

(8) 膨潤性地山の変形挙動とその予測手法

応用地質株式会社 正会員 大塚 康範
応用地質株式会社 正会員 ○鶴原 敬久
名古屋大学工学部 正会員 Ömer AYDAN
応用地質株式会社 正会員 満 弘之

Consideration on Prediction of Deformation for Swelling Rock Mass

Yasunori OTSUKA, OYO corporation
Takahisa TSURUHARA, OYO corporation
Ömer AYDAN, NAGOYA University
Hiroyuki MITU, OYO corporation

ABSTRACT

The deformation caused by swelling behavior arises the serious problems for the structures.

It is very important to consider the swelling property for the design. Therefore, it is necessary to predict the behaviors of swelling rock mass, and to evaluate the effect of swelling behaviors to the constructions.

In this paper, we propose the method to predict the swelling behavior based on a characteristic curve obtained by laboratory testing of swelling rocks and finite element modeling of rockbolt system as one of the countermeasures. We describe the actual example which was applied to the highway cut slope, confirming the validity of the method proposed.

1. まえがき

一定荷重、湿潤状態のもとで、時間の経過とともに体積膨張を起こす地盤材料、いわゆる、膨潤性を有する地盤では、構造物施工後かなりの年月を経た後、構造物にクラックなどの変状が発生する場合がある。したがって、膨潤性を有する地盤に構造物を施工する場合、設計段階で膨潤性を考慮した工学的対応が必要となる。そのためには、膨潤に起因するひずみを予測し、構造物への影響評価を的確に行なうことが重要である。また、影響がある場合には膨潤ひずみに対処するための対策工を事前に考慮しておく必要がある。この様なことから、ここでは、室内膨潤試験の特性曲線を用いた膨潤ひずみを予測する手法およびその対策工としてロックボルトをとり上げ、そのモデル化手法について述べる。さらに、切土後、数年を経て路面ならびに石積み擁壁に変状が確認された切土のり面について解析例を示しその妥当性について検討を行なう。

2. 膨潤に起因する変形の予測手法

2. 1 膨潤ひずみ特性のモデル化

膨潤ひずみに起因する変形は、一般に図-1に示すように応力と時間に依存した形で生ずる。すなわち、上載圧（土被り×単位体積重量）が大きくなれば発生する膨潤ひずみは減少し、また、時間の経過と共に膨潤ひずみは増大していく。したがって、膨潤ひずみ ε_s は応力 σ および時間 T の関数として、一般形で次のように表わされる。

$$\varepsilon_s = \varepsilon_s(\sigma, T) \quad (1)$$

ここでは、簡単のために、膨潤ひずみは体積成分 ε_{sv} だけが発生し、原因となる応力は等方応力 σ_m だけであると仮定する。これから(1)式は次のようになる。

$$\varepsilon_s = \varepsilon_{sv}(\sigma_m, T) m \quad (2)$$

ただし、

$$\varepsilon_s = \begin{Bmatrix} \varepsilon_{s11} \\ \varepsilon_{s22} \\ \varepsilon_{s33} \\ \varepsilon_{s12} \\ \varepsilon_{s21} \\ \varepsilon_{s31} \end{Bmatrix}, \quad \sigma = \begin{Bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{12} \\ \sigma_{21} \\ \sigma_{31} \end{Bmatrix}, \quad m = \frac{1}{3} \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix}, \quad \sigma_m = \frac{1}{3}(\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33}), \quad \varepsilon_{sv} = \varepsilon_{s11} + \varepsilon_{s22} + \varepsilon_{s33}$$

