

トンネル切羽の 3 次元崩壊メカニズムの可視化

Visualization of the mechanism of 3-D tunnel face failure

永谷 英基*・大谷 順**・高野 大樹***

Hideki NAGATANI, Jun OTANI, Daiki TAKANO

*正会員 工修 鹿島建設株式会社技術研究所地盤グループ (〒182-0036 東京都調布市飛田給 2-19-1)

**正会員 Ph. D. 熊本大学工学部環境システム工学科教授 (〒860-8555 熊本市黒髪 2-39-1)

***熊本大学大学院自然科学研究科 博士前期課程 (同上)

A number of experimental studies have been done regarding the mechanism of tunnel face failure but most of the studies are based on the observation of failure mechanisms using experimental models in two-dimensional and pseudo-three-dimensional model tests. And three-dimensional behavior of the face failure is not well studied yet. The objective of this paper is to investigate failure mechanism behind a tunnel face quantitatively by using X-ray computed tomography (CT) and to visualize the face failure on a three-dimensional basis through a tunnel pull-out model test. As a result of this study, the development of the failure zone at the time of face failure could be described elaborately. And the quantitative findings include that arching effect occurs when the overburden ratio is more than 2D (two times the outer diameter of the pull-out core) and that the volume of the failure zone behind the face is independent of the overburden ratio.

Key Words: model test, X-ray CT scanner, tunnel face failure, sand

1. 序 論

山岳トンネル工法やシールドトンネル工法掘削時における切羽前方の地山は、掘削時に応力解放されるため、地山の応力バランスを失い、不安定な状態となる。この問題に対し、山岳トンネル工法においては先受け工法や鏡ボルトなどの各種補助工法、シールドトンネル工法においてはチャンパー内の泥水や泥土の高度な切羽圧管理によって、切羽の安定状態を保持しているが、地山の強度変化や地下水位変動等様々な要因によって、切羽の応力バランスが崩れた場合、図-1 に示すように前方あるいは直上にすべり面が生じ、局部的な破壊、あるいは地表面まで到達するような大規模な崩壊に至ることもある。こうした切羽の安定問題に対して、これまでにも実験的研究¹⁾²⁾³⁾⁴⁾⁵⁾は数多くなされているが、その多くが二次元あるいは準三次元モデルを用いた切羽面引抜きによる変位制御実験であり、本来起きている三次元的で圧力の不均衡による崩壊現象については、三次元モデルの切羽面を圧力制御し、X線による鉛標点の変位計測を試みた西岳らの研究⁶⁾のみである。しかしながら、圧力制御実験は微小変位領域を対象とした切羽面の極限支持力の検討

に適しており、大規模な崩壊までは再現していない。また、変位計測に精度的な限界もあったことから、崩壊領域を詳細に分析するには至っていない。

筆者らは、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 スキャナ装置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(変位制御)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⁷⁾。本研究では、土被りや崩壊量(土砂流入量)が崩壊領域に与える影響も考慮することで、大規模崩壊時あるいは局所崩壊時の切羽崩壊メカニズムについて、その崩壊領域の形成過程等に注目し、検討を行うものである。

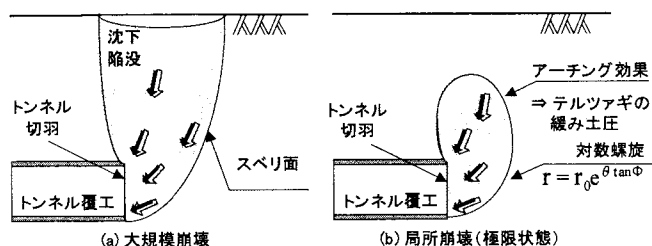


図-1. トンネル切羽崩壊概念

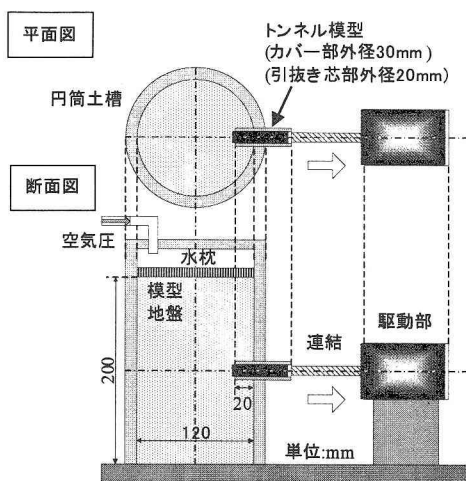


図-2. トンネル引抜き実験装置

2. 実験方法

2.1 トンネル引抜き実験装置

トンネル引抜き実験装置を図-2に示す。外径150mm、内径120mm、高さ300mmの亚克力製円筒土槽にトンネル引抜き模型が付いており、トンネル引抜き模型は外径30mmのカバー部と、外径20mmの引抜き芯部から構成されている。模型地盤は、豊浦乾燥砂（50%粒径243 μ m）を多重ふるい（425 μ mメッシュ+2mmメッシュ $\times$ 3を40mm間隔で設置）を用いて、土槽底面から高さ380mmで空中落下法により相対密度85%、乾燥密度1.57g/cm³となるように作成している。なお、本実験では、引抜き速度を0.1mm/secとした。

