

不連続性岩盤における支保の効果に関する基礎的研究

A Study of Reinforcing Effect of Rock Bolts in Jointed Rock Mass

齊藤貴彦*, 吉田秀典**, 堀井秀之†

Takahiko SAITO and Hidenori YOSHIDA and Hideyuki HORII

Nowadays, New Australian tunneling Method(NATM) is adopted to construction of rock structures, such as tunnel and cavern, with the installation of support system, such as rock bolt. Pre-Stressed Anchorage bolt, shutcreet, etc in order to make the rock structures stabilize itself. However, the reinforced effect of those support systems to jointed rock mass is not clear yet. In addition, there is few analytical method which can clarify the reinforced effect of the support systems since not only the reinforcement process of the support systems but also the governing mechanism of the behavior of joint can not be grasped well. It is necessary to develop the analytical method which can evaluate correctly the reinforced effect of the support systems. In this study, the mechanical behavior of joint is tried to be grasped analytically, and the reinforced effect of rock bolt to the joint are considered.

1 はじめに

近年, 山岳トンネルや地下空洞といった岩盤構造物を建設する際には, ロックボルト, PS アンカー, および吹き付けコンクリートと言った支保材料を積極的に用いて, こうした岩盤構造物自体を地山で持たせる NATM 工法が導入され, 現在ではこうした岩盤構造物の標準的施工法として位置づけられるようになるまでに至っている. しかしながら, こうした支保材料の効果は依然として不明瞭な点も多く, 合理的かつ経済的な施工がなされているか否かを明確にできない状況にある. こうした支保部材の効果が不明瞭であるにも関わらず, 多くの土木構造物と同様, 岩盤構造物においても, その建設コスト削減と建設の合理化が強く要請されるようになってきており, 工学的にも非常に重要な課題として認識されるようになってきている. したがって, こうした課題を解決すべく, 支保部材の効果発現のメカニズムや工法自体の検討が必要とされ, 多くの検討が加えられている. 例えば, 清水らは, 新しい支保・補強工法として, 緊張力を与えない全面接着型のケーブルボルト工法について, その特性や効果について解析的に詳しい検討を行っている [1]. また, 吉中らは不連続面を有する岩盤にロックボルトが配置された場合に, それ自体がどのように変形し, かつ不連続面に対してどのような効果をもたらすかを, 実験的アプローチで解明しようと試みている [2][3].

上述のように支保部材の効果発現メカニズムを明確にしようという試みはあるものの, それを適切に評価できる解析手法は依然として開発されていないのが現状である. 例えば, 亀裂性岩盤に着目すると, その力学的特性はその中に内在する不連続面(例えば節理や小断層)の力学的特性や幾何学的特性に特徴づけられることが知られている. しかしながら, そうした不連続面に対して支保部材の一つであるロックボルトなどが導入されると, 変形特性が変化し, かつ強度特性が増大することは経験的, あるいは実験的に認められているものの, 解析的にはそれを的確に捉えているものはまだ数少ない. これまで, 古典的な弾塑性理論に基づく解析手法を中心に不連続

*学生員 千葉工業大学 大学院工学研究科 土木工学専攻博士前期課程2年

**正会員 博士(工学) 東京大学助教授 大学院工学系研究科 社会基盤工学専攻

†正会員 Ph.D 東京大学教授 大学院工学系研究科 社会基盤工学専攻

性岩盤における支保部材の効果に関する研究が多々行われてきたが、不連続面の挙動を捉えきれていないために、支保の効果発現のメカニズムも依然として明確になっていない。

そこで本研究では、支保の効果発現が不連続面の変形・強度特性と強い相関を有するという考えに則り、その効果発現のメカニズムを明らかにすることを目的とした。特に従来の代表的手法である弾塑性のアプローチと不連続面の存在を陽に取り込んだ解析的アプローチとの比較や、これまであまり議論されてこなかった不連続面の幾何学特性が支保の効果発現にどのような影響を及ぼすかなどに着目し、検討を行うこととする。

