

---

X線CTを用いた  
新たなトンネル切羽安定化技術の  
開発に関する研究

---

17360228

平成17年度～平成18年度科学研究補助金  
(基盤研究(B)) 研究成果報告書

平成19年5月

研究代表者 大谷 順  
熊本大学大学院自然科学研究科教授

## 概 要

山岳トンネルやシールドトンネルの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。これらの対策工法としては、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バー内の泥水や泥土の高度な切羽圧管理が、現在切羽の安定性を保持する工法として実施されている。しかし、地山の強度・変形特性の違いや地下水位変動によって切羽の応力バランスが崩れた場合、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が考えられる。こうした技術課題の多い切羽安定問題に対して、現在、都市再開発や大深度法の制定によって、地下空間に大規模なトンネルや地下空洞が計画されており、従来の設計施工技術ではこれらを安全かつ経済的に構築することが難しい現状にあると言える。本研究は、上記の問題を対象として、これまで申請者が蓄積してきた X 線 CT 装置を用いた実験研究のノウハウと、その結果を定量的に評価する画像解析手法を用いることにより、トンネル切羽の三次元崩壊メカニズムの解明と新たなトンネル掘削技術の提案、および各種補助工法のメカニズム評価を行うことで、最終的には、新しいトンネル切羽安定化技術を提案するものである。

## 研究組織

研究代表者：大谷 順（熊本大学大学院自然科学研究科教授）

研究分担者：尾原祐三（熊本大学大学院自然科学研究科教授）

研究分担者：北本幸義（鹿島建設技術研究所上席研究員）

## 交付決定額（配分額）

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合 計
平成 17 年度	9,400,000	0	9,400,000
平成 18 年度	6,200,000	0	6,200,000
総 計	15,600,000	0	15,600,000

## 研究発表

### (1) 学会誌等

1. D. Takano, J. Otani, H. Nagatani and T. Mukunoki, "Application of X-ray CT on boundary value problems in geotechnical engineering - Research on tunnel face failure - ", *Proc. of Geocongress, ASCE, Atlanta, February, CD-ROM, 2005*
2. J. Otani, D. Takano and H. Nagatani , "Evaluation of three-dimensional tunnel face failure mechanism using X-ray CT", *Proc. of 16th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Osaka, pp.1639 - 1642, 2005*
3. J.Otani, and T.Mukunoki, "Characterization of X-ray CT data to assessment of geomaterials", Geotechnical Special Publications No.156, ASCE, pp.544-553, 2005.
- 4 D. Takano, H. Nagatani, J. Otani and T. Mukunoki, "Evaluation of auxiliary method in tunnel construction using X-ray CT", *Proc. of the Sixth International Conference on Physical Modeling in Geotechnics, ICPMG '06, Vol.2, pp. 1189-1194, Hong Kong, 4-6, Aug., 2006*
5. 高野 大樹、ファン ダン ホア、大谷 順, "X線 CT を用いた水平荷重下における杭周辺地盤挙動の3次元可視化", *応用力学論文集 Vol.9, pp.513-520, 2006*
6. J.Otani, "X-ray computed tomography for geotechnical engineering", *Proc. of the second International Workshop on X-ray CT for Geomaterials, Keynote Lecture, France, pp.95-115, 2006.*
7. D.Takano, J.Otani, S.Fukushige and H.Nagatani, "Investigation of interation behavior between soil and face bolts using X-ray CT", *Proc. of the second International Workshop on X-ray CT for Geomaterials,, France, pp.389-395, 2006.*
8. D.Takano, J.Otani, T.Sato and H. Nagatani, "Evaluation of passive failure at tunnel face using X-ray CT", *Computational Methods, Springer, pp.281-285, 2006.*
9. 大谷 順、永谷英基、高野大樹, "X線CTを用いたトンネル切羽崩壊機構の評価", *土木学会論文集C、Vol.62, No.4, pp.814-824, 2006.*
- 10.大谷 順、高野大樹、永谷英基, "X線 CT を用いた無排土シールド工法の一提案", *土木学会論文集C (投稿中)*
- 11.D.Takano, J.Otani, N. Lenoir, "Visualization of failure pattern of

- reinforced soil with face bolts on direct shear test”, Proc. of International Symposium on Earth Reinforcement, Nov. 2007.(掲載決定)
12. 尾原祐三, 吉永徹, 小川浩司, 横山幸也, ” 岩盤応力測定のための CBDM の開発”, 地下空間開発における調査・計測に関するシンポジウム論文集, pp. 1-6, 2006
  13. K. Soucek, L. Stas, Y. Obara, D. Fukahori , “X-ray CT observation of failure in coal geo-composite”, Proc of 1st Euro Mediterranean in Advances on Geomaterials and Structures, Tunisia, CD, 2006
  14. S.S. Kang, Y. Ishiguro and, Y. Obara , “Evaluation of core disk rock stress and tensile strength via the compact conical-ended borehole overcoring technique”, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., Vol.43, pp.1226-1240, 2006
  15. T. Temmyo, Y. Murakami, Y. Obara, “Evaluation of water cement ratio of hardened concrete by X-ray CT method”, Proc. of GeoX2006, pp.443-449, 2006
  16. Y. Obara, K. Sasaki, T. Matusyama and T. Yoshinaga , “Influence of water vapor pressure of surrounding environment on fracture toughness of rock”, Proc. of ARMS 2006, CD-7chapter, 2006
  17. 尾原祐三, 西山えるむ, 姜聲承, “高感度傾斜計による岩盤斜面モニタリングと挙動分析”, 資源と素材, 122 巻, 12 号, pp. 582-588, 2006
  18. H.S. Jeong, S.S. Kang and Y. Obara , “Influence of surrounding environments and strain rates on strength of rocks under uniaxial compression”, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., Vol.44, pp.321-331, 2007

(2) 口頭発表

1. 高野大樹, 大谷順, 永谷英基, 倉吉祐輔「補助工法がトンネル切羽崩壊機構に及ぼす影響」『土木学会西部支部研究発表会』, III-085, 福岡, 2005年3月
2. 高野大樹, 永谷英基, 倉吉祐輔, 大谷順「補助工法による切羽面補強効果」『第40回地盤工学研究発表会』, No.125, 函館, 2005年7月
3. 永谷英基, 高野大樹, 倉吉祐輔, 大谷順「切羽形状が受働破壊領域に及ぼす影響」『第40回地盤工学研究発表会』, No.942, 函館, 2005年7月
4. 倉吉祐輔, 永谷英基, 高野大樹, 大谷順「切羽安定の極限釣り合いによる3次元的評価」『第40回地盤工学研究発表会』, No.938, 函館, 2005年7月
5. 高野大樹, 大谷順, 福重庄太郎, 永谷英基「鏡ボルトの配置パターンが切羽崩壊機構に及ぼす影響」『土木学会西部支部研究発表会』, III-038, 宮崎, 2006年3月
6. 高野大樹, 福重庄太郎, 大谷順, 永谷英基「ボルト材により補強された土の一面せん断挙動 -X線CT法の適用-」『第41回地盤工学研究発表会』, No.340, 鹿児島, 2006年7月
7. 福重庄太郎, 高野大樹, 大谷順「X線CT用一面せん断装置の開発」『第61回土木学会年次学術講演会』, 滋賀, 2006年9月
8. 島田里美, 高野大樹, 大谷順, Hazarika Hemanta, 御手洗義夫「X線CTを用いた古タイヤ-地盤間の摩擦特性の解明」『土木学会西部支部研究発表会』, III-023, 北九州, 2007年3月

## 目次

### 第1節 切羽崩壊機構の解明

#### 第1章 序論

#### 第2章 X線CTによる切羽崩壊機構の可視化

##### 2.1 X線CT用トンネル引抜き実験装置

##### 2.2 実験手順と実験ケース

##### 2.3 切羽崩壊機構の解明

#### 第3章 遠心模型実験による切羽崩壊機構の解明

##### 3.1 遠心模型実験装置及び遠心用トンネル引抜き実験装置

##### 3.2 実験ケース

##### 3.3 実験結果と考察

#### 第4章 安定解析モデルによる崩壊機構の評価

##### 4.1 基本的考え方

##### 4.2 結果と考察

#### 第5章 結論

#### 参考文献

### 第2節 新たなトンネル掘削技術の開発

#### 第1章 序論

#### 第2章 X線CTを用いた模型実験

##### 2.1 X線CT装置

##### 2.2 X線CT専用トンネル押込み実験装置

##### 2.3 実験方法と実験ケース

##### 2.4 実験結果および考察

#### 第3章 遠心模型実験

##### 3.1 遠心用トンネル押込み実験装置

##### 3.2 実験方法と実験ケース

##### 3.3 実験結果および考察

## 第4章 新たな無排土シールド工法の提案

### 4.1 圧入型シールド工法における有効な切羽形状

### 4.2 無排土シールド推進制御システムの提案

## 第5章 結論

### 参考文献

## 第3節 新たなトンネル切羽安定化技術の提案

### 第1章 序論

## 第2章 X線CTを用いたトンネル補助工法の模型実験

### 2.1 実験装置と実験結果

### 2.2 鏡ボルトの配置が切羽崩壊形状に及ぼす影響

## 第3章 X線CT用一面せん断試験装置の開発

### 3.1 X線CT用一面せん断装置

### 3.2 載荷装置および計測装置

## 第4章 ボルト材により補強された砂の一面せん断挙動

### 4.1 一面せん断試験

### 4.2 実験結果と考察

## 第5章 遠心模型実験

### 5.1 実験目的

### 5.2 実験概要

#### 5.2.1 トンネル掘削のモデル化

#### 5.2.2 計測項目

### 5.3 実験手順

### 5.4 実験ケース

### 5.5 実験結果

### 5.6 まとめ

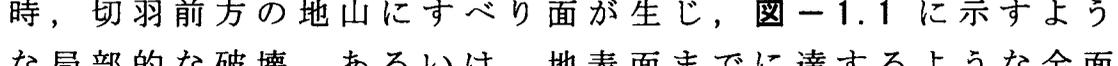
## 第6章 結論

### 参考文献

# 第1節

## 切羽崩壊機構の解明

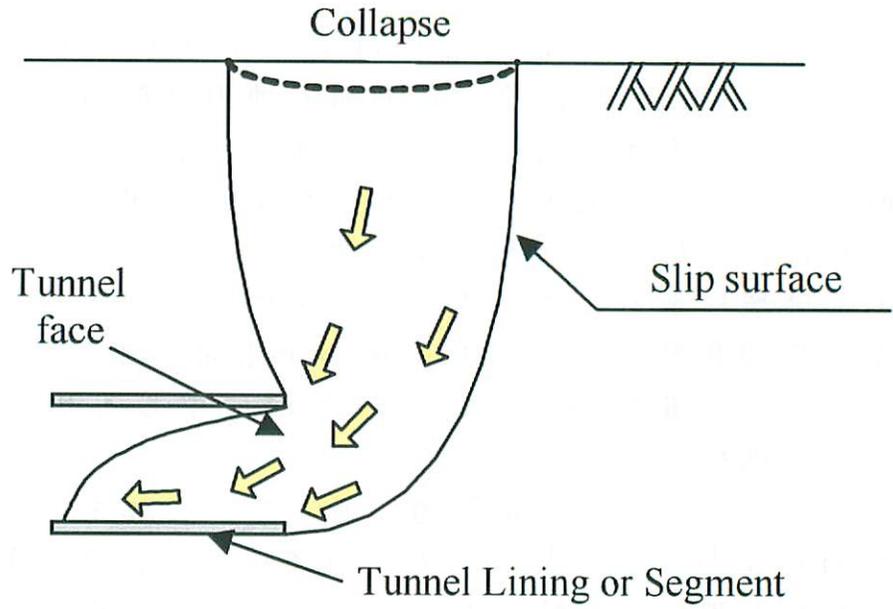
## 第1章 序 論

山岳トンネル工法あるいはシールドトンネル工法などのトンネル掘削では，その切羽面の地山は掘削による応力解放で著しく不安定な状態となる．地山の応力バランスが崩れる時，切羽前方の地山にすべり面が生じ，に示すような局所的な破壊，あるいは，地表面までに達するような全面的な破壊に至る．この切羽の安定性を評価するには，崩壊に至る極限状態でのすべり土塊の全重量に相当する滑動力と，切羽面での抵抗力およびすべり面に生じるせん断抵抗力について把握する必要がある．

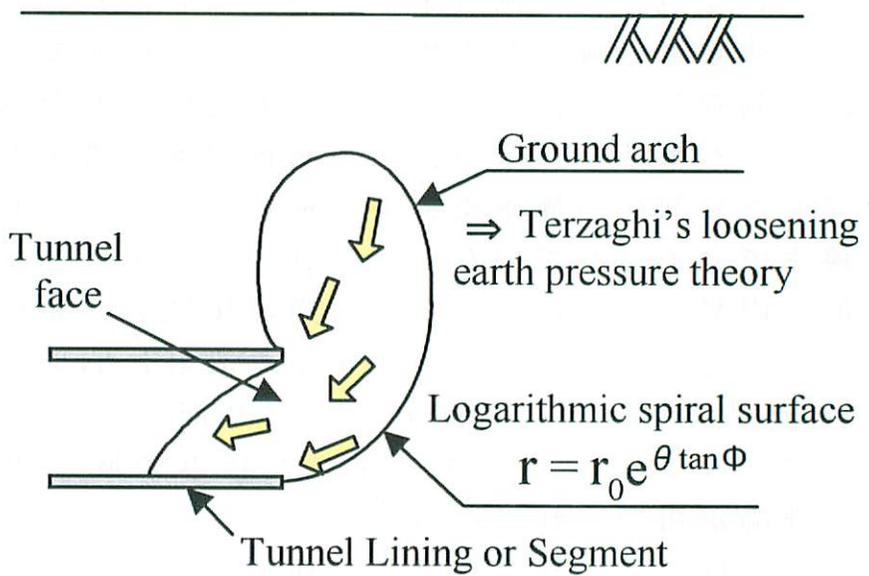
こうした切羽の安定問題に対して，これまでに数多くの実験的研究<sup>1), 2), 3), 4), 5)</sup>がなされているが，その多くが2次元モデルを用いた実験，もしくは，実験は3次元モデルを用いているが，アクリル板などを介した1箇所鉛直断面のみを観察した例であり，本来起きている3次元下における崩壊現象について観察した例は未だ例が少ない．3次元モデルの切羽面を非破壊で観察した例としては，3次元モデルの切羽面を圧力制御し，X線による鉛標点の変位計測を試みた西岳らの研究<sup>6)</sup>が挙げられるが，圧力制御実験は微小変位領域を対象とした切羽面の極限支持力の検討に適しており，大規模な崩壊までは再現していない．これについては，変位計測に精度的な限界もあったことから，崩壊領域を詳細に可視化するには至っていない．一方トンネルの設計においては，対数ら線などで評価した切羽前方のすべり面とその上部に形成されるアーチング効果により生じた緩み領域を想定した切羽安定理論が用いられている<sup>2)</sup>．

筆者らは，これまでトンネル切羽の3次元的な崩壊機構の解明を目的に，産業用X線CTスキャナを用いてトンネル切羽崩壊時における崩壊領域の3次元可視化を試みており，その結果，切羽前方に生じるすべり面や緩み領域に関する考察を行っている<sup>7)</sup>．

本研究の目的はトンネル切羽崩壊機構の評価である．まず著者らによる前の研究<sup>7)</sup>で開発した，産業用X線CTスキャナに搭載可能なトンネル引抜き模型実験装置を用いて，崩壊領域の3次元可視化を行い，切羽前方に生じるすべり面や緩



(a) Large scale failure



(b) Local failure

図 - 1.1 トンネル切羽崩壊概念

み領域の定量的評価を試みる。著者らの文献 7)では、崩壊領域の可視化を行うにとどまっていたが、今回の研究では、その定量的な評価を目的とし、遠心場での同様のトンネル引抜き実験を行い、実規模応力レベルでの崩壊領域も確認することで、CT 実験で得られた結果の妥当性を確認する。さらに、ここで得られた 3次元崩壊機構を基に切羽安定解析モデルを提案し、これを用いた安定解析を実施することによりその妥当性について検討する。

## 第 2 章 X線 CTによる切羽崩壊機構の可視化

### 2.1 X線 CT用トンネル引抜き実験装置<sup>7)</sup>

本研究で使用している産業用 X線 CT スキャナは以下のような特徴を有している<sup>8)</sup>。

- 1) 試料台の最大積載重量が 980N までである。
- 2) 撮影中に、試料台が X線源と検出器の間を並進及び移動回転する。
- 3) 最大撮影領域は、直径 400mm である。
- 4) 撮影中は、完全に外部より遮断される。

これらは、産業用 X線 CT スキャナを用いた実験を行う上での制約条件となる。以下にその制約条件を列挙する。

- (a) 試料台で反力をとることが不可能である（上記 1)に対応）。
- (b) CT 室内は限られた空間しか確保できず、試料台の動きを妨げるものがあってはならない。よって CT 撮影時は、载荷装置とコントロール部を CT 撮影範囲外に設置する必要がある（上記 2)に対応）。
- (c) 被検体は撮影領域より小さなサイズにする必要がある（上記 3)に対応）。
- (d) 撮影中は拘束圧の連続供給ができなくなるため、機密性の高い土槽を用いる必要がある（上記 4)に対応）。

著者らはこれらを考慮した X線 CT 専用のトンネル引抜き実験装置を開発している。写真-1.1 および図-1.2 にトンネル引抜き実験装置を示す。引抜き実験装置は、土槽部、駆動部、コントロール部からなり、コントロール部において引抜

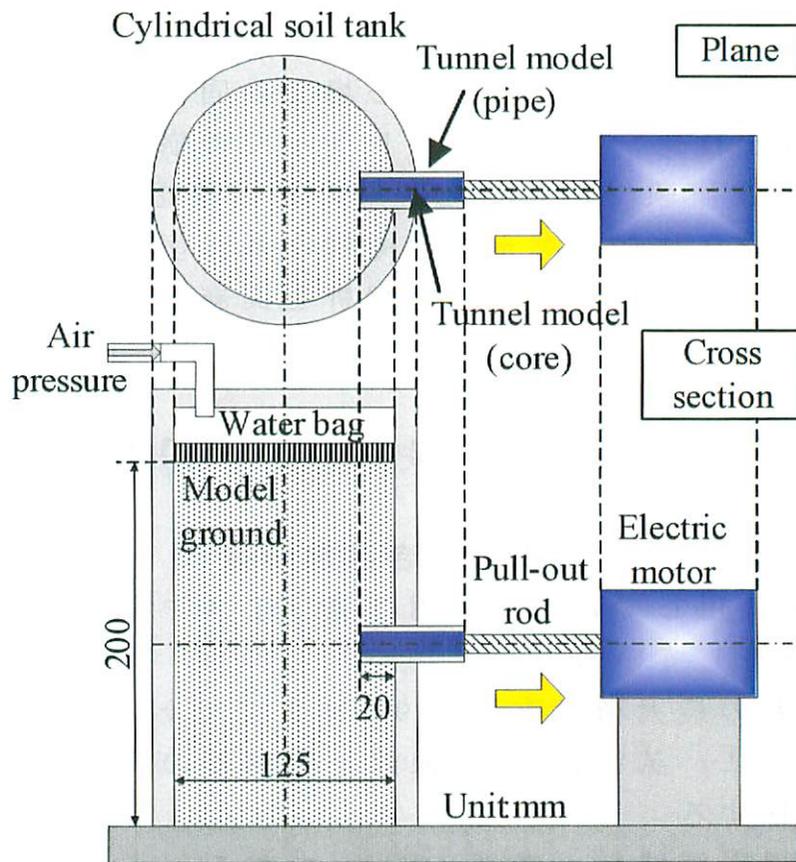


図 - 1.2 X線CT専用トンネル引抜き実験装置

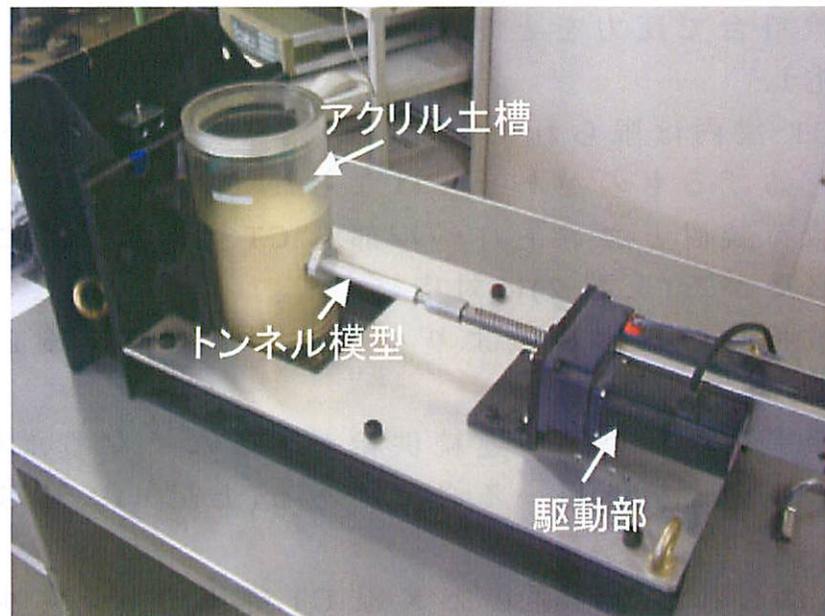


写真 - 1.1 実験装置の駆動部

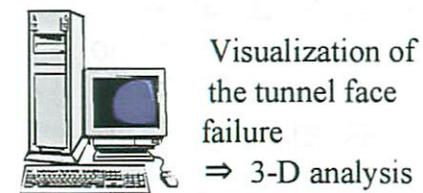
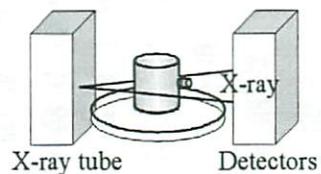
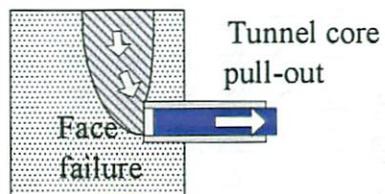
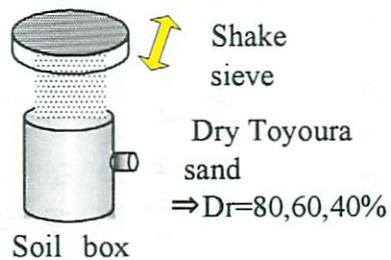
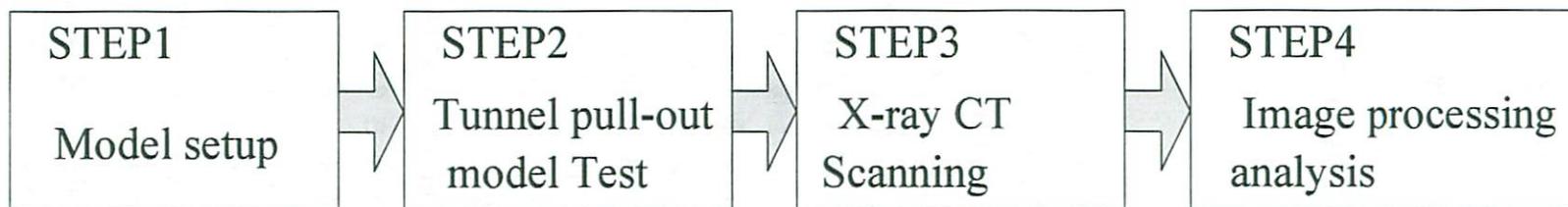


図 - 1.3 実験手順

き量と引抜き速度の設定を行う。土槽部は、外径 150mm、内径 120mm、高さ 300mm のアクリル製円筒土槽にトンネル模型が取り付けられている。トンネル模型は、外径 30mm のカバー部と、外径 20mm の引抜き部から構成されており、材料は、X 線の透過能力を考慮し、アルミ材とした。トンネル引抜き後には、駆動部とトンネル模型を切り離し、土槽部のみを X 線 CT 撮影室に移動し、CT 撮影を行う。また、模型地盤表面に水枕を設置し、空気圧を作用させることで、最大 400kPa の上載圧が載荷可能である。

## 2.2 実験手順と実験ケース

図-1.3 に実験手順を示す。まず、円筒土槽内に模型地盤を作製する。模型地盤は、豊浦乾燥砂（最大密度  $1.66\text{t/m}^3$ 、最小密度  $1.34\text{t/m}^3$ ）を多重ふるい(2mmメッシュのふるいをそれぞれ 40mm 間隔で 3 層としたふるい)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 80~83%になるように作製した。地盤作製後、土槽を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。撮影間隔は 2mm で撮影範囲は土槽底面から地表面まで行っており、撮影した水平断面画像に画像処理を施し、再構築することにより 3 次元画像が得られ、これにより、任意の断面での破壊領域の分析が可能となる。

実験ケースを表-1 に示す。既往の実験<sup>1), 2), 3), 4), 5)</sup>によると、一般的に引抜き量が切羽高さの十分の一程度であれば、土被り比が 2.0D (D: トンネルの直径) 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するとしている。そこで、本実験では、引抜き部を 2.0mm (0.1D) 引き抜くことで切羽前方地盤を緩ませて切羽崩壊に至る極限状態について模擬した場合を基本ケース (CASE 1) とし、崩壊領域の発達過程での地盤内状況を確認するために 5.0mm (0.25D) 引き抜くケース (CASE 2) も実施した。また後で安定解析モデルの提案を目的としているため、基本ケースと同じ条件で拘束圧を作用させた 2 ケース (CASE 3: 10kPa お

表 - 1.1 実験ケース

Test case	overburden ratio	confining pressure	Pull-out length	Relative density
		kPa	mm	%
CASE 1	2D*	0	2	80
CASE 2	2D*	0	5	80
CASE 3	2D*	10	2	80
CASE 4	2D*	20	2	80

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

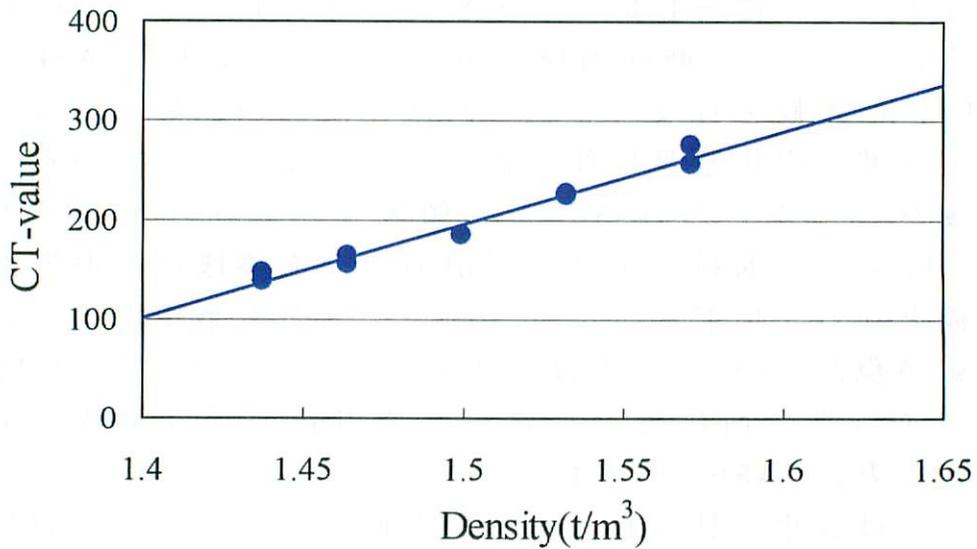


図 - 1.4 豊浦砂におけるCT値と密度の関係

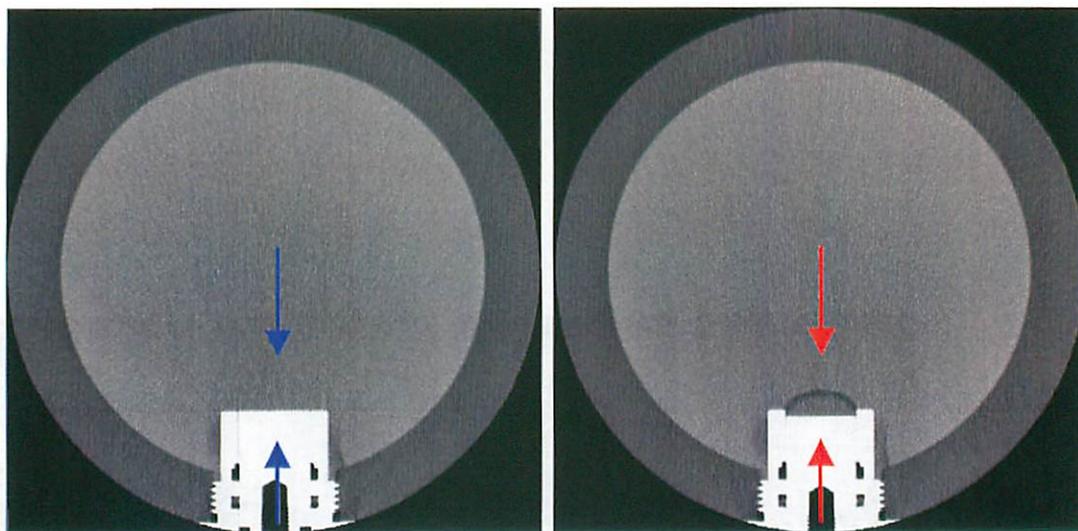
よび CASE 4: 20kPa)についても実施した。なお、実験における引抜き速度は 0.1mm/sec としている。また、それぞれの実験ケースについては複数回の実験を行い、再現性を確認した。

## 2.3 切羽崩壊機構の解明

### a) CT 断面画像による考察

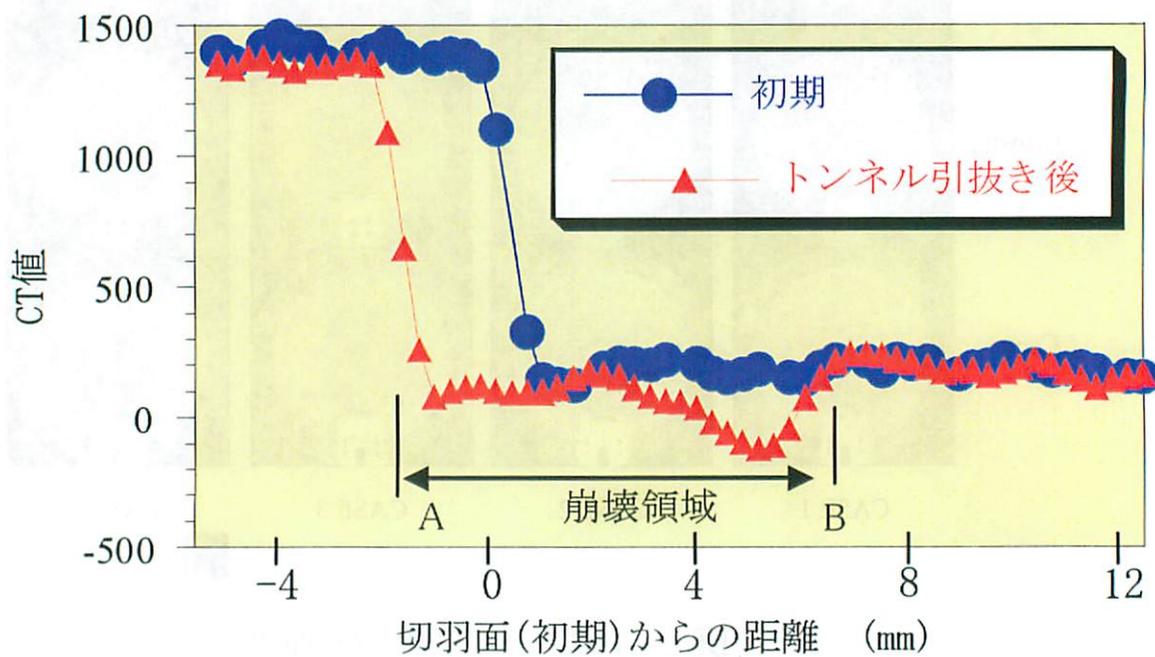
CT スキャンにより得られる CT 画像は、CT 値と呼ばれる材料の X 線吸収特性で定式化された値の空間分布によるデジタル画像である。CT 値は材料の密度に比例した値であるとされており、画像については CT 値の高い領域（高密度領域）は白色、また CT 値の低い領域（低密度領域）は黒色で、256 階調の白黒濃淡レベルにより表示される<sup>7), 8)</sup>。本研究で用いた豊浦砂についての CT 値と密度の関係を図-1.4 に示す。これにより、CT 値を密度に換算することが可能となる。

図-1.5 は、CASE 1 のトンネル切羽中心における CT 断面画像と画像中の矢印間の CT 値分布である。今回の研究では、(c)の CT 値分布中 A 点に示すように、初期状態の CT 値と比較して、密度低下が始まった画素を抽出し、その画素をつなげて得られる曲線と切羽面（B 点）に囲まれた領域を崩壊領域と定義した。図-1.6 は全実験ケースにおける 4 つの異なる深さにおける CT 断面画像を示している。まず、CASE 1 と CASE 2 の比較を行う。これら画像の黒色の部分、すなわち低密度領域が引抜き量に伴い拡大していることがわかる。この低密度領域がいわゆるゆるみ領域または崩壊領域と考えられ、その発達過程により切羽前面での崩壊機構の進展が確認可能となる。切羽前方には、両ケースとも半楕円状のゆるみ領域が現れている。また深さ方向の変化については、CASE 1 においては地表面に近づくにつれ楕円状の緩み領域は縮小する。一方、CASE 2 では地表面近くにおいても緩み領域の大きさには変化は見られない。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。その結果、基本ケースである 2mm 引抜きまでは崩壊領域の面積も大きく増加するが、それ以降は微増傾向にあることが伺える。



(a) 初期

(b) トンネル引抜き後



(c) CT値分布

図 - 1.5 初期及びトンネル引抜き後のCT画像とCT値分布

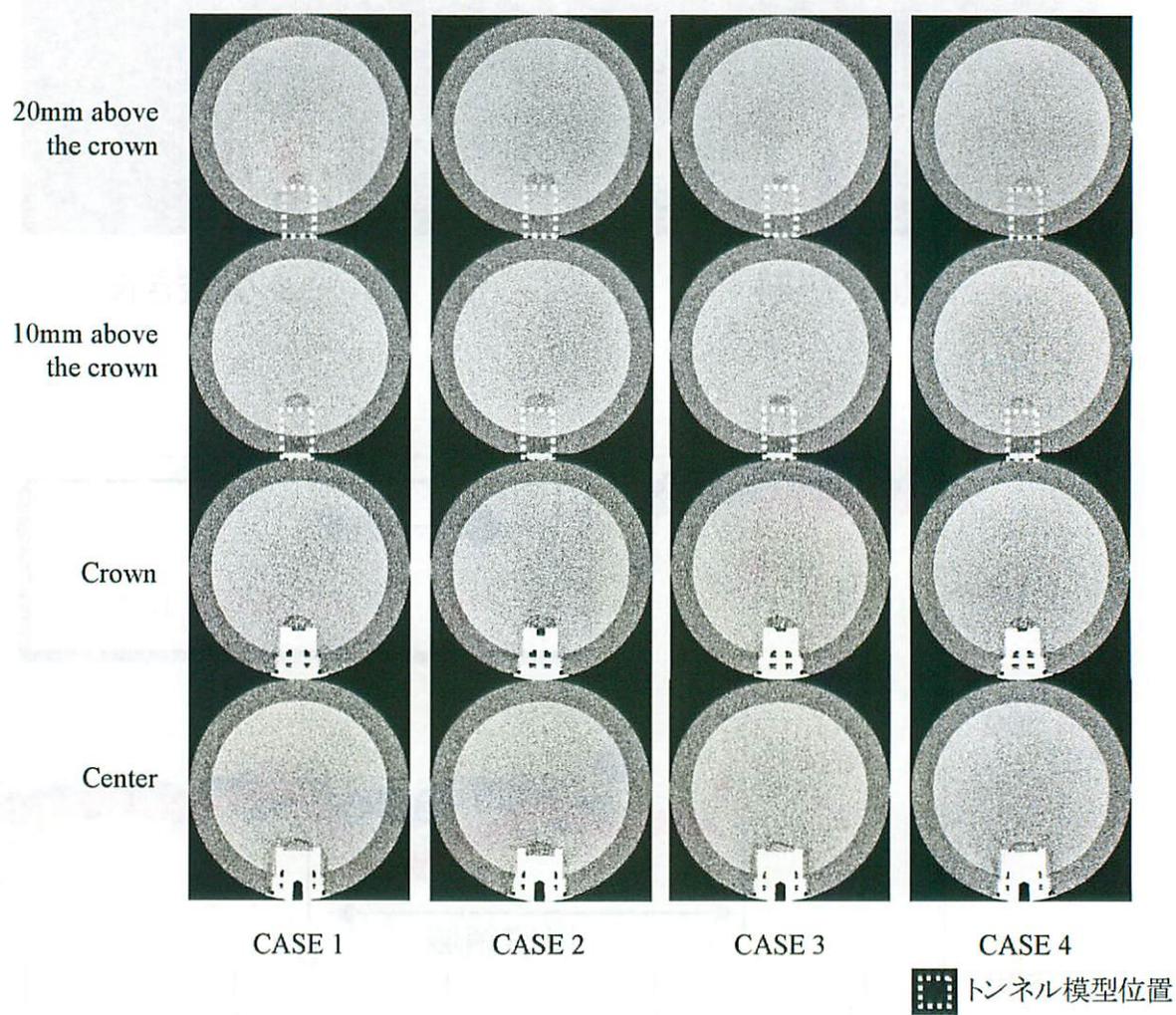
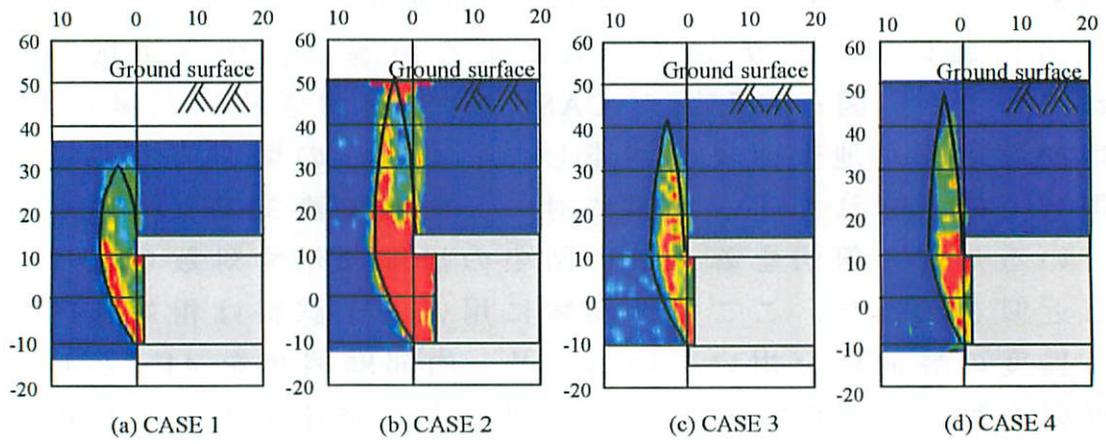


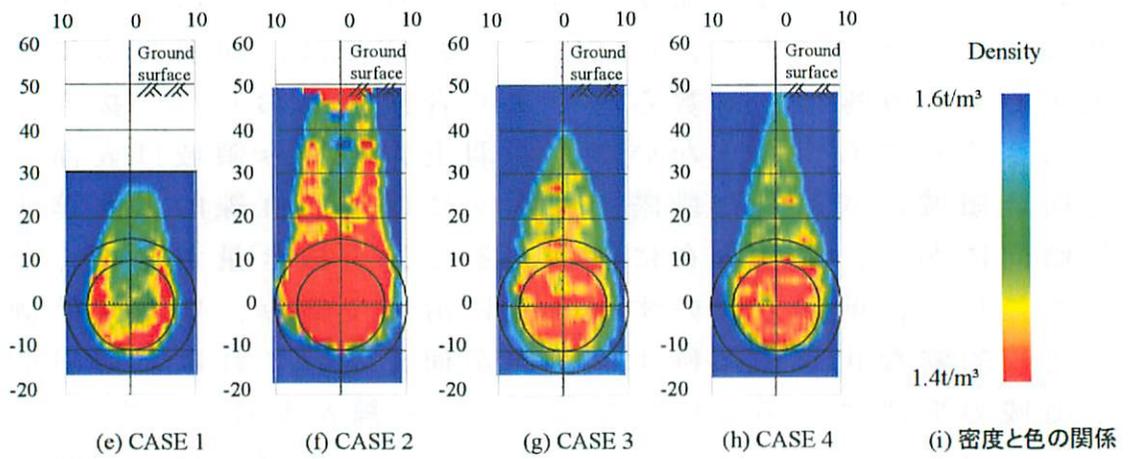
図-1.6 水平断面画像

## b) 鉛直断面画像による考察

2mm 間隔で得られた全画像を重ね合わせることで 3 次元画像を再構成した。本論文では、トンネル軸方向に垂直な断面をトンネル正面、平行な断面をトンネル側面と定義する。図-1.7 はそのときの鉛直断面について切羽の側面方向からとトンネル正面方向からの鉛直断面を表した画像を全ケースについて示したものである。ここでは密度の程度を図-1.7(i)で示すような密度変化としてカラーで表示している。図-1.7(a)で示す CASE1 のように引抜き量が小さい場合には、切羽上方においてアーチング効果による閉塞した緩み領域が現れているが、図-1.7(b)の CASE 2 (5mm 引き抜いた場合)では崩壊領域が地表面まで到達している。この切羽前方の崩壊領域で観察されたすべり面に対し、参考文献 3)でも用いられている対数ら線法を導入し、図中の黒線で示す対数ら線による近似を試みた。ここで、実験に用いた土試料は相対密度 80% 程度の豊浦砂を用いているため、内部摩擦角を  $41^\circ$  とし近似を行った。CASE 1 では切羽前方へ発達するすべり線は非常によく合致するが、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。また、CASE 2 においては、切羽上方に発達するすべり線は、対数ら線とよく合致しており、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表面まで崩壊領域が到達した段階で、徐々に直上へ直線的に発達する傾向にある。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。図-1.7(c)および(d)の CASE 3 および CASE 4 におけるゆるみ領域発生メカニズムは CASE 1 と同様であると考えられるが、ゆるみ領域内の密度変化より、領域の中心から外側に向かって崩壊が進んでいることが伺える。図中の黒線で示す対数ら線との重ね合わせを見てみると、切羽前方のすべり面、上方の緩み領域ともに CT 画像と対数ら線はよく合致している。これは、上載圧を作用させることによって、すべり面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



