

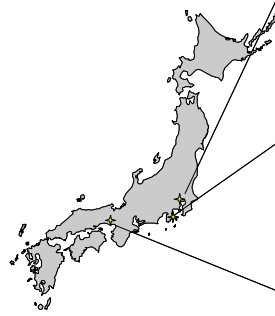
# せん断土槽を用いた都市トンネルの耐震性に関する遠心模型実験

○井澤 淳<sup>1)</sup>, 柴山 周平<sup>2)</sup>, 竹村 次朗<sup>3)</sup>, 日下部 治<sup>4)</sup>

- 1) 東京工業大学 理工学研究科 土木工学専攻, jizawa@cv.titech.ac.jp
- 2) 東京工業大学 工学部 土木工学科, sh4880@cv.titech.ac.jp
- 3) 東京工業大学 理工学研究科 土木工学専攻, jtakemur@cv.titech.ac.jp
- 4) 東京工業大学 理工学研究科 土木工学専攻, kusakabe@cv.titech.ac.jp

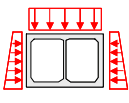
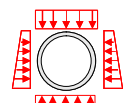

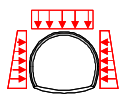
## 1. はじめに

今日、都市圏空間の高度利用は必然的に地下空間の利用を促進させている。これまでに地上に設置されてきた施設でさえも、都市居住環境の質の向上・保全のために地下に設置され、高架方式の鉄道・道路施設の新設は周辺住民の合意を得ることが困難になりつつあり、都市トンネルの建設契機は増大している。一般的に都市部のトンネル建設においては開削工法やシールド工法を適用するが、近年の建設技術の発達により、山岳トンネルに適用される NATM 工法を採用する事例が増加している。また、シールド工法と比較して建設費が安価であること、任意断面の建設が比較的容易であることなどから、NATM 工法の都市トンネルへの適用性の拡大が期待されている。一般的に地下構造物の耐震性は地上構造物に比べて高いと考えられているが、図 1 に示した過去の山岳トンネルの地震被害を見ると、地震動が大きい、土被りが浅い、地山欠陥部に位置する、活断層を横切るなどの条件が介在する場合、大きな被害を受けている。シールド工法、都市 NATM の耐震性の必要性は、土木学会トンネル標準示方書でも強調されているものの、耐震設計の確立には多様な地盤条件下と幾何学的制約条件における地盤と構造物の相互作用に関する詳細なメカニズムの把握が要請され、現在でも明確かつ合理的な耐震設計法は確立されていない。図 2 に各種トンネル工法に関する現行の耐震設計法を示したが、都市 NATM 工法ではシールド工法の考え方をそのまま適用している状況である。NATM 工法では地山自体のアーチ効果を期待し、即ち緩みを許し、覆工にかかる土圧はシールド工法と比較してかなり小さくなる。そのメリットであるアーチ効果が、地震時或いは地震後どこまで有効に保持されるかという点に関しては、適応土質、トンネル形状を含めほとんど明らかにされておらず、NATM 工法の適用性拡大に向けた大きな課題といえる。本研究は、都市トンネルの耐震性評価に関する実験的研究の第 1 歩として行った遠心模型実験について報告する。



西暦	名前	M	震度	被害	被害数
1923	関東大震災	7.9	6	大	100~
1927	北丹後	7.3	6	小	2
1930	北伊豆	7.3	6	中	1
1948	福井	7.1	6	中	2
1952	十勝沖	8.2	6	小	10
1961	北美濃	7.0	4	中	数本
1964	新潟	7.5	6	中	1
1968	十勝沖	7.9	5	小	23
1978	伊豆大島近海	7.0	5	大	13
1978	宮城県沖	7.4	5	中	6
1982	浦河沖	7.1	6	小	6
1983	日本海中部	7.7	5	小	8
1984	長野県西部	6.8	4	中	1
1987	千葉県東方沖	6.7	5	小	1
1993	能登半島沖	6.6	5	中	1
1993	北海道南西沖	7.8	5	中	1
1995	兵庫東南部	7.2	7	大	20
2004	新潟県中越	6.8	7	大	49

