

東工大レーザートンネルでの地震観測とその解析

大町 達夫¹⁾, 井上 修作²⁾, 水野 剣一³⁾

- 1) 東京工業大学 大学院総合理工学研究科 人間環境システム専攻, ohmachi@enveng.titech.ac.jp
- 2) 東京工業大学 大学院総合理工学研究科 人間環境システム専攻, shusaku@enveng.titech.ac.jp
- 3) 東京工業大学 理工学部 土木工学科, mizuno.k.ab@m.titech.ac.jp

1. はじめに

近年、地下鉄や共同溝など、多くの地中構造物が建設されており、その耐震性の確保はますます重要になっている。一般に、地中構造物の地震時挙動は周辺地盤の変位やひずみに支配されることが知られている。地震時に地中構造物に生ずるひずみを詳細的確に評価するためには、実際にひずみ観測を行うことが有効と思われる。しかし実際には、観測事例はあるものの十分とはいえず、現実の複雑な形状をしたトンネルや地下構造物の地震時挙動にはまだ不明な点が多く残されている。

そこで、地震に対する地中構造物の安全性を究明するため、本研究では東工大すずかけ台キャンパスにあるレーザートンネルで地震観測を行い地震動と地震時ひずみの関係を検討した。本論分では、最初に観測概要と得られた観測記録について説明し、その後、観測記録を基にひずみと地震動の関連について調べた結果を報告する。さらにト

ンネル西面でひずみが小さくなる原因について、有限要素法解析から得られた結果を説明する。

2. レーザートンネルでの地震観測

2.1 地震観測の概要

東工大レーザートンネルは、すずかけ台キャンパス内の総合研究館の脇にある。トンネル設置位置を図1に示す。トンネル周辺の表層は盛土層、ローム混じり粘土層、粘土層、泥岩層からなり、10m付近から、N値50以上を示している。PS検層の結果を図2に示す。

このレーザートンネルは、内空2×2mの正方形断面をもつ厚さ25cmのコンクリート製で、長さは50m、中央西側に避難用アルコーブがあり、トンネル軸方向はほぼ南北(NS)方向である。

