

海外水力開発に係る斜面解析モデルに関する検討委託（2023年度）

岸田 潔*・宮崎 祐輔**¹・貫上 恭宏**³

1. 研究の目的

本研究で対象とした海外水力開発事業においては、プロジェクトサイトが膨張性を有する地質エリアに位置することがあり、水力発電設備周辺の膨張性地山斜面の挙動を精度よく把握することは設置位置の決定や設計を行う上で非常に重要な課題であった。一方で、膨張性・膨潤性の物理モデルは、十分に整備されていないのが現状である。これは、膨張性・膨潤性の実験の難しさ、その伴うパラメータの評価の難しさがある。

本研究では、膨潤などによって大変形が発生した長大斜面の掘削解析を実施することを最終目的とし、膨潤率試験の実施による膨潤挙動の把握、膨潤ひずみを考慮した修正 Cam Clay の検討を行った。

2. 研究の方法

まず、対象斜面の泥岩に対して、ASTM の試験基準¹⁾の方法 A を参考に次元圧密試験機を用いて実施された。高さ 20 mm、直径 60 mm の再構成円柱形供試体を作成し、圧密リングに入れて水平方向の変位を拘束する。この供試体に鉛直方向に載板盤を設置し、鉛直変位を測れる状態にし、供試体に吸水させることで鉛直方向にのみ膨潤させ、膨潤率を求める膨潤率試験を実施した。载荷圧は、10 kPa、40 kPa、80 kPa まで順に段階载荷し、その時の鉛直変位を計測した。各载荷段階における圧密の終了は \sqrt{t} 法によって確認した。つぎに、80 kPa を载荷した状態で供試体底面から 100 kPa の二酸化炭素を通気し、供試体内部の空気と置換した。最後に、底面と上面の水頭差が 430 mm となるように設定して供試体底面から蒸留水を給水させるとともに、供試体が蒸留水に完全に浸されるように蒸留水を供試体の上から加えた。この時の鉛直変位を計測し、鉛直変位が安定した時点で給水を終了した。

本研究では、岩石の膨潤を表現するため膨潤ひずみを導入した修正カムクレイモデルを用いた²⁾。本研究で用いたモデルでは、膨潤ひずみを導入することで岩石が塑性状態に達すると塑性ひずみが増加し、硬化パラメータである圧密降伏応力 p_c が減少して軟化を表現するものである。図-1 に圧密降伏応力 p_c の更新の概念図を示す。

3. 得られた成果

図-2 に膨潤率試験の結果を示す。膨潤率試験の結果は、給水開始から約 2 時間で膨潤率が 1.40% まで上昇し、その後、約 250 時間で膨潤率が最大 1.904% と得られた。

つづいて、膨潤率試験への数値解析モデルの適用を実施した。まず、モール・クーロンモデルを用いて、上部から载荷圧 80 kPa を与えて自重解析を実施し、初期応力状態を求めた。つぎに、実際に設定した水頭差を参考に、底面に 4.41 kPa の間隙水圧を境界条件として与え、上述の修正カムクレイモデルを適用し、膨潤ひずみを与えて土-水連成解析を実施した。なお、不飽和浸透モデルは van Genuchten モデルを用いた。van Genuchten のパラメータは Chen, et al.³⁾を参考にした。また、初期の圧密降伏応力は次元圧密試験の再現解析によって得られた結果を利用した。さらに、膨潤ひずみは膨潤率試験の結果を参考に、給水開始から 2 時間後ま

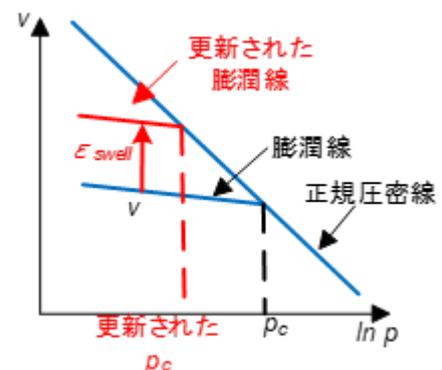


図-1 圧密降伏応力 p_c の更新

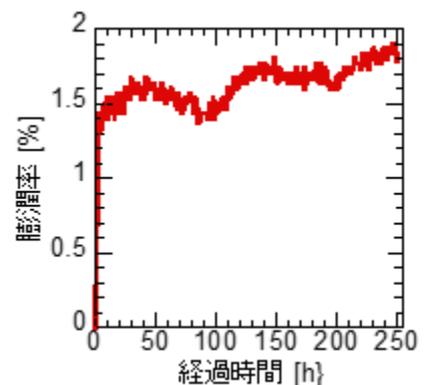


図-2 膨潤率試験の結果

*京都大学・教授，**京都大学・助教（現：関西大学・准教授），***京都大学・修士課程 1 年

では1時間当たり0.7% (2時間で計1.4%), それ以降は1時間当たり0.002% (250時間で計0.5%)と設定した. 給水開始から10時間までの実験結果と解析結果の比較を図-3に示す. 膨潤率試験では, 給水開始から急激に膨潤し, その後緩やかに膨潤しているが, 再現解析では吸水開始から膨潤率が緩やかに増加しており, 最終的な膨潤率は1.47%が得られた.