(1) トンネル側面



(2) トンネル正面

図-1.7 鉛直断面画像

されたものと考えられる。

図-1.7(e)～(h)は、引抜き後の切羽面から2mm離れた地点での切羽正面からの引抜き前の鉛直断面画像であるが、CASE 2では、アーチが形成されることなく崩壊領域が地表面に達している。一方、CASE 3およびCASE 4では、拘束圧を作用させることで、地表面近くでのゆるみ領域は細くなっていることがわかる。これについては、拘束圧が作用することにより土が締固まりアーチング効果がより顕著に発揮されたためだと考えられる。

### c) 3次元再構成画像による考察

図-1.8は、各CT画像より崩壊領域の境界の座標を抽出し、それらを3次元的に重ね合わせるにより再構成した3次元特徴抽出画像である。CASE 1とCASE 2を比較すると、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。次に、同じ引抜き量であるCASE 1とCASE 3およびCASE 4を比較すると、これら3ケースは比較的近い形状の崩壊領域を形成するが、上載圧を作用させることによりアーチング効果が顕著に発揮され、3次元抽出画像においてもシャープな緩み領域を形成していることがわかる。この3次元崩壊領域画像から体積を算出すると、CASE 2は引抜き量が5mmと大きいため異なるが、CASE 1(3280mm<sup>3</sup>)、CASE 3(3293mm<sup>3</sup>)およびCASE 4(3320mm<sup>3</sup>)となり、崩壊領域の体積にほとんど差異は見られなかった。CASE 3とCASE 4の上載圧を土被り圧に換算すると、それぞれ地盤深さ5Dおよび9D(ここではD:トンネル直径)分の土被り圧となる。これは、2D以上の土被りが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とするこれまでの研究成果を肯定していると言える。

以上の考察より、切羽崩壊領域の境界となるすべり面は、鉛直方向には対数らせん線、水平方向は楕円によって3次元的にモデル化が可能であると言える。

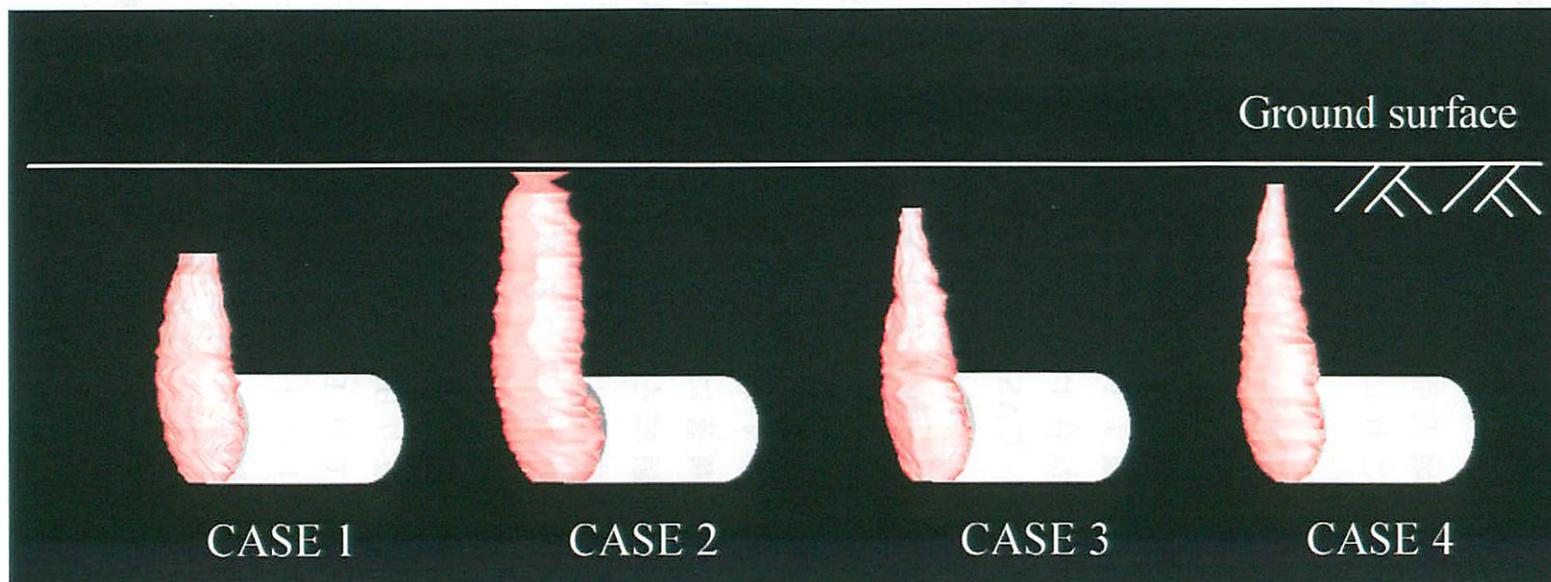


图-1.8 三次元特徵抽出画像

## 第3章 遠心模型実験による切羽崩壊機構の解明

### 3.1 遠心実験装置及び遠心用トンネル引抜き実験装置

遠心場におけるトンネル引抜き模型実験によって、切羽面に作用する土圧を測定すると共に、実規模応力レベルでの崩壊領域の形状について確認する。これにより実際の崩壊領域に近い挙動を観察し、CT実験での結果と比較することによりCT実験結果の妥当性について検討する。

本研究では鹿島建設技術研究所の遠心模型実験装置を用いた。遠心実験装置の主な仕様を表-2に示す。また図-1.9に遠心実験用トンネル引抜き実験装置の概略図を示す。土槽寸法は、幅500mm×奥行き500mm×高さ400mmであり、トンネル模型は直径50mmである。トンネル模型の切羽面には、土圧計を3箇所配置して崩壊時の切羽面に作用する土圧の測定を試みた。ただし、荷重計測は、引抜き開始後をゼロとした増分値としている。また、地表面には、地表面沈下量を計測するためにレーザー変位計を設置した。図-1.10に土圧計、レーザー変位計の設置位置をそれぞれ示す。なお、実験装置や装置寸法、実験結果などすべてのサイズは実験値で表示している。

### 3.2 実験ケース

遠心引抜き実験の実験条件を表-3に示す。引抜き実験は、50Gの遠心加速度の下、トンネル切羽を15mm(0.3D)引抜いた。模型地盤には、トンネル模型下端より25mm間隔に着色した豊浦砂を層状に敷き詰めており、実験後5mm間隔に地盤を削り、色砂の変状を観察することにより、実規模応力レベル下での切羽崩壊挙動を観察した。

### 3.3 実験結果と考察

図-1.11に切羽引抜き量と切羽作用土圧の関係を示す。土圧は、初期土圧( $p_0$ )に対する計測土圧( $p$ )の割合で表している。既往の研究<sup>3)</sup>では、引抜き開始直後に土圧は急激に減少し極小土圧を示し、その後切羽面の移動に伴い若干変動することが確認されている。さらに、土圧の減少量は、引抜き開始直後に初期土圧の1割程度に減少し、その後1割ほどの

増減が起こるとしている。本研究でも切羽面に作用している土圧は、引抜き開始後急激に減少している。しかしその後は切羽の移動に伴い若干の変動が確認できるものの、 $p/p_0=0.25$ 程度に収束していると考えられる。

以上より、変位制御とする本実験手法によっても、切羽面に作用する荷重がわずかな切羽面の変位によって大きく変化することが確認できた。

図-1.12 に引抜き量と地表面沈下量の関係を示す。なお、引抜き量は、引抜き量をトンネルの直径 ( $D=50\text{mm}$ ) で除したトンネル径に対する引抜き量の割合を用いて示している。引抜き開始後から  $0.1D$  に至るまでは、地表面沈下は見られない。さらに引抜きを進めると  $0.12D$  付近から沈下量は急激に増加する。これは、 $1G$  場での CT 実験 (CASE 1 参照) でも見られたように引抜き量が切羽高さの 1 割程度では、崩壊領域は地表面に至らずに地中で閉じた崩壊領域が形成されていることが伺える。

実験終了後、模型地盤内に設置した色砂の変形状況について観察を行った結果を写真-1.2 に示す。切羽面から  $10\text{mm}$  後方では、地盤の変位は見られないが、切羽面前方には  $15\text{mm}$  程度まで広がっている。これらの画像について細線化処理を行い、初期の色砂の座標、崩壊後の色砂の座標を決定し、遠心実験における 3次元崩壊領域を求めた。この結果と同じ引抜き量での CT 実験結果との比較を図-1.13 に示す。比較した CT 実験のケースは、ほぼ同じ地盤条件、施工条件で行われた CASE 2 (引き抜き量:  $0.25D$ ) であり、遠心実験では引抜き量:  $0.3D$  のケースを用いた。両ケースともに崩壊領域は地表面まで到達しており、その形状はよく類似している。トンネル側面からの縦断面画像を比較すると、トンネル下端より発生したすべり面は CT 実験では  $63^\circ$ 、遠心実験では  $68^\circ$  と非常に近い角度を持って発達しており、切羽面より前方すべり面までの距離も CT 実験で  $0.7D$ 、遠心実験で  $0.6D$  と近い値をとっている。以上より、遠心場における崩壊機構は  $1G$  場における CT 実験での結果と類似していると考えられる。このことより、CT 実験で行った  $1G$  場での模型実験結果は土槽境界の影響やサイズの影響も少なく、実際の切羽崩壊現象を再現可能であると考えられる。

表-2 遠心実験装置の主な仕様

Geotechnical centrifuge	
Maximum Acceleration	200G
Platform radius	2.64m
Pay load	At 100G 1000kg
	At 200G 500kg
	Width 1000mm
Platform radius	Depth 1000mm
	Height 800mm
	Power consumption
Electrical sliprings	Measurement 33
	Electric power 10
Data acquisition	192ch of
	transducers are available

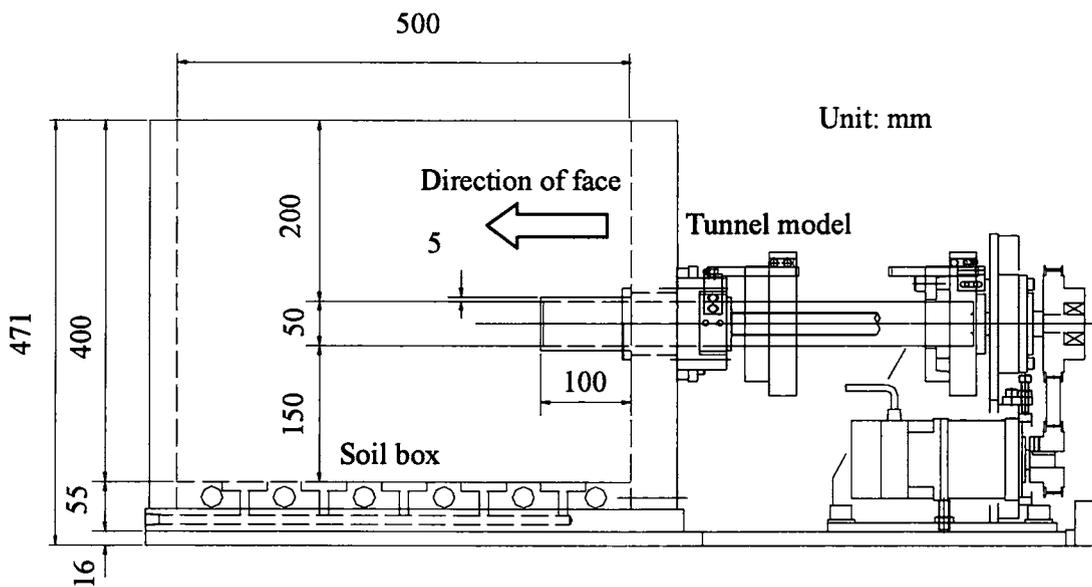


図-1.9 遠心実験用トンネル引抜き実験装置 (側面図)

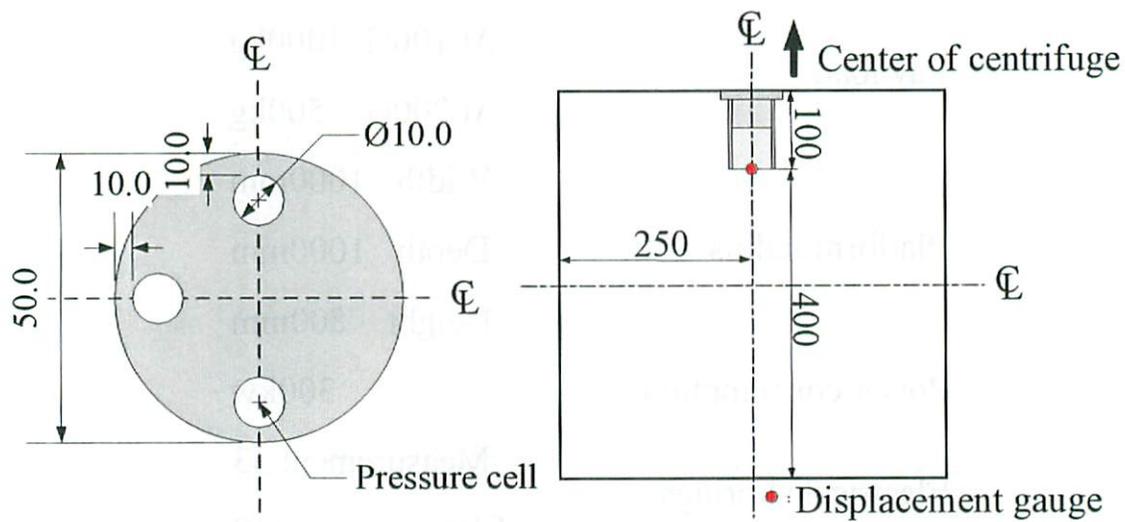


図-1.10 土圧計・レーザー変位計設

表-1.3 遠心模型実験ケース

Test case	Overburden ratio	Centrifugal acceleration	Pull-out length	Relative density
CASE 5	2D*	50G	15mm	80%

(\* ) 1D: Diameter of tunnel 50mm

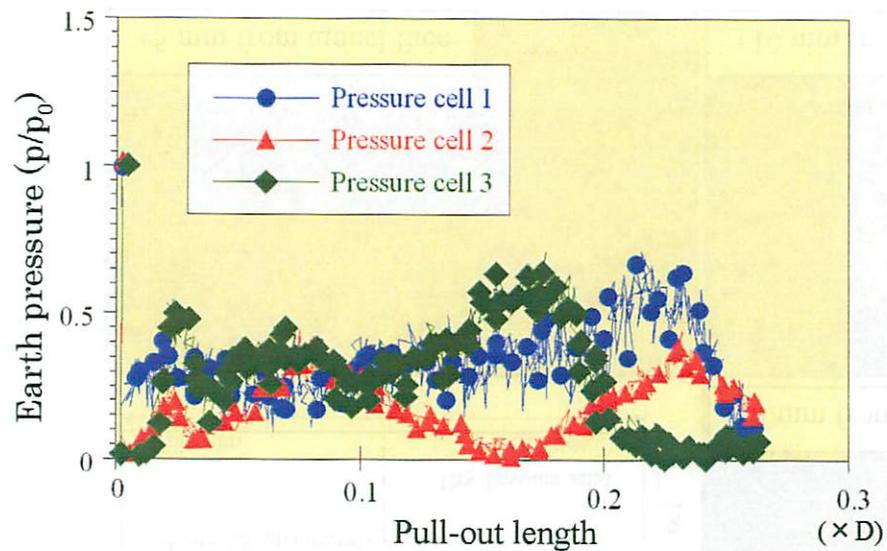


图 - 1.11 切羽面作用土压

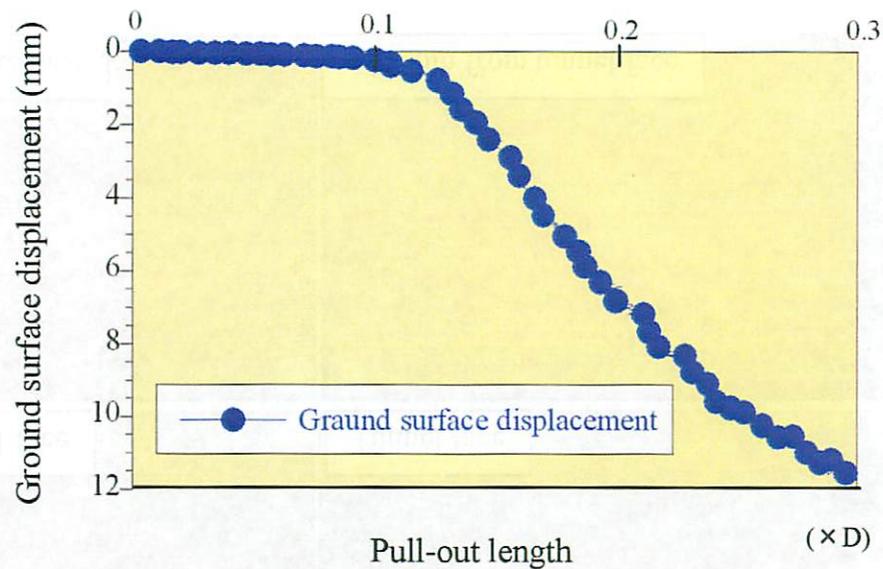


图 - 1.12 地表面沈下量

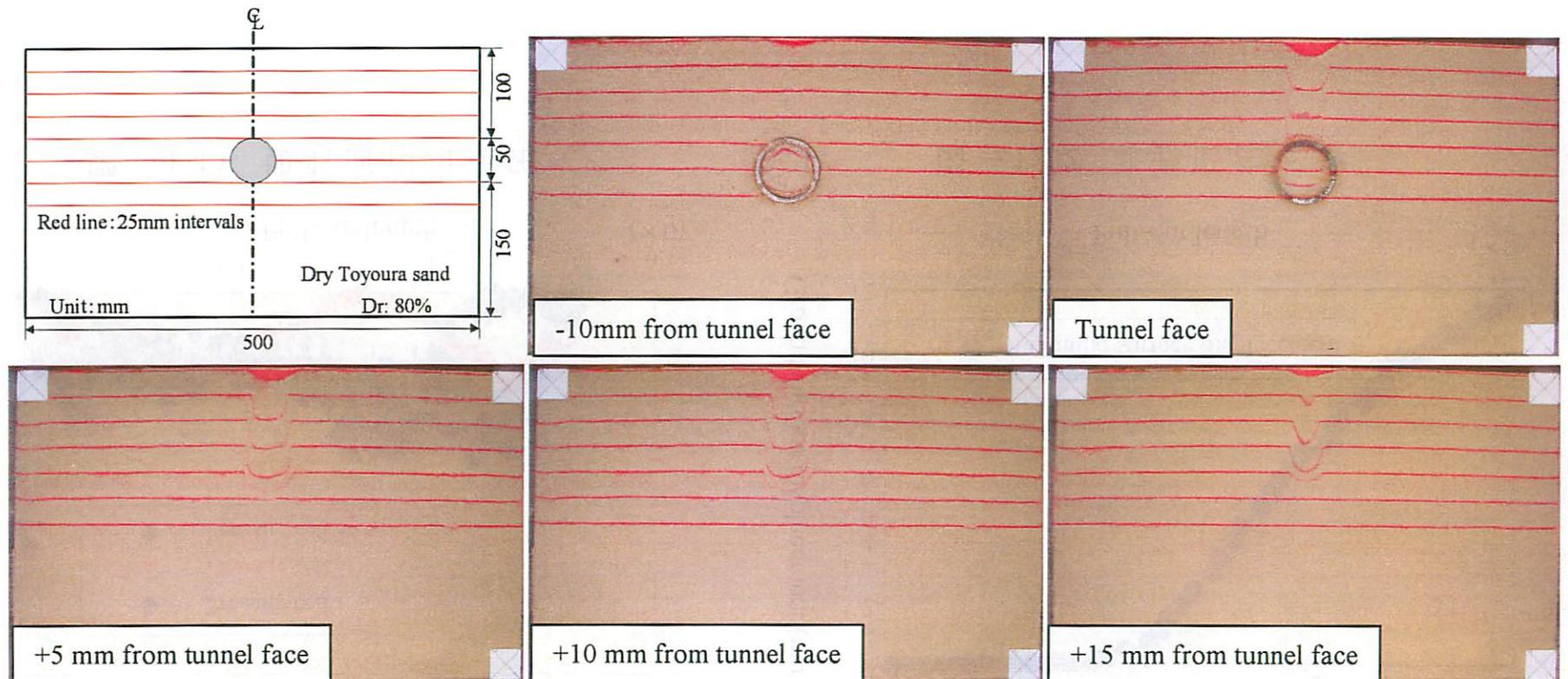


写真-1.2 実験後横断面観察状況

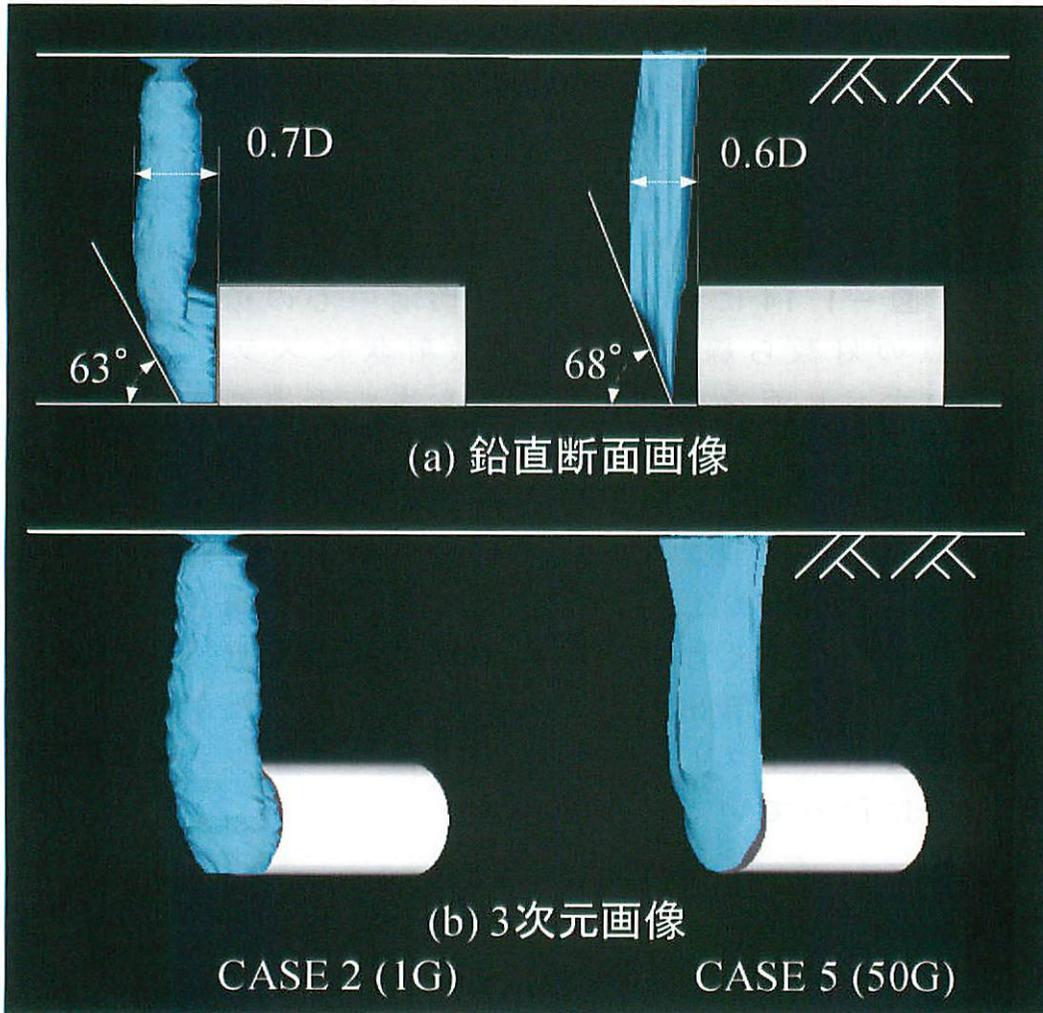


図-1.13 CT実験結果と遠心実験結果の比較

## 4. 安定解析モデルによる崩壊機構の評価

### 4.1 基本的考え方

これまでの X 線 CT を用いた模型実験および遠心模型実験による検証により，切羽前方すべり面は，トンネル軸直角方向にスライスし，フィッティングを行うと，鉛直断面は対数ら線近似が可能であることを確認した．しかし，この場合，複数のスライスに対する対数ら線の原点が必要となり，結局 2 次元的な挙動を重ね合わせたにすぎず，3 次元的な挙動を有する切羽崩壊について極限釣合いによる安定性の検討を行う上で合理性に欠ける．文献 7) では切羽前方すべり面をトンネル軸直角方向にスライスし，モデル化を行っている．これに対し，本論文では CT 撮影より得られた 3 次元的な現象に基づき，図-1.14 に示すように，切羽中心の鉛直断面に位置する一点の対数ら線の原点から放射状にスライスした鉛直断面上のすべり面を対数ら線，トンネル天端高さの水平断面におけるすべり面形状を中央断面の緩み幅と切羽直径の  $1/2$  を半径とする楕円関数で評価可能であると仮定した．また，中心断面から切羽端部までの崩壊領域を放射状に 50 分割し，全ての断面に対し，トンネル天端位置を始点に底部でもっとも誤差が小さくなる一点の対数ら線の原点（座標値）を繰返し計算により算出した．ここでは，求めた対数ら線と円筒座標系にスライスした CT 断面画像のフィッティングを試行錯誤的に行っている．

### 4.2 結果と考察

図-1.15 に検討した放射状スライス断面画像の位置を示す．ここでは  $r$  軸より  $\theta$  方向に (a)  $90^\circ$ ，(b)  $70^\circ$ ，(c)  $60^\circ$ ，および (d)  $50^\circ$  の 4 断面における検討結果について示す．図-1.16 は拘束圧の違いによる 3 ケース (CASE 1, CASE 3 および CASE 4) について，上記 (a) から (d) の放射状の鉛直断面における画像を示すと共に，それぞれの崩壊領域のすべり線をモデル化する対数ら線を示している．これら画像を解析することにより，それぞれの対数ら線の原点座標を求めると表-4 に示すとおりである．ここでの座標は，トンネル天端中心を原点として  $Y$  方向はトンネル掘削方向を示し， $Z$  方向は鉛

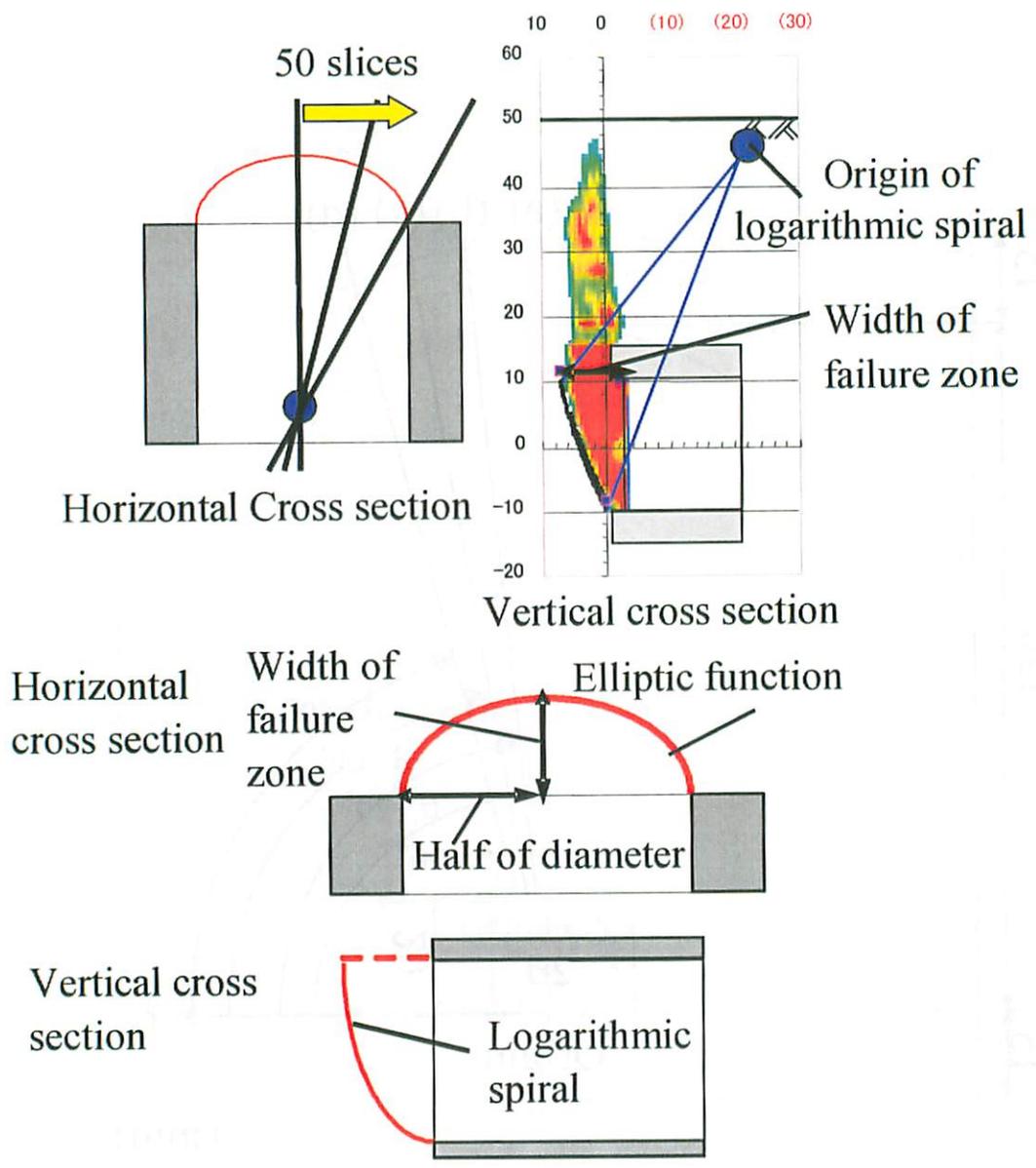


図 - 1.14 崩壊領域のモデル化

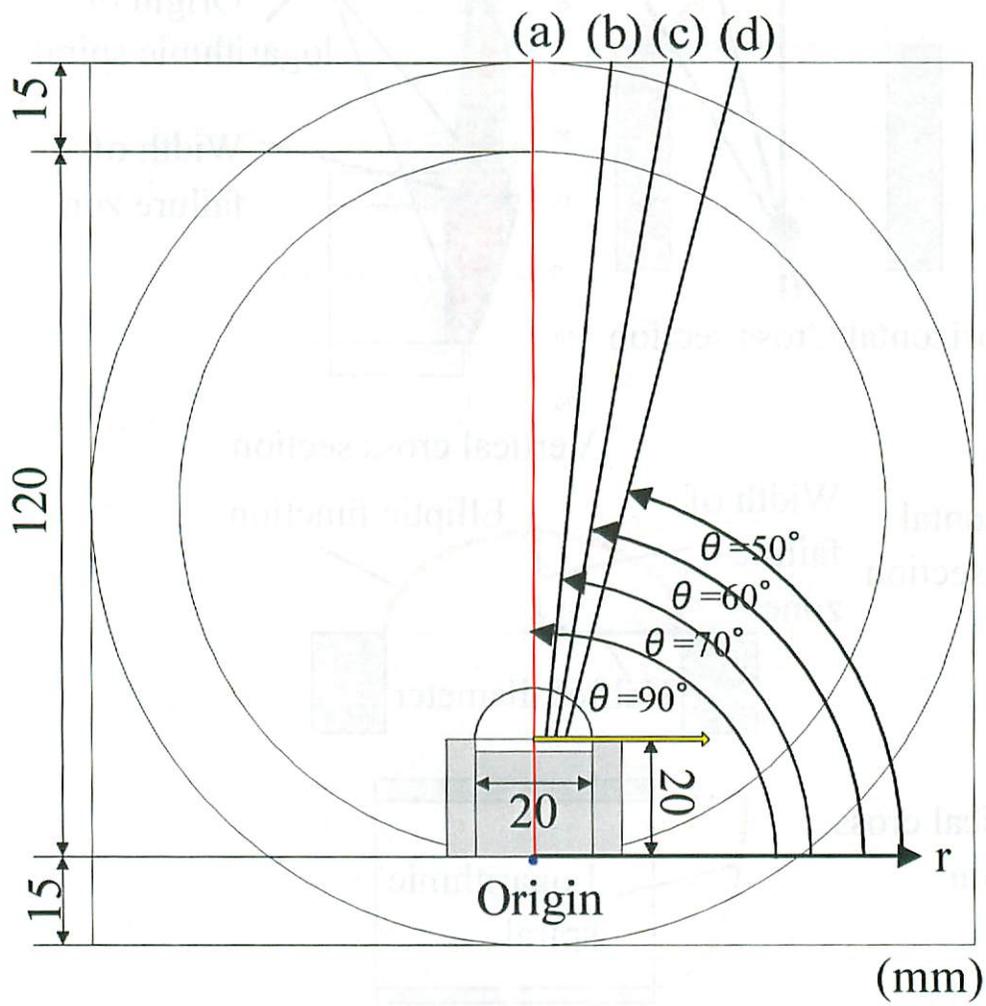


図 - 1.15 放射状断面スライス位置

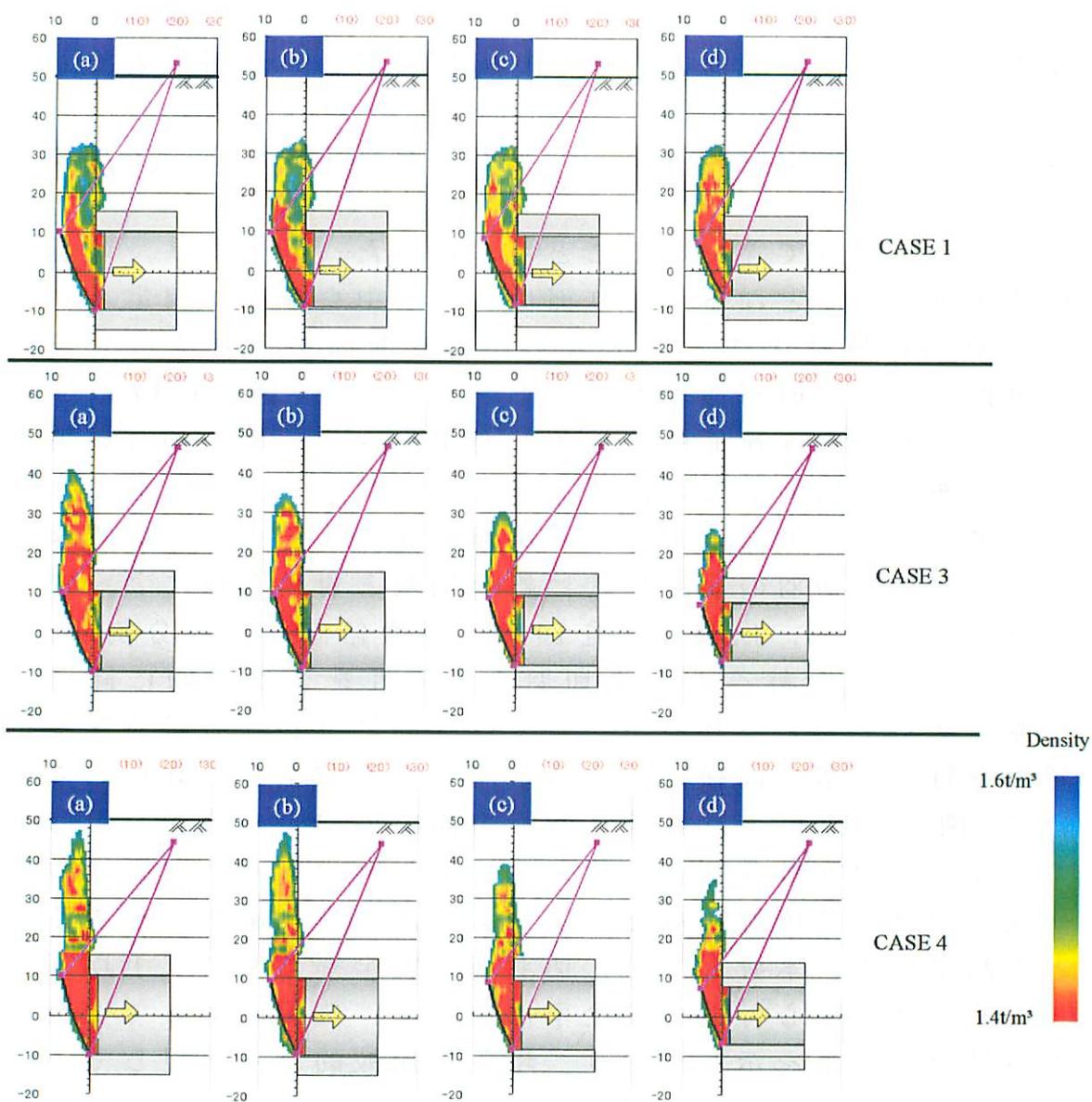


图 - 1.16 鉛直断面画像

表 - 1.4 画像分析結果

Test case	width of	Origin of	
	failure zone	logarithmic spiral	
	r (mm)	r (mm)	Z (mm)
CASE 1	8.8	-20.0	43.3
CASE 2	7.4	-21.0	36.6
CASE 4	7.0	-21.0	34.4

直上向きを正としている。この結果、緩み幅及び対数ら線の原点において、切羽前方のすべり線はいずれの断面位置でもよく合致することが確認できた。また、上載圧が大きくなるほど、天端での緩み幅は小さくなり、原点座標はトンネルに近づき、

すべり面が立ってきていることもわかった。以上より、切羽崩壊領域の境界となるすべり面は、切羽中央断面に固定された原点から放射状にスライスした鉛直断面でそれぞれ対数ら線によって近似可能であることがわかった。図-1.17はこれらすべり線を3次元的に拡張した提案3次元極限釣合いモデルである。切羽前方の崩壊土塊を、トンネル天端を通る水平面で2分し、上部の土塊を水平面に作用する土圧 $q$ に置き換えている。切羽の崩壊形状は楕円関数と対数ら線によって評価できたため、崩壊土塊を図中に示す鉛直な柱に分割し、力の釣合い式を解くことで切羽の安定性を3次元的に評価可能であると考えられる。ここでは一般に行われる斜面安定解析を行う方法と同様に、各スライスでの安全率を計算している。図-1.18はトンネル横断面方向での安全率分布を示している。安全率は分割法（簡便法）により求めた<sup>2)</sup>。既往の研究<sup>9)</sup>では、数値解析などにより切羽面で安全率が分布するとされている。本研究でも、切羽面の安全率はすべて1以下であり、切羽中心付近の安全率は小さく、位置によって安全率が異なる結果を示しており、現象を比較的よく表現している。しかし、本モデルを用いる場合、トンネル中央断面天端高さにおける緩み幅を決定する必要があるが、同一地盤条件であっても、上載圧によってその値も異なってくる。本解析では実験結果を基にこれを決定しているが、解析をより現実化するためには、地盤条件の異なるいくつかのケースについても同様の分析を実施し、設計的にトンネル直径に対してどの程度の緩み幅を取れば合理的かを検討する必要があるが、これについては今後の課題である。