図 1 山岳トンネルに被害を与えた代表的な地震

	開削	シールド	山岳(NATM)	都市NATM
形状・荷重	 鉛直: 全土被り 水平: 鉛直×K0	 鉛直: 全土被り あるいは緩み 水平: 鉛直×K0	 (なし)	 鉛直: 全土被り あるいは緩み 水平: 鉛直×K0
構造	RC	RC	無筋	RC
設計法	限界状態設計法	許容応力設計法	—	限界状態設計法
耐震設計	設計法が確立している 応答変位法が多い	手法は一応示されている 応答変位法が多い	原則設計しない 耐震性の配慮が必要な条件が示されている程度	手法は一応示されている 応答変位法が多い

工法	耐震基準の整備状況	耐震の考え方
山岳(在来)	×: ない。耐震性の配慮が必要な条件が示されている程度	「トンネルの土被り、地形、地質、等により必要により地震の影響について考慮」
山岳(NATM)	×: ない。耐震性の配慮が必要な条件や、耐震性の配慮の仕方が示されている程度	「坑口付近、地質不良区間では地震の影響について検討が必要」 「必要により鉄筋コンクリートあるいはSFRRCによる覆工、インバート等による対策を行う」
都市 NATM	△: 手法は一応示されている	「地質がやわらかい場合、地盤の剛性が急変する場合、偏圧斜面等では地震の影響を検討する。」 「必要な場合、応答変位法や動的FEMにより検討する」
シールド	△: 手法は一応示されている	「軟弱地盤、立坑との接合部、複合地盤、土被り厚が急変等の場合には必要に応じて地震の影響(主に縦断方向)を検討する」 「必要な場合、弾性床上の梁、応答変位法等で検討する」 「必要な場合、伸縮継手、接合部を可動構造等にするなどして対応する」
開削	○: 設計する場合の手法が詳しく定められている	応答変位法などにより設計

