

(39) 2 系統の不連続面を有する岩盤における ロックボルトの補強効果

㈱ニュージェック 正会員 ○ 北條 明, 中村 真
関西電力㈱ 正会員 打田 靖夫, 吉田 次男
神戸大学工学部 正会員 櫻井 春輔

Reinforcement effect of rockbolts installed in rock mass with double jointsets

Akira HOJO, Makoto NAKAMURA, NEWJEC Inc.
Yasuo UCHITA, Tsugio YOSHIDA, The Kansai Electric Power co., Inc.
Shunsuke SAKURAI, Kobe University.

Abstract

In this study, a constitutive relationship of rock mass with installation of rockbolts is derived from an equivalent continuous model, taking into consideration the stiffness improvement of discontinuities by reinforcement effect of rockbolts. The effectiveness of the constitutive equation is discussed by FEM analyses to compare the proposed relationship with one of a homogeneous model.

The Ohkawachi underground power house cavern is chosen as a case study, where precise measurements have been taken. The analyzed result by the proposed method is fairly good agreement with the measurement results than the conventional homogeneous model.

1. まえがき

トンネルや地下発電所などの施工において、不連続性岩盤の補強工としてのロックボルトの効果は広く認められている。解析においてその効果を把握する場合には、個々の不連続面とロックボルトを忠実にモデル化して解析を行う必要がある。すなわち、ロックボルトに梁要素を用い、不連続面にジョイント要素を用いたFEM解析や、DEM解析を行う必要がある。しかし、多数の不連続面が存在する岩盤では、解析モデルは非常に複雑なものとなり、不連続面の角度や位置の変更、あるいはロックボルトの打設ピッチを変更しながら、幾種類もの条件で解析を実施するのは困難である。

本研究は、ロックボルトによる岩盤の補強効果を不連続面の剛性の向上と考え、2系統の不連続面を有する岩盤を等価な連続体としてモデル化する方法¹⁾により導いた構成式を示し、その構成式を導入したFEM解析を行い、解析手法の有効性について検討を行ったものである。

2. ロックボルトのモデル化

ロックボルトを含む不連続面をそれと等価な不連続面に置き換えるにあたり、永井ら²⁾は不連続性岩盤におけるロックボルトの役割が、不連続面の変形の拘束にあるとして、その不連続面の等価な垂直剛性 K_n およびせん断剛性 K_s を求め、ロックボルトにより不連続面の変形が拘束される効果を表現した。以下にその概要を示す。なお、ロックボルトは全面定着型を考えている。

(1) 不連続面の等価垂直剛性

いま、ロックボルトにより不連続面に作用する垂直応力 σ_n （不連続面を圧縮する方向を正とする）の一部が分担され、残りの応力が不連続面に作用する。そして、これらの応力に対応して、両者には等垂直変位が生じると考えて、ボルトを含む不連続面と等価な不連続面の垂直剛性を求める。

不連続面とボルトのなす角を θ_b 、不連続面の最大可能閉塞量を V_{mc} 、不連続面の垂直剛性を K_n 、ロックボルトのヤング係数およびせん断弾性係数を E_b および G_b 、直径を D_b 、さらにボルトを含む不連続面の単位面積当りのボルトの本数を N_b とすると、ボルトを含む不連続面と等価な不連続面の垂直剛性 K_n^* は、次のように導かれる。

$$K_n^* = K_n(1 - N_b A_b) + E_b N_b A_b / V_{mc} \{1 + (4 E_b / 3 G_b) \cot^2 \theta_b\} \dots \dots \dots [1]$$

(2) 不連続面の等価せん断剛性

先の場合と同じように、ロックボルトにより不連続面に作用する水平応力 τ の一部が分担され、残りの応力が不連続面に作用する。そして、これらの応力に対応して、両者には等水平変位が生じると考えて、ボルトを含む不連続面と等価な不連続面のせん断剛性を求める。