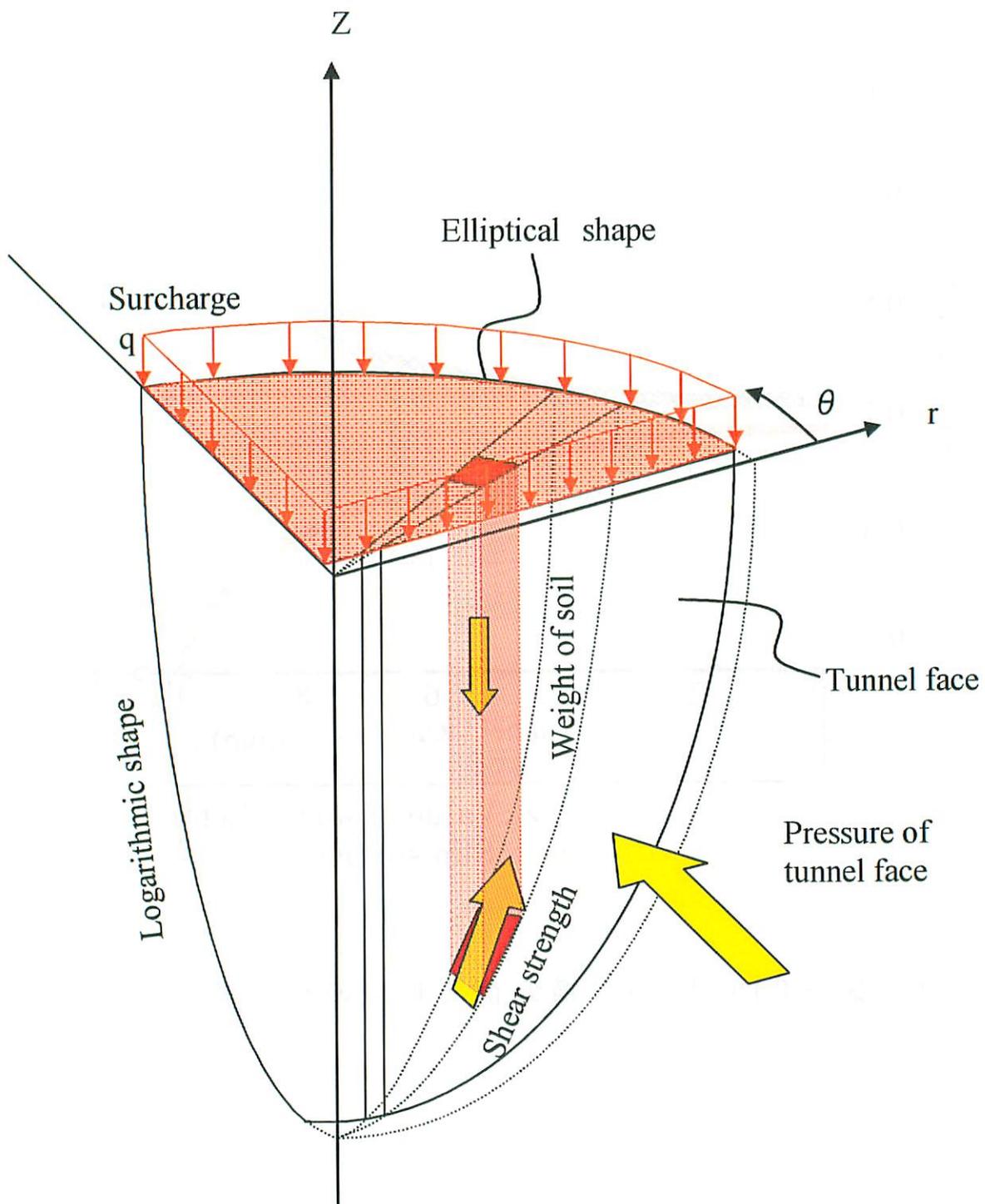


図-1.17 崩壊領域極限釣り合い3次元モデル

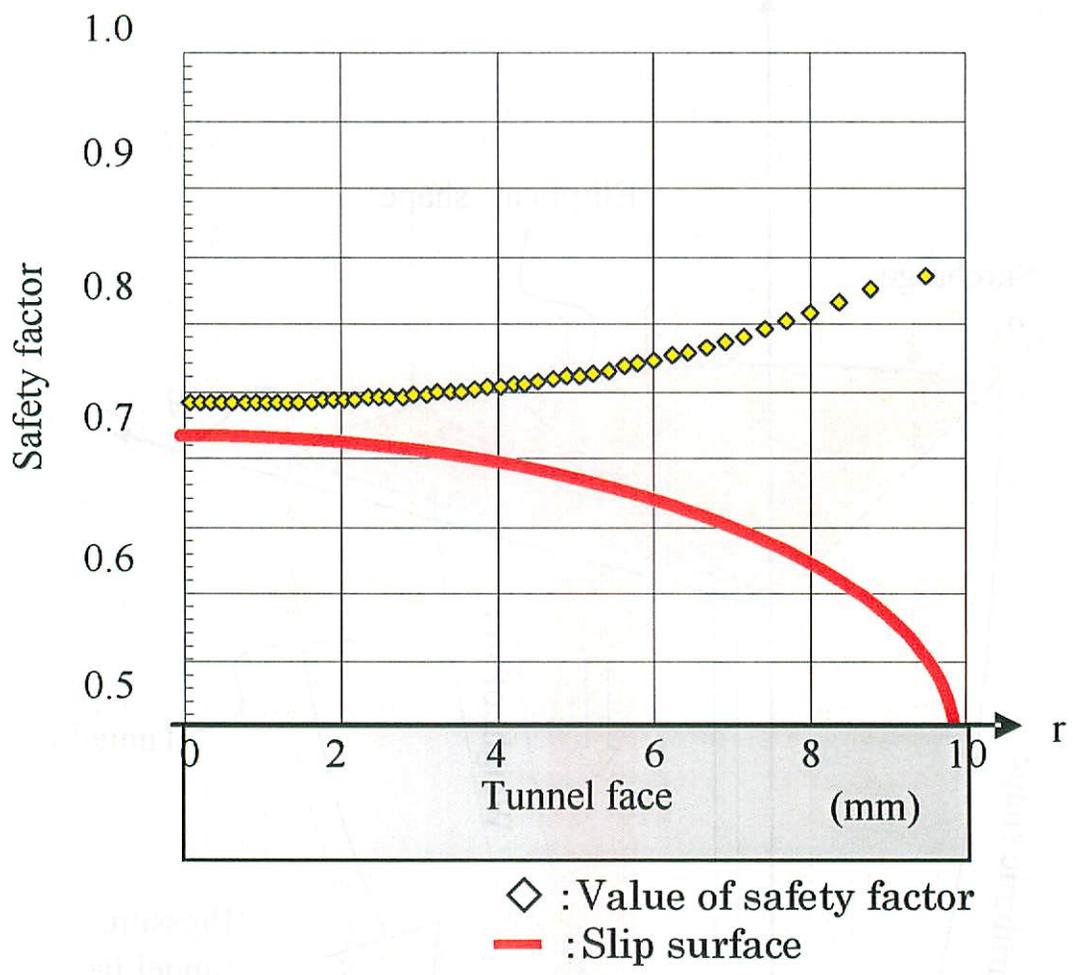


図 - 1.18 トンネル横断面方向での安全率分布

## 5. 結 論

本論文では，産業用 X 線 CT 装置とトンネル引抜き模型実験装置を連動させた実験システムを用いて，トンネル切羽崩壊機構の解明とその評価を行った．以下に結論を列挙する．

- (1) 3次元切羽崩壊領域の境界となるすべり面は，鉛直方向には対数らせん線，水平方向には楕円によって評価することが可能であることがわかった．
- (2) 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．
- (3) 遠心模型実験を実施し，遠心場における破壊機構は 1G 場における CT 実験結果と類似しており，CT 実験より得られた結果の妥当性を確認した．
- (4) 本論文の実験条件では，トンネル天端位置でのすべり面の幅は  $0.6D \sim 0.7D$  になることを確認した．
- (5) CT 実験より得られた 3次元崩壊機構を基に，対数らせん線と楕円関数に基づく 3次元安定解析モデルの提案を行った．またこれを用いて切羽安定解析を実施し，比較的良好な結果が得られ，提案モデルの有効性について確認した．

本論文では，X 線 CT 装置を用いて模型地盤内を可視化することにより，切羽崩壊機構について初めて 3次元的に考察すると共に 3次元安定解析モデルの提案を行った．実務での安定計算はその簡便性により中央断面での 2次元解析が適当であると考えられる．しかし大断面や互層地盤など切羽面内に顕著に安全率の分布が見られるような場合では，本論文で提案した 3次元解析モデルを用いることで，鏡ボルトなどの切羽補助工法を採用する場合の合理的な設計方法に展開できるものと考えられる．従って，今後は，本研究で得られた知見を基に，より合理的かつ機能的な切羽安定設計手法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， pp.117-129， 1999.
- 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，No.187， pp.95-108， 1971.
  - 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.
  - 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，No.517， pp.105-115， 1995.
  - 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-3次元歪解析によるアプローチ，土木学会論文集，No.547， pp.87-96， 1996.
  - 7) 永谷英基，大谷 順，高野大樹：トンネル切羽の3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.
  - 8) 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.
  - 9) 杉江茂彦，吉岡尚也，藤原紀夫：大断面トンネルの周辺時山の3次元挙動解析，第 27 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集， 1996.

## 第2節

### 新たなトンネル掘削技術の開発

## 第1章 序論

近年、シールドトンネル工法における施工技術の進歩は目覚しく、長距離化、大断面化、高速施工化が進んでいる。しかしこれら施工技術の向上に対し、掘削に伴う土砂の排出が大きな問題となっている。大石ら 1) は、土の大変形問題である切削現象の解明を目的として、X線ラジオグラフィ法を適用した平刃モデルによる2次元水平切削模型実験を実施している。ここでは、土中の内部変形状態をX線写真に透過撮影し、土中に生じたせん断破壊面を視覚的にとらえると共に、様々な切削条件における平刃周辺土の変形挙動について、埋設された多数の鉛標点の位置座標変化から、土の変位やひずみ分布を定量的に評価することで、せん断破壊面の発生・発達機構についての解明を試みている。特に、切削角度が切削機構に及ぼす影響として、その角度が大きいほど少ない変位で地盤は破壊に至ることや、切削角度が小さいほどせん断破壊面は直線に近く、角度が大きくなると刃先付近で曲線形状になることなどを述べている。畑村ら 2) 3) は土の切削機構について、小型土槽を用いた切削実験を実施し、写真撮影による2次元モデルとして現象を解明している。ここでは、切削現象で生じる土中および切羽面上それぞれの応力状態や、切削抵抗の大きさ・方向などについて検討し、直線切削における切削機構について示している。以上の研究においては、そのほとんどが現象を2次元下で評価しており、切削現象を3次元下で可視化した実験は皆無である。また、同様に遠心模型実験において実規模応力レベルで評価を行った例もこれまでほとんどないのが現状である。

一方、地表面変形を極力抑えながらトンネルを構築するシールドトンネル工法でも、海底地盤などの地表面変形がある程度許容される条件下においては、土砂を取り込まず、シールド切羽を圧入することで、無排土あるいは低排土掘削によるトンネル構築も十分可能であると考えられる。この場合、地山を強制的に押し込むことで、切羽前方地盤内に受働破壊現象が生じるが、どの程度の切羽荷重が必要となるのか、あるいは周辺地盤に与える影響など、そのメカニズムについては全く未知のものである。大谷ら 4), 5), 6), 7) は、地盤材料を対象としてX線CT法の適用に関する一連の研究を実施している。たとえば一軸圧縮過程における地盤材料の内部可視化及びその定量的評価や、三軸圧縮過程における土質材料の破壊現象の評価について、X線CT用三軸圧縮試験装置を用いて砂質土の破壊現象について定量的に考察している。またトンネルの切羽安定機構の解明とその評価についてもX線CTを用いた研究についてす

でに報告している 8)。

本研究では、新たなトンネル掘削技術としての無排土圧入工法の開発を目的に、産業用 X 線 CT スキャナに搭載可能なトンネル押込み模型実験装置を開発し、受働破壊領域を 3 次元下で可視化する。また様々な切羽形状が受働破壊領域に及ぼす影響について定量的な評価を試みる。加えて、同様のトンネル押込み模型実験を遠心場で行うことにより、実規模応力レベルでの切羽作用荷重と地盤変状の評価についても試みる。最終的には、これら実験から得られた知見をもとに、新たな無排土圧入シールドトンネル工法の提案を行うものである。

## 第2章 X 線 CT を用いた模型実験

### 2.1 X 線 CT 装置

本研究のように積極的に切羽を圧入する場合、過推力による切羽前方地盤に生じる受働領域の評価が重要である。本章では、トンネル切羽の押込みによる切羽前方地盤に生じる受働領域を 3 次元的に把握すべく、X 線 CT 法を用いた模型実験を行った。

使用した産業用 X 線 CT スキャナ装置は、CT 撮影を開始するとまず X 線発生装置と検出器の間を試料台が並進移動する。この間に X 線が照射され、ある一方向からの投影情報が得られる。試料台が端点に到着すると  $30^\circ$  回転し、続いて並進移動するため、また新たな方向からの投影情報が得られる。これを 6 回繰り返すことで  $180^\circ$  からの情報が蓄積され、さらにこれらのデータを対称処理することにより、全周方向から投影したと見なされて断面画像が構成される。

CT 画像は、CT 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）は白く、CT 値の低い領域（低密度領域）は黒く、256 階調の白黒濃淡レベルで表示される。CT 値は材料の X 線吸収特性により定義される。本装置においては水はゼロとなり、空気は -1000 となる。図-2.1 は本研究で使用した豊浦砂の CT 値－乾燥密度関係を示したものである。これにより CT 値と豊浦砂の乾燥密度には正の相関関係があることが確認できる。したがって、得られる画像内部の CT 値の増減は、土粒子の移動によって生じる密度変化と捉えることができる。しかし、CT 値の値自体は絶対的なものではないことに注意しておきたい。CT 値はあくまでも相対的な指標として用いなければならないと共に、各材料、および用いる被検体の大きさについて、図 2-1 で示すような基本関係を求め

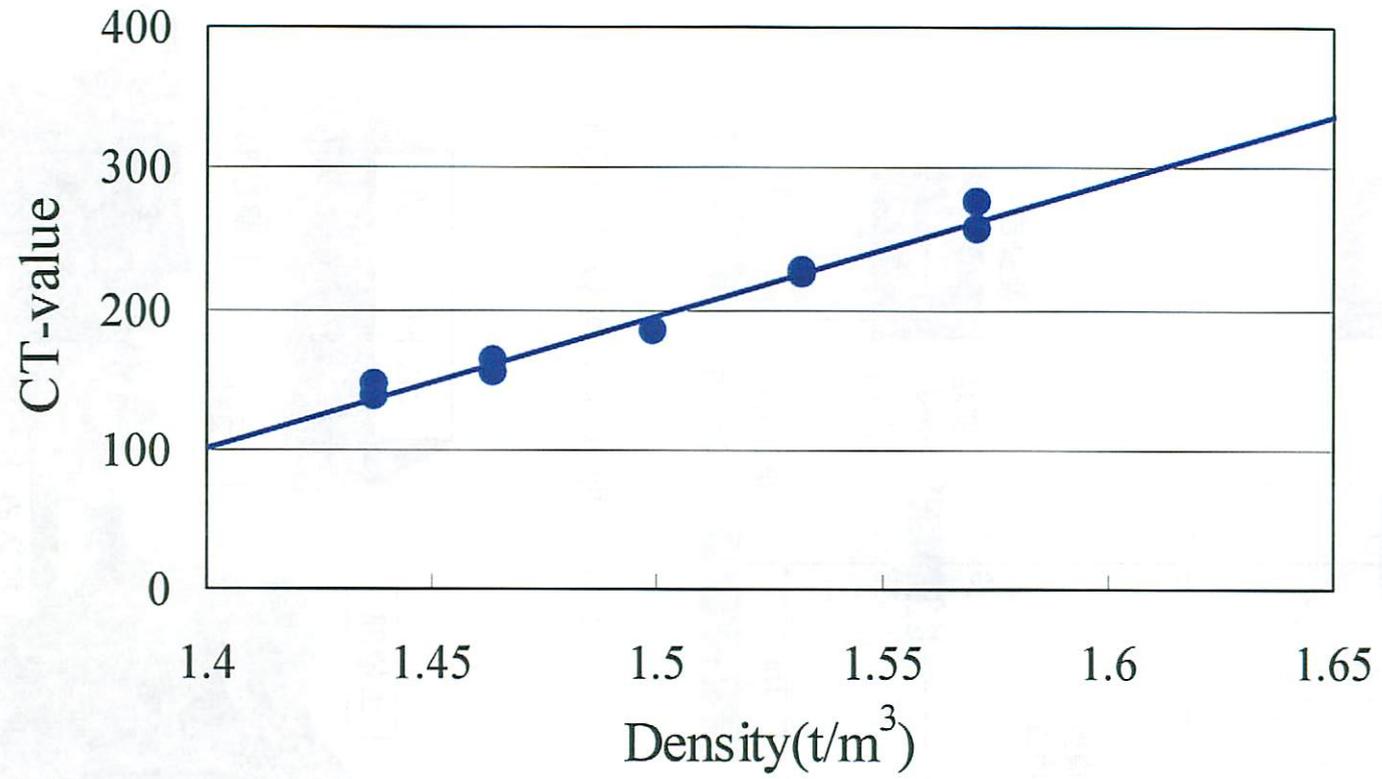


図-2.1 CT値と乾燥密度の関係

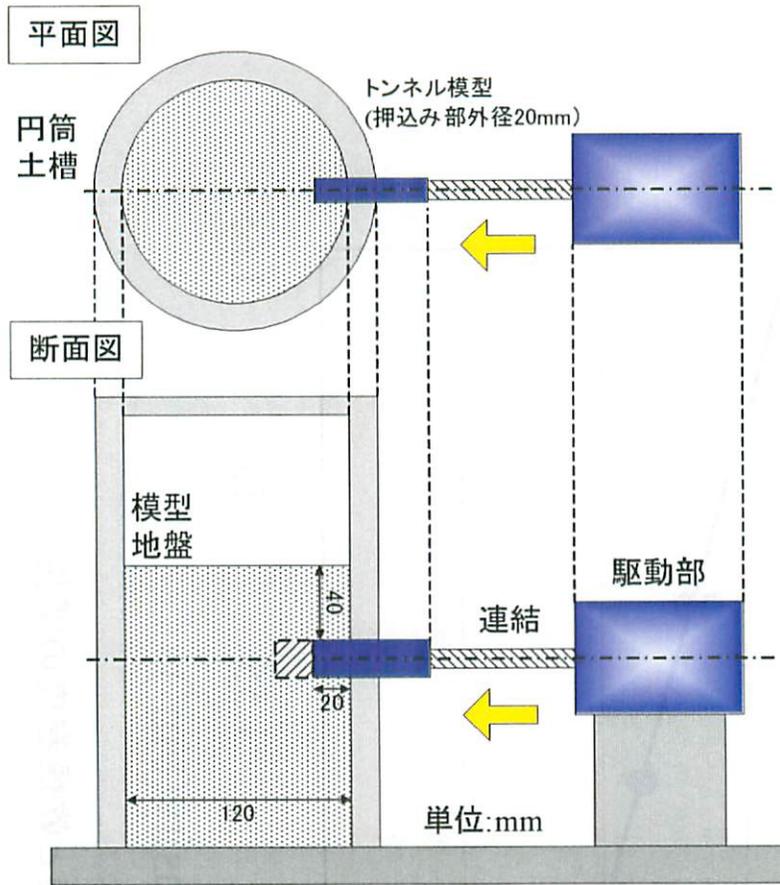


図-2.2 トンネル押し込み実験装置の概略

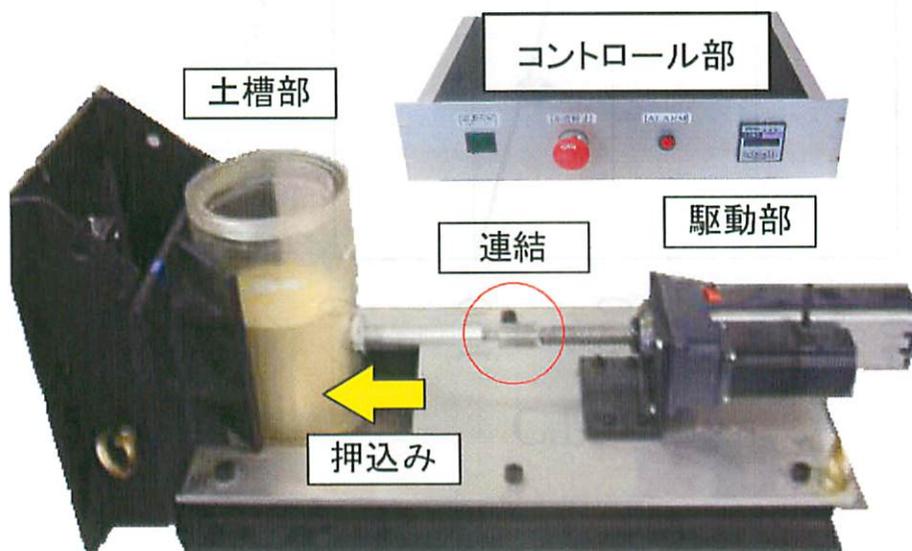


写真-2.1 トンネル押し込み実験装置

ておく必要がある。なお、X線 CT スキャナに関する詳細は参考文献 7) を参照されたい。

## 2.2 X線 CT 専用トンネル押し込み実験装置

図-2.2 にトンネル押し込み実験装置の概略図、また、写真-2.1 に装置の写真を示す。押し込み実験装置は、土槽部、駆動部、コントロール部からなり、コントロール部において押し込み量と押し込み速度の設定を行う。土槽部は、外径 150mm、内径 120mm、高さ 300mm のアクリル製円筒土槽にトンネル模型が取り付けられている。トンネル模型は、外径 30mm のカバー部と、外径 20mm の押し込み部から構成されており、材料は、X線透過能力を考慮し、アルミ材とした。トンネル押し込み後には、駆動部とトンネル模型を切り離し、土槽部のみを X線 CT 撮影室に移動し、撮影を行う。なお、本装置は著者らが前の研究(参考文献 8)) で用いた装置と同じものであり、今回はその載荷方向を、受働破壊を対象としているため、地盤側へ押し込むよう改良したものである。

## 2.3 実験方法と実験ケース

実験手順を図-2.3 に示す。まず、円筒土槽内に模型地盤を作成する。模型地盤は、豊浦乾燥砂を多重ふるい(425 $\mu$ 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作成した。地盤作成後、土槽をトンネル押し込み実験装置の所定の位置に設置し、駆動部と結合させた後、押し込み実験を行った。押し込み実験終了後、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、CT撮影を行った。撮影層厚は2mmピッチとし、撮影範囲は土槽底面から地表面まで行っており、撮影した水平断面画像に画像処理を施し、再構築することにより三次元画像が得られ、これにより、任意の断面での破壊受働領域の分析を可能とした。

実験ケースの一覧を表-2.1 に、また実験に用いた切羽模型を写真-2.2 に示す。切羽模型は円形切羽、円錐短切羽、円錐長切羽の3種類を用意した。本研究では、押し込み量をトンネル高さ1D分の20mm、土被りを2Dとし、一般的なシールドトンネル切羽である円形の切羽形状を基本ケースとして、以下に示す内容について実験を実施した。

- 1) 押し込み量の違いによる受働領域の発達過程の検討：押し込み量を基本ケースの20mm(Case3)に対し、5mm(Case1)、10mm(Case2)と変えることで、受働領域の発達過程について分析を行い、受働領域の形成メカニズムについて検討した。

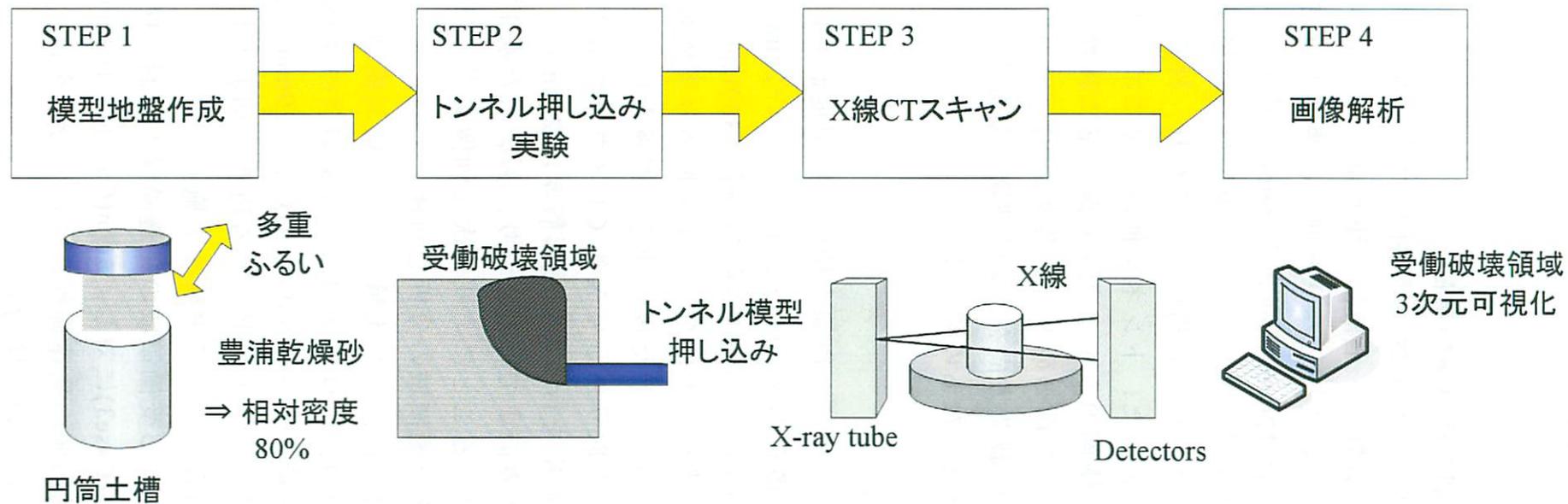


図-2.3 CT値と乾燥密度の関係

表-2.1 CT実験ケース

Test Case	切羽形状	押込み量	土被り	押込み速度	相対密度
		mm	D* : 20mm	mm/sec	%
Case1	円柱	5	2D*	0.1	80
Case2		10			
Case3	円柱	20	2D*	0.1	80
Case4	円錐(短)	20	2D*	0.1	80
Case5	円錐(長)				

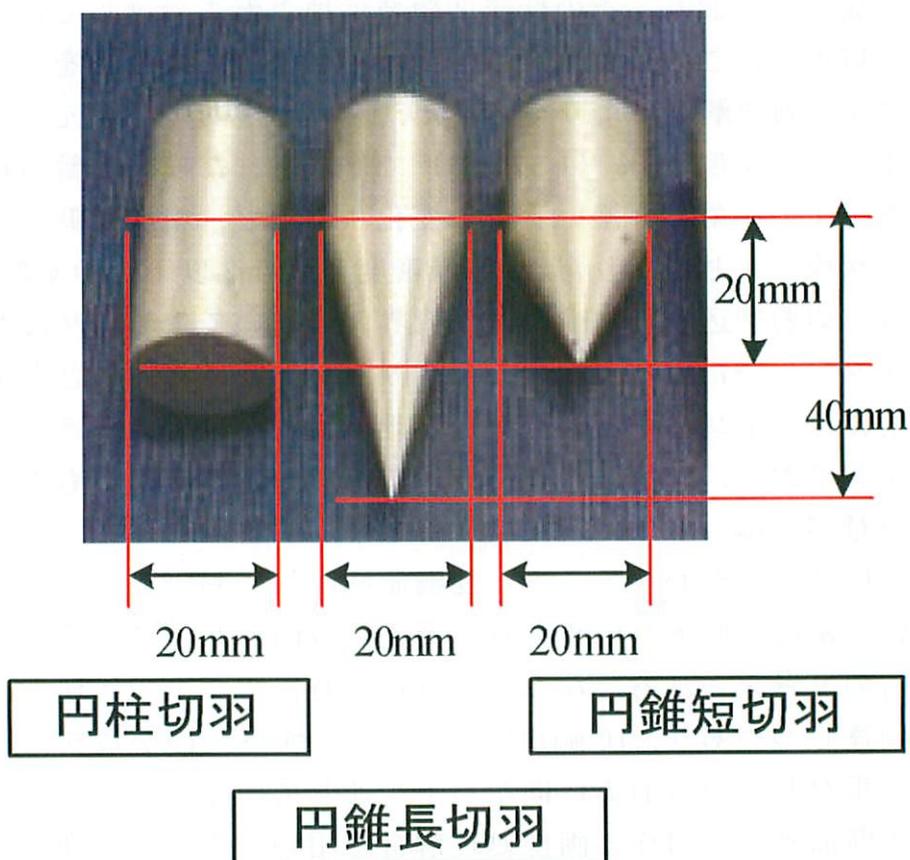


写真-2.2 切羽模型

- 2) 切羽形状が受働領域の形成に及ぼす影響：基本ケース(Case3)に対し，切羽形状を円錐短(Case4)，円錐長(Case5)と変えることで，切羽形状が破壊領域に及ぼす影響について検討した。

## 2.4 実験結果および考察

### (1) 受働領域の発達過程

ここでは，シールド工法において通常切羽として用いられている円形切羽において，押込み量を 5mm, 10mm, 20mm とした Case1, Case2, Case3 の実験結果を対象とし，これら 3 ケースを比較することで切羽前方地盤に生じる受働領域の発達過程について検討する。

図-2.4 に CT 断面画像の一例として，CT 撮影により得られた，Case3（押込み量 20mm）のトンネル底面から地表面（切羽天端+2D 位置）までの 5 断面における CT 画像を示す。トンネル切羽の前方に円状の低密度領域が形成されており，その低密度領域は地表面まで達していることがわかる。以後は，この低密度領域を受働領域と称して考察を行う。

図-2.5 は画像解析により得られた，円筒土槽内の 2 次元水平断面画像である。相対密度 80% (1.57t/m<sup>3</sup>) で作成された模型地盤の初期状態が水色を示すのに対し，濃い青色に変化するほど，密度が低下，すなわち緩んだ状態を示しており，最小乾燥密度 1.34t/m<sup>3</sup> 以下を示す部位もある。これは，切羽押込み時に受働領域境界面において生じたせん断に伴うダイレイタンスーによって緩み，すべり面が形成されることを示している。全体的には，トンネル下端位置から地表面にかけて，ほぼ円状にすべり面が生じており，すり鉢状の受働領域が形成されているものと考えられ，押込み量が 5 mm, 10 mm および 20 mm と増加するに従って，すべり面も発達していくことがわかる。また受働領域内部においても押込み量の増加に伴い，密度の低下が確認され，受働領域内においても徐々に乱されて緩むものと考えられる。なお 5 mm 押込み時点で，すでに地表面にすべり面が到達しつつあり，10 mm 以降は，新しいすべり面が最初にできた受働領域と重なりながら前方に向かって発達している。

水平断面画像と同様に画像処理解析を用いて 3 次元画像を作成し，トンネル中心位置，並びにトンネル側面位置での 2 次元鉛直縦断面画像を図-2.6 に示す。押込み量 5mm 時点で切羽下端から発達するすべり面は地表面に到達しつつあり，切羽面から前方に 3.5D まで影響が及んでいる。押込み量 10mm 以降の Case2, Case3 では，さらにすべり面が下端から新

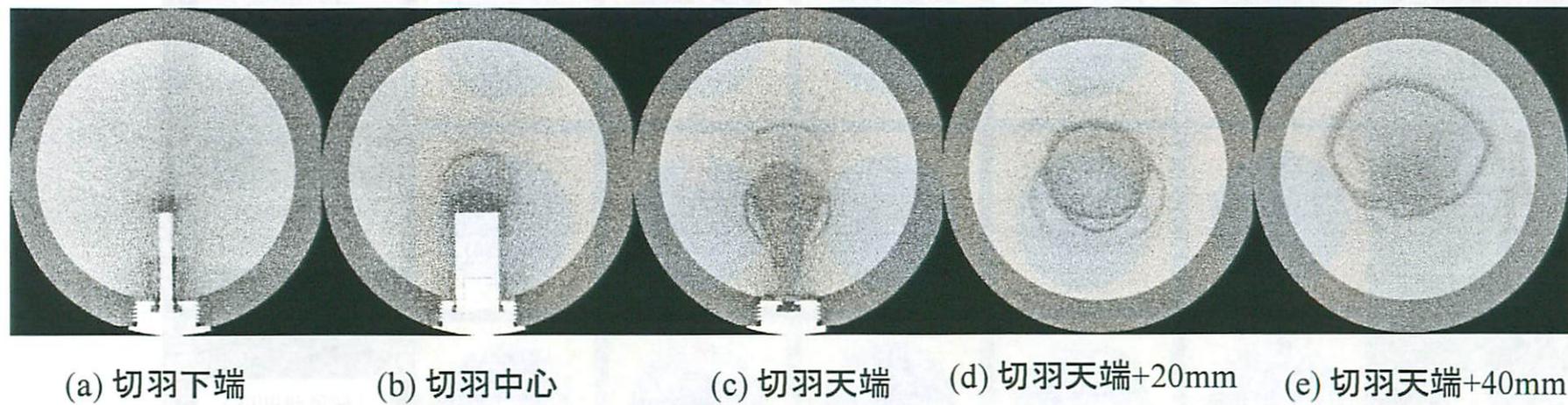


図-2.4 Case3のCT原画像

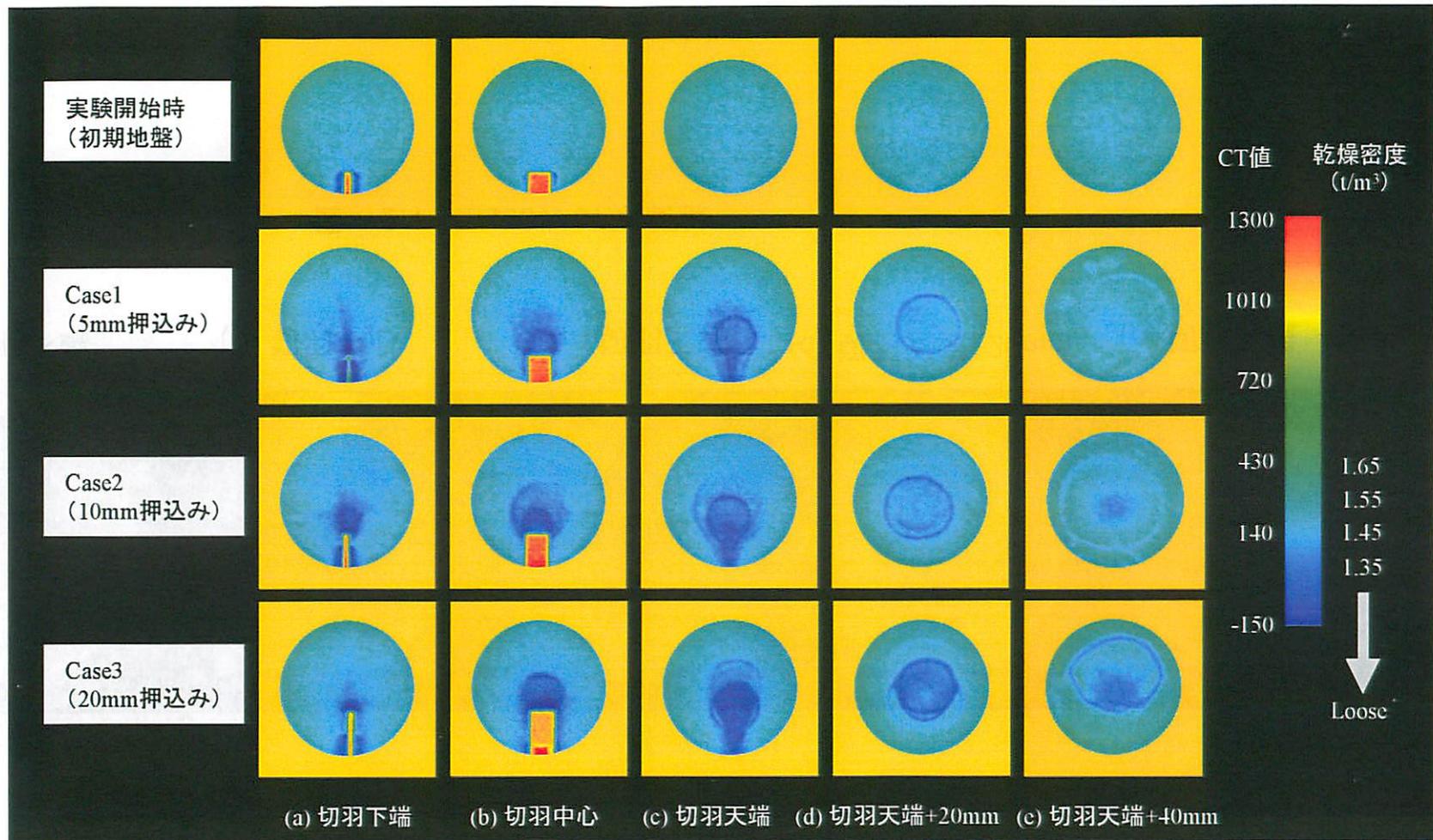


図-2.5 2次元水平断面画像

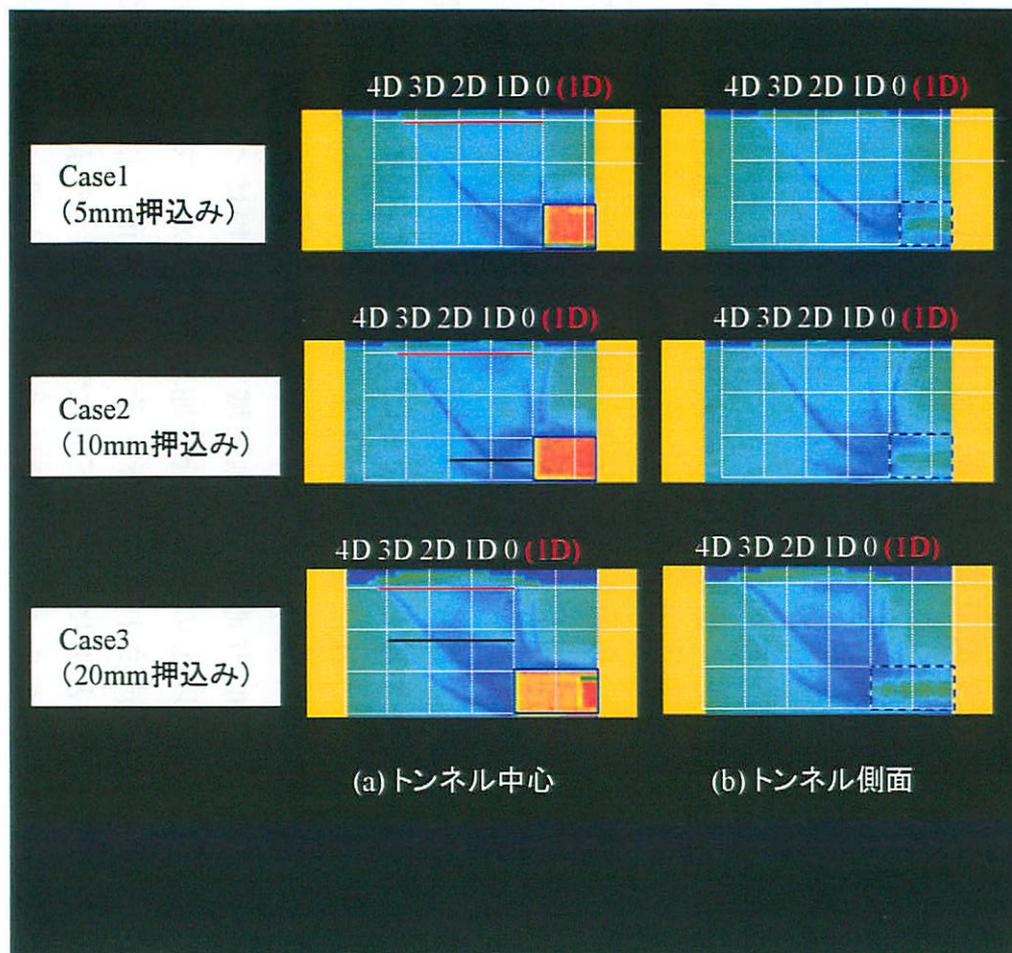


図-2.6 2次元鉛直縦断面画像

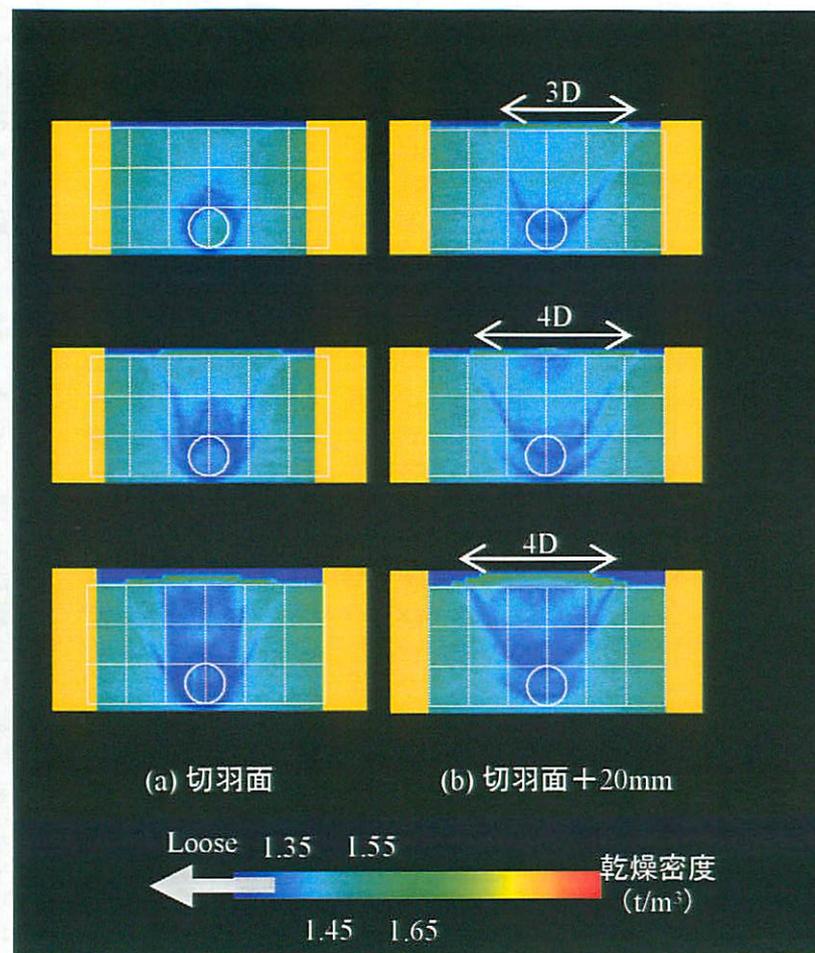


図-2.7 2次元鉛直横断面画像

たに発達していることが伺え、切羽面前方の受働領域については Case1 (5mm 押込み) と同様 3.5D の範囲まで影響が及んでいる。また、トンネル側面においても中心と同様の傾向を示しており、奥行き方向にも断面下端からすべり面が発達していることがわかる。図-2.7 はこの鉛直断面についてトンネル横断方向での画像を示している。ここでも切羽面から前方に向かって、V 字状にすべり面が拡がるように発達しており、押込み量 10mm 以降には下側から新たなすべり面が生じ、すべり面が上下 2 層となっている。また切羽面から前方 20mm の位置では、地表面において幅 4.0D~4.5D にわたって受働領域が及んでいることがわかる。ここで各ケースの切羽前方における初期すべり面と新すべり面内 (つまり初期受働領域と新受働領域) の体積を算出した結果を図-2.8 に示している。体積算出範囲としては、トンネル下端から、図-2.6 の赤線 (初期すべり面) と黒線 (新すべり面) で示した位置の高さまでとしている。初期受働領域の体積は初期すべり面が到達し終えた 10mm 押込み時までは増加しているが、20mm 押込み時は、若干減少している。これは新すべり面が形成されていることで初期すべり面が影響を受けて直線的になったためと考えられる。新受働領域に関しては、20mm 押込み時まで増加し続けている。全体的な受働領域の体積 (初期+新) についても併せて評価すると、10mm 以降はほぼ一定値 (もしくは微増加傾向) である。この結果から、切羽下端から伸びる初期のすべり面が地表面まで達した後には、押込み量が増大しても、切羽前方地盤に常に一定範囲の受働領域が形成されていくことが推察される。

