

軟岩におけるケーブルボルトの効果に関する数値シミュレーション

山口大学 学○武田智治 山口大学 正 寺戸秀和
山口大学 正 清水則一 山口大学 正 中川浩二

1. はじめに

現在わが国ではトンネルの超大断面化が進み、それに対応して地山を事前補強するための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（1）限られた空間からの長尺施工が可能、（2）降伏時の伸びが鉄筋ボルトに比べて大きいなどの特徴があり、特に大断面トンネル掘削時に施工する先行トンネル内からの地山補強工法に効果があるのではと期待されている。しかしながらケーブルボルト工法は、硬岩地山が主である諸外国での施工実績はあるものの、平均的に剛性、強度ともに低い日本の地山での施工例はほとんどなく、参考にする資料も少ない¹⁾。

そこで本研究では、軟岩地山に対するケーブルボルトの作用効果を、数値シミュレーションによって検討した。数値解析手法として、有限差分法に基づく解析コード“FLAC”（ITASCA）²⁾を利用した。

2. 一軸圧縮試験の数値シミュレーションによるケーブルボルトの作用効果の検討

解析の手順は想定した供試体（10m×5mの直方体供試体モデル）の上下両面に変位速度 v を等分布載荷して、一軸圧縮試験の数値シミュレーションを行った。また、解析は不連続面を有する硬岩（以下硬岩モデル）、理想弾塑性モデルにおける連続体の軟岩（以下軟岩モデルA）、ひずみ軟化弾塑性モデルにおける連続体の軟岩（以下軟岩モデルB）の3ケースで行った。各ケースの変位速度は硬岩モデル及び軟岩モデルAは $v=5\times10^{-8}$ m/s、軟岩モデルBは $v=6.25\times10^{-6}$ m/sとした。硬岩モデル及び軟岩モデルの供試体モデル図を図1に示す。ケーブルボルトは供試体中に水平に打設し、打設本数は3本、9本の2パターンで供試体中央より打設した。ケーブルボルトの打設間隔は3本の場合は2m、9本の場合は1mとした（図1参照）。ここで、本研究におけるひずみ軟化モデルとは、応力状態がピークに達した後に、ひずみの増加とともに粘着力及び内部摩擦角がそれぞれ低下するモデルのことである（図2参照）。各供試体物性値及びケーブルボルト物性値をそれぞれ表1、表2に示す。表2に示す $kbond$ と $sbond$ はケーブルボルトとグラウトの付着強度を表す指標である³⁾。具体的には、図3²⁾に示すようにケーブルボルトとグラウトをモデル化し、ケーブルボルトに軸方向の力が加わったときのグラウトとのせん断抵抗をバネ（図中①）として考え、その指標を $kbond$ とする。また、ケーブルボルトとグラウトの粘着力をシリンドー（図中②）として考え、その指標を $sbond$ とする。

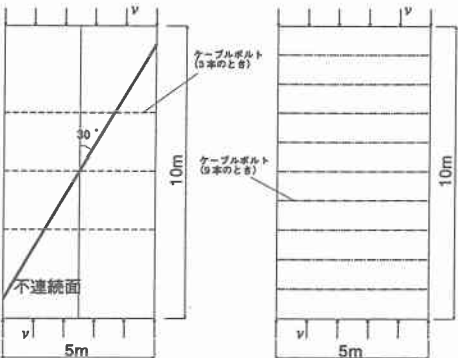


図1：供試体モデル図

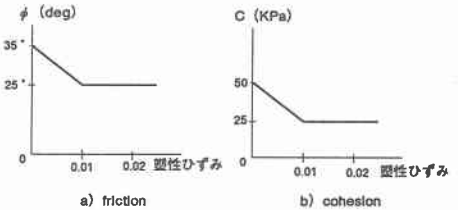


図2：ひずみ軟化モデル

表1：供試体物性値

	硬岩モデル	軟岩モデルA	軟岩モデルB
密度 (kg/m ³)	2000	2200	2200
弾性係数 (MPa)	170.27	490	490
ポアソン比	0.216	0.35	0.35
粘着力 (kPa)	2	50	50
内部摩擦角 (°)	40	35	35

表2：ケーブルボルトの物性値

弾性係数 (GPa)	200
降伏強度 (kN)	1000
$kbond$ (N/m/m)	1×10^{10}
$sbond$ (N/m)	1×10^7
公称径 (mm)	15.2