不連続面のせん断剛性 K_s は、不連続面に作用する垂直応力 σ_j に依存する量として次のように表される。

$$K_s = K_j \gamma_w (\sigma_j / P_a)^{n_j} \dots \dots \dots [2]$$

ここに、 K_j は剛性数、 n_j は剛性指数を示す。なお、 γ_w および P_a はそれぞれ水の比重および大気圧で、 K_j の次元を無次元化するために用いられているパラメータである。さらに σ_j は、不連続面自体が受ける応力であり、次式で与えられる。

$$\sigma_j = K_n \sigma_n / [K_n(1 - N_b A_b) + E_b N_b A_b / V_{mc} \{1 + (4 E_b / 3 G_b) \cot^2 \theta_b\}] \dots \dots \dots [3]$$

ところで、ロックボルトは一般に鋼材から造られており、そのヤング係数とせん断弾性係数の違いに起因して、全面定着型のロックボルトのようにボルトとその周辺岩盤が一体化されている場合、不連続面にはボルトからその変位に対応した応力が作用するようになる。この付加応力を $d\sigma_j$ とすると、次式で表せる。

$$d\sigma_j = \tau E_b (-1 + 4 E_b / 3 G_b) \cot \theta_b / V_{mc} (1 / N_b A_b - 1) \{K_j \gamma_w (\sigma_j / P_a)^{n_j} (1 - N_b A_b) (\cot^2 \theta_b + 4 E_b / 3 G_b) + E_b N_b A_b / V_{mc} \} \{1 + (4 E_b / 3 G_b) \cot^2 \theta_b\} \dots \dots \dots [4]$$

したがって、ボルトを含む不連続面と等価なせん断剛性 K_s^* は、これらの関係を用いて次のように導かれる。

$$K_s^* = K_j \gamma_w \{(\sigma_j + d\sigma_j) / P_a\}^{n_j} (1 - N_b A_b) + E_b N_b A_b / V_{mc} (\cot^2 \theta_b + 4 E_b / 3 G_b) \dots [5]$$

3. 応力-ひずみ関係

まず図-1に示すような、ある系の不連続面が無限に広がる岩盤の一部としての要素モデルを考え、その不連続体モデルと等価な挙動を示す連続体の応力-ひずみ関係を誘導する。

不連続面に作用する垂直応力 σ_n およびせん断応力 τ は、モデル境界の応力 σ_x 、 σ_y および τ_{xy} を用いて次のように求められる。

$$\sigma_n = \sigma_y \cos^2 \theta + \sigma_x \sin^2 \theta - \tau_{xy} \sin 2\theta \dots \dots \dots [6]$$

$$\tau = \{(\sigma_y - \sigma_x) / 2\} \sin 2\theta + \tau_{xy} \cos 2\theta \dots \dots \dots [7]$$

不連続性岩盤の全体変形は、岩石実質部の変形と不連続面における変形の和として表せると考え、不連続性岩盤の応力-ひずみ関係を岩石実質部と不連続面について個々に求めたものを重ね合わせて算出する。したがって、この不連続体モデルと等価な挙動を示す連続体の応力-ひずみ関係は、平面ひずみ状態では以下のように誘導される。

$$\epsilon_x = (1 + \nu_1) \{ (1 - \nu_1) \sigma_x - \nu_1 \sigma_y \} / E_1 + \sigma_n \sin^2 \theta / d S K_n - \tau \sin 2\theta / 2 d S K_s \dots \dots \dots [8]$$

$$\epsilon_y = (1 + \nu_1) \{ -\nu_1 \sigma_x + (1 - \nu_1) \sigma_y \} / E_1 + \sigma_n \cos^2 \theta / d S K_n + \tau \sin 2\theta / 2 d S K_s \dots \dots \dots [9]$$

$$\gamma_{xy} = 2(1 + \nu_1) \tau_{xy} / E_1 - \sigma_n \sin 2\theta / d S K_n + \tau \cos 2\theta / d S K_s \dots \dots \dots [10]$$

ここで、 E_1 、 ν_1 は岩石実質部の弾性係数およびポアソン比、 θ 、 dS は不連続面の角度および間隔を示す。

よって、ロックボルトを含む2系統の不連続面を有する岩盤と等価な連続体の構成式は、個々の不連続面の柔性の和として、先に示した等価な垂直剛性 K_n^* およびせん断剛性 K_s^* を用いて次のように表される。

