

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）

－補助工法鏡ボルト工による対策と効果－

Centrifuge Model Test on Tunnel Excavation (Part3)

高橋真一¹・杉江茂彦²・木梨秀雄³

Shinichi Takahashi and Shigehiko Sugie

¹正会員 工修 株式会社大林組 技術研究所 (〒204-8554 東京都清瀬市下清戸 4-640)

E-mail:takahashi.shinichi@obayashi.co.jp

²正会員 工博 株式会社大林組 技術研究所 (〒204-8554 東京都清瀬市下清戸 4-640)

³正会員 工博 株式会社大林組 土木技術本部技術第二部 (〒108-8502 東京都港区港南2-15-2)

This paper describes three centrifuge model tests concerning tunnel deformation and stability on condition that overburden height is small and ground strength is small. One model is 2-dimensional model, and another two models are 3-dimensional model tests. Model tests procedures are followings. Models ground with tunnel in ground were made by soil cement. After model preparation, centrifuge gravity was increased until failure. The main results are as follows. (1) Settlement of ground surface increased with rising of centrifuge acceleration. (2) The first collapses were observed at above the tunnel in the 2-dimensional model and at the cutting face in the 3-dimensional model tests.

Key Words : tunnel, centrifuge model test, deformation, and settlement

1. まえがき

最近増加している都市部における山岳トンネル工事では、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、トンネル掘削や地下水低下による地表面沈下など近接施工として留意が必要である¹⁾。

また、都市部トンネルでは比較的固結度の大きな土砂地山の場合も多いが、既往の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)}だけでは、比較的固結度の大きな土砂地山に関しては未解明な点が多い。

著者らは、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時の地盤変状に関して、地盤変形過程や地盤破壊メカニズムを精度良く把握して、都市部山岳トンネルの設計、施工の改善や改良に反映することを目的として、大型遠心模型実験装置を用いたトンネル空洞の安定実験と数値解析を行い、遠心模型実験や数値解析の適用性や留意点を

示した⁴⁾。この報告では、前報⁴⁾で検討したトンネル切羽の変形特性に関して、鏡ボルトの補強効果について検討を加え 変形挙動を確認した。

2. 実験方法

(1) 遠心模型実験装置

写真-1 には、実験で用いた実験装置の全景を示す。最大回転半径 7 m の大型装置⁵⁾である。

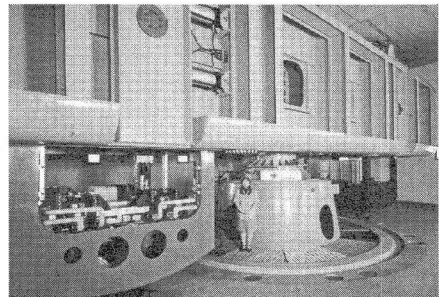


写真-1 大型遠心模型実験装置

(2) 実験条件と実験方法

図-1, 表-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φ10cm, 長さ 30cm とした。遠心加速度 100G においてφ10cm, 長さ 30cm 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から同程度の補強材断面積になるように、打設長さ 2Dcm で、φ2mm 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、事前に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、カオリン系市販粘土 (塑性指数 IP=10%) に普通ボ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。模型地盤は、目標強度 70kN/m^2 、セメント配合量 100kg/m^3 とした。この目標強度は、約 40G の遠心加速度場で地山強度比 $C_1 (=q_u/P_0$: ここに q_u は一軸圧縮強度, P_0 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=φ10cm) 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。

図-2 は、模型地盤と同条件で作製した供試体 (寸法 φ5cm×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、 74kN/m^2 であった。

写真-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 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

表-1 実験条件

	Case1	Case2	
		Case2-1	Case2-2
対策	無対策	対策(鏡ボルト) 配置は図-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		

一定速度で進行し、最大遠心加速度 80G まで上昇し

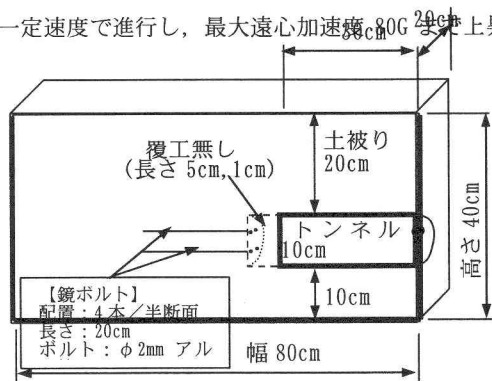


図-1 模型地盤

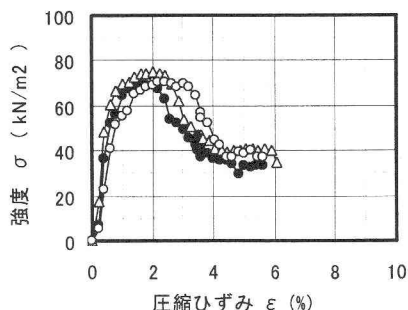


図-2 一軸試験結果

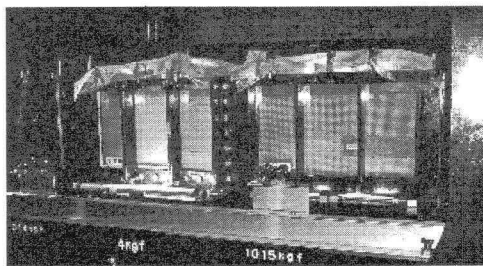


写真-2 模型地盤と土槽

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。

3. 遠心模型実験結果

(1) 地表面沈下と切羽の押出し

図-3 は、遠心加速に伴う地表面沈下と切羽の押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 辺りまでは、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 辺りで 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。実験終了後には、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た。