図-2.9 は、画像処理によりとくに密度低下が顕著な部位を抽出した、切羽前方受働領域の 3 次元特徴抽出画像

である。斜め上方及び上方から俯瞰した場合、押込み量が増加するのに伴い、受働領域境界のすべり面がすり鉢状に発達していくことがわかる。また、押込み量 10mm 以降においては、切羽下端から新たなすべり面が発達していることもわかる。さらに、トンネル中心位置ですり鉢状の受働領域を鉛直側面より観察すると、切羽前方において低密度の領域が発達していることがわかる。これは切羽が押込まれることで、切羽直近の地山がすべり面に沿って押し上げられるためと考えられる。

以上の結果をもとに、切羽前方地盤の受働領域の発達過程についてまとめると、少なくとも 5mm 以上の押込み量で地表面に向かってすべり面が生じ、受働領域が概ね形成され、その後、そのすべり面に沿って、受働領域が押し上げられるとともに、その下方に新たなすべり面が形成されるものと考えられる。またその影響範囲については、初期のすべり面

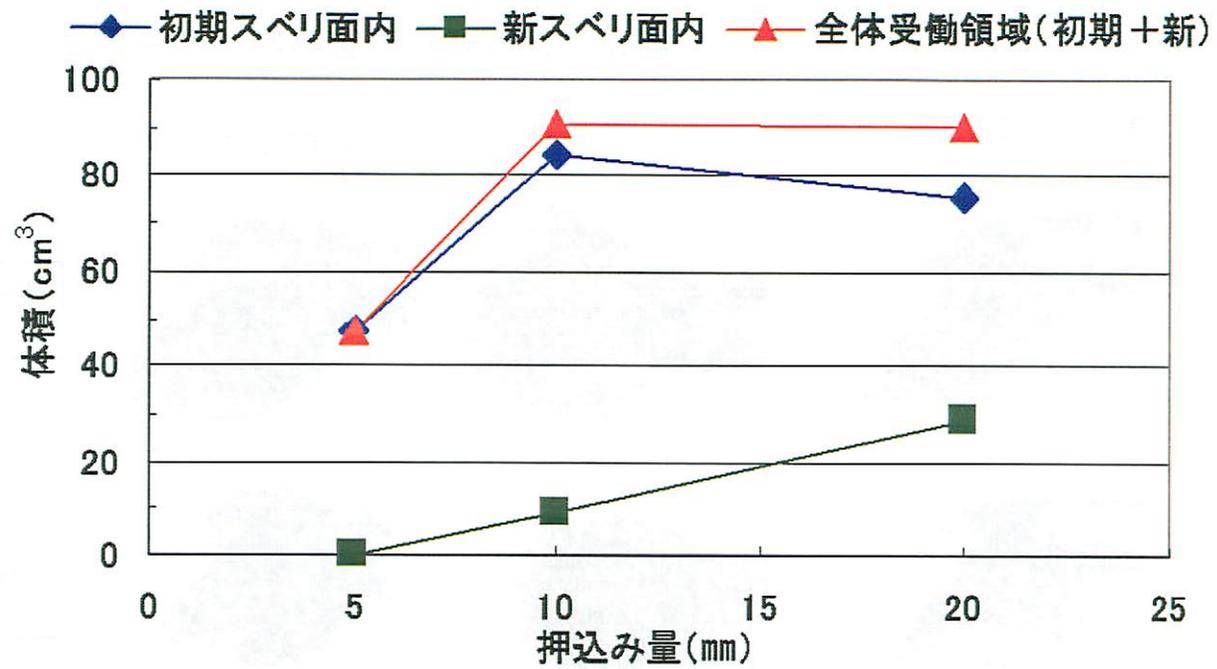


図-2.8 切羽前方受働領域の体積変化量

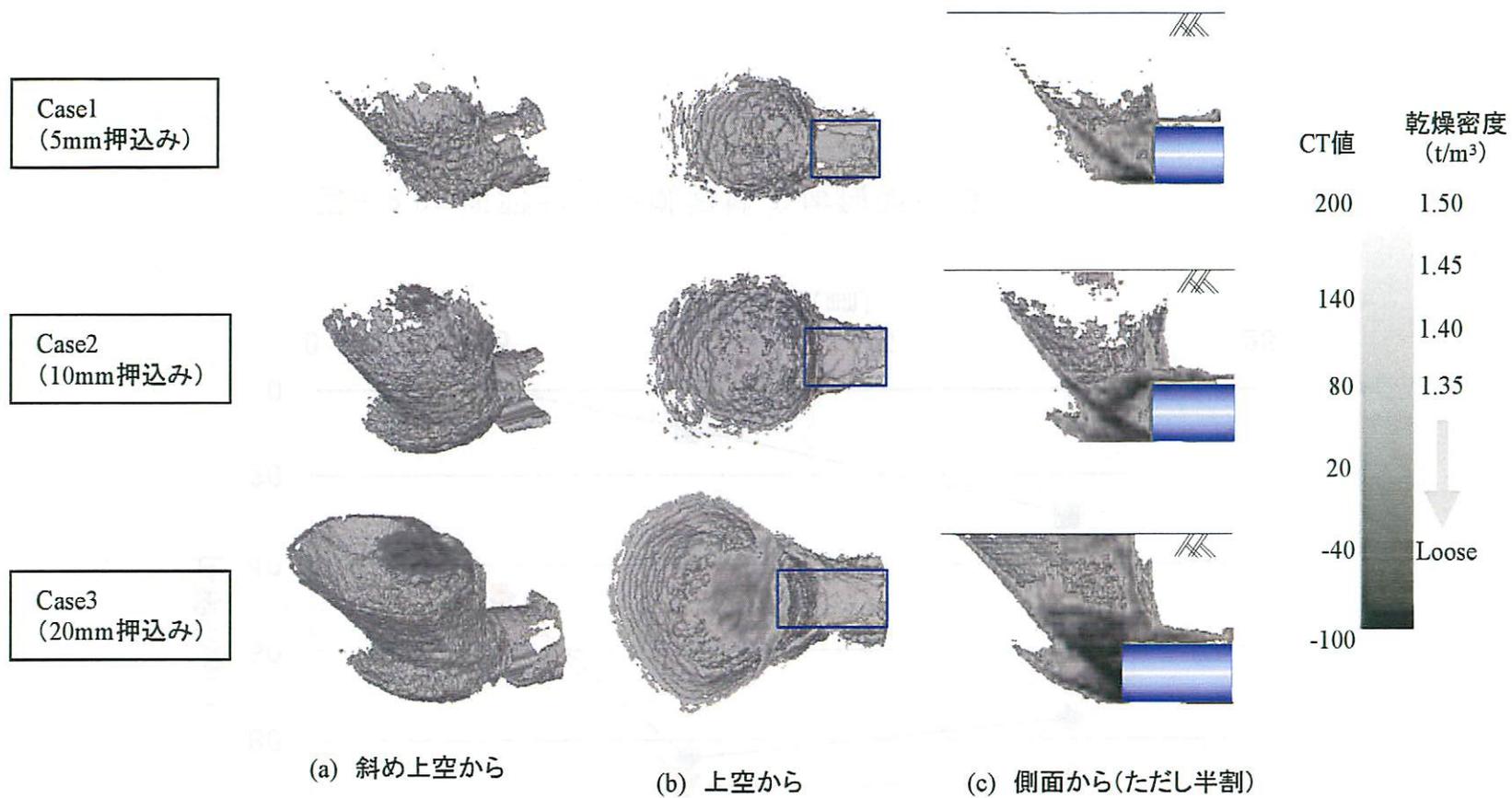


図-2.9 低密度受働領域の3次元画像

が形成されるまでは拡大し、その後は圧入量が増大しても切羽前方へほぼ一定の3.5D程度であると考えられる。

## (2) 切羽形状が破壊メカニズムに及ぼす影響

前節では、通常切羽として用いられる円形切羽について、切羽前方地盤に広がる受働領域を把握しながらその発達過程を考察した。ここではCase3の地盤条件と同様に土被り2D、押込み量20mmとし、切羽形状をCase3の円形切羽に対し、Case4（円錐 短）およびCase5（円錐 長）の3ケースにて実験を実施し、各切羽形状が地盤内に発生する受働領域に及ぼす影響範囲について検討する。円筒土槽内の各位置における水平断面画像を図-2.10に示す。受働領域の形状に注目すると、円形切羽（Case3）は円状であるのに対し、円錐タイプ切羽（Case4およびCase5）は横長の楕円形状である。特に円錐長切羽は横方向に大きく影響を及ぼしていることがわかる。また、切羽天端高さ以上の各水平断面においては、3ケースとも、新しいすべり面が最初にできた受働領域と同様の形状を呈しながら、下側から重なり合っ前方に向かって発達していることが伺える。すべり面内においては、周辺地盤と比べかなり緩んだ低密度領域が形成されており、円形切羽で顕著にみられる。

図-2.11はトンネル中心位置とトンネル側面位置の鉛直縦断面画像である。3ケース共に切羽下端から発達するすべり面が地表面まで達しており、円形切羽（Case3）は切羽面から前方に3.5D程度、円錐タイプの2ケースは4D程度まで、受働領域が及んでいる。さらに、円形切羽の受働領域は押込み方向前方へ発達していくのに対し、円錐タイプはトンネル切羽直上付近から受働領域を形成している。また、円形（Case3）、円錐短（Case4）では、新たなすべり面が下側から発達しつつあることを明瞭に確認できるのに対し、円錐長（Case5）は切羽下端からのすべり面が発生していない。これは、円錐のように傾斜面を下部に持つ切羽の場合は、切羽長がある大きさ以上になると、切羽面下部から発生するすべり面が切羽周辺の低密度領域に吸収されるためであると考えられる。図-2.12に切羽面、並びに切羽面から20mm前方位置の2次元鉛直横断面画像を示している。切羽面から20mm位置での鉛直横断面においては、円形切羽（Case3）では、トンネル切羽天端とトンネル下端からV字状にすべり面が発達しているのに対し、円錐タイプはU字状に近い曲線的なすべり面形状を呈している。また地盤内の受働領域は円形が3.5～4.0D

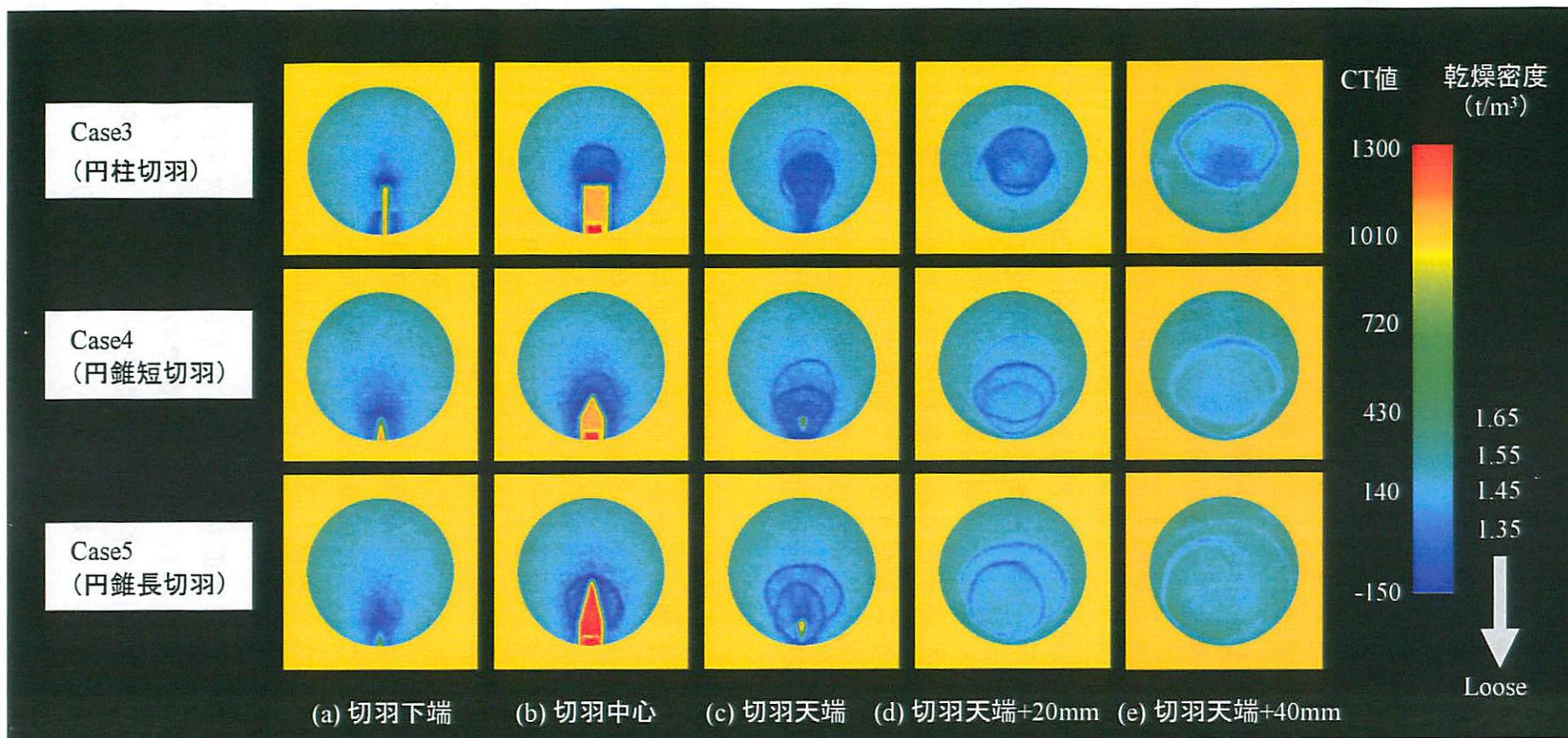


図-2.10 2次元水平断面画像

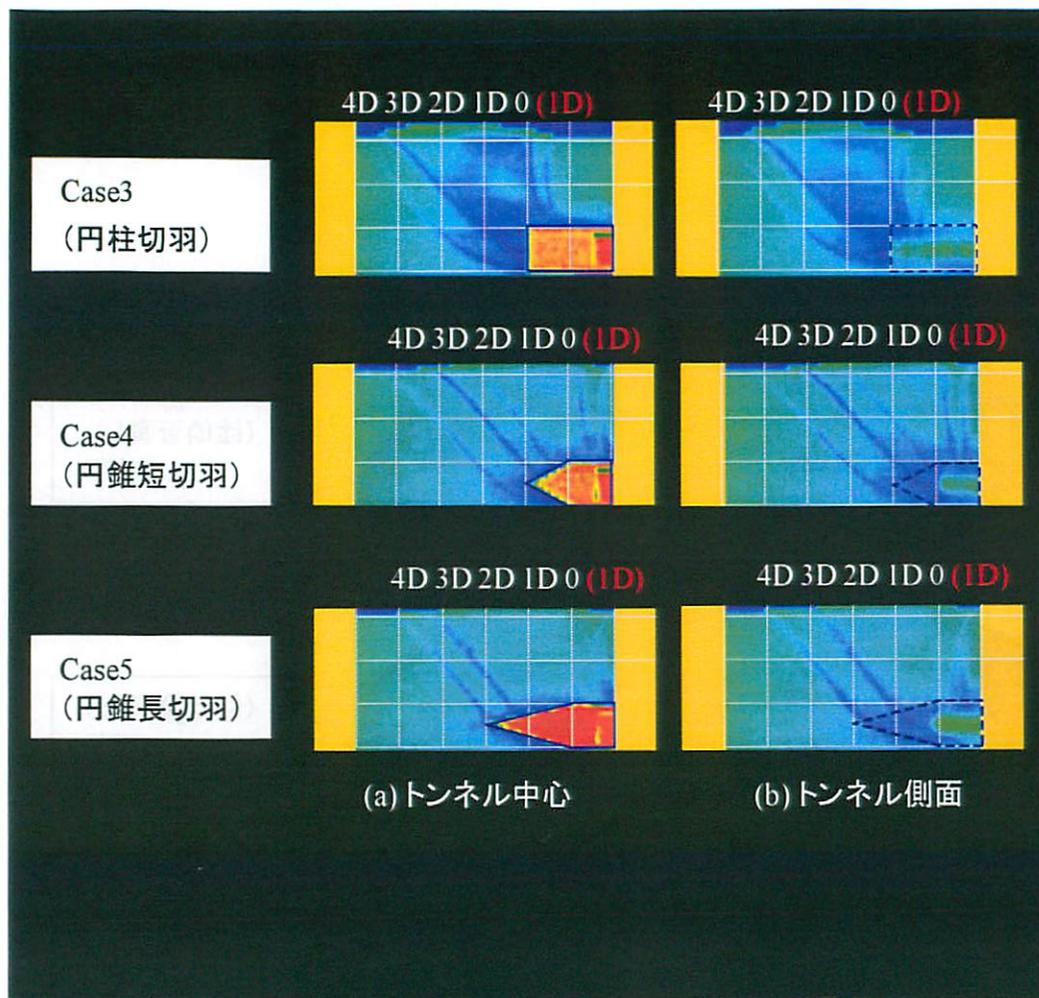


図-2.11 2次元鉛直縦断面画像

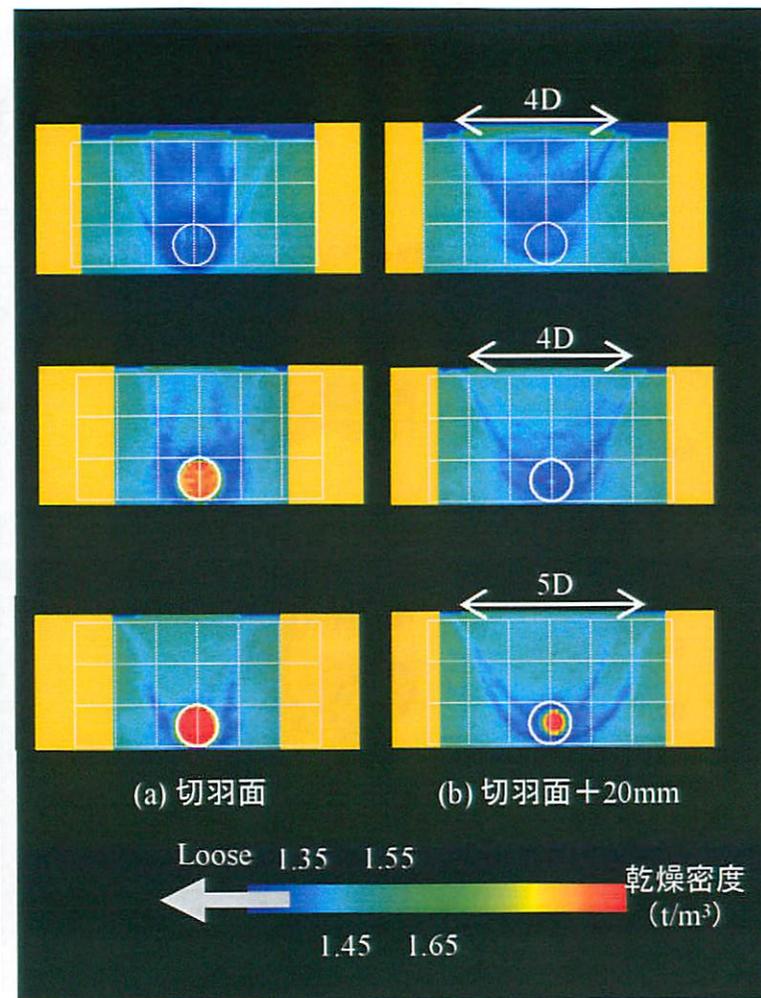


図-2.12 2次元鉛直横断面画像

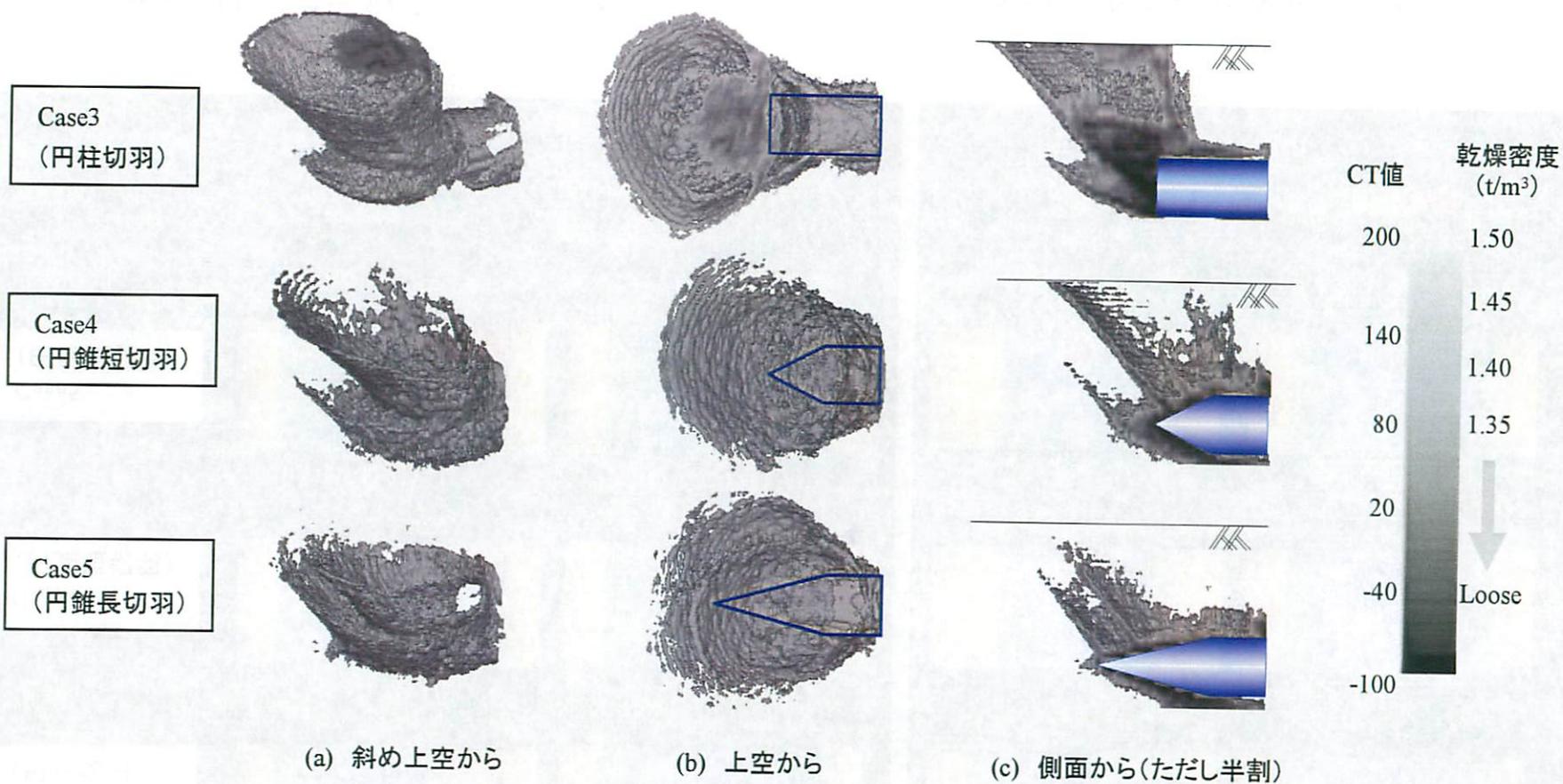


図-2.13 低密度受働領域の3次元画像

程度に対し、円錐短切羽は 4D、円錐長切羽は 5D 程度と、縦断面同様に円錐タイプが広範囲に影響する結果となった。また、図-2.11 を含め、地表面上方では、押し込みによる受働の影響を受けた土塊が押し上げられたことによる地表面隆起について確認でき、各ケースの地表面隆起高さは、円形切羽が大きく上昇しているのに対し、円錐タイプは比較的小さいことがわかる。

図-2.13 に低密度領域のみを抽出した切羽前方受働領域の 3 次元画像を示す。斜め上空及び上空から俯瞰した場合、3 ケースともに受働領域境界のすべり面がすり鉢状に発達しており、切羽下端から新たなすべり面が発達している。さらに、トンネル中心位置でスライスした断面画像からは、円形切羽 (Case3) が切羽前方及び上方に、とくに低密度の領域を集中して発達しているのに対し、円錐タイプ (Case4, Case5) は切羽面を覆うように周囲にわずかながらの低密度領域があるにとどまっている事を確認した。

### 第3章 遠心模型実験

#### 3.1 遠心用トンネル押し込み実験装置

この章では、遠心場でのトンネル押し込み模型実験を実施することで、実規模応力レベルにおける受働領域の影響範囲について、前章で述べた CT 実験結果との比較検討を行うとともに、実際のシールド切羽圧入時に必要な推進力やマシンの姿勢制御に関して参考となる受働時切羽作用荷重や切羽面における曲げモーメント分布について考察する。遠心実験装置の主な仕様と装置の写真をそれぞれ表-2.2 および写真-2.3 に示す。図-2.14 に遠心場トンネル押し込み実験装置の概略図を示す。土槽寸法は、幅 500mm × 奥行き 500mm × 高さ 400mm であり、トンネル模型は直径 50mm である。トンネル模型先端にはロードセルが組み込まれており、トンネル模型を押し込む際に作用する受働土圧による切羽面荷重が計測可能となっている。ただし、荷重計測は、押し込み開始後をゼロとした増分値とした。また、トンネル模型先端の切羽部分には合計 8 箇所にはひずみゲージを貼り付けており、ひずみデータをモーメント換算することで、各位置における曲げモーメントが算出可能となっている。ひずみゲージ添付位置 (曲げモーメント計測位置) については図-2.15 に示している。地盤変状の測定については、地盤の隆起計測を行うために、計 6 箇所にレーザー変位計を用いた計測を実施した。図-2.16 にレーザー変位計の配

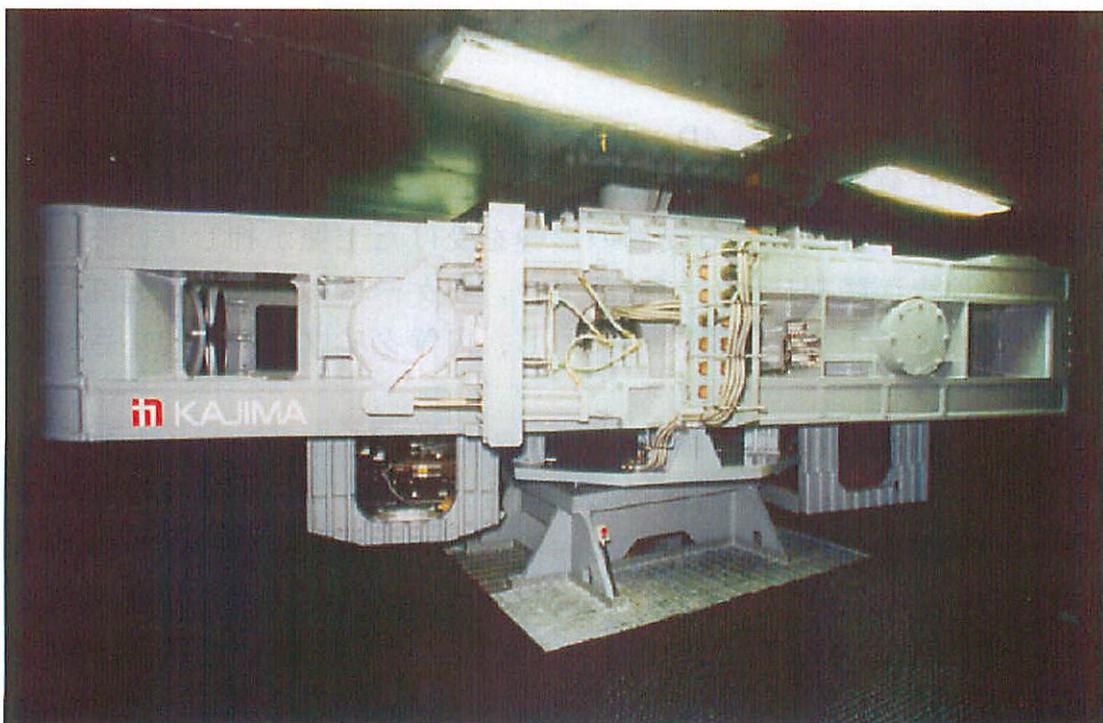


写真-2.3 遠心実験装置

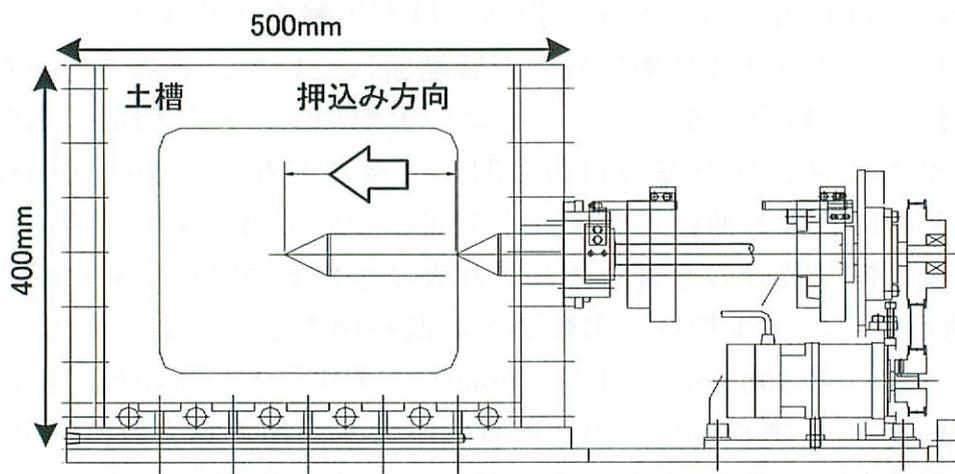


図-2.14 遠心場トンネル実験装置の概略図

表-2.2 遠心実験装置の主な仕様

遠心模型実験装置	
最大遠心加速度	200G
有効半径 (プラットフォーム上面)	2.64m
搭載重量	100G時 1,000kg 200G時 500kg
プラットフォーム寸法	幅 1,000mm 奥行き 1,000mm 有効高さ 800mm
ACモータ容量	300kW
スリップリング	計測33極 電源10極
計測システム	トランジェューサー 192ch同時計測

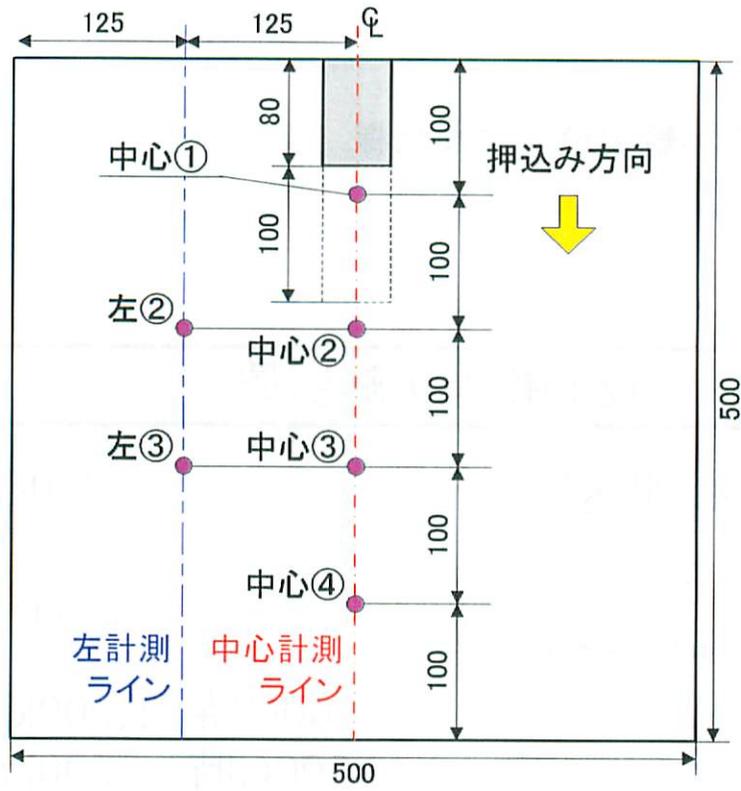


図-2.15 荷重・曲げモーメント計測位置

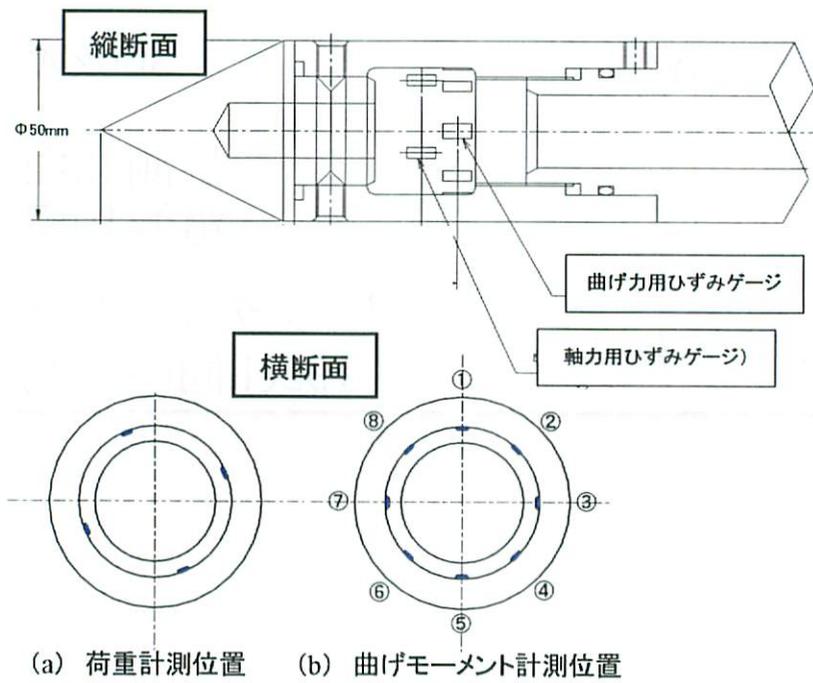


図-2.16 レーザー変位計設置位置

表-2.3 遠心実験ケース

Test Case	切羽形状	土被り	押込み量	押込み速度	相対密度	遠心加速度
		D* : 50mm	mm	mm/sec	%	G
Case6	円柱	2D*	150	0.02	80	50
Case7	円錐(短)					
Case8	円錐(長)					

置を示す。さらに、地盤内に生じている受働領域の観察を目的に、地盤内に水平な赤砂層を設置し、実験終了後、密閉の上で土槽を立て、側面から模型地盤を切り出し、観察を行っている。なお、実験条件や装置寸法、実験結果などすべて実験値で表示している。

### 3.2 実験方法と実験ケース

実験ケースを表-2.3 に示す。押し込み実験は、遠心場 50G において、X 線 CT 実験と同様に切羽形状を 3 種類用意し、土被り 2D (D:トンネル径 50mm) とした。切羽形状の違いが受働領域の形成過程に及ぼす影響を確認するため、トンネル模型の押し込み量を最大 150mm とし、押し込み速度は、装置限界の遅い速度である 0.02mm/sec とした。また、模型地盤は、X 線 CT 実験と同じ条件となるように、豊浦乾燥砂を使用し、空中落下法により相対密度 80% となるように作成した。

### 3.3 実験結果および考察

#### (1) 地盤内変形状況の観察

Case6 (円柱モデル) の実験終了後、模型地盤内に設置した赤砂の変形状況について、50mm ピッチで観察を行った結果を写真-2.4 に示す。切羽面においてはすべり面が上下 2 層で確認できるものの、切羽から 50mm 前方では 1 層のみとなり、100mm 前方では地表面付近に達し、150mm 前方ではすべり面は確認できないが、地表面付近では若干盛り上がりを見せている。X 線 CT 実験においても、切羽前方へおよそ 3D の段階ですべり面が無くなる結果を示しており、また、切羽前方 50mm (1D) における地表面でのすべり面の幅は 4D 程度と、X 線 CT 実験とほぼ同様の結果が得られた。従って、X 線 CT 実験は、小規模な 1G 場実験ではあるが、トンネル押し込み時の受働破壊現象を、遠心模型実験と相互補完的に評価可能であると考えられる。

#### (2) 地表面隆起特性

図-2.17 に各実験ケースにおける地表面変位量と切羽面までの距離の関係について、各計測位置別に示す。切羽面の位置は、各実験ケースごとに図-2.18 のように定義した。計測位置は、図-2.15 で示したように中央と左の 2 列の計測ラインに設けており、切羽面の接近に伴う地表面隆

