トンネル施工における鏡止めボルト・核残し工法の切羽安定効果の検討

近畿大学大学院　学生会員　○大前　幸寛
近畿大学　正会員　久武　勝保
近畿大学　正会員　大野　司郎
近畿大学大学院　片山　達章

１．目的

低土被りでのトンネル掘削は，従来シールド工法が主に採用されてきたが，近年のトンネル施工技術の向上により，経済面で有利な NATM 工法の採用が多くなりつつある．その場合，地上部への影響の軽減対策，切羽安定対策等が大きな課題であり，地上条件や地質条件に応じて地山補強等の様々な補助工法が，選択，採用されている．そのような中，補助工法の一つである鏡止めボルトは，地山不良箇所における切羽安定工法として有用とされている．鏡止めボルトを必要とするような地山でのトンネル安定性の検討では，切羽近傍での三次元的な挙動の把握が重要であり，これまで，室内実験，現場計測，数値解析によって挙動把握が行われてきた．しかし，鏡止めボルトの長さと切羽安定性の関係や，同様に切羽安定対策として期待されている核残し工法との比較などはあまり行われていない状況である．そこで本研究では，切羽安定対策として鏡止めボルト及び核残し工法に着目し，トンネル掘削による地盤変位と塑性状況の把握を FEM 解析により行い，切羽安定効果との関係について検討する．

２．解析概要

２．１　解析モデル

核残し工法及び鏡止めボルトの切羽安定効果を検討するために, 鏡止めボルトの導入, 未導入の場合, 及び核残し工法の場合について, 掘削解析結果を比較する．解析に用いるモデル地盤規模を**図１**に, 鏡止めボルトの打設ポイントを**図２**に示す．トンネルは半径 6m の半円形とし，土被りは 7m とした．核残し工法に用いる核は横 6m 高さ 4m の半楕円形である．鏡止めボルトは切羽断面に対し 1.5m^2 に一本の割合で 37 本打設した．また，解析に用いた鏡止めボルトは GFRP 管(外径 76mm，内径 60mm，L=15.0m)とした．なお,支保部材は用いていない. 解析物性値について, 地盤は弾性係数 50MPa, ポアソン比 0.42，単位体積重量 20.0kN/m^3，粘着力 40kPa，内部摩擦角 30 ° とし Mohr-Coulomb の降伏基準に従う完全弾塑性体とした．鏡止めボルトは弾性係数 20GPa，ポアソン比 0.3，単位体積重量 17.5kN/m^3, 断面積 1.17×10^{-3}m^2, 断面二次モーメント 1.00×10^{-6}m^4 として入力した.

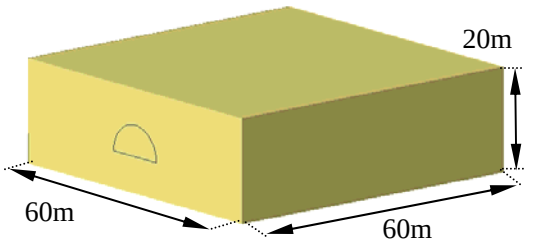

図１　解析モデル地盤

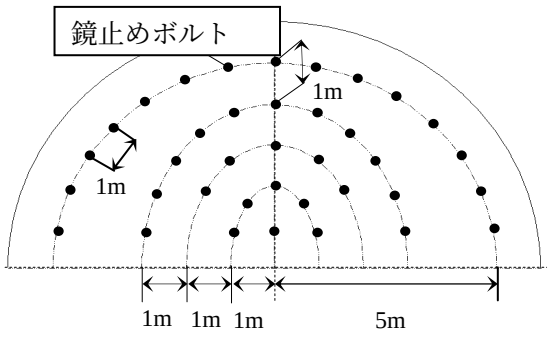

図２　打設ポイント

２．２　解析手順

次の三種類の掘削パターンを設定した．すなわち，（１）トンネル全断面掘削解析，（２）鏡止めボルトを坑口から 15m 打設したトンネル全断面掘削解析，（３）核残し工法を用いたトンネル掘削解析である. なお, 全て一間掘削長 1m とし計 15m 掘削するものであり，（３）は核を残すようにリンクガットで 15m 掘削した後，残された核を取り除く条件とした.

キーワード　三次元 FEM 解析，NATM，鏡止めボルト，核残し工法
連絡先　〒557-8502　大阪府東大阪市小若江 3-4-1　近畿大学　TEL：06-6721-2332(代)

３．解析結果

３．１　トンネル天端沈下量

３パターンの施工法を用いた場合の切羽前方および後方の天端沈下量を**図３**に示す.鏡止めボルトがある場合及び核が残されている場合には,切羽前方及び後方においてトンネル天端沈下量が抑制されていることがわかる.切羽直上の天端沈下量は鏡止めボルトなしの場合に比べ,鏡止めボルトがある場合で 19%,核がある場合で 15%沈下を抑制している.また,鏡止めボルトありの場合と,核残し工法の場合の天端沈下量はほぼ同じ傾向を示している．これは，鏡止めボルトが切羽の内側から地盤の変位を抑制するものに対し，核残し工法は切羽の外側から地盤変位を抑制するものであると推測される.