2.2 実験手順

実験手順を図-3に示す。まず、円筒土槽内に模型地盤を作成し、引抜き実験装置の所定の位置に設置し、駆動部と結合させた後、引抜き実験を行う。引抜き実験終了後、円筒土槽のみを取り外してX線CTスキャナ装置のターンテーブル上に固定し、X線CT撮影を行う。撮影は2mm間隔で、撮影範囲はモールド底面から地表面まで行っており、撮影した水平断面画像を、2次元あるいは3次元に画像処理を施すことで、切羽崩壊領域の可視化による分析が可能となる。なお、X線CT法によって得られる地盤の密度に対するCT値の相関性は線形関係を有することが確認されている。X線CT法の詳細については参考文献8), 9)を参照されたい。

2.3 実験ケース

実験ケース一覧を表-1に示す。本研究では、まず、切羽が大規模な崩壊に至る直前の極限状態を想定した実験モデルとして、引抜き量をトンネル径の1割の2mmとし、切羽直上においてアーチング効果によって崩壊領域が閉じる土被り比2D（D：トンネル径）を基本ケースとして詳細な分析を行っている。次に、この基本ケース

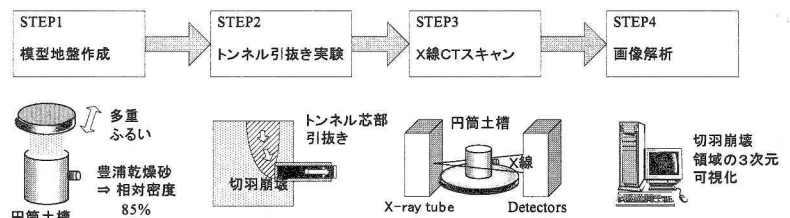


図-3. 実験手順

表-1. 実験ケース一覧

CASE	土被り	引き抜き量	上載圧	備考
	D(*)	mm	kPa	
1	2	2	-	基本ケース
2	1	2	-	土被りが切羽崩壊メカニズムに及ぼす影響
3	4	2	-	
4	2	2	10	
5	2	1	-	崩壊量が切羽崩壊メカニズムに及ぼす影響
6	2	5	-	
7	2	10	-	

・相対密度Dr: 85% ・引き抜き速度: 0.1mm/sec (*)D=20mm

に対し、土被り比を1D、4Dと変えることで土被りが切羽崩壊領域の形成に及ぼす影響について分析を行うとともに、拘束圧の影響に注目し、上載圧10kPaを作用させた実験を実施している。さらに、引抜き量を基本ケースの2mmに対し、1mm、5mm、10mmと変えることで、トンネル内への砂の流入量、すなわち崩壊量が切羽崩壊領域に与える影響についても分析を行った。

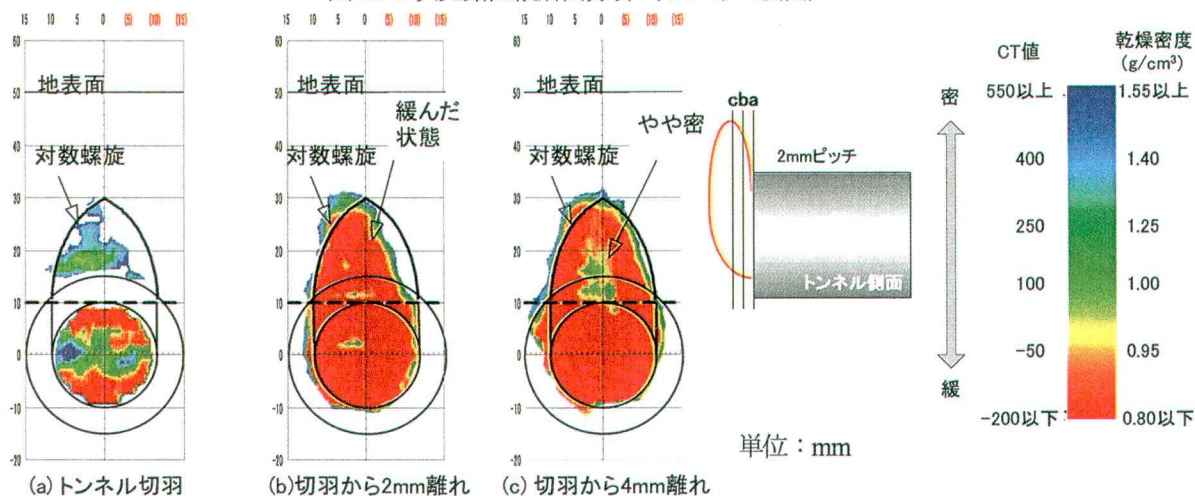
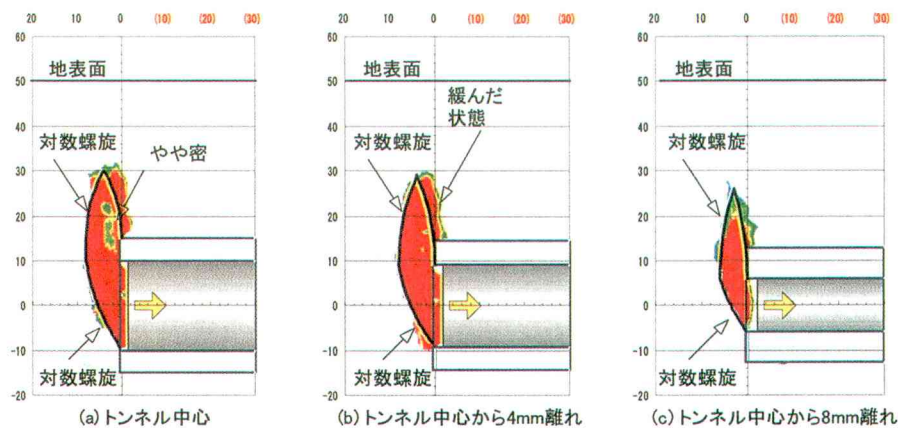
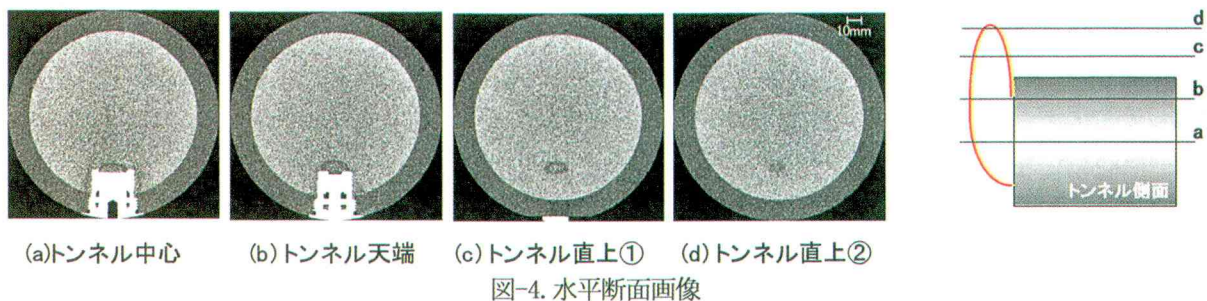
3. 切羽崩壊領域の可視化

