

(50) 地下空洞における全面接着型ボルトの アンカー作用機構とその支保効果について

名古屋大学工学部 正 会 員 オメール・アイデン

名古屋大学工学部 正 会 員 市 川 康 明

名古屋大学工学部 正 会 員 川 本 脩 万

1. はじめに

近年、全面接着型のロックボルトは地盤工学における構造物の主たる支保部材として広く用いられるようになってきているが、ボルトと岩盤との間の相互関係（ボルトのアンカー作用機構）によるその支保効果についてはまだ十分に解明されているとは言えない。これまでの研究の結果、ボルトとグラウト、グラウトと岩盤間の境界面での挙動、ボルトの表面形状、拘束圧、グラウトの特性がボルトのアンカー作用機構を支配することなどが判った。したがって、これらの結果を用いて、より現実に即したロックボルト要素を開発し、様々な岩盤のタイプおよび挙動を考慮した数値解析を行わなければならない。

本論文では、ボルトのアンカー作用とその支保効果について、新たに提案したロックボルト要素を用いて数値解析を行い、従来の方法による結果と比較・検討し、その応用について述べる。

2. 実験

グラウトとボルト、岩盤間のそれぞれの境界面での挙動と破壊形状を把握するため、次の実験を行った。

2. 1 押抜きおよび引抜き実験：様々な応力状態でロックボルトのアンカー作用を明らかにするため、三軸セルを考案した。実験はロックボルト表面にひずみゲージを貼り付け、大谷石に穿孔したボーリング孔にモルタルセメントでセットし、これを試料として三軸セル内において各種応力下でのボルトの押抜き実験と引抜き実験を行った。押抜き実験と引抜き実験はグラウト中でボルトが抜けるという点で基本的には同じであるが、ボルトに垂直に作用している応力状態はそれぞれ圧縮、引張と異なっているため、ロックボルトの支持力も異なる。そこで現場でのロックボルトの応力状態に対応するため三軸セルを修正した（図・1）。ボルトとして直径13mm、19mmの異形鉄筋と丸鋼を用い、ボルト表面の5ヶ所にひずみゲージを貼り付け、各種応力下でボルトの押抜き、引抜き実験を行った。図・2はその実験結果の一部を示している。同図より押抜き実験の結果は引抜き実験のそれと良く対応するが、耐力は1.3～1.6倍程度高く見積もられることが判る。

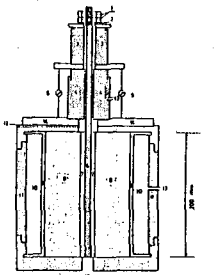
一連の実験において観察されたボルト周辺の破壊形状より、以下の結論が要約される。

丸鋼：拘束圧およびボルト・ボアホール半径比に関係なく、ボルト・グラウト境界面で滑り破壊を生じた。

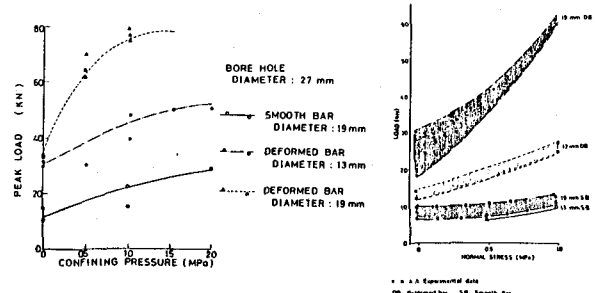
異形鉄筋：一般に3つのタイプの破壊形態が観察された。

a) ボルト・グラウト境界面における破壊—拘束圧が0.5MPa以上の時生じる。

b) 岩石・グラウト境界面における破壊—ボルト・ボアホール半径差が小さい時生じる。



図・1 実験装置概略図（引抜き実験）



図・2 ロックボルトの耐力 a) 押抜き実験 b) 引抜き実験

c) グラウトおよび岩石の割裂による破壊—拘束圧が0、または比較的低い時生じる。（これはくさび効果に

よるグラウト内に半径方向の内部応力が生じ、その結果、円周方向引張り応力が増加するためと考えられる。また、引抜き力の方向とボルト軸方向の不一致による影響が考えられる。)

