

都市部トンネル掘削時の地盤変状予測に関する研究（その2）

一切羽の変形挙動と鏡ボルトによる変形抑止対策の効果検証—

高橋 真一 杉江 茂彦
鳥井 原 誠

Centrifuge tests on Tunnel Excavation and its Simulation by Numerical Analysis (Part 2)

— Deformation at Tunnel Face and Countermeasure —

Shinichi Takahashi Shigehiko Sugie
Makoto Toriihara

Abstract

This paper describes centrifuge model tests and their simulation by numerical analysis for tunnel deformation and stability for low overburden depth and low ground strength. Model tests were carried out as follows. Model ground with a tunnel was made with soil cement of strength $q_u \approx 70\text{kN/m}^2$. After model preparation, centrifuge gravity was increased up to failure. The main results were as follows. 1) Collapse at the tunnel face spread to the upper part of the tunnel. 2) Reinforcement at the excavation sight was effective for ground stability. 3) Numerical simulation was useful for prediction of deformation during tunnel construction.

概 要

近年、都市部におけるトンネル工事に対して山岳工法を適用する建設工事が増加している。都市部では一般的に周囲に住宅等の構造物が多く、山岳地帯における山岳工法適用にする場合に比べ、トンネル掘削工事に伴う沈下量の制限、地下水低下の影響など近接施工として留意する点が多い。これまでトンネル掘削時の地盤挙動についての研究は砂層や粘性土層を対象にしたものが多いが、この報告では、都市部トンネルで多い比較的固結度の大きな土砂地山を対象にした。トンネル掘削に伴う変形予測手法の高度化を図り、切羽の安定や鏡ボルト工などの補助工法も含めたトンネルの設計法、施工法に反映することを目的に、大型の遠心模型実験装置を用いた模型実験と弾塑性数値解析を行った。その結果、地表面沈下や地盤破壊などの地盤挙動に対して、良好な変状予測精度を示すことを検証した。

1. はじめに

近年、都市部におけるトンネル工事に対して山岳工法を適用する建設工事が増加している。都市部ではトンネル直上やその周囲に住宅等の構造物が多いため、山岳地帯における山岳工法適用に比べ、トンネル掘削工事に伴う地表面沈下量の制限、地下水低下による周辺井戸への影響や地盤沈下の影響など近接施工として留意する点が多いことが指摘されている¹⁾。

一般に都市部トンネルでは比較的固結度の大きな土砂地山を対象にする場合が多い。しかし既往の研究では、砂質土地盤や粘性土地盤のトンネル掘削時に関する研究^{2), 3)}が多く、比較的固結度の大きな土砂地山に関しては、変形特性や破壊メカニズムに対して未解明な部分も多い。

著者らは、大型遠心模型実験装置（Photo 1 参照）を用いて、比較的固結度の大きな土砂地山を想定したトンネル空洞安定に関する模型実験とそのシミュレーション解析を行い、トンネル空洞の安定性や変形挙動の予測手法の検証を行ってきた⁴⁾。この報告では、都市部トンネル

切羽の変形問題とその対策工法の効果検証に対して、同様の手法を適用し、切羽付近の地盤変形過程や地盤破壊メカニズムを把握、変形予測手法の検証を進めるとともに、代表的なトンネル切羽の補助工法である「鏡ボルト」の効果検証を行ったものである。



Photo 1 遠心模型実験装置
Centrifuge Facility

2. 実験方法

2.1 遠心模型実験装置

Photo 1 に実験で使用した遠心模型実験装置の全景を示す。回転半径7mの大型装置⁵⁾である。

2.2 実験条件と実験方法

Fig. 1, Table 1 に模型地盤条件を示す。模型地盤は切羽無対策 (Case1) および切羽鏡ボルト対策 (Case2) の2ケース行った。トンネル模型は縦断方向半断面モデルで、このうち覆工部は 10cm, 長さ30cmとした。遠心加速度100Gにおいて 10m, 長さ30mに相当する。覆工が無い切羽付近の長さは、5cmおよび1cm, 土被りは低土被り条件の2D(Dはトンネル径)とした。鏡ボルトは、実際のボルト施工配置と模型地盤の大きさを考慮して、打設長さ2Dで、2mmのアルミ棒4本で模擬した。