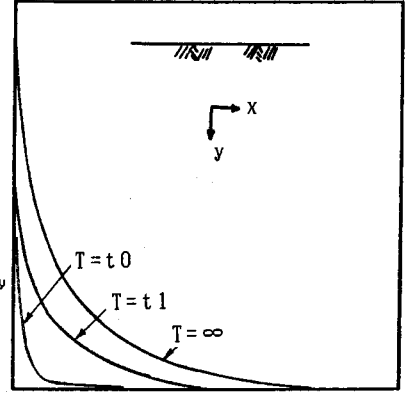


図-1 上載圧と膨潤ひずみ関係の概念図

2. 2 数値解析手法

全ひずみを ε とすると応力-ひずみ関係は

$$\sigma = D(\varepsilon - \varepsilon_s) \quad (3)$$

と表わされる。ここで、 D は応力-ひずみ関係マトリックスである。

つりあい方程式に仮想仕事の原理を適用すると

$$\int \sigma \delta \varepsilon dv = \int_{st} \delta U t ds + \int \delta U f dv \quad (4)$$

を得る。(4)式を離散化し(3)式を代入し整理すると次式となる。

$$KU = F + F^* \quad (5)$$

ただし、

$$K = \int B^T D B dv$$

$$F = \int_{st} N^T t ds + \int_v N^T f dv$$

$$F^* = \int_v B^T D \varepsilon_s dv$$

B は変位-ひずみ関係マトリックス、 N は形状関数、 t はトラクション、 f は慣性力、 U は変位ベクトルである。ここで、(5)式の F^* は図-1の膨潤ひずみの特性曲線から計算される値である。これは応力の関数であるため結果的に F^* は変位 U の関数となる。したがって、膨潤ひずみを求めるためには(5)式を変位 U に関する非線形方程式として取り扱う必要がある。

3. ロックボルトの有限要素モデル¹⁾

ここで示すロックボルト要素はロックボルトシステムの全てのメカニズム（ボルトの軸力とせん断力、グラウトのせん断、垂直荷重）を考慮している。ロックボルトは、鋼棒からなる部分とグラウトで構成されるものとして考える。図-2にロックボルトシステムの概念図を示す。

まず、ボルトは有限体積の円柱で、軸対称と仮定する。作用荷重に対するボルトの力学的な応答は軸応力とせん断応力で表現されるものとする。

また、グラウトはボルトおよび地盤の2つの接触面を持ち、ボルトが地盤に力を伝達するのに重要な媒体であると考えられる。この力の伝達は主にグラウトのせん断力が支配するものとする。さらにグラウトは破壊と剝離過程で生じるダイレイタンスーを表現することが可能である。この場合、グラウトもまた、軸対称の円柱として仮定する。作用荷重に対する力学的応答は軸と平行方向に生じるせん断力と半径方向応力からなるものとする。

ロックボルト要素の剛性マトリックスを式(6)に示す（詳細は Aydan(1989)参照）。要素は、棒要素と Gh aboussiタイプの接合要素を合成することにより構成されている。ここではロックボルトシステムの全体を示している。しかし、ロックボルトに期待する効果やコンピュータによる計算コストの低減を目的として単純化も可能である。要素は3次元の場合、8節点から構成されるが、そのうち2つは鋼棒として用いられ、残りは岩盤として用いられる。また、2次元の場合、6節点となる。

(6)式は局所座標系におけるボルト要素の剛性マトリックスである。

$$K_{local}^e = \begin{bmatrix} \frac{1}{9}[K]_{ga} & \frac{1}{9}[K]_{ga} & \frac{1}{9}[K]_{ga} & -\frac{1}{3}[K]_{ga} \\ \frac{1}{9}[K]_{ga} & \frac{1}{9}[K]_{ga} & \frac{1}{9}[K]_{ga} & -\frac{1}{3}[K]_{ga} \\ \frac{1}{9}[K]_{ga} & \frac{1}{9}[K]_{ga} & \frac{1}{9}[K]_{ga} & -\frac{1}{3}[K]_{ga} \\ -\frac{1}{3}[K]_{ga} & -\frac{1}{3}[K]_{ga} & -\frac{1}{3}[K]_{ga} & [K]_{ga} + [K]_b \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\text{where} \quad [K]_b = \begin{bmatrix} K_b^r & 0 & 0 & -K_b^r & 0 & 0 \\ 0 & K_b^r & 0 & 0 & -K_b^r & 0 \\ 0 & 0 & K_b^z & 0 & 0 & -K_b^z \\ -K_b^r & 0 & 0 & K_b^r & 0 & 0 \\ 0 & -K_b^r & 0 & 0 & K_b^r & 0 \\ 0 & 0 & -K_b^z & 0 & 0 & K_b^z \end{bmatrix}$$

