

早稲田大学 正会員 森 麟
 建設省建築研究所 正会員 田村昌仁
 早稲田大学 横山直樹
 早稲田大学 学生会員 ○福井義弘

1. はじめに

土質工学における割裂現象(hydraulic-fracturing)とは、浸透水圧によるダムのコア材の破壊、薬液注入における脈状注入、あるいは液状化に伴う噴砂等において見られるものであるが、割裂圧を支配する要因については材質などによって異なり未だ十分解明されない不明な点が多い。筆者らはこれまで粘性土及び砂質土の割裂現象について調査研究し、割裂圧を与える式を提案してきたが¹⁾、これらの割裂現象は、土に比べて強度が著しく大きい岩石などに適用される「孔壁の引張破壊に起因する割裂現象」とは異なることがわかった。そこで今回は土に限らず土と同程度の強度を有するゲル状結合物を用いて実験を行い、これまでの結果を検証するとともに、材料一般の割裂現象について検討することにした。

2. 実験結果及び試料

図1に使用した中型三軸装置(供試体直径180mm)の概要を示す。実験方法はまず中空円筒状(供試体直径180mm, ボアホール径13mm)に作製した試料を装置にセットし、所定の拘束圧及び初期ボアホール圧を同時に加える。その後拘束圧一定のままボアホール圧のみを手動の注入ポンプを用いて増加させる。割裂圧の判定は、まず注入液を圧入する過程でボアホール下端で注入圧を測定する。そしてその注入圧がピークに達した後急激に低下するが、このときのピーク値を割裂圧とした。割裂の方向は着色注入液を用い、実験後試料を切り出して調べている。使用した試料は表1に示す通りである。注入液は水(フロー値8[秒])とモルタル(フロー値60[秒])である。

3. 割裂圧算定式

材料により提案されている割裂圧算定式には次のようなものがある。

孔壁の引張破壊説²⁾(岩石) 急加圧条件: $P_r = 2\sigma_3 + \sigma_t$, 緩加圧条件: $P_r = \sigma_3 + \sigma_t / 2$

平均応力説³⁾(コンクリート): $P_r = \sigma_t (k - 1) + k\sigma_3$

粘性土の割裂圧実験式(粘性土): $P_r = \sigma_3 + q_u$

砂質土の割裂圧実験式⁴⁾(砂質土): $P_r = m\sigma_3 + R$

極限空洞内圧説⁵⁾(地盤の空洞拡張): $P_r = cF_0 + \sigma_3 F_0$

$$F_0 = (F_0 - 1) \cot \phi$$

$$F_0 = (1 + \sin \phi) \left\{ \frac{E \sec \phi}{2(1 + \nu)(c + \sigma_3 \tan \phi)} \right\}^{\left(\frac{\sin \phi}{1 + \sin \phi} \right)}$$

ここに、 P_r : 割裂圧, σ_3 : 拘束圧, σ_t : 引張強度, c : 粘着力

q_u : 一軸圧縮強度, k : 径比(供試体直径/ボアホール径), E : 弾性係数

ν : ボアソン比, ϕ : 摩擦角, R : 亀裂進展抵抗, m : $1 \leq m \leq 2$ の定数

4. 実験結果及び考察

割裂圧算定式による値と注入実験による実験結果を表2に示す。まず粘性土試料では、水注入で粘性土の割裂圧実験式が適合し、モルタル注入では割裂圧が極限空洞内圧とほぼ等しくなった。これは粘性土の場合、注入材の粘性の影響を強く受け、粘性の小さい水では亀裂がクサビ作用によって進展するのに対し、粘性の大きいモルタルではクサビ作用が起らず、無限土中に空洞を生じさせるのと同じ状況になるためと考えられる。透水性の大きい未固結砂では水でもモルタル注入でも割裂圧は同一で、極限空洞内圧にほぼ等しくなった。これは砂の透水性が大きいといずれの注入材でも間隙中に浸透し、クサビ作用が起らず、注入材の粘性の影響を受けないためと考えられる。溶液型薬液による固結砂の水注入では急加圧条件の孔壁の引張破壊式が合い、モルタル注入の場合は割裂圧が大きくなるが、上述の破壊式に適合するものはなかった。懸濁型薬液自身が固結したホモゲルに対して水注入した場合は緩加圧条件、モルタル注入では急加圧条件の孔壁の引張破壊式が適合する。このホモゲルのように脆性(圧縮強度/引張強度)の割合

が大きく、堅くて脆いものは孔壁の引張破壊式が適していると考えられる。溶液型薬液が固結したホモゲルにモルタル注入した場合は、割裂圧は極限空洞内圧にほぼ等しくなった。アクリルアミド薬液のホモゲルの場合、水及びモルタル注入のいずれでも割裂圧は同一となり、極限空洞内圧及び粘性土の割裂圧実験式の値にほぼ等しくなった。

注入後の割裂状況は、未固結砂では孔壁周辺が全般的にせん断破壊して割裂面としては発生しない。その他の試料では垂直にほぼ真二つに割裂していた。

5. まとめ

- ① 透水性の大きい砂試料では割裂圧に及ぼす粘性の影響はほとんどなく、透水性が小さく変形しやすい粘性土試料は亀裂がクサビ作用によって進展し、割裂圧に及ぼす粘性の影響は大きいと考えられる。
- ② 脆性が大きく堅くて脆い試料は孔壁の引張破壊式に合うと考えられる。

