

MBC 解析におけるロックボルト導入に関する検討

STUDY ON THE INSTALLATION OF ROCK BOLT IN MBC ANALYSIS

吉田 秀典*・平川 芳明**・森 聡***

Hidegori YOSHIDA, Yoshiaki HIRAKAWA and Satoshi MORI

In excavation of a tunnel or a cavern, the existence of discontinuities in a rock mass governs the mechanical behaviors of a jointed rock mass. In order to predict the behavior of a jointed rock mass and to perform rationalization of the design of support system, MBC analysis was developed. However it is difficult for it to obtain an equivalent effect with real installation of support system, since it is a equivalent continuous analysis. Thus, in this study, a way of the installation of rock bolt in MBC analysis is proposed and its effect is discussed through analyses. The results show that the equivalent effect with real installation of rock bolt in the jointed rock mass is reproduced by changing the stiffness or friction angle of joint in MBC analysis.

Key Words: jointed rock mass, rock bolt, installation effect, MBC analysis

1. はじめに

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变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支保設計の合理化を行なうためには、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。

岩盤、特に不連続性岩盤の力学的挙動を評価する解析手法は、不連続体モデリングと連続体モデリングに大別される。前者は、不連続面の分布情報がかなりの確度で把握されている場合に適用が可能で、Ngo ら¹⁾の結合要素、Goodman ら²⁾のジョイント要素、Cundall³⁾の個別要素法、Dowding ら⁴⁾の剛体ブロックモデル、Kawai⁵⁾の剛体バネモデル、Shi ら⁶⁾の不連続変形法などが挙げられる。

しかしながら、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扱うことは到底不可能で、不連続性岩盤を等価な連続体に置き換えた解析が望まれる。不連続性岩盤を等価連続体とみなす解析手法としては、節理の破壊を考慮したひずみ軟化モデル⁷⁾、ロックボルト効果を考慮可能な等価連続体モデル⁸⁾、複合降伏モデル⁹⁾、クラックテンソルモデル¹⁰⁾、損傷テンソルモデル¹¹⁾などが挙げられるが、著者らの一部も、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的メカニズムと捉え、空洞掘削に関する解析手法＝MBC 解析を開発している¹²⁾。MBC 解析は他の手法と異なり、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。

ここで、不連続性岩盤における支保の効果に焦点をあてると、不連続体モデリングの場合は、比較的、ロックボルトなどの効果を表現しやすい。一方、連続体モデリングの場合、ロックボルトをトラス要素などでモデル化して密に打設することで内圧効果に近い現象が得られるが、不連続面の縫い付け効果などの表現は困難である。つまり、連続体モデルにおいてロックボルトと等価な剛性を有する要素を追加しただけでは、不連続性岩盤におけるロックボルトの打設と等価な現象および効果を得るのが難しい。MBC 解析も等価連続体解析

*正会員 博士(工学) 香川大学 助教授 工学部 安全システム建設工学科

**正会員 博士(工学) ニュージェック 技術開発グループ グループマネージャー

***正会員 修士(工学) ニュージェック 技術開発グループ 地圏環境チーム 主任

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。そこで本研究では、MBC 解析においてもロックボルトの打設効果に関する議論を可能とするために、ロックボルトの導入と等価な効果が得られるモデルを提案し、さらに解析を通して、その効果について考察を加えることとした。

2. 不連続面の変形とロックボルトのモデル化

MBC 解析は、材料の巨視的挙動の支配的メカニズムをマイクロクラックや不均一介在物といった微視構造要素の存在、あるいはその発生・成長であると捉え、これらを含む材料の力学的挙動をモデル化する等価連続体理論である。不連続面を有する岩盤を等価な連続体に置換する方法としては、まず、不連続面を有する岩盤の任意の点に着目し、その点を含む部分領域（代表要素）を考える。次に、不連続面同士の相互干渉を考慮に入れて不連続面の挙動を算定し、その結果を基に代表要素内で平均操作を行うことにより、巨視的な平均応力と平均ひずみの関係（構成式）を求める。そして、この構成式が等価な連続体の一点における材料の挙動を与えるものとして連続体の解析を行う。代表要素における平均応力と平均ひずみの関係は、内在する不連続面の寸法、平均間隔および方向分布に依存し、材料は異方的な挙動を強く呈する。詳細は文献¹²⁾を参照されたい。