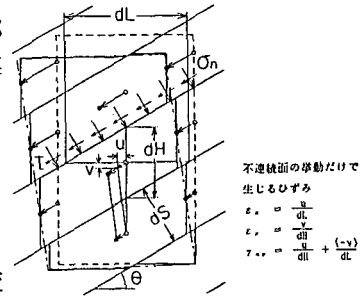


図-1 要素モデル

$$\{\varepsilon\} = [C] \{\sigma\} \dots\dots\dots [11]$$

$\{\varepsilon\} = \{\varepsilon_x \varepsilon_y \varepsilon_{xy}\}^T$: ひずみベクトル

$\{\sigma\} = \{\sigma_x \sigma_y \sigma_{xy}\}^T$: 応力ベクトル

$[C] = [C_{ij} (i, j = 1, 2, 3)]$: コンプライアンスマトリックス

$$C_{11} = (1 - \nu_1^2) / E_1 + \sum_{j=1}^2 (\sin^2 \theta_j / K^*_{nj} + \cos^2 \theta_j / K^*_{sj}) \sin^2 \theta_j / d S_j$$

$$C_{12} = C_{21} = -\nu_1 (1 + \nu_1) / E_1 + \sum_{j=1}^2 (1 / K^*_{nj} - 1 / K^*_{sj}) \sin^2 \theta_j \cos^2 \theta_j / d S_j$$

$$C_{13} = C_{31} = \sum_{j=1}^2 \{-2 \sin^2 \theta_j / K^*_{nj} - (\cos^2 \theta_j - \sin^2 \theta_j) / K^*_{sj}\} \sin \theta_j \cos \theta_j / d S_j$$

$$C_{22} = (1 - \nu_1^2) / E_1 + \sum_{j=1}^2 (\cos^2 \theta_j / K^*_{nj} + \sin^2 \theta_j / K^*_{sj}) \cos^2 \theta_j / d S_j$$

$$C_{23} = C_{32} = \sum_{j=1}^2 \{-2 \cos^2 \theta_j / K^*_{nj} + (\cos^2 \theta_j - \sin^2 \theta_j) / K^*_{sj}\} \sin \theta_j \cos \theta_j / d S_j$$

$$C_{33} = 2(1 + \nu_1) / E_1 + \sum_{j=1}^2 \{4 \sin^2 \theta_j \cos^2 \theta_j / K^*_{nj} + (\cos^2 \theta_j - \sin^2 \theta_j)^2 / K^*_{sj}\} / d S_j$$

4. 地下空洞掘削シミュレーション

(1) 地下空洞の概要³⁾

シミュレーションのモデルとしたのは、関西電力 備大河内水力発電所の地下発電所空洞である。本発電所は、最大出力128万kW (32万kW×4) の純揚水式発電所であり、地下発電所空洞の断面形状は大規模地下空洞では国内初の弾頭形を用いている。地下発電所は土被りが約300mに位置し、発電所空洞の大きさは、幅 24m、高さ 46.6m、長さ134.5mである。地下発電所空洞の施工にあたっては、空洞周辺岩盤の安定性を確保するために、プレストレスアンカー (PS工)、ロックボルト (RB)、吹付コンクリートによる岩盤補強工事を行うと同時に、地中変位などの計測を行いながら掘削を進めた。

地下空洞周辺岩盤は、中世代の生野層群に属するひん岩であり、解析断面の岩盤状況は、図-2に示すように、全体的には電研分類によるC₁₁級の良好岩盤であるが、放水路側のアーチ部と側壁部には発電所空洞の長軸と平行な走向で水圧管路側へ傾斜するシームが多数存在している。一方、水圧管路側は全体的にシームが少なく良好な岩盤状況になっている。

