

# 鏡ボルトの配置パターンが切羽崩壊機構に及ぼす影響

熊本大学大学院(日本学術振興会特別研究員) 学生会員 高野 大樹  
 熊本大学 正会員 大谷 順  
 熊本大学 学生会員 福重 庄太郎  
 鹿島建設 正会員 永谷 英基

## 1. はじめに

近年、都市部においても NATM などの山岳トンネル工法によるトンネルの構築が数多く見られるようになった。輻湊化が進む都市部においては既設構造物との近接施工も数多く見られ、切羽面の安定性を保つことは重要な課題と言える。低土被り、未固結地山など地盤条件が悪い場合は、安全なトンネル構築を行うために切羽面を補助工法により補強して掘削することがしばしば行われる。しかし、こうした補助工法の地山補強効果について定量的に評価した事例は少なく、その補強メカニズムには未解明な部分が多く残されている。

著者らはこれまでに、トンネル切羽の三次元的な崩壊メカニズムの解明を目的に産業用 X 線 CT スキャナに搭載可能で大規模な崩壊まで再現可能なトンネル引抜き実験装置を開発し、トンネル切羽崩壊時における崩壊領域の三次元的な可視化による分析を行い、切羽前方に生じるすべり面や緩み領域の定量的な評価を試みている<sup>1), 2)</sup>。これらの研究で先受け工と鏡ボルトの効果について検討を行い、切羽前方地山を補強する際、鏡ボルトにより高い補強効果が期待できることを確認した。そこで、今回の報告では、鏡ボルトを対象とし、その配置パターンが切羽崩壊機構に及ぼす影響について同様の実験手法を用いて考察を行った。

## 2. 実験概要

Figure 1 に本研究で用いたトンネル引抜き実験装置、Figure 2 に実験手順を示す。実験は模型地盤作成後、引抜き実験装置によりトンネル模型の引抜き実験を行い、その後土槽を CT スキャンし、模型地盤内部の状況を観察した。CT 撮影は、トンネル模型底部から 1mm 間隔で地表面まで行った。模型地盤は乾燥状態の豊浦砂を使用し、空中落下法により相対密度約 80% となるよう作成した。なお、本研究ではトンネル引抜き部の直径 20mm を 1D とし、土被り 2D の模型について実験を行っている。また、トンネル引抜き量は、崩壊領域が地表面に至らない局所的な破壊を想定し、切羽高さの 1/10 となる 0.1D(2mm)とした。Table 1 は今回実施した実験ケースを示している。今回の報告ではボルトの配置パターンに着目し、実験ケースを想定した。各ケースにおける鏡ボルトの打設パターンを Figure 3 に示す。なお、補助工法を適用しない無対策のケースを CASE 1 に設けている。鏡ボルトには長さ 10mm、直径 0.5mm のアルミ棒を、模型地盤を作成する段階で所定の位置に順次設置した。

## 3. 実験結果及び考察

Figure 4 に CT 撮影により得られたそれぞれのケースの水平断面画像を示す。CT 画像は、CT 値と呼ばれる密度に比例した数値によるデジタル画像であり、CT 値の高い領域(高密度領域)は白色、CT 値の低い領域(低密度領域)は黒色、また 256 階調の白黒濃淡レベルで表示される。全ケースにおいてトンネル切羽前方に低密度領域が確認でき、この領域が崩壊領域であると考えられる。CASE 1 ではトンネル切羽前方に半楕円状の崩壊領域が確認できる。鏡ボルトを適用した CASE 2~CASE 4 を見てみると、ボルトを密に打設した CASE 4 では切羽前方の崩壊領域は縮小されているのが確認できるが、CASE 2, 3 では CASE 1(無対策)と顕著な違いは観察できない。