岩盤の補強工であるロックボルトに関する研究事例は数多く存在し、そのほとんどが補強効果の評価に関するものである。近年では、多田ら¹³⁾が単一不連続面にロックボルトを打設した岩石供試体に対してせん断試験を行い、試験を通して、ロックボルトの打設角度、グラウトの材齢、岩種の違い（花崗岩と安山岩）がロックボルトのせん断補強効果に与える影響を検討している。試験におけるロックボルトの効果に焦点を当てると、ロックボルトの効果が打設角度でも、ボルト無しの試験に対して 40%（1.4 倍）の強度増加があり、効果が出やすい打設ケースでは 150%（2.5 倍）も強度が増加している。従来からの研究でも、ロックボルトの打設角度が重要な役割を果たすことは知られているが、さらにこの研究では、ロックボルトの打設によってせん断に対する強度が増大し、一方、グラウトの材齢などはせん断初期の剛性に影響を与えると結論している。しかしながら、供試体の材齢が同じ場合、ボルトの有無によって初期剛性にほとんど差がないことから、本研究では、巨視的な初期剛性の増加ではなく、ボルトの導入によって顕著に増大する強度に着目する。

(1) 不連続面の剛性

ここで、MBC 解析における不連続面の剛性の評価について説明する。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は異なり、それは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¹⁴⁾を採用した。「系の剛性」という概念においては、まず、図-1 に示すようにある一つの不連続面に着目し、元々の問題 (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 $\Delta[u_n^s]$ とスリットに作用する平均応力増分 $\Delta\sigma_n^J - \Delta\sigma$ の関係は、以下のように与えられる。

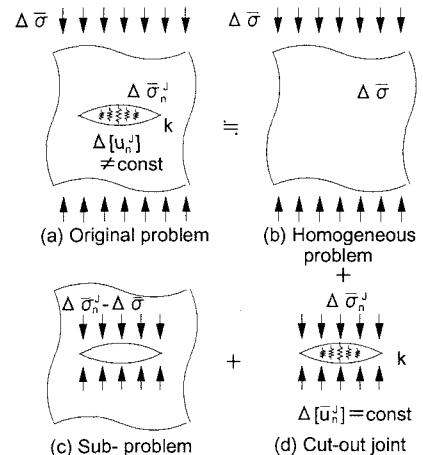


図-1 問題の重ね合わせ

このように 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 $\Delta[u_n^s]$ とスリットに作用する平均応力増分 $\Delta\sigma_n^J - \Delta\sigma$ の関係は、以下のように与えられる。

$$\Delta\bar{\sigma}_n - \Delta\bar{\sigma}_n^J = \bar{K}_n \Delta[\bar{u}_n^S], \quad \Delta\bar{\sigma}_s - \Delta\bar{\sigma}_s^J = \bar{K}_s \Delta[\bar{u}_s^S] \quad (1)$$

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

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

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、そして λ_n^c および λ_s^c は不連続面の連結性を表す無次元のパラメータである。不連続面を円形と仮定すれば、 $\lambda_n^o = \frac{16(1-\nu^2)}{3\pi}$ 、 $\lambda_s^o = \frac{16(1-\nu)}{3\pi(2-\nu)}$ (ν はポアソン比) であり、2次元問題では、 $\lambda_n^o = \pi$ 、 $\lambda_s^o = \frac{\pi}{2(1+\nu)}$ となる。また、一般に不連続面は孤立して存在するわけではなく、他の不連続面と複雑に交差しているものと考えられる。この影響は不連続面が変形しやすい、すなわち包含する岩盤の拘束が弱まるという形で現れる。この効果は包含する岩盤の剛性が低減する、あるいは不連続面の見かけの寸法が増大するということで表現される。不連続面の連結性を表すパラメータ λ_n^c と λ_s^c は、こうした効果を表すために導入されたが、具体的にはこの値を測定して定めることは難しく、また、不連続面の寸法も特定しがたい。不確定な要因が多い中でパラメータを区分しておくことはあまり意味が無いことから、それらの積をとり、不連続面の有効寸法 ($\bar{L}_n^J = \lambda_n^c L^J$ 、 $\bar{L}_s^J = \lambda_s^c L^J$) を導入した。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¹²⁾。

