

軟岩に対するケーブルボルトの作用メカニズムに関する考察

日本建設コンサルタント(株) 正〇荒本 達也 山口大学大学院 学 中川 倫孝
前田建設工業(株) 正 武田 智治 山口大学工学部 正 清水 則一

1. はじめに

岩盤の先行補強工法としてケーブルボルト工法が注目されている。ケーブルボルト工法は、硬岩地山が主の諸外国での施工実績はあるものの、剛性・強度ともに低い軟岩地山での施工実績はほとんどなく、その効果やメカニズムなど未解明な点も多い^{1), 2)}。そこで本研究では、数値解析によって二軸圧縮試験シミュレーションを行い、軟岩に対するケーブルボルトの作用効果とそのメカニズムについて検討した。

2. 解析モデルと解析条件

数値解析において使用した供試体モデルは、横5m、縦10m、奥行き1mの直方体供試体モデル（図-1）である。供試体の上下面より変位速度 $v=6.25 \times 10^{-6}$ m/sを等変位载荷して変位制御し、側圧として0, 0.5, 1.0MPaを与えて二軸圧縮試験（平面ひずみ問題）の数値シミュレーションを行った。この解析に用いた供試体モデルは、Mohr-Coulombの降伏基準に基づくひずみ軟化軟岩モデルである。なお、本解析では図-2に示すように c と ϕ が塑性ひずみ1.0%で初期強度から残留強度へ軟化させた。ケーブルボルト（ $\phi=15.2$ mm）の打設本数は、0本、3本、5本、9本の4パターンであり、打設間隔は、3本、5本の場合は供試体中央部より2m間隔、9本の場合は、供試体中央部より1m間隔である。なお供試体の物性値は表-1に示し、ケーブルボルトの物性値は表-2に示す。

3. 解析結果

3-1 見かけの補強効果

軸ひずみと軸応力と平均軸力の関係（図-3）では、側圧に関係なく、供試体降伏後にひずみ軟化現象による急激な軸応力の減少がみられるが、ケーブルボルトを打設することにより軸応力の減少が緩和され、残留強度においても強度増加がみられた。その効果はケーブルボルトの打設本数が増加するほど大きくなった。また供試体降伏前の弾性域においてはケーブルボルト打設による剛性の改善効果はほとんどないと思われる。次にケーブルボルトに発生した平均軸力をみると、供試体降伏後に打設本数別にばらつきが生じ、軸力発生状況図（図-4）によりケーブルボルトに発生する軸力は打設部分が膨張した場合に大きいことが示される。さらに打設本数別に供試体の変形特性を調べた結果、供試体端面に中央部に比べ非常に大きな変形が生じる場合に供試体の軸応力が急激に減少することが示される³⁾。

ここでケーブルボルト打設による強度増加は、言い換えると地山における強度定数の粘着力（ c ）と内部摩擦角（ ϕ ）の見かけ上の改善効果であると考えられる。そこで二軸圧縮試験の数値シミュレーションから塑性ひずみの進行に伴う c と ϕ

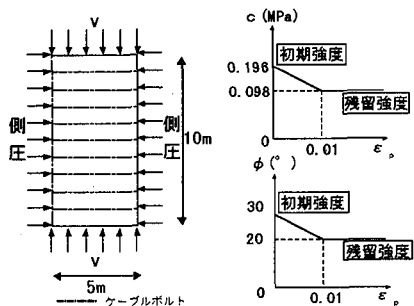


図-1 供試体モデル 図-2 粘着力と内部摩擦角

表-1 供試体物性値（D II 地山相当）

弾性係数 (MPa)	147
ポアソン比	0.35
粘着力 (MPa)	ピーク時 0.196
	残留時 0.098
内部摩擦角 (°)	ピーク時 30
	残留時 20
密度 (kg/m^3)	2100
引張強度 (MPa)	0.068

表-2 ケーブルボルト物性値

弾性係数 (MPa)	2.0×10^5
引張降伏強度 (kN)	200
ケーブル断面積 (m^2)	1.81×10^{-4}
クラウト付着剛性 (MN/m/m)	100
クラウト付着強度 (MN/m)	0.3

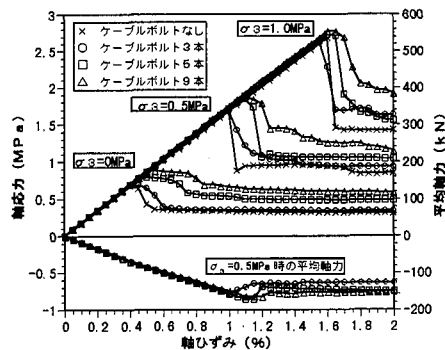
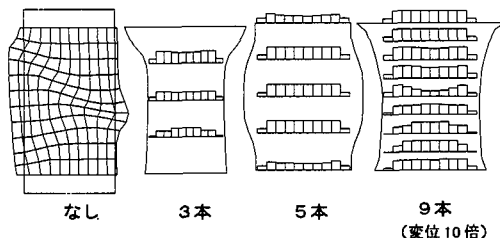


