

III-652

強度の異なる2層粘性土の割裂圧と割裂発生メカニズムについて

早稲田大学 正会員 森 麟
熊谷組 正会員 北原 陽一
早稲田大学 学生員 〇片桐 年弥(現 大成建設)

1. 研究目的

泥水式シールド工法における軟弱粘性土地盤の切羽安定で問題とされる事の一つに割裂現象がある。この現象についての筆者らの研究結果によると、均等な粘性土地盤の割裂圧 P_{ri} は、一軸強度を q_u とすると

$$P_{ri} = \sigma_3 + \alpha q_u \quad \dots (1)$$

の形で表されることを示した。 α は割裂係数で、 α は加圧液の粘性、加圧速度、供試体の形状、径比(土被り厚/シールド半径)、その他の要因で決まるものである。 α は径比が5以上のとき、加圧液が水の場合0.2~0.6、12%前後のベントナイト泥水では0.5~1.5の範囲である。実際の地盤は、多層であり q_u は均等でない。また均等な地盤でも、シールド掘進の際に周辺地山が乱れて q_u が低下し、2層地盤に類似する。2層地盤の割裂圧 P_{ri} も(1)式と同じ形で表現されるが、 q_u はボアホールの存在する土層の値、 α は均一地盤の値とは多少異なってくる。ここでは q_u の異なる2層粘性土が存在し、比較的境界面近くのボアホールで加圧するときの割裂圧即ち α の変化、割裂メカニズムが均等な場合とどのように違ってくるか明らかにした。

そこで実験では、液圧が作用するボアホールを含む内層部と q_u の異なる外層部を持つ2重円筒形供試体を用いて、割裂圧と割裂のメカニズムについて研究した。さらに実験結果から類推して実際の2層粘性土地盤の境界近くに、シールドの液圧が作用する場合の割裂状況についても考察した。

2. 実験方法

供試体は、直径18cm、高さ19cm、中央部に径13mmのボアホールを設け、内層部と外層部の厚さと q_u を種々に変化させた。実験は供試体を三軸装置にセットし拘束圧は0.5kgf/cm²とし、内圧の加圧速度を0.10kgf/cm²/minとした。

3. 実験結果及び考察

3.1 径比の影響の実験式について

割裂のメカニズムを考察する上に、径比 R (供試体径/ボアホール径)の影響を考慮する必要があるのですがこの影響について考える。泥水加圧の径比の影響¹⁾について既に提示したが、今回は、清水(フロー値8秒)を用いているので、径比 R と(1)式の割裂係数 α の関係は実験結果を整理すると下記ようになる。

$$R > 10 \quad \alpha = A \quad \dots (2) \quad A: 0.2 \sim 0.6 \text{ で } q_u \text{ や加圧速度によって異なる}$$

$$R \leq 10 \quad \alpha = (0.34 \ln R + 0.21) A \quad \dots (3)$$

したがって、同じ q_u 、加圧速度での A の値が決まれば、 $R \leq 10$ の α は(3)式を用いて計算でき、 α は径比 R が小さくなると対数曲線的に減少してくる。

3.2 内層の強度の方が大きい場合

図1は供試体の内層、外層の q_u がそれぞれ1.31、0.64kgf/cm²で外層の q_u に対する内層の q_u の比 β (=外層の q_u /内層の q_u) ≈ 0.5 のものであり、中心から内層と外層の境界までの距離 a を徐々に大きくしたときの割裂圧 P_{ri} の変化を示したものである。なお図中の点線は、ボアホール径に対する境界径の径比 R を(3)式に入れた α を用いた割裂圧であり、外層を無視したときの割裂圧の計算値 P_{ri} に当る。

この図において、2層の場合の割裂圧は全厚を内層部の強い粘土からなる均一としたものより小さく、割裂圧はほぼ外層を無視した割裂圧 P_{ri} と同じになる。したがって、内層厚が大きいほど割裂圧も大きくなっている。この割裂圧は内層が1cm程度以下を除き、全厚が弱い外層のみの P_{ri} より大きくなる。これから、 $\beta = 0.5$ 程度ならば、外層部は内層部の変位を拘束せず、外層部が割裂圧にほとんど影響していないことが分かる。