実験ではボルトは載荷端より滑り始め、ボルト表面のせん断力が一様に分布するとボルト全長にわたって滑りが生じた(図. 3)。

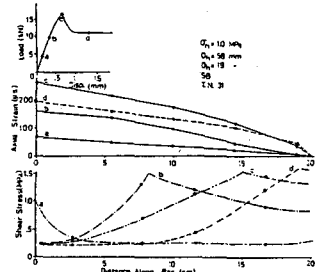


図. 3 引抜き実験でのロックボルトの応力分布

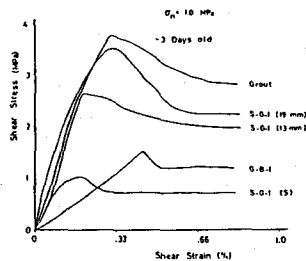


図. 4 境界面でのせん断挙動

2. 2 グラウトと境界面に対する直接せん断試験: ボルト・グラウトおよびグラウト・岩石境界は構造的に弱く、ボルトのアンカー作用に大きな影響を与えることが先の実験で確かめられた。境界面の破壊形状はせん断破壊を生じていることから、グラウトと境界面のせん断試験が行った。供試体としては、グラウト・岩石および引抜き実験におけるボルト・グラウト境界面と同じ境界形状を持つグラウト・鋼材プレートを用い、垂直応力を様々に変化させて試験を行った。その結果以下のことが結論された(図. 4)。

- 境界面では弾性-塑性軟化-塑性流れ型の挙動を示す。
- スムーズな境界面を持つ試料のせん断抵抗は、凹凸のある境界面を持つ試料のそれに比べて小さいが、どの試料のせん断抵抗もグラウト自身のそれより小さい。これはロックボルトをモデル化する際、境界面の取り扱い方が重要な要素となることを示している。
- ボルトの表面形状はボルト・グラウト境界面のせん断抵抗に大きな影響を与える。ボルトの凸部の間隔が広く、また凹凸の高低差が大きい程境界面のせん断抵抗はグラウト材のそれに近づく。

3. 理論的および数値解析的研究

3. 1 アンカー作用について: 押抜きおよび引抜き実験におけるロックボルトのモデル化とそのアンカー作用のメカニズムを説明するため、種々の理論的および数値解析的研究を行った。まず、境界面およびボルト自身の弾塑性挙動を考慮した理論解を検討し、この解を引抜き実験に適用し(図. 5)、有限要素解析で得られた解と比較した。つぎに、有限要素解析では結合1次元および Goodman型ジョイント要素を用いて、2次元軸対称解析を行った(図. 6)。以下にその結果を示す。

- ロックボルトに沿う応力の分布状態はボルトおよびその周辺岩盤の弾性係数に大きく依存する。
- 応力集中はボルトの載荷端で生じる。
- ボルト・グラウトまたはグラウト・岩石境界面ですべり破壊が生じる場合、せん断応力集中は始め載荷端で生じ、ボルト内の軸方向応力が増加し、すべりが進行するにしたがって非載荷端の方向へ移る。また、ある長さ以上の付着破壊を生じるとボルトの軸応力は下降し始める。
- 境界面におけるすべり破壊のシミュレーション結果は理論値および実験値と良く一致した。これは本研究で導入した力学モデルが妥当であることを示している。
- ボルトとボアホール半径比はボルトの耐荷力に大きな影響を与える。数値解析および引抜き実験結果によると、ボルトの径に対してボアホールの径が相対的に増加するにしたがってグラウト・岩石境界面におけるせん断応力は低下する。

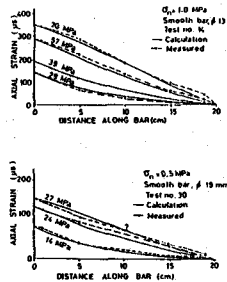


図. 5 理論解と実験値との比較

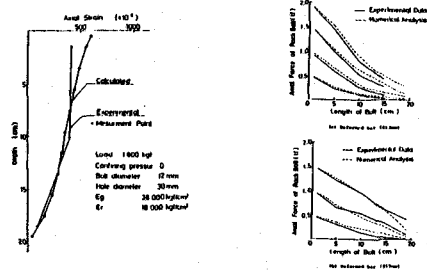


図. 6 2次元軸対称有限要素法解析 a) 押抜き実験 b) 引抜き実験

3. 2 支保効果について：ロックボルトと岩盤の相互作用に対して行った解析から、ベアリングプレートを取り付けた長いロックボルトではボルトの両端でのせん断集中は軽減すること、また、岩盤とロックボルトの相互的な変位も減少するか、あるいは生じないこと、したがって、境界面のせん断破壊の可能性はなくなり、岩盤とロックボルトは一体となった挙動を示すことが判った。この概念を用いて均一な応力状態でのトンネルや立坑等の軸対称空洞に対する理論解を求めた。理論解は、ボルトの設置時期、周辺岩盤の変形とボルトの内圧効果の関係および岩盤の弾性係数の改善効果を考慮して求められた。本解析により、軸対称問題におけるグラウトボルトの効果が評価でき、また地下空洞におけるグラウトボルトの持つ本質的役割を明確にすることができた。図. 7 は理論解を用いて行った解析結果の一部を示しているが、結果は以下のようにまとめることが出来る。