2007年3月に、トンネル南端に3成分サーボ型速度計(水平2成分はNS成分とEW成分)とトンネル中央付近の断面の上下面および左右壁面トネ

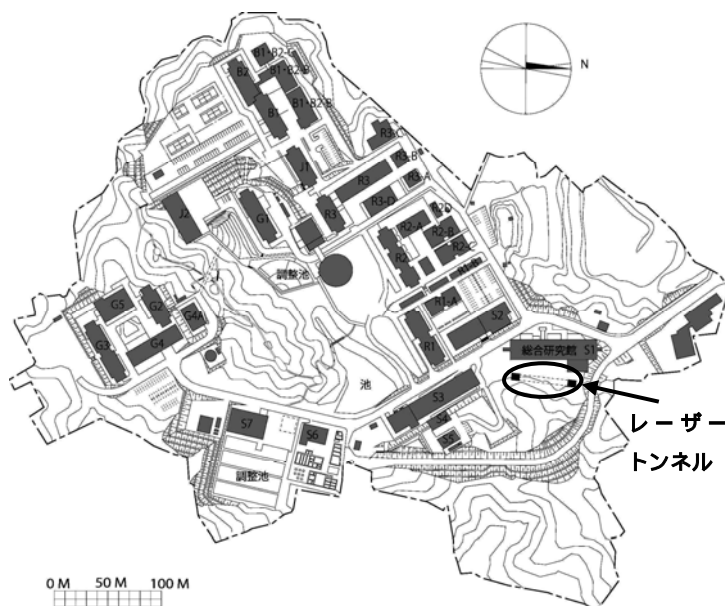


図1 キャンパス内レーザートンネルの位置¹⁾

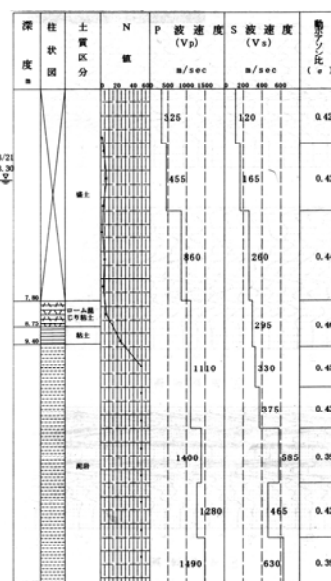


図2 PS検層の結果

表 1 観測された地震と記録の一覧表

地震発生時刻		場所	Mj	震源 深さ (km)	最大速度(cm/s)				最大ひずみ(μ)					
年月日	時間				水平 2成分	EW	NS	UD	床面	東面	天井	西面	東面 45度	天井 45度
2007/06/01	07:29	埼玉県北部	4.5	59	0.07	0.07	0.05	0.03	0.15	0.15	0.23	0.03	0.12	0.12
2007/06/02	14:43	茨城県南部	4.6	50	0.11	0.10	0.09	0.05	0.24	0.24	0.35	0.04	0.13	0.23
2007/06/04	13:33	茨城県南部	4.4	48	0.06	0.03	0.06	0.02	0.09	0.07	0.11	-	0.06	0.06
2007/06/05	13:59	千葉県南東沖	4.1	66	0.03	0.01	0.03	0.01	0.04	0.03	0.05	-	0.03	0.04
2007/06/09	20:28	茨城県南部	4.1	47	0.03	0.01	0.03	0.01	0.05	0.04	0.07	-	0.04	0.04
2007/07/16	10:13	新潟県上中越沖	6.8	17	1.34	1.08	1.19	0.46	4.01	3.91	3.85	0.37	1.66	1.26
2007/08/01	17:15	三重県南東沖	5.5	383	0.04	0.04	0.03	0.04	0.13	0.08	0.15	0.02	0.08	0.07
2007/08/16	04:15	千葉県東方沖	5.3	31	0.24	0.06	0.20	0.04	0.7	0.53	0.7	0.07	0.35	0.29
2007/08/16	08:20	千葉県東方沖	4.9	29	0.07	0.23	0.06	0.13	0.18	0.13	0.2	0.03	0.11	0.1
2007/08/18	04:14	千葉県南部	4.8	23	0.07	0.07	0.07	0.04	0.22	0.17	0.24	0.04	0.1	0.12
2007/08/18	13:36	千葉県北東部	4.5	24	0.05	0.04	0.04	0.03	0.16	0.12	0.17	0.02	0.08	0.07
2007/08/18	16:55	千葉県南部	5.2	20	0.14	0.12	0.13	0.09	0.35	0.28	0.38	0.04	0.18	0.17
2007/10/01	02:21	神奈川県西部	4.9	14	0.14	0.13	0.10	0.1	0.44	0.35	0.5	0.05	0.23	0.2
2007/10/06	03:46	神奈川県西部	4.2	32	0.25	0.22	0.19	0.13	0.54	0.39	0.66	0.08	0.49	0.46
2007/10/17	22:36	茨城県南部	4.1	55	0.03	0.02	0.03	0.01	0.08	0.06	0.09	-	0.05	0.07
2007/10/29	18:13	埼玉県秩父地方	3.2	14	0.01	0.01	0.01	0.01	0.04	0.03	0.06	-	0.03	0.05
2007/11/11	19:43	茨城県南部	4.3	44	0.05	0.04	0.05	0.02	0.11	0.1	0.17	0.02	0.07	0.09
*2007/11/26	22:51	福島県沖	6	44	0.1	0.08	0.08	0.05	0.22	0.17	0.22	0.20	0.13	0.1

*は西面から計測器を東面に移設した結果
 - は値が小さいため計測不可
 地震発生時刻, 場所, Mj は気象庁より

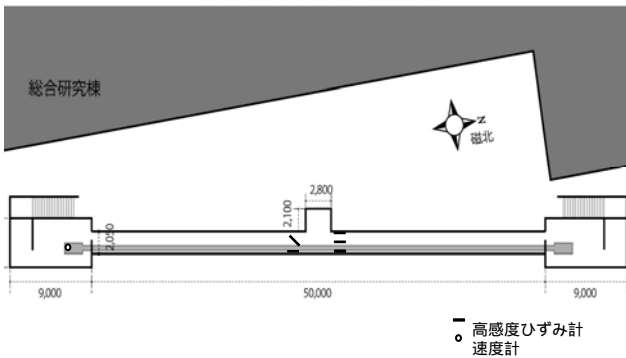


図 3 トンネル平面図と計器設置位置(mm)

