

MBC解析へのロックボルト補強モデルの導入

澤田 昌孝^{1*}・青木 聡²・長井 和樹³・吉田 秀典⁴・堀井 秀之⁵

¹電力中央研究所 地球工学研究所 (〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子1646)

²株式会社四電技術コンサルタント 土木技術部 (〒761-0121 香川県高松市牟礼町牟礼1007-3)

³四国電力株式会社 高知支店電力部 (〒781-2611 高知県吾川郡いの町脇ノ山367-1)

⁴香川大学 工学部安全システム建設工学科 (〒761-3096 香川県高松市林町2217-20)

⁵東京大学 大学院工学系研究科社会基盤学専攻 (〒113-8654 東京都文京区本郷7-3-1)

*E-mail: sawada@criepi.denken.or.jp

トンネルや地下空洞の掘削における周辺岩盤の挙動は、岩盤中に包含される不連続面の変形の影響を強く受ける。MBC解析は、多数の不連続面を有する岩盤を、それと等価な連続体に置き換える手法の一つである。一般に連続体モデルは不連続体と比較してロックボルトの打設効果を表現することが課題であった。本研究では、不連続体解析で用いられるロックボルトモデルに基づき、MBC解析における不連続面に作用する力とすべり・開口変位の関係にロックボルトによる力を加えることにより、ロックボルトを含む不連続性岩盤の等価連続体モデルの定式化を行った。仮想的な問題の解析により、ロックボルトの支保効果を不連続体解析と同等に再現できることを確認した。

Key Words : rockbolt, jointed rock mass, equivalent continuum model, tunnel, underground cavern

1. はじめに

トンネルや地下空洞を掘削する際の周辺岩盤の挙動は、岩盤中に分布する不連続面の変形などの影響を強く受ける。したがって、周辺岩盤の挙動予測や合理的な支保設計のためには、不連続面の挙動を反映した解析手法を用いる必要がある。このような不連続性岩盤の解析手法は、不連続体モデリングと連続体モデリングに大別される¹⁾。前者は不連続面を陽にモデル化する手法で、ジョイント要素を用いた有限要素法、個別要素法、不連続変形法などが挙げられる¹⁾。これらの手法は不連続面の分布状況がかなりの確度で把握される場合に適用が可能である。しかし、我が国の岩盤は一般に多数の不連続面を有し、個々の不連続面を個別に取り扱うことは困難であり、不連続性岩盤を等価な連続体に置き換えた解析手法が望まれる。このような解析手法としては、複合降伏モデル、クラックテンソルモデル、損傷テンソルモデルなどが挙げられる¹⁾。また、吉田・堀井²⁾はMBC解析（空洞掘削により生ずる不連続面のせん断すべり・開口を岩盤挙動の支配メカニズムと捉え、マイクロメカニクスに基づきこれをモデル化した解析手法）を提案した。MBC解析は、不連続面の方向や間隔を直接入力することができ、かつ最終的な不連続面のせん断・開口量の空間分布を解析結果として得ることができるという特徴を有する。

一方、不連続性岩盤における支保の效果に着目すると、不連続体モデリングでは、比較的ロックボルトなどの効果を表現しやすい。例えば、ブロック体の個別要素法（DEM）解析コード³⁾ではLorig⁴⁾が提案したLocal-Reinforcement modelを導入し、ロックボルトの効果を表現できるようになっている。

それに対して連続体モデリングの場合、ロックボルトと等価な剛性を有する要素（トラサ要素など）を配置しただけでは、ロックボルトによる不連続面の縫い付け効果などの表現が困難であるため、実際のロックボルトの打設と等価な現象・効果を得ることが難しい。MBC解析も等価連続体手法であることから、ロックボルトに代表される支保の効果を表現することが課題であった。吉田ら⁵⁾は、MBC解析において、不連続面の摩擦角の増大、あるいは不連続面の連結性の低下により、ロックボルトの導入効果を表現することを提案した。このアプローチでは、ロックボルトの特性（断面積、弾性係数、打設角、打設ピッチなど）とパラメータ値の対応に関する検討が必要である。本研究では、MBC解析にLorigのLocal-Reinforcement modelを導入し、不連続体モデリングと同様にロックボルト効果を表現できるようにした。また、同様のロックボルトモデルを持つ個別要素法解析コードによる解析結果との比較を通して、提案手法の妥当性を検討した。

