図-5 直径 10mm の不規則形状粒子塊の圧裂試験時の軸荷重 P と軸変位 δ との関係；
(a) $Q_c = 6\%$, $D_{rs} = 45\%$; (b) $Q_c = 15\%$, $D_{rs} = 30\%$, 45%

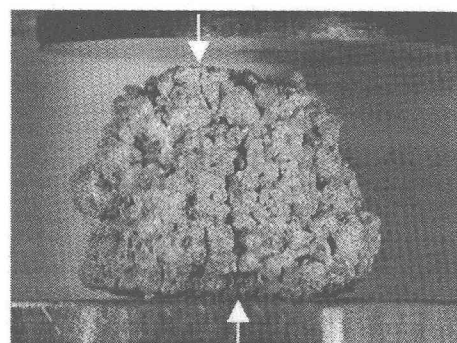


図-6 直径 10mm 付近の粒子塊 (Silica_{0.18-2.0}, $Q_c = 6\%$, $D_{rs} = 45\%$) の破壊の様子

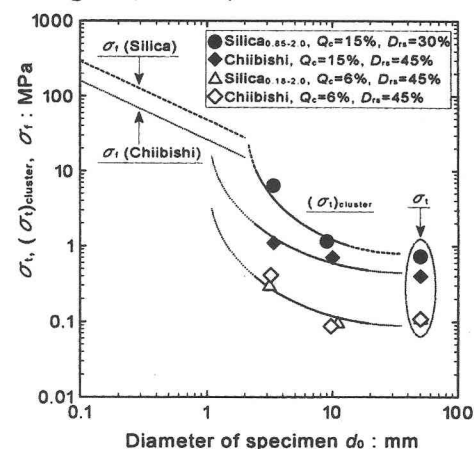


図-7 割裂強度 σ_t 、圧裂強度 $(\sigma)_{cluster}$ および単粒子破碎強度 σ_{tm} と粒径 d_0 との関係