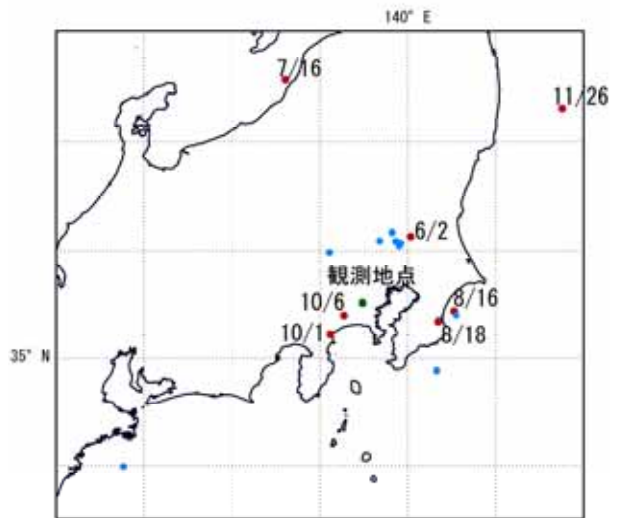


図 4 観測地点と観測された地震の震源位置

ル軸方向に, また, 天井と東壁面にはトンネル軸方向から 45 度回転した方向に, 高感度ひずみ計(引張りを正, 圧縮を負)が計 6 個設置され, サンプリング周波数 100Hz で常時観測中である. トンネル平面図と計器設置位置を図 3 に示す.

2.2 観測記録例

2007 年 5 月~2008 年 1 月末までに観測された 18 の地震について, 震源情報と得られた観測記録の最大値の一覧を表 1 に, 観測地点と震央位置を図 4 に示す. 18 地震の内, 水平速度(2 成分合

成)0.1cm/s 以上を観測した地震は 7 つである. 最も大きい水平速度値(2 成分合成)は 2007/7/16 の新潟県中越沖地震(M6.8 震源深さ 17km)時に観測された 1.34cm/s であり, 最大上下速度値は 0.46cm/s, 最大地震時ひずみ値は底面 4.01 μ, 天井 3.85 μ, 東面 3.91 μ, 西面 0.37 μ, 東面 45 度 1.66 μ, 天井 45 度 1.26 μであった(μ は 10⁻⁶).このときの時刻歴波形を図 5 に示す. この記録のように, 西面の地震時ひずみは著しく小さな値(床面に対して約 0.14 倍)を示すことが一つの特徴と言える.