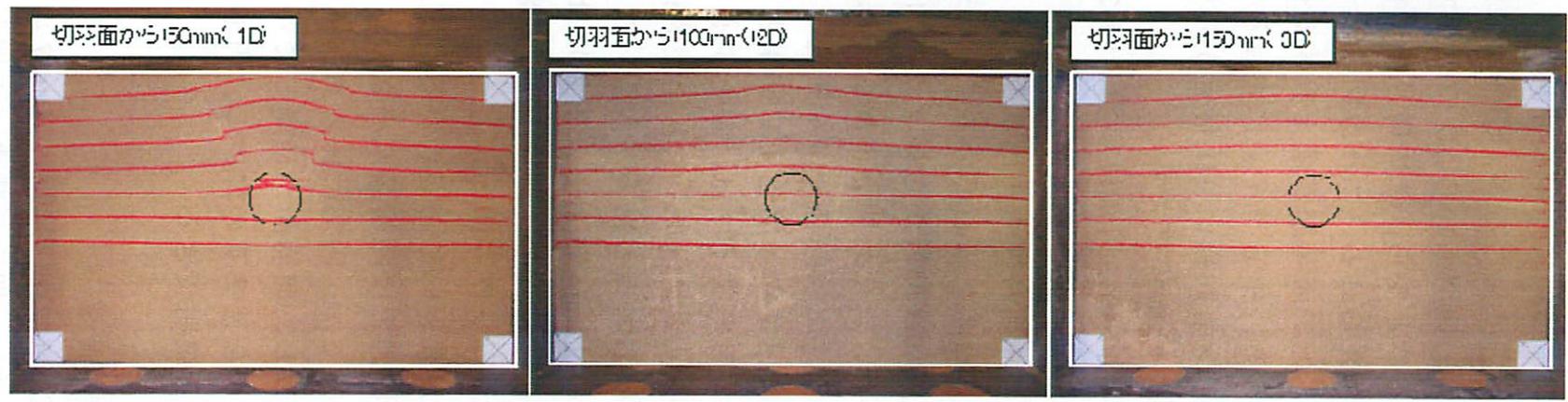
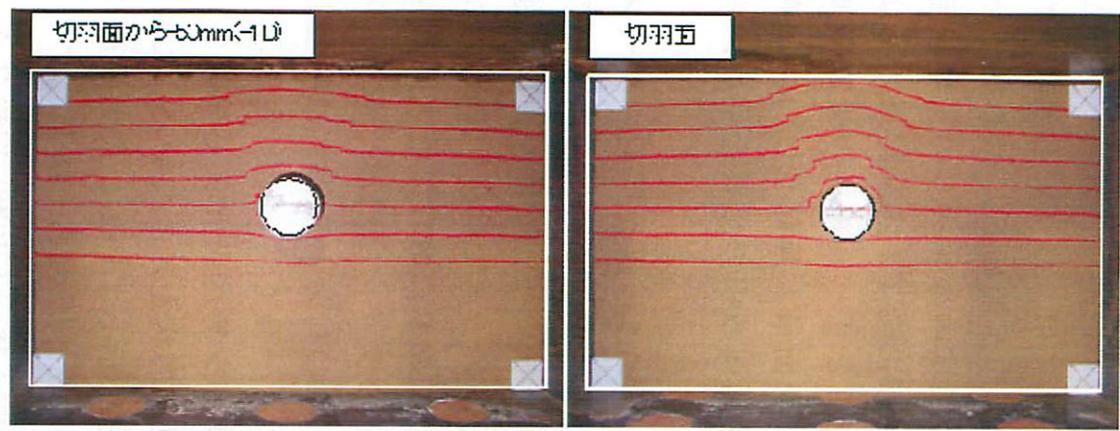
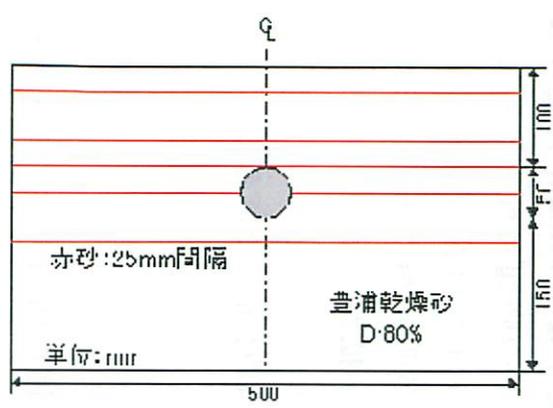


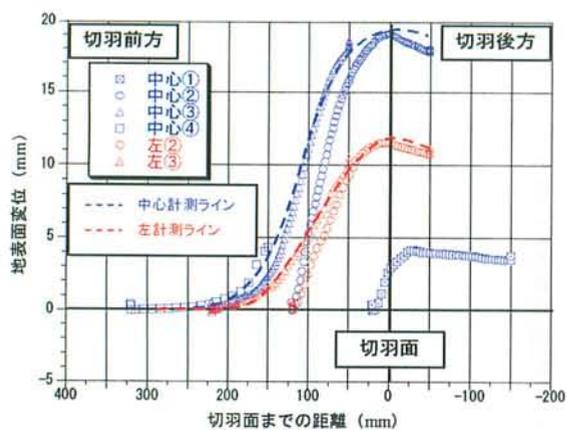
写真-2.4 実験後横断面観察状況 (Case6)

起特性を計測ライン別に破線にて表現することとした。まず、図-2.17(a)に示す円形切羽について、中心計測ラインにおいては、押し込み開始位置にもっとも近い①は異なるが、②③④に関しては、ほぼ同じ隆起特性を示すと考えられ、切羽面から5Dの距離で隆起が開始し、3.5D付近から急激に増加することから、この時点で受働領域内のすべりの影響を受けているものと考えられる。これは図-2.11で示したCT実験結果ともよく一致しており、地表面隆起が急上昇する位置とすべり線内の受働領域であると考えられる。中心ラインにおける地表面最大隆起量は19mmを示し、左計測ラインも同様に3D付近から受働領域内の影響を受け、地表面最大隆起量は12mm程度である。

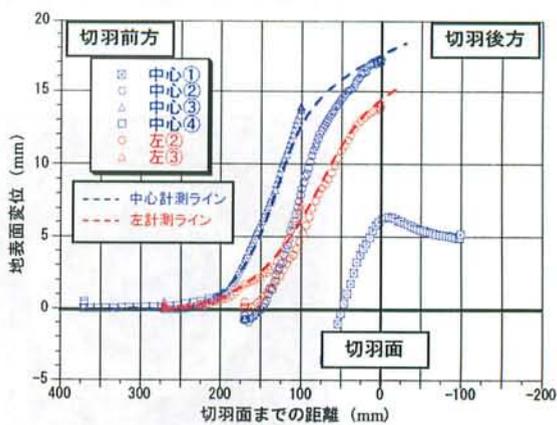
同様に、図-2.17(b)に円錐短切羽、図-2.17(c)に円錐長切羽のケースについて示す。まず、中心計測ラインについて考察する。円錐タイプの中心計測ラインの隆起特性も円形切羽同様、計測位置①を除く、②③④に関しては、同じ特性を示している。短切羽のケースでは、5.0D付近から隆起が開始し、4.0D付近から徐々に増加しており、地表面最大隆起量は17mm程度である。また長切羽の場合では中心ラインは円形であり、円錐短と比較すると、比較的穏やかな特性で、4.0D付近から徐々に隆起していく。これらは円錐タイプもCT結果とよく一致している。左計測ラインに関しては、円形タイプは、左と中心ライン特性が大きく異なるのに対し、円錐タイプは中心ラインと比較的似た形状を示している。これは、円錐タイプが横方向への影響が大きいことを示している。最大隆起に関しても、円形の12mmに対し、円錐短は15mmと大きく隆起している。この地表面隆起に注目し、図-2.19に実験終了後(150mm押し込み後)の地表面変位量をコンター図で示した。先ほどの隆起特性と一致し、円形切羽は隆起量が多いことがわかる。円錐タイプは横方向への拡がりが大きく、特に円錐短は隆起量が少ないことが明らかである。また、その影響範囲については、円形は圧入方向前方へ拡がる傾向にある。これも隆起特性と一致し、切羽面が通過してからピークを迎える円錐タイプは背後にも広がりを見せるのに対し、円形は切羽面上で隆起量のピークを迎えることから説明できる。

### (3) 切羽作用荷重

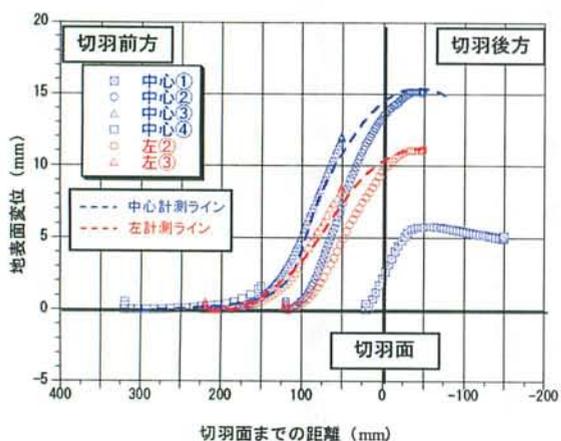
図-2.20にCase6の円形切羽、Case7の円錐短切羽、およびCase8の円錐長切羽の100mm押し込み時までの切羽作用荷重の結果を示す。切羽作用荷重はシールド圧入時に必要となる推進力を検討する上で重要な実験値である。まず、円形切羽については、押し込み後、急激に作用荷重は



(a) 円柱切羽 (Case6)



(b) 円錐短切羽 (Case7)



(c) 円錐長切羽 (Case8)

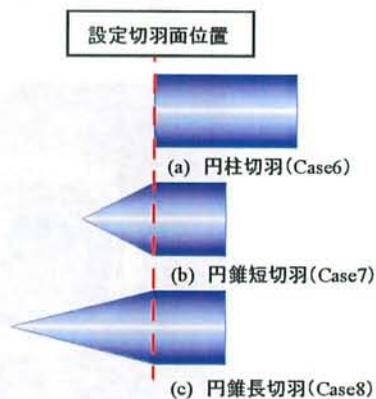


図-2.18 設定切羽面の位

図-2.17 切羽面までの距離と地表面変位量の関

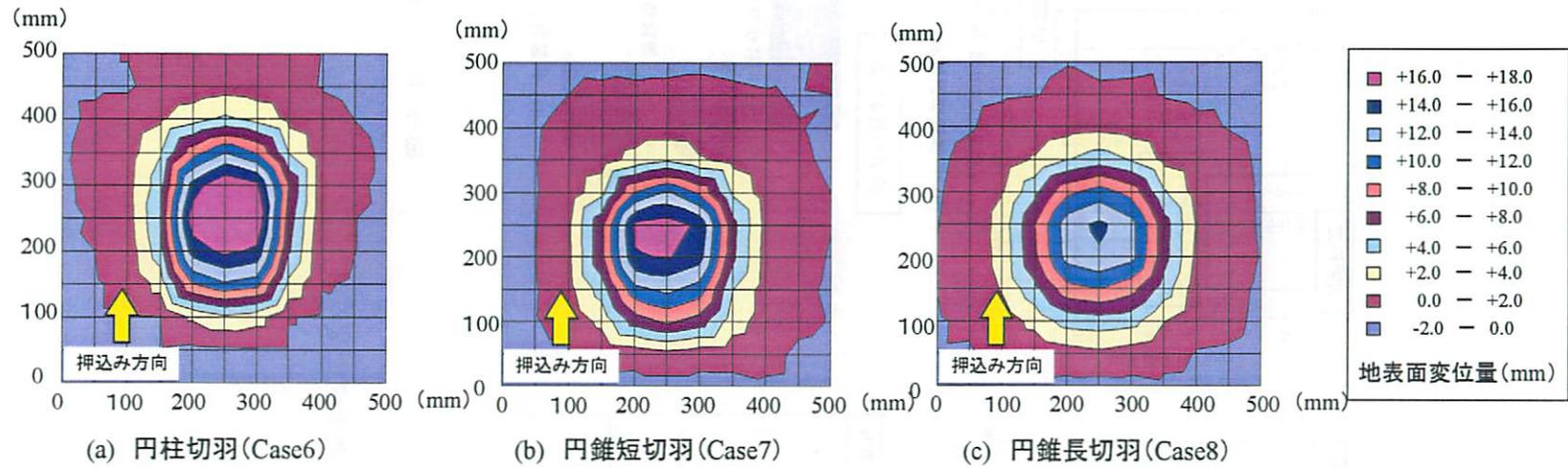


図-2.19 実験終了後の地表面変位量

増加し、押込み量が 1/5D 程度で約 11kN を示し、その後、ほぼ一定となっている。X 線 CT 実験の結果 1/4D の押込み量で受動領域境界のすべり面が地表面に到達しつつあったことから、遠心実験においても、押込み量 10mm の段階で切羽に作用する受動領域がほぼ形成され、その結果ほぼ一定になったと考えられる。

次に、円錐タイプの 2 ケースについては、円形切羽と比べるとかなり緩やかに荷重が増大し、押込み量 1D 程度で 8.0~9.0 kN を示し、その後、ほぼ一定となっている。X 線 CT 実験の結果から、円錐タイプは切羽前方に低密度の領域が形成されにくいため、円形切羽のように受動領域内にて土塊が押し上げられる傾向が少なく、安定するまでの押込み量が大きくなったと推察できる。圧入工法を考慮した場合、最大荷重の小さい円錐タイプの切羽形状のほうが、マシン圧入時の推力は小さくて済むと考えられる。

#### (4) 切羽面曲げモーメント分布

図-2.21 に Case6 の円形切羽、Case7 の円錐短切羽、および Case8 の円錐長切羽それぞれのケースについて、100mm 押込み時の切羽面の各位置における曲げモーメント分布を示す。また表-2.4 には計測位置①②⑧の切羽上面と計測位置④⑤⑥の切羽下面における曲げモーメントの平均値と上下面の差分について示している。符号については+が引張り、-が圧縮である。各切羽とも上側曲げモーメントが卓越した結果となっており、切羽状態としては、上面にかかる負荷が大きいといえる。また、

上下面の曲げモーメントの差分についてみると、円形切羽の差分が、177kN であるのに対し、円錐形状は短切羽 253kN、長切羽 382kN と大きくなっている。これは、円錐形状の切羽は、円柱タイプである円形切羽と比べ上下面に傾斜を有しており、この場合、下部の地盤反力を大きく受けたためと考えられる。マシンの姿勢方向としては、斜め上方に仰け反るような状態になるといえる。次に、円錐タイプの短長切羽を比較すると、掘削面積の大きな円錐長切羽が、下部の地盤反力の影響を大きく受けたため、差分結果も大きくなっている。逆に、上面のみに傾斜を有する注射針形状のような切羽を考えると、マシンは上部の受働土圧の影響が大きいため、下部曲げモーメントが卓越すると考えられ、マシン姿勢は下向きに垂れ下がると推察される。この切羽面における曲げモーメント分布から考察されるマシン姿勢は、圧入工法においては非常に重要な問題であると考えられる。

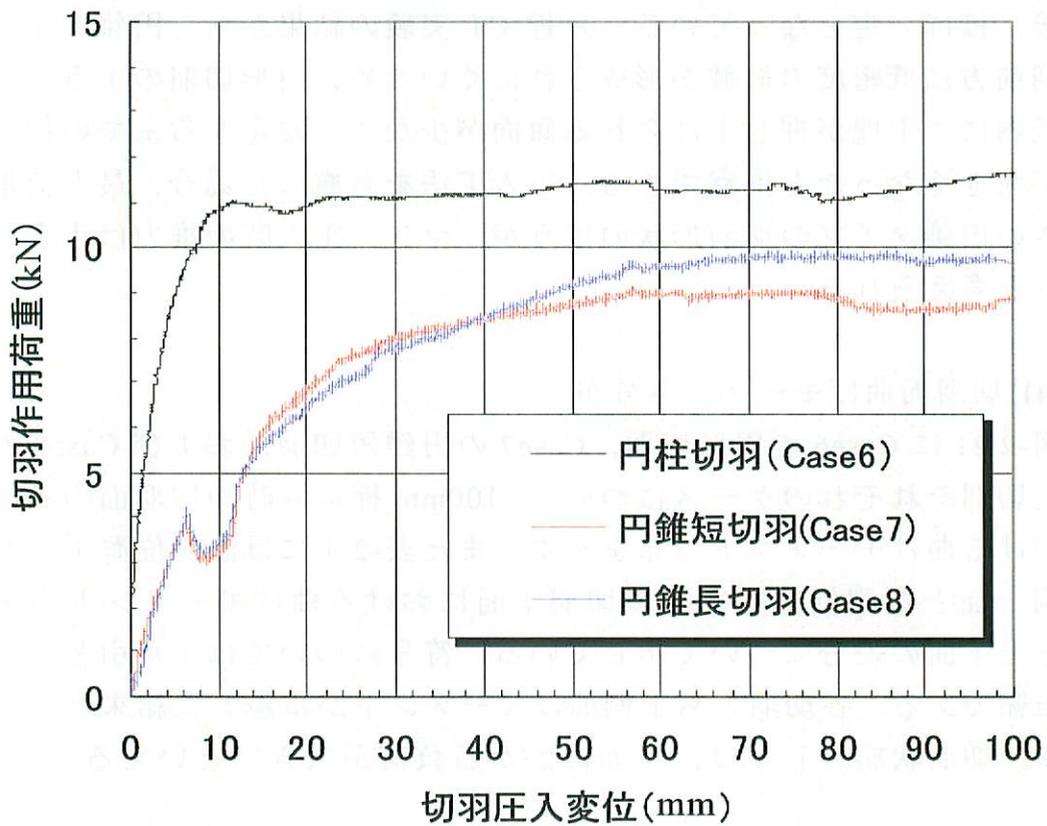


図-2.20 圧入変位量と切羽作用荷重の関係

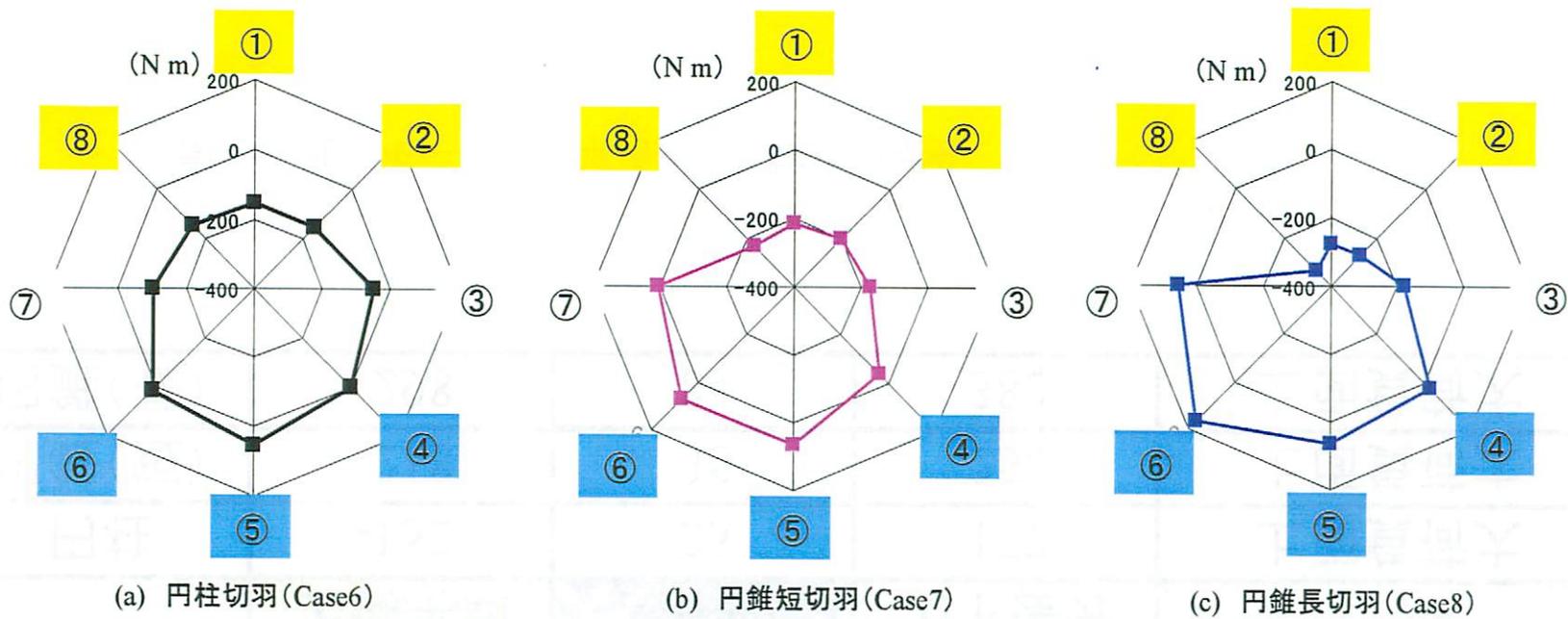


図-2.21 切羽面の各位置における曲げモーメント分布

	曲げモーメント(N・m)			切羽状態
	上側平均	下側平均	上下差分	
円柱	-152	25	177	上面負荷大
円錐(短)	-218	35	253	上面負荷大
円錐(長)	-298	84	382	上面負荷大

表-2.4 曲げモーメント平均値と上下面の差分

## 第4章 新たな無排土シールドトンネル工法の提案

### 4.1 圧入型シールドトンネル工法における有効な切羽形状

ここまで、異なる切羽形状を用いたトンネル押込み実験を実施し、シールド圧入時に必要となる推進力や、マシン姿勢、周辺地盤への影響について、切羽作用荷重、曲げモーメント分布、受働領域の影響範囲の検討を行ってきた。X線CT実験では、トンネル切羽圧入による前方地盤への受働領域は、円形切羽が3.5D程度に対し、円錐タイプは4.0D程度であり、円錐タイプの切羽形状は広範囲に影響が及ぶことがわかった。また、遠心実験は、地表面隆起についてもCT結果と同様の影響範囲を示した。切羽作用荷重については、円錐切羽は円形切羽に対して2割程度小さな値を示している。さらに曲げモーメント分布は、円形、円錐両タイプとも上側曲げモーメントが卓越しており、円錐タイプは切羽長の違いで曲げモーメントに差があることがわかった。このように、通常切羽である円形切羽と比べ、円錐切羽のように傾斜を付与した切羽条件では、推進力やマシンの姿勢制御、地盤変状に大きな特徴を有すると言える。ここで圧入シールド工法について考慮すると、無排土条件で切羽を圧入していく場合においては、大きな推進力が必要となり、また、マシンの姿勢を常時保つことが最重要課題であると考えられる。切羽面作用荷重が小さく、曲げモーメントが小さな切羽形状が圧入工法に有効な切羽形状であると考えられるが、姿勢制御に関して、シールド工法における通常の切羽である円形と比較すると、円錐タイプの切羽形状の持つ特徴が有効に利用可能であると考えられる。すなわち、切羽が円錐形状の場合、切羽面が上下面に勾配を有しており、切羽圧入に伴い、上面には受働土圧、下面には地盤反力が作用する。この場合、図-2.22に示すように、土被りの違いや地盤強度の違いにより、上下面に作用する受働土圧や地盤反力は異なってくるため、円錐形状の切羽は、上下に力が卓越する方向に曲げモーメントが作用するものと考えられる。シールドマシンであれば、姿勢制御を行う上で、こうした外力とうまくバランスをとることで円滑な掘進が可能と考えられる。以上の考察から、圧入による過大な推進力や高度な姿勢制御が要求される圧入型シールド工法においては、円錐タイプの切羽形状が有効であると考えられる。そこで、特に掘削制御に有効であると考えられる偏心切羽を提案する。

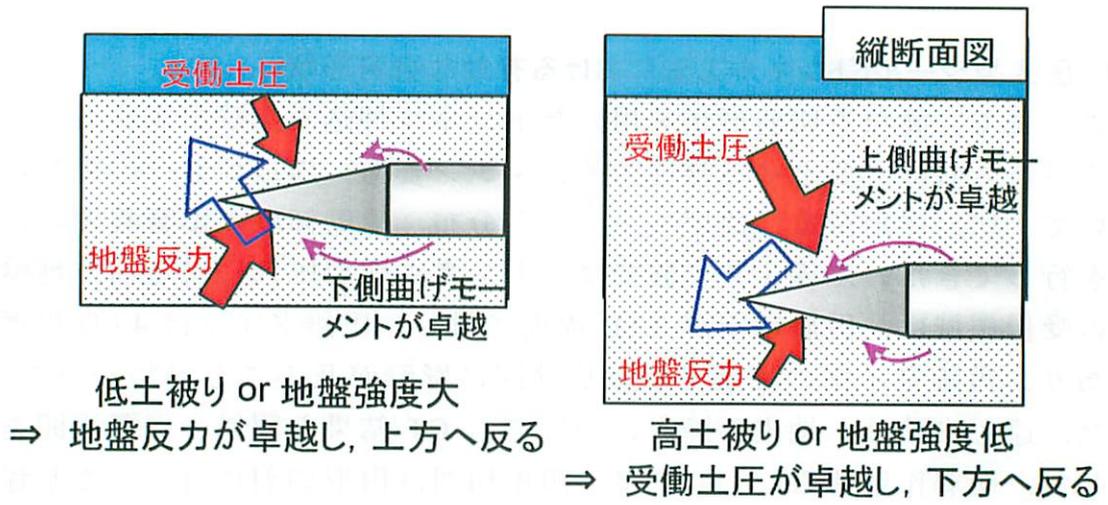


図-2.22 円錐切羽の姿勢制御

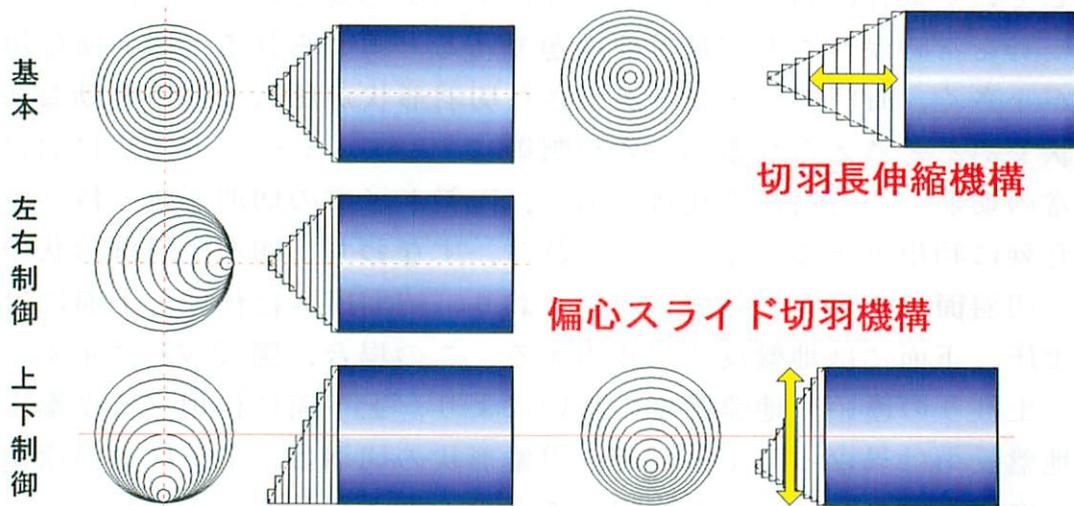


図-2.23 偏心切羽システムの概念

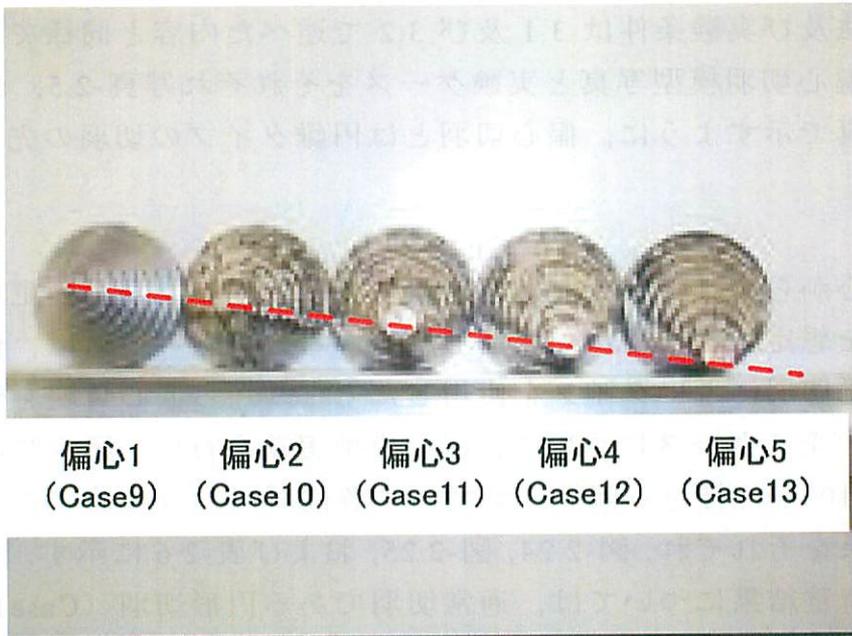
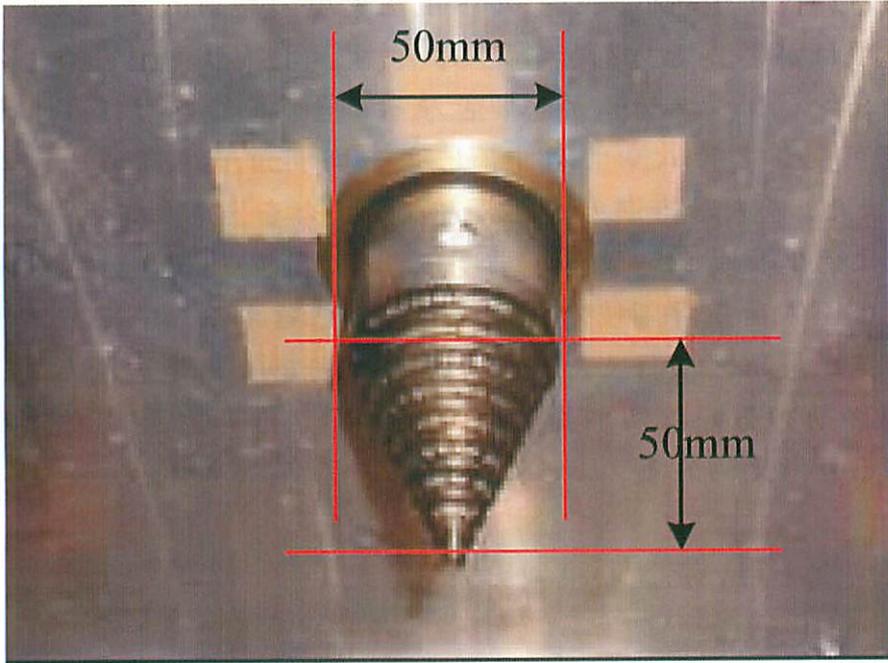


写真-2.5 偏心切羽模型写真

## 4.2 無排土シールド推進制御システムの提案

### (1) 偏心切羽の提案

無排土あるいは排土量低減シールド工法実現のためには、以下に示すような開発項目が必要であると考えられる。まず、土被りや土質条件の変化に対応可能なマシンシステムが必要となることから、スライド切羽による切羽角度可変システムや切羽伸縮による切羽角度可変システムが考えられる。また、過大な推進力が必要となることを考慮し、切羽の振動・回転などによる低負荷システムが挙げられる。その他にも、隆起範囲の予測技術及び圧入荷重評価技術も重要であると考えられる。中でもスライド切羽部の開発が最重要項目であり、図-2.23 にその制御概念を示す。切羽先端位置の移動あるいは切羽長さの変化により推進力及び姿勢の制御が可能であると考えられる。

### (2) 偏心切羽を用いた遠心模型実験

ここでは、偏心切羽を用いた遠心模型実験を実施した。使用した実験装置、実験方法及び実験条件は 3.1 及び 3.2 で述べた内容と同様である。偏心切羽の偏心切羽模型写真と実験ケースをそれぞれ写真-2.5、表-2.5、に示す。写真で示すように、偏心切羽とは円錐タイプの切羽の先

端位置が中心からずれたような切羽形状であり、偏心切羽の面上は、スライド切羽を想定した階段状の表面形状である。実験ケースは、偏心模型切羽を円錐切羽に近いタイプを使用した Case9 から偏心角度を変えた Case13 まで、全 5 ケースについて、遠心模型実験を行い、圧入時の切羽作用荷重と 100mm 押込み時の、切羽面の各位置における曲げモーメント分布の結果をそれぞれ、図-2.24、図-2.25、および表-2.6 に示す。図-2.24 の切羽作用荷重結果については、通常切羽である円形切羽 (Case10) を含めて比較を行っている。偏心切羽 5 タイプは圧入開始時から 1D (50mm) 程度の押込み量までは、1.0kN~2.5kN の開きがあるものの、圧入変位 1D (50mm) 以降では 7.0kN~8.0kN 程度に落ち着く結果となった。圧入開始時は、偏心 1, 2 タイプの荷重が多少大きいですが、偏心角度を変えても、推力は定常状態で概ね同程度となると考えられる。また、円形切羽の作用荷重 11kN に対し、偏心切羽は 7.0kN~8.0kN とかなり小さい値となった。図-2.25 の曲げモーメント分布については、円形と偏心

表-2.5 偏心切羽実験ケース

Test Case	切羽形状	土被り	押込み量	押込み速度	相対密度	遠心加速度
		D* : 50mm	mm	mm/sec	%	G
Case9	偏心1	2D*	150	0.02	80	50
Case10	偏心2					
Case11	偏心3					
Case12	偏心4					
Case13	偏心5					

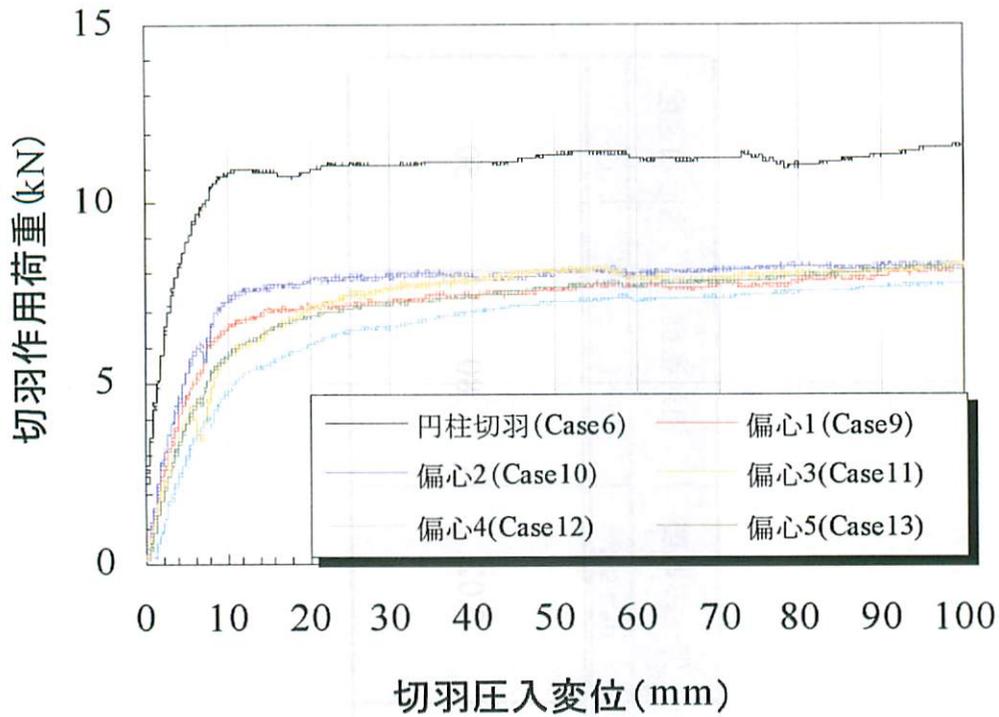


図-2.24 圧入変位量と切羽作用荷重の関係

表-2.6 曲げモーメント平均値と上下の差分

	曲げモーメント(kN・m)			切羽姿勢状態
	上側平均	下側平均	上下差分	
円柱	-152	25	177	上面負荷大
偏心1	-134	-2	133	上面負荷大
偏心2	-106	11	117	上面負荷大
偏心3	-59	-8	51	上面負荷やや大
偏心4	-87	-12	75	上面負荷やや大
偏心5	-73	13	86	上面負荷やや大

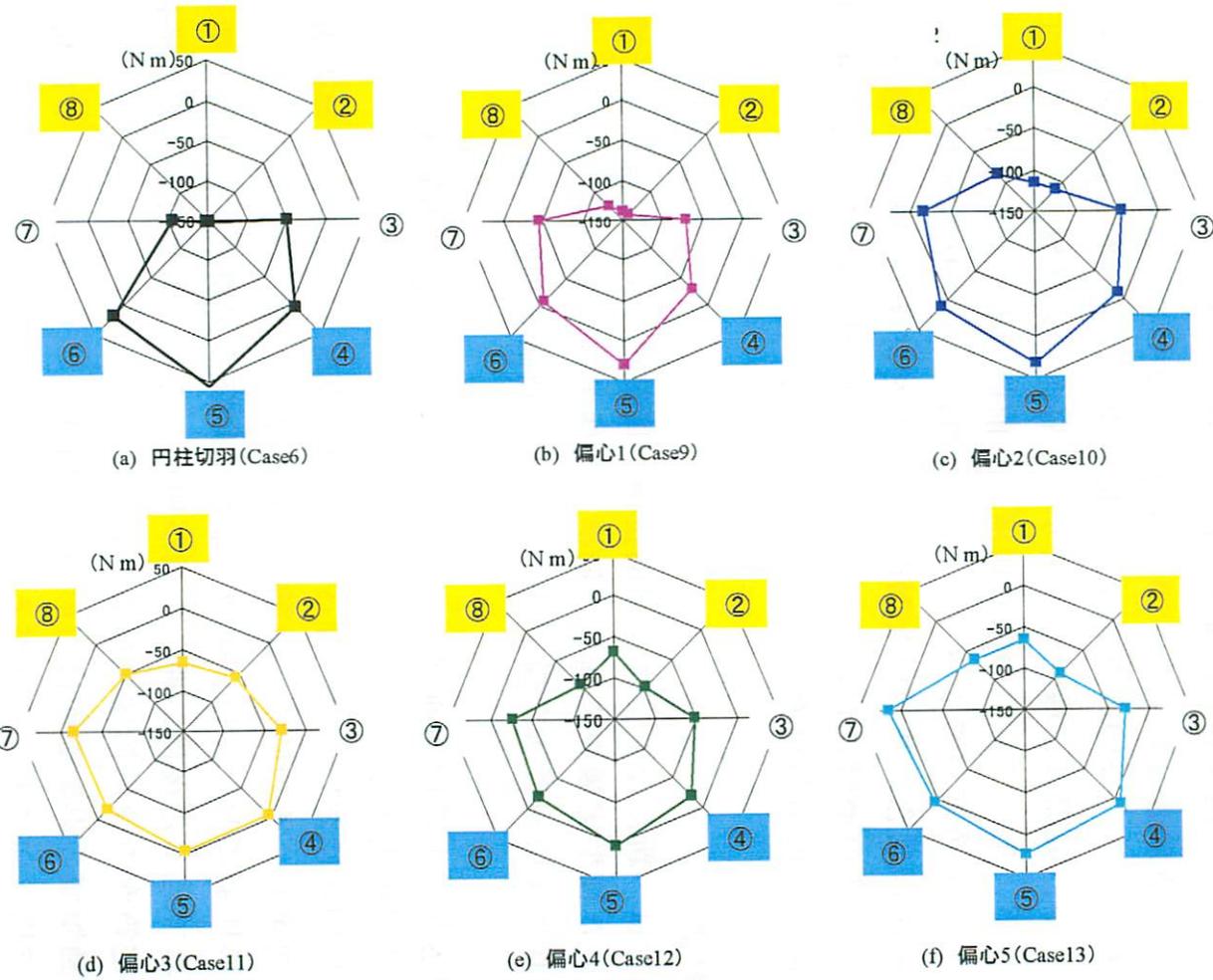


図-25 切羽面の各位置における曲げモーメント分布

タイプ共に上側曲げモーメントが卓越している。上下面の差分は明らかに偏心タイプが小さい。偏心 3 (Case11) が最も小さい結果を示しているが、全 5 ケースについての傾向としては切羽先端が下に位置するほど、差分は小さくなる傾向が見られるといえる。円錐タイプと比較しても、偏心タイプがより安定度が高いといえる。

以上の結果から、提案した円錐状の偏心スライド切羽は、姿勢制御に有効であり、必要推進力も少なく通常切羽と比較すると容易に圧入可能であると推察される。今回の実験は、土被りを 2D とした均質な地盤を想定しているが、実際は、様々な土被りや土質条件の地盤において施工することになる。そこで、この偏心切羽に、前節で述べたようなスライド切羽による切羽角度可変システムや切羽伸縮による切羽角度可変システムなどの制御概念に基づいた掘進システムを併せることで、様々な土被りや土質条件の地盤においても、作用する地盤反力あるいは受働土圧に十分対応した掘削が可能であると考えられる。

## 第 5 章 結論

本論文では、新たなトンネル掘削技術の開発として、X線CTと遠心装置を用いた模型実験を実施し、無排土条件下での圧入型シールド工法における有効な切羽形状を提案した。以下に結論を列挙する。

- 1) 押込みによる切羽前方に発達するすべり面や、受働領域を 3 次元的可視化することができた。
- 2) 円形切羽においては、押込み量  $1/4D$  程度ですべり面が地表面まで到達し、その時点で受働領域が形成されることがわかった。
- 3) 円形切羽においては、切羽下端から伸びる初期のすべり面が地表面まで達した後は、押込み量が増大しても、切羽前方地盤に常に一定範囲の受働領域が形成されていく。
- 4) 受働領域の影響範囲は円形切羽は円状であり、円錐タイプは楕円形で横方向に大きく広がる。
- 5) 切羽前方の受働領域について、CT 実験結果をもとに 3 次元可視化を試みた。
- 6) 遠心場において押込み実験を行った結果、CT 実験における結果と同様の挙動が確認できたことにより、CT 実験結果の妥当性が確認できた。
- 7) 地表面隆起特性から円錐切羽の影響範囲が大きいことが確認された。

- 8) 円形切羽と比較すると、円錐タイプの切羽のほうが切羽作用荷重は小さく済む。また、作用荷重が安定する条件として、切羽に作用する受働領域がほぼ形成されることが挙げられる。
- 9) 円形、円錐切羽共に上側曲げモーメントが卓越している。また、円錐タイプにおいては長短で値が異なる。
- 10) 偏心切羽を提案し、その有効性を確認した。

今後の展開としては、理論解による設計手法の検討が挙げられる。よって遠心模型実験による実規模応力レベルでの圧入推力の確認と X 線 CT 実験による 3 次元メカニズムの分析により、上界法などによる必要推力算定手法について検討する所存である。

#### 【参考文献】

- 1) 大石善啓：X線ラジオグラフィ法を用いた土の切削機構の可視化，土木学会論文集，第 454 号， pp.19-26, 1992.9.
- 2) 畑村洋太郎，千々岩健児：土の切削機構の解明（第 1 法,土の切削パターンについて），日本機会学会論文集（第 3 部），第 40 巻 338 号，PP2944-2955, 1974.10.
- 3) 畑村洋太郎，千々岩健児：土の切削機構の解明（第 2 法,切削による土の変形および内部応力について），日本機会学会論文集（第 3 部），第 41 巻 349 号，PP2749-2759, 1975.9.
- 4) 大谷 順，椋木俊文，永留 健，菊池喜昭，佐藤孝夫：X 線 CT 法を用いた気泡混合処理土の浸透・乾燥現象の解明，土木学会論文集，No.701/III-58, pp.293-302, 2002.
- 5) 大谷 順，弘中淳市，椋木俊文，平井貴雄：鉛直荷重下における杭先端地盤の 3 次元支持力特性，土木学会論文集 C，Vol.62, No.2, pp.311-319, 2006.
- 6) Otani, J., Mukunoki, T and Obara, Y., : Characterization of failure in sand under triaxial compression using an industrial X-ray CT scanner, International Journal of Physical Modelling in Geotechnics, Vol.2 No.1, 2002.
- 7) Otani, J., Mukunoki, T. and Obara, Y. : Application of X-ray CT method for characterization of failure in soils, Soils and Foundations, Vol.40, No.2, pp. 111-118, 2000.
- 8) 大谷 順，永谷英基，高野大樹：X線CTを用いたトンネル切羽崩壊機構の評価，土木学会論文集 C, Vol.62, No.4, pp.814-824, 2006.

