

不連続面の寸法とロックボルト導入効果に関する一考察

A Consideration of the relationship between the size of discontinuity
and the installation effect of rock bolt

吉田秀典*・宇田圭一**・平川芳明***・森 聡****

Hidenori YOSHIDA, Keiichi UDA, Yoshiaki HIRAKAWA and Satoshi MORI

*正会員 博士(工学) 香川大学教授 工学部 安全システム建設工学科 (〒761-0396 香川県高松市林町 2217-20)
**修士(工学) 四国ガス株式会社 松山支店供給課 (〒790-0814 愛媛県松山市味酒町 1-3)
***正会員 博士(工学) (株)ニュージェック 技術開発グループ (〒542-0082 大阪市中央区島之内 1-20-19)
****正会員 修士(工学) (株)ニュージェック 技術開発グループ (〒542-0082 大阪市中央区島之内 1-20-19)

For the design of a rock bolt in a tunnel construction, the standard patterns of the installation of a rock bolt are mostly employed. The standard patterns are determined by engineering experiences or geological categories. Therefore, there is a possibility of the overabundant design of a rock bolt. In order to improve the design of a rock bolt, many experiences were conducted and gave us a valuable knowledge. Most of them used the rock specimen having a cut-through joint so as to seize the performance of the installation of a rock bolt, but this kind of situation is considered to be rare in a rock mass during the construction of a tunnel. Most of rock joints are included in a rock mass and their deformation is constrained by the rock mass. Therefore, there are some questions about the knowledge from room tests to seize the performance of the installation of a rock bolt. Thus, in this article, several analyses with various size of joint included in a rock mass are carried out, and the installation effects of a rock bolt are discussed from an analytical point of view.

Key Words : rock mass, discontinuity, rock bolt

1. はじめに

岩盤は、岩石と節理や亀裂など様々な規模の不連続面から構成される極めて複雑な非均質材料である。したがって、トンネルや地下空洞などの岩盤構造物を建設する際には、岩盤中に包含される不連続面の状況などを勘案した上で、最も適切と思われる支保工が選択される。例えば、NATM工法においては、ロックボルトや吹き付けコンクリートなどが挙げられるが、その設計に関しては、岩盤の性状や特性あるいは電中研方式の岩盤等級に応じて、岩盤構造物の形、大きさ、そして構造が経験的に決定され、同時に、それらを勘案して支保量が算定されるのが一般的である。

ここで、NATM工法においてもっともポピュラーな支保工の一つであるロックボルトに着目すると、その設計は必ずしも定量的に評価されている訳ではなく、特に、道路トンネルなどにおいては、地質状況に応じて定められた標準支保パターンよりロックボルトの打設密度などが決定される。こうした支保パターンは豊富な経験によって裏付けられていることから、このような設計方法で問題があるということではないが、過剰な支保量になっているのではないかと懸念も付きまとう。

そこで、設計をより合理的かつ経済的にするため、不連続性岩盤におけるロックボルトの効果を確認し、かつ

モデル化しようという試みが多数実施されている。例えば、多田ら¹⁾は一面せん断試験において、ロックボルトを打設し、供試体を貫いた単一不連続面におけるロックボルトの効果を評価している。不連続面にロックボルトを打設することで変形のタイミングが若干遅れ、せん断補強効果は、不連続面に対してロックボルトの打設角度45°のとき最大で、ロックボルトを打設しない場合と比較して約2.5倍であるという結果が得られている。吉中ら²⁾は不連続面を貫通するロックボルトの変形に着目し、ロックボルトを打設した一面せん断試験からロックボルトの打設角度と曲げ長さの関係を示し、最適な打設角度を提案している。永家ら³⁾はせん断強度と表面形状特性との関係に着目し、不連続面の変形は境界条件に依存することを指摘した上で岩盤中における不連続面の変形を模擬するため、垂直応力一定ではなく垂直剛性一定の下で一面せん断試験を実施し、せん断変形にともなう表面形状変化の定量的評価法を提案している。

しかしながら、いずれの研究においても不連続面は供試体を貫いており、二分化した供試体において生ずる剛体的なすべりに対して抵抗するロックボルトの効果を評価しているものが大半である。一方、実際の岩盤においては、トンネル壁面に露出した一部の不連続面を除けば、それらのほとんどが岩盤に完全に包含されており、トンネルに露出した不連続面も、その全体

が露出しているものは極めて少ない。室内試験と実岩盤においては不連続面の幾何学的条件が異なっていることから、両条件下におけるロックボルトの導入効果についても、差異がみられる可能性がある。この点については、前出の永家ら³⁾も同様のことを指摘している。異なる条件の下で得られた結果に基づいてロックボルトの導入効果を評価しても合理的かつ経済的な支保設計には至らない可能性もあることから、より実際に近いケース、つまり不連続面が岩盤に包含されるケースにおけるロックボルトの挙動と地山補強効果に関して議論する必要がある。そこで本研究では、不連続面が包含されたケースにおいて、特に、不連続面の寸法を変化させた際のロックボルトの導入効果について数値解析を通じて検討することとした。なお本研究では、ロックボルトの効果の評価方法について室内実験と現実とでは乖離があるのではないかという視点から検討を行うため、まずは汎用的な力学モデルを用いて考察することとした。また、新規に力学モデルを提案した場合は、その妥当性を示すことが必要となることもあり、本研究では、より真実に近い力学モデルを提案するのではなく、汎用的な力学モデルを用いて議論することとした。