図 2 各種トンネル工法の耐震設計の考え方

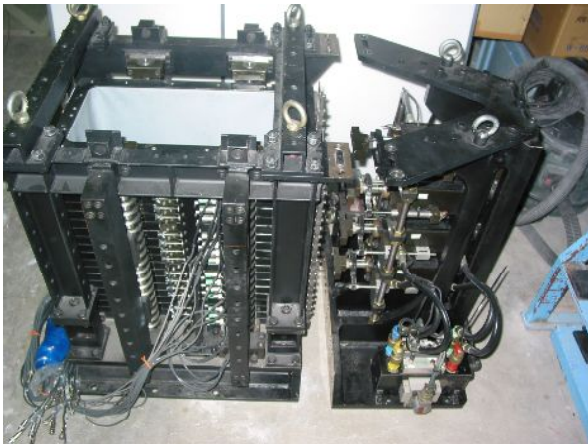


写真 1 せん断土槽

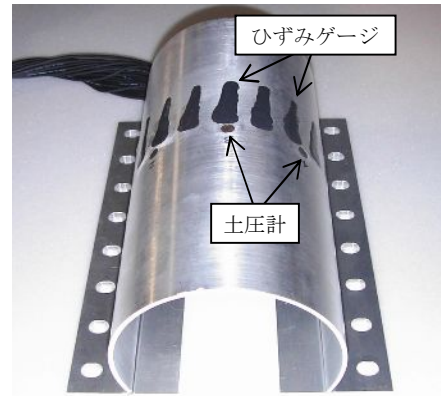


写真 2 トンネル模型

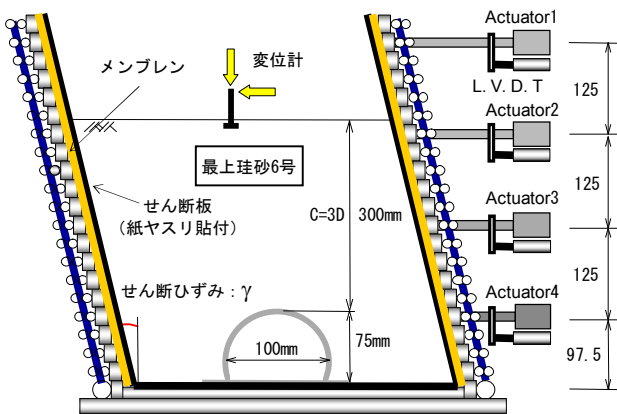


図 3 模型地盤

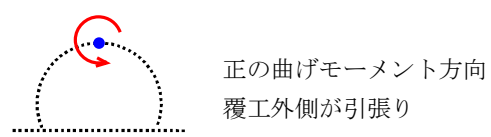
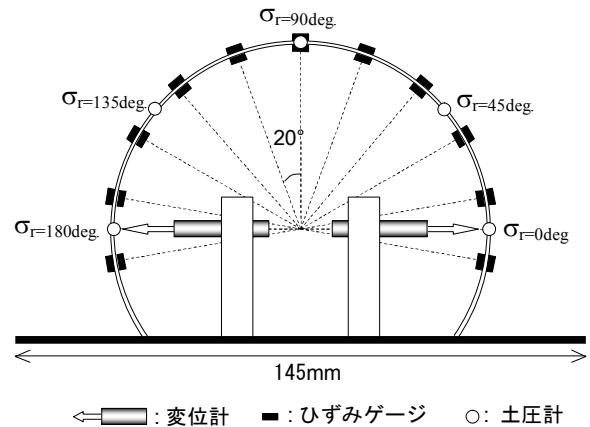


図 4 トンネル模型

## 2. 遠心模型実験概要

トンネルの耐震設計は応答変位法による検討が一般的である。応答変位法は地下構造物が地震時に地盤の振動に追従した動きをする特性を生かし、地震時に生じる地盤変位を強制的に地下構造物に与えることにより静的に耐震性を評価する方法である。その適用の妥当性については過去の研究で確認されている<sup>1)</sup>。本研究では写真 1 に示すような遠心場静的せん断装置を用いて応答変位法を模擬することでトンネルの安定性を検討した。本装置は地盤からせん断を受ける杭に関する研究用に作成した装置<sup>2)</sup>であるため、本研究用に大幅な改造をしている<sup>3)</sup>。

図 3 に実験模型概要図を示す。使用した遠心場静的せん断装置は高さ 25mm×21 段のせん断リング(最下段固定)と 4 本の水平方向アクチュエータから構成されており、アクチュエータに入力した水平変位は板ばねを介してせん断リングに伝達され、リング内の模型地盤に強制水平変位を与えることが出来る。リング内はメンブレンが巻かれているが、メンブレンと試料との間に紙ヤスリを貼り付けたステンレス板を設置することでリングからのせん断変位を適切に地盤に伝達できるようにしている。本実験では空中落下法にて乾燥最上珪砂 6 号地盤

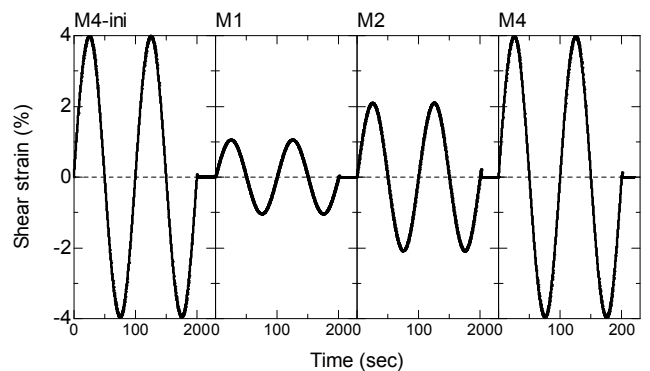


図 5 入力せん断ひずみ

( $Dr=80\%$ ,  $Gs=2.64$ ,  $e_{max}=0.922$ ,  $e_{min}=0.565$ ,  $D_{50}=0.51mm$ ) を作成し、写真 2 に示すような厚さ 2mm、直径 100mm の円形アルミトンネル模型を設置した。トンネル土被りがトンネル直径の 3 倍 ( $C=3D$ ) となるよう、地盤高さは 375mm とした。トンネル模型には断面力測定用のひずみゲージを、

