

Ⅲ-B105

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

山口大学大学院 学 武田 智治
飛鳥建設(株) 正 馬杉 篤司
山口大学工学部 正 清水 則一

1. はじめに

地山の先行補強工法としてケーブルボルトの利用が注目されている。しかし、その効果のメカニズムや定量評価については研究すべき課題が多い。特に、これまでのケーブルボルト工法の利用はほとんどが硬岩を対象とし、脆弱な地山に対しては効果があるかどうかを含めて未解明な点が多い¹⁾。筆者らは、これまで数値シミュレーションによって、強度の低い軟岩においても、ケーブルボルトには先行補強効果があり、それは強度の増加（あるいは維持）と延性特性の改善であると指摘している^{2), 3)}。

本報告では、ひずみ軟化型の軟岩について、ケーブルボルトによる強度の改善効果を示し、トンネル掘削の数値シミュレーションを行い、先行補強の効果を調べる。なお、数値計算にはFLAC (ITASCA) を利用した。

2. 平面ひずみ二軸圧縮試験の数値シミュレーション

2-1 解析条件

図-1に示す直方体供試体（10m×5m）を想定し、平面ひずみ二軸圧縮試験の数値シミュレーションを行った。試験は、供試体上下面より変位速度 v （ $v=6.25 \times 10^{-6}$ m/s）を等変位制御する変位制御方式で行い、供試体側方より側圧（0.5MPa, 1MPa）を与えた。本解析にはMohr-Coulombの降伏基準に従うひずみ軟化モデルを使用した。なお、本解析で用いたひずみ軟化モデルは、図-2に示すように塑性ひずみの進行に伴い粘着力及び内部摩擦角が減少するものである。ケーブルボルト（ ϕ 15.2mm、ブレインストランド）は、3本、5本、9本の3パターンで打設し、3本、5本の場合は打設間隔は供試体中央より2m、9本の場合は1mとした（図-1参照）。なお、供試体及びケーブルボルトの物性値を、それぞれ表-1、表-2に示す。

2-2 解析結果

ケーブルボルトを打設した供試体の上下面の平均応力と与えた側圧からMohrの応力円を描き、その結果から、初期降伏後の降伏面の移動を調べ軟化過程におけるみかけの粘着力と内部摩擦角の推移を調べた。図-3に塑性ひずみの進行に伴う粘着力の推移を示す。この図から、ケーブルボルトを打設することにより、ピーク時及び残留時ともにみかけの粘着力の改善（ケーブルなしの場合に比べて低下しない）が見られ、ケーブルボルトの打設本数の増加によりこの効果は大きく見られた。特に、ケーブルボルトを9本打設した場合は、打設しない場合に比べてピーク時で1.2倍、残留時で1.3倍の改善効果が見られた。内部

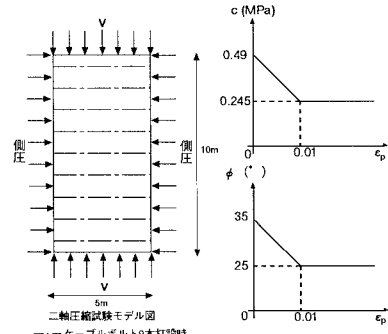


図-1 供試体モデル図

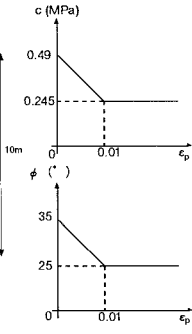


図-2 粘着力と内部摩擦角

表-1 供試体物性値

弾性係数 (MPa)	490
ポアソン比	0.35
粘着力 (MPa)	ピーク時 0.49 残留時 0.245
内部摩擦角 (°)	ピーク時 35 残留時 25
密度 (N/m³)	2.2×10^4
引張強度 (MPa)	0.188

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 (MN)	0.2
ケーブル断面積 (m²)	1.81×10^{-4}
グラウト付着剛性 (MN/m/m)	6.5×10^3
グラウト付着強度 (MN/m)	0.3

