

III-445

粘性土の水圧破碎基準と亀裂面方向に関する研究

東北電力 正会員 ○成沢謙伸
 東北大学工学部 正会員 柳沢栄司
 東北大学工学部 学生員 米原久人

1. まえがき

粘性土の水圧破碎は局所的な間隙水圧の上昇による亀裂現象であり Teton ダム（コア型のアースダム）の水道の生成による決壊の原因のひとつと考えられている。本研究は $Ali^{1)}$ と森²⁾の研究をもとに応力で与えられる境界条件の違いによる破碎注入圧と亀裂面の方向の違いを実験的に考察した。

2. 実験概要

試料として藤の森粘土を用い、供試体は内径 $2a=2\text{cm}$ 、外径 $2b=5\text{cm}$ 、高さ $2h=12\text{cm}$ の中空円筒形のものを使用した。実験装置の略図を図1に示す。拘束圧 σ_c と軸圧 σ_v を予め定めた値に固定し、注入圧 P_i を供試体に亀裂が発生するまで上昇させる。供試体の側面には注入水の排水を容易にするため排水布を巻き付け、供試体内を浸透する注入水の流量を測定する事により流量が急増する時点での注入圧を破碎注入圧とした。亀裂面の方向の模式図を図2に、実験結果を図3に示す。軸圧と拘束圧の大小関係によって亀裂面の方向が変化するが破碎注入圧はほとんど軸圧によらず一定であった。

3. 供試体内の応力解析

この問題は変位・ひずみ・応力が θ 方向に変化しない軸対称問題である。境界条件は軸圧と注入圧の z 方成分のみが作用している場合と拘束圧と注入圧の r 方向成分のみが作用している場合との2つに分解して考える。前者の場合はそれらの合力が σ_z として供試体に一様に分布しそれ以外の応力成分はすべてゼロであると考え、後者の場合にのみLoveの応力関数を用いた。この関数は重調和関数でベッセル関数の無限級数とルジャンドルの多項式から導き出される多項式との和によって表される。その結果、拘束圧と注入圧の差が水圧破碎を生じさせる程度ならば実験精度 0.01kgf/cm^2 のオーダーで平面ひずみを仮定して得られる線形弾性解で十分である事が判明した。ただし $z=\pm h$ の端面において任意の r について $\sigma_r=0$ としたい所を近似としてサンブナンの原理を用いて端面での σ_z の合力がゼロであるという境界条件に置き換えた。

4. 水圧破碎基準

水圧破碎は供試体の内壁近傍($r=a$)におけるせん断破壊によって生じるものと仮定し、モール・クーロンの破壊基準を用いた。内壁近傍での主応力は図4に示すように $P_i, \sigma_{\theta\theta}, \sigma_{zz}$ である。 $\sigma_{\theta\theta}$ は平面ひずみを仮定して得られる線形弾性解で近似し、 σ_{zz} は軸圧と注入圧の z 方成分の合力として求められる。鉛直方向亀裂時の最大主応力 σ_1 は実験の境界条件から P_i 、最小主応力 σ_3 は $\sigma_{\theta\theta}$ となる。一方、水平方向亀裂時は軸圧が鉛直方向亀裂時と比較して小さいので σ_2 と σ_3 が入れ替わり $\sigma_1=P_i, \sigma_3=\sigma_{zz}$ となる。中間主応力の影響は無視し、この最大・最小主応力をモール・クーロンの破壊基準