トンネル覆工内外に対で 11 ヶ所設置した。また、覆工土圧、トンネル内空水平変位を測定するため、土圧計、ポテンシオメータを設置した。トンネル模型の詳細及び写真を図 4, 写真 2 にそれぞれ示す。

せん断実験は遠心加速度 50G 場で行った。せん断ひずみが鉛直方向に一定になるよう、アクチュエータの変位は線形分布で入力している。図 5 に示すように 0.01Hz の正弦波で、せん断ひずみ 4%, 1%, 2%, 4% の順で各 2 周期ずつ連続的に入力した。

### 3. 実験結果

図 7, 8 にせん断ひずみ 4% のケースでのトンネ

ル覆工にかかる土圧および曲げモーメントの時刻歴をそれぞれ示した。ここで、M4-in ケースは遠心加速度上昇後、初めてせん断を受けるケースであり、M4 ケースは 4, 1, 2% のせん断履歴を受けた後、4% のせん断を受けるケースである。 $\sigma_{r=90deg}$  およびに  $\sigma_{r=135deg}$  の土圧時刻歴に着目すると、M4-in ケースではせん断終了後の残留土圧が 150kPa 程度であるのに対し、M4 ケースでは初期土圧からほとんど残留していない。一方曲げモーメントに関しては、絶対値に多少の差はあるものの、ほぼ同様の挙動をしている。