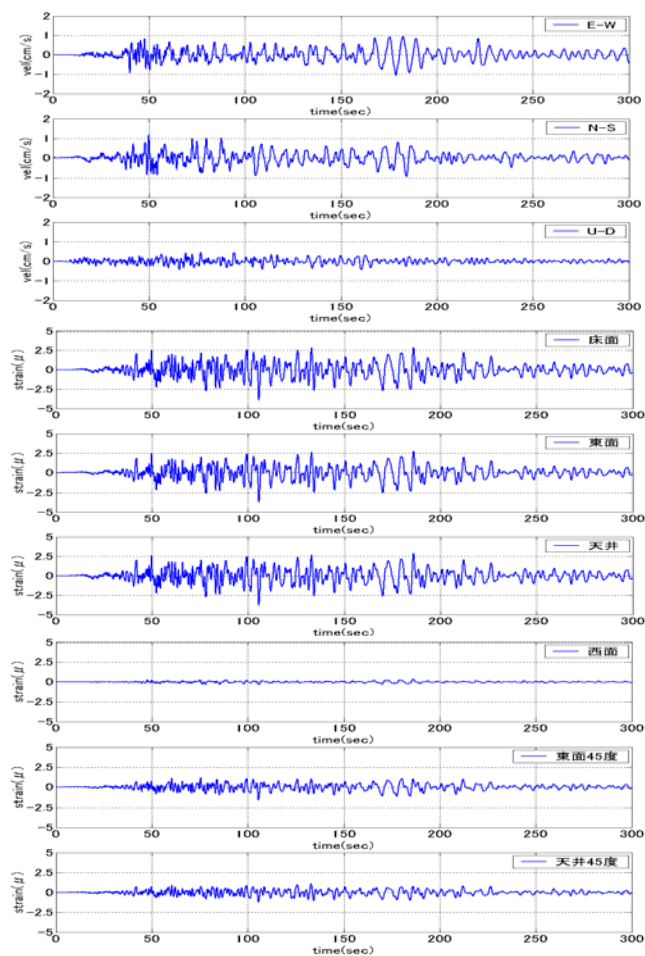


図5 7/16の速度とひずみの時刻歴波形

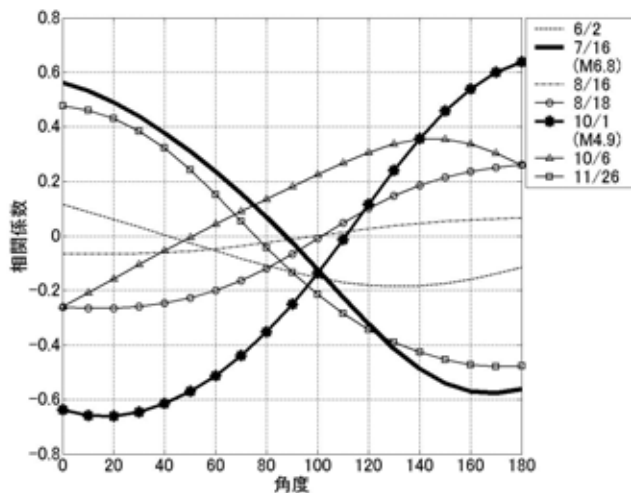


図6 水平速度と軸方向ひずみの相関関係

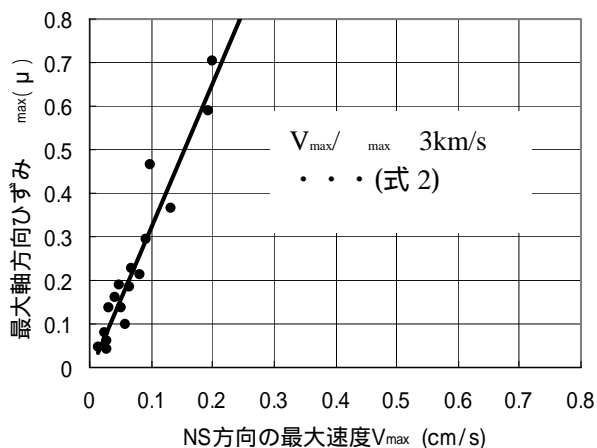


図7 最大NS速度と最大ひずみの関係

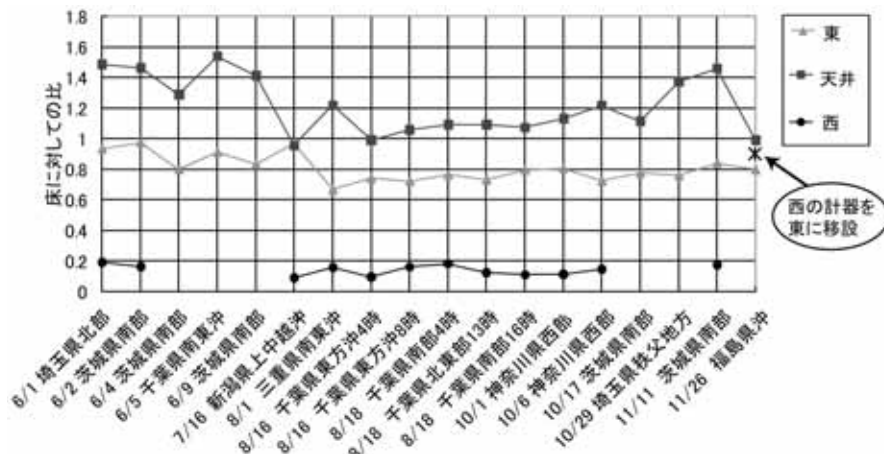


図8 地震動ごとの各面と床の最大ひずみ比

3. 軸方向ひずみと地震動との関係

従来から、単純な水平地盤ではトンネル軸方向ひずみは地震動速度 V との相関性が高く、大まかに次式のようにあらわせることが知られている²⁾。

$$=V/C(C:一定値) \dots \text{式(1)}$$

これを踏まえ、トンネル軸方向ひずみを(床面のひずみ+天井面のひずみ)/2で求め、それと地震動速度 V との相関性について検討した。

水平2成分速度記録を用いて、S波到達から波形の包絡が最大値の半分となるまでの時間範囲について、速度と軸方向ひずみの相関性を調べた結

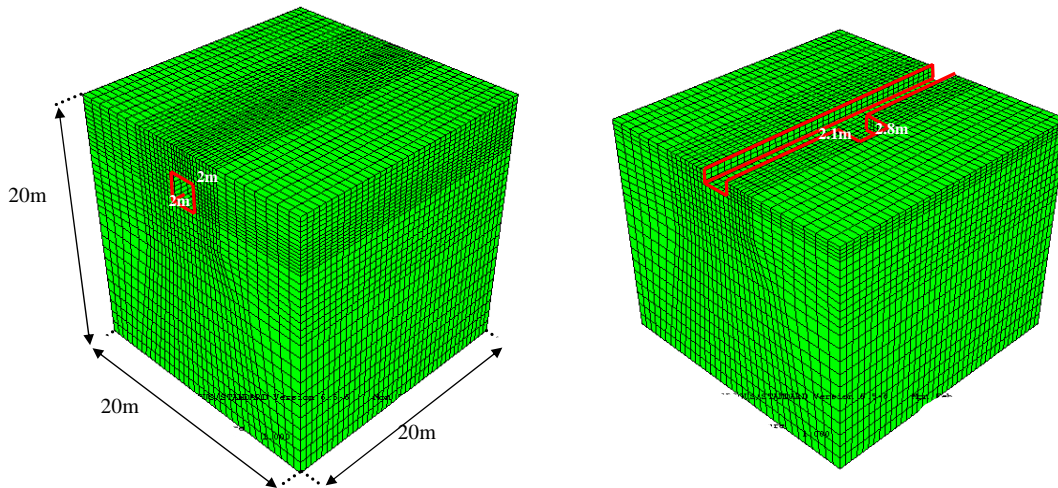


図9 解析モデル概要(左：全体，右：トンネル中央切断)

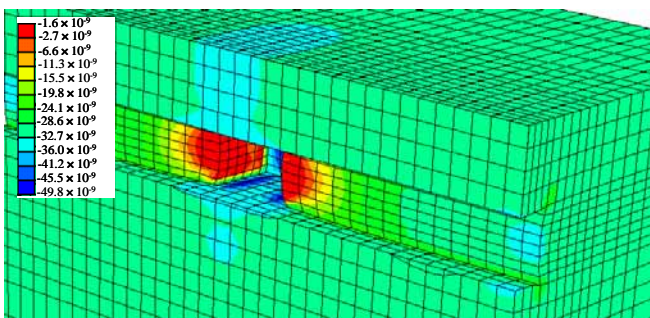


図10 軸方向ひずみ分布

果を図6に示す。図中横軸の角度はNS方向を0度とし、反時計方向に回転させた角度である。7/16と10/1の地震では共にNS方向との相関が大きいですが、相関係数が逆符号であった。これは二つの震源位置がトンネルに対して南北逆方向にあったことによるとと思われる。

図7にNS方向の最大速度値と最大軸方向ひずみ値の関係を示す。両者はほぼ線形関係にあり、図中に示したように二つの最大値の間には式(2)の関係が認められる。

4. アルコーブの影響