実験土槽の大きさは、幅B 80cm × 高さH 50cm × 奥行きD 20cmで、前面はアクリル板を使用し地盤変形の計測が可能である。なお、アクリル板表面を含む土槽内面と模型地盤の間にはテフロンシート(厚さ0.2mm)を貼付して摩擦低減を図った。

実験方法は、あらかじめトンネル空洞を設けた均質な模型地盤を作製した後、遠心力を増加させ、変形や破壊を観察する方法で行った。模型地盤は、低塑性のカオリン系市販粘土(塑性指数 IP=10%)に普通ポルトランドセメントを混合したソイルセメントで作製した。模型地盤の目標強度70kN/m²で、セメント配合量は100kg/m³である。この目標強度は、約40Gの遠心加速度場で地山強度比C_f(=q_u/Po:ここにq_uは一軸圧縮強度,Poは土被り圧を示す)=0.5を再現し、切羽が不安定で大きく変形し破壊挙動が期待できる地盤条件として設定した。

模型地盤の深さは40cmとした。トンネル覆工は、アクリルパイプで作製した半円柱型枠(外径= 10cm)で模擬した。トンネル切羽部は、ソイルセメント打設時に一旦切羽用型枠を設置した後、ソイルセメント硬化後に撤去する方法で作製した。なお、覆工モデル部分(長さ30cm)は、一次覆工モデルとして遠心実験中も残置した。実験中の地盤変形観測のために地盤側面には格子枠模様を作製した。模型地盤材令7日で遠心模型実験を行った。

Fig. 2 は、模型地盤と同条件で作製した供試体(寸法5cm × H10cm)の一軸試験結果である。一般的な粘性土に比べて小さな軸ひずみ(1~2%)でピーク強度が現れ、比較的固結度の大きな土砂地山を表現できている。平均一軸圧縮強度は、74 kN/m²であった。

Photo 2 は、遠心模型実験装置に搭載した模型地盤である。地表面沈下計測用にレーザー変位計を土槽上面に配置し、また土槽前面には地盤変形挙動を観察するためにCCDカメラ、画像センサーを設置した。

遠心実験は、遠心模型実験装置の回転開始後ほぼ一定速度で進行し、最大遠心加速度80Gまで上昇した。最大遠心加速度到達に要した所要時間は、約27分であった。

Table 1 実験条件
Model tests Condition

	Case1	Case2	
		Case2-1	Case2-2
対策	無対策	対策(鏡ボルト) 配置はFig.1参照	
モデル	3次元モデル		
D:トンネル径	10cm		
H:土被り	20cm (H/D=2)		
支保部	長さ30cm		
無支保部	長さ5cm	長さ1cm	
模型地盤強度	74kN/m ²		