図-4 は、Case2 の地表面沈下と切羽の押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。切羽の押出し量は、Case1 の 1/2 程度であり、切羽押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出し量の低減効果に比べて小さい。これは切羽の押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を含むためと考えられる。

鏡ボルトの長さの効果を検討するため Case2 と同様の模型地盤で鏡ボルトの長さを 10cm、5cm と変えて実験を行った。これらの実験では Case1, 2 と異なり遠心模型加速度 60G までは、孔内に泥水を満たし、60G 到達時に一旦排水し空洞にした後、遠心加速度を上昇させたが、60G 以降では、自重のみが载荷される Case1, 2 と同様の载荷荷重条件とした。図-5 に切羽中央における押出し量の変化を示す。鏡ボルト長さが 20cm、10cm では押出し量は小さいが、5cm の条件では他のボルト長のモデルに比べ、70G 以降で補強効果が減少し、押出し量が増加している。

(2) 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貼付して計測した。計測位置は、図-6 に示すように 20cm のボルト長に対して、4 箇所計測した。図-7 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

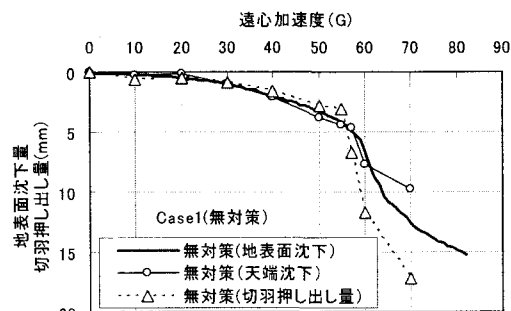


図-3 地表面沈下と切羽の押出し量 (Case1: 無対策)

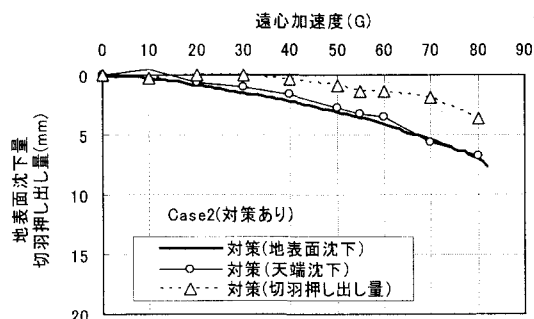


図-4 地表面沈下と切羽の押出し量 (Case2: 対策)

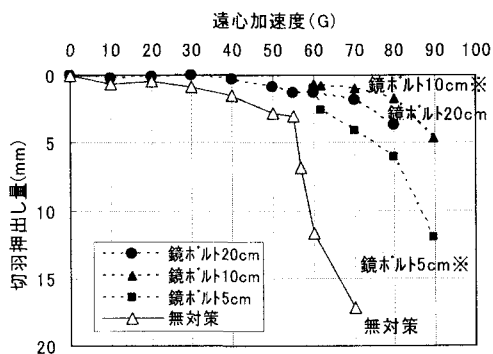


図-5 鏡ボルト仕様と切羽の押出し量

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出し量の抑制に効果を発揮していると考えられる。

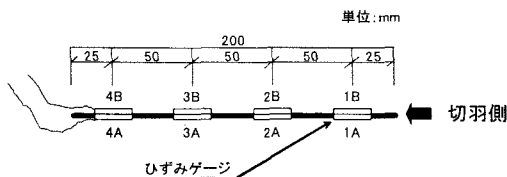


図-6 鏡ボルトの軸ひずみ計測位置(Case2-2)

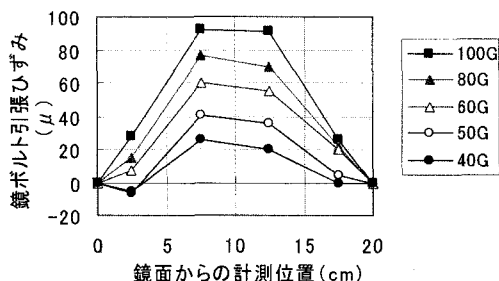


図-8 鏡ボルトの軸ひずみ分布(Case2-2)

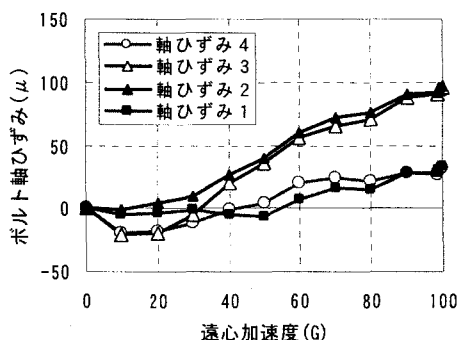


図-7 鏡ボルトの軸ひずみ分布(Case2-2)