この場合の割裂のメカニズムは、ボアホール内圧により、内層孔壁部にクラックが発生する。そしてそのクラック中に加圧液が浸入し、クラックが境界面に達すると、クラックは弱い外層にそのままの圧力で進展し割裂すると考えられる。

上記の結果は、 $\beta \approx 0.5$ の場合であるが、 β が0.5以下では、当然外層部の影響はないものと思われる。しかし、外層部の強度を増加して β が1に近づいてくると外層が内層の変位を拘束してくる影響が出てくるはずであるので割裂圧は P_{ri} より高く、境界径による径比でなく全厚による径比で、全厚を内層強度としたときの均一状態の割裂圧に近づくものと考えられる。

3.3 内層の強度の方が小さい場合

図2は供試体の内層、外層の q_u がそれぞれ0.61、1.30kgf/cm²で強度比 $\beta \approx 2$ のものであり、中心から境界面までの距離 a を徐々に大きくしたときの割裂圧 P_{ri} の変化を示したものである。なお図中の点線は外層を無視したときの割裂圧の計算値 P_{ri} である。また破線は、内層を無視し境界径に対する供試体径(=18cm)の径比 R を(3)式に入れた α を用いた割裂圧であり、これは内層を無視したときの割裂圧の計算値 P_{ri} に当る。

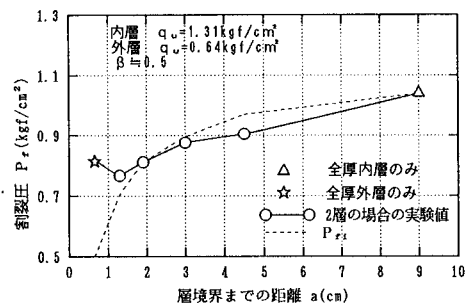


図-1 内層の強度の方が大きい場合

この図において、内層厚が1cm程度以下の薄い場合、割裂圧は計算値 P_{ri} とほぼ一致し、内層の影響がほとんどない。この場合の割裂のメカニズムは、割裂圧になる前に内層部に何本かのクラックが発生するが境界面で止まる。さらに内圧を高くすると内層が薄いために内圧と同じ圧力が境界面に働き、内層を取り除いた大きいボアホール状態と考えられ、この条件下の割裂圧になる。外層部の割裂は既に内層に発生しているクラック延長上に進展すると考えられる。

次に内層厚が1cm程度以上の場合、割裂圧と計算値 P_{ri} を比べると、内層が薄いときは P_{ri} より大きく、内層が厚くなるにつれ P_{ri} に近づき、外層が極めて薄い状態になると P_{ri} にほぼ一致する。これから、内層が薄いとき外層の影響は大きく、内層が厚くなるにつれ外層の影響は少なくなることが分かる。この場合の割裂のメカニズムは、液圧による内層の変位を外層が拘束し、外層部の厚さに比例して拘束圧が増加し(1)式の σ_3 を大きくする。そのため、内層にクラックを発生させるには、増分 $\Delta\sigma_3$ だけ大きな圧力が必要となる。しかし、(1)式の σ_3 は初期値のまま用いるのが原則なので、 $\Delta\sigma_3$ の代わりに α が増加したと考えることができる。この場合の増分 $\Delta\alpha$ は $\Delta\sigma_3/q_u$ に当り、実験結果では、 $\Delta\alpha=0\sim0.17$ 程度となる。この場合の割裂の発生は、内層のクラックが境界に達するとそのままの圧力で強い外層部にクラックが進展し割裂すると考えられる。

上記の結果は、強度比 $\beta=2$ のものであるが、外層の q_u を小さくして β を1に近づけると割裂圧は3.2と同様に全厚を径比とし、全厚を内層強度としたときの割裂圧に接近してくると考えられる。

4. 現場における強度の異なる2層粘性土地盤の割裂現象についての考察

泥水式シールドにおいて、割裂はクラウン部から発生することが多い。そこで、図3のようにクラウン上部の土被り厚とシールド半径 r の和を円筒供試体の半径とみなして今回の実験結果から強度の異なる2種の粘土層が水平に存在し粘土層境界面下の近傍を泥水式シールド機が水平に掘進する場合の割裂現象について考察する。この場合も、割裂圧は(1)式の形になり、 σ_3 はクラウン部の水平静止土圧になるが、切羽地盤に沈下があればゆるみ土圧が発生し²⁾ σ_3 は小さくなる。