2. MBC解析へのロックボルトモデルの導入

(1) Local-Reinforcement model

Lorig⁴⁾の提案したLocal-Reinforcement modelは図-1に示すように不連続面と交わるロックボルトを軸方向とせん断方向のバネに置き換え、不連続面のすべりや剥離によるロックボルトの変形を力に換算して解析に導入するものである。入力定数として必要なものは軸剛性 K_a 、軸耐力 P_{ult} 、せん断剛性 K_s 、せん断耐力 S_{ult} とロックボルトの変形範囲を表すアクティブ長 A_L である。軸剛性、軸耐力、せん断剛性、せん断耐力についてはロックボルトとグラウトの機械的性質から算出することができる。軸剛性 k_a は以下の式から推定できる。

$$\begin{aligned} k_a &= \pi k d_1 \\ k &= [(1/2)G_g E_b / (d_2 / d_1 - 1)]^{1/2} \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、 d_1 はボルト直径、 d_2 は削孔直径、 G_g はグラウト材のせん断弾性係数、 E_b はボルト材の弾性係数である。また、せん断剛性 k_s は以下の式から推定できる。

$$\begin{aligned} k_s &= E_b I \beta \\ \beta &= [K / (4E_b I)]^{1/4} \\ K &= 2E_g / (d_2 / d_1 - 1) \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、 I は断面2次モーメント、 E_g はグラウト材の弾性係数である。さらに、軸耐力 P_{ult} およびせん断耐力 S_{ult} は以下の式から推定できる。

$$\begin{aligned} P_{ult} &= 0.1\sigma_c \pi d_2 L \\ S_{ult} &= 0.67d_1^2 (\sigma_b \sigma_c)^{1/2} \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、 σ_c は岩石またはグラウト材の一軸圧縮強さの小さい方、 σ_b はボルトの引張り強さである。

Lorigはロックボルトの軸方向変位 Δu_a に伴う軸力の増分 ΔF_a として以下の関係を提案した。

$$\begin{aligned} \Delta F_a &= k_a |\Delta u_a| f(F_a) \\ f(F_a) &= |P_{ult} - F_a| (P_{ult} - F_a) / (P_{ult})^2 \end{aligned} \quad (4)$$

関数 $f(F_a)$ は軸力 F_a が軸耐力 P_{ult} へ到達するまでの荷重経路を表す。式(4)の代わりに下式を用いると完全弾塑性型のバイリニアモデルとなる。

$$\Delta F_a = \begin{cases} k_a |\Delta u_a| & (F_a < P_{ult}) \\ 0 & (F_a = P_{ult}) \end{cases} \quad (5)$$

せん断抵抗力 F_s についても同様のモデルを適用する。また、Lorigはロックボルト軸力 F_a は、変形時のロックボルトの軸方向 θ に作用するのに対して、せん断抵抗力 F_s は初期のロックボルト軸の方向 θ_0 の法線方向に作用としている。

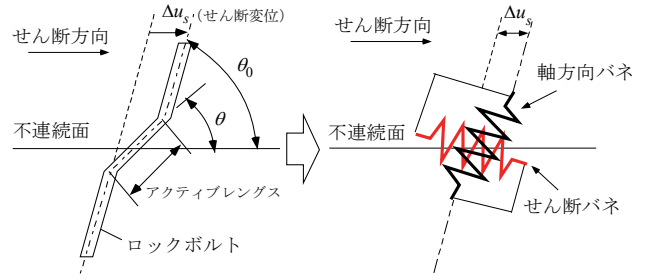


図-1 Local Reinforcement model

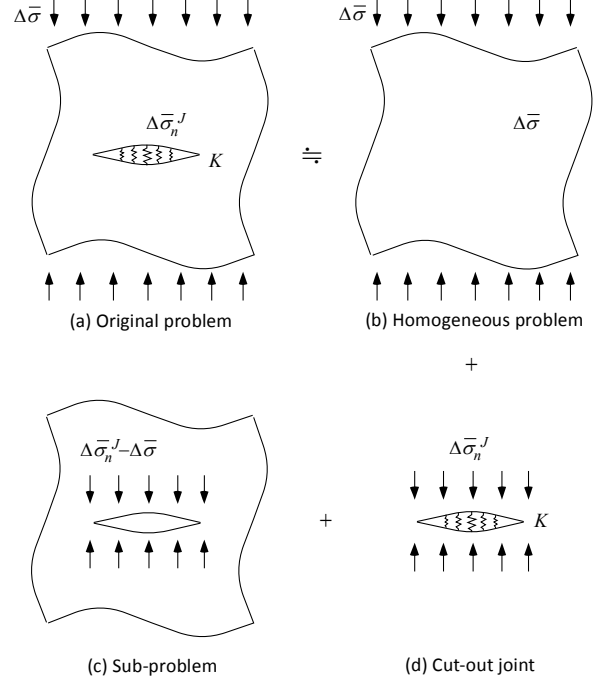


図-2 系の剛性

(2) MBC解析への導入

マイクロメカニクスに基づく連続体モデル (MBCモデル)²⁾は、微視構造要素の存在、あるいはその発生・成長に支配された物体に対する連続体理論である。不連続性岩盤では、不連続面が対象となる微視構造である。