(2) 不連続面の変形

地下空洞の掘削時には、不連続面の開口現象が認められるが、応力が解放されたとは言え、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、図-2に示すようにのこぎり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。

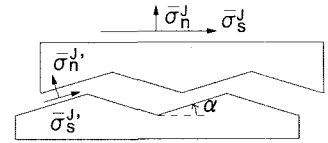


図-2 起伏を有する節理

$$|\bar{\sigma}_s^{J'}| = -\bar{\sigma}_n^{J'} \tan \phi, \quad \bar{\sigma}_n^{J'} < 0. \quad (3)$$

ここで ϕ は不連続面の摩擦角、 $\bar{\sigma}_n^{J'}$ 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局所的平均応力である。一方、開口が起こる面においてはストレスフリーになるものと仮定している。

(3) ロックボルト導入のモデル化

次章で一例を示すが、MBC 解析においても、ロックボルトと等価な剛性を有する要素を、実施工における打設ピッチ（密度）程度で追加しただけでは、不連続性岩盤におけるロックボルトの打設と等価な現象および効果を得ることは出来ない。その原因として、ロックボルトのような鋼材は剛性の高い材料であるが、実施工における打設ピッチ（密度）程度では、連続体モデルの解析の場合、内圧効果すら期待することが難しい場合がある。したがって、作用する応力の大半をロックボルトが負担して、不連続面を含む等価連続体が負担する応力が減少するという現象には至らない。

一般に、不連続性岩盤におけるロックボルトの効果としては、縫付け効果やはり形成効果が挙げられるが、数値解析上、こうした効果を表現するには、効果を詳細にモデル化して解析手法に反映させるか、等価な現象を簡易に表現できる手法を用いるというようなことが考えられる。無論、詳細にモデル化して解析手法に反映させる方が望ましいが、実設計において、煩雑なパラメータ設定やメッシュの追加には多くの時間と労力を要する。文献¹⁵⁾においては、連続体における補強材の効果、釣合い式に拘束条件を付加する、あるいは降伏関数を変化させることで対応しているが、研究もこれに倣って、等価な現象を簡易に表現する手法を採る。

ここで、前出のロックボルトを打設した岩盤供試体に対するせん断試験¹³⁾において、岩盤全体の巨視的な初期剛性の増加ではなく、ボルトの導入によって顕著に増大する強度、すなわち、不連続面のせん断強度の増大に着目する。ロックボルトの打設によって、見掛けではあるが不連続面の強度が増大するという現象について、簡易な手法のみで表現するのであれば、新たにモデルやパラメータを追加するよりも、MBC 解析では、式 (3) における不連続面の摩擦角を増大させることで対応できると考える。

また、ロックボルトの打設によって縫付け効果のような効果が得られるが、これは、岩盤内に多数の不連続面が存在し、その不連続面同士の連結性が極めて高いような岩盤において、不連続面の連結性を低減、つまり岩盤としての連続性を増大させる効果と考えられる。前出の通り、MBC 解析では不連続面の連結性を表わすパラメータを導入していたが、不連続面の寸法も特定し難いことから、不連続面の連結性を表わすパラメータと寸法の積を不連続面の有効寸法と称して解析では用いている。しかしながら、ロックボルトの導入によってその連結性が低減するのであれば、定式化上、これは不連続面の有効寸法が短くなることを意味している。

ロックボルトの打設によって系の剛性は増大するものと思われるが、その評価に関する一つの考え方として、ロックボルトの打設にともなう剛性の増加分を式 (2) に付加する手法が考えられる。その場合、前出の系の剛性は以下のように表わされる。

$$\bar{K}_n = \frac{\bar{E}}{\lambda_n^0 \bar{L}_n^J / 2} + \bar{K}_n^B, \quad \bar{K}_s = \frac{\bar{G}}{\lambda_s^0 \bar{L}_s^J / 2} + \bar{K}_s^B \quad (4)$$