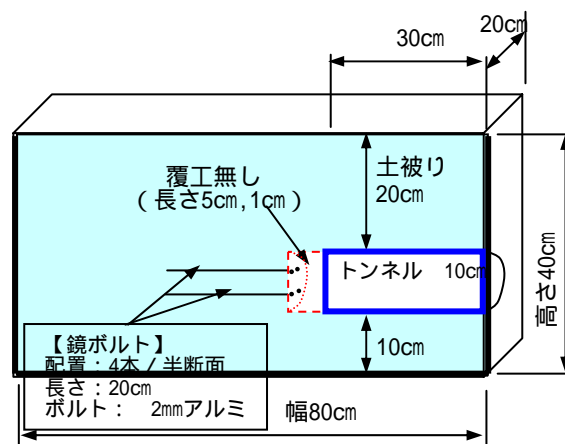


Fig. 1 模型地盤
Model Ground

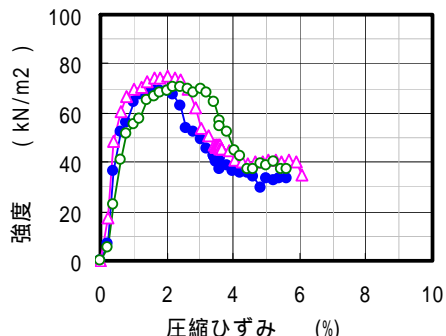


Fig. 2 一軸試験結果
Stress Strain Curve of Model Ground

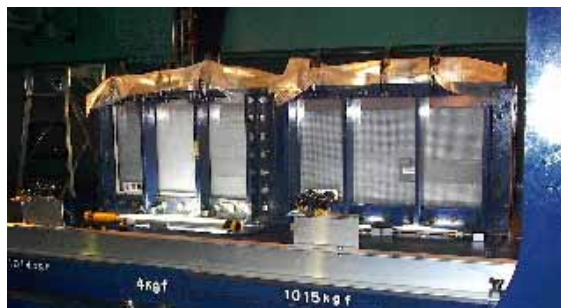


Photo 2 模型地盤と土槽 (Case1, Case2-1)
Model Grounds on Platform before Test

3. 遠心模型実験結果

3.1 地表面沈下と切羽の押し出し

Fig. 3 は、遠心加速に伴う地表面沈下と切羽の押し出し量の変化である。遠心加速度を上昇させる過程で20G程度以降に顕著な変形が観測されはじめ、20G以降55G切りまでは、遠心加速度にほぼ比例して沈下が発生している。沈下量は55G切りで3mm程度である。別途計測した地山部分においても同程度の沈下量が計測されていることから、これらの沈下は遠心加速度の上昇に伴う自重圧縮沈下による部分が多いと考えられる。これに対して遠心加速度が55Gより大きくなると、まず切羽の押し出し量が増大し、その後58Gで天端付近の沈下が大きくなっている。

Photo 3 は、実験終了後の地盤状況である。切羽が大きく崩壊し、地表面まで及ぶおおきな破壊変形が発生している。

Fig. 4 は、Case2の地表面沈下と切羽の押し出し量の変化である。Case1に比べて地盤変形の急激な増加と破壊は認められなかった。切羽の押し出し量は、Case1の1/2程度であり、切羽押し出し抑制効果が認められる。沈下量でも低減効果は認められるが、Case1で破壊が発生した時点(58G付近)で比べると、Case2では3/4程度を示している。先に示した切羽の押し出し量の低減効果に比べて小さい。これは切羽の押し出し量抑制に伴う地表面沈下に加え、模型地盤の自重沈下の影響がと考えられる。

3.2 トンネル切羽のクラックの進展過程

Fig. 5, 6 は、加速度上昇に伴う切羽付近の状況である。Case1(無対策)は、40Gで鏡面下部でクラックが発生した後、上方向にクラックが進展し、切羽崩壊が生じた57Gにおいて切羽天端に達する過程を示している。これに対して、Case2(対策)は、50Gで鏡ボルト間設置地盤の間で一旦短いクラックが発生するが、その後の進展はない。

3.3 鏡ボルトの補強効果

鏡ボルトのひずみは、Case2-2の実験において、鏡ボルトにひずみを添付して計測した。計測位置は、Fig. 7 に示すように20cmのボルト長に対して、4箇所計測した。Fig. 8 は鏡ボルトの軸ひずみの変化である。30Gを超えると遠心加速度の増加とともに軸ひずみが増加し始める。100G到達時の最大軸ひずみ92 μ で、軸力換算すると、鏡ボルト1本にかかる引張り荷重は6N、100G場換算で60kNとなる。軸ひずみの増加し始める30G以降では切羽の変形が始まる変形挙動とも合致する。遠心加速度の増加に応じた切羽の押し出し変位に応じて鏡ボルトの引張り力も増加し、その補強効果がその後の鏡押し出し量の抑制に効果を発揮していると考えられる。

Fig. 9 は、鏡ボルトの軸ひずみの奥行き方向の分布変化である。鏡ボルト両端部はゼロとした。鏡ボルト全範囲で軸ひずみが発生し、中央部分で最大を示す分布形状を示している。既往の鏡ボルト軸力実測結果⁶⁾と比べると、