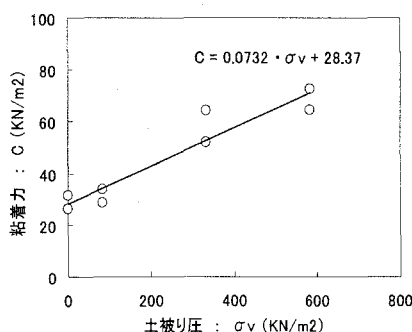


図-9 地盤のモデル化(解析)

図-8 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⁵⁾と比べると、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。

4. 数値解析

(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。

(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。図-9 は、得られた粘着力 $c (=q_v/2)$ 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自重圧密の影響と考えられる。数値解析では図-9 に示す粘着力 c と土被り圧 σ_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 ($\phi=0$) 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 $\rho_i=1.74\text{gf/cm}^3$ とした。ポアソン比は $\nu=0.45$

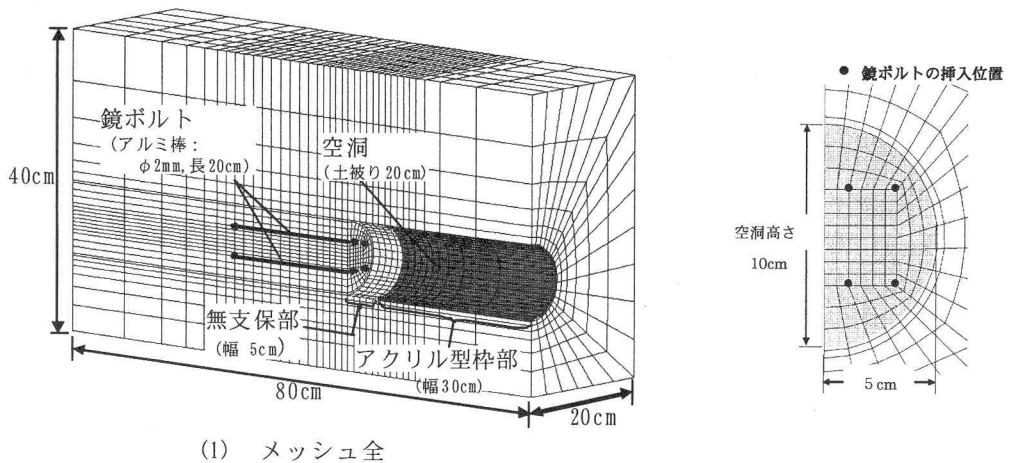


図-10 有限要素メッシュ

と設定した。

(3) 有限要素メッシュと遠心載荷過程のモデル化

土層モデルを図-10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(φ2mm, 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) 解析結果

a) 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写真-3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ものと考えられる。

解析で得られた空洞周辺地山の破壊状況を図-11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。写真-3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がない上段の鏡ボルトで遮断される結果となっている。

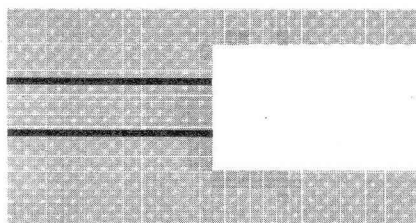
b) 切羽の押出し変位

切羽中央の押出し変位を図-12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る。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、連続体による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。

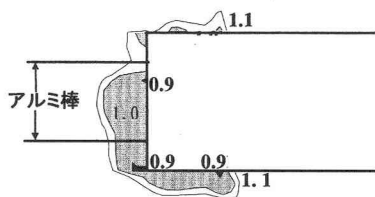
5. まとめ

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数値解析を行い、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。



(1) 破壊要素の分布



(2) 局所安全率コンター

図-11 切羽付近の破壊状況

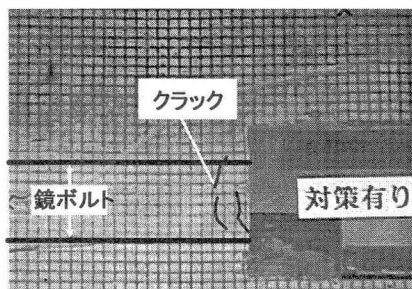


写真-3 破壊直前のモデル地盤

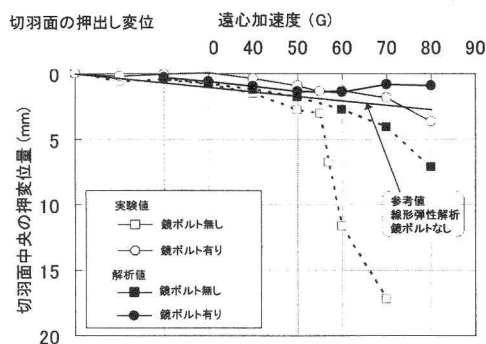


図-12 切羽の押し出し量

- 3) FEM数値解析では、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モデル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：低土被りトンネルの掘削を模擬した遠心模型実験（その2），第14回トンネル工学研究発表会，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., Omote, 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