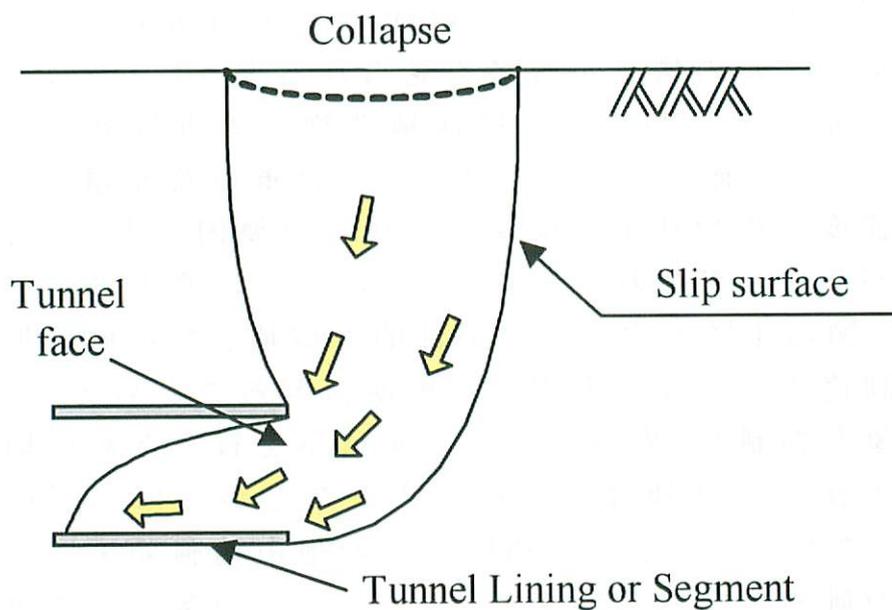
## 第3節

# 新たなトンネル切羽安定化技術の 提案

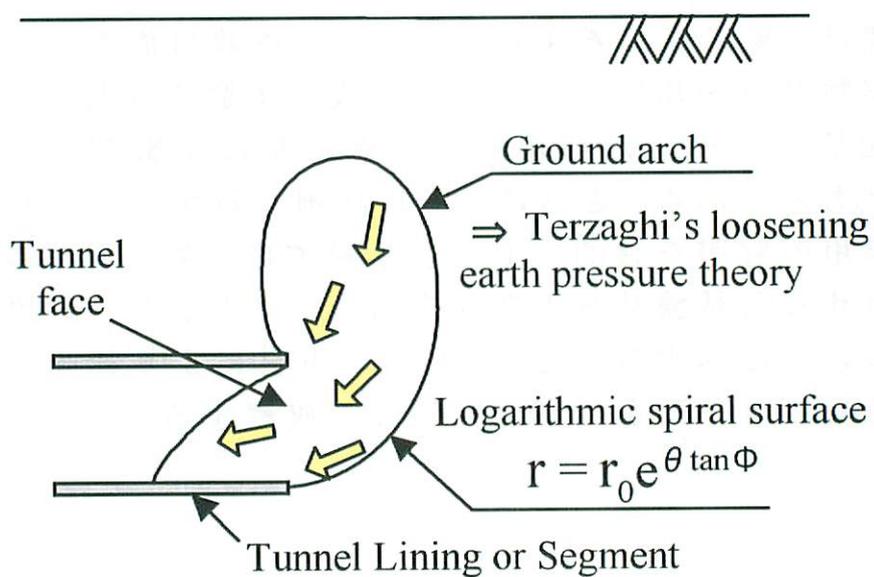
## 第 1 章 序 論

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。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、前方あるいは直上にすべり面が生じ、図-3.1 に示すような局所的な破壊、あるいは地表面にまで到達するような大規模な破壊に至ることもある。これらの現象を抑制し、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ている。これまでに、この補助工法の地山補強効果について数多くの研究がなされてきた。しかし、その多くは 2 次元あるいは準 3 次元モデルでの検証であり、3 次元かつ定量的な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。

本研究は、産業用 X 線 CT スキャナに搭載可能なトンネル引抜き実験装置を用い、トンネル引抜き実験を実施し、鏡ボルトの配置パターンが切羽崩壊機構に及ぼす影響について検討したものである。さらに、より詳細な鏡ボルトと地盤との相互作用の解明を目的として、X 線 CT スキャナに搭載可能な一面せん断試験装置の開発を行う。また、この装置の有用性について確認するとともに、ボルト材により補強された砂の一面せん断挙動を X 線 CT により観察する。



(a) Large scale failure



(b) Local failure

図-3.1 トンネル切羽崩壊概念

## 第 2 章 X線 CT を用いたトンネル補助工法の模型実験

### 2.1 実験装置と実験結果

実際のトンネル施工では、切羽崩壊を防止するために様々な補助工法が用いられている。補助工法の効果としては、地盤変状抑止効果、施工性、安全性の向上など様々である。著者が所属する研究グループで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ている<sup>11)</sup>。開発した装置を図 3.2 に示す。これまでに、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。また、補助工法の効果に着目し、鏡ボルト、及び先受け工をシミュレートした模型実験を実施した。補助工法の設置位置を図 3.3 に示す。先受け工は打設範囲  $120^\circ$ 、打設長 10 mm、20 mm の 2 ケースを設置し、鏡ボルトは長さ 10 mm、直径 0.5 mm のアルミ棒を設置し、引抜き量は 2 mm である。この模型実験で得られた CT 画像を図 3.4 に示す。先受け工打設長 10 mm の結果においては、崩壊領域はある程度縮小されているが、切羽面から前方すべり面までの距離が、打設長より若干長く発生しているため崩壊領域は、先受け工を超えたさらに上方まで発達しており、切羽の安定は十分に確保できているとは言い難い。先受け工 20 mm では、先受け工の打設長が十分であるために破壊領域はトンネル天端より上方には達していない。実際の施工では、先受け工は片持ち梁のような状態になっているので、打設長が長くなると先端部にたわみが発生することが考えられ、これによる地山の崩壊も起こりうる。よって、打設長を長くすればいいとは一様には言い難い。鏡ボルトの結果では、先受け工を打設した両ケースと比較すると、切羽前方の破壊領域はかなり縮小されている。

切羽上方の破壊領域は十分な長さの先受け工を打設することで、トンネル天端以上の崩壊領域は抑制できる。しかし、切羽前方の破壊領域は抑制できない。また、鏡ボルトを打設することにより、切羽前方地山の安定は確保でき、トンネル上方への崩壊も抑制できることがわかった。

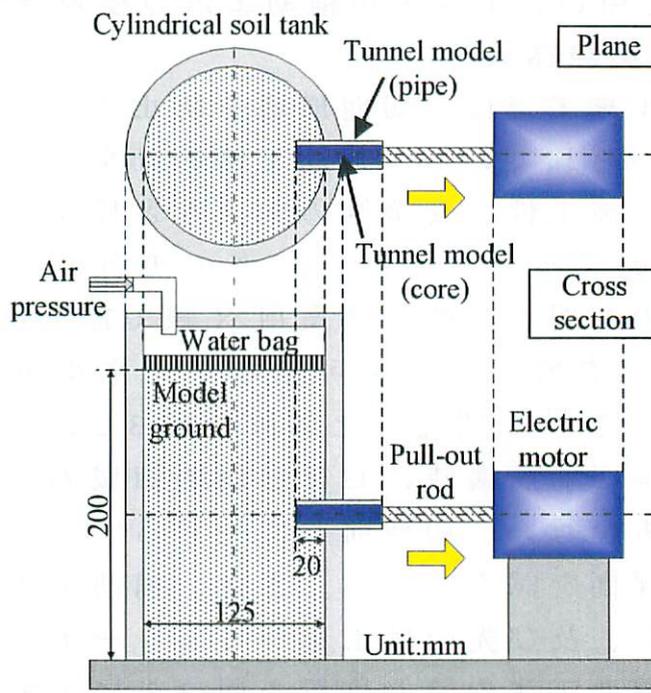
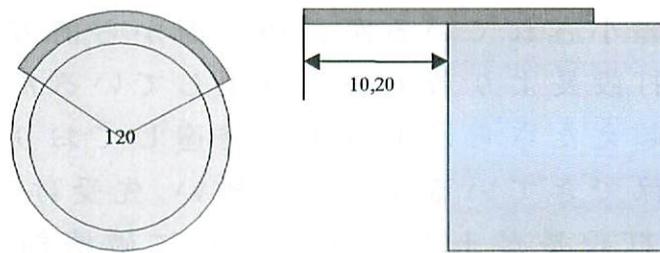
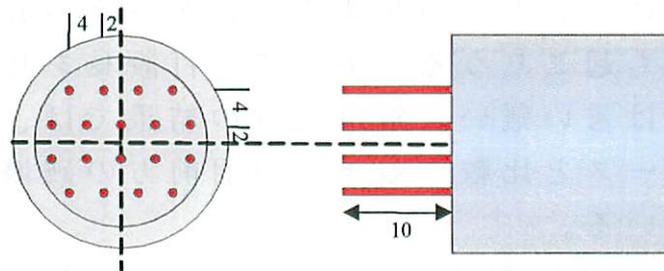


図-3.2 トンネル引抜き実験装置



(a) Pre lining method



(b) Face bolt method

図-3.4 先受け及びプレライニングモデル

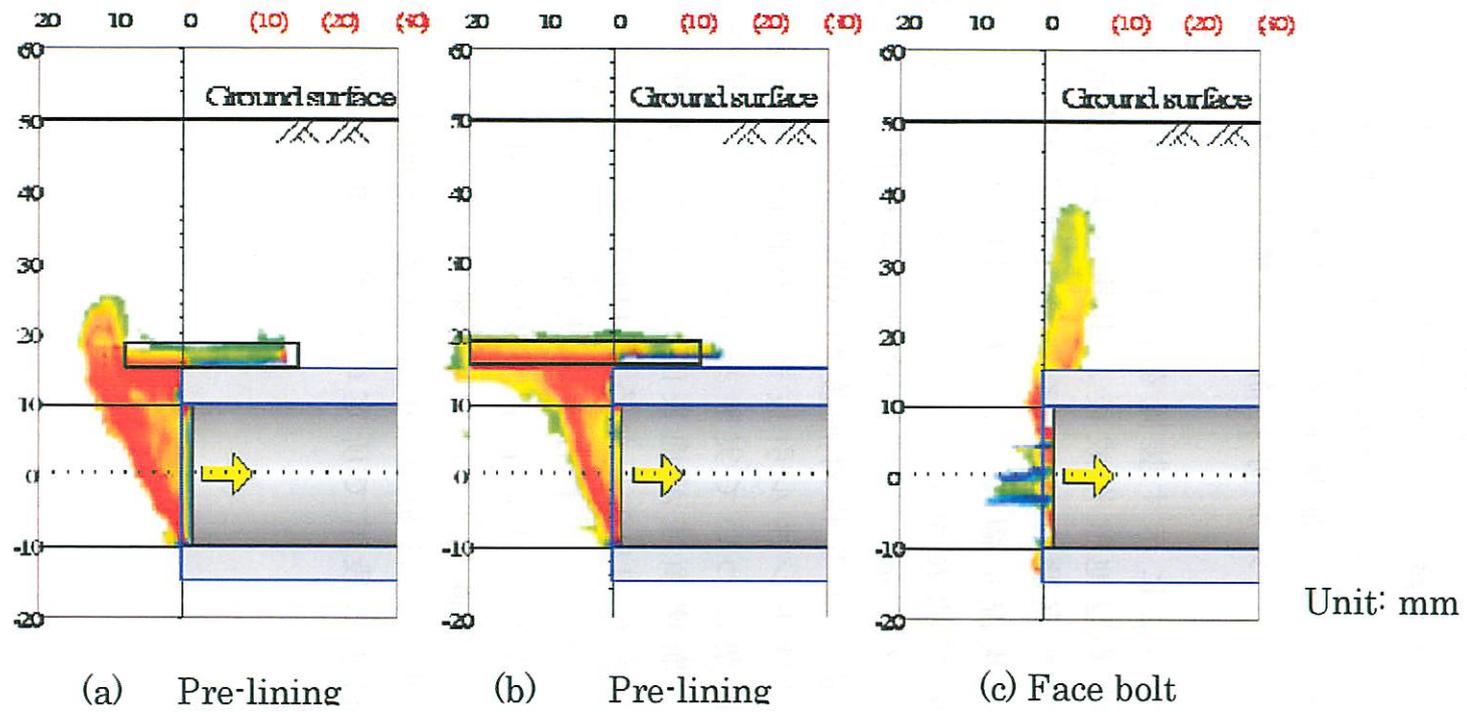


图-3.4 鉛直断面画像

## 2.2 鏡ボルトの配置が切羽崩壊機構に及ぼす影響

前述の実験結果から、切羽前方地山を補強する際、鏡ボルトを打設することにより高い補強効果が期待できることを確認した。ここでは鏡ボルトの打設パターンに着目した実験ケースを想定し、トンネル引抜き実験を実施する。実験後は、CT画像に基づく3次元崩壊領域の可視化を行うとともに、鏡ボルトの打設パターンが切羽崩壊機構に及ぼす影響について検討する。

実験装置は図 3.2 に示す装置を使用した。実験手順を図 3.5 に示す。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 1 mm 間隔で地表面まで行った。次に、表 3.1 に今回実施した実験ケースを示す。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 20 mm 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(2 mm)とした。ここ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図 3.6 に示す。ここでは、補助工法を適用しない無対策のケースを CASE1 に設けている。鏡ボルトには長さ 10 mm、直径 0.5 mm 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。

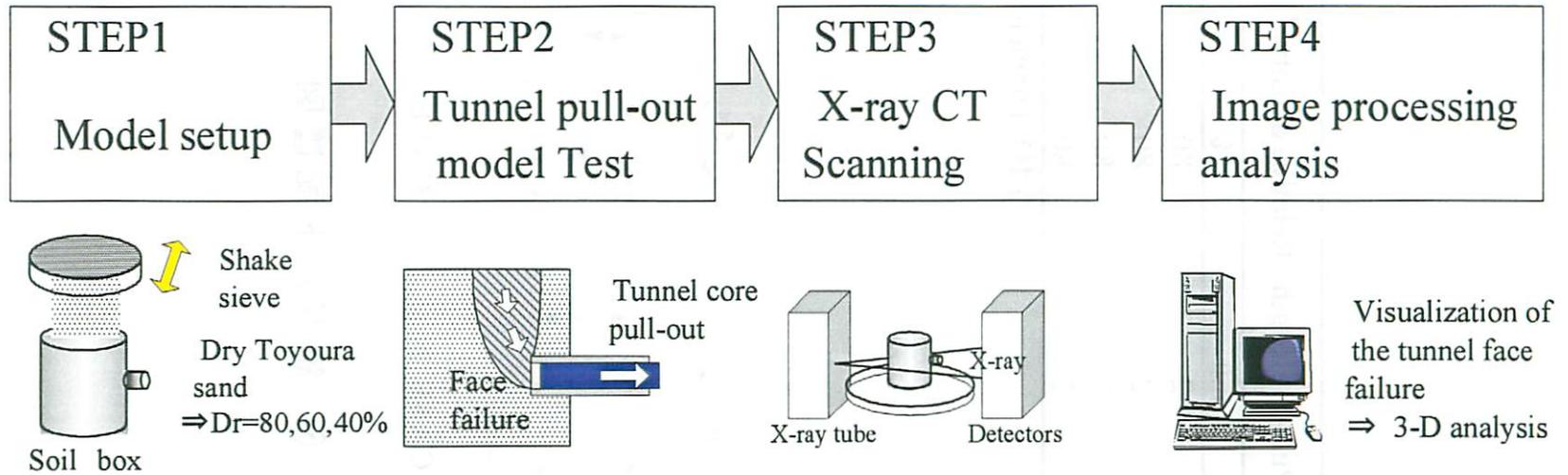


図 3.5 実験手順

表 3.1 実験ケース

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

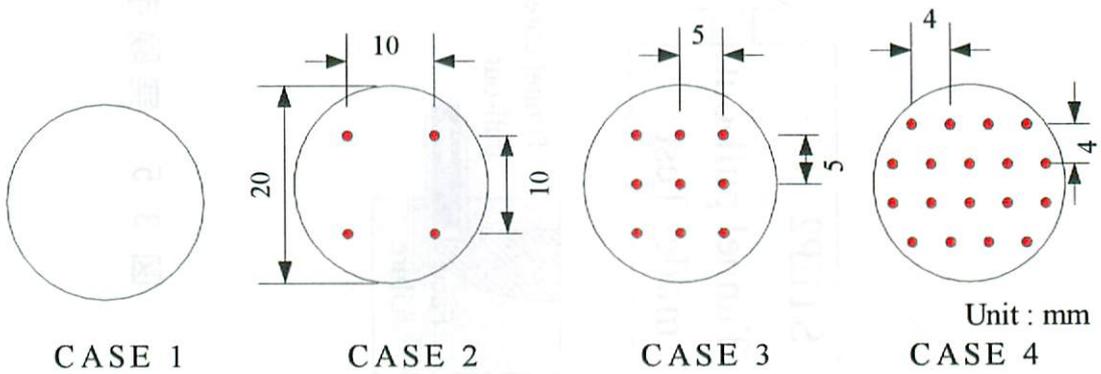


図 3.6 鏡ボルト配置図

図 3.7 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 スキャンによって得られる CT 画像は、CT 値と呼ばれる材料の X 線吸収特性で定式化された値の空間分布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)は黒色で 256 階調の白黒濃淡レベルにより表示される。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。

それぞれのケースの画像データを 3 次元的に再構築し、トンネル中心でのスライス画像を図 3.8 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。これらの結果から、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が確保することが確認できる。また、図 3.9 は崩壊領域のみを特徴抽出した 3 次元画像を示し、表 3.2 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。これらの結果より、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は確保できるといえる。

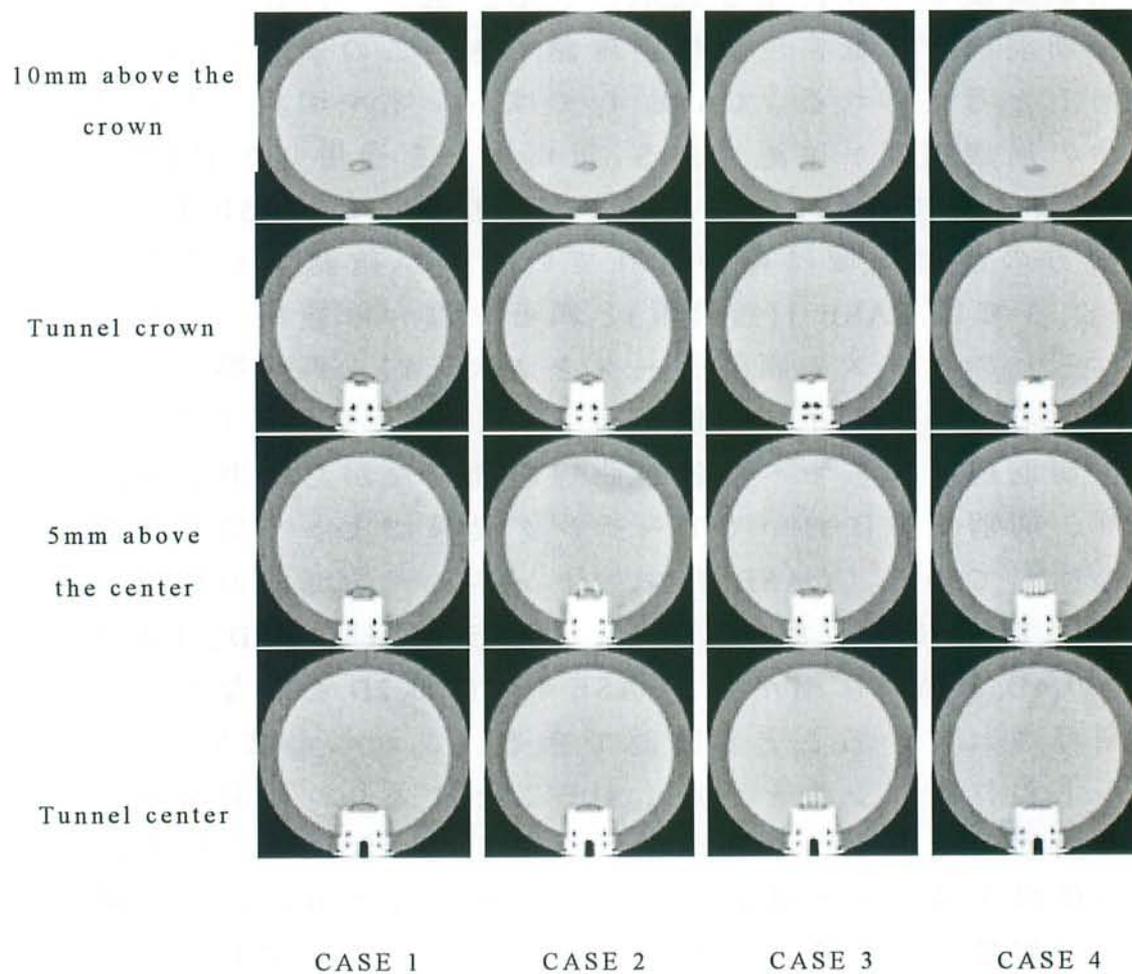


图 3.7 水平断面画像

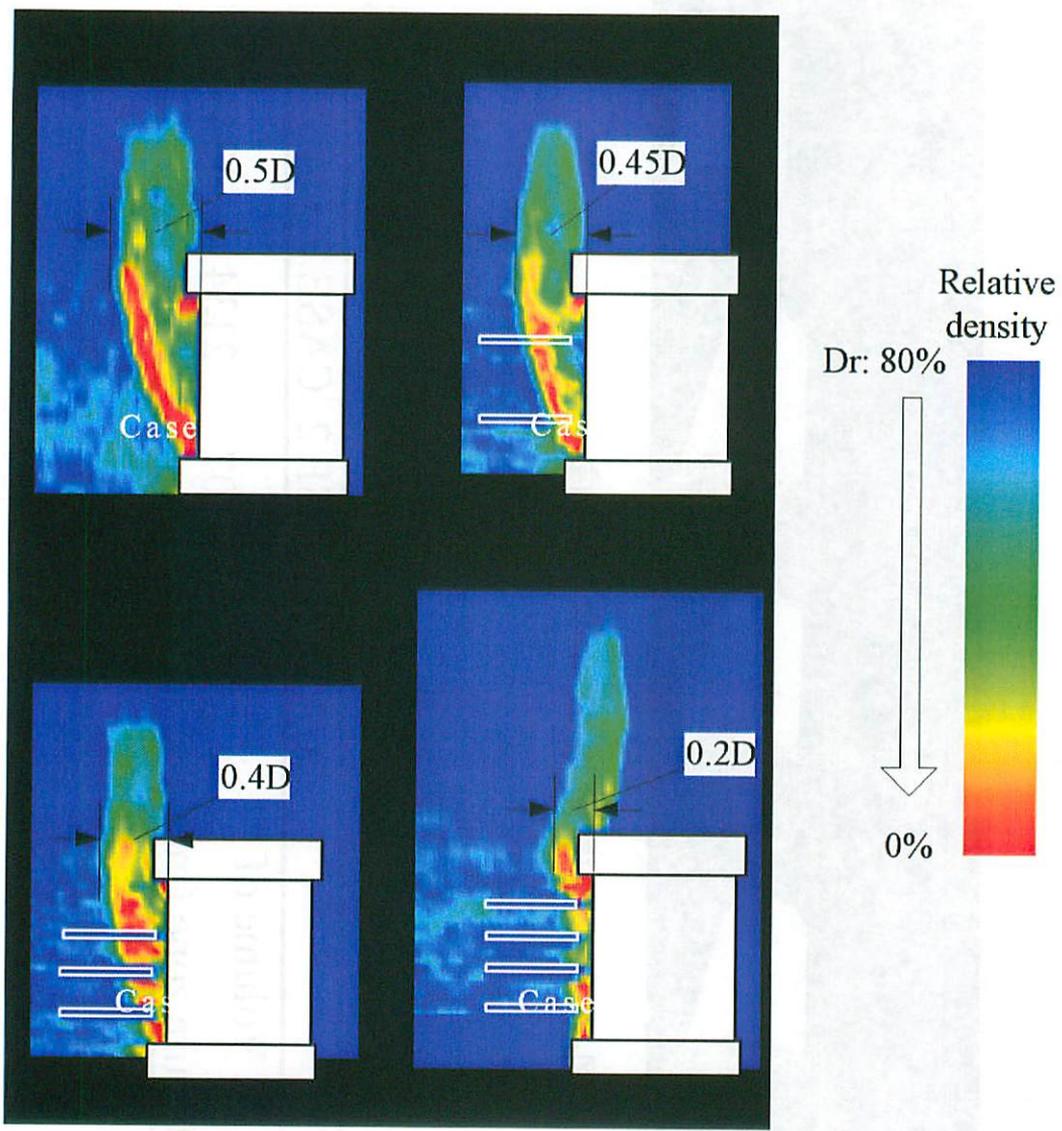


図 3.8 水平断面画像（トンネル側面）

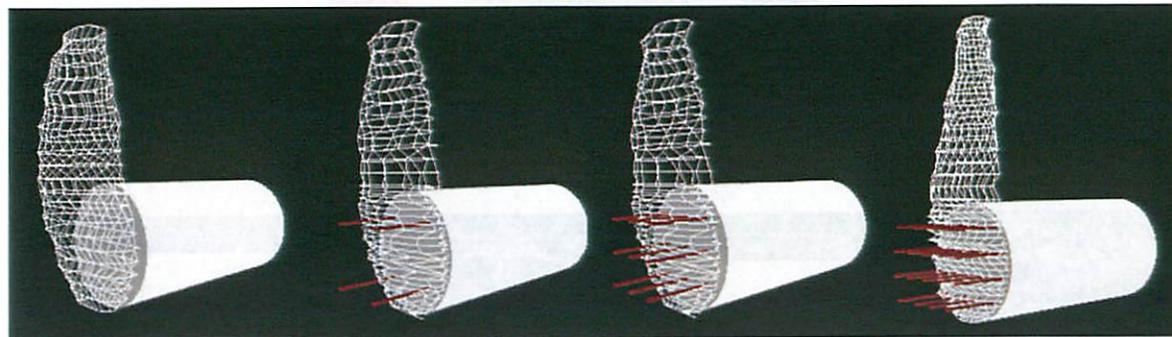


図 3.9 崩壊領域の 3 次元画像

表 3.2 崩壊領域体積

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

## 第 3 章 一面せん断試験装置の開発

### 3.1 X線 CT 用一面せん断試験装置の開発

本研究で使用している産業用 X 線 CT スキャナの撮影室は、下記の特徴を持っている。

- 1) 試料台の最大積載重量が 980N までである。
- 2) 撮影中に、試料台が X 線源と検出器の間を並進及び移動回転する。
- 3) 最大撮影領域は、直径 400mm である。
- 4) 撮影中は、完全に遮蔽される。

これらは X 線 CT 撮影室内で一面せん断試験を行うための制約条件となり、これらの条件が従来型一面せん断試験装置の適用の障害となっている。以下にその問題点を列挙する。

(a) 試料台に反力を取ることが不可能である。(前段の(1)に関連)

(b) 従来型一面せん断試験機はせん断箱と載荷装置が一体型ではないため、X 線 CT 撮影室内に載荷装置を搬入しなければならない。しかし、X 線 CT 撮影室には従来型一面せん断試験装置一式を搬入できる空間はない。

(前段の(2)に関連)

(c) 従来型一面せん断装置は鉄製であるため X 線を通さない。(前段の(3)に関連)

(d) 電源は、撮影領域外に設置するような工夫が必要である。(前段の(3)及び(4)に関連)

以上のことを考慮し、X 線 CT 撮影室内で一面せん断試験が実施可能な X 線 CT 用一面せん断試験装置を開発した。

開発した試験装置を写真 3.1 に示す。せん断箱、載荷装置の支柱は X 線を通させるためにアルミを用いて作製した。また、撮影領域内にせん断のためのモーターや計測装置が入

らないように、せん断箱の下にもう一段箱を設置することで高さを調節した。また、装置の底には反力を取らせるための板を設け、試料台には装置の自重のみが作用する。さらに、本装置の X線 CT室への持ち運びも、装置自体が解体できる。

せん断箱は写真 3.2 に示すように 3 パートに分けられる。これらの組立図を図 3.10 に示す。上段には直径 80mm の空洞を設け、中段には  $\Phi 80\text{mm}$ 、深さ 40mm の円筒を設けた。さらに、中断には下段と接続し固定するための直径 80mm、高さ 15 mm の接続部を設けた。これら上段と中断で直径 80mm、高さ 80mm の供試体を作製する。下段には中段の底と接続し、固定するために直径 80mm、深さ 15mm 円筒を設けた。また、下段を駆動部で押込むことによりせん断を行うため、下段底にはせん断時に反力板との摩擦を低減するためにスライドガイドを設置した。また、上段の固定はせん断箱の両脇に設置する支柱にネジで固定されている。

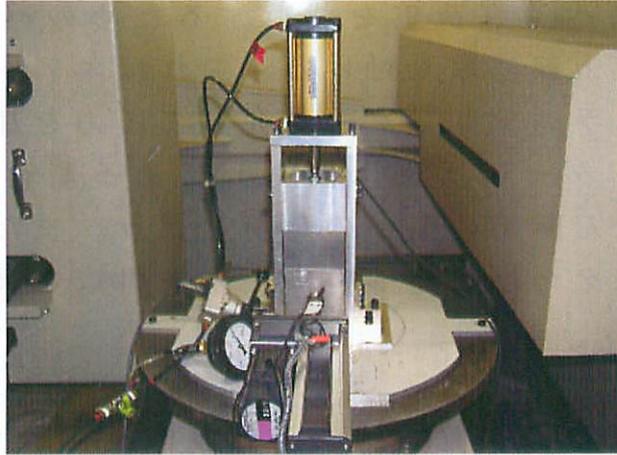
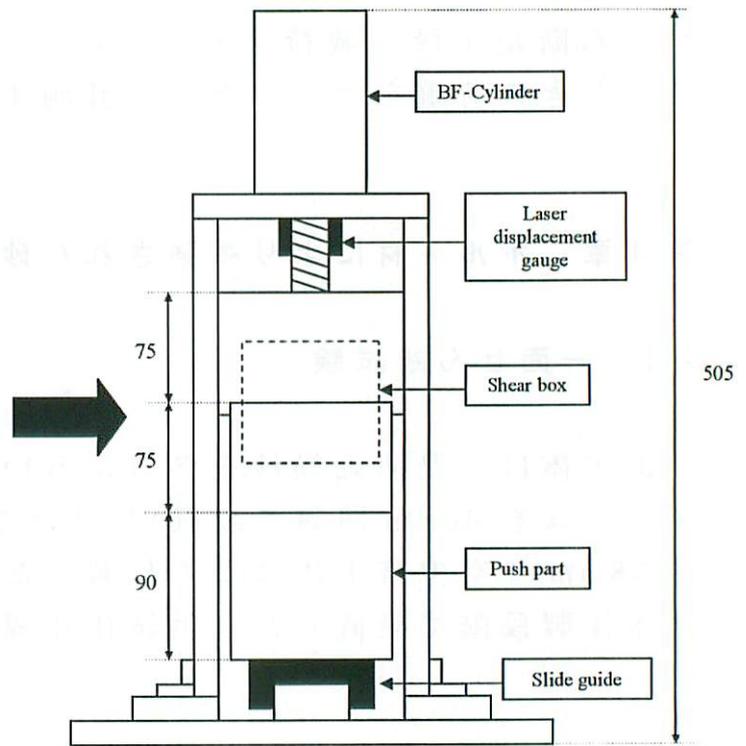
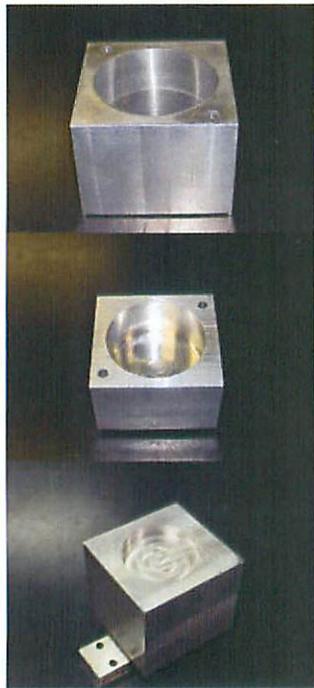


写真 3.1 X線 CT 用一面せん断装置



Unit : mm

図 3.10 一面せん断装置概要

### 3.2 載荷装置および計測装置

せん断箱へ鉛直荷重を載荷するためのペロフラムシリンダーを装置上部に取り付ける。これはエアーコンプレッサーからペロフラムシリンダーを介して圧力を加え、このペロフラムシリンダーの下部に設置してある載荷アタッチメントを通してせん断箱の蓋への載荷を行う。また、せん断のための載荷モーターは、前章のトンネル引抜き実験装置の駆動部を用いる。

図 3.11 に計測装置と試験装置の構成を示す。せん断箱のせん断変位は接触式変位計(25 mm)、鉛直変位はレーザー変位計を用いて計測する。接触式変位計は 3 パートに分かれているせん断箱の下段に接触するように取り付ける。レーザー変位計はペロフラムシリンダーが取り付けられている板の裏側に設置し、せん断箱の蓋の変位を計測する。ロードセルは供試体をせん断させる駆動部の先端部分に取り付ける。駆動部がせん断箱下段へ載荷することにより供試体はせん断され、このときの荷重をロードセルで計測する。

## 第 4 章 ボルト材により補強された砂の一面せん断挙動

### 4.1 一面せん断試験

供試体は、豊浦乾燥砂を多重ふるい(425  $\mu\text{m}$ メッシュ+2 mmメッシュを 40mm 間隔で設置)を用いて、せん断箱底面から高さ 38mm で空中落下法により作製した。なお、ボルト材は供試体作製段階で設置した。供試体作成後、せん断箱を X 線

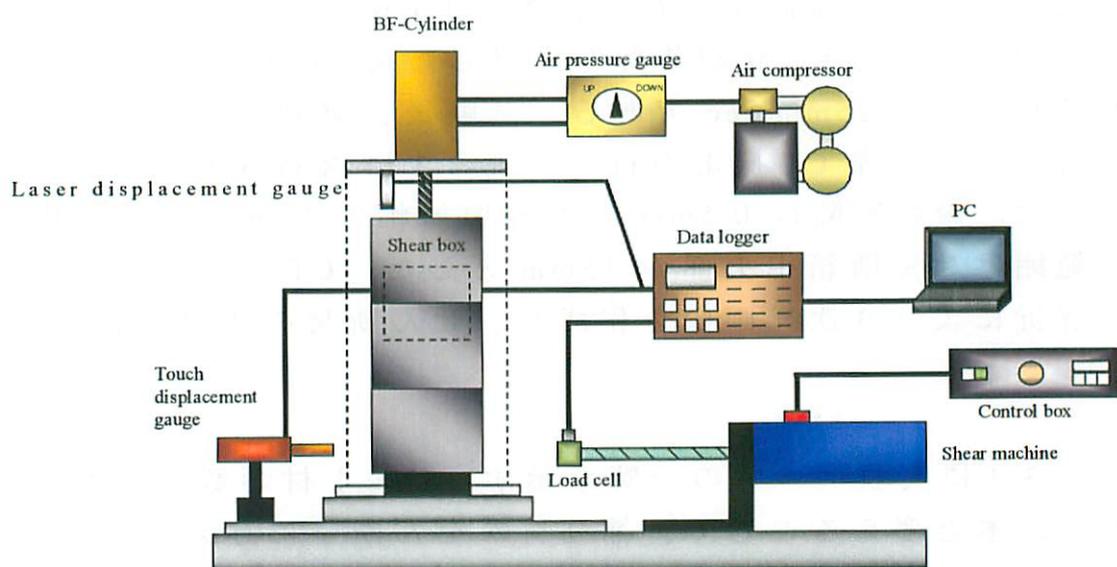


図 3.11 実験システム概要

表 3.3 X線 CT スキャン概要

Scan area	15
Scan pitch	0.5
Irradiation width	1

Unit: mm

CT スキャナ装置のターンテーブル上の一面せん断試験装置の所定の位置に設置する。次に、上載圧をかけ供試体の初期状態と均一性を確認するために X 線 CT 撮影を行う。確認後、駆動部と連結させ、計測装置を設置した後、定速載荷を行う。載荷速度は 0.25mm/sec である。試験後、駆動部、計測装置を取外し、X 線 CT 撮影を行う。表 3.3 に X 線 CT 撮影条件を示す。撮影間隔は 0.5mm で X 線照射幅は 1mm であり、撮影範囲はせん断箱中央部の 15mm とした。CT 撮影後は、画像解析により 3 次元画像を作成し、せん断帯の観察を行う。

表 3.4 に実験ケースの一覧を示す。ボルト材の数を 1 本、3 本、5 本と変えることで、補強材がせん断帯に与える影響について分析した。また、補強材として用いたポリプロピレン樹脂の性質を表 3.5 に示す。このポリプロピレン樹脂を、長さ 7.5mm、直径 1mm の棒状に造形し、供試体を作製する段階で設置した。図 3.12 に補強材の設置位置を示す。

表 3.4 一面せん断実験ケース

Test case	Air pressure	Upside pressure	Shear displacement	Face bolts	Relative density
	MPa	kN/m <sup>2</sup>	mm	number	%
CASE 5	0.2	25.6	7	0	88
CASE 6	0.2	25.6	7	1	88
CASE 7	0.2	25.6	7	3	88
CASE 8	0.2	25.6	7	5	88

表 3.5 補強材物理特性

Tension load (kN)	Mass per unit area (g/m <sup>2</sup> )	Elasticity modulus (kN/m <sup>2</sup> )	Geometric moment of inertia (m <sup>4</sup> )
10.0	340	0.88	$0.45 \times 10^{-11}$