図 9, 10 に M4-in および M4 ケースのせん断前後

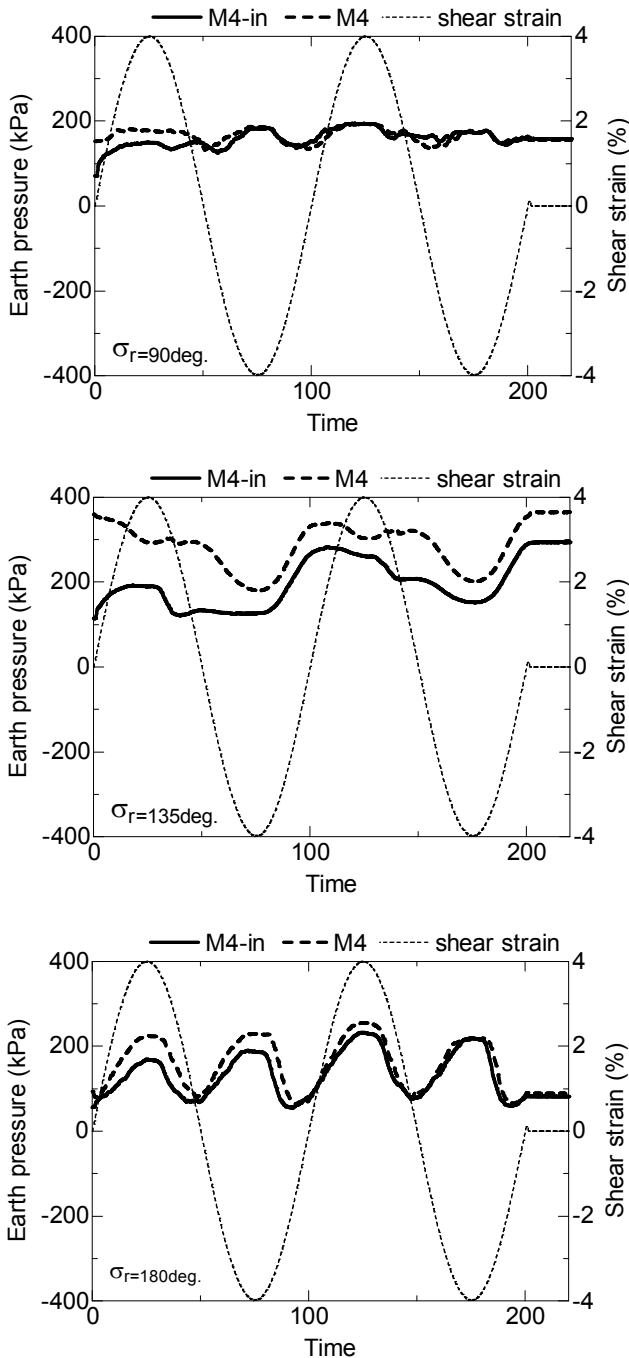


図 7 せん断中の土圧時刻歴： $\gamma=4\%$

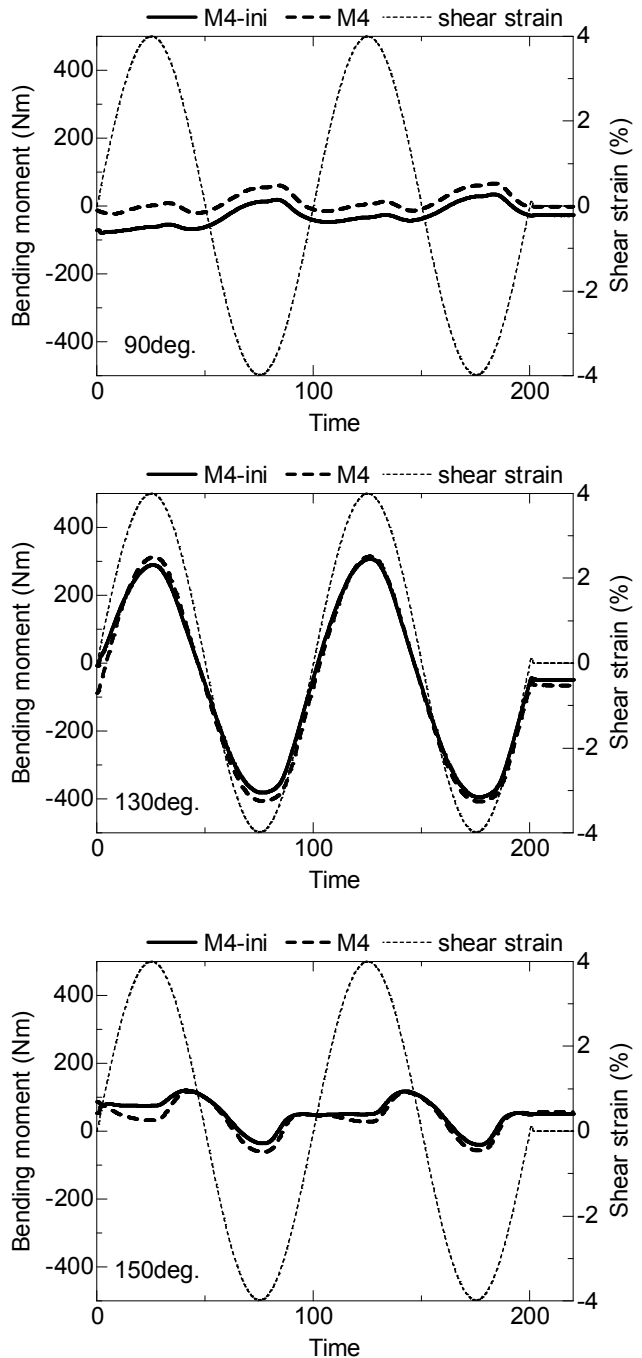
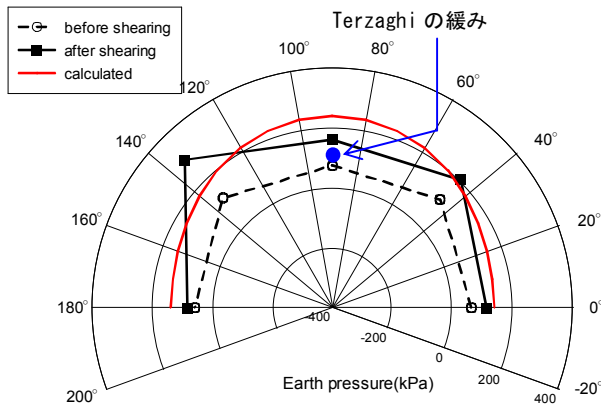
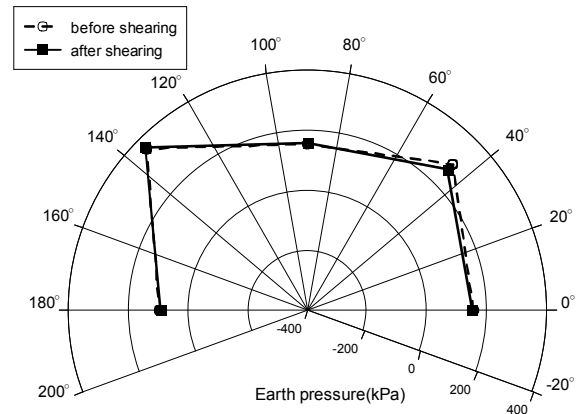