3.1 目的と方法

既往の研究¹⁾²⁾³⁾⁴⁾⁵⁾から、切羽崩壊時に前方地盤に生じるすべり面や上方の緩み領域が対数螺旋によって表現できることが示されている。また、引抜き量が切羽高さの十分の一程度であれば、土被り厚1～2D以上で破壊は地表面まで至らずにアーチングによる緩み領域が形成される傾向にある。そこで、本研究では、引抜き量2mm、土被り比2Dを基本ケースとして詳細な切羽崩壊領域の分析を行うことで、崩壊領域の3次元すべり面形状に対する対数螺旋の適用性について検討を行った。

3.2 水平断面画像の観察

図-4にトンネル底面から崩壊領域天端までの水平断面画像を示す。切羽から前方へ半楕円状に低密度領域が形成されており、トンネル底面から天端にかけて徐々に大きくなっている。また、トンネル天端より上方は、概ね楕円形状を呈し、地表面に近づくにつれて、徐々に小さくなり、最終的には低密度領域は消失している。つまり、本実験では、崩壊領域は地表面まで達することなく途中ですり鉢状を逆さにした形状に収束していると考えられる。



3.3 画像処理による崩壊領域の分析

(1) 2次元鉛直縦断面 (トンネル側面)

前述の水平断面画像を3次的に再構成し、トンネル中心から4mmピッチでスライスした鉛直縦断面画像を図-5に示す。いずれの断面も切羽底面からすべり線が発達し、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。この切羽前方の崩壊領域と上方の緩み領域で観察されたすべり線に対し、対数螺旋によってフィッティングした結果、切羽前方へ発達するすべり線はいずれの断面位置でも非常に良く合致するが、上方緩み領域のアーチ頂点付近から切羽背面側にかけては、崩壊領域がつぶれたような広がりを見せる傾向にある。この点については土被り等を変えて比較検討した結果を次節に示すが、本実験のような低拘束圧条件下ではすべ

り面のせん断抵抗が発揮されにくいと、とくにアーチ頂点付近ではアーチング効果が発揮されにくいものと推察される。また、崩壊領域の密度分布に注目すると、領域境界のすべり線に沿って密度は緩くなっているが、内側は比較的に密な状態であることが伺える。

(2) 2次元鉛直横断面 (トンネル正面)

縦断面と同様に3次的に再構成し、トンネル切羽から2mmピッチでトンネル軸方向に切羽崩壊領域をスライスした鉛直横断面画像を図-6に示す。トンネル幅で天端まですべり線は発達し、トンネル天端高さから上方にアーチ状に発達しており、対数螺旋とよく合致する。また、縦断面と同様に、崩壊領域の密度分布に注目すると、崩壊領域の内側には比較的密な状態を保持していることが確認できる。

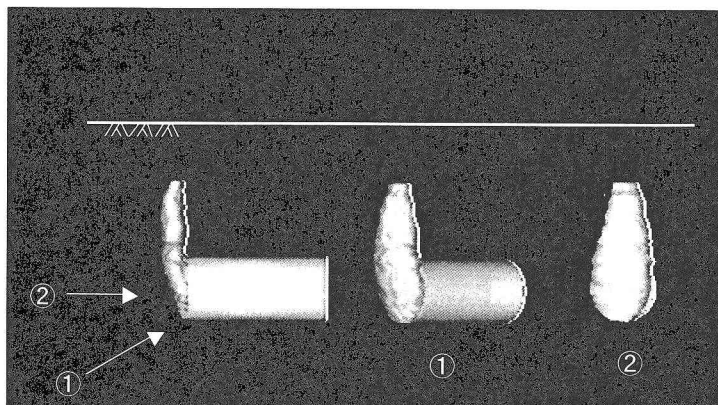


図-7. 3次元崩壊領域画像

(3) 3次元崩壊領域のモデル化

本実験から、地表面まですべり面が到達しない極限状態での切羽崩壊の場合、切羽前方に向かってすべり面が発達し、切羽上方においてはアーチング効果による緩み領域が形成されることを確認することが出来た。図-7 に画像処理により抽出した切羽崩壊領域の3次元画像を示す。以上から、図-8 に示すように切羽崩壊領域の境界となるすべり面は、鉛直方向には対数螺旋、水平方向には楕円によって3次的に崩壊領域のモデル化が可能であると考えられる。ただし、2次元鉛直縦断面の詳細分析で示したように、切羽上方の緩み領域については切羽背面側への緩み領域の拡がりをやや過小に評価する傾向にある。