2. 構成モデル

本研究では、岩盤がその中に不連続面を含み、その不連続面が摩擦すべりを生じるといった問題を扱うことから、こうした摩擦すべり現象を表現できるモデルが必要となる。不連続面の接触挙動を解析する方法としては、有限要素解析などで用いられる接触モデルと、剛体ばねモデルのような離散モデルを用いる方法に大別される。前者については、モデル化や計算が複雑になることから、設計において用いられることは稀である。一方、後者について考えると、その手法の1つである剛体ばねモデルは、2つの物体間にバネを挿入し、それを介する力を表面力として扱うことから不連続面の摩擦すべりなどを上手く再現できるが、弾性変形の精度は有限要素法と比較して劣るという欠点がある。そこで近年では、剛体ばねモデルに弾性変形の自由度を持たせたハイブリット型ペナルティ法 (HPM)⁴⁾のような混合型モデルも提案されている。HPMにおいては、弾性変形の精度をある程度確保しつつ不連続面の摩擦すべりなどの解析ができるが、本研究のような構造解析問題では、不連続面以外は連続体としてモデル化したいため、その場合、前者の有限要素解析などで用いられる接触モデルを採用する方が都合が良い。そこで本研究では、不連続面に相当する箇所には、その摩擦すべりを表現できる要素（以降、「摩擦すべり要素」と呼ぶ）を導入し、それ以外の岩盤基質部、グラウト、ロックボルトには、通常のソリッド要素を使用した。

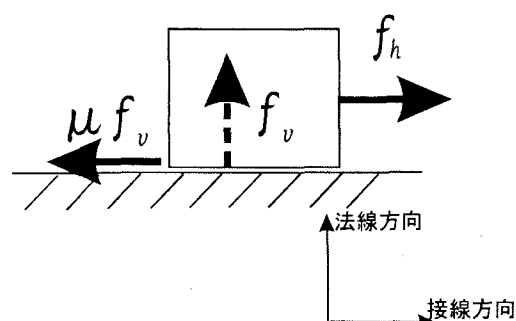


図-1 物体に作用する接触力

まず、不連続面に相当する箇所に導入する摩擦すべり要素であるが、本研究では、変形する物体が2つ存在し、その物体の間に、古典的摩擦則であるクーロン摩擦則を採用することとした。実際の固着すべりメカニズムは高い非線形性を有し、物体の弾塑性特性に著しく依存する他、異なる物体間における接触問題においては、両者の摩擦特性が異なるため、それらが一齐に滑動するとは考え難く、まず部分的なすべりが生じて、それから大きなすべりに発展していくなどの指摘があり、クーロン摩擦則の適用には問題がないわけではない。しかしながら、対象とする2つの材料が全く同じであり、かつ、不連続面の変形と比較して材料の変形が小さい範囲において解析を実施するため、本研究では、導入の簡易性を考慮して、クーロン摩擦則を採用した。本研究は、採用するモデルを用いて不連続面の滑動現象の全てを再現するというようなモデルを提案するものではなく、後述するような問題設定の範疇に限っては、採用モデルでおおよその検討が可能であると考えていることに注意されたい。

クーロン摩擦則によると、図-1に示す2つの物体間の相対すべりは $\mu|f_v| + c \leq f_h$ を満たすとすべりを生じる。ここに、 μ は静止摩擦係数、 f_h および f_v は接触力の接線および法線成分、そして c は粘着力である。

また、一旦物体はすべりを生じると、物体同士は接触し続ける場合もあるが、非接触（解離）という状態にもなりうる。さらに、一般に接触問題においては、物体の挙動からその状態を判定し、後述するような「貫通」に対する条件を加味する必要などがある。接触については、有限要素法で言う「要素」に対して、その要素の任意の節点を接触可能な節点と定義し、その節点が接触しうる他の要素の節点あるいは辺を定義しておく。物体を構成する要素は通常の固体要素（2次元問題では3角形あるいは4角形要素、3次元では4面体あるいは6面体要素）で定義する。計算ステップごとに各接触可能な節点が接触相手の節点あるいは辺にどれほど近接しているかを調べ、接触の判定を行う。本解析では、接触する要素において、接触相手との距離が、もっとも大きさが小さい要素の辺の長さに対して