卓越するジョイント群は3組存在しており、そのうちの2組はN45W50SW、およびN55W40NEの走向・傾斜を示し、その走向が地下空洞の長軸方向にほぼ平行である。もう1組のジョイント群は、N60E85NWで、その走向が長軸にほぼ直交しており、掘削による空洞側壁のはらみ出しなどに関しては、その影響は小さいと考えた。そこで解析では、走向が地下空洞の長軸方向にほぼ平行な2組のジョイント群を対象とした。すなわち、ジョイントの傾斜は、左 (水圧管路側) 落ち50度と右 (放水路側) 落ち40度とする。

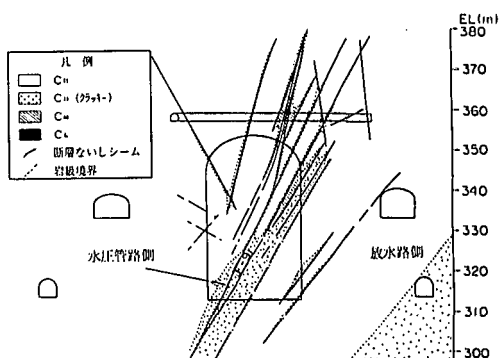


図-2 地質断面図

表-1 使用した物性値

等方連続体解析	弾性係数	$E_0 = 30,000 \text{ kgf/cm}^2$
	ポアソン比	$\nu_0 = 0.25$
岩体実部	弾性係数	$E_1 = 750,000 \text{ kgf/cm}^2$
	ポアソン比	$\nu_1 = 0.25$
	傾 度	$\theta_1 = 50^\circ$ $\theta_2 = 40^\circ$
	間 隔	$dS_1 = 20 \text{ cm}$ $dS_2 = 33 \text{ cm}$
	せん断弾性	$K_n = 1200 \text{ kgf/cm}^2$ (但し $K_n \geq 500 \text{ kgf/cm}^2$)
	圧縮弾性	$K_s = 3,000 \text{ kgf/cm}^2$ (但し $\sigma_n < 0$ のとき $K_n = 50 \text{ kgf/cm}^2$)
	最大可能変位	$V_{\max} = 0.6 \text{ cm}$
	打設角度	壁面垂直
	直径×長さ	$D_0 = 2.5 \times 500 \text{ cm}$
	弾性係数	$E_0 = 2,100,000 \text{ kgf/cm}^2$
等価連続体解析	ポアソン比	$\nu_0 = 0.3$
	打設ピッチ	(アーチ部) 1本/22,500cm ² 1本/30,000cm ² (C23C)
	打設ピッチ	17本/90,000cm ² 17本/120,000cm ²
	初期導入力	45,000 kgf/1孔
初期応力	100kg/cm ² σ_{xx} σ_{yy} σ_{zz} σ_{xy} σ_{yz} σ_{zx}	$\sigma_{xx} = -78.6 \text{ kgf/cm}^2$ $\sigma_{yy} = -59.4 \text{ kgf/cm}^2$ $\sigma_{zz} = 28.2 \text{ kgf/cm}^2$

(2) 解析条件

解析は既存のFEMプログラムに式[11]の応力-ひずみ関係を取り込んだ等価連続体解析（支保無し、RB支保のみ、RB+PS支保）と、従来の等方連続体解析（支保無し）を、平面ひずみの条件下で行った。表-1に掘削解析に用いた物性値を示す。

等価連続体解析で用いた物性値のうち、岩盤実質部の物性については岩石試験の結果から、不連続面の間隔および角度は地質観察結果を用いた。また、不連続面の剛性は原位位置せん断試験に用いた供試体を元にもどし、もう一度せん断する摩擦抵抗力試験結果から求めた。本解析では、PSアンカーの効果は、等価な内圧として表現した。さらに、等方連続体解析は、空洞変位を参考に弾性係数を決定した。

地山の初期応力の測定結果は最大主応力が約 100 kgf/cm²であり、その方向は発電所長軸方向にほぼ直交し、傾斜は水平より36度下向き（右落ち）と報告されている。

計算では、掘削を6段階とし、支保を行う場合、前ステップで掘削を行った領域でロックボルトのほぼ全長分の範囲の不連続面の剛性が向上するとして物性値を変化させ、次のステップの掘削を行った。