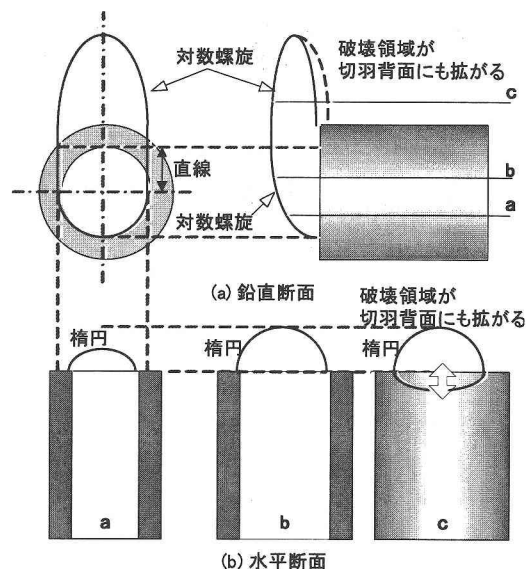


図-8. 崩壊領域モデル化

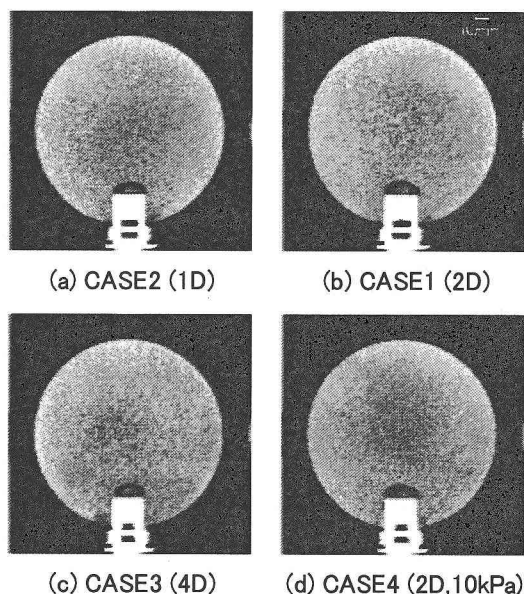


図-9. 水平断面画像（トンネル天端）

4. 土被りが切羽崩壊メカニズムに及ぼす影響

4.1 目的と方法

既往の実験¹⁾²⁾³⁾⁴⁾⁵⁾によると、一般的に引き抜き量が切羽高さの十分の一程度であれば、土被り比1～2D以上で破壊は地表面まで至らずにアーチングによる緩み領域が形成されている。そこで、本実験では、基本ケースと同様に、引き抜き部を2mm引き抜くことで切羽前方地盤を緩ませ、切羽崩壊に至る極限状態について模擬した場合について、土被りが切羽崩壊メカニズムに及ぼす影響について分析した。切羽の直径20mmを1Dとし、CASE1の2Dに対して、CASE2の1D、CASE3の4Dの計3ケースについて比較を行うとともに、CASE4では土被り比2Dで上載圧を10kPa作用させることで、拘束圧が崩壊領域に及ぼす影響についても比較した。

4.2 水平断面画像の観察

切羽直上に生じる緩み領域は、トンネル天端における崩壊領域断面に影響を受ける。そこで、土被り比の違いが及ぼす影響について、図-9 にトンネル天端における

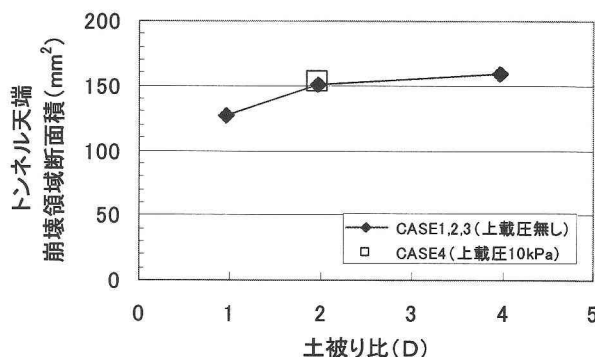


図-10. トンネル天端崩壊領域断面積と土被り比の関係

水平断面画像、図-10 にその面積について比較した。その結果、2Dまでは面積も大きく増加する傾向にあるが、それ以上は、土被りに関係なくほぼ一定を示し、土被り比が2Dと同じであれば上載圧を作用させてもトンネル天端崩壊領域断面に差異は認められないことがわかった。

4.3 画像処理による崩壊領域の分析

(1) 2次元鉛直縦断面（トンネル側面）の比較

図-11 に対数螺旋を重ね合わせた鉛直縦断面画像を示す。CASE 2 は、十分な土被りが無いためにアーチが形成される前に崩壊領域が地表面に達するが、土被り比 2D 以上では、崩壊領域は地中内でアーチ状に収束している。また、全てのケースで切羽前方へのすべり線は、対数螺旋と良く一致するが、トンネル天端部より上方は、上載圧を作用させない CASE1,2,3 では、アーチ頂上付近から切羽背面側にかけてやや異なる。一方、上載圧を作用させた CASE4 では、良く一致することから、拘束圧が増加し、すべり線におけるせん断抵抗力が増したため、アーチング効果が十分に発揮されたものと考えられる。