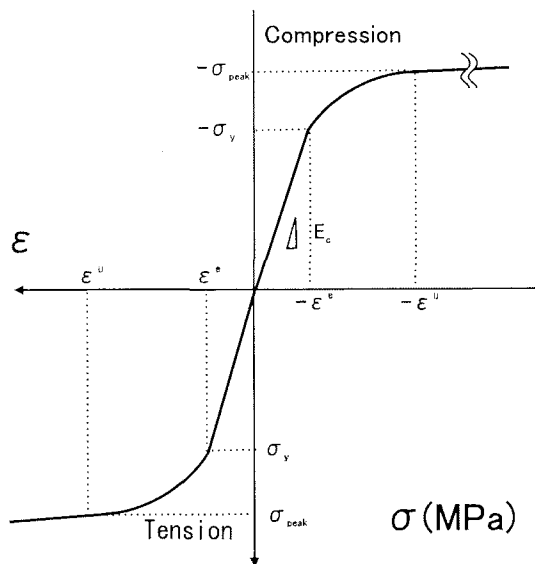


図-2 構成モデル

5% 以内であれば接触，それを超えると非接触になるものとした。なお，計算ステップが粗い場合は，その節点が接触可能な相手の辺を越えて要素内に入るような貫通状態となるため，貫通状態にならない程度の計算ステップが必要となる。節点間の力が負である場合は接触状態と判断し，逆に，節点間の力が正である場合は，当該節点は接触可能な要素から解離することとなる。この際，接触中に節点間で作用していた反力は内部要素との釣り合いを失い，残差力として作用させ，物体内部では応力再配分が起こる⁵⁾。

次に，連続体，つまり岩盤基質部，グラウト，そしてロックボルトについてであるが，本研究では，ロックボルトの導入効果の確認を目的としていることから，不連続面が摩擦すべりを生じピーク荷重に達した後に軟化するような領域までは対象としない。

岩盤基質部およびグラウトについては Drucker-Prager 型の弾塑性モデルを適用することとし，それらの応力-ひずみ関係（構成モデル）については，文献⁶⁾を参考に，図-2 に示すようなものとした。ピーク応力 (σ_{peak} ，本研究では，材料の一軸圧縮強度とした) の $2/3$ の応力を初期降伏応力 (σ_y) とし，この応力に至るまでは弾性挙動を呈するものとした。解析では，ピーク応力に達したときのひずみ (ϵ^u) を，比較の対象とした多田らの実験結果と整合するよう 0.2% に設定し，初期降伏後，ひずみ硬化挙動を呈しながら，ピーク応力を迎えるものとした。岩盤基質部およびグラウトについては，载荷条件/レベルによっては引張応力が発生したり，グラウトの付着が切れる場合も十分に考えられる。しかしながら，不連続面が包含された場合とそうでない場合におけるロックボルトの導入効果を検討するということが本研究の目的であることから，解析結果の解釈を容易にするために，グラウトなどの

表-1 花崗岩，グラウトの材料特性（実験値）

	花崗岩	グラウト (材令 3 日)
単位体積質量 (kg/m^3)	2.68	-
弾性係数 (MPa)	68,900	23,200
ポアソン比	0.22	0.22
一軸圧縮強度 (MPa)	156	50.0

表-2 ロックボルトの材料特性（実験値）

初期降伏点 (MPa)	295
ピーク応力 (MPa)	440

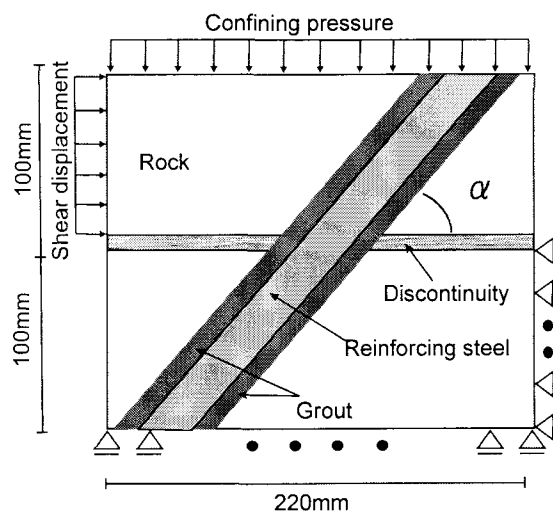


図-3 解析概要図

付着切れは考慮せずに，また，圧縮側も引張側も同じ挙動をするものと仮定し，引張破壊に対して特別な措置は講じていない。

ロックボルトに関しては，von-Mises 型の弾塑性モデルを適用することとし，その応力-ひずみ関係（構成モデル）については，おおよそ図-2 と同じようなものを考えた。ロックボルトについては，そのピーク応力におけるひずみ (ϵ'_u) は多田らの実験と整合するよう 5.0% に設定し，引張側も圧縮側も同様の挙動を呈するものとした。なお，ピーク応力と初期降伏応力については，参考実験で採用した SD295 における公称値を採用した。

参考までに，多田らの実験において抽出された各種材料の特性を表-1 および表-2 に示す。また，非線形問題を解析することから，反復計算としてニュートン・ラプソン法を採用した。