ここで、 $\bar{K}_n^B$ および $\bar{K}_s^B$ はロックボルトそのものの剛性（単位面積あたりの剛性）ではなく、不連続面を貫くような場合に、その不連続面の剛性増大に寄与するロックボルトの剛性（単位面積あたりの剛性）である。したがって、当該不連続面の寸法などに強く依存するパラメータとなる。ここで問題となるのが、どうやって $\bar{K}_n^B$ および $\bar{K}_s^B$ を評価するかということである。単一不連続面を有するモデル岩盤にロックボルトを打設して、室内実験、例えばせん断試験を実施した場合は、不連続面にロックボルトが貫通しているため、剛性の増大は明確な形で現れると思われるが、実岩盤においては、通常打設されるロックボルトのピッチ（打設密度）では、貫通されない不連続面も多々存在する。つまり、実際の施工を考えた場合、式 (4) に示すような剛性の増大を、全ての不連続面に対して期待することは難しく、また、貫通している不連続面とそうでない不連続面を分けて評価することも現実的とは言えない。

そこで、平均化手法を用いて、ボルトが打設されている周辺岩盤の平均的な弾性係数（ E , G ）を以下のように評価する。

$$E = (1 - f)E^R + fE^B, \quad G = (1 - f)G^R + fG^B \quad (5)$$

ここで、 E^R および E^B は岩盤およびロックボルトの弾性係数、 G^R および G^B は岩盤およびロックボルトのせん断剛性であり、また、 f は岩盤に対するロックボルトの体積比ということになる。これを周辺岩盤の等価な弾性係数として、あらためて式 (2) に代入して系の剛性を評価するという手法も考えられる。しかしながら、一般に打設されるロックボルトのピッチ（打設密度）と断面積を考えると、例えば、岩盤 1 m^3 あたりに長さ 1 m 、断面積 $3.0 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ (3 cm^2) のロックボルトを打設した場合、体積比 f は 3.0×10^{-4} となり、ロックボルトの弾性係数が岩盤の弾性係数の 100 倍程度大きいと仮定しても、計算上、ほとんど意味をなさないことが分かる。多数の不連続面を包含する不連続性岩盤を考えた場合、全ての不連続面をロックボルトが貫通するとは考え難いことから、系の剛性の評価は、このような平均化手法を基に決定する方が良いと思われるが、一般的なロックボルトの打設密度や断面積を考慮すると、系の剛性の増大に対する寄与は小さい。そこで次章の解析例では、強度と連結率（すなわち有効寸法）を変化させた事例を提示することとする。なお、現象を表現するに当たっては多くの考え方や手法があると思われるが、本研究では、みかけのせん断強度の増加という現象を等価連続体解析という範疇で考慮するという命題に対して、上述したようなパラメータをキーとして捉え、そのパラメータを適当に設定するという対応を試みることとする。

3. 要素解析

前章での考察を踏まえ、本章では要素解析を実施し、MBC 解析におけるロックボルトの打設と等価な効果／現象について考察を加える。今、図-3 に示すように、縦横ともに 1.0 m の長さを有する領域（弾性係数 10,000 MPa、ポアソン比 0.25）に、有効寸法 0.50 m、間隔 0.50 m で、反時計回りに 45 度傾いた不連続面が存在するものとする。掘削にともなって、空洞壁面から応力が解放される現象を模擬するために、図のように、上方および側方から 10 MPa の圧を作用させた後に、側方の圧を除荷していく。なお、解析は 2 次元平面ひずみの条件下で実施した。除荷が進むと、包含される不連続面は破壊条件を満たし、不連続面は変形を生ずる。

