

### III-45

#### 粘性土の割裂位置と発生方向及び割裂圧

早稲田大学 正会員 森 麟  
西松建設（株） 正会員 森 仁司  
早稲田大学 学生員 ○袁 大軍  
（株）熊谷組 正会員 鈴木 真

#### 1. まえがき

粘性地盤中の空洞部に液圧が作用して、割裂現象が発生する場合、割裂面の発生位置とその方向がどのようなになるかはまだよく分からない、更に多層の粘土の割裂の位置とその方向も不明である。このため、割裂発生位置、方向を支配する条件と割裂発生位置と割裂圧との関係などを実験によって調査してみた。

今までは供試体として円筒形で、その中心部円孔を持つものを用いて調査してきたが、供試体に作用する外圧は三軸装置を用いて等方圧状態( $\sigma_3 = \sigma_1 = \sigma_2$ )で行ったので、割裂方向は半径方向に決まったが、その発生位置はいろいろであり、特定することが出来なかった。今回は供試体断面が長方形、正方形、円筒形を用いた。実験装置の都合上異方性の応力条件( $\sigma_3 \neq \sigma_1$ )は使用できず、等方圧条件の下で実験を行った。従って、本研究は等方圧条件の下で、供試体断面形状及び層数の異なる場合の割裂発生位置、方向の支配条件及び割裂位置と層数が割裂圧の大きさにどのような関係があるかを明らかにした。

#### 2. 実験方法

実験装置の概要は図-1に示す。円孔を持つ表-1に示す供試体を三軸装置にセットし、注入材を満たして一定の速度で等方拘束圧と円孔内圧を設定圧まで同時に加圧する。その後、等方拘束圧を一定にしたまま、円孔内圧だけを一定の速度で徐々に上げて、孔壁に割裂を生じさせる。注入材が水、ベントナイト泥水を用いた。

#### 3. 供試体の形状、層数に対する割裂位置と発生方向及びその考察

##### (1) 円孔を持つ均質円筒形供試体の場合

割裂位置は円孔のある点で、方向は半径方向を持つ平面として発生する。割裂の本数1本～3本で、表-1に示す。その理由としては弾性理論による厚肉円筒に内外圧を加えた場合の結果によって、孔壁接線応力 $\sigma_\theta$ どこでも均等最大であるから、内圧の増加するに連れて圧縮応力 $\sigma_{r2}$ が減少し、最終的には引張りあるいはせん断破壊し、そこから割裂が発生する。割裂面はすべて半径方向となっているので孔壁の破壊メカニズムはせん断より引張り破壊の可能性が高い、またその発生位置は特定できない。

##### (2) 円孔を持つ均質正方形の場合

割裂位置は円孔の孔壁と対角線との交点となっている。割裂は正方体の対角線方向の内に2～3方向に発生する。その理由としては等方外圧力を受ける円孔を持つ正方体円孔内壁の接線応力は弾性理論によるとほとんど均等な圧縮接線応力 $\sigma_{\theta 2}$ を生じるが、しかし内圧により円孔内壁に生じる引張りの接線応力 $\sigma_{\theta 1}$ は $a/R$ につれて変化する。 $a/R \geq 1.5$ の大きい範囲では最大の引張り接線応力是对角線上の交点( $\theta = 45^\circ$  交点が四つある)に発生する。今回の実験の $a/R$ 値は全部この範囲中にあるから割裂は $\theta = 45^\circ$ の対角線方向となる。しかし、 $a/R \geq 4$ であれば、内圧の作用で孔壁の接線応力 $\sigma_{\theta 1}$ はほとんど均等となる。しかし今回の実験は表-1に示すように $a/R \geq 4$ の場合も割裂の方向は変わらなかった。これはこの状態の時 $\theta = 45^\circ$  交点の $\sigma_{\theta 1}$ が多少とも大きくのではないかと考えられる。また、この場合円孔の変形状態で考えると $\theta = 45^\circ$  付近の曲率が小さくなり、引張り状態に最もなりやすいように考える。このような変形状況による割裂方向の考察も可能である。