3. 妥当性の検討の解析

本章では、前章で示した解析モデルを用いた場合、どの程度のパフォーマンスがあるのかを調査する目的で、既存の実験結果¹⁾の再現を試みることにする。解析の対象とした実験は、単一不連続面を有する岩石供試体に対する室内せん断試験で、その概況を図-3に示す。供試体のサイズは、幅 220 mm、高さ 200 mm、奥行き 110 mm で、不連続面はカッターを用いて平坦な分離面としている。ロックボルトについては D6 の異形棒鋼 (SD295A, $\phi=6.35$ mm) を用いており、これを削孔 (径 17 mm) に挿入して、その外周にグラウトを流し込んでいる。本解析では、こうした 3 次元的な問題を 2 次元平面応力問題として取り扱うため、実験におけるロックボルトおよびグラウトの体積比を 2 次元問題に換算し、解析断面内におけるロックボルトの幅を 0.31 mm、周辺グラウトの厚さを 0.9 mm とした。岩石、グラウト、ロックボルトおよび不連続面に関する特性は前章で示した通りであるが、グラウトの水セメント比など、詳細については文献¹⁾を参照されたい。

せん断試験は、供試体をせん断試験装置にセットした後、所定の垂直応力 (0.5 MPa) となるように垂直荷重を作用させ、垂直応力一定の状態でせん断方向に載荷 (変位速度 1 mm / min) している。実験の結果、弾性変形に相当するような変形はかなり小さく、早い段階から不連続面が部分的にせん断すべりを生じ、ピーク応力到達後は、せん断応力が増大することなく、せん断変位のみが増大するという状況を呈している。この時のせん断応力 (ピーク応力) は約 0.35 MPa であった。実験に関する詳細についても、文献¹⁾を参照されたい。

一方、解析では、境界条件、載荷条件および岩石、つまり材料基質部のパラメータについては実験と同じ値を設定した。不連続面については、実験における不連続面の内部摩擦角が 36° と報告されていることから、摩擦係数を 0.7 とし、不連続面の形成においてカッターを用いていることから、粘着力を 0.0 MPa と仮定した。解析においては、不連続面に接する要素 (上下 22 個ずつの計 44 個) に前述の摩擦すべり要素を用いた。なお、総要素数は 440 個、総節点数は 506 個で、前述の通り、解析は 2 次元平面応力の条件下で実施した。

実験および解析におけるせん断変位 (載荷変位量) とせん断応力 (下の供試体の右側境界における反力を面積で除した値) の関係をそれぞれ、図-4 および図-5 に示す。なお、実験ではロックボルトの打設角度を 45 度、90 度、135 度とし、比較のためにボルトを打設しないケースを実施しているので、解析においてもこれを模擬した。

解析結果は、載荷にともなって、載荷面に近い方から不連続面がすべりはじめ、載荷 0.1 mm 程度で不連続

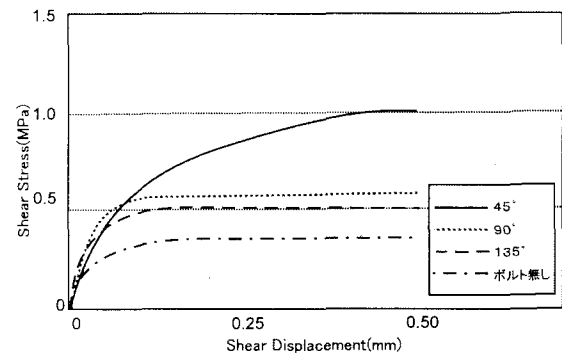


図-4 せん断変位-せん断応力関係 (実験)

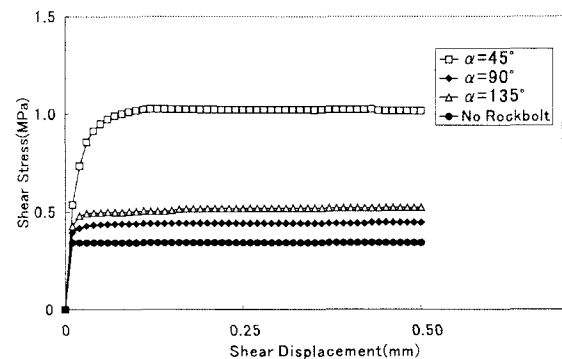


図-5 せん断変位-せん断応力関係 (解析)

面全体がすべるという状況を表している。初期の段階で、解析におけるみかけの剛性が実験よりも大きい理由としては、グラウトの付着切れなどを考慮していないことに起因するものと思われる。しかしながら、ロックボルトの打設角度 45 度を除けば、解析結果は実験と近いものとなっている。また、打設角度 45 度の場合も、ピークに至るまでの挙動には差があるものの、ピークの値はほぼ合致していることから、本研究で採用したモデルを用いることにより、おおまかではあるが、不連続面を有する岩盤供試体のすべり挙動を再現できると判断し、次章では、こうした数値解析モデルを用いて、不連続面の寸法とロックボルトの導入効果との関係について検討を実施する。

4. 包含不連続面に対する一面せん断試験

第一章で説明した通り、ロックボルトの効果に関する実験の大半は、不連続面が供試体を貫いており、二分化した供試体において生ずる剛体的にすべりに対して抵抗するロックボルトの導入効果を評価している。しかしながら、実際の岩盤構造物において、この種の不連続面が出現するケースは極めて稀であり、このような稀なケースを模擬した実験などから得られたロックボルトの導入効果が、不連続面が包含されている実岩盤のケースにおいても得られるものなのかは不明であ

