

3次元数値解析による鏡ボルト工法のトンネル切羽安定性の評価

ライト工業（株） 正会員 ○中野慶彦
 山口大学大学院 学生会員 今井政孝
 山口大学大学院 学生会員 千々和辰訓
 山口大学大学院 正会員 進士正人

1. はじめに

近年、トンネル断面の大断面化などにより、山岳トンネル工法における切羽安定性の確保が重要となっている。その中でも全断面掘削に対応でき、なおかつ経済性および安全性の高い新たな切羽安定化対策の方法が求められている。特に、鏡ボルト工法や球面切羽は、北陸自動車道 山王トンネルなどで施工され、一部、その支保効果が検証されている。そこで、本研究では、三次元数値解析を用い、切羽の自立が困難になると想定される砂質土系地山に対して、補助工法として鏡ボルト工法を用いた場合の、ボルトの打設長、切羽形状の違いによる切羽補強効果を比較する。そして、ボルト打設仕様の違いによる切羽補強効果を切羽の押出し量の差として定量的に判断することを目的とする。

2. 解析条件

2-1 地山のモデル化

本研究で用いた地山モデルを図-1に、各解析物性値を表-1に示す。表-1に示すとおり、地山モデルは旧日本道路公団が設定した地山等級DⅡの物性値を基本とし、Mohr-Coulombの破壊基準に従う弾塑性体とした。その上で、粘着力を低下させ砂質土系地山を表現した。土被りは100mを想定し、地山モデルに上載荷重を加え、静水圧状態とした。トンネル断面は、二車線高速道路トンネルの標準断面をモデル化した。掘削手順は、重力解析の後、境界から検討断面までの距離4D（D:トンネル掘削径10m）を一括掘削し、早期閉合という意味合いをかねて直後に切羽1m手前までインバートを含めた支保工を設置した。

2-2 鏡ボルト工法のモデル化

鏡ボルトの物性値を表-2に示す。ボルトには掘削時に撤去可能なGFRPボルト（φ76mm）を用いた。鏡ボルトのモデル化については、ボルト自体の破断、注入材の付着切れ等を考慮せず、ボルトと注入材が地山と密着した状態を表現するため、線形弾性体挙動のBeam要素としモデル化した。なお、部材と注入材はその剛性を合成し、一体部材としてモデル化した。打設仕様については図-2に示すとおり、半断面に1.5m間隔で14本を格子状に配置した。

3. 解析の整理

3-1 打設長の違いによる切羽安定効果への影響

直立切羽ケースにおける打設長の違いによるトンネルセンター上の切羽押出し量の比較を図-4に示す。打設長は1m～9mまで9パターンについて解析を行った。押出し量の測定箇所は図-3に示すとおり切羽水平押出し量と切羽面の天端沈下（本文では「天端沈下量」）である。図-4から打設長が長くなるにつれ押出し量抑制効果が高くなることがわかる。しかし、打設長6m以上では押出し量はほぼ一定となることがわかる。

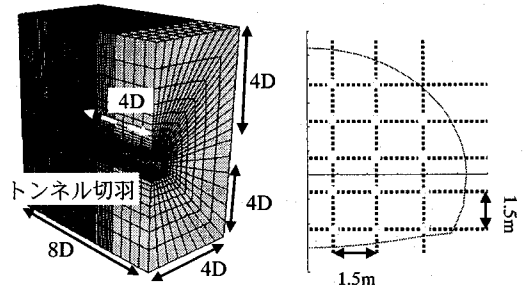


図-1 地山モデル

図-2 鏡ボルト配置図

表-1 各解析物性値

	密度 ρ (N/m ³)	弾性係数 E (Mpa)	ポアソン比 ν	粘着力 C (Mpa)	内部摩擦角 ϕ (°)
地山	210	150	0.35	0.015	30
合成支保工	251	8,134	0.2		
インバート	240	22,000	0.2		