まず、MBC解析における不連続面の剛性の評価について述べる。MBC解析では、不連続面に作用している応力が材料全体の応力と異なり、不連続面の剛性とそれを包含している材料の剛性の比によって決まる。つまり、不連続面を包含している岩盤の剛性が不連続面の剛性と比較して大きければ、相対的に不連続面に作用する応力は小さくなる。また、不連続面の変位が増大すると、不連続面の剛性は減少 (コンプライアンスは増大) するため、その変形に対して、包含している岩盤が不連続面の変形を拘束するようになる。そこで、MBC解析においては、岩盤に包含される不連続面の挙動を決定するために「系の剛性」という概念を採用している。まず図-2に示すようにある一つの不連続面に着目し、もともとの問題(a)を、不連続面を含まない均一材料の問題(b)、不連続

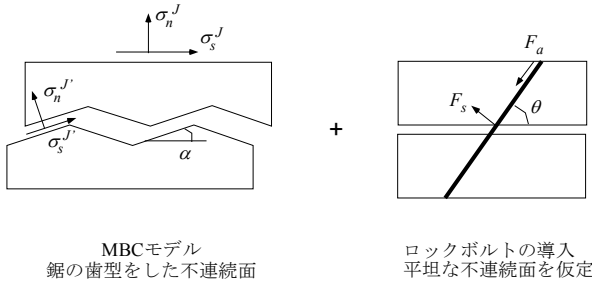


図-3 MBC解析における不連続面変形のモデル化

面をくり抜いた問題(c), そしてくり抜かれた不連続面の問題(d), というように3つの問題に分ける. 問題(c)におけるスリットの相対変位増分の平均値 $\Delta[\bar{u}^S]$ とスリットに作用する平均応力増分 $\Delta\bar{\sigma}^J - \Delta\bar{\sigma}$ の関係は, 以下のように与えられる.

$$\begin{aligned}\Delta\bar{\sigma}_n - \Delta\bar{\sigma}_n^J &= \bar{K}_n \Delta[\bar{u}_n^S] \\ \Delta\bar{\sigma}_s - \Delta\bar{\sigma}_s^J &= \bar{K}_s \Delta[\bar{u}_s^S]\end{aligned}\quad (6)$$

ここで, $\bar{K}_n$ および $\bar{K}_s$ はそれぞれ法線方向, 接線方向の系の剛性であり,

$$\begin{aligned}\bar{K}_n &= \frac{\bar{E}}{\lambda_n^o \lambda_n^c L^J / 2} = \frac{\bar{E}}{\lambda_n^o \bar{L}^J / 2} \\ \bar{K}_s &= \frac{\bar{G}}{\lambda_s^o \lambda_s^c L^J / 2} = \frac{\bar{G}}{\lambda_s^o \bar{L}^J / 2}\end{aligned}\quad (7)$$

と定義される. ここで, $\bar{E}$ は不連続面に対して垂直方向の岩盤の等価接線剛性, $\bar{G}$ は等価接線せん断剛性, L^J は不連続面の寸法, λ_n^o および λ_s^o は不連続面の形状に関する係数である. そして λ_n^c および λ_s^c は不連続面の連結性を表すパラメータであるが, 具体的にこの値を定めるのは難しく, また不連続面の寸法も特定しがたいため, 不連続面の有効寸法 ($\bar{L}_n^J = \lambda_n^c L^J$, $\bar{L}_s^J = \lambda_s^c L^J$) が導入されている. 一般には有効寸法の法線方向と接線方向に対する成分の差も明確でないことから, $\bar{L}^J = \lambda_n^c L^J = \lambda_s^c L^J$ として解析に用いることが多い²⁾.

地下空洞の掘削時には, 不連続面の開口現象が見られるが, 応力が解放されたとはいえ, 依然として圧縮応力場にある不連続面が開口するメカニズムとして, MBC解析では, 図-3に示すように鋸の歯型をした不連続面を考えている. この場合, 不連続面の変形は一方の面におけるせん断すべりにより生じ, 他方の面は開口するものとしている. また, 不連続面の変形は, 以下に示すような条件を満たした際にせん断すべりを生ずるものと仮定している.

$$\left| \bar{\sigma}_s^{J'} \right| = c - \bar{\sigma}_n^{J'} \tan \phi, \quad \bar{\sigma}_n^{J'} < 0 \quad (8)$$

ここで, c , ϕ はそれぞれ不連続面の粘着力, 摩擦角,

$\bar{\sigma}_n^{J'}$ および $\bar{\sigma}_s^{J'}$ はせん断すべりを生じている面に作用する法線方向および接線方向の局所的平均応力である. 開口が起こる面においてはストレスフリーになると仮定している.