$$[K]_{ga} = \begin{bmatrix} 2K_{ga}^r & 0 & 0 & K_{ga}^r & 0 & 0 \\ 0 & 2K_{ga}^r & 0 & 0 & K_{ga}^r & 0 \\ 0 & 0 & 2K_{ga}^z & 0 & 0 & K_{ga}^z \\ K_{ga}^r & 0 & 0 & 2K_{ga}^r & 0 & 0 \\ 0 & K_{ga}^r & 0 & 0 & 2K_{ga}^r & 0 \\ 0 & 0 & K_{ga}^z & 0 & 0 & 2K_{ga}^z \end{bmatrix}$$

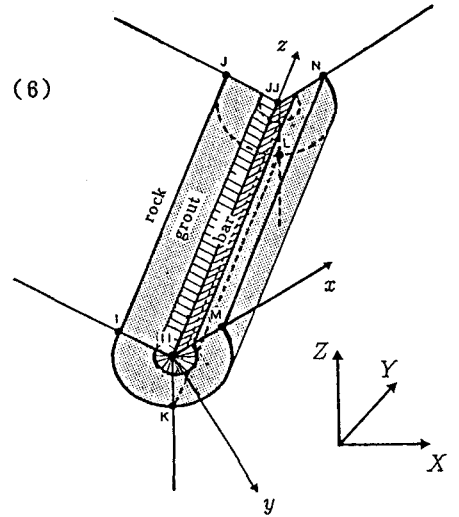


図-2 ロックボルトシステムの概念図

$$K_b^r = \frac{G_b A}{L} \quad K_b^z = \frac{E_b A}{L} \quad A = \pi r_b^2, \quad L = z_{JJ} - z_{II}.$$

$$K_{ga}^r = \pi E_{ga} \frac{L}{3 \ln(r_h/r_b)} \quad K_{ga}^z = \pi G_{ga} \frac{L}{3 \ln(r_h/r_b)}$$

また、局所座標系の剛性マトリックスは次式を用いて、全体座標系の剛性マトリックスに変換される。ただし、Tは座標変換マトリックスである。

$$K_{global}^e = T^T K_{local}^e T \quad (7)$$

- E_b : ボルトの弾性係数
- G_b : ボルトのせん断弾性係数
- E_{ga} : グラウトの弾性係数
- G_{ga} : グラウトのせん断弾性係数
- r_b : ボルトの半径
- r_h : 孔の半径
- L : ボルトの長さ

4. 解析例

高速道路の切土区間において、道路供用後5年経過時に石積み擁壁にクラックが生じ図-3に示す範囲で切土のり面および路面に変状が確認された²⁾。調査の結果、変状の原因は熱水変質を受けた安山岩溶岩の膨潤によることが明かとなり、昭和60年1月に石積み擁壁をとり壊し、のり面整形後にロックボルトと吹付けコンクリートによる対策工を施した。

図-4は中央分離帯に設けた地中変位計(B₂-4)の現場計測結果より膨潤ひずみの将来予測を行なったものである。

図-4には、ボーリングコアの室内膨潤試験³⁾によって求めた膨潤ひずみ曲線を白丸で示した。常時地下水位以下にある1.2mより以深では自然状態の曲線に、そして、乾湿の繰り返しを受ける地表付近では炉乾燥状態試料の曲線に漸近した形で変位が終息することが予測され、膨潤ひずみの事前予測に室内膨潤試験が有効なことがわかる。