表-2 鏡ボルト物性値

	密度 ρ (N/m ³)	弾性係数 E (Mpa)	断面積 (m ²)	断面二次モーメント (m ⁴)
GFRPボルト	175	20,000	1.71×10^{-3}	1.00×10^{-6}

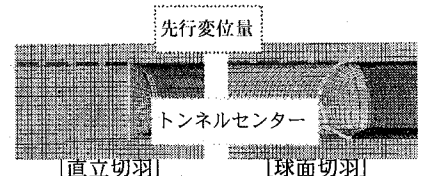


図-3 測定箇所

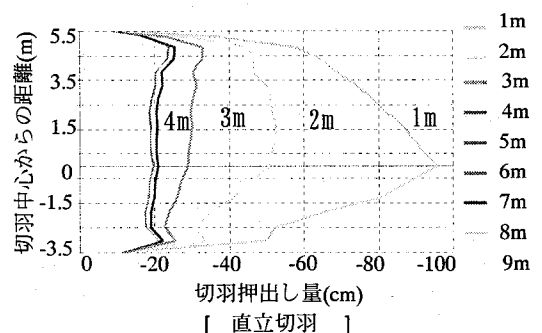


図-4 ボルトの打設長の違いが与える影響

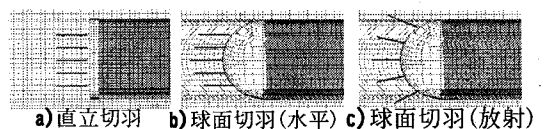


図-5 打設形状

3-2 切羽形状が及ぼす切羽安定効果への影響

図-5に本研究で検討した直立切羽、球面切羽それぞれにおける鏡ボルトの打設形状を示す。球面切羽は大型施工機械による高速掘削によって、切羽面そのものに曲率を持たせドーム状に掘削することで、切羽面そのもののアーチ効果を期待するものである。

しかし、図-6に切羽周辺地山の等変位分布図を示す。球面切羽では天端部に変位が集中している。これは、直立切羽では切羽前方の地山自身が三次元的に天端部地山を支保する役割を果たしている一方、球面切羽ではその支保効果が望めないためと考えられる。次に、打設長6mの時の切羽形状の違いによるトンネルセンターの切羽押し出し量の比較を図-7に示す。図から最も押し出し量を抑制しているのは直立切羽であることがわかる。これは、先にも述べた、切羽自身による変位抑制効果が低いと思われる。よって、球面切羽では鏡吹付けなどの補助工法の採用や切羽の形状等を再検討が必要であると言える。また、球面切羽における打設方向の違いによる比較では、ボルトを放射状に打設した方が水平打設に比べ、押し出し量を抑制できている。これは、図-6からもわかるように、砂質土系地山では切羽周辺の変位量は切羽上方に発生するため、放射状に打設した方が地山の変形の抑制効果が高いと考えられる。

3-3 適切な鏡ボルト工法の打設条件の検討

前章で解析を行った打設長6m、ボルトの全打設長84mを固定し打設条件(間隔、長さ)を変更した。表-3にその条件を示す。図-8に打設条件の違いによる各変位量の最大値を比較する。図からわかるように、球面切羽(放射)では、条件2の結果が最も変位が大きくなる。逆に、条件3のように、短いボルトでも、打設本数を増加した方が先行変位量の抑制効果が高いことがわかる。

3-4 鋼管膨張型ロックボルトによる施工

鋼管膨張型ロックボルトの特徴は、地山に打設直後からボルトの地山補強効果が発揮されることである。そこで本研究で用いたBeam要素の定着力のみに着目し、定着力の違いを弾性係数の変化で表現し、すなわち、鏡ボルト性値の弾性係数 $2 \times 10^4 \text{MPa}$ を基準とし、 $2 \times 10^5 \text{MPa}$ 、 $2 \times 10^6 \text{MPa}$ と比較した。図-9に結果の1例として打設長6mのときの球面切羽(放射)のトンネルセンターの切羽押し出し量を示す。弾性係数の増加とともに切羽押し出し量が抑制しているが、押し出し量の抑制率は弾性係数と比例せず、弾性係数の向上のみで鋼管膨張型ロックボルトの支保メカニズムを表現することはむずかしいことが分かる。