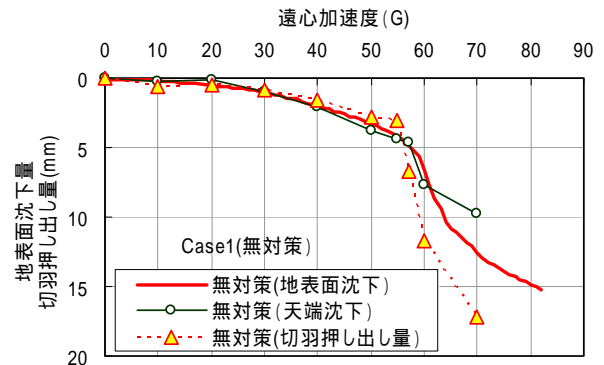


Fig. 3 地表面沈下と切羽の押し出し (Case1: 無対策)
Settlement and Lateral Displacement near Face

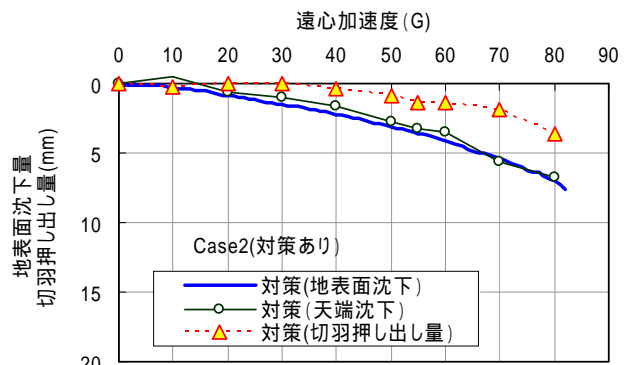


Fig. 4 地表面沈下と切羽の押し出し (Case2: 対策)
Settlement and Lateral Displacement near Face

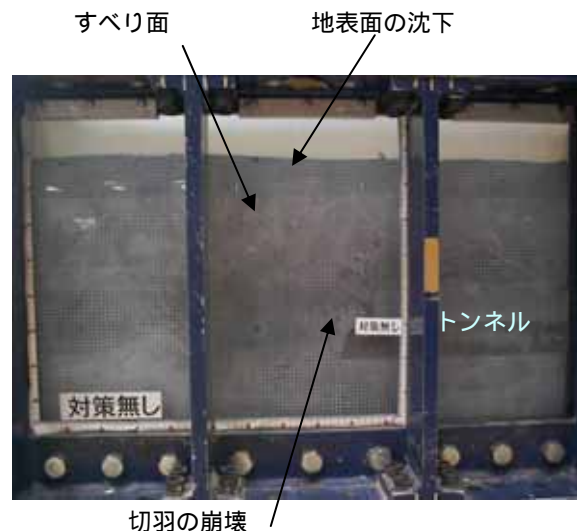


Photo 3 破壊後の模型地盤 (Case1: 無対策)
Model Ground after Failure (Case1)

実験結果で発揮された軸力は小さいものの、山形の分布となる軸力の分布形状は良く表している。しかし、実測結果では軸力発生範囲は切羽から1D以下の範囲で軸力が発生しているのに比べて、実験結果では切羽から2Dのより広い範囲で生じた。実験地盤の強度が比較的小さい地盤の影響や、空洞を設けて遠心加速度を増加させる実験手法の影響などが考えられる。

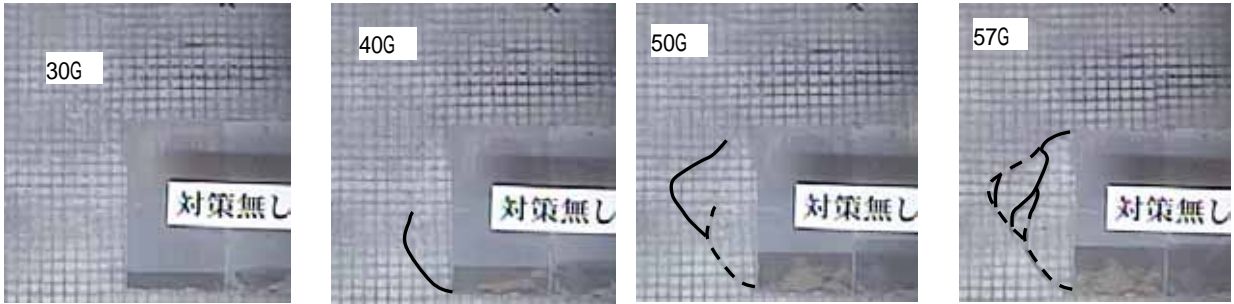


Fig. 5 遠心加速度と切羽付近の変形 (Case1:無対策モデル)
Deformation near the Tunnel Face (Case1)