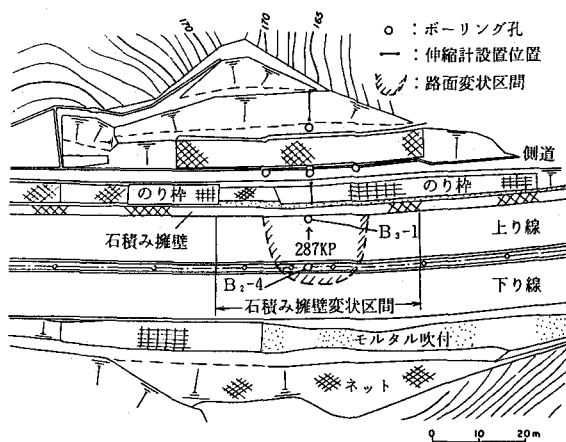


図-3 変状区間と計測機器設置位置

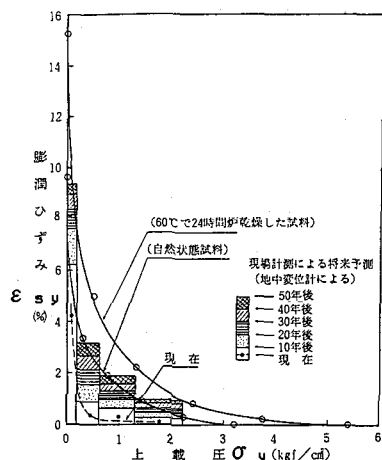


図-4 吸水膨潤試験と現場計測に基づく膨潤ひずみの予測

ここでは、ロックボルトの効果を検討するために対策工を施工した昭和60年以降の動態観測結果を用いて前述した解析を行なった。解析に用いた、応力-膨潤ひずみ関係を図-5に示す。これは、一定応力の状態での、昭和60年1月から昭和61年8月の間で発生したB₂-4の地中変位計の現場計測結果を基に算定した。FEM解析メッシュ図を図-6に示す。

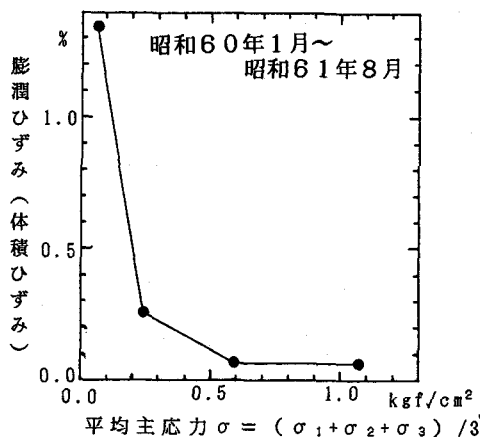


図-5 平均主応力と膨潤ひずみの関係 (B₂-4の地中変位計による)

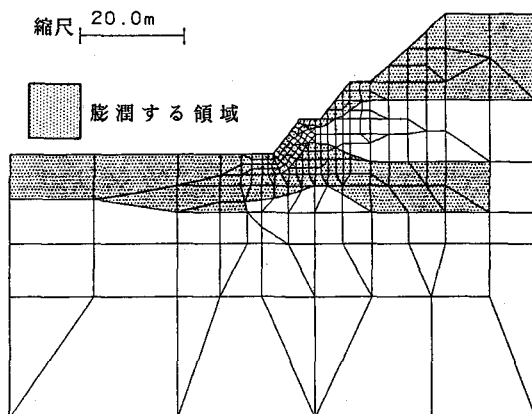


図-6 FEM解析メッシュ図

図-7に解析によって求められた膨潤ひずみ（体積ひずみ）を示す。また、図-8に変形図を示す。膨潤ひずみが多く発生するのは、法肩部分であり、ボルトが無い場合は、その領域が拡大している。図-9にボルト軸力図を示したが、法肩部分は法尻部分より大きく、さらに、地表面に近いほど軸力が大きい傾向が伺われる。

