

Ⅲ—26

シルト及び粘性土の水圧破砕に関する研究

東北大学（学）○成沢 謙伸（正）柳沢 栄司

1. はじめに：アースダムやロックフィルダムなどにおけるダム堤体やダム基礎のコア材中のクラック発生機構を考える場合に、水圧破砕現象を把握する必要がある。また、ダム基礎にグラウトする場合には水圧破砕は基礎地盤での注入圧や注入効果に関連して最も重要なファクターとなっている。本研究はシルト、シルト分を多く含む粘性土を試料として水圧破砕試験を行い、シルト分が水圧破砕に及ぼす影響を調べたものである。

2. 試験方法：試料には表1に示すようにA～Fの6種類を用いた。D～FはBとCを括弧に示す重量比で混合した試料で、D→E→Fの順で粘土分の含有率が多くなる。供試体の寸法は内径2cm、外径5cm、高さ12cmの中空円筒形である。試料を最適含水比付近で金属製モールド内において5層に分けて突固めた後、 -20°C の冷凍庫で、およそ16時間冷却する。図1に試験装置の概略を示す。この装置は通常の三軸試験装置に若干の変更を加えたもので注入圧、拘束圧及び軸圧は独立に操作できる。

3. 試験結果と解析：試験は大きく二つに分けられる。シリーズ1は試料にシルト（A）を用いる試験、シリーズ2はシルト分を多く含む粘性土（D、E、F）を用いる試験である。表2にシリーズ1の試験結果として注入圧及び破壊状態を示してある。ここで、 ρ_t は供試体の湿潤密度であり、拘束圧は $\sigma_h=0.3\text{kgf/cm}^2$ 、軸圧は $\sigma_v=0.4\text{kgf/cm}^2$ でこのシリーズを通して一定である。この結果から試料にシルト（A）を用いた場合には水圧破砕は認められず、浸透圧によって供試体が水平方向に膨張する expansion なる破壊状態が見られた。

水平方向の力の釣合い、すなわち浸透圧による外向きに作用する力と拘束圧による内向きに作用する力の釣合いを考えると、expansion が生じる計算値は、

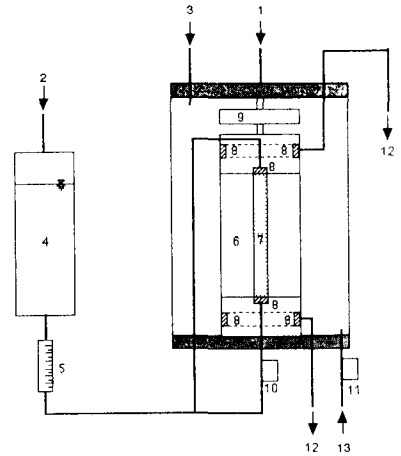
$$P_i = \frac{b \ln(b/a')}{b-a} \sigma_h = 0.983 \text{ kgf/cm}^2$$

となり、実験結果と近い値を示す。ここに、外径 2b、内径 2a、2a'はボアホールに埋め込んであるポーラスストーンの間隙水圧が注入圧と等しい領域の直径であり 0.70 cmである。

次に、シリーズ2の試験結果を表3に示す。拘束圧 $\sigma_h=0.5\text{kgf/cm}^2$ 、軸圧 $\sigma_v=0.6\text{kgf/cm}^2$ はこのシリーズを通して一定である。その結果は、シルト分が非常に多い粘性土（D、E）ではシリーズ1と同様に水圧破砕現象が認められず、expansionまたはせん断破壊によって供試体が破壊された。表3に "shear failure or expansion" と記入してあるのは、その見分けが困難であったからである。粘

表1 試料

試料名	粘土分	シルト分	砂分
A シルト	41%	95.9%	0.0%
B 標準砂の細粒分	8.2	63.1	28.7
C 藤の森粘土	29.0	71.0	0.0
D BとCの混合土	(8.2)		
E BとCの混合土	(7.3)		
F BとCの混合土	(6.4)		



- 1 軸圧 σ_v 2 注入圧 P_i 3 拘束圧 σ_h 4 注水用シンダー
5 流量計 6 供試体 7 ボーラスストーンまたは砂
8 ボーラスストーン 9 軸圧計 10 注入圧計 11 拘束圧計
12 排水管 13 セル水供給管

図1 水圧破砕試験装置の概略図

表2 シリーズ1の試験結果

No	$\rho_t \text{ g/cm}^3$	$P_i \text{ kgf/cm}^2$	破壊状態
1	1.858	(0.90)	継続不可
2	1.697	(0.52)	継続不可
3	1.695	1.00	expansion
4	1.710	1.05	expansion
5	1.663	1.00	expansion