2 解析概要と結果

不連続面を多数有する岩盤の力学的挙動を明らかにすることは、岩盤力学分野における重要課題の一つである。不連続性岩盤の力学的挙動は、その中に内在する節理（ジョイント）などの不連続面によって特徴づけられることが知られており、岩盤構造物を建設する際には、こうした不連続面の変形が岩盤挙動の支配的なメカニズムになると考えられる。特に、トンネルや地下空洞といった構造物が建設される際には、空洞掘削による応力解放に起因する不連続面のせん断すべり・開口が、不連続性岩盤の力学的挙動が支配的メカニズムであると考えられる。吉田らは、こうしたジョイントの力学的に立脚した解析理論 [5] を構築しているが、これによれば、岩盤中でジョイントは局所的に見れば平坦であるが、巨視的には少なからず起伏を有しており、空洞掘削時には、ある場所ではせん断すべりを起こし、別の場所では開口するとしている。さらにこうした理論を力学的にモデル化し、導かれた岩盤の構成式を有限要素解析プログラムなどに組み込むことにより、任意の岩盤構造物・荷重条件における岩盤挙動の解析を開発し、種々の地下空洞について地下空洞掘削解析を行っている。解析結果は、計測結果などと比較して妥当なものとなっており、彼らの解析手法が、地下空洞掘削に関して適用可能であると結んでいる。これより、実際の地山に存在するジョイントは平坦であるとモデル化するより、少なからず起伏を有すると考えてよいものと思われる。そこで本研究では、起伏を有する不連続面が岩盤に包含されており、その条件下で支保部材、とりわけロックボルトがどのような効果を発するかを解析的に検討する。また、こうした起伏を有するジョイントの変形をモデル化した解析と、不連続面の挙動を陽に形では取り込んでいない弾塑性解析を行い、両解析におけるロックボルトの効果発現の違いについて考察を加える。

2.1 問題設定と解析パラメータ

ジョイントが平坦な場合と起伏を有する場合において、ロックボルトがどのような効果を発揮するかを検討するために、本研究では、(1) ジョイントが平坦な場合 (図-1), (2) ジョイントが5度の起伏を有する場合 (図-2), (3) ジョイントが15度の起伏を有する場合 (図-3), (4) ジョイントが30度の起伏を有する場合 (図-4), の4つの問題と、これらと比較を行うために、(5) ジョイントを考慮せずに、岩石材料を弾塑性と仮定した場合 (図-1においてジョイントを除いたメッシュ) を考え、合計5つの問題を設定した。全てのケースにおいて、供試体は矩形として、そのサイズは縦10m、横5mとした。

ケース(1)から(4)までは、材料を硬質な岩石を想定し、そのほぼ対角線上に不連続面を有するものとする。岩石基質部のとその中に包含される不連続面の解析パラメータを表-1に示した。このケースでは、岩石基質部は弾性体とし、包含される不連続面はある荷重レベルに達すると変形を開始するものとする。一方、不連続面を考慮しない弾塑性材料の解析パラメータを表-2に示した。弾塑性解析ではドラッガー・ブラッガーの構成則を用いて解析を行った。また、ロックボルトを導入する解析では、(A) メッシュの中央に、1本のロックボルトを水平配置するケース、(B) 不連続面を跨ぐように等間隔にロックボルトを3本水平に配置するケースの2通りを考えた。解析においては、有限要素の各節点をトラス要素で繋ぎ合わせることでロックボルトをモデル化している。尚、ロックボルトの解析パラメータは表-3に示す通りである。

解析はまず、一定の荷重を静水圧的に材料に作用させる。そして底部に鉛直変位固定の境界条件を設けて、その状態から鉛直下向きに軸載荷を行う。載荷は変位制御であり、解析は平面ひずみの条件下で行った。