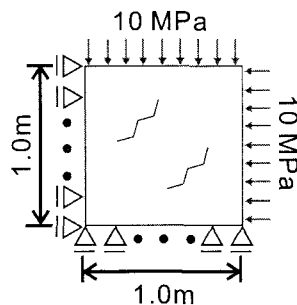


図-3 要素解析概要

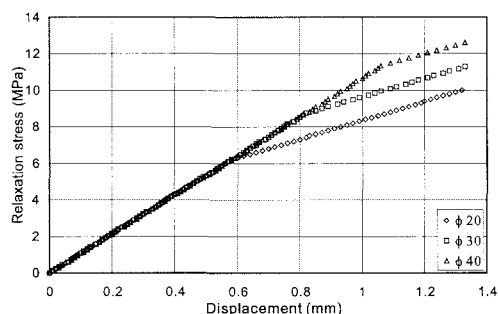


図-4 水平変位と解放応力（ ϕ を変化）

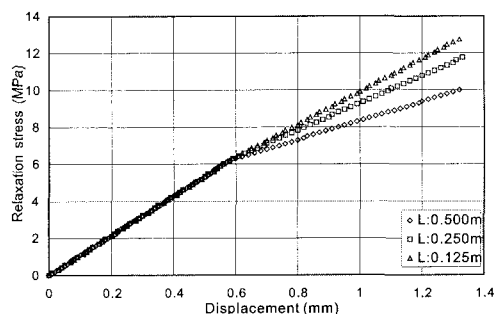


図-5 水平変位と解放応力（連結性を変化）

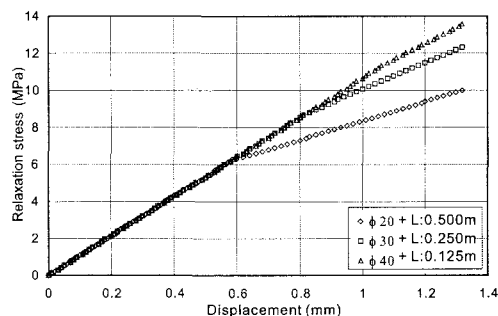


図-6 水平変位と解放応力（ ϕ と連結性を変化）

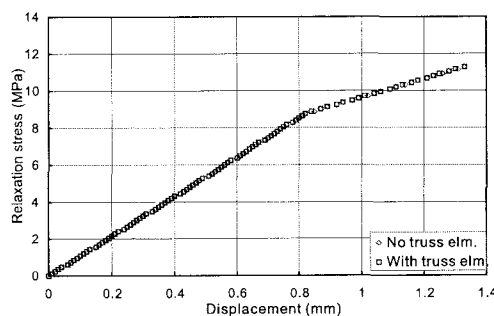


図-7 水平変位と解放応力（トラス要素の導入）

まず、不連続面の摩擦角を 20 度、30 度、そして 40 度と変化させた際の解放応力と水平変位の関係を図-4 にプロットする。摩擦角の増大にともなって変形のタイミングが遅れるため、巨視的な変形に関して、不連続面の変形に対する強度が増大したと等価な現象を得る。

次に、ロックボルトの打設によって岩盤の連結性が増大した場合を想定する。解析においては、不連続面の連結率を半分、4 分の 1（有効寸法を 0.25 m、0.125 m）と変化させた際の解放応力と水平変位の関係を図-5 にプロットする。なお、不連続面の摩擦角は 20 度としている。摩擦角が一定であることから、不連続面の変形のタイミングは同じであるが、変形開始後、応力変化に対する巨視的な変形量は小さくなっている。つまり、不連続面の連結性の低下によって、不連続面の変形後の巨視的な剛性が増大する。

さらに図-6 は、ロックボルトの打設によって、不連続面の強度の増加と連結性の低下という両現象が同時に起こることを考慮した解析の解放応力と水平変位の関係で、ロックボルトを打設しない状態を不連続面の

摩擦角が 20 度の解析とし、それに加え、不連続面の摩擦角が 30 度で連結性が半分、および不連続面の摩擦角が 40 度で連結性が 4 分の 1 という解析の結果をプロットしたものである。両者を組み合わせることで、不連続面の变形に対する強度が増大し、かつ、不連続面の变形後の巨視的な剛性が増大するという現象を得る。

不連続面の摩擦角が 30 度のケースにおいて、応力解放時に左右の側線にトラス要素（弾性係数 200,000 MPa、断面積 $3.0 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ ）のみを追加した際の結果を、図-7 にトラス要素を追加しない解析結果と併せてプロットした。解放応力と水平変位の関係は、トラス要素を追加しない解析結果とほぼ同じで、トラス要素のみを追加したことによる変化は小さい。これは、トラス要素の断面積が、解析領域上方の面積（本解析では、奥行きを 1m としているので、面積は 1 m^2 ）に対して、その比で僅か 3.0×10^{-4} で、上載に対する負担が 0.06 MPa 程度に過ぎないことが原因の 1 つと考えられる。しかしながら、実際の空洞掘削でも、1 m × 1m のピッチ程度に 1 本の割合でロックボルトが打設されることから、実施工状況と大きく乖離しているわけではないと考える。解析結果は、MBC 解析のような等価連続体解析を用いた場合、トラス要素の追加などでは不連続面の变形に対して発揮するであろうロックボルトの効果をうまく再現できないことを示唆している。