図 8 せん断中の曲げモーメント時刻歴： $\gamma=4\%$

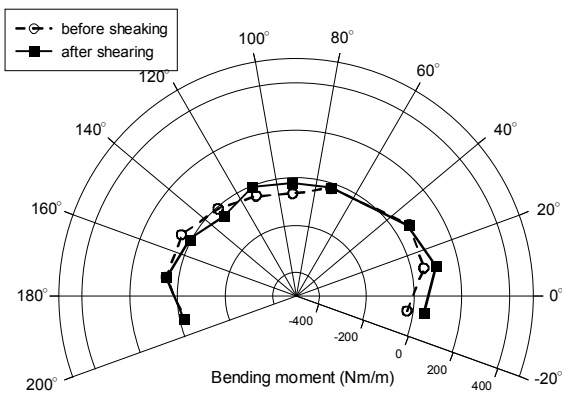


(a) M4\_ini : せん断履歴無し

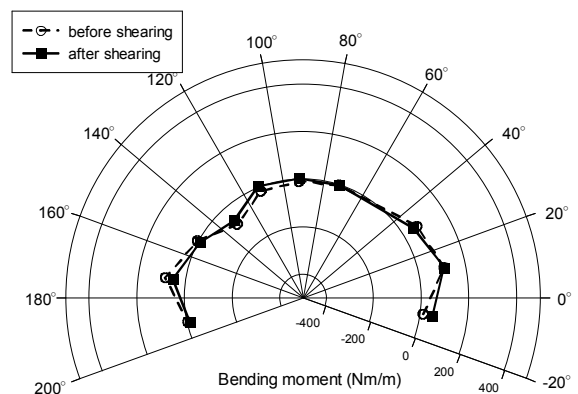


(b) M4 : せん断履歴有り

図9 せん断前後の覆工に作用する土圧分布



(a) M4\_ini : せん断履歴無し



(b) M4 : せん断履歴有り

図10 せん断前後の覆工に作用する曲げモーメント分布

の土圧および曲げモーメント分布を示した。(a)に示した M4-in ケースではすべての土圧計の値が、せん断後に大きく増加しているのに対し、M4 ケースでは増加が見られず、せん断前後でほぼ同じ分布を示している。また実践で示した全土被り圧から求めた計算値と比較して、せん断前の土圧分は小さくなっている。ここで計算値は以下の式から求めた ( $K_0=0.5$ )。

$$\text{土圧理論値} : \sigma_r = \frac{\sigma_v + \sigma_h}{2} - \frac{\sigma_v - \sigma_h}{2} \cos 2\theta$$

これはせん断前には地盤のアーチ作用によって覆工に作用する土圧が低減しているためであると考えられる。M4-in ケースの土圧分布図に次式で示される Terzaghi の緩み土圧式から求めた緩み土圧を示した。Terzaghi の緩み土圧式：

$$P_{VC} = \frac{B_1(\gamma - c/B_1)}{K_0 \tan \phi} \cdot (1 - e^{-K_0 \tan \phi H/B_1}) + P_0 e^{-K_0 \tan \phi H/B_1}$$

