

Ⅲ-B65 不連続面のせん断に伴うケーブルボルトの補強効果に関する解析的検討

大林組技術研究所 正会員 木梨秀雄
 大林組土木技術本部 正会員 天野 悟
 大林組土木技術本部 正会員 吉岡尚也

1. はじめに

ケーブルボルトは全面接着式の岩盤補強部材であり、そのたわみ性を利用してトンネル・地下空洞への適用が期待されている。筆者らはすでに、ケーブルボルトの岩盤補強効果に関する現場実験・計測、および数値シミュレーションの結果を報告し^{1),2)}、トンネル・地下空洞への適用性を検討してきた。このケーブルボルトは、一般に不連続面が開口するような挙動を抑制する効果は大きい、これに比べケーブル自体にはロックボルトのようなせん断剛性がないため、せん断に対する抵抗は小さくなるものと考えられている。ロックボルトによる不連続面のせん断に対する補強効果については、ロックボルト自体のせん断剛性を考慮した上で、実験および数値シミュレーションを通じて検討がなされている^{3),4)}。一方、ケーブルボルトについても、ケーブル自体にはせん断剛性がないものの、全面接着の付着により軸力が生じ、不連続面のせん断強度が増加するものと期待される。そこで、本論文では不連続面の一面せん断を解析的に模擬し、ケーブルボルト打設による不連続面の補強効果について検討した結果について述べる。

2. 解析方法

解析では、不連続面のせん断挙動およびケーブルボルトの補強効果を考慮するため、DEM解析コードUDEC⁵⁾を用い、Barton-Bandisジョイントモデルを適用した。今回の数値実験では、 $3 \times 3\text{m}$ (奥行き 1m)の岩盤ブロックが不連続面に境にせん断される場合を想定した。打設するケーブルボルトは、19本より線($\phi=17.8\text{mm}$ 、長さ 4.5m)4本とした。岩盤は一軸圧縮強度 100MPa 程度の硬岩を想定し、不連続面の強度JCSおよび残留摩擦角 ϕ_r をそれぞれ 80MPa 、 27° とした。数値実験では、ケーブルボルトの水平からの打設角 $\alpha=45^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ 、垂直応力 $\sigma_v=0.01 \sim 0.1 \sim 1.0\text{MPa}$ 、ジョイントの粗さ係数 $\text{JRC}=1 \sim 8 \sim 15$ を変化させて不連続面の一面せん断を模擬し、せん断応力～変位挙動などを比較した(図-1参照)。これらのパラメータの組合せに、ケーブルボルトを打設しない場合も含めて解析ケースは合計36である。解析では、岩盤ブロックおよびケーブルボルトの間に生じる相対変位に基づいて、定着材を介してケーブルボルトに軸力が発生する機構となっており、ケーブル自体にはせん断剛性がないものとしてモデル化している¹⁾。

3. 解析結果と考察

$\alpha=90^\circ$ の場合の不連続面のせん断応力～変位および最大軸力の関係を図-2に示す。図-2ではボルトを打設しない場合の不連続面のせん断応力もあわせて示した。ここで、せん断応力は 3m の不連続面上の平均値を示している。図-2において、せん断開始から図中の①までの範囲では、ケーブルボルトの軸力の発生はわずかであり、不連続面本来のせん断抵抗によりせん断応力が増加している。せん断変位が図中の②まで増加する範囲では、ケーブルボルトがない場合には不連続面は降伏するが、ケーブルボルトを打設した場合には、その効果によりせん断応力が大きく増加することがわかる。この②の時点で不連続面とボルトの交差部において定着材の降伏が起こる。このため、さらにせん断変位が進んだ区間においてせん断応力は低下するが、軸力については依然として増加する。軸力はさらに③までは単調に増加するが、それ以