図-3 軸ひずみと軸応力の関係

図-4 軸力発生状況図（ $\sigma_3=0.5\text{MPa}$ ）

の推移を求め図-5、図-6に示す。ケーブルボルトを打設することにより c の増加がみられ、その効果は打設本数を増加させると大きくなった。しかし、ケーブルボルト打設による ϕ の増加にはばらつきがあり、 c に比べて打設本数の増加による改善ははっきりとはみられなかった。本研究においては、表-1の力学定数をもつ地山以外に対しても同様の方法でケーブルボルト打設による作用効果を調べた。その結果日本道路公団地山等級区分C I、C II、D I相当の地山においてケーブルボルトの打設により供試体降伏後の急激な軸応力の減少が緩和され、その効果は打設本数を増加させると大きくなった。さらに地山等級別に c と ϕ の改善効果を比較すると、 c は強度の低い地山ほど改善効果は大きいことがわかった(図-7)。また、 ϕ は c ほど明確な違いはみられなかった。

3-2 補強効果のメカニズム

3-1にケーブルボルト打設による補強効果として、供試体降伏後の見かけ上の強度増加と延性特性の改善があることを示した。次にその効果のメカニズムを解明するため、供試体内部の応力分布に注目する。ここでは一つの要素(図-8①)を例にとり考察する。この要素では、ケーブルボルトを打設しない場合は早くからひずみ軟化現象により大きなせん断変形を生じる(図-9)。ケーブルボルトを打設した場合は打設しない場合に比べて供試体の同じ軸変位に対する要素のせん断ひずみが小さくなる。次にその要素の応力経路(図-10)をみると、ケーブルボルトを打設した場合には打設しない場合に比べて最小主応力が増加することがわかる。この効果はケーブルボルトの打設本数が増加するほど大きい(図-11)。以上のようにケーブルボルトを打設することによって供試体内部の最小主応力が増加し、これが要素の初期降伏点をより大きい応力状態まで増加させ、その後の変形の抑制効果につながっていると思われる。なお、この最小主応力の増加はケーブルボルトの軸力発生、あるいはケーブルボルトと供試体材料間の付着応力に起因するものである。したがってケーブルボルトが降伏したり付着が切れたりすれば、上に述べたような補強効果は失われるものと考えられるのでその点には注意が必要となる。

4. 結論

- (1) ケーブルボルトの作用効果は供試体降伏後の見かけ上の強度増加と延性特性の改善である。その効果は打設本数を増加させると大きくなる。また強度の低い地山ほどその効果は大きい。
- (2) 補強効果のメカニズムは、最小主応力の増加による強度増加と延性特性の改善である。

参考文献：

- 1) 清水、武田：軟岩に対するケーブルボルトの適用性について、トンネル工学研究論文・報告集、第7巻、pp. 111-116, 1997. 11.
- 2) 武田、馬杉、清水：ケーブルボルトによる軟岩トンネルの先行補強効果の数値シミュレーション、土木学会第53回年次学術講演会概要集第3部B、210-211, 1998. 10.
- 3) 荒本：軟岩におけるケーブルボルトの作用効果に関する数値シミュレーション、山口大学工学部平成10年度卒業論文

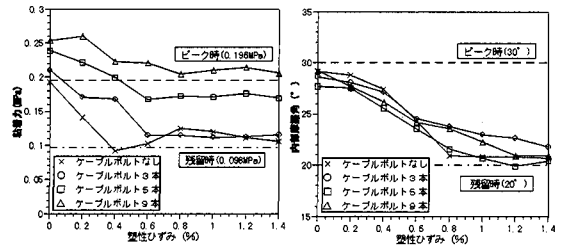


図-5 塑性ひずみと粘着力の関係 図-6 塑性ひずみと内部摩擦角の関係

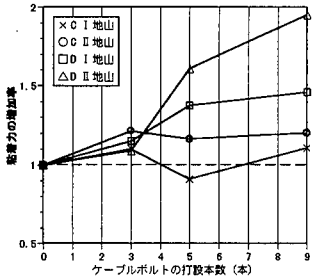


図-7 地山等級別の粘着力の増加率

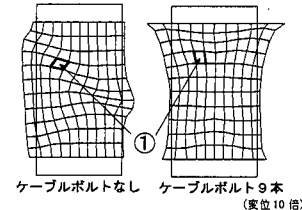


図-8 供試体の変形状況図

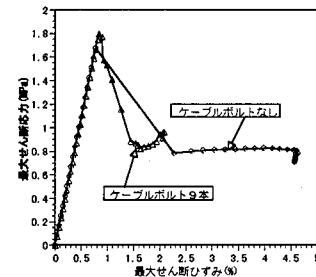


図-9 最大せん断ひずみと最大せん断応力の関係(要素①)

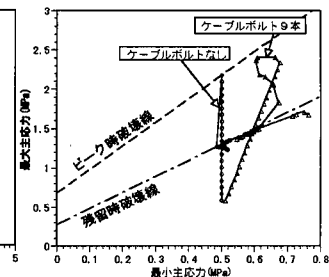


図-10 応力経路(要素①)

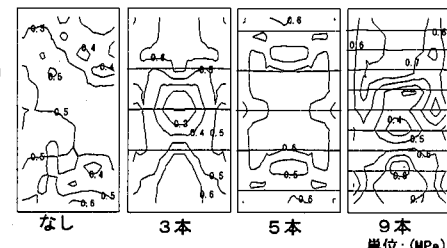


図-11 最小主応力分布図