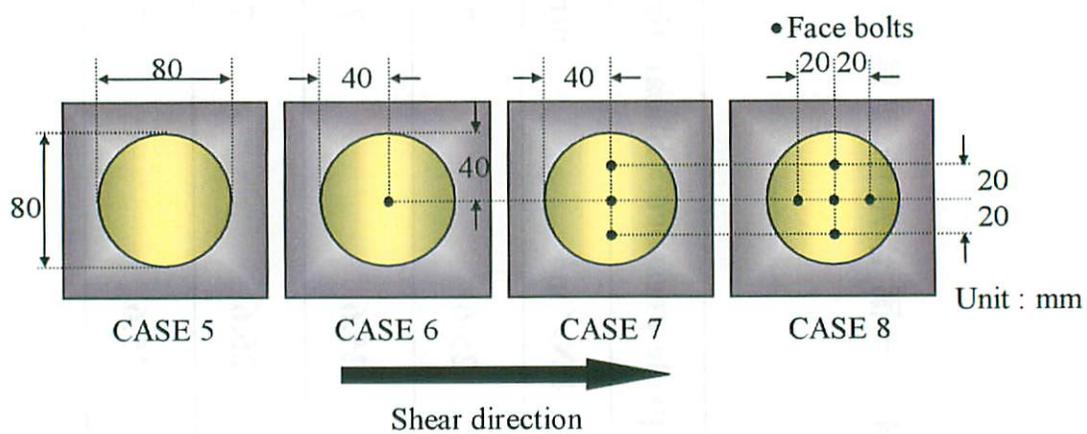


図 3.12 供試体概要

## 4.2 結果と考察

一面せん断試験の結果を図 3.13 に示す。図 3.13 では全てのケースで水平変位が 15mm を過ぎたところで荷重が急に増加している。これはせん断させる駆動部の先端部分とせん断箱下段とを接続させる際の精度に問題があり、駆動部とせん断箱に若干の隙間ができてしまったためと考えられる。CASE5 と CASE6 を比較すると、最大せん断力に差はない。CASE6 は補強材が供試体中央に 1 本設置されているが、本数が少ないためにせん断強度を上げるまでには至っていない。さらに補強材の数を増やしたケース(CASE7, CASE8)では、無補強(CASE5)、補強材 1 本のケース(CASE6)と比較して、ピーク強度は増加している。CASE7 と CASE8 について比較すると、これらも最大せん断力に差はない。CASE7 ではせん断方向と垂直に補強材 3 本を設置している。これに対し、CASE8 ではせん断方向と同様にせん断方向と垂直に 3 本、さらにせん断方向と平行に 2 本の計 5 本、補強材を設置している。これらのことから、せん断方向と垂直に補強材の設置を行えば補強効果が高いが、せん断方向と平行に補強材の設置を行うと補強効果が比較的低いため、CASE7 と CASE8 の結果に差が表れなかったと考えられる。

一面せん断試験後、せん断箱中央部の幅 15mm を撮影範囲とし、0.5mm ピッチで CT 撮影を行った。図 3.14 にそれぞれのケースにおける水平断面画像を示す。全ケースにおいて撮影高さ(a)では低密度領域が確認できず、(b)の画像には低密度領域が広がっているが、(c)の画像では低密度領域が減少していることがわかる。(d)ではさらに低密度領域が小さくなり、せん断面上方よりも下方に低密度領域が拡大していることが伺える。ここで、せん断帯の発達状況を忠実に把握するために 3 次元的な考察が必要である。そこで、水平断面画像を再構築し、鉛直断面画像を作成し地盤内挙動を把握する。図 3.15 にそれぞれのケースのせん断帯を 3 次元的に可視化した画像を示す。

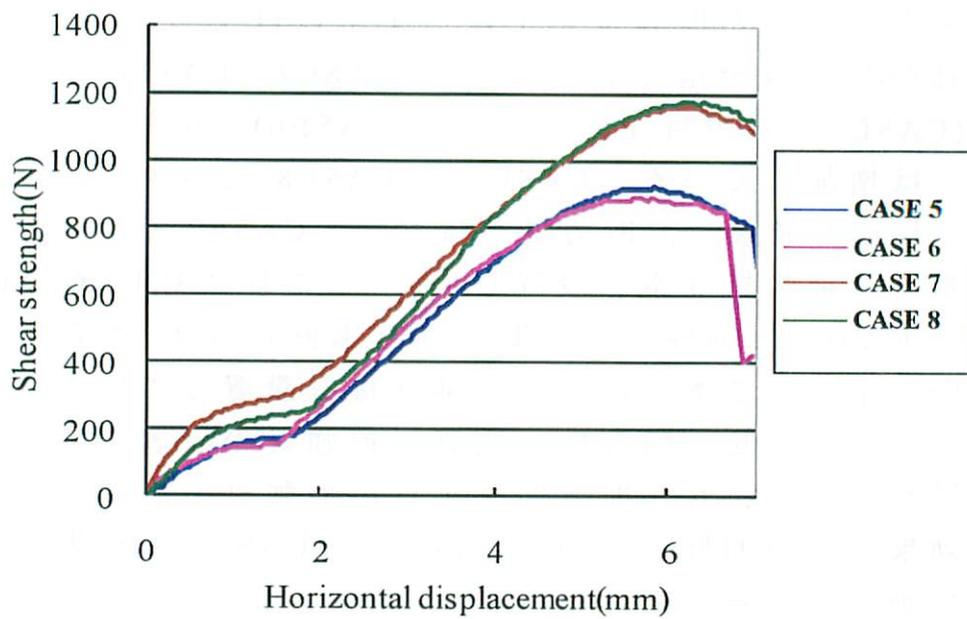


図 3.13 一面せん断試験結果

全ケースとも、供試体の断面全体にせん断帯が広がっていることが確認できる。補強材を5本設置したCASE8では、ボルト間にせん断帯が形成されておらず、補強効果が確認できる。CASE7はCASE5と比較するとせん断帯領域が広がっているように見えるが、前節の一面せん断試験結果に着目すると、補強効果があると考えられる。

次に、図3.16、図3.17にせん断方向と垂直にせん断帯を可視化した画像と断面位置をそれぞれ示す。まず、せん断方向に対して垂直にせん断帯を表した画像について考察を行う。CASE6は載荷面の反対側で、せん断面より下方にせん断帯が広がっており、載荷面側のせん断面上方にもせん断帯が広がっている。CASE7ではCASE6と同様に、せん断面下方にせん断帯の広がり存在するが、せん断帯領域はCASE6と比較すると減少している。また、CASE7ではせん断面上方へのせん断帯の広がりみられず、ボルト材を1本から3本へ増加させた効果が認められる。CASE8はCASE7と比較してもせん断帯の減少が確認できる。これは、CASE6とCASE7でせん断帯が広がっていた箇所にボルト材を設置し、せん断帯の形成を抑制したためであると考えられる。

せん断方向に対し、平行にせん断帯を表した画像について考察を行う。この画像からも、ボルト材の数に比例してせん断帯が減少していることがわかる。また、ボルト間のせん断帯は形成されていないことが確認できる。

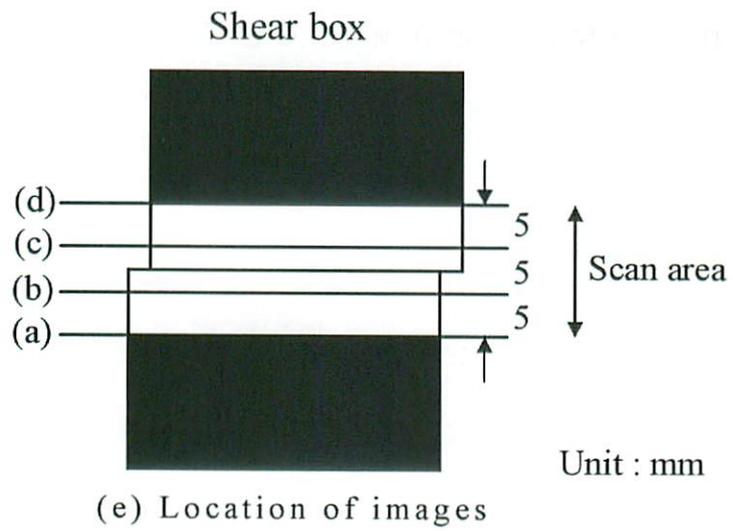
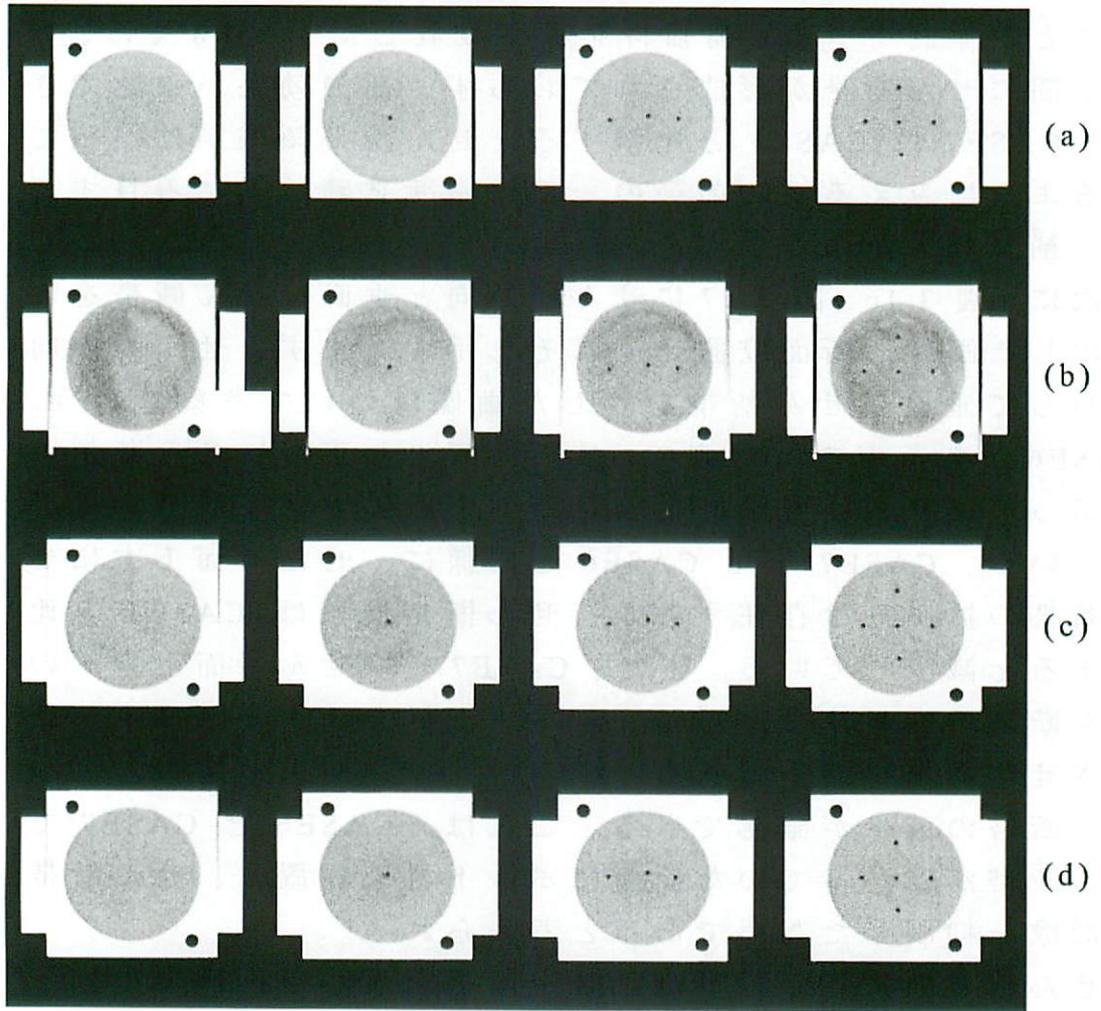


图 3.14 水平断面画像

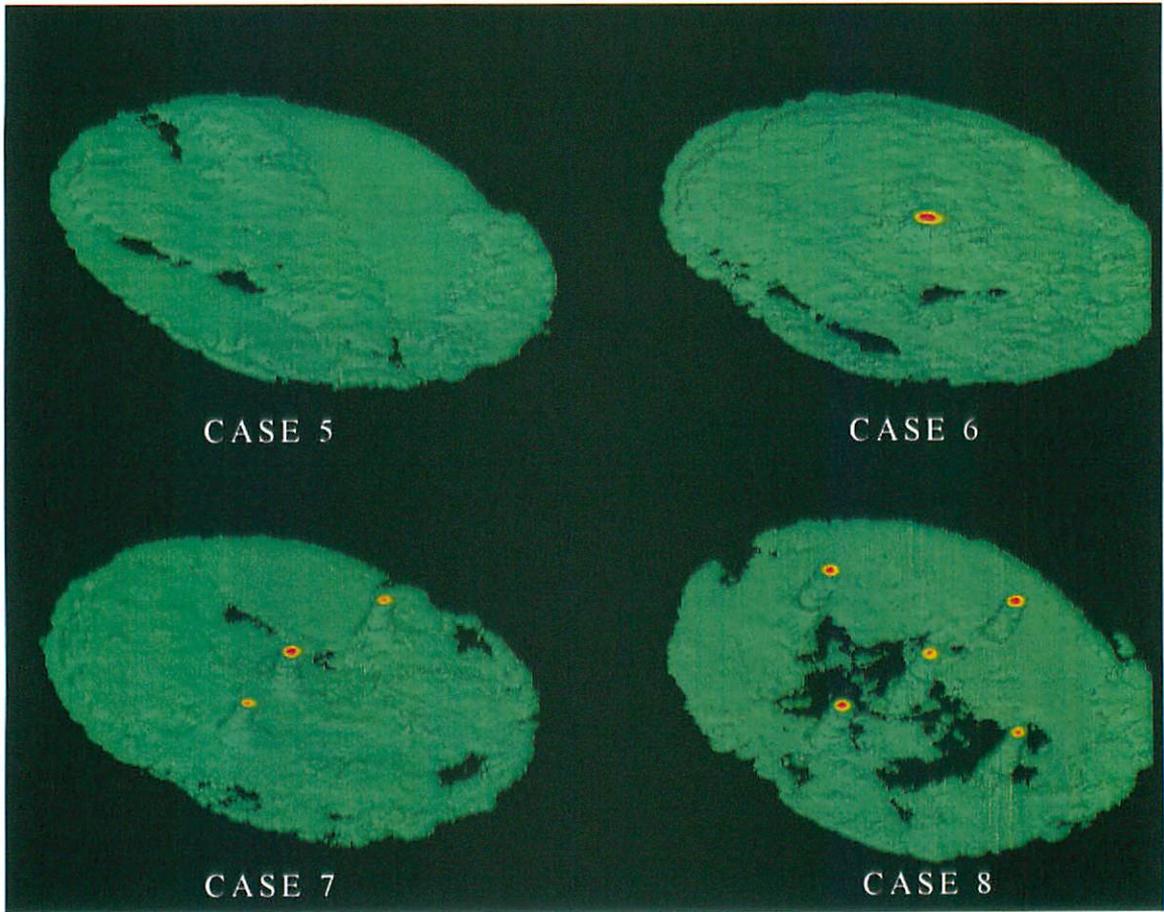
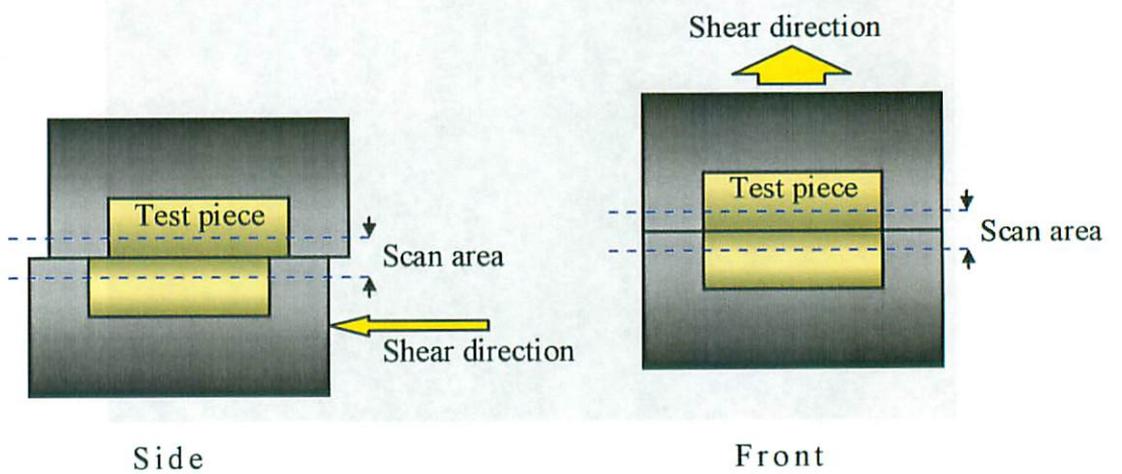
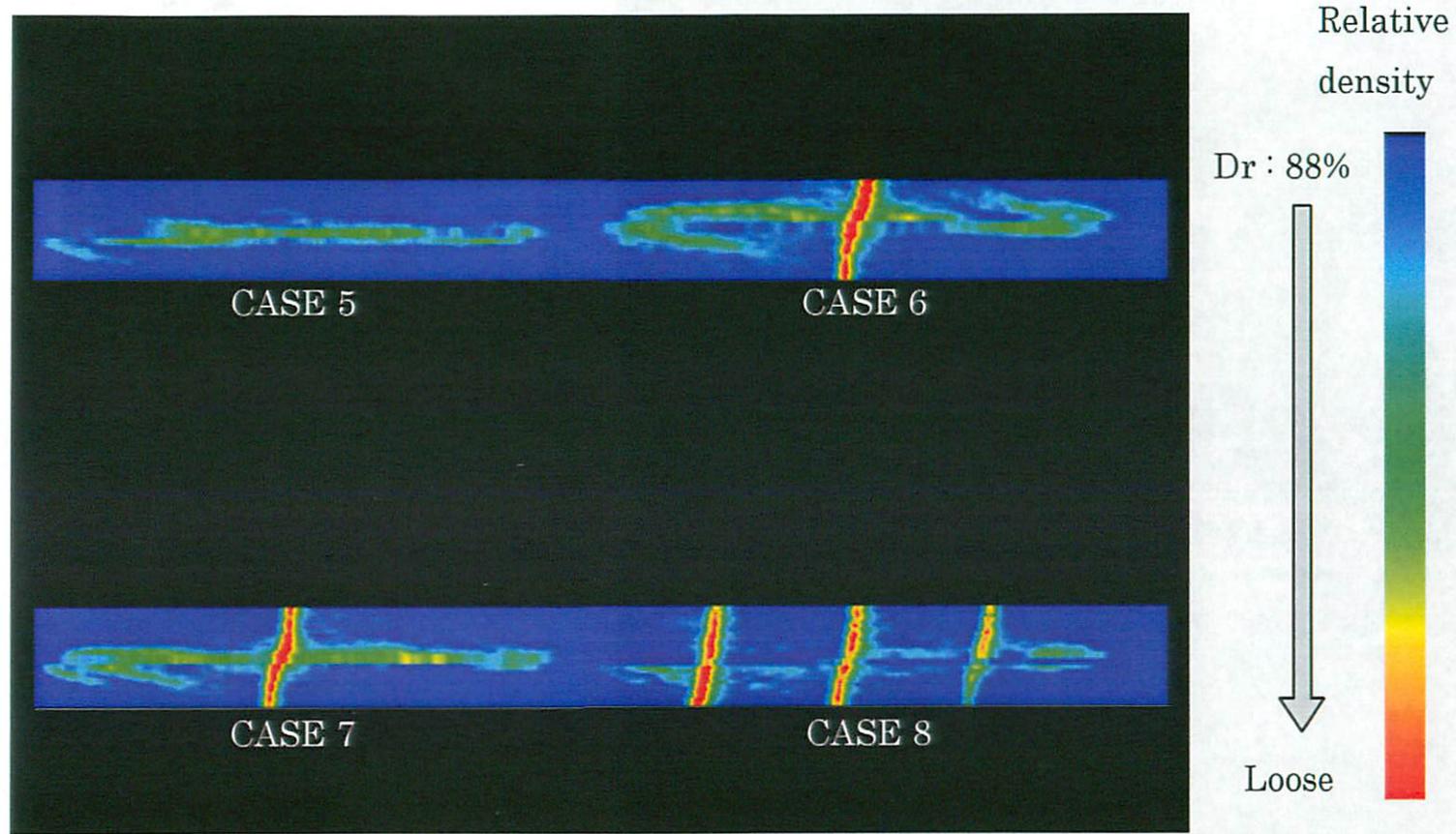


図 3.15 せん断面の 3次元画像



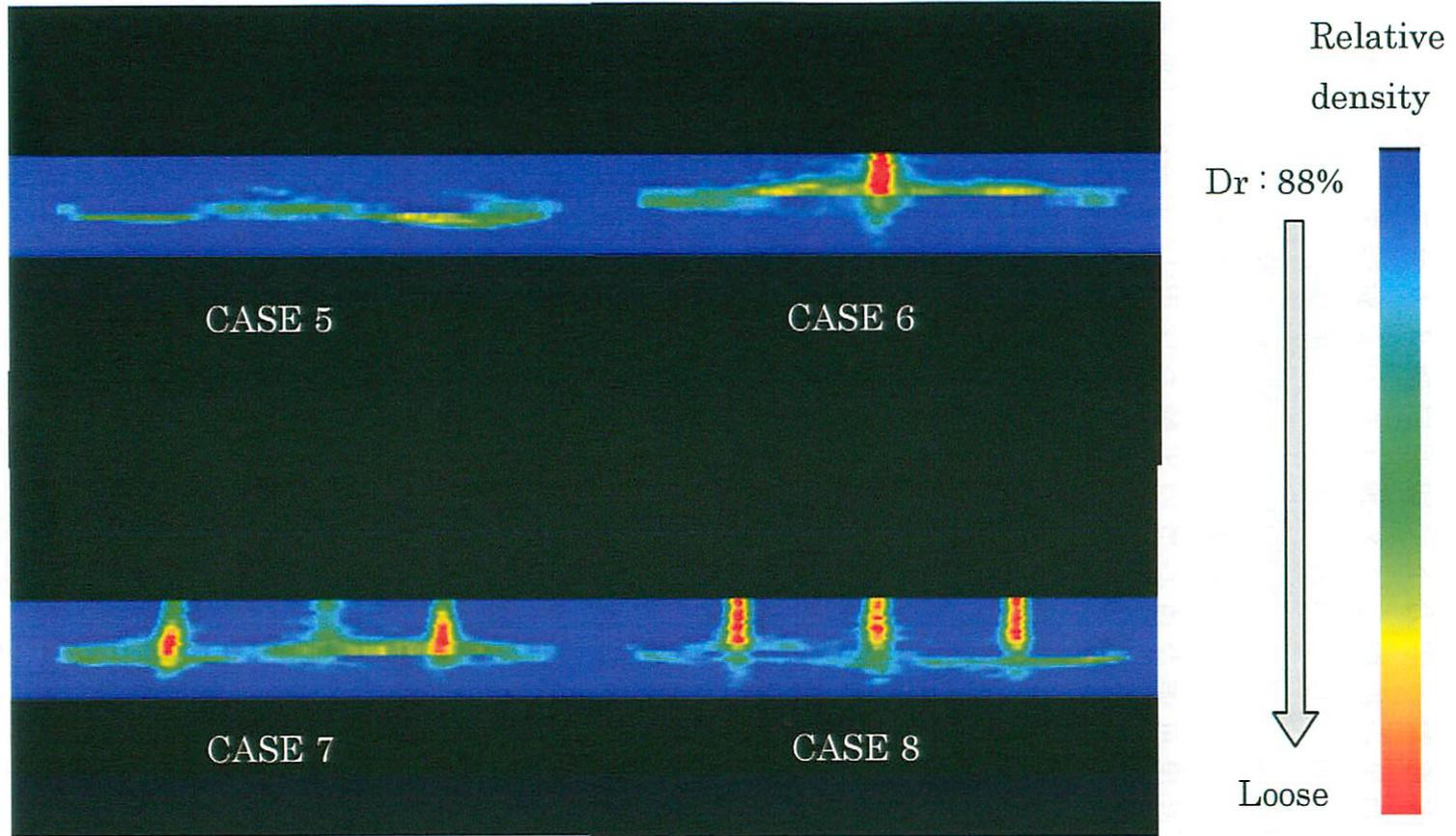
(a) Location of image

図 3.16 断面画像位置



(b) Vertical cross sectional images (side)

图 3.17 鉛直断面画像



(c) Vertical cross sectional images (front)

图 3.17 鉛直断面画像

## 第 5 章 遠心模型実験

### 5.1 実験目的

本実験は，実地盤の応力下で切羽崩壊メカニズム及び切羽補強工の補強効果を把握し，X線CTの実験結果と比較検討を行うことを目的としている．さらに，破壊だけでなく変形抑制効果の側面からも切羽補強工の補強効果を評価することも目的とした．その目的を実現させるための手段として実地盤の応力を再現可能な遠心模型実験を採用し，Case01(無補強)とCase02(鏡ボルト有り)の実験を行った．

### 5.2 実験概要

#### 5.2.1 トンネル掘削のモデル化

##### (a) 土槽

本実験で使用した土槽を図 3.18 に，トンネル模型を図 3.19 にそれぞれ示す．土槽の内寸は， $L500 \times W500 \times H400$ (mm)である．トンネル径は土槽の境界に影響を大きく受けない範囲で出来る限り大きい値とするため 100mm を採用した．実験で設定した遠心加速度は 75G であることから，実地盤では径 7.5m のトンネルを模擬していることになる．また，トンネルを模擬した円筒形のゴム内に空気圧をかけ，段階的に内圧を下げることによってトンネル掘削を模擬した．現状のトンネル掘削現場では，1掘削長を 1.0-1.5m と設定していることが多く，本実験でもそれにあわせて 1掘削長を  $20\text{mm} [75(\text{G}) \times \langle \text{遠心場} \rangle > 20(\text{mm}) = \langle \text{実地盤} \rangle 1.5(\text{m})]$  とした．

##### (b) 地盤モデル

地盤には，図 3.20 の粒度分布を示す豊浦標準砂を用いた．最大密度 ( $\rho_{d-\max}$ ) は  $1.642(\text{g}/\text{cm}^3)$ ，最小密度 ( $\rho_{d-\min}$ ) は  $1.334(\text{g}/\text{cm}^3)$  である．また，鏡ボルトによる補強効果が得られるように地盤を密詰めとし，相対密度は 80% に設定した．

##### (c) 切羽補強工(鏡ボルト)

切羽補強工である鏡ボルトには，図 3.21 に示したステンレス製のパイプ(中空， $L=150\text{mm}$ ， $\phi=2.1\text{mm}$ )を用いた．鏡ボルト

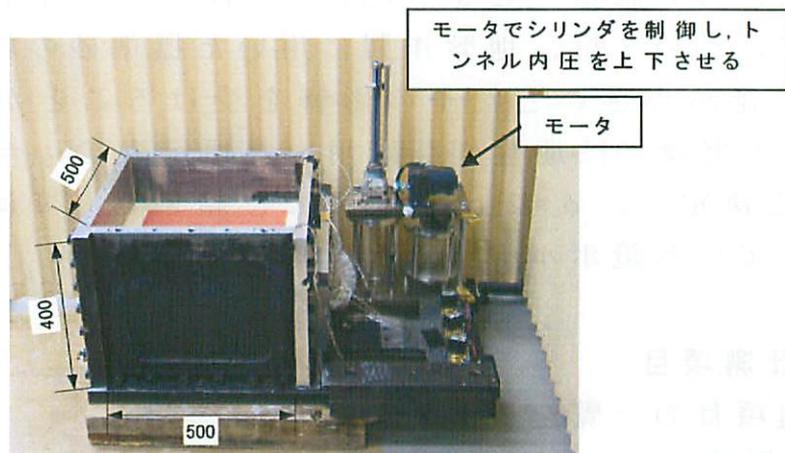


図-3.18 土槽写真(全体)

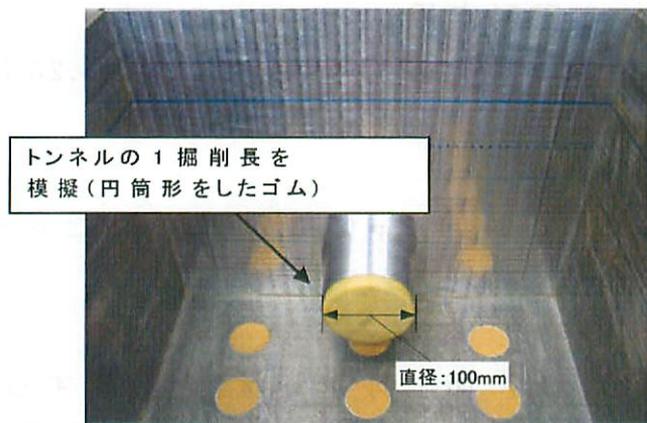


図-3.19 土槽写真(トンネルモデル)

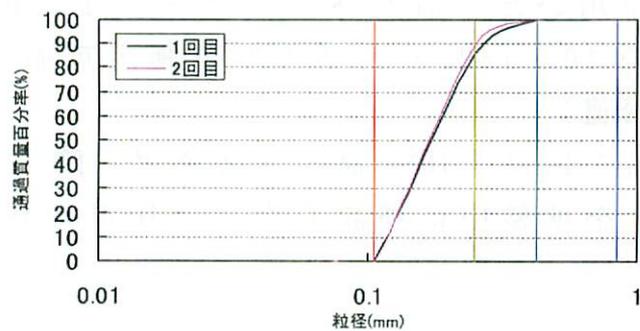


図-3.20 実地盤に用いた豊浦砂の粒度分布

トは、砂質地盤においては  $1.0D$ (トンネル径)以上あれば補強効果が十分に得られることが分かっているが、より確実に補強効果が得られることを目的に  $1.5D$  のボルト長とした。パイプ径については、地盤作製に用いた標準砂の粒径に対して、パイプ径が小さいと粒子の影響を受けることが懸念されるため、本実験では地盤作製に用いた標準砂  $D_{50}(=0.2\text{mm})$  の約 10 倍と決定し、 $\phi=2.1\text{mm}$  とした。結果としては、実際に用いられている鏡ボルトより大きい値となる。

### 5.2.2 計測項目

計測項目の一覧を表 3.5 に示す。

#### (a) 加速度計

実験中の遠心加速度を測定する目的で、図 3.22 に示す加速度計を用いた。

#### (b) 間隙水圧計(エア圧測定用)

シリンダ内及びトンネル内圧の測定には、図 3.23 に示した間隙水圧計を使用した。

#### (c) レーザー変位計

地表面沈下を計測する目的で、図 3.24 に示したレーザー変位計を図 3.25 のように設置した。

#### (d) ゴム歪計

切羽奥の地中変位(主に切羽押し出し量)を計測する目的で、図 3.26, 3.27 に示したゴム歪計を埋設した。地盤の動きに付随してゴムが伸縮するように、使用したゴムの剛性を決定した。ひずみゲージには、大変形に対応するよう箔大ひずみゲージを用いた。箔大ひずみゲージは、単純引張ひずみにおいて約 10~15% の大ひずみが測定可能である。

#### (e) 土圧計(鉛直)

トンネル上部の鉛直土圧を測定するため、図 3.28 に示した小型圧力センサを地盤中に埋設した。土圧計の形状を図 3.29 に示す。

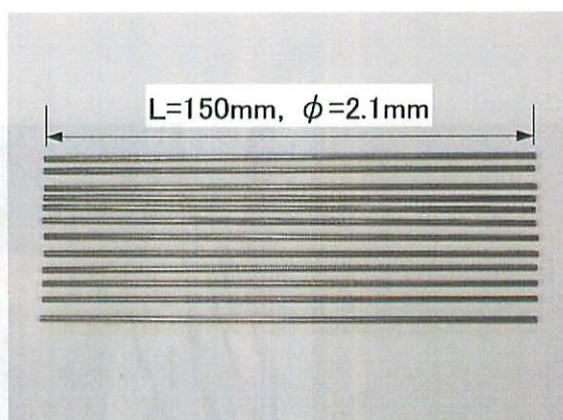


図-3.21 鏡ボルトモデル

表 3.5 計測項目一覧

計測項目	目的	機器の仕様
(a)加速度計	遠心加速度の測定	共和電業製:AS-200A
(b)間隙水圧計	シリンダ内及びトンネル内圧の測定	共和電業製:PGM-2KC 測定レンジ:0-200kPa
(c)レーザー変位計	地表面沈下計測	KEYENCE製:LB-1000, 1100 測定レンジ:±5mm(LB-1000) ±15mm(LB-1100)
(d)ゴム歪計	周辺地盤の地中変位計測	箔大ひずみゲージ(共和電業製:KFEL-2-120-C1)
(e)土圧計	鉛直土圧計測	小型圧力センサ 共和電業製:PS-5KC 測定レンジ:0-500kPa



図-3.22 加速度計

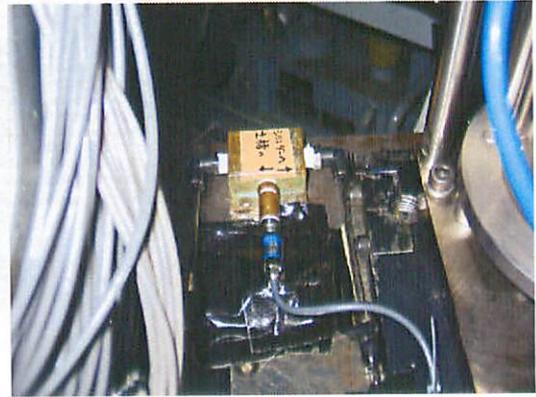


図-3.23 間隙水圧計



図-3.24 使用した  
レーザー変位計

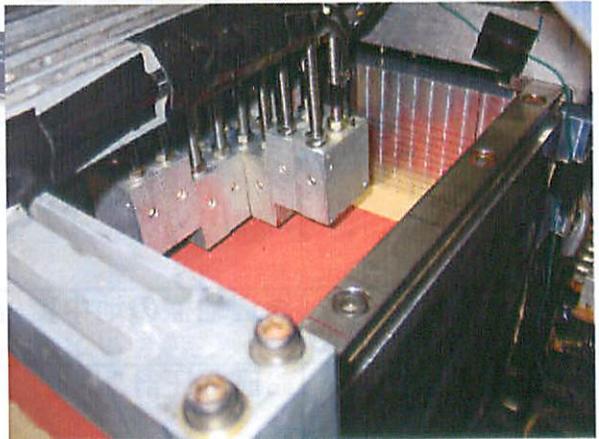


図-3.25 レーザー変位計  
設置状況

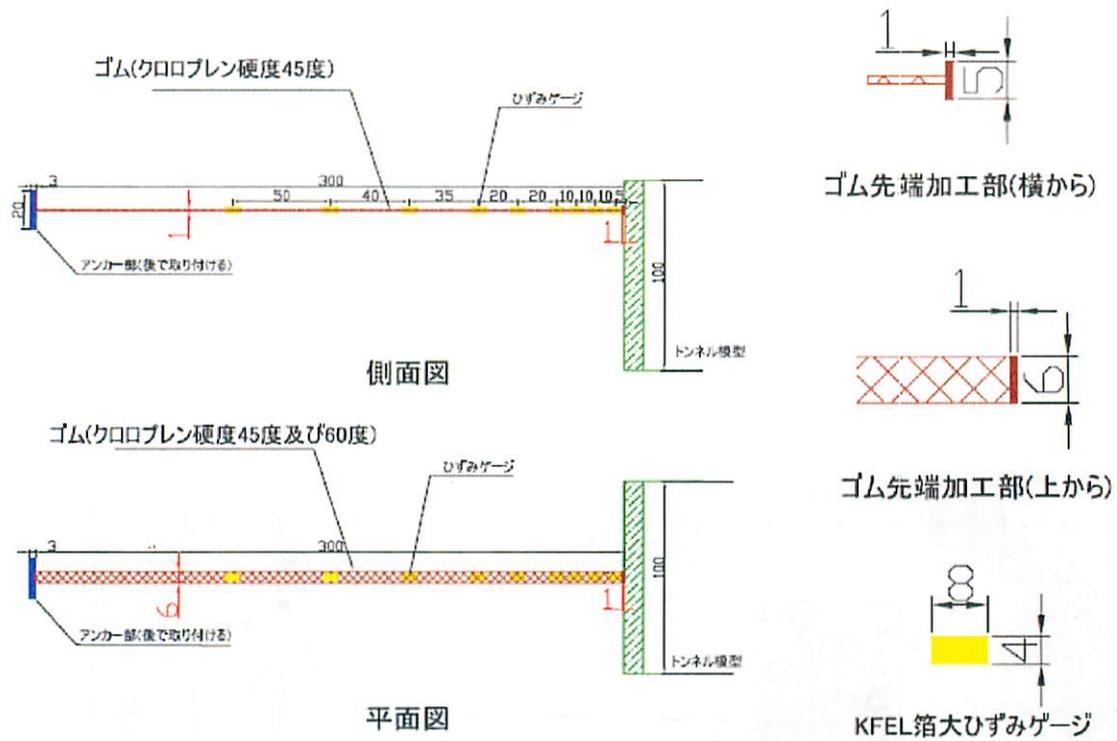


図 3.26 ゴム歪計図面

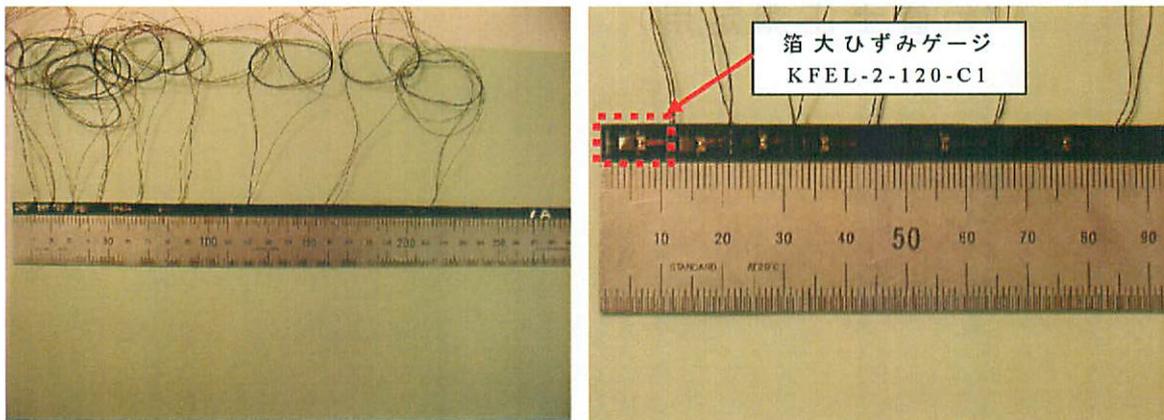


図 3.27 ゴム歪計  
(左：全体図、右：トンネル近傍部拡大)

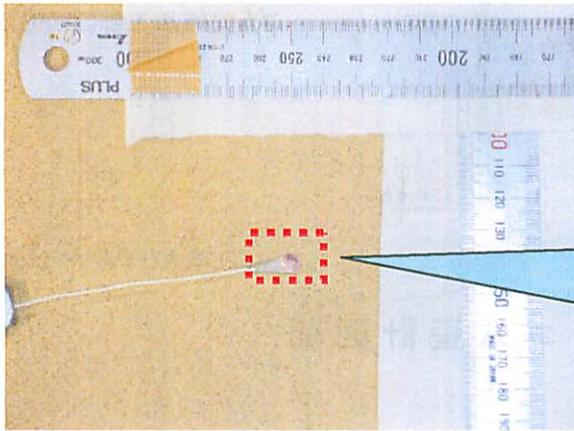


図 3.28 土圧計設置状況  
(鉛直土圧測定用)

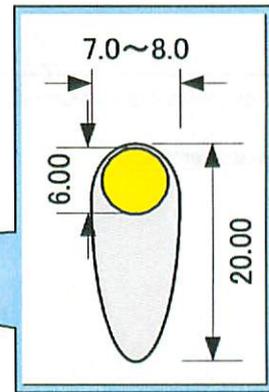


図 3.29 土圧計図面

### 5.3 実験手順

図 3.30 に実験手順を示す。

- ① 地盤モデル作製：相対密度 80%となるように，砂降らし高さ，ホースの種類及びホースの吐出口を決定し，砂降らしを行った(図 3.31)。またトンネル下端 2cm より地表面まで 1cm 間隔で，拡大写真のように色砂(高さ：約 1mm)を設置した(図 3.32)。
- ② (ボルト及び)計測機器埋設：図 3.33(Case02 のみ)，図 3.34 のようにボルトをモデル化したパイプ及び計測機器を埋設した。
- ③ 加速度上昇：遠心加速度を 75G まで段階的に上昇させる。加速度上昇時は，トンネル内圧と遠心加速度の比を一定にすべく表 3.6 のように増加させる。
- ④ 掘削開始：遠心加速度を 75G で 10 分間安定させた後，トンネル内圧を表 3.7 のとおり段階的に減少させる。各段階では 90 秒間内圧を安定化させている。
- ⑤ 崩壊：トンネル内圧の変化，レーザー変位計の変化及び地表面の陥没などから崩壊を確認する。
- ⑥ 遠心加速度降下：遠心加速度を 1G に降下させる。
- ⑦ 写真撮影，掘り出し作業：実験終了後，土槽側壁側から段階的に地盤を掘り出し，トンネル縦断方向の断面図を 5mm 間隔で写真撮影を行う。