$$B_1 = \frac{D_c}{2} \cot \left( \frac{45^\circ + \phi/2}{2} \right)$$

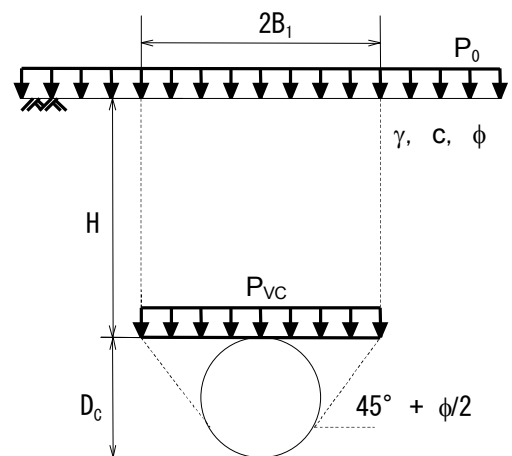
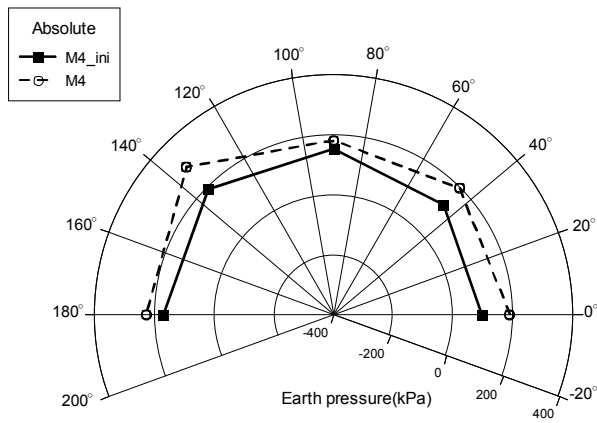
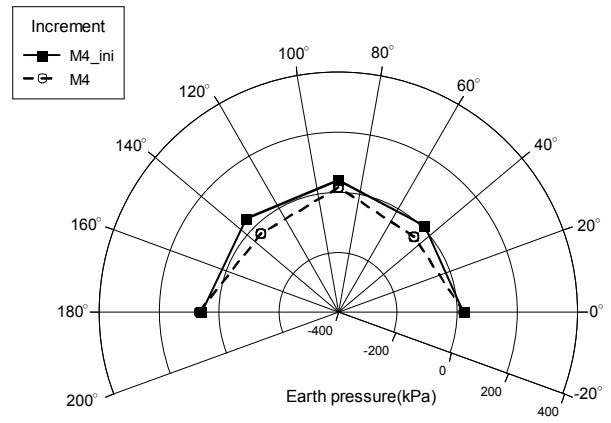


図10 Terzaghi の緩み土圧の算定

Terzaghi の緩み土圧式は現行設計法<sup>4)</sup>でも採用されているが、せん断前には緩み土圧を下回る土圧が作用していたと考えられる。その後、せん断前に存在したアーチ効果は、せん断を受けることにより低下し、ある一定の土圧分布に収束する。収束した土圧分布はクラウン部で小さく  $45^\circ$  および  $135^\circ$  部で土圧が卓越した形状となる。これはトンネル覆工が図

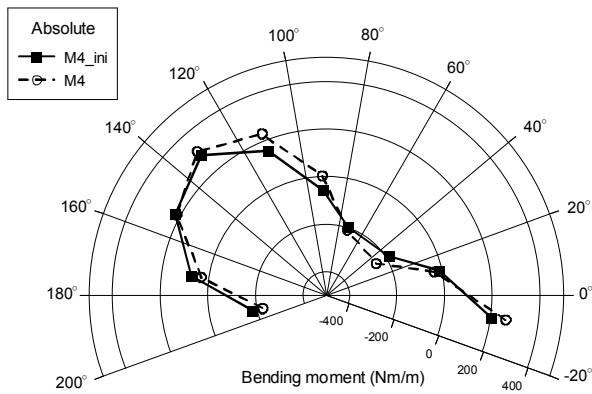


(a) 土圧分布 (絶対値)