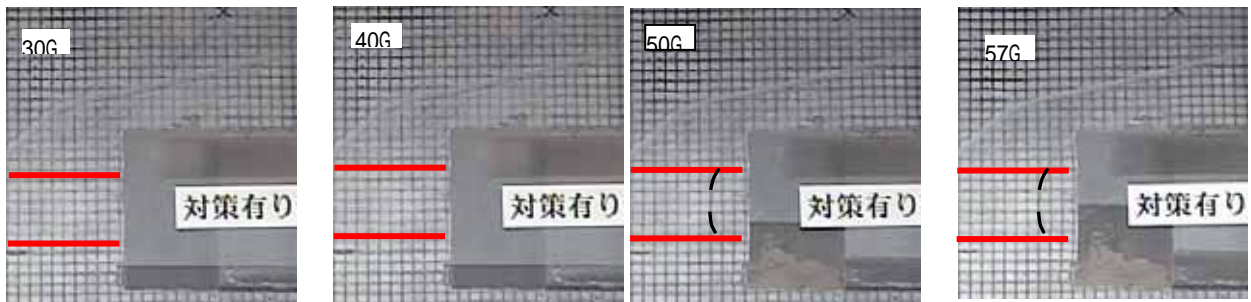


Fig. 6 遠心加速度と切羽付近の変形 (Case2:鏡ボルト対策モデル)
Deformation near the Tunnel Face (Case2)

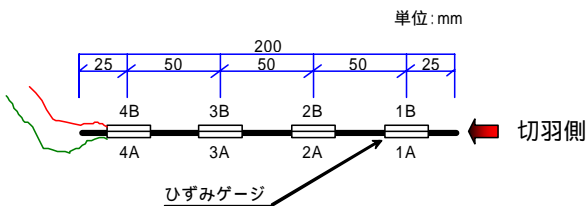


Fig. 7 鏡ボルトの軸ひずみ計測位置(Case2-2)
Measurement Strain in Face Bolt (Case2-2)

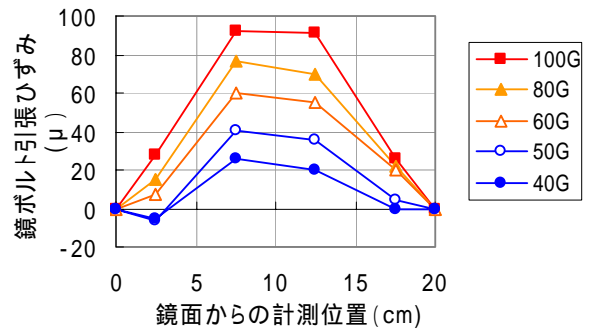


Fig. 9 鏡ボルトの軸ひずみ分布(Case2-2)
Distribution of Strain in Face Bolt (Case2-2)

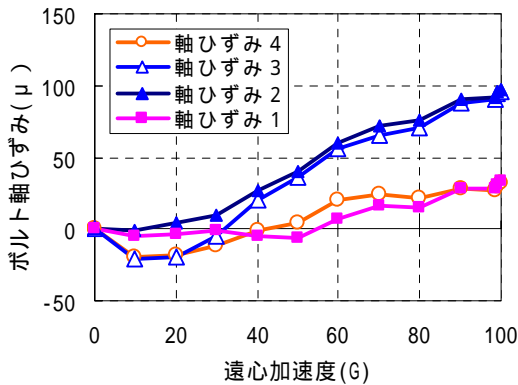


Fig. 8 鏡ボルトの軸ひずみ分布(Case2-2)
Distribution of Strain in Face Bolt (Case2-2)

