

長尺鏡ボルト工による地山補強効果の簡易評価モデル

前田建設工業（株）正会員 ○宮野前俊一，森田篤，酒井照夫，松井幹雄，梨本裕
 東京大学 正会員 大久保誠介

1. はじめに

小土被りの未固結地山におけるトンネル施工では，切羽前方地山の安定を確保することが重要視されるようになってきている．近年ではGFRP管を1シフトあたり長さ20m程度として切羽前方に打設する，長尺鏡ボルト工が切羽安定対策工として広く採用されている¹⁾．

これまで長尺鏡ボルト工による地山補強効果は経験的には認められているものの，設計段階でどの程度の効果があるかを予測することは困難なものとなっている．また3次元掘削解析による定量的な効果の把握が行われるようになってきている²⁾が，モデル化や解析に時間を要する．

これらを解決する一つの方法として，本報告では軸対称FEMを用いて長尺鏡ボルト工の効果を簡易に評価するモデルを提案する．

2. 長尺鏡ボルト工の作用効果

清水・武田³⁾と同様に一軸圧縮試験の解析を行い，長尺鏡ボルト工の作用効果について検討する．地山はMohr-Coulombの破壊規準に従う弾完全塑性体とし，表-1に示す低強度の粘性土地山の物性を用いる．ボルトは外径76mm，内径60mmのGFRP管（ヤング率20GPa）を想定し，打設密度は表-2のとおりとする．図-1に示すモデル上端に強制変位を与え圧縮を行った結果（地山の軸応力-軸ひずみ関係）を図-2に示す．

図より長尺鏡ボルト工の作用効果は地山の変形を抑制することによる耐力力向上⁴⁾であると考えられる．効果の程度はボルトの剛性や打設密度およびボルトと地山の付着特性に依存すると考えられるが，適切な施工がなされれば，少なくとも地山が弾性的な挙動を示すものとして近似的に取り扱うことができると考えられる．

3. 長尺鏡ボルト工による作用効果の簡易評価モデル

長尺鏡ボルト工を採用するようなトンネルにおいてはショートベンチカット工法や補助ベンチ付全断面工法が採用されることが多く，インバートによる断面閉合が早期に行われる．またインバートの曲率を小さくし，円形に近い断面が採用されることが多い．このような場合には軸対称モデル（図-3）でトンネルの掘削過程を表現できるものと考え，トンネルの掘削幅Dを10.0m，一掘進長を1.0mとして切羽位置zが-50m(z=-5D)から50m(z=5D)まで逐次掘削解析を行う．表-1に示す地山物性を用い，図-4の解析ケースを設定する．ケースIIIが提案する簡易評価モデルであり，長尺鏡ボルト工による切羽前方地山の補強区間のみを弾性体としたものである．ここでは補強区間長Lを0.25D，0.5D，1.0Dの3通りに設定する．初期応力は静水圧的に0.55MPaが作用しているものとする．

表-1 地山物性

ヤング率 E (MPa)	10
ポアソン比 ν (-)	0.4
内部摩擦角 ϕ ($^{\circ}$)	10
粘着力 C (MPa)	0.08
引張強度 σ_t (MPa)	0.02
単位体積重量 γ (kN/m ³)	22

表-2 長尺鏡ボルトの打設密度

打設本数 (本)	打設密度 (本/m ²)
0	0.0
1	0.1
3	0.3
5	0.5
9	0.9

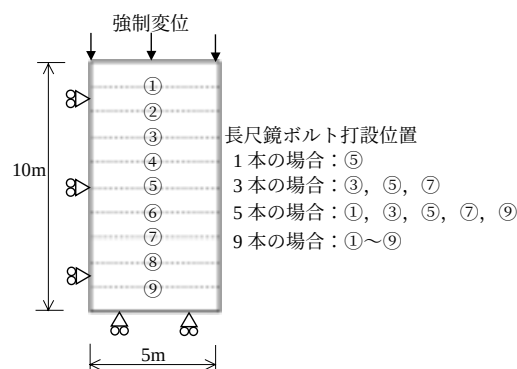


図-1 圧縮試験解析モデル

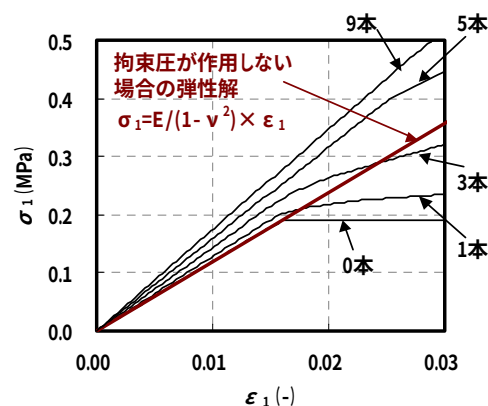


図-2 地山の軸応力-軸ひずみ関係

キーワード 長尺鏡ボルト工，軸対称FEM

連絡先 〒179-8903 東京都練馬区高松5-8J.CITY 前田建設工業（株）土木技術部 TEL03-5372-4759

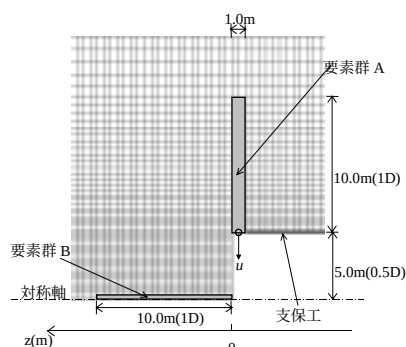
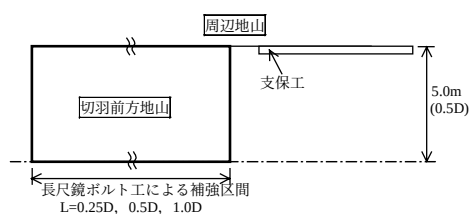