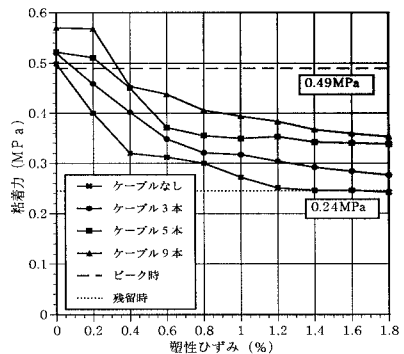


図-3 塑性ひずみと粘着力の関係

キーワード：ケーブルボルト，軟岩，トンネル，事前補強，数値解析

〒755-8611 山口県宇部市常盤台 2557 TEL(0836)35-9440 FAX(0836)35-9429

摩擦角については、本例ではケーブルボルトの打設による改善効果はほとんど見られなかった。

次に、供試体の物性値として、上述のケーブルボルトの打設によって改善された粘着力を用いて一軸圧縮試験の数値シミュレーションを行う。これは、「改善された物性値をケーブルを打設しない供試体に与えることによって、ケーブルボルトを打設した場合と等価な強度を持つ供試体（等価強度モデル）と考えることはできないか?」、を調べることを目的としている。もし、これが妥当ならば、たとえば、「ケーブルボルトで先行補強しておけば、地山のクラス（あるいは支保パターン）をひとつ上げることができる」、といえるのではなかろうか。図-4にケーブルボルトを9本打設した場合について、等価強度を持つ供試体とケーブルを打設した供試体に対する結果を示す。等価強度モデルは実際にケーブルを打設した供試体と比べ、降伏後のひずみ軟化の緩和効果が少ないものの、おおむね両者の違いはほとんど見られず、等価強度モデルの可能性が示唆されたものと思われる。

4. トンネル掘削シミュレーション

4-1 解析条件

図-5 (a) に示すように、トンネル上半壁面において2m間隔でケーブルボルト（ $\ell=10\text{m}$ ）を先行打設し、トンネル掘削の数値シミュレーションを行う。また、等価強度モデルについては、図-5 (b) に示すようにケーブル打設領域の強度を前節の改善された強度（図-3、表-3）に置き換えて解析を行う。

4-2 解析結果

図-6および図-7にそれぞれ天端沈下及びトンネル側壁点の水平変位に対する地山特性曲線を示す。まず、素掘り掘削とケーブルボルトによって先行補強したケースを比較すると、トンネル周辺に塑性領域が発生し掘削解放率が95%を越えた段階でケーブルの効果が発揮され、変位が大きく抑制される。これは、前節の供試体で見られた効果と整合している。一方、等価強度モデルの地山特性曲線は、おおむね、ケーブルボルトを打設したケースと一致しており、トンネル掘削においても等価強度モデルの考え方が有効ではないかと思われる。

5. おわりに

本報告では、軟岩に対するケーブルボルトの先行補強効果について数値シミュレーションを行い検討した。ケーブルボルトの効果は、トンネル周辺に塑性領域が生じてから有効に発揮されるものと考えられる。また、等価強度モデルの考え方を適用すると、ケーブルボルトによる先行補強によって、補強しない場合に比べて地山等級を上げて考えたり、あるいは、支保パターンを軽くすることができるのではないかとと思われる。

参考文献

- 1) 清水 他. トンネルと地下, vol.28, p.43, No.4, 1997.
- 2) 清水 他. トンネル工学研究論文報告集, 7, p.111, 1997.
- 3) 清水 他. 第10回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, p.539, 1998.

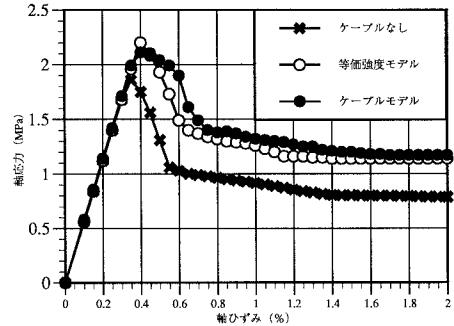
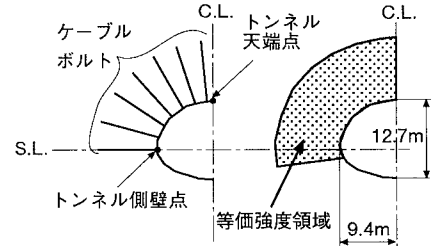


図-4 軸ひずみと軸応力の関係（ケーブルボルト9本）



(a) ケーブルボルトモデル (b) 等価強度モデル

図-5 トンネル断面モデル図

表-3 改善された物性値

	ピーク時	残留時
粘着力 (MPa)	0.52	0.34
内部摩擦角 (°)	34	27

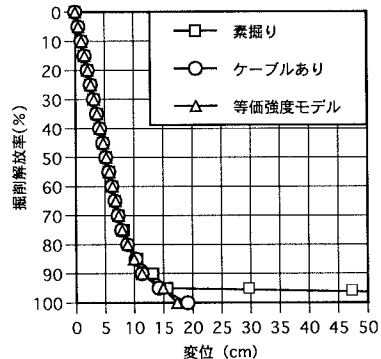


図-6 地山特性曲線（天端）

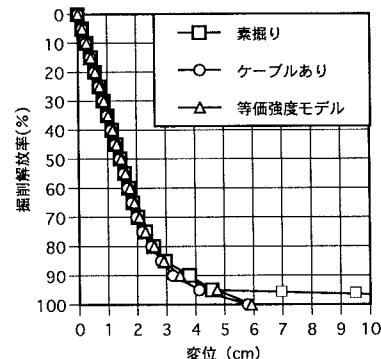


図-7 地山特性曲線（トンネル側壁点）