さらに, 本モデルを用いて斜面の掘削解析を実施した. 解析対象斜面と着目点を図-4に示す. 解析は, 有限差分法 (FLAC) で実施し, 破壊規準に修正カムクレイモデルを用いた弾塑性解析を実施した. ここで示す結果は, 有効応力解析 (土-水連成解析) のケース3と膨潤ひずみを導入した有効応力解析のケース4である. 解析は, 当該斜面の掘削最終段階までは進んでいない.

図-5, 6に図-4に示す地点5および6の有効応力経路を示す. 有効応力は限界状態の左側の領域内で異動していたため, 軟化による影響よりも掘削による応力解放の影響が大きいと考えられる. ケース4は膨潤ひずみを考慮したケースであるが, 地点5および6では, ケース3とケース4で有効応力に大きな差異は見られなかった. これは, 他の地点でも同様である. 今回, 掘削途中までの計算であり, その時点まではあまり降雨がなく, 膨潤ひずみを導入したことによるひずみ軟化の影響は小さかったことが推察される.

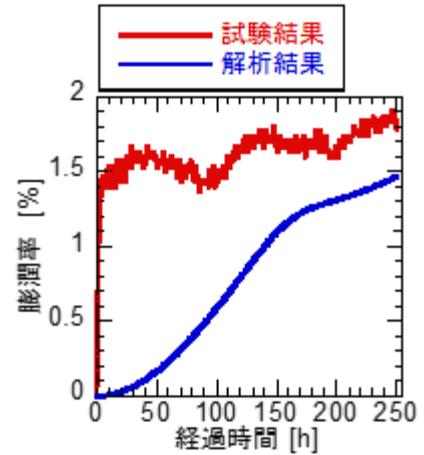


図-3 膨潤率の比較

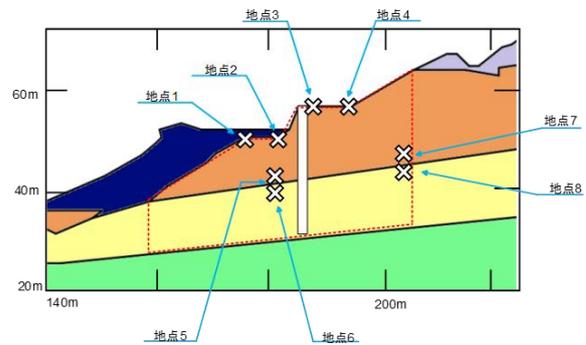


図-4 掘削解析対象斜面と着目地点

4. 謝辞

本研究は, 関西電力株式会社より委託されたものであり, 関係各位に謝意を表する.

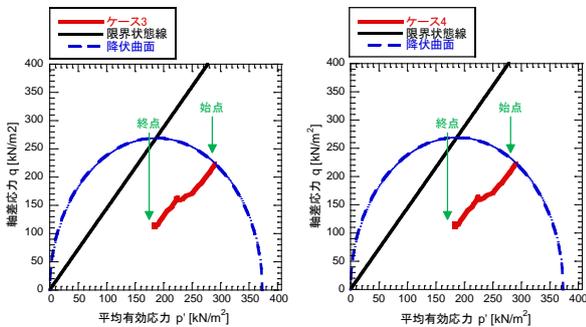


図-5 地点5の有効応力経路

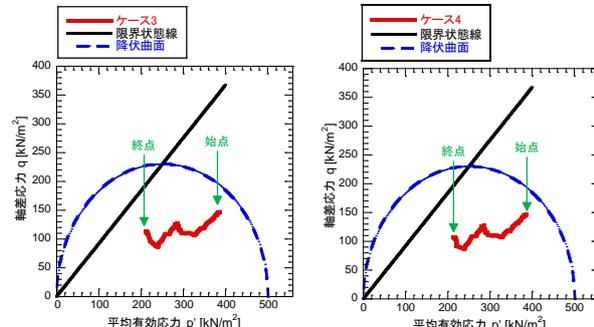


図-6 地点6の有効応力経路

発表論文

貫上恭宏, 岸田 潔: 膨潤率試験と限界状態モデルを用いたその再現解析についての考察, 第79回国土学会年次学術講演会, 2024, 9.

参考文献

- 1) ASTM D4546-21: Standard Test Methods for One-Dimensional Swell or Collapse of Soils, 2021.
- 2) Yuan, Kaixuan: Mechanism investigation on weathered mudstone slope deformation under excavation process with geological complexity and folded structure, 京都大学博士論文, 2024. Doi: 10.14989/doctor.k25262
- 3) Chen, Y.F., Ye, Y., Hu, R., Yang, Z., Zhou, C.B.: Modeling unsaturated flow in fractured rocks with scaling relationships between hydraulic parameters, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 14(6), 1697 – 1709, 2022. Doi: 10.1016/j.jrmge.2022.02.008