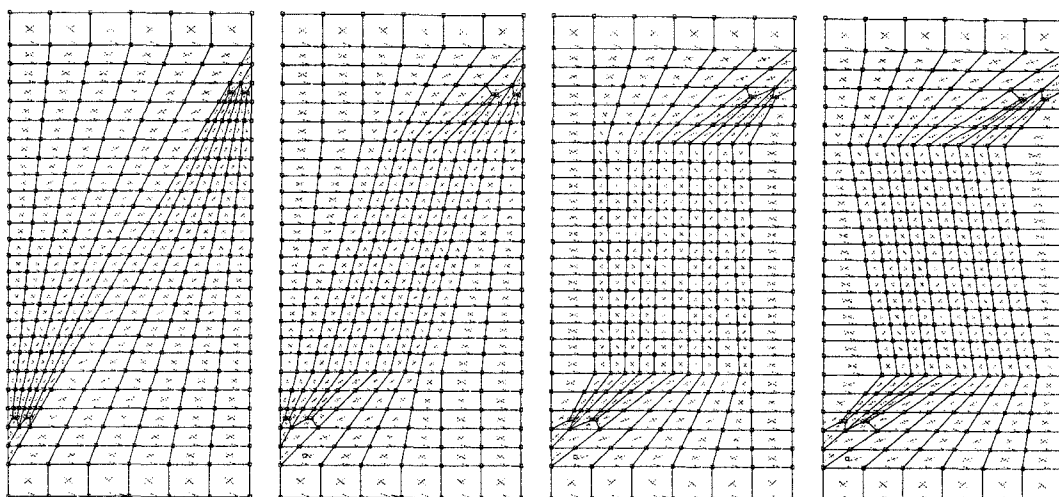


図-1 起伏角 0 度の mesh 図-2 起伏角 5 度の mesh 図-3 起伏角 15 度の mesh 図-4 起伏角 30 度の mesh

表-1 硬質岩石の解析パラメータ 表-2 弾塑性体の解析パラメータ

解析パラメータ	物性値
弾性係数 E (MPa)	6300
ポアソン比 ν	0.25
不連続面の摩擦角 (度)	40
不連続面の粘着力 (kN)	0

解析パラメータ	物性値
弾性係数 E (MPa)	4900
ポアソン比 ν	0.25
摩擦角 ϕ (度)	35
粘着力 C (kN)	0.49

表-3 ロックボルトの解析パラメータ

解析パラメータ	物性値
弾性係数 E (MPa)	200,000
直径 (cm)	15.2
引張強度 (kN)	200

2.2 解析結果

2.2.1 ロックボルト無の解析

まず、ロックボルトを施していない、不連続面を有する硬質岩盤の荷重-変位曲線を図-5に示す。図は、載荷荷重が約 140 kN に達するまでは材料に包含される不連続面は変形しないために、完全な弾性挙動を呈し、その後に、不連続面がすべり条件を満たすことで変形が生ずることを示している。変形が一旦生じると、不連続面が流れるように滑るため、完全弾塑性的な挙動を呈している。したがって、ピーク荷重に達した後は荷重の増減は起こらず、ピーク荷重を保ったまま、変形のみが進む。ピーク荷重が一番小さいものは、ジョイントに起伏がないケースであり、順に、ジョイントの起伏角が 5 度、15 度、30 度のケースで続いている。しかしながら、それぞれのケースにおいて、ピーク荷重については差がほとんどない。したがって、軸荷重と軸変位の関係においては、ジョイントの起伏の有無は、ほとんど関係がないものと思われる。しかしながら、紙面の関係上、変形モードの図を掲載してないが、水平方向の変位は、起伏が大きい程大きい。これは、今回の解析においては、鉛直方向と平行に近い起伏面で開口が、また逆に対角線にほぼ平行な起伏面においてせん断すべりが生じたために、水平方向では、起伏が大きい程ジョイントの開口が大きく、これに起因して水平方向の変位が大きくなったものと考えられる。

2.2.2 ロックボルトを考慮した解析

次に、ロックボルトを施した解析を行い、その時の硬質岩盤の荷重-変位曲線を図-6および図-7に示す。ここで、図-6はジョイントの起伏が無いケースで、図-7はジョイントが起伏を有し、その角度が 15 度の場合

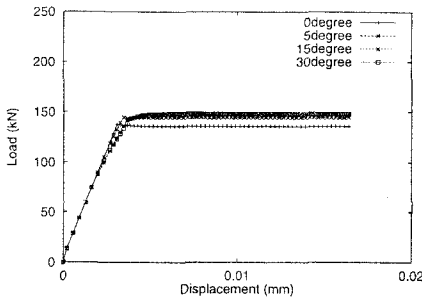


図-5 荷重-変位曲線 (ロックボルト無)

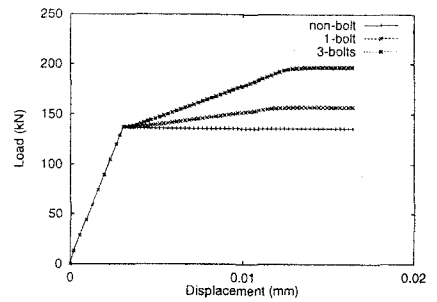


図-6 荷重-変位曲線 (ロックボルト有, 起伏無)

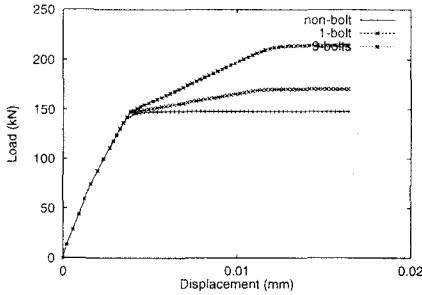


図-7 荷重-変位曲線 (ロックボルト有, 起伏15度)