以上より、MBC 解析においては、ロックボルトが導入される箇所に隣接する岩盤に包含される不連続面の摩擦角を増大させる、あるいは不連続面の連結性を低下させることで、実岩盤にロックボルトを打設した際に得られる効果と等価な現象が得られるのではないかと考える。そこで本研究では、こうした考え方を実際の空洞掘削解析に反映させ、空洞掘削におけるロックボルトの効果を論じることとした。

4. 空洞掘削解析

想定した空洞は、幅 12 m、高さ 18 m（上方に、半径 6 m のアーチ部）の弾頭型空洞で、掘削ボリュームは 260 m^3 （単位奥行当）になる。こうした空洞に対して、アーチ部を 2 ステップ、方形部を 4 ステップ（3 m ごとの盤下げ）で掘削解析を行った。考慮した掘削ベンチについては、後掲する図-8～図-13 中に示している。想定岩盤は CH 級とし、その弾性係数を 15,000 MPa、ポアソン比を 0.25、密度を 2.67 t/m^3 と仮定した。解析領域の大きさは $200 \text{ m} \times 200 \text{ m}$ 、要素数は 2840、節点数は 2867 である。不連続面のパラメータとしては、傾斜を右落ち 67.5 度（解析断面内において、水平から反時計周りに 157.5 度）、走向を空洞軸に平行、摩擦角を 35 度、寸法を 3.0 m、平均間隔を 0.3 m と設定した。土被りについては、500 m のケース（Case1）と 1000 m のケース（Case2）の 2 通りを考え、この土被りに密度を乗じたものを鉛直土圧とし、また、側圧比を 1.068 として水平土圧を算定した。掘削については、こうした土圧を初期地圧として発生させた後に、空洞掘削予定線から相当土圧の逐次解放という手法で模擬した。ロックボルトについては、掘削ベンチごとに追加していく形態をとった。なお、多田ら¹³⁾の実験結果に焦点をあてると、ロックボルトの導入によって、主として不連続面のすべりに対する強度が増大しているという事実より、本論文では、紙面の都合もあることから、不連続面のすべりに対して強度を増加させるパラメータである不連続面の摩擦角を変化させる解析のみの結果を記す。

各ケースについて、ロックボルトを打設しないケース（摩擦角は 35 度）、ロックボルト（打設ピッチ 1.5 m × 1.5 m）を打設するが、効果が小さいケース（摩擦角 5 度増しの 40 度）および効果が大きいケース（摩擦角 15 度増しの 50 度）の解析を実施した。前述の通り、不連続面の摩擦角を増大させるのは、ロックボルトを打設する箇所に隣接する要素のみである。なお、ロックボルトの仕様（長さ、弾性係数、公称断面積）とパラメータ（不連続面の強度や連結率）について十分な対応付けが出来ていないので、ここではロックボルトの仕様については割愛する。各解析ケースにおける空洞全断面掘削後の最大せん断ひずみ分布を図-8～図-13 に示す。

図より、前章で示したロックボルトの導入と等価と考えた手法を施すことによって、いずれの深度ケースにおいても、最大せん断ひずみレベルの大きい領域が小さくなっていることが分かる。また、不連続面のすべり

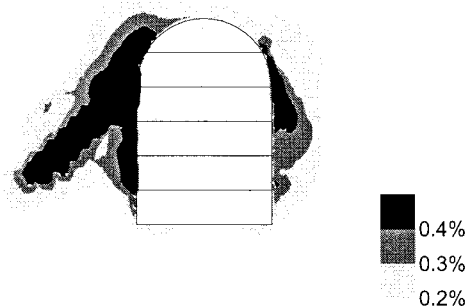


図-8 最大せん断ひずみ (case1, ボルト無)