4. シミュレーション解析

4.1 解析概要

遠心载荷の過程を有限要素法 (FEM解析プログラム : GRASP3D)^{7),8)}でシミュレートし,用いた数値解析法による地盤挙動の再現能力(予測性能)ならびに鏡ボルトによる切羽地山の安定性向上効果を検証した。

4.2 地盤の力学モデル化

セメント改良土を用いたモデル地盤の材料特性を調べるために,一軸圧縮強度と密度を調べた。一軸圧縮試験ではモデル地盤と同一の試料を充填したモールド供試体,ならびに遠心実験の後に土層の各深度から採取した土試料を整形して用いた。Fig. 10は,得られた粘着力 $c (= q_u/2)$ と最大遠心加速度到達時土被り圧の関係である。土試料が遠心载荷過程で経験した土被り圧に応じて粘着力が概ね比例的に増している。遠心実験の载荷過程での

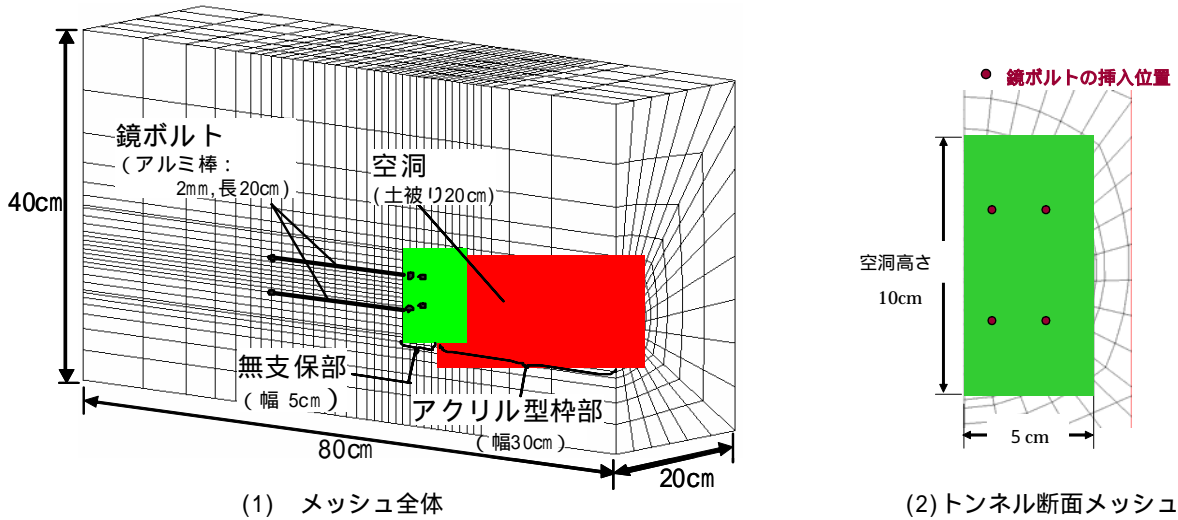


Fig. 11 有限要素 Finite Element Mesh

自重圧密の影響と考えられる。シミュレーション解析ではFig. 10 に示す粘着力 c と土被り圧 v の関係をソフト内で与え、遠心载荷過程で漸増する土被り圧に応じた粘着力 c の変化を考慮しながら、地盤材料の破壊基準としては一般的なMohr-Coulombの破壊規準を用いて地盤要素のせん断破壊を判定した。ここで内部摩擦角はゼロ ($=0$) とした。引張り破壊に対しては最少主応力の値を用いることとし、この値に引張り応力が生じた要素を引張り破壊と判定した。破壊と判定された要素については変形係数を1/100に低減させた。また先の一軸圧縮試験ならびに密度試験の結果をもとにモデル地盤の変形係数を $E=5,000\text{ kN/m}^2$ 、湿潤密度を $\rho=1.74\text{ g/cm}^3$ とした。ポアソン比は $\nu=0.45$ と設定した。

