

III-15 砂の水圧破砕に関する研究

東北大学（学）○宮崎 竜聖 Komaki Panah.A.（正）菅野 高弘

1. はじめに：アースダムやロックフィルダムにおけるダム基礎やダム堤体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。本研究では、実験的に砂の供試体中に種々の流速で水が流れる場合の応力状態について調べ、水圧破砕による破壊状況を明らかにしている。

2. 実験方法：試料は豊浦標準砂を用い、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砂を含水比15%の状態、金属製モールド内において5層にわけて突固めた後、 -20° の冷凍庫でおよそ3時間冷却する。また、供試体の内側には内圧をかけるために特別なポーラスストーンがあらかじめ入れてある。図1に実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、内圧、拘束圧および軸圧は独立に操作できる。実験手順は、供試体を装置におき、排水紙を表面にまいてメンブレンでおおう。セル内に水を浸した後、軸圧と拘束圧を条件に合うように加え、16時間ほど融解のために放置する。その後、供試体中の空気を排除し飽和させ内圧のみを増加させる。すべての試験で加圧速度は一定であり、 $0.15 \text{ kgf/cm}^2/\text{min}$ とする。これは試料の透水係数より決めたものである。

3. 実験結果と解析：まず、拘束圧、軸圧、流れの状態を変化させて実験を行った。表1に試験結果として内圧および破壊状態を示してある。ここで、 ρ_t は供試体の密度、 σ_h は拘束圧、 σ_v は加圧板での軸圧、 u_0 は供試体表面の間隙水圧、 P_c は内圧で破壊が生じた時の破砕圧 P_c に等しい。この結果から、非常に高い内圧がかかる場合には水圧破砕は認められず、供試体中の流れによる力でのヒービングが起こった。理論的には、内圧は不透水性メンブレンのために $2\sigma_h$ を越えないことになる。そこで、内圧が $2\sigma_h$ より大きい場合の供試体の挙動と結果から間隙水圧が拘束圧を越えたときについて次のように考えられる。最初、表面の水平有効応力は拘束圧に等しかったのが、内圧の増加でポテンシャルとして $P_c > \sigma_h$ となる部分が液化化して、残った部分に作用する内圧は拘束圧に等しくなる。このことは、水平方向の圧力が非常に高くなっても水平方向圧力では破壊しないが、残った部分に作用する軸力によって破壊するであろうことを示している。これらの砂の挙動から、この種の土では水圧破砕は起こらないと言えるであろう。さらに、シリーズ2とシリーズ3として別の試験を行った。シリーズ2では σ_h と u_0 を固定して一定の内圧 $P_c (=P_c)$ を試験ごとに変え

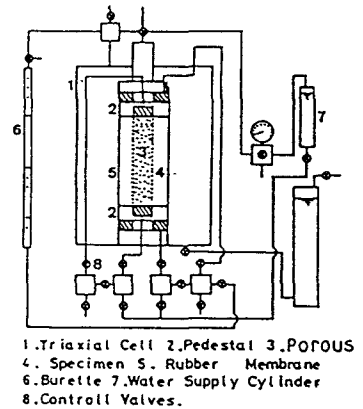


図1. 水圧破砕実験装置
Hydraulic fracturing apparatus.

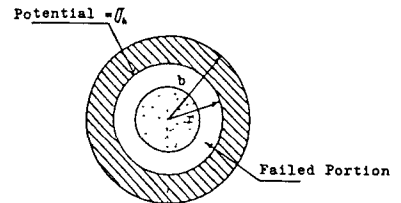


図2. 供試体断面の破壊説明図
Section of sample with two portions with potential less and greater than confining pressure.