(2) 2次元鉛直横断面（トンネル正面）の比較

図-12 にトンネル切羽から 2mm 離れた位置での鉛直横断面画像について、対数螺旋と重ねて示す。縦断面と同様に、土被り比 1D の CASE 2 では、アーチが形成さ

れる前に崩壊領域のすべり線が地表面に達し、やや異なるが、土被り比 2D 以上のケースでは、崩壊領域は地表面に達することなく途中でアーチ状に収束し、緩み領域のすべり線は対数螺旋と良く合致している。

(3) 3次元崩壊領域の比較

図-13 において崩壊領域の三次元画像について比較すると、CASE1 から CASE3 は、比較的に近い形状の崩壊領域を形成するが、CASE4 は切羽上方において上載圧の影響でアーチング効果が発揮され、シャープな緩み領域を形成している。この 3 次元崩壊領域画像から体積を算出し、土被り比との関係について図-14 に示す。その結果、CASE2 は地表面まで崩壊領域が到達したため異なるが、2D 以上では崩壊領域の体積にほとんど差異は見られない。つまり、2D 以上あればアーチング効果が発揮され、崩壊領域の形成に土被りは影響しないものと考えられる。なお、CASE1 は CASE4 と比べて形状は異なるが、潰れた形状のため、結果的にほぼ同じ体積を示した。