図5から明らかなように、西面の地震時ひずみが著しく小さいことを、全地震について調査するため、得られた地震時ひずみ記録から求めた各面と床面の最大値の比を図8に示す。西面の地震時最大ひずみ比はどの地震でも0.2以下となっている。念のため、計器の作動状況を検査するため西面の計測器を東面に移設して測定した。11/26の最大ひずみ比はその結果であり、これから計器に異常がないことが確認された。トンネル西面の軸方向地震時ひずみが他の3面より著しく小さい原因は、西側にあるアルコーブの影響と思われる。

そこで有限要素法による数値シミュレーション

解析をおこなった。解析モデルは図9に示すように、一様な物性値の20mの立方体にトンネル中央部の形状をくりぬいたモデルである。上下面は上下方向固定、トンネル軸直交方向の側面は軸直交方向固定とし、トンネル軸方向の側面に一様な分布荷重を入力して静的解析を行った。軸方向ひずみの分布を図10に示す。西面のアルコーブ付近では軸方向ひずみが明らかに著しく小さい。静的解析ではあるが、トンネル形状(アルコーブ)の影響で局所的に西面のひずみが小さくなる状況が示されており、トンネル西面の地震時ひずみが小さいことも同様な影響によるものと考えられる。

5. まとめ

レーザートンネルで地震時のひずみおよび速度を一年間観測し、実測データを蓄積し解析した。その結果、トンネル中央西側のアルコーブによって西面の地震時軸方向ひずみ量が格段に低減されることが明らかになった。また、軸方向ひずみはNS方向(トンネル軸方向)の速度Vとの相関性が高く、両者の最大値には式(2)の線形関係が認められた。この物理的理由の解明を含め、今後も地震観測を継続し、更なる検討をしていく必要がある。

謝辞：地震観測では山中浩明准教授や東京測振(株)、数値解析では小島康弘氏(M2)の協力を得た。記して謝意を表す。

参考文献

- 1)東京工業大学 施設運営部ホームページ：
<http://131.112.67.37/InstitutionMng/PDFprint01.aspx>
- 2)中村 正博ほか：地中構造物の実測地震時ひずみに関する定量的研究 土木学会論文報告集 第320号 pp.35~45 1982