### 5.4 実験ケース

無補強(Case01)の実験仕様を図 3.35, 3.36 にそれぞれ示す。また，鏡ボルト(Case02)の実験仕様を図 3.37, 3.38 にそれぞれ示す。

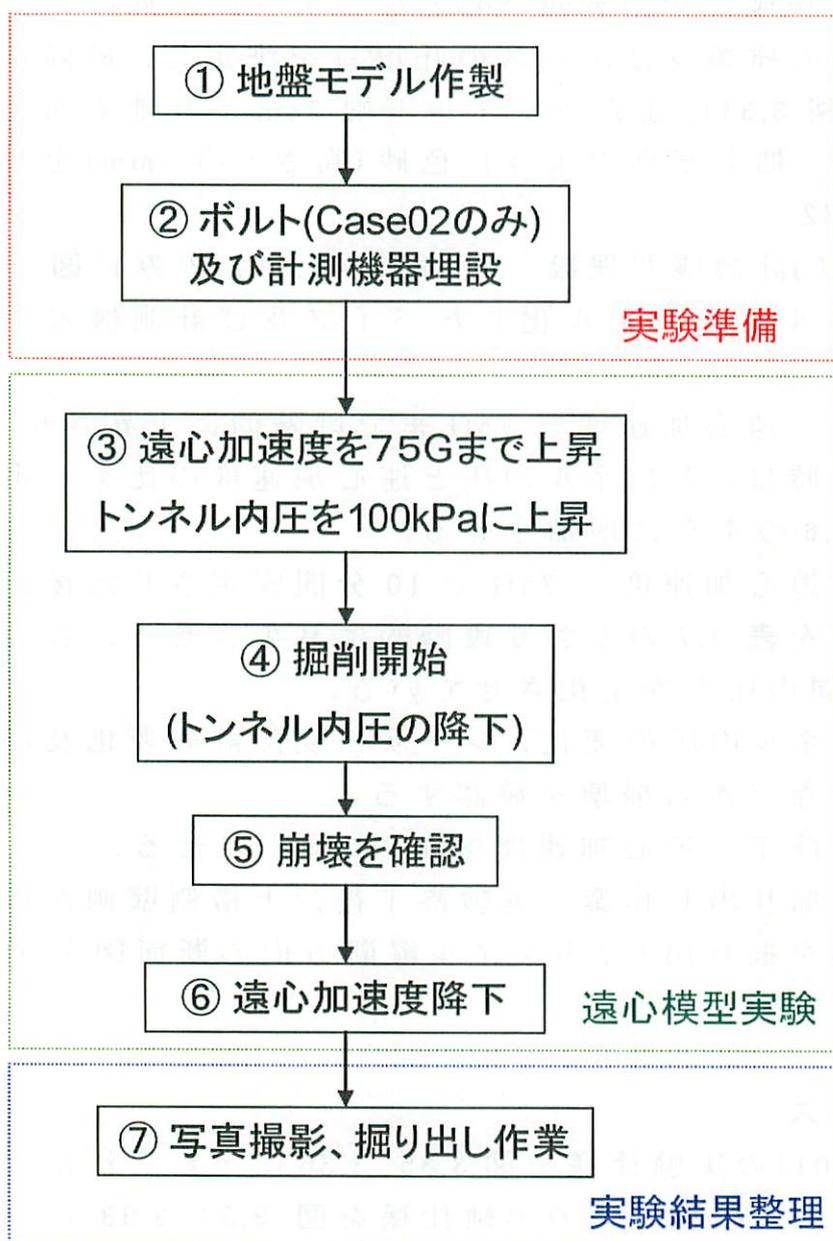


図 3.30 実験手順



図 3.31 砂降らし状況

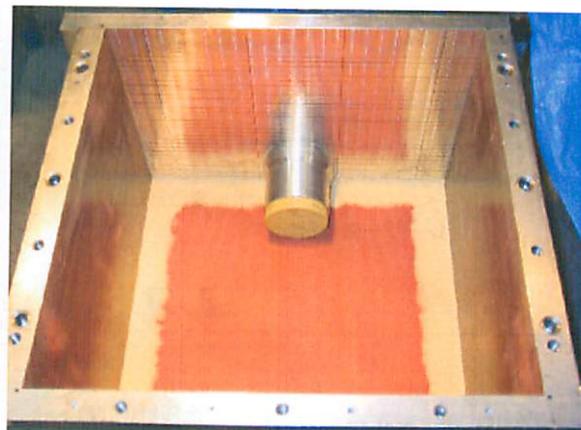


図 3.32 色砂設置

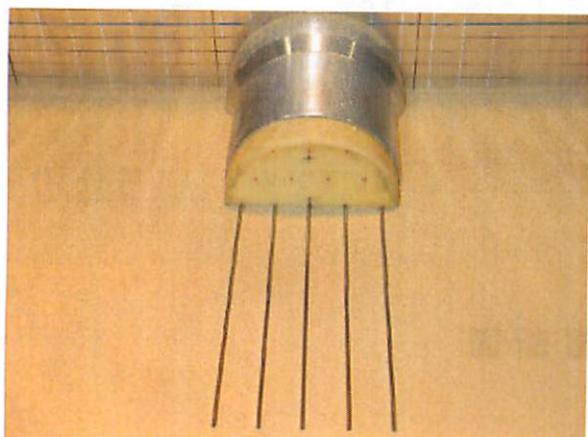


図 3.33 パイプ設置



図 3.34 ゴム歪計

表 3.7 トンネル掘削時におけるトンネル内圧の各安定段階(計画)

表 3.6 加速度上昇時におけるトンネル内圧

遠心加速度(G)	トンネル内圧(KPa)
1	5.0
10	13.3
15	20.0
20	26.7
25	33.3
30	40.0
35	46.7
40	53.3
45	60.0
50	66.7
55	73.3
60	80.0
65	86.7
70	93.3
75	100.0

トンネル内圧(KPa)
100.0
90.0
80.0
70.0
60.0
50.0
45.0
40.0
35.0
30.0
25.0
22.5
20.0
17.5
15.0
12.5
10
7.5
5
2.5
0

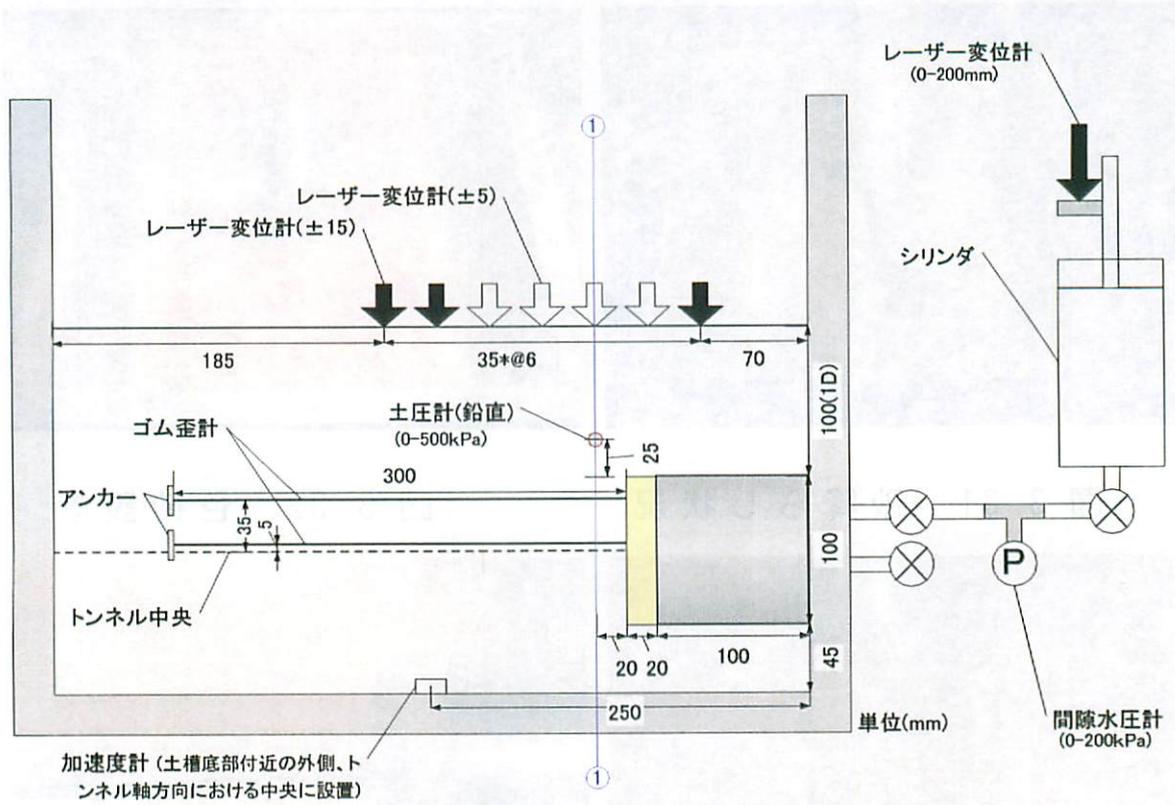


図 3.35 土槽縦断面

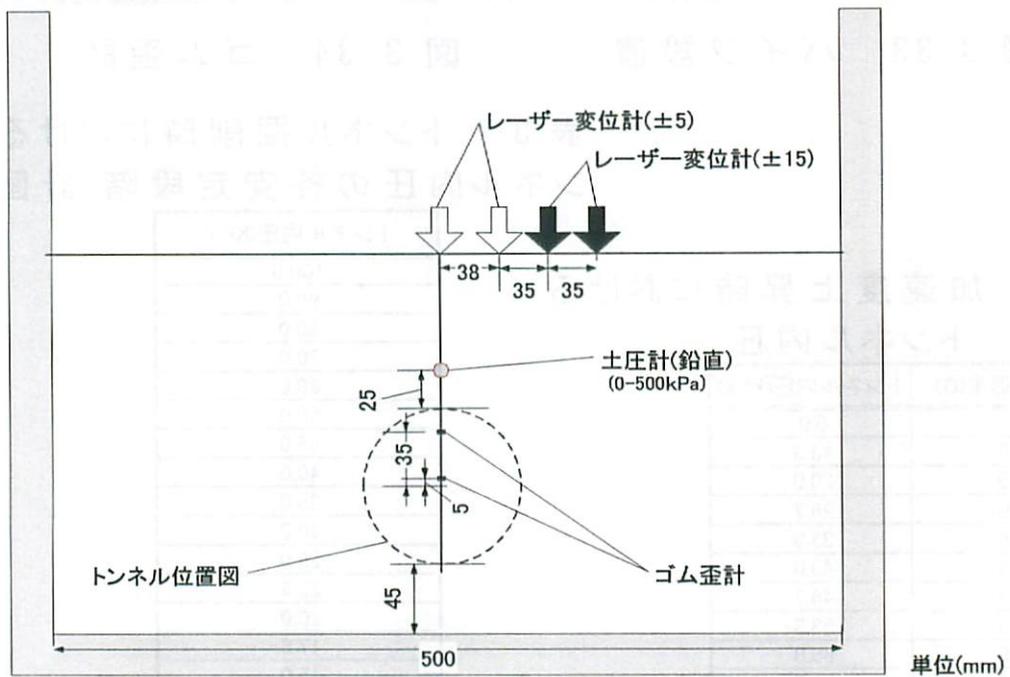


図 3.36 ①-① 断面図



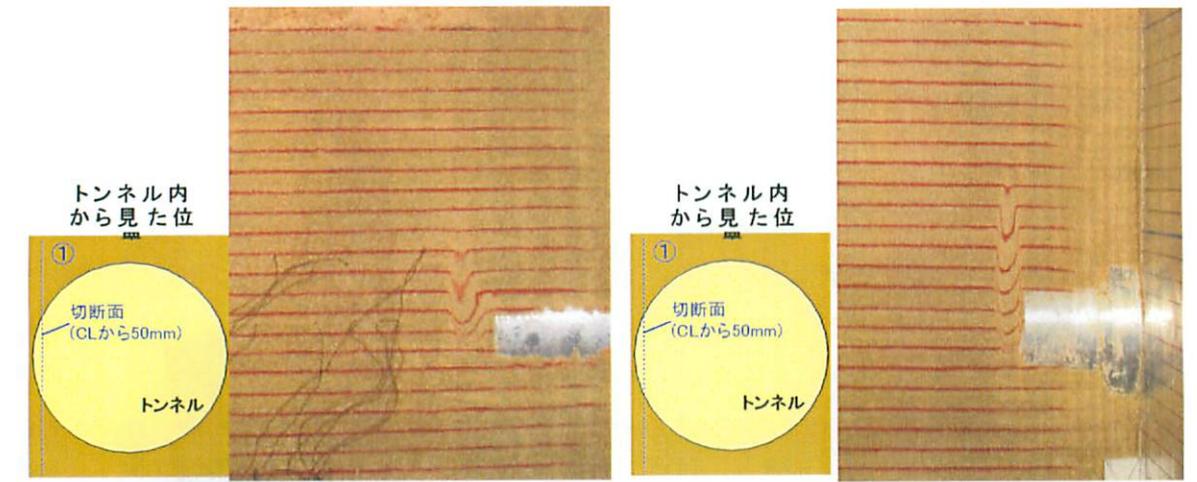
## 5.5 実験結果

図 3.39 にトンネルセンター及びセンターから 45, 50mm の地点における縦断図をそれぞれ示した。また、図 3.40 に縦断図より破壊面座標を取り出して、破壊面形状を三次元 CAD 化した図を示した。破壊時のトンネル内圧は、表 4 に示す通りである。

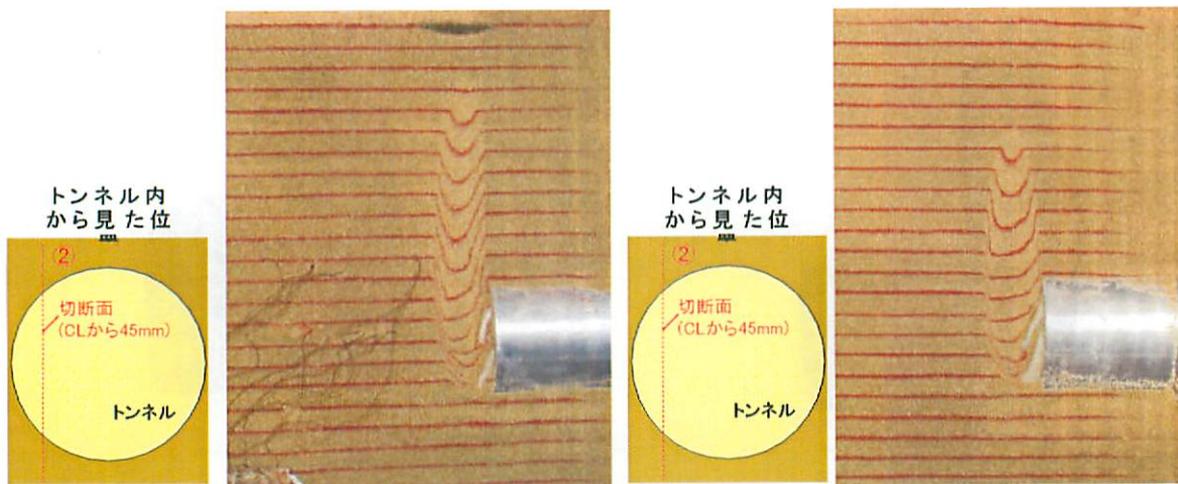
図 3.39, 3.40 に示す通り Case01(無補強)の場合はトンネル底部から対数らせんに近い形状となりクラウン部奥を通過するあたりから鉛直に進展し、地表付近で大きく広がる形で地表陥没が生じた。一方、Case02(鏡ボルト有り)の場合は、破壊線がクラウン部奥を通過する辺りからトンネル側に戻るような形で鉛直に進展した。同様な傾向は、図中右の観測線でも観察された。これらの破壊形状は X 線 CT 実験の結果と非常に酷似していることがわかった。次に表 3.8 にそれぞれのケースにおける破壊時のトンネル内圧を示す。Case01(無補強)における破壊時のトンネル内圧 4.8kPa は既往の研究結果<sup>1) 2)</sup>と整合性があり、本実験の妥当性が確認できた。また Case02(鏡ボルト有り)における破壊時のトンネル内圧から、鏡ボルトによる補強効果についても確認することができた。

図 3.41, 3.42 にトンネル中央縦断面における地表面沈下分布を示す。これらの図よりトンネル内圧 10 k Pa 以上までは、Case01(無補強)と Case02(鏡ボルト有り)に顕著な差は見られないが、5-7.5 k Pa になるとその差が徐々に大きくなり、5kPa では Case01(無補強)で 13.5mm(実地盤換算)、Case02(鏡ボルト有り)で 9.4mm(実地盤換算)沈下が生じている。縦断面における地表面沈下分布については、まず Case01(無補強)では、最大地表面沈下地点付近に、沈下が集中するような変形モードであるのに対し、Case02(鏡ボルト有り)では、最大地表面沈下地点を含めてその付近が全体的に沈下するような変形モードを示していることが分かる。

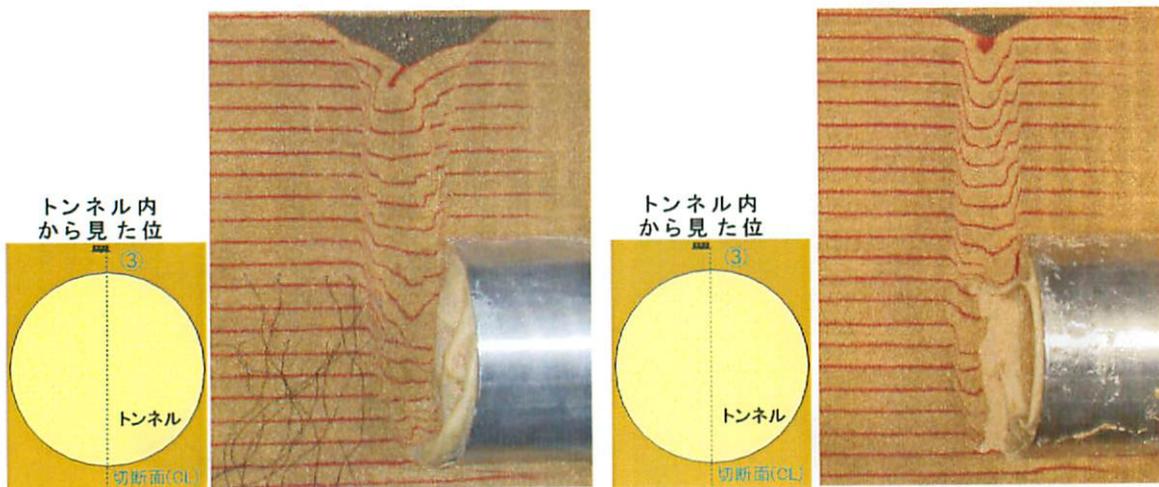
図 3.43 にトンネル内圧低下に伴う最大地表面沈下量の増加傾向を示したが、この結果からも 10kPa 以上までは Case01, 02 共に大きな差が見られないが、それ以下のトンネル内圧になると鏡ボルトの補強効果が顕著に得られることが分かる。



(a) Case01 (無補強 / トンネルセンターから 50mm)      (b) Case02 (鏡ボルト有り / トンネルセンターから 50mm)

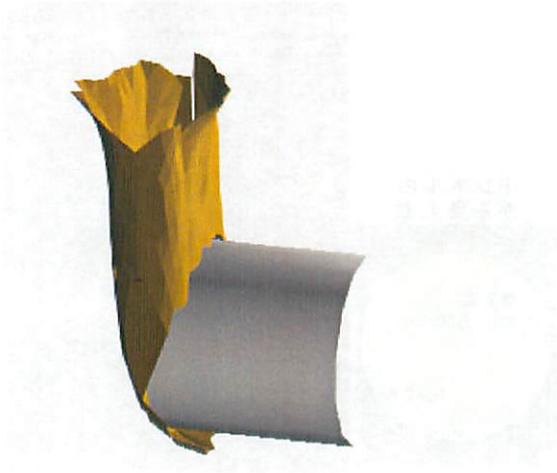


(c) Case01 (無補強 / トンネルセンターから 45mm)      (d) Case02 (鏡ボルト有り / トンネルセンターから 45mm)



(e) Case01 (無補強 / トンネルセンター)      (f) Case02 (鏡ボルト有り / トンネルセンター)

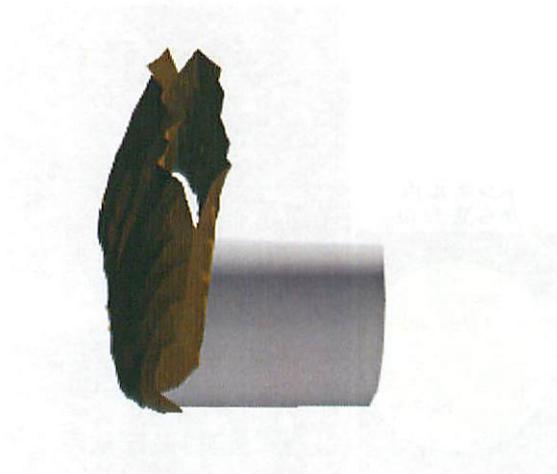
図 3.39 破壊形状 (切出し時、縦断面トンネル中央部)



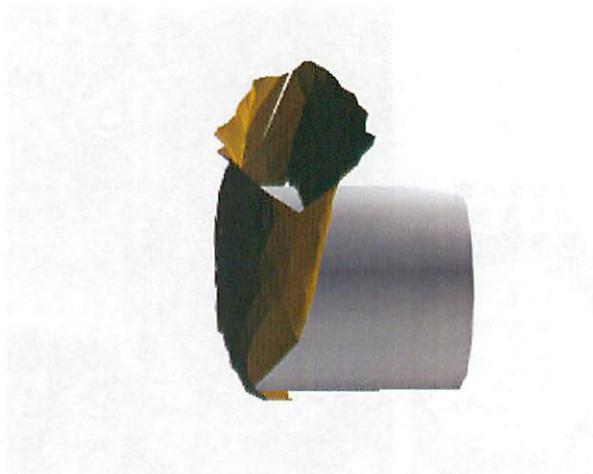
(a) Case01(無補強)



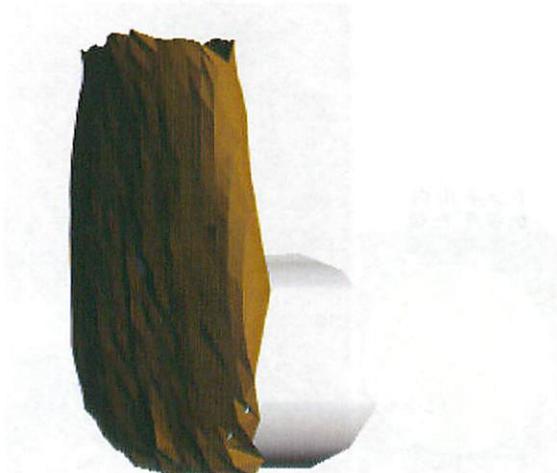
(b) Case02(鏡ボルトリ)



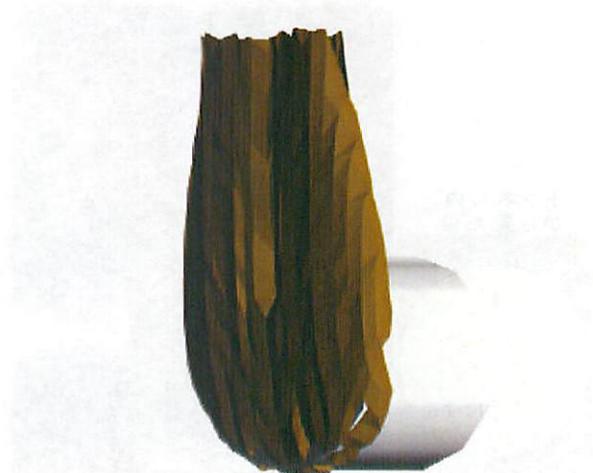
(c) Case01(無補強)



(d) Case02(鏡ボルト有り)



(e) Case01(無補強)



(f) Case02(鏡ボルト有り)

図 3.40 破壊形状

表 3.8 破壊時のトンネル内圧

Case01(無補強)	Case02(鏡ボルト有り)
4.8kPa	2.6kPa

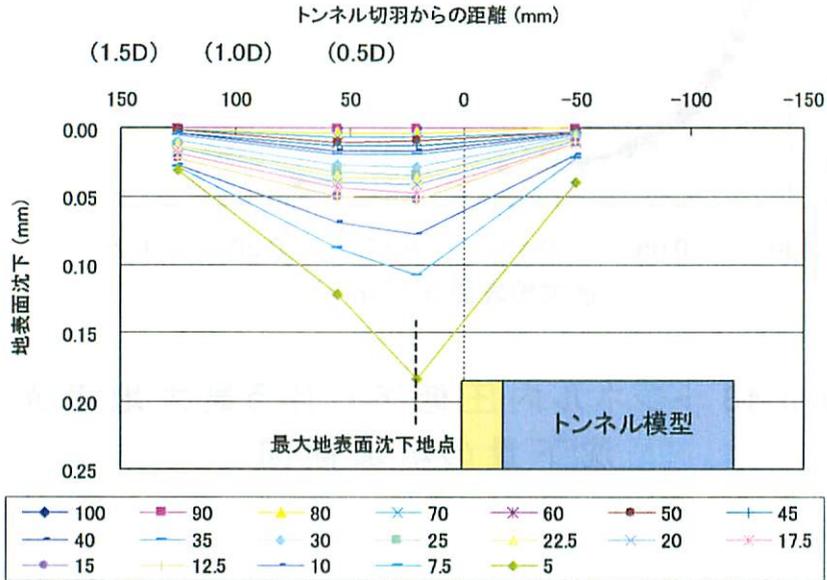


図 3.41 トンネル中央縦断面における地表面沈下分布 (Case01:無補強)

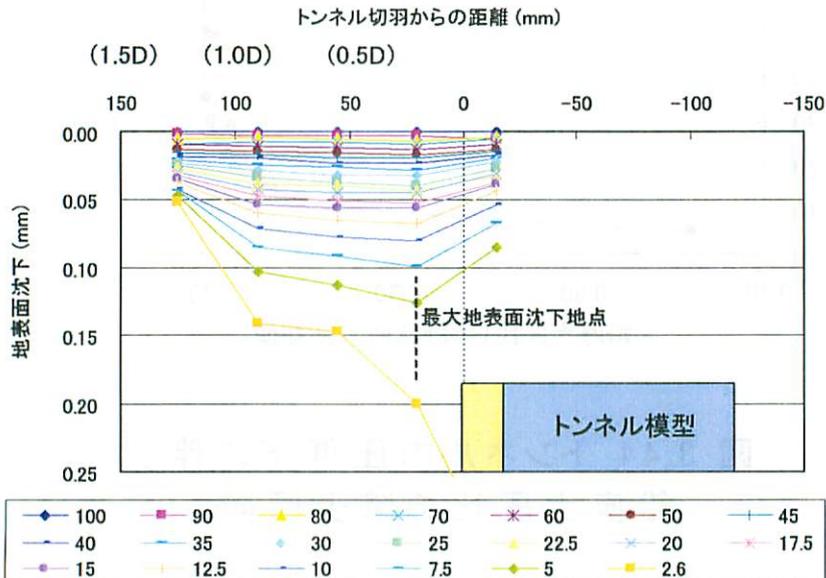


図 3.42 トンネル中央縦断面における地表面沈下分布 (Case02:鏡ボルト有り)

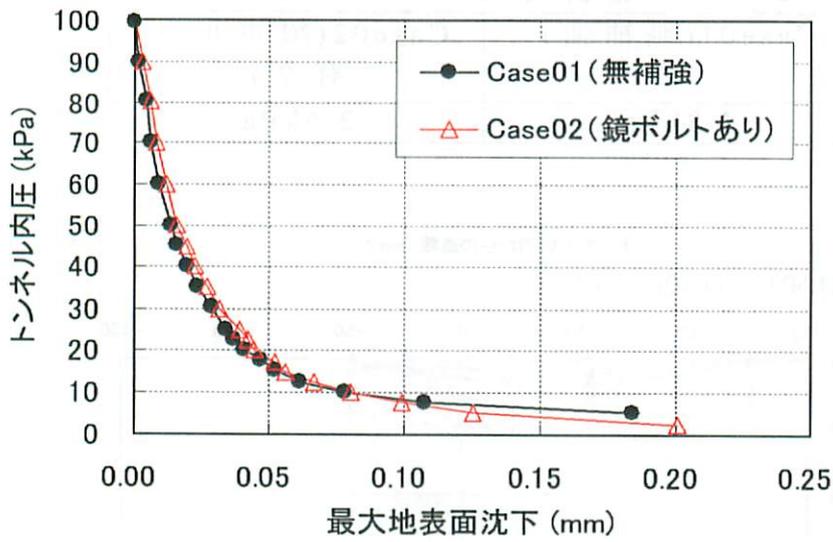


図 3.43 トンネル内圧低下に伴う最大地表面沈下量の増加傾向

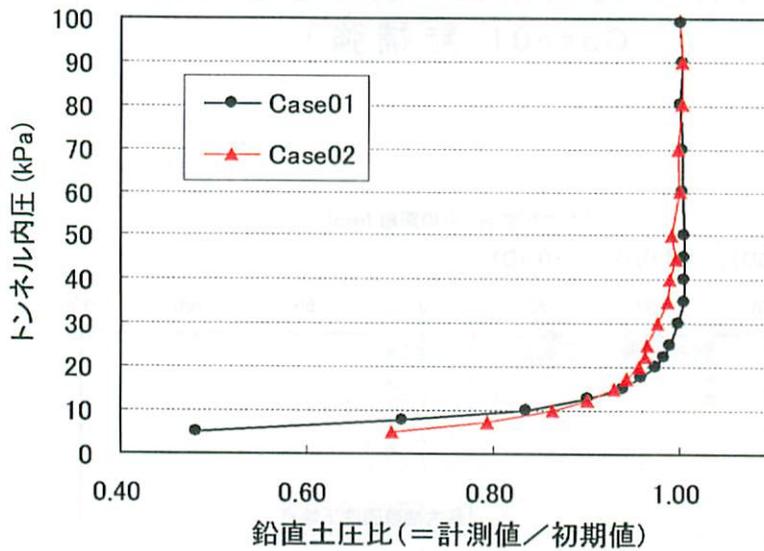


図 3.44 トンネル内圧低下に伴う鉛直土圧比の減少傾向

次に、図 3.44 にトンネル内圧低下に伴う鉛直土圧比の減少傾向を示した。鉛直土圧比とは掘削時における鉛直土圧の値を掘削前の土圧で除した値である。同図から、Case01(無補強)が Case02(鏡ボルト有り)に比べ、10kPa 付近までは鉛直土圧の低下度合がむしろ小さいが、内圧がそれ以下になると急激に低下が激しくなる。この傾向は、地表面沈下結果と整合性がある。

最後に、図 3.35, 3.36 に地中変位を測定する目的で設置したゴム歪計の結果を示す。ゴム歪計では、地盤の変位に付随して伸縮したゴムのひずみを測定し、計測地点での伸びを積分することでトンネル切羽奥における切羽押し変位量分布を評価した。トンネル内圧が 50 k Pa では、トンネル切羽近傍において、切羽押し変位量の増加が顕著になっているが、内圧 20kPa ではその傾向がさらに顕著に現れてくる。この時点においても Case02(鏡ボルト有り)の方が、切羽近傍において押し量が抑制されており、その補強効果が確認できる。トンネル内圧 5kPa では、切羽押し量の急激に増加する位置がより切羽奥となる。切羽奥 0.5-1.5D まではほぼ一定の割合で増加していくが、0.5D から急激に押し変位量が増加している。Case02(鏡ボルト有り)においては、その傾向が顕著であり、鏡ボルトの補強効果が良く現れている。

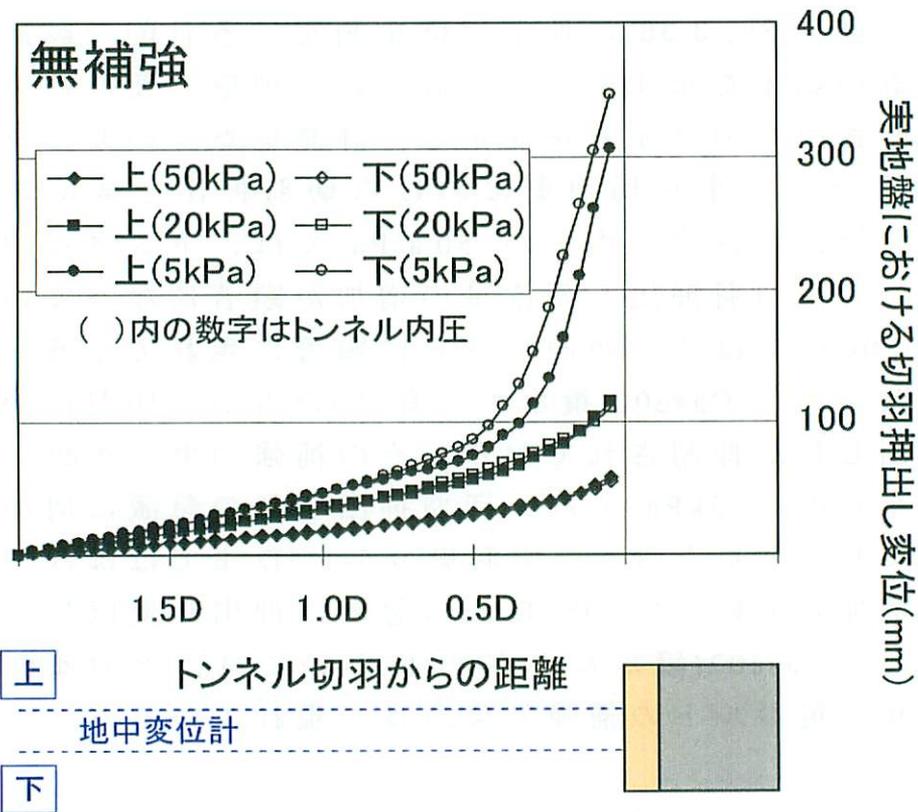


図 3.45 内圧 5, 20, 50kPa における切羽奥の押し出し変位分布 (Case01: 無補強)

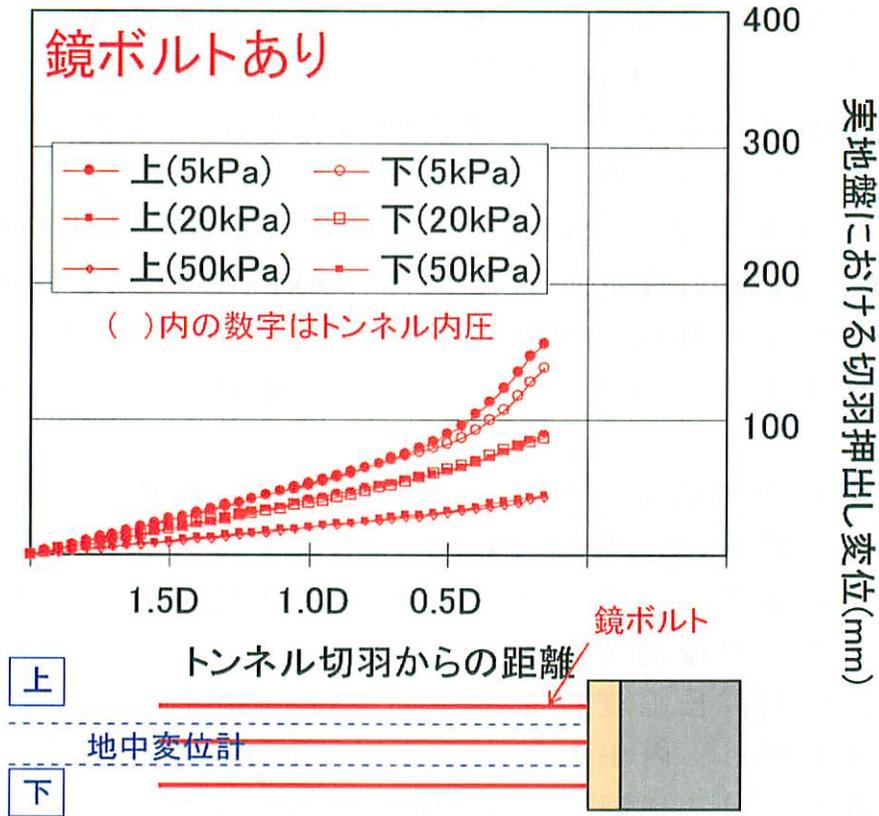


図 3.46 内圧 5, 20, 50kPa における切羽奥の押し出し変位分布 (Case02:補強有り)

## 5.6 まとめ

本実験で得られた結果を以下に示す。

- ・ 実地盤の応力下における無補強時の破壊形状は，X線 CT 実験の結果と酷似していることが分かった。
- ・ Case01(無補強)と Case02(鏡ボルト有り)の破壊形状には，主にクラウン部付近から地表面までの範囲で違いを確認することができ，Case02(鏡ボルト有り)のクラウン上部の崩落範囲が小さくなり，地表の陥没も小さく抑えられていることが分かった。
- ・ 破壊時のトンネル内圧については，Case01(無補強時)で 4.8kPa，Case02(鏡ボルト有り)で 2.6kPa となっており，鏡ボルトによる補強効果をトンネルを自立させるためのトンネル支保圧という点から定量的に把握することができた。
- ・ トンネル内圧低下に伴う地表面沈下量，鉛直土圧比には整合性が見られ，内圧 10kPa 以上までは，鏡ボルトの補強効果は顕著に見られず，それ以降に補強効果が大きく生じることが確認できた。
- ・ 一方，切羽押出し変位量については，50kPa の段階から，その差が現れ，内圧の低下と共にその差が顕著になった。破壊直前では，切羽から 0.5D 地点から急激に押出し変位量が増加している。

## 第 6 章 結論

本論文では、鏡ボルトと地盤系の相互作用解明のための実験システムの開発を行い、一面せん断試験を行うことにより補強材の補強効果について考察を行った。以下に結論を列挙する。

- (1) 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。
- (2) X線 CT 用一面せん断試験装置の開発・設計を行い、その有用性について確認した。
- (3) せん断帯を 3 次元的に可視化し、形状の違いを確認した。
- (4) ボルト材で補強した砂の一面せん断挙動を確認できた。実地盤の応力下における無補強時の破壊形状は、X線 CT 実験の結果と酷似していることが分かった。
- (5) Case01(無補強)と Case02(鏡ボルト有り)の破壊形状には、主にクラウン部付近から地表面までの範囲で違いを確認することができ、Case02(鏡ボルト有り)のクラウン上部の崩落範囲が小さくなり、地表の陥没も小さく抑えられていることが分かった。
- (6) 破壊時のトンネル内圧については、Case01(無補強時)で 4.8kPa、Case02(鏡ボルト有り)で 2.6kPa となっており、鏡ボルトによる補強効果をトンネルを自立させるためのトンネル支保圧という点から定量的に把握することができた。
- (7) トンネル内圧低下に伴う地表面沈下量、鉛直土圧比には整合性が見られ、内圧 10kPa 以上までは、鏡ボルトの補強効果は顕著に見られず、それ以降に補強効果が大きく生じることが確認できた。
- (8) 一方、切羽押し変位量については、50kPa の段階から、その差が現れ、内圧の低下と共にその差が顕著になった。破壊直前では、切羽から 0.5D 地点から急激に押し変位

量が増加している。

その他、本研究における今後の展開を以下に列挙する。

- (1) 駆動部とせん断箱の接続の不具合を解決し、せん断をさらに円滑化する必要がある。
- (2) 補強材の配置パターンを増すことにより、補強材の配置と効果の関連性を確認する必要がある。
- (3) 上載圧、補強材の種類、相対密度などを変化させ、さらに補強効果の分析をする必要がある。
- (4) せん断箱内部の摩擦を解消し、実験精度をより向上させる必要がある。

今後は、まず上記の問題点を早急に解決することが必要である。さらに、実験システムの改良を行うとともに、鏡ボルトと地盤系の相互作用の解明を目指す所存である。

#### 参考文献

- 1) 吉田和行，田口善文：プレライニングによるトンネル切羽の安定性について、フジタ技術研究所報、第34号、1998年
- 2) 米谷秀樹，田口善文，笹尾春夫，指田健次：プレライニングの先受け・支保機構に関する模型実験、土木学会論文集 No.589/Ⅲ-42, 109 - 120, 1998.3
- 3) 今田徹：トンネルの支保構造に関する構造力学的研究、pp147~166, 1980.7.
- 4) 山本稔：ロックボルトの地山支持機構を考える、トンネルと地下、vol.20, No.2, pp.7~19, 1989.
- 5) 清水則一，武田智治：軟岩に対するケーブルボルトの適用性について、トンネル工学研究論文・報告書、第7巻、

pp.111~116, 1997.

- 6) 木梨秀雄, 天野悟: ケーブルボルトの作用機構と支保効果に関する考察、トンネル工学研究論文・報告書、第7巻、pp.15~22, 1997.
- 7) 高橋真一, 杉江茂彦, 木梨秀雄: 低土被りトンネルの掘削を模擬した遠心模型実験(その3)、トンネル工学報告集第15巻、pp.9~14, 2005.12
- 8) 真下英人, 鈴木正彦, 藤巴太郎: 切羽安定対策工法に関する遠心力模型実験、土木学会第51回年次学術講演会、1996.9
- 9) 菅原勝彦, 尾原祐三ら: X線CTによる岩盤透水現象の可視化、第10回岩の力学国内シンポジウム講演論文集、pp.341~346, 1998.
- 10) 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平成12年度、博士学位論文
- 11) 弘中淳市: 杭基礎の3次元支持力特性に関する研究、熊本大学大学院自然科学研究科平成14年度、修士論文.
- 12) 高野大樹: トンネル切羽崩壊機構の解明に関する研究、熊本大学大学院自然科学研究科平成16年度、修士論文.