これらそれぞれのケースの画像データを 3 次元的に再構築し、トンネル中心でスライスした画像を Figure 5 に示す。CASE 1 においては、切羽底面からすべり線が曲線を描きながら切羽前方に広がり、切羽上方においてアーチング効果によって閉じた領域を形成している。CASE 1 でのトンネル天端部での崩壊領域の幅は 0.5D であったのに対し、CASE 2 では 0.45D、CASE 3 では 0.4D と徐々に縮小し、CASE 4 では 0.2D とかなりの効果が発揮されていることが確認できる。Figure 6 は崩壊領域のみを特徴抽出した 3 次元画像を示し、Table 2 は切羽前面部における崩壊領域の体積を示している。この結果からも、ボルトの間隔を小さくすることにより崩壊領域の体積が減少する傾向にあるといえる。

## 4. まとめ

今回の実験では鏡ボルトの打設パターンについてトンネル引抜き実験を行い、X 線 CT 法により地盤内部の崩壊領域を可視化し、その効果について検討した。その結果、鏡ボルトの打設ピッチを小さくすることにより切羽前方に広がる崩壊領域のすべり幅が小さくなり、これにより切羽の安定性が確保されることが確認できた。今後は、要素試験装置を開発し、より詳細なボルト材と地盤との相互作用現象を解明するとともに、遠心模型実験による実規模応力レベルでの実験を行い、その適用性について定量的な評価を試みる。また、新たな補助工法の設計法について提案する所存である。

### 【参考文献】

- 1) 永谷ら 「トンネル切羽の三次元崩壊メカニズムの可視化」 応用力学論文集 Vol. 7, pp. 553-560, 2004.
- 2) 高野ら 「補助工法が切りは崩壊機構に及ぼす影響」 土木学会西部支部研究発表会講演概要集 pp. 537-538, 2005.

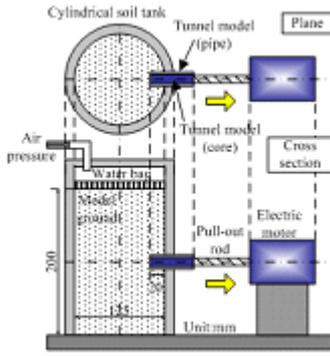


Fig. 1 Tunnel pull-out model test system.

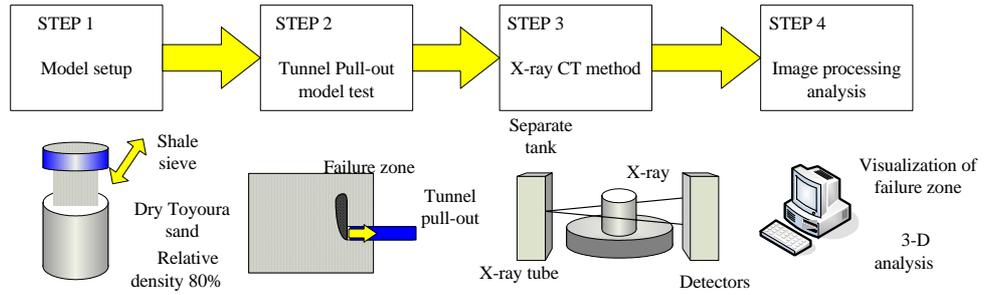


Fig. 2 Experimental procedure.

Table 1. Test cases.

Test case	Overburden ratio	Pull-out length	Relative density	Arrangement of auxiliary method
		mm	%	
CASE 1	2D*	2	80	-
CASE 2	2D*	2	80	Loose
CASE 3	2D*	2	80	Middle
CASE 4	2D*	2	80	Dense

(\*) 1D: Diameter of tunnel 20mm

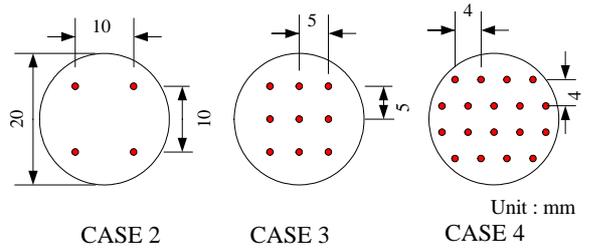


Figure 3. Arrangement of bolts.