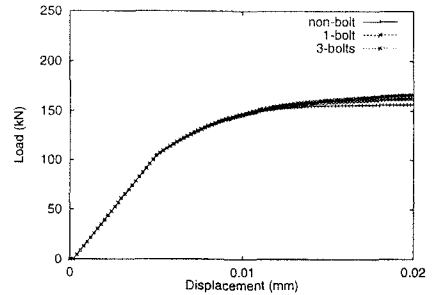


図-8 比較解析 (弾塑性解析, ロックボルト有)

である。ともに、ロックボルト無、ロックボルト1本、そしてロックボルト3本の場合の結果を合わせてプロットしている。ジョイントの起伏が無いケースも、15度の起伏を有するケースも、まず荷重レベル140 kN程度で不連続面の変形が生じる。しかし、ロックボルトを施したケースは、傾きを変えるものの、比例的に荷重が増大し、やがてロックボルトが降伏してピーク荷重に達する。ロックボルトが降伏した後は、ロックボルトを考慮しない場合と同様、完全弾塑的な挙動を呈する。また、ロックボルトの導入本数が増加するにしたがって強度が増加していることが分かる。ここで、ジョイントが有する起伏の影響を検討を行う。ロックボルトが3本でジョイントが起伏を有しないケースでは、そのピーク荷重が190 kN程度であるのに対し、ジョイントが起伏を有するケースでは、そのピーク荷重は約210 kNで、起伏を有する方が強度が発現していることが分かる。これより、ジョイントの起伏の有無は、ロックボルトは効果発現に影響を及ぼしているものと思われる。

2.2.3 比較解析 (弾塑性解析)

最後に、上述してきたような不連続面を陽に取り入れた解析と、不連続面自体は考慮せずに、単に弾塑性解析を行ったケースとの比較を行う。比較解析の荷重-変位曲線は図-8の通りである。図より、ロックボルトの有無に関わらず、ある荷重レベルまでは弾性的に挙動し、荷重100 kN程度で降伏していることが分かる。その後の塑性領域の拡大に伴って、材料は巨視的にひずみ硬化的な挙動を呈し、やがてピークに達する。この場合、ロックボルトの本数を増加させてもほとんど強度増加にはつながらず、弾塑性的解析手法を用いても、的確にロックボルトの効果を表現できないこと、および効果発現のメカニズムを解析的に明らかにするのは不可能であることが判明した。

3 まとめ

本研究では、支保の効果発現が不連続面の変形・強度特性と強い相関を有するという考えに則り、その効果発現のメカニズムを解析的に明らかにすることを試みた。

まず、吉田ら [5] の研究より、不連続面の幾何形状は材料全体の変形に大きな影響を与えることが分かっており、この研究成果に基づいて、本研究でも不連続面の幾何形状がロックボルトの効果発現にどのような影響を与えるかについて考察を行った。ロックボルトが施されていない場合は、軸荷重と軸変位の関係に関する限り、ジョイントの起伏の有無は、ほとんど関係がなかったが、ロックボルトが施した場合では、両者に差が見られた。これより、ジョイントの起伏の有無は、ロックボルトは効果発現に影響を及ぼしているものと思われる。

次に、不連続面を陽に取り入れた解析と、不連続面自体は考慮せずに、単に弾塑性解析を行ったケースとの比較を行ったが、これより、塑性的解析手法を用いても、的確にロックボルトの効果を表現できないこと、および効果発現のメカニズムを解析的に明らかにするのは不可能であることが判明した。

本研究により、不連続面の幾何形状は、ロックボルトの効果発現に少なからず影響を与えることが分かった。また、こうした不連続面の幾何形状の他にも、不連続面の変形特性・強度特性の違いにより、ロックボルトの効果発現は影響を受けることが予想されるので、今後はこうしたことを明確にすること、そして実際の空洞掘削などでは、どういった効果発現が期待できるのかなどを明らかにする必要があるものと思われる。

参考文献

- [1] 清水、武田、小島ケーブルボルトによる岩盤の先行補強について、第 10 回岩の力学国内シンポジウム講演論文集
- [2] 吉中、清水実際のな岩盤不連続面のロックボルト補強、第 10 回岩の力学国内シンポジウム講演論文集
- [3] 吉中、清水岩盤不連続面のせん断に対するロックボルトの補強効果第 7 回岩の力学国内シンポジウム講演論文集、(1987)
- [4] 吉中、清水、岩盤分離面に対するロックボルトの作用効果に関する基礎研究第 17 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集、(1985)
- [5] 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.