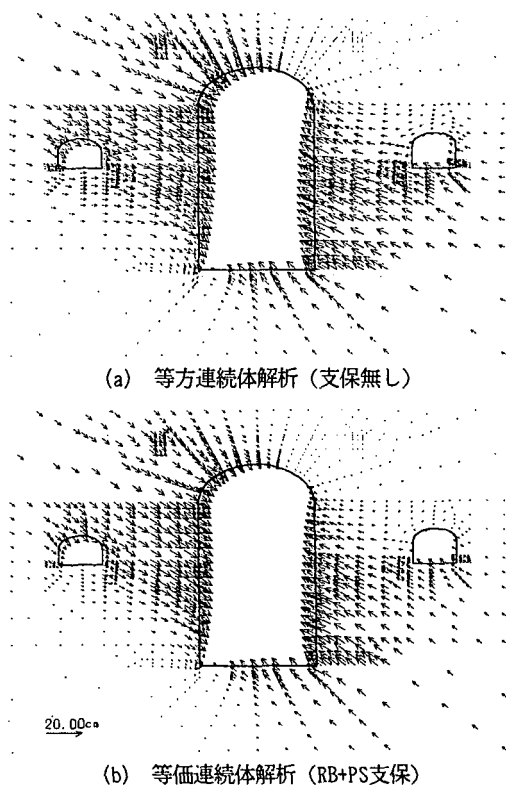


図-3 変位分布

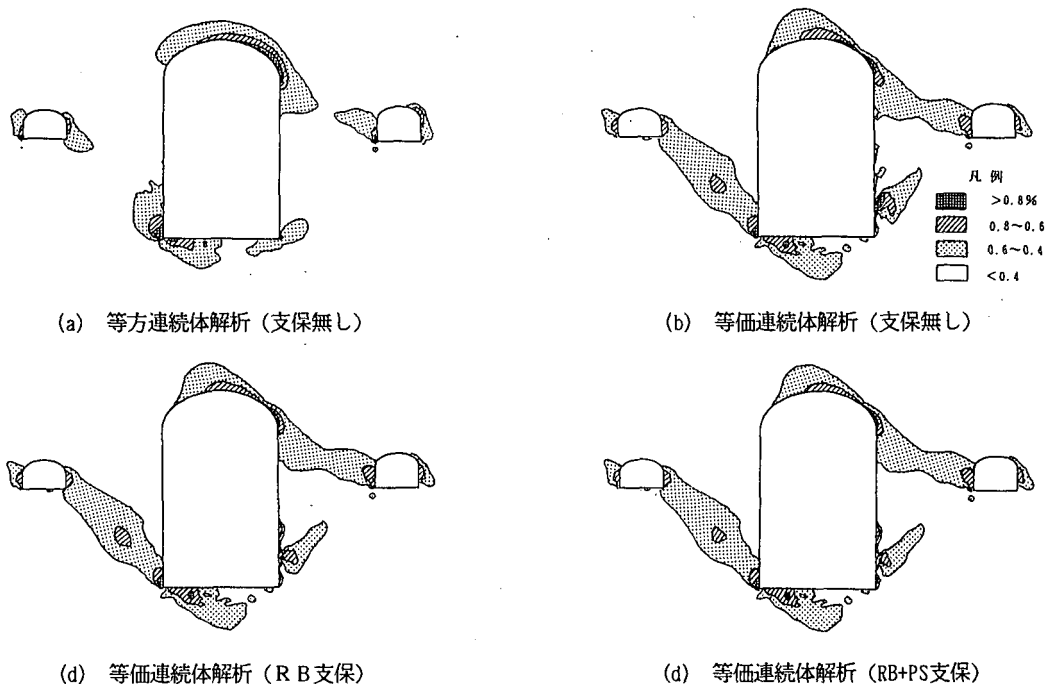


図-4 掘削によって発生する最大せん断ひずみの増分

(3) 解析結果

図-3に、等方連続体解析と等価連続体解析(RB+PS支保)から得られた変位分布を示す。この図では、放水路側壁面の分布形状にやや違いが見られる。図-4には、各解析での掘削によって発生する最大せん断ひずみの増分を示す。同図より、支保が無い場合の等方連続体解析ではアーチ部に広い範囲で最大せん断ひずみの大きい値が存在するが、等価連続体解析では、アーチ表面付近に集中している。また、放水路側の壁面下部に最大せん断ひずみの大きい部分が、等価連続体解析では広く存在する。この放水路側壁面下部の最大せん断ひずみが大きい領域は、ロックボルトを考慮した場合、ロックボルトとPSアンカーを考慮した場合となるにつれて、減少している。次に、計測値と各解析での地中変位の分布を比較した。比較をしたのは、図-5のAからCの3計測線であり、その結果を図-6に示す。A計測線では、表面付近で計測値は大きな値となっているが、各解析ではほとんど変位が出ていない。ただし、等方連続体解析では空洞の奥で縮みが表れるが、等価連続体解析では、表面を除いて計測値と同様に変位がほとんど生じていない。次にB計測線では、等方連続体解析と等価連続体解析はほぼ等しい分布であるが、共に計測値より小さい値となった。さらに、C計測線では、計測値に対し等価連続体解析は壁面付近の変位分布がほぼ等しくなっているが、等方連続体解析ではかなり小さい結果となった。