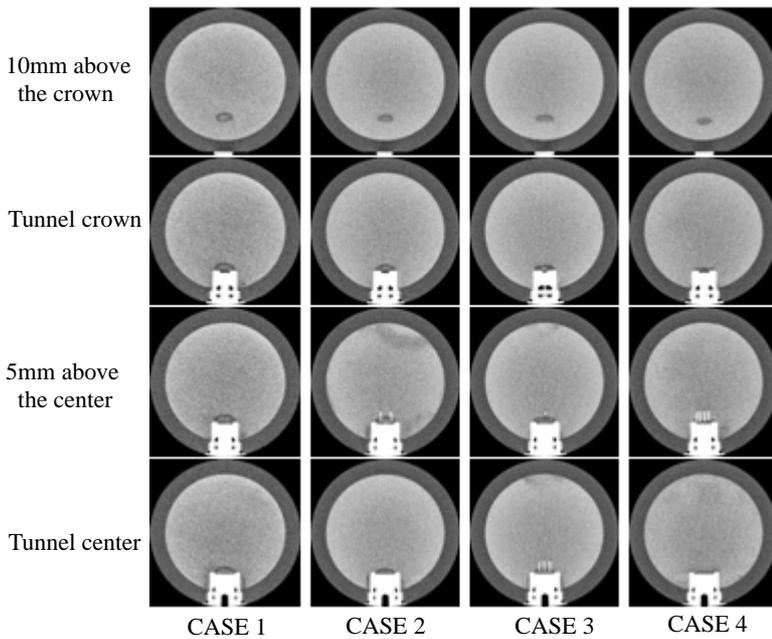


Fig. 4 Cross sectional images.

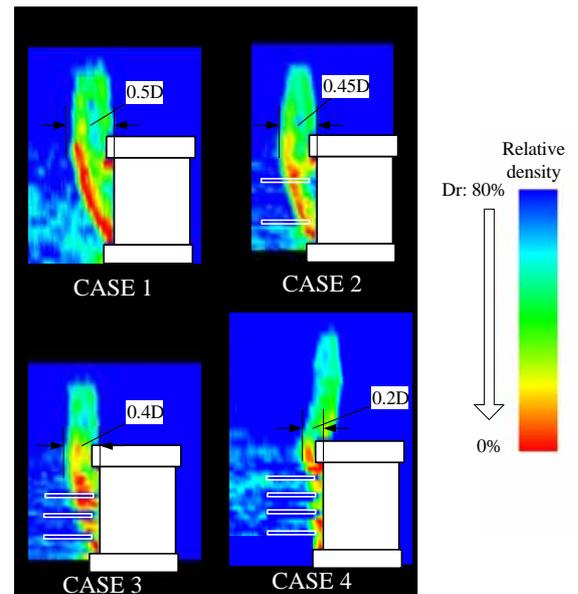


Fig. 5 Vertical cross sectional images from tunnel side.

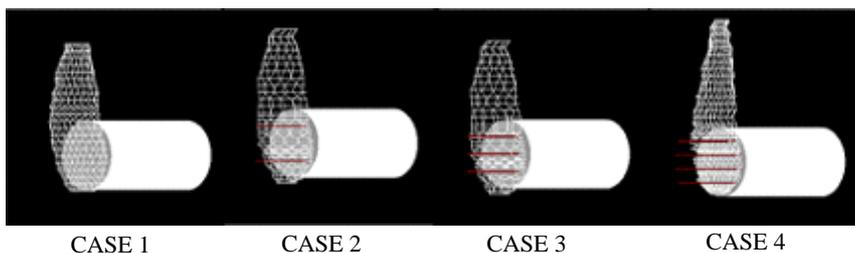


Fig. 6 3-D X-ray CT images of failure zone.

Table 2. Volume of failure zone.

	CASE 1	CASE 2	CASE 3	CASE 4
Volume of failure zone(mm <sup>3</sup> )	2524	2407	2134	1349