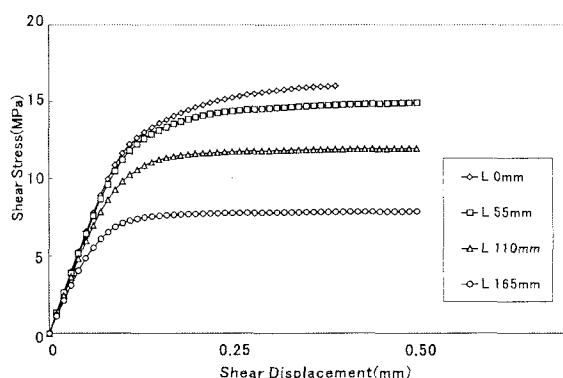


図-6 せん断変位-せん断応力関係 (ボルト無し)

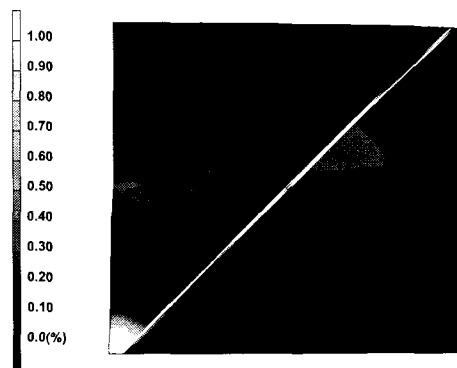


図-7 相当塑性ひずみ分布 (L 0mm・ボルト無し)

る。そこで本章では、不連続面の寸法を変化させた場合に、(1) 岩盤の挙動はどう変化するのか、(2) ロックボルトの打設効果はどのようになるのか、という点に着目して数値解析的な検討を行う。

本章で用いた解析メッシュは前章のものと同様で、その際、貫通した不連続面における両端に位置する接触要素を通常の連続体要素に置き換えることで、含まれる不連続面の寸法を調節する。その他の物性、境界条件、そして载荷方法については、全て前章と同様とする。なお、ロックボルトの効果論を論ずるために、まず、ロックボルトの導入しないものについて、不連続面を包含する岩盤の挙動を把握し、その後、ロックボルトを導入したケース (紙面の都合上、打設角度 45 度のみを掲載) における岩盤の挙動について議論する。

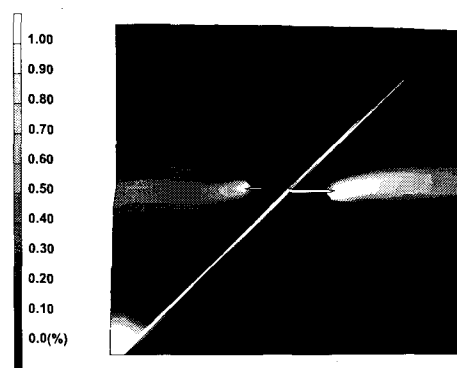


図-8 相当塑性ひずみ分布 (L 55mm・ボルト無し)

4.1 ロックボルト無し

まず、ロックボルトを導入しない場合に、不連続面の寸法を変化させることで、材料がどのような巨視的挙動を呈するかについて検討を行った。なお、この際、後述するロックボルトの導入に際して、ロックボルトの導入効果のみを明確にするために、導入しない解析においても、ボルト周辺に設けるグラウトについては予め導入した上で解析を実施した。不連続面の寸法は 0 mm (不連続面無し)、55 mm、110 mm、165 mm の 4 ケースを考慮し、前章と同様に左側面上半分の接点に変位による载荷 (0.5 mm まで) を行った。なお、不連続面の寸法は 0 mm (不連続面無し) については、载荷 0.4 mm 程度で解が不安定となったので、そこまでの結果を提示している。一般的には、弱面を含む (不連続面を含む) 解析の方が不安定になりやすいが、本解析の場合、上下の不連続面において変位のギャップ、つまりすべりや開口が生じることで、岩盤そのものに大きな変形が生じないため、安定的に解析が進んだものと思われる。

まず、解析より得られたせん断変位-せん断応力関係を、図-6 に示す。ここにはプロットしていないが、

不連続面が完全に供試体を貫通すると、図-5 における「ボルト無し」の解析結果となる。図より、不連続面の増大にともなって材料の巨視的な強度 (ピーク応力) の低下が見られる。当然のことではあるが、不連続面の寸法、そしてここでは論じていないが不連続面同士の間隔などは、材料 (岩盤) の巨視的挙動に大きな影響を与えることが分かる。

次に、図-6 に示すようなせん断変位-せん断応力関係となった理由を考察するために、図-7 から図-10 に、各ケースにおける解析最終段階の相当ひずみ分布を示すと同時に、変形の様子を 10 倍にして表している。図-7 より、不連続面が存在しない場合は、強度の小さいグラウトが全体にわたって塑性化している様子が伺える。その際、グラウトに沿って左側の部分が右斜め上方に押し上げられるような形になるため、左下の角部付近での岩盤の塑性化が著しくなっている。この付近における顕著な岩盤の変形によって、上述した通り、解析が不安定になったものと考えられる。不連続面の長さが 55 mm の場合、グラウトより左側にある不連続面はほぼ密着したまません断すべりを生じているが、右側に