4.3 有限要素メッシュと遠心载荷過程のモデル化

土層モデルをFig. 11 に示す。モデルの底面および各側面の境界には面と直角方向の変位を拘束した。実験を模擬して有限要素メッシュに円筒形状の空洞を設けている。空洞部の内、アクリル型枠を配置した位置にはアクリルの剛性を与えたシェル要素を設け、型枠による支保効果を考慮した。またアルミ棒 (2mm、長さ20cm) で模擬した切羽部の鏡ボルトはトラス要素で模擬した。計算は遠心加速度が80Gまで増す過程を8段階に分けて行った。ここで各計算段階では増分10Gに相当する要素自重を逐次累加した。

4.4 解析結果

4.4.1 切羽周辺の変形破壊 遠心模型実験Case 1 (無対策) では遠心加速度40Gで切羽の下端からクラックが発生し、50Gでは切羽の下端から上端に至る半円形状のすべり線が形成された。一方、鏡ボルトありの実験ではPhoto 4 に示すように遠心加速度50Gにおいても3本程のクラックが生じるに留まり、鏡ボルトがすべり線の成長を抑制する効果を発揮したのと考えられる。

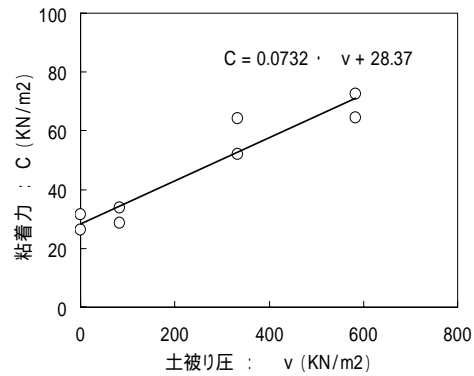
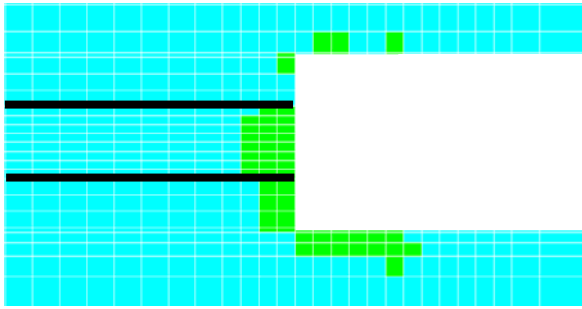


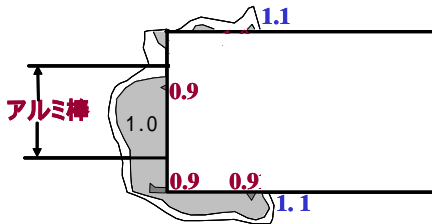
Fig. 10 地盤のモデル化 Model of Ground

解析で得られた空洞周辺地山の破壊状況をFig.12 に示す。Mohr-Coulombの破壊基準により求めた破壊域と局所安全率のコンターである。Photo 4 と同様に加速度50Gにおける鏡ボルトありの結果である。上下2段の鏡ボルトの位置を加筆している。上段の鏡ボルトの付近には破壊していない地山要素が分布しており、切羽の下方で生じた破壊域の拡がりや上段の鏡ボルトで遮断される結果となっている。

4.4.2 切羽の押し出し変位 切羽中央の押し出し変位をFig. 13 に示す。実験結果の鏡ボルトあり (○) と鏡ボルトなし (□) を比べると、切羽にクラック・すべり線が生じた遠心加速度40G~50Gあたりから変位に差が生じはじめています。鏡ボルトによりすべり線の上方への成長が抑制されたためである。解析結果 (鏡ボルトあり (○), 鏡ボルトなし (□)) においても実験で生じた押し出し変位、ならびに鏡ボルトの変位抑制効果が比較的うまく再現できている。しかしながら鏡ボルトなしの実験 (□) では55G 以後において押し出し変位が急増している。すべり線のはく離が大きくなったためであり、連続体よるFEMでこの領域の挙動のシミュレートはもはや難しいといえる。