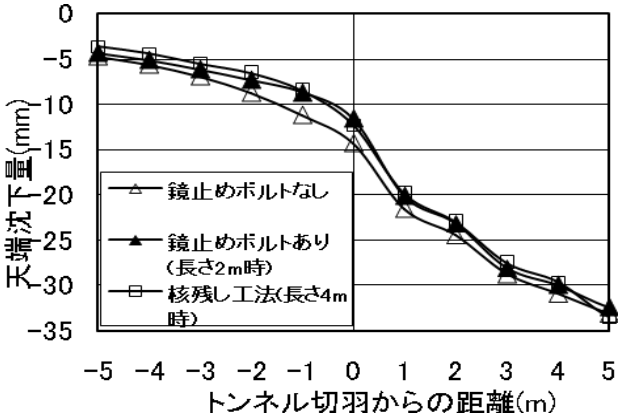

図３　トンネル天端沈下量の比較

３．２　切羽塑性率

鏡止めボルト及び核残し工法と切羽安定効果の関係を検討するために一間掘削する毎の切羽周辺地盤の塑性率を式(１)のように定義し，比較した結果を**図４**，**図５**に示す．まず，鏡止めボルトの効果について示したものが**図４**である.鏡止めボルトなしの場合，掘削毎の塑性率はほぼ一定で約 45～48%であり，鏡止めボルトを打設している場合は，坑口から 13m 地点を掘削するまで塑性率が 35%程度抑制されていることがわかる．また，13m 地点より掘削が進むと塑性率が大きくなっていることから,鏡止めボルトの効果を維持するためには 2m 以上残す必要があることがわかる．次に，核残し工法の効果について示したものが**図５**である.**図４**の鏡止めボルトがない場合と比べ,核の長さが 4m 以上保たれている場合の塑性率は 25%程度抑制されており，核の長さが 4m より短くなると塑性率は大きくなっていることがわかる.このことから,核の長さを 4m 以上長くしても塑性率を低下させる効果は期待できない．なお，核の高さを変えて，同様の解析を行ったところ,核の高さより核を長く残しても効果的ではないことも明らかとなった.

$$\text{塑性率} = \frac{\left(\begin{array}{c}\text{トンネル延長上の切羽前方}\\ \text{3m内で塑性化した要素数}\end{array}\right)}{\left(\begin{array}{c}\text{トンネル延長上の切羽前方}\\ \text{3m内の要素数}\end{array}\right)} \times 100\ (\%) \qquad (1)$$

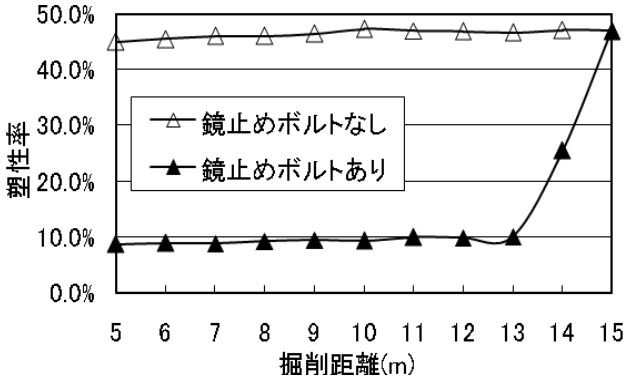

図４　全断面掘削での掘削進行に伴う塑性率の変化

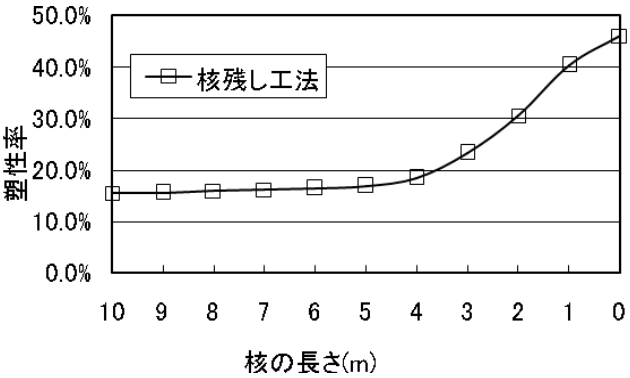

図５　核の長さを削っていく場合の塑性率の変化

４．結論

本解析条件で得られた知見を以下にまとめる.

- 鏡止めボルトには切羽周辺のトンネル天端沈下量を抑制する効果がある．また，切羽前方の塑性率を 35%程度抑制する効果がある．また，その効果を維持するためには，鏡止めボルトの長さを 2m 以上保つ必要がある.
- 核残し工法は，鏡止めボルト同様に切羽周辺のトンネル天端沈下量を抑制する効果がある．また，切羽前方の塑率を 25%程度抑制する効果がある.また,核を残す長さを,その核の高さより長くしても効果は高まらない.
- 鏡止めボルトと核残し工法が切羽周辺地盤に及ぼす変位の抑制効果はほぼ等しい.

参考文献

久武，大野，片山，大前：トンネル核残し工法の変位抑止・切羽安定効果の遠心模型実験，トンネル工学論文集，第 17 巻，pp1-8，2007．11