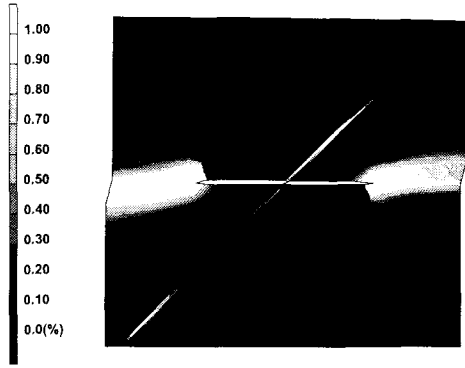


図-9 相当塑性ひずみ分布 (L 110mm・ボルト無し)

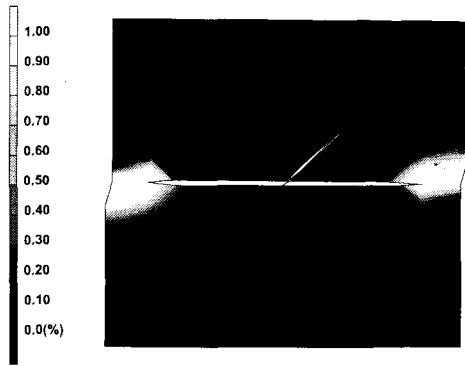


図-10 相当塑性ひずみ分布 (L 165mm・ボルト無し)

ある不連続面は開口していることが分かる（不連続面部分が白くなっているのは、塑性化しているのではなく、開口しているということに注意されたい）。供試体全体は、やや右回りに回転するようなモードとなっているので、左側は不連続面が押される形になっているが、供試体右下側面部においては水平方向の変位が拘束されているのに対して右上側面部は変位の拘束が無いことから、供試体右側上部においては水平方向に大きく変形し、この付近を中心に塑性変形が卓越している。その結果、供試体右側の中心付近（上下の不連続面の境部分）では、上部においてやや右斜め上の変形モードになって、グラウトより右側に位置する不連続面は開口するようなモードとなっている。この場合も、左下の角部付近で岩盤の塑性化が顕著となっているが、右側の不連続面の先端付近でも塑性化が顕著になっており、複数の箇所に変形が卓越した格好となっている。ところが、不連続面の寸法が増大すると、グラウトの左側に位置する不連続面も载荷初期の段階から開口するようなモードとなり、グラウトも全面にわたって塑性化するというには至らない。これは、不連続面

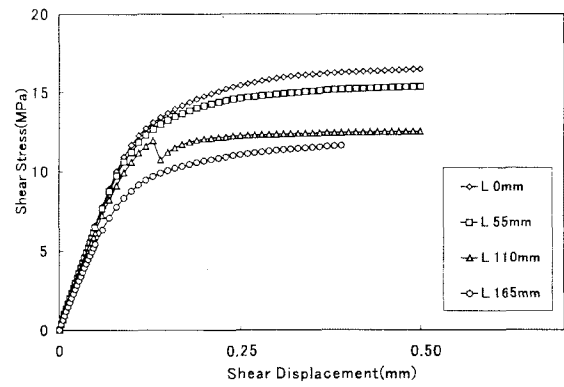


図-11 せん断変位—せん断応力関係 (ボルト有り)

の端部が境界に近いことで、载荷の初期の段階より、供試体端部付近の岩盤から塑性変形が進行することに起因している。以上より、不連続面が無い場合、不連続面の寸法が供試体全体の寸法と比較して小さい場合、あるいは大きい場合によって、不連続面および岩盤の変形モードがかなり異なることが分かる。こうした検討を踏まえ、次小節では、ロックボルトを導入し、導入効果などについて考察する。

4.2 ロックボルト有り

本小節では、前小節で検討したケースに対して、それぞれにロックボルトを導入（打設角度は45度）した場合を想定した解析を行い、前小節と同様、不連続面の寸法を変化させることで、岩盤がどのような巨視的挙動を呈するかについて検討を行った。解析におけるパラメータは、前章および前小節と同様とした。

解析より得られたせん断変位—せん断応力関係を、図-11に示す。ここにはプロットしていないが、不連続面が完全に供試体を貫通すると、図-5における「 $\alpha=45$ 」の解析結果となる。また、図-12から図-15に、各ケースにおける载荷最終段階の相当塑性ひずみ分布を示す。この場合も、変形の様子を10倍にして表している。

図より、不連続面の増大にともなって材料の巨視的な強度（ピーク応力）の低下するという傾向は前小節と同じである。ここで着目したいのが、ロックボルト導入の効果である。図-6と図-11を比較すると、ロックボルトが無かった場合に不安定となった不連続面を考慮しない場合が、ロックボルトの導入によって安定的に変形が進行しているものの、材料の巨視的な強度（ピーク応力）の増加はほとんど見られない。これは、不連続面が少ない連続性の高い岩盤にロックボルトを打設しても効果が見られないという一般的な知見と合致している。また、不連続面を考慮し、その寸法を55mmとした場合も、供試体全体のサイズと比較して不連続面の寸法が小さいため、この場合もロックボルトの導入によるピーク応力の増大は見られない。寸法が110