不連続面に変位が発生すると, ロックボルトの軸力, せん断抵抗力が不連続面に作用する. 不連続面とロックボルトの交差角の評価にあたっては, 鋸の歯型の起伏を考慮せず, 平坦な不連続面として巨視的に捉える. ロックボルトの変形に伴い発生する軸力およびせん断抵抗力の増分は不連続面の巨視的な変位増分 $\Delta[\bar{u}_n^J]$ ($= \Delta[\bar{u}_n^S]$), $\Delta[\bar{u}_s^J]$ ($= \Delta[\bar{u}_s^S]$) を用いて, 以下のように書ける.

$$\begin{aligned}\Delta F_a &= k_a (\Delta[\bar{u}_n^J] \sin \theta + \Delta[\bar{u}_s^J] \cos \theta) \\ \Delta F_s &= k_s (\Delta[\bar{u}_n^J] \cos \theta_0 - \Delta[\bar{u}_s^J] \sin \theta_0)\end{aligned}\quad (9)$$

なお, 本稿では $0^\circ < \theta$ (θ_0) $< 90^\circ$ のときの式を示す. $90^\circ < \theta$ (θ_0) $< 180^\circ$ のときは一部の+-符号が逆転する.

不連続面全体に作用する巨視的な法線方向・接線方向の平均応力増分は, ロックボルト軸力・せん断抵抗力の増分を含め次のように表される.

$$\begin{aligned}\Delta\bar{\sigma}_n^J &= \frac{1}{2} (\Delta\bar{\sigma}_s^{J'} \tan \alpha + \Delta\bar{\sigma}_n^{J'}) \\ &\quad + \frac{N_b}{S} (\Delta F_a \sin \theta + \Delta F_s \cos \theta_0) \\ \Delta\bar{\sigma}_s^J &= \frac{1}{2} (\Delta\bar{\sigma}_s^{J'} - \Delta\bar{\sigma}_n^{J'} \tan \alpha) \\ &\quad + \frac{N_b}{S} (\Delta F_a \cos \theta - \Delta F_s \sin \theta_0)\end{aligned}\quad (10)$$

ここで, α は起伏角である. 右辺の第3, 4項がロックボルトの効果を表現するために新たに導入された項である. N_b は不連続面と交差するロックボルトの本数, S は不連続面の面積である. せん断すべりを起こしている間, すべりを生じている不連続面における応力増分は, 次の条件を満たすものと仮定する.

$$\Delta\bar{\sigma}_s^{J'} = \begin{cases} -\Delta\bar{\sigma}_n^{J'} \tan \phi & \alpha > 0 \\ \Delta\bar{\sigma}_n^{J'} \tan \phi & \alpha < 0 \end{cases} \quad (11)$$

すべりを生じている不連続面では法線方向の変位が生じないと仮定すると, 以下の変位の適合条件が満たされる.

$$\begin{aligned}\Delta[\bar{u}_n^J] &= \Delta[\bar{u}_s^{J'}] \sin \alpha \\ \Delta[\bar{u}_s^J] &= \Delta[\bar{u}_s^{J'}] \cos \alpha \\ \Delta[\bar{u}_n^{J'}] &= 0\end{aligned}\quad (12)$$

式(6)(9)(10)(11)(12)を連立することにより, m 番目の不連続面群の平均相対変位増分は,

$$\begin{aligned}\Delta[\bar{u}_n^{J(m)}] &= Y_{nn}^{(m)} \Delta\bar{\sigma}_n^{(m)} + Y_{ns}^{(m)} \Delta\bar{\sigma}_s^{(m)} \\ \Delta[\bar{u}_s^{J(m)}] &= Y_{sn}^{(m)} \Delta\bar{\sigma}_n^{(m)} + Y_{ss}^{(m)} \Delta\bar{\sigma}_s^{(m)}\end{aligned}\quad (13)$$