- ボルト内に生じる軸応力はボルトの内圧効果と密接に関係している。グラウトボルトの設置時期を変えることにより、ボルトの軸応力は大きく変動する。ボルトの設置時期を遅くする程、岩盤に変形を許し、ボルトの軸応力は減少する傾向にある。この傾向は周辺地盤が軟岩である場合、特に顕著である。
- グラウトボルトの補強効果は周辺岩盤の種類およびその挙動形態に大きく依存し、特に岩盤の弾性係数はその中で最も重要な影響因子である（図. 7）。
- 従来から言われているように、グラウトボルトは岩盤の弾性係数を増加させる。
- ボルト間隔を広げることにより、ボルト1本当たりの軸応力は高い値を示すが、全体としての補強効果は減少する。また、ボルトの荷重-変位曲線の傾きは小さくなり、その結果、平衡に達するまでに岩盤に対して非常に大きな変位を許すことになる。
- 地山特性曲線は従来の方法で求めた曲線と一致するが、従来の方法と比較してこの解析によると岩盤の変形が低く抑えられることを示しており、この現象は現場での観測結果とも一致している。
- ボルトの荷重-変位曲線はボルトが弾性的に挙動する範囲内において傾きの異なる2つの直線から構成される。この理論解からグラウトボルトの補強効果を良い精度で定量的に評価することは可能であるが、この解析は均一応力状態でのトンネルや立坑等の軸対称空洞に限られることに注意する。

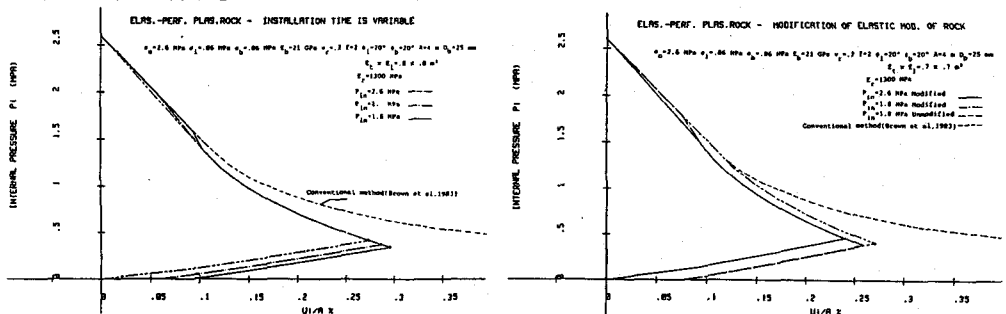


図. 7 地山特性曲線

4. 新たなロックボルト要素の提案

ロックボルトの有限要素解析モデルとして、従来トラス要素、ビーム要素などが用いられてきた。一方、グラウト材のシミュレーションに Ngo and Scordelis が提案したリンク要素(linkage element) が利用されている。また、付着機構とグラウト材中での破壊を考慮した新たなボルト要素も提案されている(John and Van Dillen, 1983)。しかしながら、先の実験結果より得られた各境界面での挙動および破壊の可能性、ボルト表面の形状とそのダイレイタンスー効果およびボルトに作用する拘束応力の影響等のロックボルト挙動の重要な因子は、これらの方法では十分表現出来ないため、このような特性を考慮して、ボルトおよび境界面の挙動を以下のようにモデル化したロックボルト要素を提案する。

- a) ボルトの挙動：ボルトはバー要素を用いてシミュレートされ、その挙動としては引張およびせん断に対し弾塑性性を仮定する。ここでボルトのせん断挙動(ドウェル効果)はボルトが不連続面を貫いている場合にのみ考慮される。
- b) 境界面の挙動：境界面における挙動は、要素の厚みを表現することができる Ghaboussi et al. タイプのインターフェース要素を用いてシミュレートする。この要素より、ボルト・グラウト境界面、グラウト・岩石境界面およびグラウト内の挙動を1つの要素で表現することができる。

境界面およびグラウト内において、せん断挙動に対し弾塑性-塑性軟化-塑性流れ則を仮定した。なお、境界面およびグラウトのせん断挙動に及ぼすパラメータ(ボルトの表面形状、拘束圧等)は構成式を通じてモデルに取り入れられる。