$$\sigma_1 - \sigma_3 = (\sigma_1 + \sigma_3) \sin \phi_u + 2C_u \cos \phi_u$$

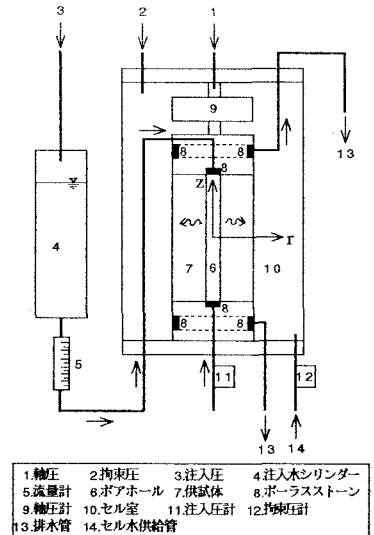


図1 実験装置の略図

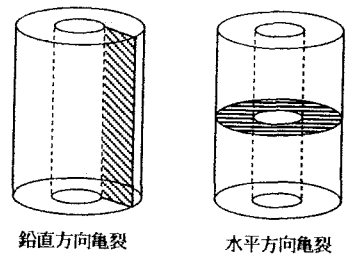


図2 亀裂面方向の模式図

に代入すると、それぞれの亀裂面方向の水圧破碎基準は

$$\begin{aligned} \text{鉛直方向亀裂} \quad P_{fv} &= \frac{1 + \sin \phi_u}{1 + \frac{a^2}{b^2} \sin \phi_u} \sigma_c + \frac{\left(1 - \frac{a^2}{b^2}\right) \cos \phi_u}{1 + \frac{a^2}{b^2} \sin \phi_u} C_u \\ \text{水平方向亀裂} \quad P_{fh} &= \frac{1 + \sin \phi_u}{1 - \left(1 - 2 \frac{a^2}{b^2}\right) \sin \phi_u} \sigma_v + \frac{2 \left(1 - \frac{a^2}{b^2}\right) \cos \phi_u}{1 - \left(1 - 2 \frac{a^2}{b^2}\right) \sin \phi_u} C_u \end{aligned}$$

となる。 ϕ_u, C_u はそれぞれ非圧密・非排水条件下での内部摩擦角と粘着力である。この値は水圧破碎時の含水比に調整した供試体を用いた三軸試験から決定した。 $(C_u=0.21 \text{ kgf/cm}^2, \phi_u=1.9^\circ)$ 図3に実験結果と併せてこの水圧破碎基準を示す。

5. 注入圧による粘着力の低下について

実験結果と水圧破碎基準を比較すると鉛直方向亀裂の場合両者はよく一致するが、水平方向亀裂の場合は一致しない。その原因のひとつとして注入圧による粘着力の低下を考慮してみた。実際には内部摩擦角も低下するがこれは無視して水平方向亀裂の水圧破碎基準の変化の傾向を見ることにした。注入圧が上昇すると供試体の含水比も上昇し、その結果粘着力が低下する。注入圧と含水比の関係は供試体の初期含水比と破碎時の含水比の2点を通る曲線で表されるがこれは供試体の透水性や注入圧を上昇させる速さによって変化するので数種類の曲線を仮定した。含水比と粘着力の関係は種々の含水比での一軸圧縮試験の結果からおよその値を算定した。その結果、含水比が注入圧の単調増加関数であるならば水平方向亀裂の水圧破碎基準は図3の直線(1)と(2)の間に入る事が明らかになった。白丸でプロットされた点はほとんど直線(1)側に寄っているが、このように考えると注入圧を上昇させる初期において含水比が上がりにくい場合に相当する。したがって透水性のより大きい供試体を用いるか、あるいは注入圧を準静的にの上昇させれば水平方向の破碎注入圧は直線(2)側に移動してくるであろう。

6. 結論

1. 軸圧と拘束圧の大小関係の違いによる亀裂面の方向の違いは明確には確認できなかった。
2. 供試体内の応力分布は拘束圧と注入圧の差が水圧破碎を生じさせる程度ならば平面ひずみを仮定して得られる線形弾性解で十分である。
3. 水圧破碎は内壁近傍におけるせん断破壊によって生じる。
4. 水平方向亀裂の水圧破碎基準は注入圧による粘着力の低下を考慮した結果、ある領域に存在する事が言える。

<参考文献>

- 1) Komak Panah A. and Yanagisawa E., "Laboratory Study of Hydraulic Fracturing Criteria in Soil", Soils and Foundations, Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Dec., 1989, Vol.29, No.4, pp.14-22
- 2) 森 麟, 「圧力注入における地盤のハイドロ・フラクチャリング現象」, 土と基礎, 1987年8月, Vol.35, No.8, pp.5-11

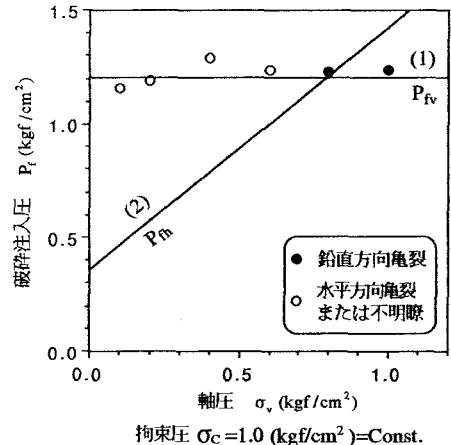


図3 水圧破碎実験結果

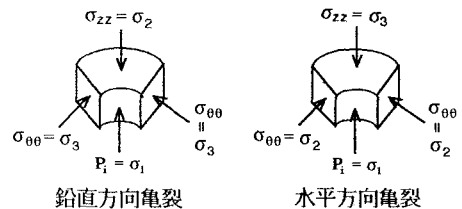


図4 内壁近傍での主応力