剛塑性有限要素法による粘性土の落し戸土圧発生機構について

東電設計株式会社正会員〇金子俊輔茨城工業高等専門学校フェロー会員日下部治

1. はじめに

トンネルの覆工設計では、粘性土でも適用条件を満たせば、ゆるみ土圧を採用する。ゆるみ土圧は、Terzaghi の落し戸理論により算定することが多い。Terzaghiの落し戸理論は、砂質土を対象にしたものであるが、現場で 土圧を計測すると、粘性土も砂質土と同様に土被り圧よりも小さくなることが少なくないため、理論的な根拠は 明確ではないものの、粘性土に対しても適用されているようである。本報は、粘性土の落し戸土圧を剛塑性 FEM で算定し、Terzaghiの理論土圧と対比しながら、その土圧発生機構について考察したものである。

2. 剛塑性 FEM と Terzaghi の考え方にもとづいた落し戸理論土圧

剛塑性 FEM の破壊条件には、関ロ,太田モデル¹⁾を適用した。図-1 に解析モデルを示す。落し戸幅 Bは 4m とし、土被り Dは、土被り比 D/B が 1、2、3、4、5 となるように 4、8、12、16、20m に変化させた。落し戸部分には、単位変位速度 1 を与えた。解析に必要な地盤物性値は、図-1 中に示したとおりである。応力誘導異方性を考慮するため、静止土圧係数 K_0 は 0.59 とした。

粘性土の落し戸理論土圧 σ_v は、Terzaghi の考え方にもとづき式(1)で算定した。内部摩擦角を考慮せずに非排水 せん断強度だけを考慮している。式(1)中の c_{ud} は、落し戸深さ D での非排水せん断強度 c_u である。非排水せん断 強度 c_u は、深度依存性を考慮し、地表面で $c_u=0$ 、落し戸深さ D で $c_u=c_{ud}$ となる三角形分布を仮定した。

$$\sigma_{v} = \gamma_{t} D - \frac{D}{B} C_{ud} \tag{1}$$

落し戸深さ D での非排水せん断強度 cud は、剛塑性 FEM で用いる地盤物性値との整合を図るため、別途、剛塑性 FEM で平面ひずみ条件下での非排水単純せん断試験のシミュレーションを実施して設定した。落し戸による せん断破壊は、単純せん断破壊が卓越するものと考えた。

3. 落し戸土圧の対比結果

図-2 は、落し戸土圧 σ_v を土被り圧 γ_v ・D で正規化した $\sigma_v (\gamma_v \cdot D)$ と土被り比 D/B との関係である。〇が剛塑性 FEM、 ●が Terzaghi の理論土圧を示す。剛塑性 FEM の $\sigma_v (\gamma_v \cdot D)$ は、土被り比 D/B=2 までは理論土圧とほぼ同じ であるが、D/B=3 以上になると理論土圧よりも大きくなる。この要因は、主に、土被り比 D/B=1、2 では落し戸 端部から発生するせん断破壊面が鉛直直上に立ち上げた直線となり、理論解のせん断破壊面と同じとなるのに対 し、土被り比 D/B=3 以上では、落し戸端部のせん断破壊面が上開き形状となるため、せん断破壊面で囲まれた塑 性域の重量が大きくなることによる。これは、図-3 に示した剛塑性 FEM で得られた塑性相当ひずみ $\bar{e}=\sqrt{\hat{e}_v^{(P)}\cdot\hat{e}_v^{(P)}}$ の コンターで確認できる。図-3 によれば、土被り比 D/B=1、2 における塑性相当ひずみの大きい箇所は、落し戸端 部から鉛直上方に地表面まで伸びている。一方、土被り比 D/B=3~5 における塑性相当ひずみの大きい箇所は、 落し戸端部から外側に上開き形状で発生し、そこから上方に地表面まで伸び、理論解で仮定したせん断破壊面の 幅よりも広がっている。土被り比 D/B=3~5 の塑性相当ひずみの大きい箇所は、落し戸端部から外側に上開き形 状で発生するだけでなく、落し戸端部から落し戸中央に向かって三角形状に発生している。これは、Terzaghi の 落し戸理論では考慮していないせん断破壊面の発生を示しているが、このせん断破壊面が落し戸土圧に与える影 響は、上開き形状のせん断破壊面発生による自重増加の影響に比べると小さいようである。

4. 落し戸土圧の発生機構

図-4 は、土被り比 *D/B=5* における剛塑性 FEM で得られた塑性相当ひずみの大きい箇所での要素応力から、 $(\sigma_y - \sigma_x)/(2\sigma_{y0}) \sim \tau_{xy}/\sigma_{y0}$ 関係を整理したものである。原点 o からの距離が非排水せん断強度 c_u/σ_{y0} となる。図-4 中の θ は、主応力の回転角度であり、実線は関ロ・太田モデルから得られる理論強度²⁾である。主応力の回転により非

キーワードゆるみ土圧、剛塑性有限要素法、落し戸、トンネル、せん断破壊、応力誘導異方性

連絡先 〒110-0015 東京都台東区東上野 3-3-3 東電設計株式会社 土木本部 都市土木部 Tel: 03-6372-5111

排水せん断強度が異なることから、図-4を整理することで、塑性相当ひずみの大きい箇所の破壊の仕方がわかる。 図-4にもとづいて落し戸土圧のせん断破壊メカニズムを整理すると図-5となる。単純せん断だけでなく、圧縮せん断、伸張せん断破壊が発生する。そして、この破壊メカニズムは、村山³⁾が想定した砂質土地盤のせん断破壊 メカニズムとよく似ている。

5. おわりに

粘性土の落し戸土圧を剛塑性 FEM で算定した結果、落し戸土圧は、土被り比3を超えると Terzaghi 理論と異 なったせん断破壊面が発生し、理論土圧よりも大きくなることを示した。また、土被り比3を超えて発生するせ ん断破壊は、伸張、圧縮、単純せん断の組み合わせで発生することを示した。これらから、Terzaghi 理論を適用 して設計荷重を設定する際は、土被りや地盤物性値の設定方法等に配慮し、危険側にならないように留意する必 要がある。

参考文献

Sekiguchi, H. and Ohta, H.: Induced anisotropy and time dependency in clays, *Int. Proc. of Speciality Session 9, 9th ICSMFE*, pp.229-238, Tokyo, 1977.
Ohta, H., Nishihara, A. and Morita, Y.: Undrained Stability of K₀-consolidated clays, *Proc. 11th Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol.2, pp.613-616, 1985.

3)村山朔郎,松岡元:砂質土中のトンネル土圧に関する基礎的研究,土木学会論文報告集, Vol.187, pp.95-108, 1971.