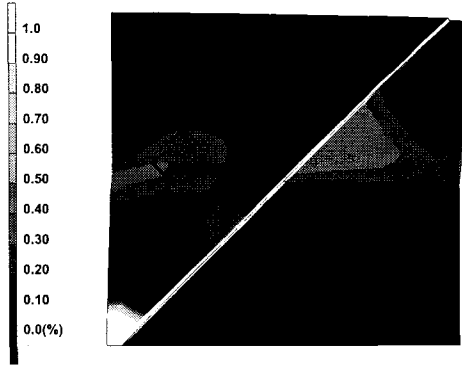


図-12 相当塑性ひずみ分布 (L 0mm・ボルト有り)

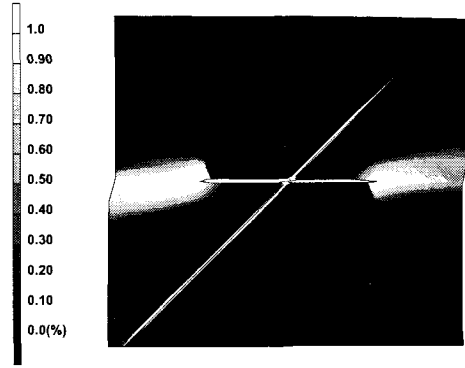


図-14 相当塑性ひずみ分布 (L 110mm・ボルト有り)

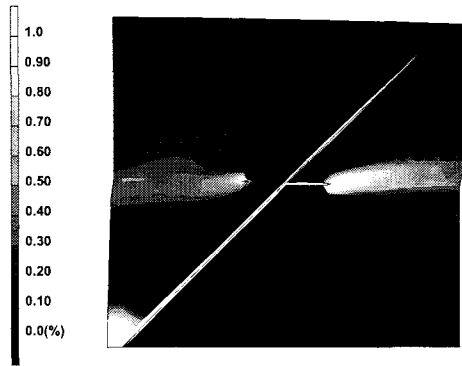


図-13 相当塑性ひずみ分布 (L 55mm・ボルト強有り)

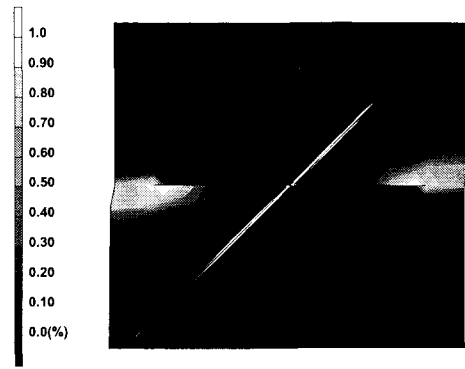


図-15 相当塑性ひずみ分布 (L 165mm・ボルト有り)

mm の場合、荷初期の段階では、ロックボルトの導入によって上下の不連続面は開口せずに密着したまますべりのみを生ずるが、不連続面の端部と側方境界が近接していることに起因して、不連続面端部から側方境界にかけて変形が顕在化し、やがてその領域全体が降伏することで変形モードが変化し、荷 0.12 mm のあたりで、密着していた不連続面は開口モードに転じる。これを受けて、せん断応力が一時的に低下している。結局、最終的な変形モードや相当塑性ひずみの分布は、ロックボルトを導入しない場合とほとんど変わらず、ロックボルト導入にともなうピーク応力の増大というようなことには至っていない。さらに寸法を増大させると (165 mm)、貫通した不連続面の剛体的なすべり現象に近いような現象を呈し、寸法が 110 mm の際に見られたような不連続面の端部と側方境界に挟まれた領域における大きな変形領域は出現しない。また、上下の不連続面も開口することなく、密着したまますべっている。さらに、図-15 より、ロックボルトに軸力が生じて付近のグラウトが降伏している様子が

伺える。こうした現象は、ロックボルトを導入しなかった場合には見られなかった現象である。こうした現象に対応して、この場合のピーク応力は大きく増大しており、ピーク応力は、導入しない場合と比較して 1.5 倍以上となっている。

本来、ロックボルトとグラウト、岩盤とグラウトの間では、荷応力/変位の増大にともなう付着が切れ、こうした付着切れが全体挙動に大きな影響を及ぼす。本研究でも、本来はこうしたことをきちんとモデル化すべきであるが、付着切れの影響と不連続面の寸法などを同時に考慮することで得られた解析結果の解釈が複雑となるため、敢えて付着切れのモデル化はしていない。つまり、グラウトと岩盤あるいはロックボルトは完全付着という特殊な条件下で解析を実施している。そのため、荷変位が大きくなって、ロックボルト周辺のグラウトが降伏すると、降伏には達していないロックボルトや岩盤と解析的な釣り合いを取ることが困難となり、本解析では、寸法 165 mm の場合は、荷 0.40 mm 程度で不安定となっている。したがって、寸法が 165 mm のケースについては、荷 0.40 mm