6. 今後の課題

本研究は土やその他固結材料の割裂現象を総合的に取り扱う基礎的研究の第一段階であるが、試料の性状の種類、割裂の理論的考察を考慮すれば今後さらに研究を進めていく必要があると考えられる。

（参考文献）

- 1) 森：土と基礎，Vol.35，NO.8，pp.5-11，1987
- 2) Timoshenko・Goodier：Theory of elasticity，2nd，1951
- 3) 原田・出光・渡辺：土木学会論文集 NO.360，pp.61-70，1985
- 4) 森・田村・千：土木学会論文集 NO.388，pp.61-70，1987
- 5) Vesic：Proc.ASCE，SM3，pp.265-290，1972

表 1 試料の性状

試 料	一軸圧縮強度 q_u kgf/cm ²	引張強度 σ_t kgf/cm ²	弾性係数 E_{50} kgf/cm ²	透水係数 k cm/s	密度 ρ g/cm ³	摩擦角 ϕ °
粘性土A	0.60~1.20	0.20~0.25	80~120	$<10^{-5}$	1.67	0
粘性土B	0.40~0.80	0.12~0.15	35~60	$<10^{-5}$	1.60	0
粘性土C	0.40 以下	—	25~35	$<10^{-5}$	1.60	0
未固結砂	—	—	250~400	6×10^{-3}	1.40	38
固結砂	2.5~2.6	0.50~0.55	180~170	$<10^{-5}$	1.55	35
懸濁型薬液ゲル	7.0~8.0	1.6~1.7	200~300	4×10^{-7}	1.23	0
溶液型薬液ゲル	0.20~0.25	—	25~35	$<10^{-5}$	1.09	0
アクリルアミドゲル	0.20~0.30	0.04~0.06	1~2	1×10^{-9}	1.01	0

なお、粘性土は木節粘土・ベントナイト・石膏・水から成る。未固結砂はケイ砂7号、固結砂はケイ砂6号を使用。懸濁型薬液はエヌタイトSG、アクリルアミドはNITTO-SS、溶液型薬液は水ガラス+グリオキザール+リン酸+水を使用。

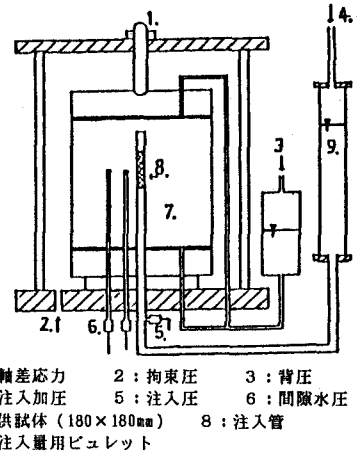


図 1 中型三軸実験装置

表 2 各試料の実験値と割裂圧算定式の値との比較

	引張破壊説 (急加圧条件)	引張破壊説 (緩加圧条件)	平均応力説	割裂圧実験式 (粘性土)	極限空洞内圧	実 験 値		
	σ_3'	σ_3'	σ_3'	σ_3'	σ_3'	水 σ_3'	モルタル σ_3'	
	0.5 1.0 2.0	0.5 1.0 2.0	0.5 1.0 2.0	0.5 1.0 2.0	0.5 1.0 2.0	0.5 1.0 2.0	0.5 1.0 2.0	
粘性土A	1.2 2.2 4.2	0.6 1.1 2.1	10.0 17.0 31.0	1.5 2.0 3.0	3.3 3.8 4.8	1.5 2.0 3.0	2.9 3.4 4.4	
粘性土B	1.1 2.1 4.1	0.6 1.1 2.1	8.7 15.7 29.7	1.1 1.6 2.6	2.5 3.1 4.1	1.1 1.6 2.6	2.2 2.7 3.7	
粘性土C	1.0 2.0 4.0	0.5 1.0 2.0	7.0 14.0 28.0	0.7 1.2 2.2	1.4 1.9 2.9	0.7 1.2 2.2	1.3 1.8 2.8	
未固結砂	1.0 2.0 4.0	0.5 1.0 2.0	7.0 14.0 28.0	0.5 1.0 2.0	6.8 10.5 16.1	4.7 7.4 ---	4.8 8.0 ---	
固結砂	1.5 2.5 4.5	0.8 1.3 2.3	13.7 20.6 34.4	3.0 3.5 4.5	23.1 26.4 31.1	1.6 2.5 4.5	4.9 6.0 8.2	
懸濁型ゲル	2.7 3.7 5.7	1.4 1.9 2.9	28.5 35.5 49.5	8.0 8.5 9.5	16.6 17.1 18.1	1.5 2.0 3.0	3.3 3.8 4.8	
溶液型ゲル	1.0 2.0 4.0	0.5 1.0 2.0	7.0 14.0 28.0	0.7 1.2 2.2	1.2 1.7 2.7	--- --- ---	0.9 1.4 2.5	
アクリルアミド	1.1 2.1 4.1	0.5 1.0 2.0	7.7 14.7 28.7	0.8 1.3 2.3	0.8 1.3 2.3	0.7 1.1 2.1	0.7 1.2 2.2	