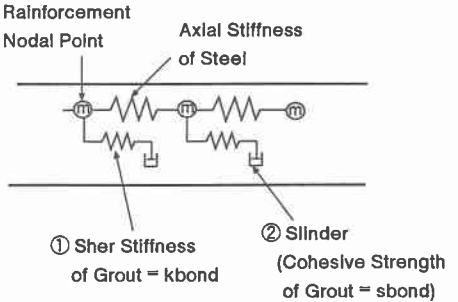


図3：ケーブルボルトとグラウトのモデル図²⁾

3. 解析結果

硬岩モデル、軟岩モデル A、軟岩モデル B の各ケースにおける応力-ひずみ曲線をそれぞれ図 4、図 5、図 6 に示す。硬岩モデル（図 4）においては、応力-ひずみ曲線の降伏点通過後、つまり供試体が不連続面によって滑り始めた直後からケーブルボルトの作用効果が現れ、ひずみの増加に伴い応力が増加している。また、ケーブルボルトを増設するほどその効果は大きく現れ、すべり面の抑止効果は大きくなる。軟岩モデル A（図 5）においても、硬岩モデル同様、供試体降伏直後よりひずみの増加に伴う応力の増加が現れている。しかし、硬岩モデルほどの大きな作用効果は見られず、また、ケーブルボルトの増設による作用効果の違いもほとんど見られなかった。軟岩モデル B（図 6）においては応力-ひずみ曲線の降伏点通過後に急激な応力の減少が見られるが、ケーブルボルトを打設することにより緩和されている。この結果より、軟岩モデル B ではケーブルボルトの作用効果が現れることが示されており、ケーブルボルトを増設することでその効果はより大きく現れることが分かる。

次に、効果を定量的に表すため α 、 β （図 4～6 参照）を用いて効果率 β/α を定義し評価を行う。ここで α はケーブルなしの場合から弾性体へ改良される場合の最大の効果を表すパラメータ、 β は改良効果を表すパラメータである。 $\beta/\alpha=0$ の場合が最もケーブルボルトの効果がないことを示しており、 $\beta/\alpha=1$ は供試体が弾性挙動を示し、ケーブルボルトの作用効果が最大となることを示している。図 7 に、それぞれのモデルの解析結果より得られた効果率を示す。図 7 より、硬岩モデルと軟岩モデル B ではほぼ同様の効果率が得られるが、軟岩モデル A では効果率は他のモデルに比べて低いことが分かる。

次に、ケーブルボルトの作用効果を側圧との関係で考察する。硬岩モデルにおいて、ケーブルボルトを打設した場合に発生した軸力と同じ大きさの圧力を供試体に側圧として作用させる。このときケーブルボルトは導入しない。これはトンネルのボルトの解析において、しばしば、ボルトの効果を壁面に作用する内圧として取り扱うことになったものである。図 8 において、図中○は側圧のみを与えた結果である。降伏応力は元の弾塑性性体の場合より増加するが、その後完全塑性状態となる。一方、ケーブルボルトを導入したケース（図中●）は塑性降伏を示し、供試体の強度は増加する。このことは、ケーブルボルトの効果は側圧のみでは表せないことを示唆しているものと思われる。

4. 結論

以上のことから、軟岩地山に対してもケーブルボルトの作用効果があるという可能性が示された。しかし、地山の力学特性によっては効果のない場合もあり、今後の詳細な検討が必要である。

参考文献

- 1) 清水則一, ピーター K. カイザー, マーク S. ディードリクス, D. ジーン ハッチンソン: 海外におけるケーブルボルトの設計法, トンネルと地下, 1997.4 (掲載予定)
- 2) FLAC ver3.3 マニュアル, ITASCA, 1995.

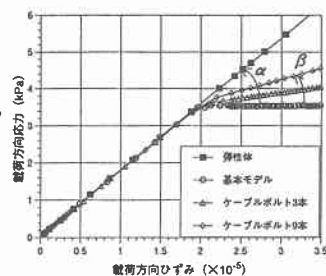


図 4: 応力-ひずみ曲線 (硬岩モデル)

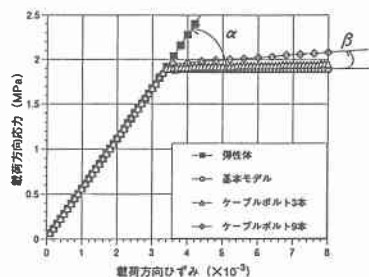


図 5: 応力-ひずみ曲線 (軟岩モデル A)

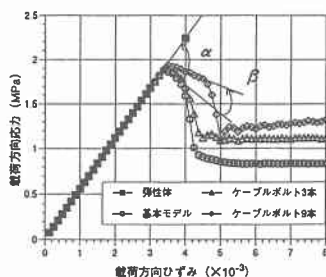


図 6: 応力-ひずみ曲線 (軟岩モデル B)

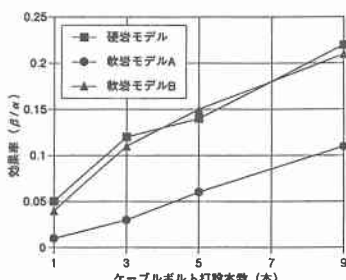


図 7: 効果率による比較

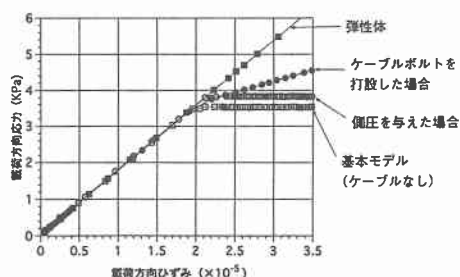


図 8: ケーブルボルトの作用効果の検討