4.1 上部粘土層の強度の方が小さい場合

シールド通過層の強度の方が2倍以上大きい場合には、3.2の結果からみて境界面までの厚さが非常に割裂圧に影響する。このときの割裂圧の(1)式の α は、径比 R (境界層までの距離/シールド半径)と共に小さくなり、極く薄い場合には α は0.1程度となる。この様に α が径比に大きく影響されるのは、上部の弱い粘土層は単に荷重として σ_3 に関係するだけで、粘土の強度はゼロとした場合に相当するためである。通過層に発生した割裂はそのまま上部粘土層へ進展する。この場合の割裂圧は、通過部の強い粘土のみの均一地盤の値より小さくなるので注意すべきである。

4.2 上部粘土層の強度の方が大きい場合

逆にシールド通過層の強度の方が1/2程度と小さく、境界面までの厚さが極く薄い数十cmの場合、3.2の結果からみて、割裂圧になる前にシールド通過層にクラックが発生し境界部で止まる。さらに圧力を上げると既に通過層に発生していたクラックの延長上に割裂は進展する。このときの割裂圧は、通過層を無視した場合と同様になるので、境界面上部の強度の大きい粘土層に直接液圧が作用した場合と同じになる。このときの割裂圧は、(1)式の σ_3 を境界面における地盤の最小主応力、 q_u を上層部の強い粘土の一軸強度とした値である。ただし、軟らかい粘土部分を無視して求めた径比が5以上の場合には、 α は1.の記述と同じ程度の値になる。

また、境界面までの厚さがある程度厚い場合は、全体がシールド通過層の粘土としたときの割裂圧に近く、 σ_3 の増分の影響はないと考えられる。これは、3.3の実験と異なり粘土層が水平なためである。通過層に生じた割裂面は、そのままの圧力で上部粘土層に進展する。このときの(1)式の割裂圧は、 q_u を通過層の弱い粘土の一軸強度、 α は1.の記述と同じ程度の値と考えられる。

4.3 均一地盤中のシールド周囲にリング状の乱れ部分が生じた場合

均一地盤においてシールド掘進の際に周辺地山を乱しシールド周辺のみ q_u が1/2程度低下した場合の割裂について考察すると、乱れ範囲は一般に数十cmぐらいまでであり、シールド径に対して極く薄い場合であると考えられる。このとき、乱れた粘土部分にクラックが発生しても乱れない地盤との境界部で止まる。液圧をさらに上げ、乱れた粘土部分を無視しこれも空洞部とみなし、液圧が乱れない粘土に直接作用した条件に当る割裂圧に達すると、既に乱れた粘土に発生しているクラックはその延長上の乱れない部分に進展し割裂すると思われる。このときの(1)式の割裂圧は、 σ_3 を実質空洞クラウン位置の地盤の最小主応力、 q_u を乱れない強い粘土の一軸強度、 α は1.の記述と同じ程度の値である。このときの割裂圧は、当然乱れない場合より小さくなる。

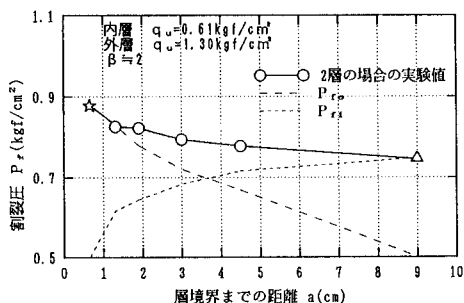


図-2 内層の強度の方が小さい場合

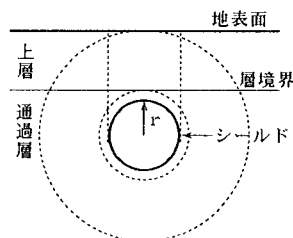


図-3 現場への適用

1) 森・田村他：粘性土の割裂圧に及ぼす諸要因に関する実験的研究，土質工学会論文報告集，1991.3，pp.222～229，

2) 森・鈴木他：割裂圧に影響する粘性土地盤のゆるみ土圧の研究，土木学会第48回年次学術講演会，1993.9，pp.104～105