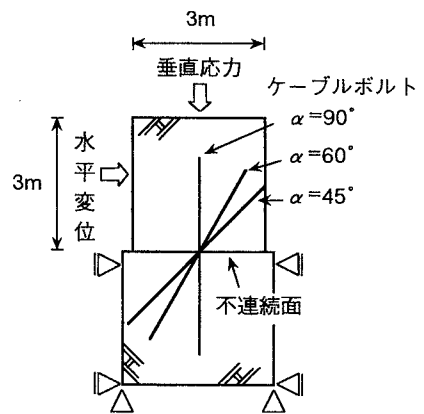


図-1 解析モデル

キーワード：ケーブルボルト、岩盤不連続面、山岳トンネル、地下空洞

大林組 技術研究所 〒204 東京都清瀬市下清戸4-640 TEL 0424-95-0910 FAX 0424-95-0903

降は軸力の増加率は減る傾向にある。図-2のケースを、軸力分布の変化および定着材の降伏の進展について整理したものが図-3である。軸力はせん断変位とともに増大し、不連続面との交差部でピークとなる。このピークの前後に軸力は分布しており、せん断変位の増大とともにその分布範囲は広がる傾向にある。一方、定着材の降伏はせん断変位が約12mm (図-2の②) 付近で始まり、せん断変位が15mmに達するとこの範囲が大きく広がる。このように定着材の降伏範囲が大きく進展することにより、図-2の③のように軸力の増加率の減少が起きたものと考えられる。つぎに、 $JRC=8$ 、 $\sigma_n=0.01$ 、 0.1MPa の場合の不連続面に作用するせん断応力～変位関係を示したものが図-4である。図-4より、せん断応力のピーク値に関しては、いずれもボルトを打設しない場合に比べ大きくなり、ボルトの打設角による違いが小さいことがわかる。しかしながら、 $\alpha=45^\circ$ および 60° の場合は、 $\alpha=90^\circ$ に比べ初期のせん断剛性が大きく、かつせん断応力がピークにいたるまでの変位が小さい。すなわち、 $\alpha=45^\circ$ および 60° の場合は $\alpha=90^\circ$ よりもせん断変位の初期の段階からケーブルボルトが効果を発揮していることがわかる。また、ケーブルボルトを打設しない場合に対するピークせん断応力の増加率に関しては、 $\sigma_n=0.1$ の場合に比べ $\sigma_n=0.01$ の場合の方が大きい。したがって、ケーブルボルトの補強効果は垂直応力が小さいほど有効と考えられる。

4. まとめ

不連続面の一面せん断におけるケーブルボルトの補強効果を解析的に検討した結果、ケーブルボルトが不連続面と直交して打設されるような場合にもせん断変位の増大とともに軸力が発生し、不連続面のせん断強度が増大することがわかった。また、せん断変位に伴う軸力分布の変化や定着材の降伏が進展する状況などを解析的に把握した。これらの結果から、ケーブルボルトの補強効果は、不連続面の開口に対してのみならず、せん断に対しても十分有効と考えられる。しかしながら、今回の結果はあくまで数値実験に基づいたものであるため、今後は模型実験などによりこの結果を検証していく必要がある。

参考文献

- 1) 天野・木梨・田中: 不連続性岩盤におけるケーブルボルトの作用効果に関する解析的検討, 第5回トンネル工学研究発表会, p. 155-160 (1995)
- 2) 天野・木梨・土原・渡辺・二宮: 切羽安定のためのケーブルボルトの支保効果について, 第6回トンネル工学研究発表会, pp. 151-156 (1996)
- 3) Bjurström S.: Shear strength of hard rock joints reinforced by grouted untensioned bolts, 3rd. ISRM Congress, pp. 1194-1199 (1974)
- 4) 吉中・清水・新井: 岩盤不連続面に対するロックボルトの補強効果, 土質工学会論文報告集, Vol. 28, no. 2, pp. 177-186, (1988)
- 5) Cundall P.A.: UDEC- A generalized distinct element program for modelling jointed rock, U. S Army, Contract DAJA37-79-C-0548, (1980)

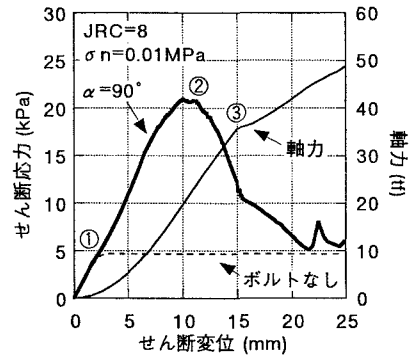
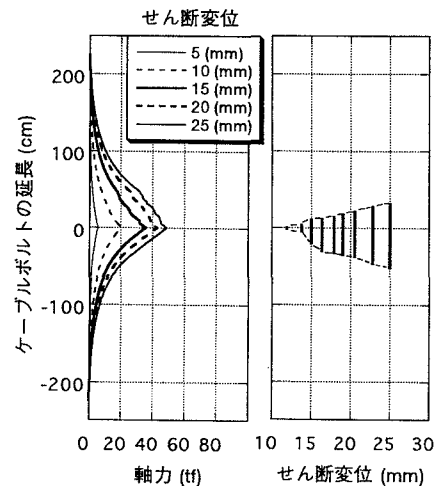


図-2 せん断変位～せん断応力、軸力の関係



(a) 軸力の変化 (b) 定着材の降伏範囲

図-3 せん断変位に伴う軸力と定着材の降伏

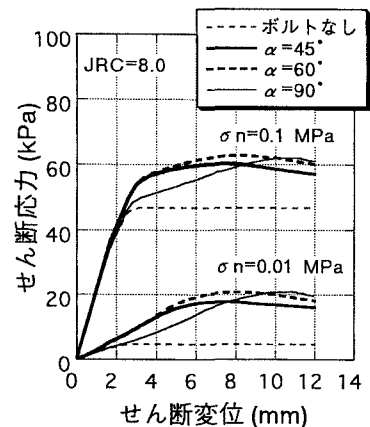


図-4 せん断応力～変位関係