と求まる．ここで、 $\Delta\bar{\sigma}_n^{(m)}$ 、 $\Delta\bar{\sigma}_s^{(m)}$ は平均応力増分の m 番目の不連続面群に対する、垂直、せん断成分であり、 $Y_{nn}^{(m)}$ 、 $Y_{ns}^{(m)}$ 、 $Y_{sn}^{(m)}$ 、および $Y_{ss}^{(m)}$ は、

$$\begin{aligned} Y_{nn}^{(m)} &= \frac{\bar{M}^{(m)}}{\cos \alpha^{(m)}} (\tan \phi^{(m)} + \tan \alpha^{(m)}) \\ Y_{ns}^{(m)} &= \frac{\bar{M}^{(m)}}{\cos \alpha^{(m)}} (1 - \tan \phi^{(m)} \tan \alpha^{(m)}) \\ Y_{sn}^{(m)} &= \frac{\bar{M}^{(m)}}{\sin \alpha^{(m)}} (\tan \phi^{(m)} + \tan \alpha^{(m)}) \\ Y_{ss}^{(m)} &= \frac{\bar{M}^{(m)}}{\sin \alpha^{(m)}} (1 - \tan \phi^{(m)} \tan \alpha^{(m)}) \end{aligned} \quad (14)$$

である．さらに、 $\bar{M}^{(m)}$ は以下のとおりである．

$$\begin{aligned} \bar{M}^{(m)} &= \bar{K}^{(m)} / \left[\left\{ \frac{\bar{K}^{(m)}}{\sin \alpha^{(m)}} + \rho^{J(m)} (k_1^{(m)} + k_2^{(m)}) \right\} \right. \\ &\quad \cdot \left\{ \frac{\bar{K}^{(m)}}{\cos \alpha^{(m)}} + \rho^{J(m)} (k_3^{(m)} + k_4^{(m)}) \right\} \\ &\quad \left. - \rho^{J(m)2} (k_1^{(m)} + k_2^{(m)}) (k_3^{(m)} + k_4^{(m)}) \right] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \bar{K}^{(m)} &= \bar{K}_n^{(m)} \sin \alpha^{(m)} (\tan \phi^{(m)} + \tan \alpha^{(m)}) \\ &\quad + \bar{K}_s^{(m)} \cos \alpha^{(m)} (1 - \tan \phi^{(m)} \tan \alpha^{(m)}) \\ k_1^{(m)} &= (k_a \sin^2 \theta^{(m)} + k_s \cos^2 \theta_0^{(m)}) \\ &\quad \cdot (\tan \phi^{(m)} + \tan \alpha^{(m)}) \\ k_2^{(m)} &= (k_a \sin \theta^{(m)} \cos \theta^{(m)} - k_s \sin \theta_0^{(m)} \cos \theta_0^{(m)}) \\ &\quad \cdot (1 - \tan \phi^{(m)} \tan \alpha^{(m)}) \\ k_3^{(m)} &= (k_a \sin \theta^{(m)} \cos \theta^{(m)} - k_s \sin \theta_0^{(m)} \cos \theta_0^{(m)}) \\ &\quad \cdot (\tan \phi^{(m)} + \tan \alpha^{(m)}) \\ k_4^{(m)} &= (k_a \cos^2 \theta^{(m)} + k_s \sin^2 \theta_0^{(m)}) \\ &\quad \cdot (1 - \tan \phi^{(m)} \tan \alpha^{(m)}) \end{aligned} \quad (15)$$

ここで、 $\rho^{J(m)} = N_b^{(m)} / S^{(m)}$ であり、不連続面での単位面積あたりのロックボルトの本数（すなわち、密度）を表す．

等価連続体内の平均ひずみは基質岩盤の平均ひずみに不連続面の変形による平均ひずみを加えた以下の式で表される．

$$\bar{\varepsilon}_{ij} = D_{ijkl}^R \bar{\sigma}_{kl} + \frac{1}{2V} \sum_m \int_{\Omega_m} ([u_i^{(m)}] n_j^{(m)} + [u_j^{(m)}] n_i^{(m)}) dS \quad (16)$$

ここで、 D_{ijkl}^R は基質岩盤のコンプライアンステンソルである．式(16)の第2項の不連続面の変形による平均ひずみ増分は以下ようになる．

$$\begin{aligned} \Delta \bar{\varepsilon}_{33}^{J'} &= \frac{1}{d^{(m)}} (Y_{nn}^{(m)} \Delta \bar{\sigma}_{33}' + Y_{ns}^{(m)} \Delta \bar{\sigma}_{31}') \\ \Delta \bar{\varepsilon}_{31}^{J'} &= \frac{1}{d^{(m)}} (Y_{sn}^{(m)} \Delta \bar{\sigma}_{33}' + Y_{ss}^{(m)} \Delta \bar{\sigma}_{31}') \\ \Delta \bar{\varepsilon}_{11}^{J'} &= \Delta \bar{\varepsilon}_{22}^{J'} = \Delta \bar{\varepsilon}_{12}^{J'} = \Delta \bar{\varepsilon}_{23}^{J'} = 0 \end{aligned} \quad (17)$$