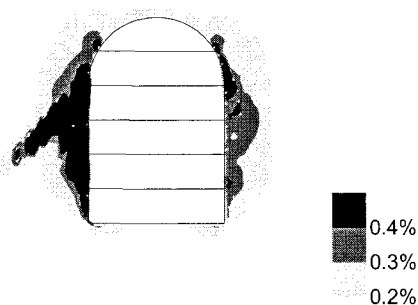


図-9 最大せん断ひずみ (case1, $\phi 5$ 度増)

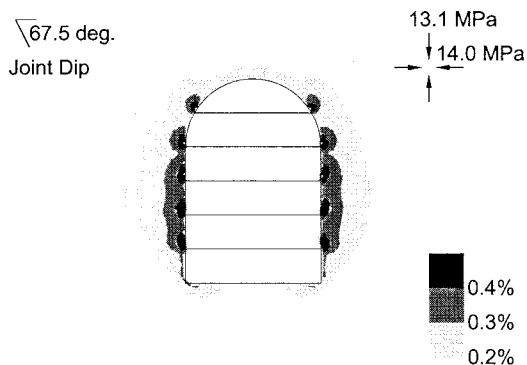


図-10 最大せん断ひずみ (case1, $\phi 15$ 度増)

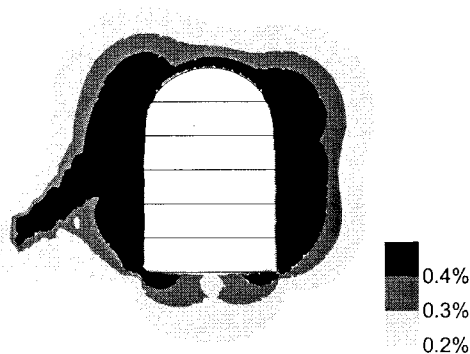


図-11 最大せん断ひずみ (case2, ボルト無)

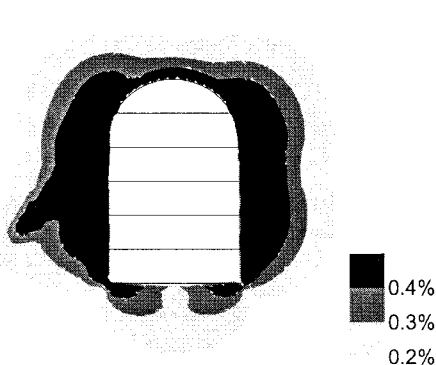


図-12 最大せん断ひずみ (case2, $\phi 5$ 度増)

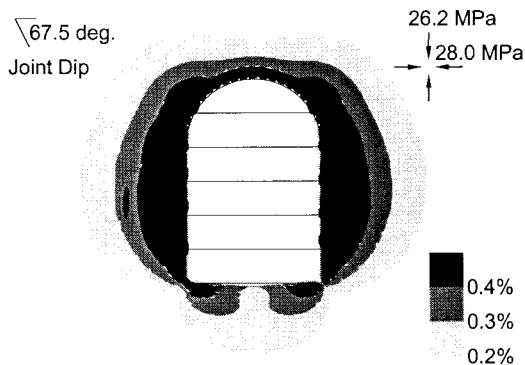


図-13 最大せん断ひずみ (case2, $\phi 15$ 度増)

に対する強度を大きくすればするほど、最大せん断ひずみレベルの大きい領域が小さくなり、かつ、最大ひずみの値も小さくなる。本解析では、不連続面の傾斜が右落ち 67.5 度であることに起因して、空洞の左側で不連続面の変形が顕著となっているが、ロックボルトを施さない場合、側壁より 10 m 以上離れた領域においても不連続面の変形が認められ、その結果、ひずみの値の大きな領域が広範囲に広がっている。なお、効果が大きいケース（摩擦角 15 度増しの 50 度）の分布（図-10 と図-13）は弾性解析における分布とほぼ同じであった。つまり、この 2 ケースについては、不連続面の強度を 50 度より大きくしても、図-10 と図-13 よりひずみの領域および値が小さくなることはないことを示唆している。