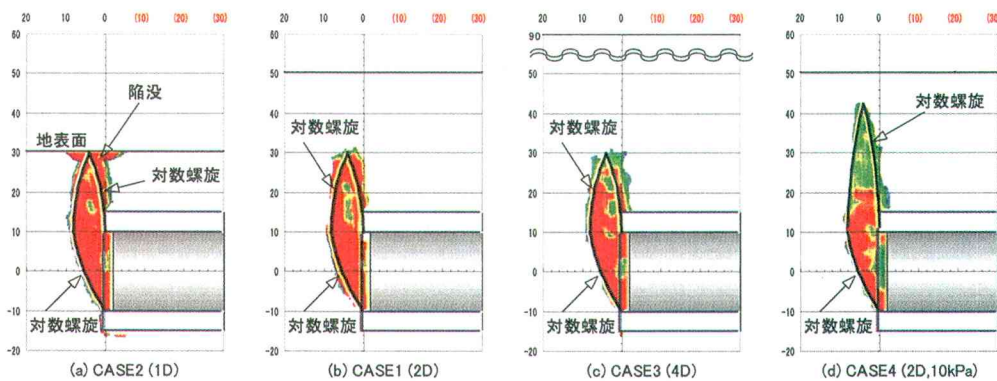


図-11. 2次元鉛直縦断面分析（トンネル中心断面）

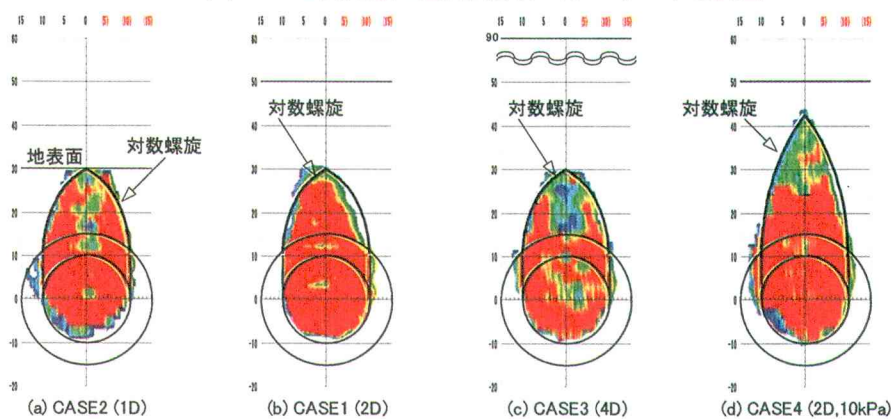


図-12. 2次元鉛直横断面分析（トンネル切羽から 2mm 離れ）

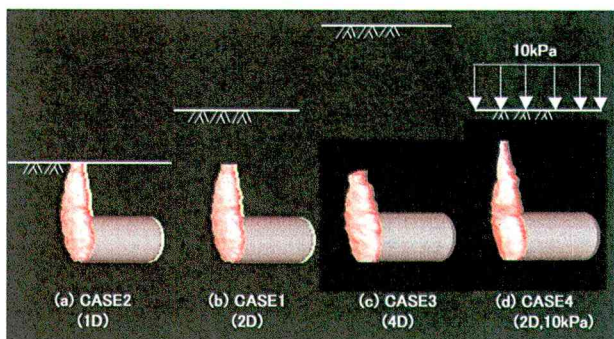


図-13. 3次元崩壊領域画像

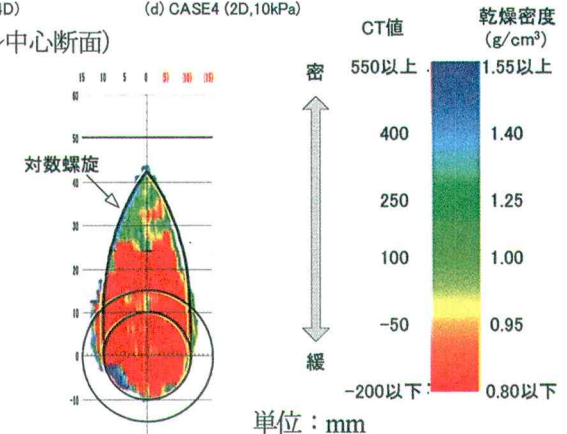


図-14. 崩壊領域体積と土被り比の関係

5. 崩壊量が切羽崩壊メカニズムに及ぼす影響

5.1 目的と方法

土被りの影響について検証した結果、2 D以上の土被り条件下であれば、引抜き量をトンネル直径の1割(2mm)を引抜くことで切羽前方の崩壊領域が概ね形成されることわかった。また、トンネル天端での崩壊領域断面積や切羽上方緩み領域の体積がほぼ一定となることがわかった。しかし、実際は、それ以上に土砂がトンネル坑内に流入することもしばしばであり、その際、どのように切羽崩壊領域が発達するかは不明な点が多い。ここでは土砂流入量、すなわち崩壊量が切羽崩壊メカニズムに及ぼす影響について明らかにするために基本ケースであるCASE1(引抜き量2mm)に対し、土被り比2Dのまま、CASE5(同1mm)、CASE6(同5mm)、CASE7(同10mm)の4ケースについて比較を行う。

5.2 水平断面画像の観察

切羽直上に生じる緩み領域は、トンネル天端における崩壊領域断面に影響を受ける。そこで、図-15にトンネル天端における水平断面画像、図-16にその面積を示す。その結果、基本ケースである2mm引抜き量までは面積も大きく増加するが、それ以降は微増傾向を示すことから、この時点で天端における崩壊領域断面はほぼ固定され、その後、崩壊領域が地表面付近に到達するに従い、崩壊領域境界面で肌落ちが生じ、トンネル天端の崩壊領域断面積が徐々に拡大するものと推察される。

5.3 画像処理による崩壊領域の分析

(1) 2次元鉛直縦断面(トンネル側面)の比較

図-17に対数螺旋を重ね合わせた鉛直縦断面画像を示す。引抜き量2mmまでは切羽上方においてアーチング効果によって閉塞した緩み領域が形成されるが、5mm引抜いたCASE6以降は崩壊領域が地表面まで到達している。切羽前方に発達するすべり線は、対数螺旋と良く合致しており、引抜き量を大きくしても変わらないが、切羽上方の緩み領域は地表面まですべり線が到達した段階で、徐々に直上へ直線的に発達する傾向にある。なお、密度分布に注目すると、引抜き量が大きくなるにつれて、前方方向のすべり線に沿って緩み、切羽背面側は比較的に密な状態を保持する傾向が伺える。これは、切羽崩壊領域の形成過程が、まず、前方にすべり線が発達し、その後、そのすべり線に沿って崩落していくためと推察される。

(2) 2次元鉛直横断面(トンネル正面)の比較

図-18にトンネル切羽から2mm離れた位置での鉛直横断面画像について、対数螺旋と重ねて示す。縦断面と同様、引抜き量2mmまでは横断面においても対数螺旋状のすべり面を示すが、崩壊領域が地表面まで到達する

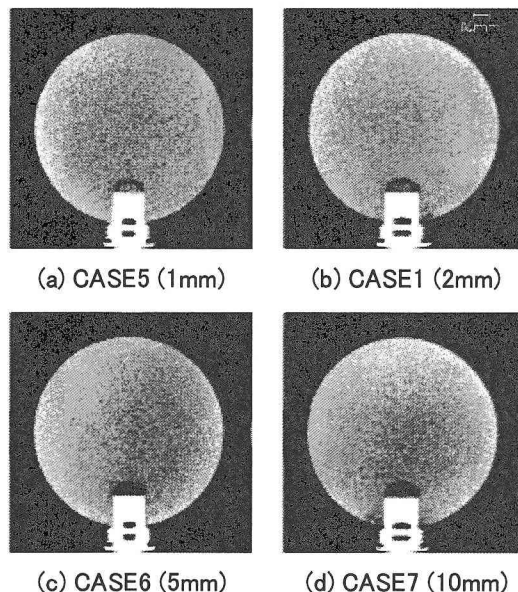


図-15. 水平断面画像(トンネル天端)