ここで、座標系は不連続面の法線方向を x_3' 、不連続面に接し、せん断応力が最大となる方向を x_1' にとった局所座標系を用いた．また、 $d^{(m)}$ は m 番目の不連続面群の平均間隔である．式(17)をテンソル表示すれば、

$$\Delta \bar{\varepsilon}_{ij}^{J'(m)} = D_{ijkl}^{J'(m)} (\bar{E}^{(m)}, \bar{G}^{(m)}) \Delta \bar{\sigma}_{kl}' \quad (18)$$

と表される．式(18)を全体座標系に変換すれば式(16)は次のように表される．

$$\Delta \bar{\varepsilon}_{ij} = [D_{ijkl}^R + \sum_m D_{ijkl}^{J'(m)} (\bar{E}^{(m)}, \bar{G}^{(m)})] \Delta \bar{\sigma}_{kl} \quad (19)$$

3. ロックボルトによる支保効果の確認

ここでは、前節までに定式化したロックボルト支保効果を考慮したMBC解析（有限要素法）を簡単な力学問題に適用し、その挙動を確認する．また、同様のロックボルトモデルを持つ個別要素法（DEM）解析コード³⁾との比較解析を行う．

(1) 支保効果の表現

問題の概要を図-4に示す．15m×15mの2次元平面ひずみの解析領域において、左側面と下面をローラー境界とし、上面、右側面から10MPaの初期応力を作用させる．掘削時の応力解放を模擬するために、右側面からの応力を段階的に0MPaまで除荷する．除荷時の右上隅での変位応答を求める．ロックボルトは水平方向あるいは右落ち45°で解析領域全体に配置する．解析用物性値を表-1に示す．ロックボルトの物性は、鋼材を径0.024m、断面

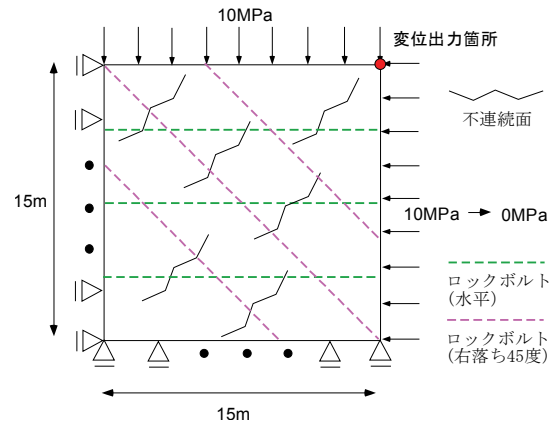


図-4 支保効果の確認問題

表-1 解析用物性値

岩盤・不連続面		MBC	DEM	ロックボルト	
基質岩盤	ヤング率	8.5 GPa		軸剛性	2620 MN/m
	ポアソン比	0.2		せん断剛性	306 MN/m
不連続面	摩擦角	19°	20°	軸耐力	0.227 MN
	傾斜	左落ち45°		せん断耐力	0.0372 MN
	有効寸法	15 m	図	アクティブ長	0.11 m
	間隔	1.0 m		密度(側面)	1.4 本/m ²
	起伏角	2°	-	傾斜	0°, 右落ち45°