てかけておき、せん断破壊が起こるまで σ_v を増加させていく。図3に結果をグラフにして示す。シリーズ3では逆に σ_v を一定にして、せん断で破壊するまで P_i を増加させる。図4はこの結果である。図中にある曲線はモール＝クーロンの基準から得られる次式を表わしている。

$$\sigma_1' = \sigma_3' \tan^2(\pi/4 + \phi'/2)$$

ここに

$$\sigma_3' = \sigma_h - u_0$$

$$\sigma_1' = \frac{(\sigma_1 - \sigma_1^{(1)}) (b^2 - a^2)}{(b^2 - a^2)}$$

$$\sigma_1^{(1)} = \frac{P_i(b^2 - a^2 \ln(b^2 e/a^2))}{2(b^2 - a^2) \ln(b/a)} + \frac{u_0(a^2 - b^2 \ln(a^2 e/b^2))}{2(b^2 - a^2) \ln(b/a)}$$

$$r^2 = \exp 2 [(\sigma_h \ln(b/a) - P_i \ln b + u_0 \ln a) / (u_0 - P_i)]$$

$a = 1 \text{ cm}$, $b = 2.5 \text{ cm}$ である。これは、砂の場合における水圧破碎の問題に適用できるものと考えられる。

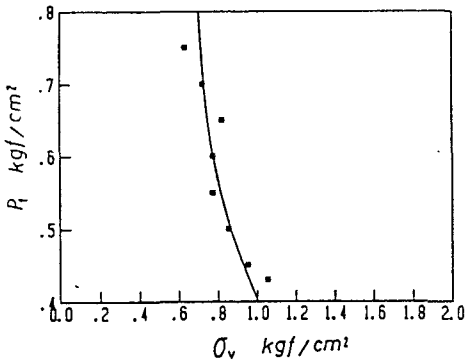


図3. シリーズ2の結果と水圧破碎基準の比較
Comparison between hydraulic fracturing criterion and test results of second series.
($\sigma_h = 0.43$ and $u_0 = 0.3 \text{ kgf/cm}^2$, $\phi' = 46^\circ$)

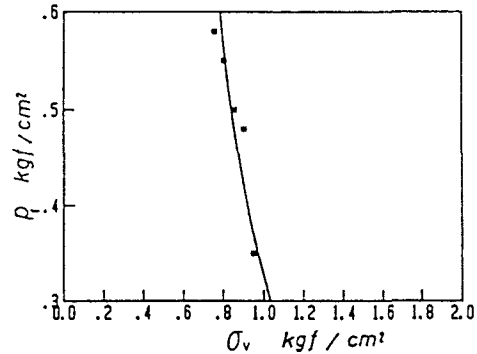


図4. シリーズ3の結果と水圧破碎基準の比較
Comparison between hydraulic fracturing criterion and test results of third series.
($\sigma_h = 0.3$ and $u_0 = 0.1 \text{ kgf/cm}^2$, $\phi' = 43^\circ$)

4. 結論：砂質土中では、比較的高い注入圧のときでも水圧破碎現象は起こらないが、孔壁付近では間隙水圧の増加に伴って破壊するとされる。本研究においては、上に示したように理論式と実験値がよく一致しているため砂中にグラウトする場合の許容注入圧を決定する上で、有用なものにできるであろう。また、この結果は様々な大きさの供試体にも適用できる。十分に大きな外径のときには鉛直上向きの圧力に比較して液状化部分の影響は非常に少なく、高い注入圧時にはせん断破壊することはないが、強制注入法では加圧時間の増加とともにさらに多くの液体注入によって供試体内部の動水勾配は小さくなっていくであろう。これは時間的にみて、鉛直上方応力の増加に主な影響を及ぼす u_0 の値が増加していくことになる。このように、流れの立場から計算できる加圧時間は許容注入圧の決定に際して重要な役割を果たすと考えている。

参考文献

Komak Panah.A., and Yanagisawa.E., "Laboratory Studies Of Hydraulic Fracturing In Soil", Proc. of 23rd Conf. on Soil Mech. and Found. Eng., 1988, pp. 505-508