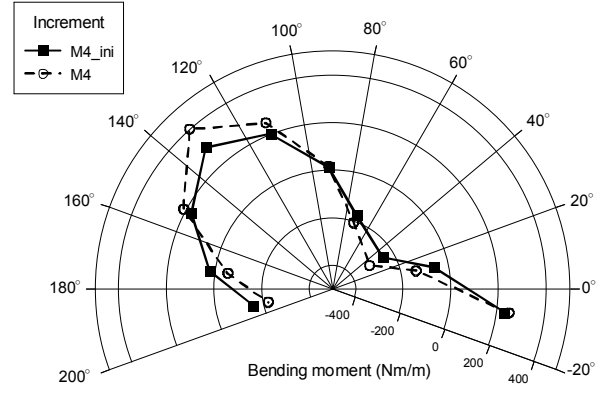


(b) 土圧分布 (増分)

図 11 セン断時に覆工に作用する土圧分布： $\gamma=4\%$



(a) 曲げモーメント分布 (絶対値)



(b) 曲げモーメント分布 (増分)

図 12 セン断時の覆工に作用する曲げモーメント分布： $\gamma=4\%$

9の曲げモーメント分布から分かるように、上下に圧縮し、水平に伸張するような変形をするためであると考える。

図 11, 12にせん断土槽のせん断ひずみが最大になったときの、土圧および曲げモーメント分布を示した。せん断時のトンネルの変形は 45 度方向に卓越している。これは円形のシールドトンネルに関する Yamada et al.(2002)の報告と一致している。図 13, 14に土圧、曲げモーメントのせん断前からリング最大せん断ひずみ 4%までの増分分布を示した。土圧の増加は図 9に示した土圧分布と比較して非常に小さい。一方、曲げモーメントは変形によって大きく増大している。これは周辺地盤の変形からトンネル表面がせん断応力を受けていることによるものと考えられる。

#### 4. まとめ

本稿では過去の大規模地震時におけるトンネルの被害調査結果と共に、都市トンネルに関するの現行耐震設計法の問題点を示した。特に今後、都市トン

ネルへの適用性の拡大が期待される NATM 工法については、そのメリットであるアーチ効果が地震時或いは地震後どこまで有効に保持されるかという点に関してほとんど明らかにされておらず、大きな課題となることを明らかにした。そこで初期土圧分布及びその後の地盤変位によるトンネル覆工に作用する断面力を把握し、トンネルの耐震性を評価するため、アルミニウム製円形トンネルを用いた遠心場せん断土槽実験を行った。その結果、初期土圧及び断面力分布や周辺地盤のせん断変位によるそれらの分布の変化を明らかにすることが出来、遠心場せん断土槽実験の適用の可能性を示した。今後、遠心場せん断土槽実験だけでなく、振動台実験や数値解析を通して、都市トンネル全般の耐震性に関する評価を行っていく予定である。

#### 謝辞

現行設計法および過去の地震被害調査に関して、(財)鉄道総合技術研究所の野城一栄氏に多大な御協力を頂いた。ここに記して謝意を示します。

## 参考文献

- 1) 井澤, 重定, 永谷, 山田, 大保, 日下部, 矩形断面を有するトンネル構造物に対する応答変位法の適用性, 土木学会第 59 回年次学術講演会, 2004
- 2) Takahashi, A. Takemura, J. Suzuki, A. and Kusakabe, O., “Development and Performance of an Active Type Shear Box in a Centrifuge”, International Journal of Physical Modelling in Geotechnics, Vol.1, No.2, pp. 1-17., 2001
- 3) Takemura, J., Izawa, J., Shibayama, S. & Kusakabe, O., Active type shear box and its application on a stability of shallow tunnel in a centrifuge, Proc. of 3<sup>rd</sup> International conference of urban earthquake engineering, pp. , 2006
- 4) 例えば, 鉄道総合技術研究所, 鉄道構造物等設計標準・同解説シールドトンネル, pp. 48-51, 平成 14 年 12 月, 丸善株式会社
- 5) Yamada, T., Nagatani, H., Igarashi, H. and Takahashi, A., “Centrifuge Model Tests on Circular and Rectangular Tunnels Subjected to Large Earthquake-induced Deformation”, Proc. Intn. Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground, pp.673-678, Lyon, Balkema, 2002