の時点でのピーク応力について比較を行っている。付着切れ/すべりなどを考慮することで、より実際に近い解が得られる、あるいは安定的に解析が進むものと思われ、この点は今後の課題と言える。

以上より、岩盤に包含される不連続面の寸法が小さい場合はロックボルト導入の効果は小さく、ある程度の大きさになるとそれが顕著となる。一般的に、ロックボルトの打設効果に関する研究では、不連続面が供試体を貫いたものが大半であるが、実際の岩盤においては、トンネル壁面に露出した一部の不連続面を除けば、それらのほとんどが岩盤に完全に包含されている。不連続面が供試体を貫いているというような状況は稀であるが、実際には、不連続面が供試体を貫いたような条件下での実験結果などを基にロックボルトの効果は議論されているのが現状である。しかしながら、上記の解析結果より、不連続面の寸法によってロックボルトの導入効果は異なることから、現状の評価方法が妥当であるかについては、今後、実験を含めて詳細な検討が必要であると考えられる。

5. まとめ

トンネルや地下空洞においては、その掘削壁面に露出した一部の不連続面を除けば、それらのほとんどが岩盤に完全に包含されており、壁面に露出した不連続面も、その全体が露出しているものは極めて少ない。しかしながら、ロックボルトの効果などを議論するために実施される室内実験においては、そのほとんどにおいて不連続面が供試体を貫いており、実際の岩盤の状況とは大きく異なる。異なる条件の下で得られた結果に基づいてロックボルトの導入効果を評価しても合理的かつ経済的な支保設計には至らない可能性もあることから、本研究では、不連続面の寸法とロックボルトの導入効果について、数値解析による検討を実施した。

解析を行った結果、以下のような知見を得た。

1. 岩盤の包含される不連続面の寸法は、岩盤の巨視的挙動に大きな影響を与える。例えば、不連続面に対してせん断試験を実施した場合、その寸法の長短によって巨視的なせん断強度は変化する。しかも、せん断強度の変化は寸法の長短に比例せずに、その寸法が供試体の寸法に近づくにしたがって急激に低下する。特に、不連続面が岩盤を貫通するとせん断強度は極めて小さくなる。
2. ロックボルトを導入した場合、不連続面の寸法が長い程、導入効果は大きくなり、貫通不連続面の場合に、その効果が最大になると思われる。不連続面に対するロックボルトの効果を議論するための室内試験においては、こうした貫通不連続面を有する供試体を用いて実験が行われるが、実岩盤における状況と大きく異なることから、このよう

な実験から得られる知見をそのまま実岩盤の評価に用いることには議論が必要である。

なお、本研究では、解析にあたって極めて簡易な力学モデル（不連続面：クーロン摩擦モデル、連続体：Drucker-Prager あるいは von-Mises）を採用しており、実験などから得られた知見を基に精緻な力学モデルを構築している訳ではない。また、不連続性岩盤に対するロックボルトの効果などを議論する際には、グラウトの付着切れなどについて十分な考察が必要となるが、本研究では、問題の解釈を容易にするという理由から付着切れを考慮せずに、グラウト材料が他の材料（岩盤およびロックボルト）と完全固着としている。したがって、解析から得られた結果は、決して実現象を精度よく再現するものではなく、決して、ロックボルトの効果発現機構を明確にできるものではない。したがって、今後、より詳細にその機構を議論する場合には、上述したような細かい点も考慮する必要がある。ただし、本研究は、そうした細かい点もさることながら、不連続面の寸法あるいは不連続面の状態（貫通あるいは包含）が及ぼす影響を明確にするという目的で実施しており、本論文では、その目的に対して、ある程度の知見を示せたものと考えている。

付記： 本研究の一部は、(財)南海育英会教育研究助成（代表者：吉田秀典）の助成を得て行なった。

参考文献

- 1) 多田浩幸, 若林成樹: ロックボルトに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, p.1221-1222, 2001.
- 2) R. Yoshinaka, S. Arisaka, N. Saijo, H. Arai: Evaluation of bolt reinforcement in discontinuous rocks, ISRM, Volume1, p.249-252, 1995.
- 3) 永谷健司, 蔣宇静, 棚橋由彦, 肖俊, 山下祐司: 岩盤不連続面の力学的挙動および表面形状フラクタル特性の評価, 第33回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, p.33-40, 2004.
- 4) 竹内則雄, 草深守人, 武田洋, 佐藤一雄, 川井忠彦: ペナルティを用いたハイブリット型モデルによる離散化極限解析, 構造工学論文集, Vol.46A, pp.261-270, 2000
- 5) 宮村倫司, 牧野内昭武: 共役射影勾配法による大規模接触問題解析, 日本計算工学会論文集, Paper No.20020011 (電子ジャーナル), 2002
- 6) 吉田秀典, 高森大資, 和田光真: 非均質性が岩盤構造物の挙動に及ぼす影響と設計に関する研究, 応用力学論文集, Vol.6, pp.387-396, 2003

(2005年4月15日受付)