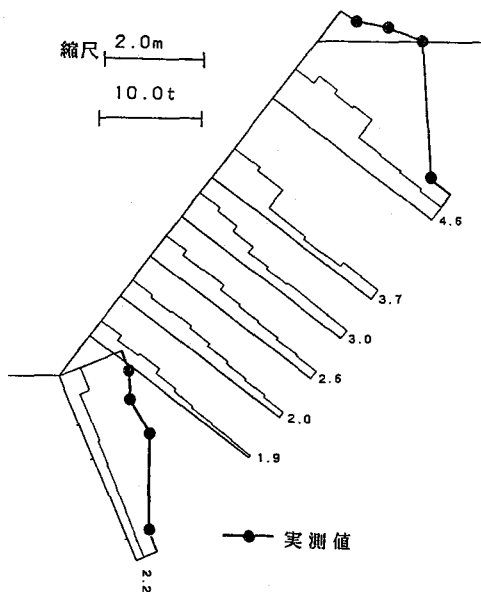


図-9 ロックボルト軸力図

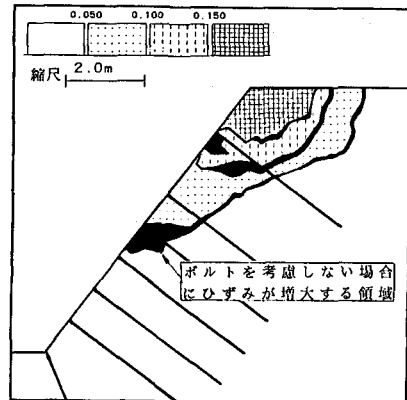


図-7 膨潤ひずみ図（体積ひずみ）

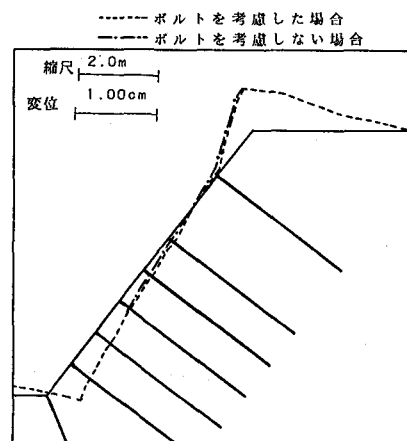


図-8 膨潤による変形図

5. あとがき

本論文では膨潤性を有する地山の掘削後の変位予測を現場計測結果と室内膨潤試験に基づいて行なう方法について述べた。また、対策工としてのロックボルトのモデル化手法について考察し実際の現場に適用した。

解析の結果算定したボルトの軸力分布は絶対値的には開きがあるが実測値に近い発生形態を示しており本手法の有効性が示された。絶対値的な値の開きの原因としては、計算上平面ひずみを仮定しているが実際には線材としてボルトの効果が発揮されている点に両者の差が現われていることが考えられるが、今後の検討課題としたい。

なお、ここで示した膨潤ひずみの解析手法に関しては名古屋大学工学部京谷孝史氏に貴重な意見を戴いたので、ここに謝意を表する。

<参考文献>

- 1) Omer AYDAN: THE STABILISATION OF ROCK ENGINEERING STRUCTURES BY ROCK BOLTS, 名古屋大学学位論文, 1989
- 2) 植本直之、大塚康範、満弘之; "膨潤性地山における変形挙動と対策工の効果"、土と基礎、Vol.36, No.5, pp.43-48, 1988.5
- 3) ISRM, Commission on Swelling Rock and Working Group on Swelling Rock of the Commission on the Testing Methods H. Einstein (Co-ordinator): Suggested methods for laboratory testing of argillaceous swelling rocks, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Vol.26, No.5, pp.415-426, 1989