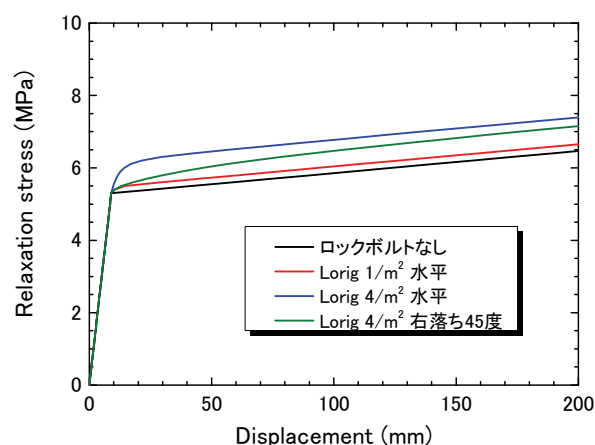


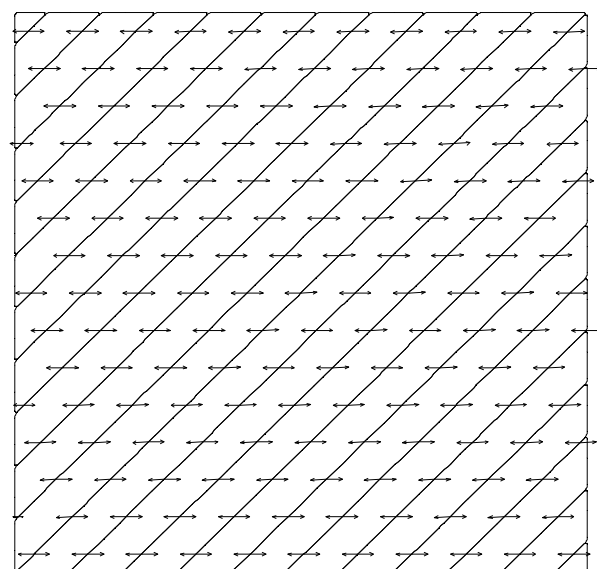
図-5 解放応力と変位の関係 (MBC, Lorigのモデル)

積 $4.46 \times 10^4 \text{ m}^2$ のねじり棒鋼とし、削孔径0.045mを想定して設定した。

図-5は解放応力と変位の関係を表す。ロックボルトがない場合には解放応力が約5.3MPaで包含される不連続面が破壊規準を満たし、不連続面の変形が生じる。それにより巨視的な剛性が低下する。ロックボルトがある場合には、変形の開始は同じであるが、変形開始後、応力変化に対する変形量は小さくなる。ロックボルトが水平な場合(ロックボルトと不連続面の交差角度は45°)、同じ変位を発生させるのに必要な解放応力は、1本/m²のときで約0.2MPa増加し、4本/m²のときは約0.8MPa増加する。解放応力の増分はロックボルトの密度に比例する。いずれも変位20mmではロックボルト軸力が軸耐力に近づくため、以降の巨視的剛性はロックボルトなしの場合とほとんど同じである。右落ち45度にロックボルトを配置した場合は、不連続面の変形に対する補強効果が水平の場合よりも小さい。これは不連続面との交差角度が90°であり、交差角度45°の場合と比較して、軸方向の剛性の効果があまり得られないためである。この場合、ロックボルトは軸力より先にせん断力によって降伏する。

(2) DEMとの比較

次にLorigのLocal- Reinforcement modelを持つブロック体個別要素法解析コード(以下、DEMとする)を同じ問題に適用し、結果の比較を行うことにより、支保効果の発現を確認する。本解析コードは、ロックボルト・ケー



左落ち45°の線は不連続面を表す。また、水平の矢印がロックボルトとの交差位置を示す。

図-6 DEMによる不連続面とロックボルトの配置 (1本/m²)

ブルボルトの支保効果を考慮する問題に適用されてきた^{9,7)}。解析対象は引き続き図-4の問題であるが、比較を容易にするため、LorigのLocal- Reinforcement modelを簡略化したバイリニア型のロックボルトモデルを用いる。DEMの解析に用いた岩盤の物性値も表-1に示す。また、図-6にDEM解析での不連続面とロックボルトの配置を示す。ロックボルトは水平に配置する。このモデルと物性値を用いることにより、ロックボルト無しの場合のMBCとDEMの右上隅での変位は一致する。

図-7、図-8にMBC、DEMでの解放応力と変位の関係をそれぞれ示す。ロックボルトにバイリニア型のモデルを用いた結果を実線でプロットし、参考としてロックボルトが降伏しないモデル(リニア型)の結果も破線でプロットした。MBC、DEMともに解放応力が約5.3MPaで不連続面が変形を開始し、1本/m²のときで約5.6MPa、4本/m²のときで約6.2MPaの解放応力となったらロックボルトが降伏する。ロックボルト降伏後のグラフの勾配はロックボルト無しの結果と一致する。リニア型のモデルの結果を比較すると、MBCの方が不連続面の変形後の剛性がやや小さくなる傾向がある。ロックボルトの変形として、MBCでは不連続面上の平均変位を用いるのに対して、DEMでは不連続面上の個々の交差箇所での変位を用いているため、この違いが生じると考えられる。しかし、バイリニアモデルで比較すると両者の結果は近い。