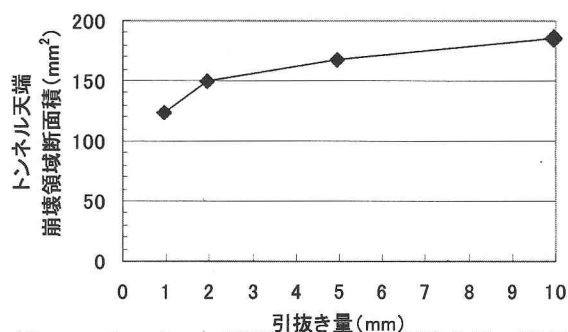


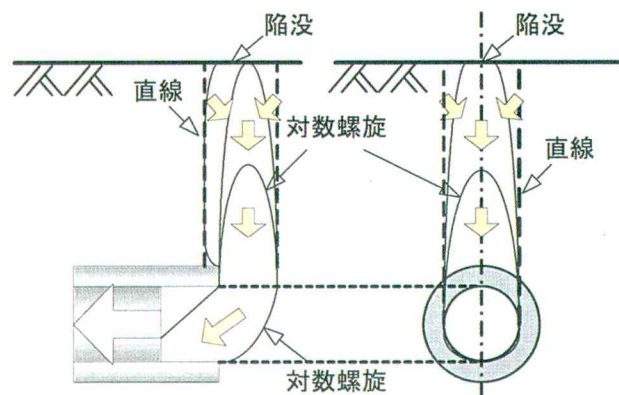
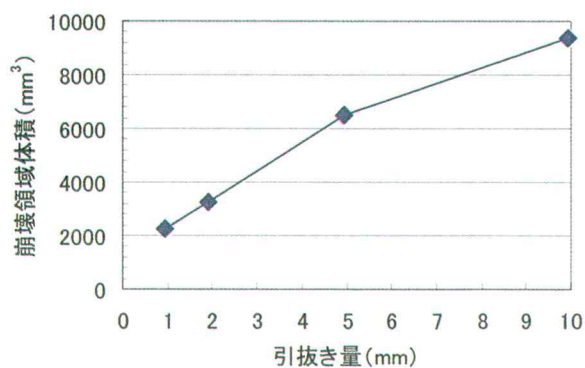
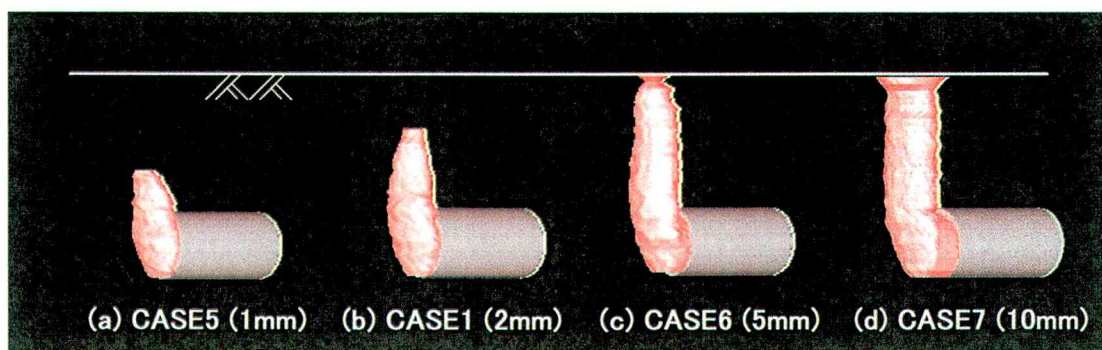
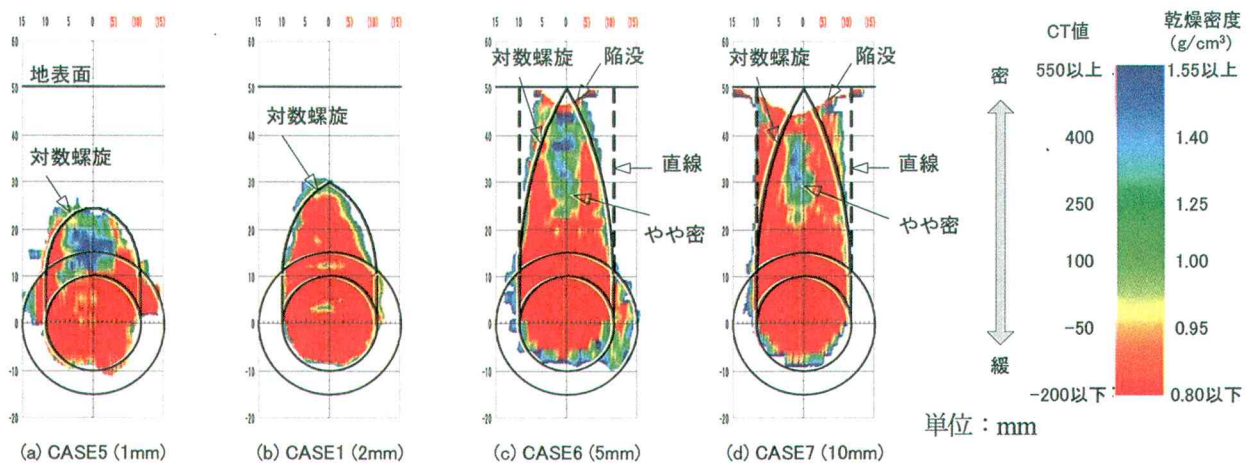
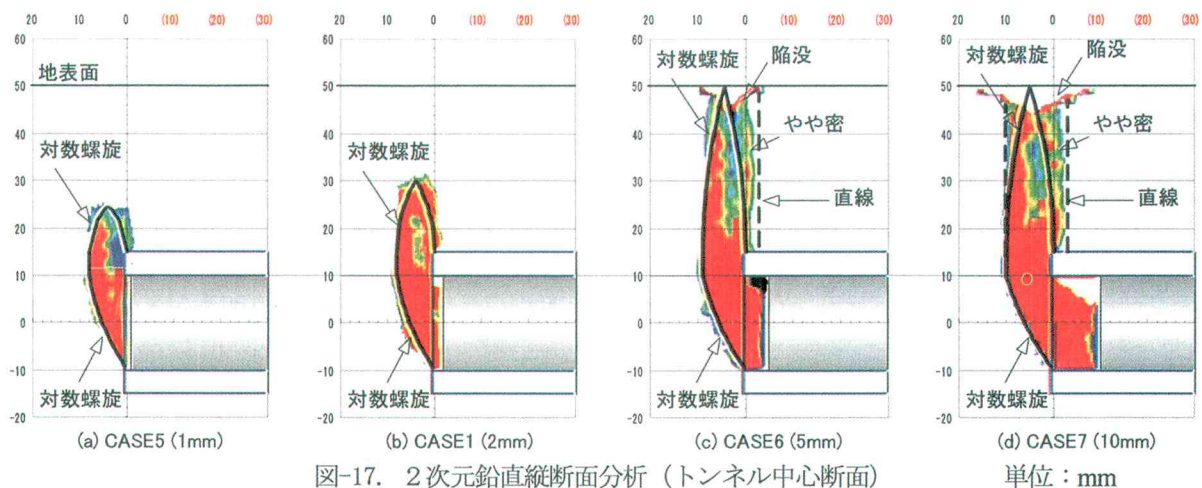
図-16. トンネル天端崩壊断面積と引抜き量の関係