4. まとめ

本研究で得られた知見を以下に述べる

- ・ 鏡ボルト工法を採用した際、球面切羽よりも直立切羽の方が切羽安定効果は高い。
- ・ ボルトの打設長が増加すると、変位抑制効果は高くなるが、打設長6m以上では変位抑制効果は変化しない。
- ・ 球面切羽を想定する場合、上半の打設本数の増加により先行変位の抑制がある程度可能になる。

参考文献

- 1) 田名瀬寛之, 芹川博, 山本宏司, 菅正: 軟岩トンネルのTWSによる施工, トンネルと地下 第29巻11号 pp.15~23 1998.11
- 2) 平田亮: 地山条件の違いによる補助工法の地山補強効果に関する数値解析的評価, 山口大学, 修士論文, 2005
- 3) 道廣一利, 吉岡尚也: 鏡止めボルトの作用効果を三次元FEMで解析, トンネルと地下 第33巻6号 pp.43~48 2002.6

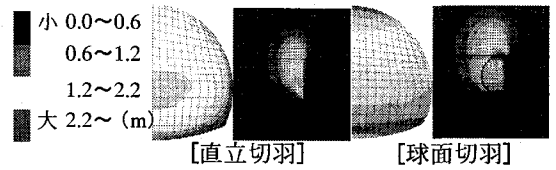


図-6 切羽周辺地山の挙動(変位量分布)

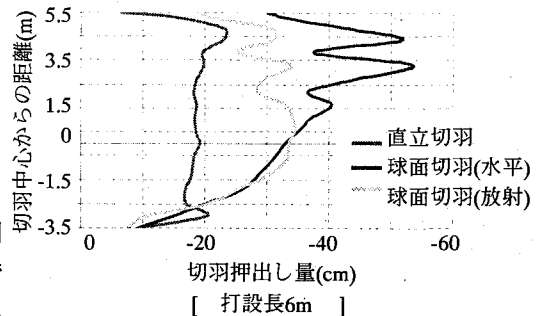


図-7 切羽形状の違いが与える影響

表-3 打設条件

	打設本数		打設長	
	上半	下半	上半	下半
条件1	8本(1.5m間隔)	6本	6m	6m
条件2	8本(1.5m間隔)	6本	8.25m	3m
条件3	26本(1.0m間隔)	6本	2.62m	2.62m

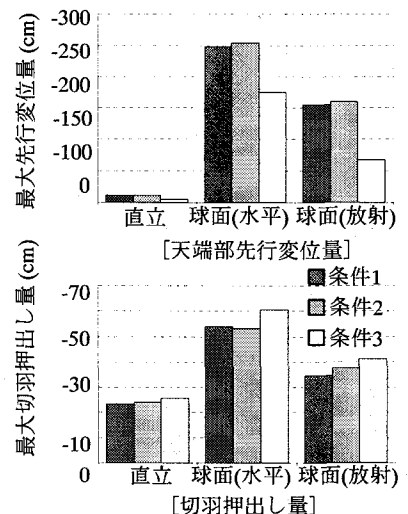


図-8 打設条件の違いが与える影響

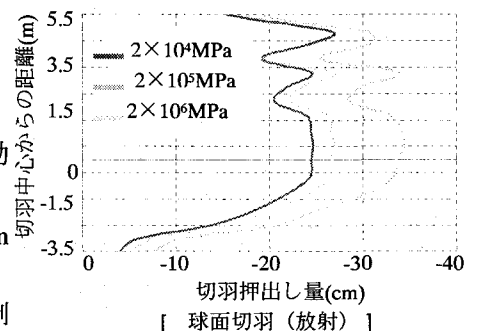


図-9 弾性係数の違いが与える影響