(1) 破壊要素の分布



(2) 局所安全率コンター

Fig. 12 切羽付近の破壊状況
Distribution of Strain in Face Bolt

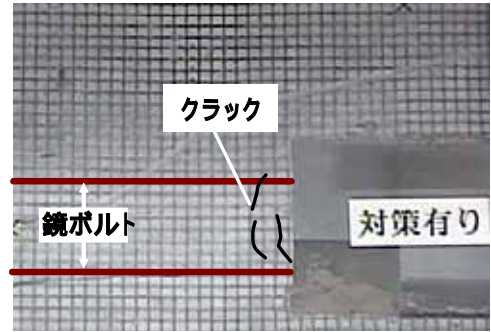


Photo 4 破壊直前のモデル地盤
Model Ground just before Failure

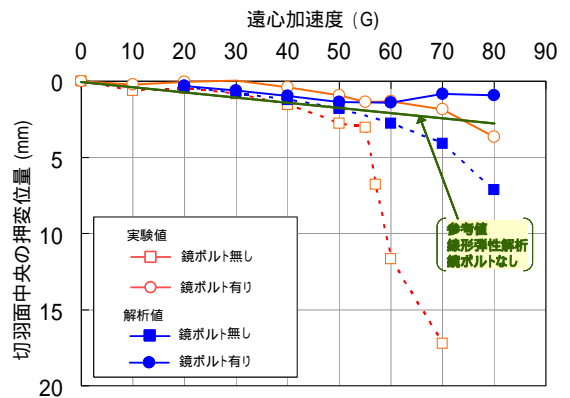


Fig. 13 切羽の押し出し量
Lateral Displacement at the Face

5. まとめ

この論文では、比較的固結度の大きな土砂地山を対象とした都市部トンネル掘削工事における地盤変形問題に対して、切羽部分をモデル化した3次元模型の遠心模型実験とそのシミュレーション解析を行い、変形破壊メカニズム把握と予測手法検証を行い、以下の結果が得られた。

- 1) トンネル掘削時の変形は、切羽が最初に破壊した後、徐々に変形破壊範囲が拡大した後、地表面に到達する大変形進行過程に進展する。
- 2) 切羽を鏡ボルトで補強する対策工は切羽の変形を抑制する効果が期待でき、その対策効果はトンネル掘削地山全体の変形抑制や安定性向上に寄与する。
- 3) FEMシミュレーション解析では、破壊前の地盤の変形状況や地盤の破壊状況を比較的うまく再現できた。また鏡ボルトが切羽地山のすべり線の形成を抑制する効果があることがひずみ分布や安全率の分布などから解析的に表現できた。

実際のトンネル掘削時の挙動は、互層を含む層構成や地下水などの地盤条件や、掘削順序や支保など施工過程が複雑に影響しあうが、ここで得られた比較的単純化した模型地盤でのトンネル掘削時の挙動に関する知見は、こういった複雑な実地盤の挙動予測に広く応用できるものである。今後も実験や解析を通して、変形特性の把握や補強対策の改善に資したいと考えている。

参考文献

- 1) (財)鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説 都市部山岳工法トンネル, 丸善, (2002)
- 2) 本多,他：砂質土中の浅いトンネルの遠心模型実験, 第35回地盤工学研究発表会, (2000)
- 3) Kimura,T. and Mair,R.J. : Centrifugal testing of model tunnels in soft clay, Proc. of 10th ICSMFE, (1981)
- 4) 高橋真一, 杉江茂彦, 桑原徹, 鳥井原誠：都市部トンネル掘削時の地盤変状予測に関する研究, 大林組技術研究所報, No.68, (2004)
- 5) 遠心模型実験装置の活用事例, 大林組技術研究所報, No.66, pp.121~124, (2003)
- 6) 木梨,他：低土被り未固結地山における長尺鏡ボルトの挙動計測, 第14回トンネル工学研究発表会, (2004)
- 7) Ohta,H.,Iizuka,A.,Omete,Y. and Sugie,S.: 3-D analysis of soil/water coupling problems using elasto-viscoplastic constitutive relationships, Proc. 7th Int. Conf. Computer Methods and Advances in Geomechanics, Vol.2, pp.1191~1196, (1991)
- 8) 杉江茂彦, 飯塚敦, 太田秀樹：三次元土/水連成FEM解析における種々の離散化と計算精度・効率, 構造工学シンポジウム論文集, 第18巻, pp.33~38, (1993)