このロックボルト要素を模式的に図. 8に示す。グラウト・ボルト境界面で破壊する場合の剛性マトリックスは次のとおりである。

$$\begin{aligned} \mathbf{F}' &= \mathbf{K}' \mathbf{U}' \\ \mathbf{F}'^T &= (F_{x'}^K, F_{x'}^L, F_{x'}^{KK}, F_{x'}^{LL}) \\ \mathbf{U}'^T &= (U^K, U^L, U^{KK}, U^{LL}) \end{aligned} \quad \mathbf{K}' = \begin{bmatrix} 2K_1 & -K_1 & -2K_1 & K_1 \\ & 2K_1 & K_1 & -2K_1 \\ & & K_2+2K_1 & -(K_1+K_2) \\ \text{sym.} & & & K_2+2K_1 \end{bmatrix}$$

剛性マトリックス

$$K_1 = \frac{\pi G_b (r_b^2 - r_c^2)}{(r_b \ln(\frac{r_b}{r_c}))^2} L$$

$$K_2 = \frac{E_b A}{L}$$

$$A = \pi r_b^2$$

$$L = \mathbf{x}'_{LL} - \mathbf{x}'_{KK}$$

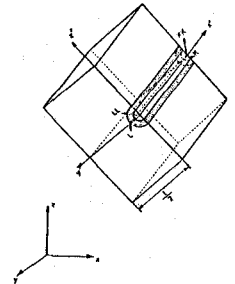


図. 8 ロックボルト要素

5. 結論

この研究で明らかになったことは、以下のとおりである。

- a) ロックボルトの引抜きおよびせん断抵抗はグラウトのせん断抵抗より、グラウト・ボルト境界面あるいはグラウト・岩石境界面に依存すること、そのためロックボルトの引張強度を十分に発揮させるにはアンカ一部分が堅固でなければならない。
- b) 引抜き実験は、ロックボルトの引抜き抵抗力を確認するためには簡便かつ適切な方法であるが、この実験から数値解析のためのパラメータを直接に決定することは困難である。このため、グラウトと境界面の付着挙動に関するパラメータは直接せん断試験から決定した。
- c) 連続性岩盤におけるロックボルトの支保効果は、内圧効果と岩盤物性を改善する効果に分けて考えられるが、これらの効果はロックボルトの設置時期、間隔および岩盤の挙動に依存することが明らかになった。
- d) 実際のボルトの支保効果の発生機構を考慮した有限要素解析における新しいロックボルト要素を提案したが、これにより地盤構造物でのロックボルトの引抜き抵抗および支保効果をシミュレーションすることが可能である。

(50) ANCHORAGE PERFORMANCE OF FULLY GROUTED ROCKBOLTS AND THEIR REINFORCEMENT EFFECT
ON UNDERGROUND OPENINGS

Ömer AYDAN, Yasuaki ICHIKAWA and Toshikazu KAWAMOTO
Dept. of Geotechnical Engineering, Nagoya University

Rockbolts have become one of the principal supporting member in securing the stability of underground and surface structures in geotechnical engineering field in the last 25 years. However, it is quite difficult to state that their reinforcement effect which is interrelated to their anchorage performance and the interaction among the bolts and rock mass is clearly understood inspite of their wide-spread use.

In this paper, the authors summarize the findings of the experimental, theoretical and numerical studies on anchorage performance of the bolts and their reinforcement effect they have carried out for the last 3 years and proposes a new bolt element for finite element analysis.

Laboratory push-out and pull-out tests under triaxial state of stress have revealed that the anchorage mechanism of the bolts is largely governed by two interfaces, namely, bolt-grout and grout-rock interfaces rather than grouting material itself and failure usually takes place at one of the interfaces by shearing. Though push-out and pull-out tests are good enough at investigating the parameters on load bearing capacity of rockbolts, it is very difficult to determine the parameters for bonding behaviour of interfaces and mortar which are necessary in assessing the stability of bolted structures. Therefore, shear tests were carried out on samples of grout-rock and grout-steel plate having the same surface configurations as those of bolts. Tests have shown that the shear resistance of the interfaces is less than that of mortar, and surface configuration of bolts and borehole wall and confining pressure have a great effect on their shear behaviour and confirmed that the interfaces are the weakness surfaces in the system. This implied that any mathematical modelling of the grouted bolts must take into account the possibility of slippage at one interfaces rather than within the grout annulus. Theoretical and numerical analysis with joint elements, taking account the behaviour of such interfaces have shown that the load bearing capacity of the bolts can be reasonably well predicted by using the parameters obtained from the shear tests. As a result, a new bolt element has been developed in a similar manner to that of John and Van Dillen's, but considering the effect of confining pressure, surface configurations of the bolts and allowing the failure at one interfaces rather than within the annulus.

Furthermore, results of analyses by newly developed analytical solutions based on composite material concept are presented and it has been shown that the internal pressure provided by the bolts depends upon allowed displacement of rock before the installation of bolts, their spacing and behaviour of rock mass.