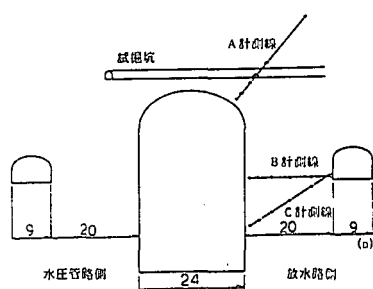


図-5 計測線位置

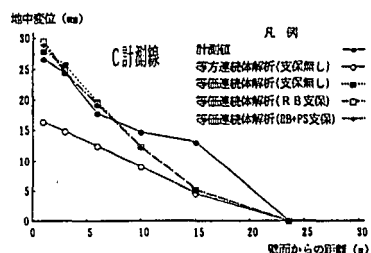
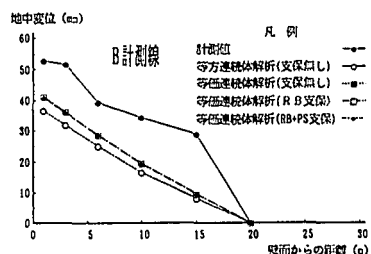
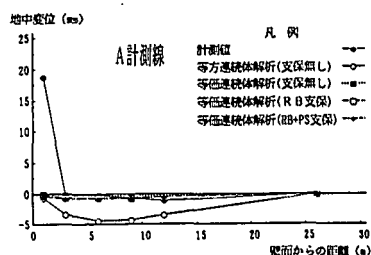


図-6 地中変位分布

5. まとめ

2系統の不連続面を有する岩盤におけるロックボルトの補強効果を取り込んだFEM解析を行い、その効果を最大せん断ひずみ分布により確認した。さらに、地中変位分布の計測値との比較において、A計測線でのアーチ部壁面の剝離がFEM解析では表現できなかったが、これは今後、等価連続体解析において、不連続面の剝離を考慮することにより、実際の挙動に近い値が得られるものと思われる。またC計測線付近で大きな変位が計測されているが、この状況を等価連続体解析では表現することができた。

なお、今回の解析ではPS工による支保効果を等価な内圧で表現したが、今後適切なモデル化を検討する必要がある。

(参考文献)

- 1) 北條明・中村真・打田靖夫・吉田次男・櫻井春輔：2系統の不連続面を有する岩盤におけるロックボルトの補強効果、土木学会第49回年次学術講演会、3-A, pp. 724~725, 1994.
- 2) 永井哲夫・櫻井春輔：ロックボルトにより補強された不連続性岩盤の挙動に関する研究、神戸大学大学院自然科学研究科紀要、10-B, pp. 1~12, 1992.
- 3) 片山武・矢田篤・平川芳明：大河内水力発電所地下発電所空洞掘削時の情報化施工、電力土木、No. 237, pp. 97~107, 1992.