5mm引抜き以降は、トンネル幅で直上に向かってほぼ直線状にすべり線が発達している。また、崩壊領域境界付近と比べ、内側はやや密な状態を示す。

(3) 3次元崩壊領域の比較

図-19において崩壊領域の三次元画像について比較すると、切羽上方においてアーチング効果が発揮され、閉塞して形成されていた緩み領域が、崩壊量の増加とともに円柱状に変化していく過程が伺える。この3次元崩壊領域画像から体積を算出し、引抜き量との関係について整理した結果を図-20に示す。引抜き量、すなわち崩壊量の増加とともに、切羽前方及び上方に形成される崩壊領域の体積は増加傾向にあり、地表面に崩壊領域が到達した段階で、徐々に収束する傾向にあると推察される。

以上の結果をもとに崩壊量が切羽崩壊メカニズムに及ぼす影響を図示すると図-21のように考えられる。崩壊量の増加に従って、切羽上方においてアーチング効果によって閉塞していた緩み領域が地表面に向かって拡大し、最終的にトンネル天端からほぼ直線状にすべり線が発達すると考えられる。また、その際に切羽背面側の地山が引き込まれる傾向にあると考えられる。



6. 結論

本論文では、トンネル切羽崩壊について、トンネル引抜き模型実験を実施し、X 線 CT スキャナを用いてその崩壊メカニズムを可視化することで、切羽崩壊メカニズムについて考察した。以下に結論を列挙する。

- (1) 切羽前方に向かって発達するすべり面や、切羽上方において形成されるアーチング効果による緩み領域を3次的に可視化することが出来た。
- (2) 切羽崩壊領域の境界となるすべり面は、鉛直方向には対数螺旋、水平方向には楕円によって評価可能であることがわかった。
- (3) 拘束圧が作用する条件下では、切羽上方緩み領域がシャープな形状を有することを確認した。
- (4) 土被り比2D以上では、切羽崩壊領域の形状に大きな差が生じないことがわかった。
- (5) 崩壊量が増加しても切羽前方に生じるすべり面及びトンネル天端の崩壊領域断面に大きな変化は生じないことがわかった。
- (6) 崩壊量が増加することで、切羽上方緩み領域は円柱上に地表面まで発達することがわかった。
- (7) なお、対数螺旋による崩壊領域のフィッティングに関しては、基本的に切羽天端のすべり幅、すなわち崩壊領域の断面積に依存する。また、上方ゆるみ領域に関しては、緩み高さにも依存する。今回の実験では、これら寸法を画像解析により抽出した上で画像とのフィッティングを行ったが、いくつか材料物性を変えた実験を同様に行うことで、三次元的な崩壊領域予測に必要な設定手法が検討可能であると考えられる。

以上、模型地盤内を可視化することにより、切羽崩壊メカニズムについて詳細に検討した。本実験は、小型の模型実験装置であるため、寸法効果など検証すべき点もある。そこで今後は、遠心場での引抜き実験を行い、そこで得られる破壊領域形状等と比較することで、本論文で得られた三次元的な切羽崩壊メカニズムの妥当性について検証する。また、本実験では小型であるがゆえに計測が出来なかった切羽面作用荷重についても、遠心模型実験によって計測を行うことで、モデル化した切羽崩壊領域との極限釣り合いを比較する。そして、二次元的な極限崩壊荷重と比べることで、切羽崩壊時の極限荷重に及ぼす三次元効果についても検証を進め、より合理的な切羽安定対策について検討する所存である。

参考文献

- 1) 小西真治「砂と粘性土の互層地盤の切羽安定評価に関する研究」京都大学博士論文, 2000.
- 2) 真下英人, 鈴木正彦, 猪熊明: 「トンネル切羽安定性の簡易評価法の提案」土木学会論文集, No. 638, PP117~129, 1999. 12.
- 3) 村山朔郎, 松岡元: 「砂質土中のトンネル土圧に関する基礎的研究」土木学会論文報告集, 第 187 号, PP95~108, 1971. 3.
- 4) 村山朔郎, 遠藤正明, 中崎英彦, 竹村章: 「アルミ棒積層体によるトンネル切羽の安定に関する模型実験」竹中技術研究報告, 第 12 号, PP82~90, 1974. 8.
- 5) 久武勝保: 「トンネル切羽の安定・崩壊挙動に関する基礎的研究」土木学会論文報告集, 第 517 号, PP105~115, 1995. 6.
- 6) 西岳茂, 櫻井春輔, 有川究: 「X 線可視化実験による切羽の挙動に関する研究-三次元歪解析によるアプローチ-」土木学会論文集, 第 547 号, PP87~96, 1996. 9.
- 7) 古賀武寛: 「X 線 CT 法を用いた切羽崩壊メカニズムの可視化に関する実験的研究」熊本大学卒業論文, 2003. 3.
- 8) 椋木俊文: 「地盤工学における X 線 CT 法の適用に関する研究」熊本大学大学院自然科学研究科博士学位論文, 2001. 3.
- 9) 大谷 順, 尾原祐三, 菅原勝彦, 椋木俊文: 「地盤工学における産業用 X 線 CT スキャナーの適用」土と基礎, No.48, Vol.2, pp.17-20, 2000.

(2004 年 4 月 16 日 受付)