図-3 軸対称モデル



ケース	周辺地山	切羽前方地山
I		弾性体
II		弾塑性体
III (提案モデル)	弾塑性体	補強区間 L は弾性体, 他は弾塑性体

図-4 解析ケース

支保工は厚さ 0.25m の吹付けコンクリート（ヤング率 3.4GPa, ポアソン比 0.2）および鋼製支保工（ヤング率 210GPa, H-200）を想定し,掘削毎に手前 1.0m 部分にシェル要素でモデル化する。

σ_r を要素群 A（図-3）の最も内空側に位置する要素のトンネル半径方向応力（圧縮：正）， u を図-3 に示す節点の内空方向への変位（内空側：正）として得られる σ_r と u の関係を図-5 に示す。ここに□は切羽位置 z が 0m の時点（切羽到達時），■は切羽位置 z が 50m の時点（5D 通過時）での値である。切羽位置 z が 50m の時点での要素群 A（図-3）における最大主応力 σ_1 および最小主応力 σ_3 を図-6 に示す。また切羽位置 z が 0m の時点での要素群 B（図-3）における最大主応力 σ_1 および最小主応力 σ_3 を図-7 に示す。これらの図から，ケース III では切羽前方地山の補強区間のみを弾性体としているにも関わらず，得られる結果は地山全体を弾性体としたケース I に近いことが分かる。すなわち切羽前方地山の安定性がトンネルの安定性に深く関わっており，長尺鏡ボルト工により先行変位や押し出し変位が抑制され，トンネルの安定性が向上すると考えられる。しかしながらケース III の結果から長尺鏡ボルトの打設長やラップ長が十分でない場合には効果が期待できないことが分かる。

長尺鏡ボルト工を採用したトンネル⁵⁾における計測天端沈下量（地中沈下計による）とケース III（補強区間長 $L=0.5D$ ）の結果を比較したものが図-8 である。計測トンネルの各種条件はケース III と同様であり，長尺鏡ボルトの打設長は 21m（約 2.0D），ラップ長は 6m（約 0.5D）である。図からケース III の結果は実用的な範囲で天端沈下量の計測結果を表現できており，簡易評価モデルとして使用に耐えうることが分かる。

4. おわりに

本報告では長尺鏡ボルト工による補強効果を軸対称 FEM において切羽前方地山の補強区間のみを弾性体とすることにより表現する簡易評価モデルを提案するとともに，現場計測結果と比較しその実用性を明らかにした。軸対称 FEM を用いていることから適用範囲は限定されるものの長尺鏡ボルト工によりどの程度の効果が得られるかを簡易に評価できる。

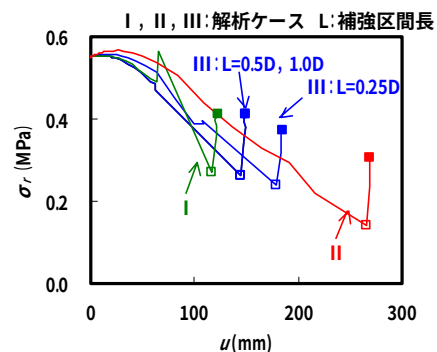
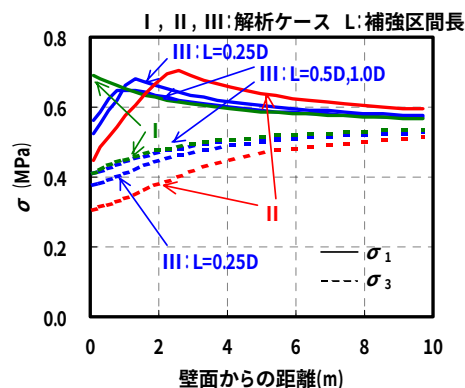
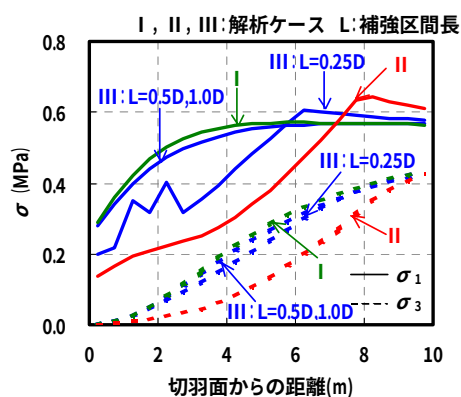
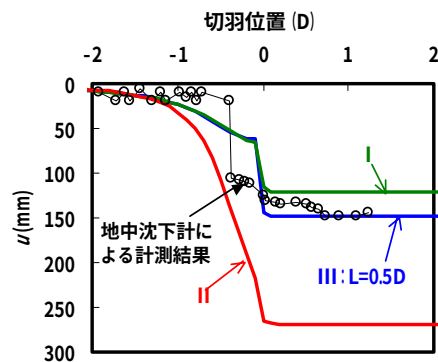
図-5 σ_r と u の関係図-6 要素群 A の応力状態
(切羽位置 $z=50m$)図-7 要素群 B の応力状態
(切羽位置 $z=0m$)

図-8 計測天端沈下量との比較

参考文献: 1) ジェオフロンテ研究会: ケーブルボルトに関する調査報告書—長尺鏡ボルトの施工実態調査結果とその分析—, 1998. 2) 例えば宮野前他: トンネル工学報告集, 第 14 巻, 2004. 3) 清水・武田: トンネル工学研究論文・報告集, 第 7 巻, 1997. 4) 土屋: ロックボルト・吹付けコンクリート工法の設計に関する研究, 1986. 5) 佐藤他: トンネルと地下, 第 34 巻, 8 号, 2003.