以上より、不連続体解析でのロックボルトによる補強効果の表現を、連続体解析であるMBC解析においても達成できるようになったと考えられる。

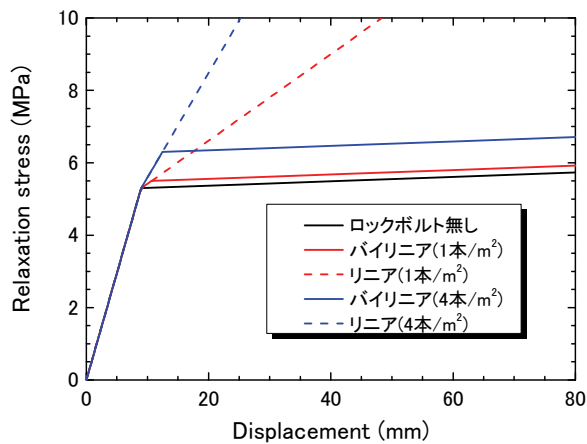


図-7 解放応力と変位の関係 (MBC)

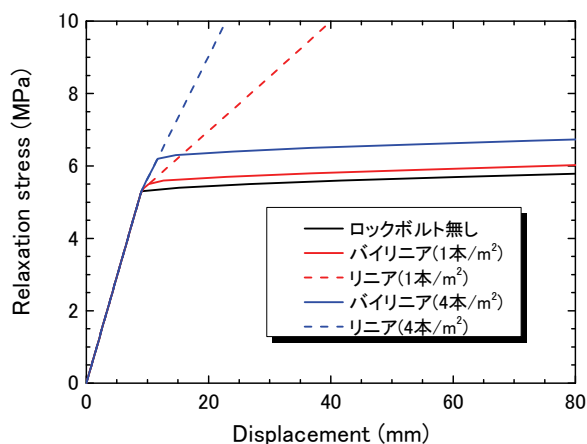


図-8 解放応力と変位の関係 (DEM)

4. おわりに

不連続性岩盤の等価連続体モデルの一つであるMBC解析にLorigによるロックボルトモデルを導入し、不連続体解析で得られるようなロックボルトの補強効果の表現を可能とした。MBC解析の特徴として、不連続面の

方向、間隔を直接入力することができることが挙げられる。ロックボルトについても、打設方向、打設密度を直接入力することができる。ロックボルト長については、ロックボルトモデルを適用する有限要素を指定することで設定することになる。

本解析手法は、地下発電所空洞の側壁のように一定方向にロックボルトを打設する場合に適用しやすい。しかし、アーチ部でのロックボルトの施工、周辺坑からのケーブルボルトによる先行補強のように方向を変えて（例えば、放射状に）打設するような場合への適用については、検討が必要である。

今後は、実際の空洞掘削問題に適用することで、さらに検討を進めたいと考えている。

参考文献

- 1) 宇野晴彦, 石田毅, 水田義明: 岩盤モデルおよび解析手法の歴史的な変遷と特徴, 資源・素材学会, 総説, Vol.118, pp.150-156, 2002.
- 2) 吉田秀典, 堀井秀之: マイクロメカニクスに基づく岩盤の連続体理論と大規模空洞掘削の解析, 土木学会論文集, No.535/III-34, pp.23-41, 1996.
- 3) Itasca Consulting Group, Inc.: UDEC Ver4.0 Reference Manual, Special Features.
- 4) Lorig, L. J.: A simple numerical representation of fully bonded passive rock reinforcement for hard rocks, *Computers and Geotechnics*, Vol.1, pp.79-97, 1985.
- 5) 吉田秀典, 平川芳明, 森聡: MBC 解析におけるロックボルト導入に関する検討, 第 34 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.97-104, 2005.
- 6) 若林成樹, 多田浩幸: ロックボルトによる岩盤不連続面の補強効果に関する解析的検討, 第 36 回地盤工学研究発表会予稿集, pp.1223-1224, 2001.
- 7) 柏柳正之, 伊藤文雄, 星野貴史, 清水則一: ケーブルボルトによる地下空洞の先行補強に関する現場実験とその評価, 土木学会論文集, No.784/VI-66, pp.31-44, 2005.

INSTALLATION OF ROCKBOLT SUPPORT MODEL IN MBC ANALYSIS

Masataka SAWADA, Satoru AOKI, Kazuki NAGAI,
Hidenori YOSHIDA and Hideyuki HORII

In excavation of a tunnel or a cavern, the existing discontinuities in a rock mass governs the mechanical behaviors of a jointed rock mass. MBC analysis is one of the equivalent continuous analyses for a jointed rock mass. Generally, it is difficult to obtain an equivalent effect with real installation of rockbolts in continuous analyses. In this study, rockbolt model used in a discontinuous analysis is installed in MBC analysis by adding forces from deformed rockbolts to the mechanical equilibrium condition on joints. The results from test analyses show that the proposed method reproduces the effect of rockbolt supporting system as well as a discontinuous analysis.