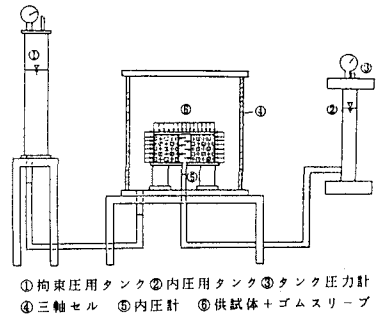


図-1 実験装置

表-1 供試体の種類と割裂状態

| 解状 | 断面形状 | 径比                   | 内側の $\sigma_3$<br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) | 外側の $\sigma_3$<br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) | 内側の<br>厚さ(cm)          | 割裂の状態 |
|----|------|----------------------|------------------------------------------|------------------------------------------|------------------------|-------|
| 均質 |      | 13.8<br>5.63<br>3.60 | 1.04 ~ 2.18                              |                                          | —                      |       |
| 均質 |      | 10.8<br>4.38<br>2.80 | 1.04 ~ 2.18                              |                                          | —                      |       |
| 均質 |      | 20<br>26.1           | 0.3 ~ 0.5                                |                                          | —                      |       |
| 均質 |      | 5<br>6.47            | 0.3 ~ 0.5                                |                                          | —                      |       |
| 2層 |      | 13.8<br>4.38<br>2.8  | 0.65 ~ 0.89                              | 1.6 ~ 2.08                               | 1.05,<br>2.15,<br>3.85 |       |
| 3層 |      | 20<br>26.1           | 0.65 ~ 0.87                              | 1.6 ~ 2.08                               | 3.5, 5.5<br>10         |       |
| 3層 |      | 20<br>26.1           | 0.65 ~ 0.87                              | 1.6 ~ 2.08                               | 20                     |       |

## (3) 中孔を持つ均質長方体の場合

長方形断面の場合の割裂面は水平から対角線までの範囲内で発生する。円孔 $d=1.5\text{cm}$ 時は割裂面ほぼ水平で、円孔 $d=6\text{cm}$ の時傾きが大きくなる。その理由は、長手に当たる水平方向は円孔直径 $d=6\text{cm}$ 時に $b/R=6.7$ であるので、水平方向は無限長と考えても良い、縦の方向は $a/R=5$ であるから、無限長として取り扱えず図-2に示すような内圧を受ける円孔を有する半無限板問題の場合に近いと思われる。この場合の弾性理論問題として考えると、円孔の周辺における内圧 $p_1$ による接線応力 $\sigma_{\theta 1}$ は0点から円孔上の一点 $Q$ への直線が $y$ 軸となす角 $\beta$ を用いて次のようになる。 $\sigma_{\theta 1} = p_1(1+2\tan^2\beta)$ 、この式より最大引張り接線応力は $\beta = \beta_{\max}$ の点で生じ、 $a/R=5$ のとき、 $\beta_{\max}=11.3^\circ$ であり、 $a/R=20$ ときは $\beta_{\max}=2^\circ$ となる。前者の応力集中率は $\sigma_{\theta 1 \max}/p_1 \approx 1.08$ である。一方、供試体周囲の等方外圧力による孔壁に生じる接線応力 $\sigma_{\theta 2}$ はほとんど均等になる。このため、割裂は内圧による引張り接線応力 $\sigma_{\theta 1}$ が最大になる方向に発生する。つまり、水平に対して前者で $\theta=11.3^\circ$ 、後者で $\theta=2^\circ$ の方向である。しかし、水平と対角線の間では接線応力 $\sigma_{\theta 1}$ の差が僅かであるので、もし $q_v$ に少しの不均一性があれば $\sigma_{\theta 1}$ と $q_v$ との関係で割裂がこの範囲内で様々に発生したと考えられる。一方、円孔の変形状況から考えて見ると、内圧により円孔は肉厚の大きい横の方向より肉厚の小さい縦方向が余分に変形し易く、円孔は図-3に示すように縦長に変形し、曲率の小さいA点の付近の引張り応力が最も大きくなる。このため、割裂はほぼ水平になるとした方が考え易い。またこのような変形するので長方形の場合の割裂圧は正方形や円形断面のものより小さくなる。