土分がD, Eよりは多いFを用いた試験では水圧破碎が認められた。次に、試料Fの試験結果を解析するために、浸透圧を考慮した水圧破碎基準を求めた。それは、粘土分が多い試料(C)を用いる時は、供試体を不透水性と見なし、いわゆる”一様の圧力を受ける厚肉円筒”の問題と見なし供試体内の応力を求め、ボアホール近傍における局所的なせん断破壊をモール・クーロンの破壊基準を用いて水圧破碎基準を求められる。しかし、試料Fはシルト分が試料Cよりもかなり多いので透水性による浸透圧の影響を考慮しなければならない。そこで透水は平面内の2次元流れでDarcyの法則に従うものとし、供試体は等方、均質、弾性体と見なし平面ひずみ状態にあると近似して供試体内の応力分布を求めた。さらに、ボアホール近傍の局所的なせん断破壊によって亀裂が生じるものとして、モール・クーロンの破壊基準を用いて求めた水圧破碎基準を下に示す。

$$P_f = \frac{2b^2(1 + \sin\phi_u)\sigma_h + 2C_u(b^2 - a^2)\cos\phi_u}{\left\{ \frac{b^2}{1-\mu} + \frac{1-2\mu}{2(1-\mu)} \cdot \frac{b^2 - a^2}{\ln(b/a)} \right\} - \left\{ \frac{1-2\mu}{1-\mu} b^2 - 2a^2 - \frac{1-2\mu}{2(1-\mu)} \cdot \frac{b^2 - a^2}{\ln(b/a)} \right\} \sin\phi_u}$$

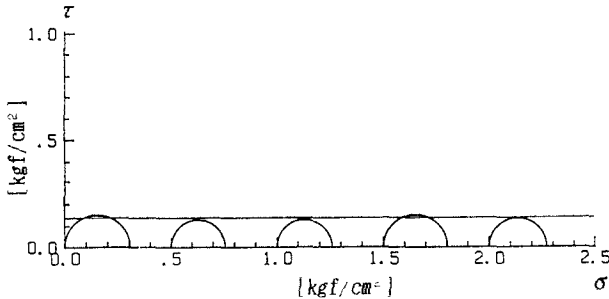
ここに、 C_u, ϕ_u は三軸試験(UU)より求める強度定数で、 $C_u=0.14 \text{ kgf/cm}^2$, $\phi_u=0.0^\circ$ である。図2に三軸試験結果を示す。 μ はボアソン比であり、非排水条件の下で飽和粘性土が非圧縮性に見なせる場合には、 $\mu=0.50$ であるが、本試験ではシルト分の多い粘性土が試料であって排水性を無視できないので $\mu < 0.50$ である。表3に μ が0.50, 0.45, 0.40の時に上式から求められる水圧破碎基準を示す。すなわち $\mu=0.50$ の時は非排水条件のために浸透圧の影響がないとみなした場合と等価であり、上式に $\mu=0.5$ を代入すると、いわゆる”一様の圧力を受ける厚肉円筒”の問題と見なしして求めた水圧破碎基準と一致する。試料Fは表3の水圧破碎基準から $\mu < 0.50$ の時のの方が試験値と良く一致するので排水による体積変化の影響(ボアソン比の影響)が無視できない事を示している。

表3 シリーズ2の試験結果

No	試料	$\rho_t \text{ (g/cm}^3\text{)}$	$P_t \text{ (kgf/cm}^2\text{)}$	破壊状態	透水係数
6	D	1.798	0.67	shear or expansion	$5 \sim 10 \times 10^{-4}$ (cm/s)
7	D	1.838	0.77		
8	D	1.883	0.66		
9	D	1.880	0.64		
10	E	-	-	shear or expansion	$3 \sim 8 \times 10^{-5}$ (cm/s)
11	E	1.898	0.78		
12	E	1.920	0.63		
13	E	1.903	0.68		
14	E	1.894	0.66	水圧破碎	$2 \sim 8 \times 10^{-6}$ (cm/s)
15	F	1.959	0.63		
16	F	1.954	0.65		
17	F	1.950	0.68		
18	F	1.977	0.69		
19	F	1.988	0.66	水圧破碎	

表4 水圧破碎基準

μ	$P_f \text{ (kgf/cm}^2\text{)}$	
	計算値	実験値
0.50	0.618	0.63
0.45	0.649	5
0.40	0.678	0.69



4. 結論

図2 試料Fの三軸試験(UU)結果

1. シルトを用いた試験では水圧破碎は認められず、他の破壊形態によって供試体が破壊される。
2. シルト分が非常に多い粘性土(D, E)ではシルト(A)と同様に水圧破碎が認められない。
3. シルト分が多い粘性土(F)では透水性を無視できず、排水による体積変化の影響を考慮した水圧破碎基準が必要である。

参考文献 Komak Panah, A., and Yanagisawa, E., "Laboratory Studies of Hydraulic Fracturing Criteria in Soil", Soil Mech. and Found. Eng., Vol.29, No.4, Dec, 1989, pp.14-22