5. まとめ

本研究では、MBC 解析においてもロックボルトの打設と等価な効果を得ることを目的に、その導入について一つの考え方を示した。ロックボルトの打設によってせん断に対する強度の増大という実験結果¹³⁾に着目し、ロックボルトが導入される箇所に隣接する岩盤に包含される不連続面の摩擦角を増大させる、あるいは不連続面の連結性を低下させる手法で、ロックボルトの導入効果と等価な現象が得られると判断した。さらに、こうした考察に基づいて、空洞掘削解析を実施した。その結果、MBC 解析においても、提示したロックボルト導入と等価な手法によって空洞周辺岩盤の変形が抑えられることを確認した。本研究で提示したロックボルト導入と等価な手法は、等価連続体解析に対する一つのアプローチ方法と考える。

しかしながら、本稿においては、ロックボルトの特性（断面積、弾性係数、打設角、打設ピッチ）に対して、不連続面に関するどのパラメータをどの程度変化させると、実岩盤においてロックボルトを打設した際に得られる効果と同程度になるかという検討を実施していない。これは、提案している手法の妥当性を検討する意味でも非常に重要であるため、検討が必要な点である。現在、不連続体モデルにロックボルトを打設する解析を行い、解析において上記パラメータ（断面積、弾性係数、打設角、打設ピッチ）を変化させた際に、巨視的な挙動の何がどの程度変化するかという研究を実施しており、ある程度までは MBC 解析におけるパラメータの設定を明らかにすることができると考えている。しかしながら、それが実岩盤で本当に同程度の効果が得られるか否かは、全く同じ条件の空洞を 2 つ掘削し、一方にはロックボルトを打設するが、他方には打設しないというようなことを実規模実験を実施しない限り検証が難しいため、判断が難しいことも事実である。今後、機会があれば、こうした課題に対する解決策についても検討したいと考えている。

参考文献

- [1] Ngo D. and Scordelis A.C.: Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Beams, *J. American Concrete Institute*, Vol.64, No.3, pp.152-163, 1967
- [2] Goodman R.E., Taylor R. and Brekke T.L.: A Model for Mechanics of Jointed Rock, *J. Soil Mech. and Found. Eng. Div.*, ASCE, SM3, **94**, pp.637-659, 1968
- [3] Cundall P.A.: Formulation of Three-dimensional Distinct Element Model - Part I. A Scheme to Detect and Represent Contacts in System Composed of Many Polyhedral Blocks, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol.25, No.3, pp.107-116, 1988
- [4] Dowding C.H., Belytschoko T.B., and Yen H.J.: Dynamic Computational Analysis of Openings in Jointed Rock, *J. Geotech. Eng.*, ASCE, 109(12), pp.1151-1556, 1983
- [5] 川井忠彦：離散化極限解析法概論, 1990
- [6] Shi G.H. and Goodman R.E.: Discontinuous Deformation Analysis, *Proc. 25th U.S. Symp. on Rock Mech.*, p.p269-277, 1984
- [7] 田坂嘉章, 宇野晴彦, 大森剛志, 工藤奎吾：節理の破壊を考慮したひずみ軟化手法による地下発電所空洞掘削の解析, 第 10 回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, pp.575-580, 1998
- [8] 北条明, 中村真, 打田靖夫, 櫻井春輔：不連続岩盤におけるロックボルトの設計法について, 土木学会論文集, No. 553/III-33, pp.143-153, 1996
- [9] 佐々木猛, 吉中龍之進, 永井文男：有限要素法による節理性岩盤の複合降伏モデルに関する研究, 土木学会論文集, No. 505/III-29, pp.59-68, 1994
- [10] 山辺正, 原夏生, 小田匡寛：クラックテンソルによる節理性岩盤の弾性変形解析と入力パラメータの決定に関する研究, 土木学会論文集, No. 382/III-7, pp.121-129, 1987
- [11] 京谷孝史, 市川康明, 川本眺万：岩盤の力学特性評価における損傷テンソルの適用について, 土木学会論文集, No. 358/III-3, pp.27-35, 1985
- [12] 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
- [13] 多田浩幸, 若林成樹：ロックボルトのよる岩盤不連続面のせん断補強効果に関する実験的検討, 第 36 回地盤工学研究発表会, pp.1221-1222, 2001
- [14] 堀井秀之, 吉田秀典, 久保田啓二朗：岩盤の構成モデルにおけるジョイントの連結性の評価とその妥当性の検証, 第 25 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.86-90, 1993
- [15] Kobayashi, S.: Limit Shakedown Design in Geotechnical Engineering, 2003 (京都大学学位論文)