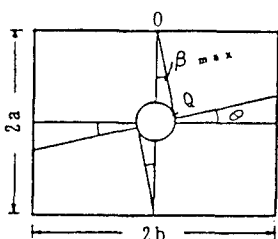


図-2 円孔の最大接線応力位置

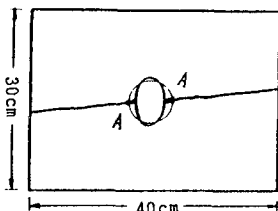


図-3 円孔の変形と割裂面

(4) 円孔周囲付近の $q_v$ が弱い場合

円孔周囲付近の粘土が乱れて $q_v$ が小さくなった場合、この状態が割裂発生方向に及ぼす影響を調査した。供試体が円筒形の場合は割裂の発生位置と方向は(1)で述べた均質の場合と変わらない。その理由も(1)と同様である。供試体が長方形の場合は $q_v$ の小さい層は供試体作成方法の関係で円孔周辺部だけでなく、表-1に示すように中間部全部となっている。割裂発生方向は内層の厚さと関係がある。供試体の内層の厚さと割裂方向の実験結果は表-1に示す。内層の厚さ $h \leq 10\text{cm}$ 範囲内では割裂が円孔のクラウン付近から真上に伸び、次に2層境界に沿って水平に伸展する。内層厚 $20\text{cm}$ の時の割裂発生位置はクラウン部でなく、側壁部からやや水平に近い平面となって発生する。このようになる理由としては内層厚さ $h \leq 10\text{cm}$ 場合は、円孔の変形が上部の硬い層の影響を受けて横長に変形するためクラウン付近の引張り破壊が生じ易くなるので割裂面はクラウン付近から真上に発生し、境界面に達すると上方に割裂せず、弱い境界面に沿って水平に割裂が進む。内層厚さ $20\text{cm}$ の時は上部硬い層の影響が小さいので全体として(3)の均質の場合に近くなり、円孔は縦長な変形となり、このためほぼ水平方向に割裂する。

4. 円孔付近の $q_v$ が弱い場合の割裂圧

## (1) 円筒形供試体の場合

この状態は軟弱層の厚さと円孔半径との比によって割裂圧が違ふ。図-4にその影響を示す。その軟弱層比が大きくなると割裂圧は全体が軟弱層の場合の割裂圧に近づく。その比が約5.92を超えると、供試体全部が軟弱層の場合の割裂圧と変わらない。円孔半径が $5\text{m}$ あれば軟弱層が $0.5\text{m}$ あっても $d/R=0.1$ なので、割裂圧への影響はほとんどないと考えられる。

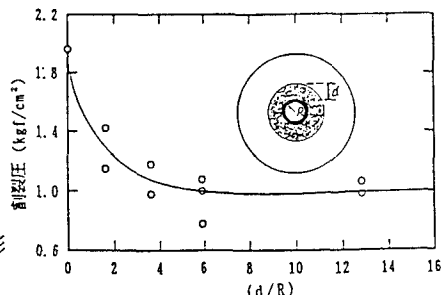


図-4 割裂圧と軟弱層厚さの関係

## (2) 長方形の供試体の場合

この場合は割裂圧は軟弱層厚さに拘らず全体が軟弱層とした均質供試体割裂圧とほとんど同一である。

## 5. まとめ

等方外圧を受ける粘性土中の円孔に液圧が作用して割裂する場合の割裂位置とその発生方向は供試体の断面形状によって変わり、円孔内の液圧による孔壁の $\sigma_{\theta 1}$ の集中率が1以上ある断面形状の場合は集中率の最も大きい位置付近から半径方向に割裂が進展する。また円孔の変形状態からみれば曲率が最も小さく位置付近が割裂位置となる。