

# 浅い地盤に位置するトンネルの地震時ひずみに関する研究

大町 達夫<sup>1)</sup>, 井上 修作<sup>2)</sup>, 戸田 忠友<sup>3)</sup>

- 1) 東京工業大学 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 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 総合理工学研究科 人間環境システム専攻 toda.t.aa@m.titech.ac.jp

## 1. はじめに

都市機能や土地利用の高度化に伴い、上水道、下水道、ガス等の地中ライフライン設備は様々な地盤条件下に敷設されており、その耐震性能を検討することは重要である。地中構造物の地震時挙動は、周辺地盤の変位量やひずみに支配されており<sup>1)</sup>、埋設管路の地震時挙動を把握するには直接管路のひずみを測定することが有効である。これまで数値解析の事例はあるものの直接ひずみを観測した事例は十分とはいえず、未だ不明な点が多い。埋設管路に発生するひずみは、地震波の波動伝播によって発生し、地盤中を伝わる伝播速度に影響を受けるが<sup>1)</sup>、管路周辺の地盤ではどのような波動が伝播し、管路に支配的であるかは明らかでない。

以上のことから、本研究では、地震波の伝播と管路に発生するひずみの関係について、実測記録を用いて検討する。

## 2. 研究目的

本研究で対象としたひずみ観測トンネルは、東京工業大学すずかけ台キャンパス内にあるレーザートンネルである。図1にトンネルの設置位置を示す。同様のトンネルを扱った研究<sup>2)</sup>では、以下の結論が得られている。

- ・ トンネル中央の避難用アルコーブ付近(図4)では、壁面のひずみが他の面のひずみに比べ極端に小さくなる。
- ・ トンネル内で観測された軸方向の地震動速度とひずみの最大値は線形関係がある。

しかし、軸方向のひずみと地震動速度の最大値がなぜ線形関係にあるのかについては明らかではない。よって本研究ではトンネルのひずみと地震動速度の関係について実測にもとづき調べることを目的とする。

## 3. 観測概要

### 3.1 レーザートンネル概要

レーザートンネルは地下約3mに位置し、周辺の地盤は盛土層、ローム混じり粘土層、粘土層、泥岩層からなる。トンネルはコンクリート製で、内空2m×2m、壁圧0.25mの正方形断面である(図2)。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。

トンネルの寸法および速度計、ひずみ計(図3)の設置点を図4に示す。

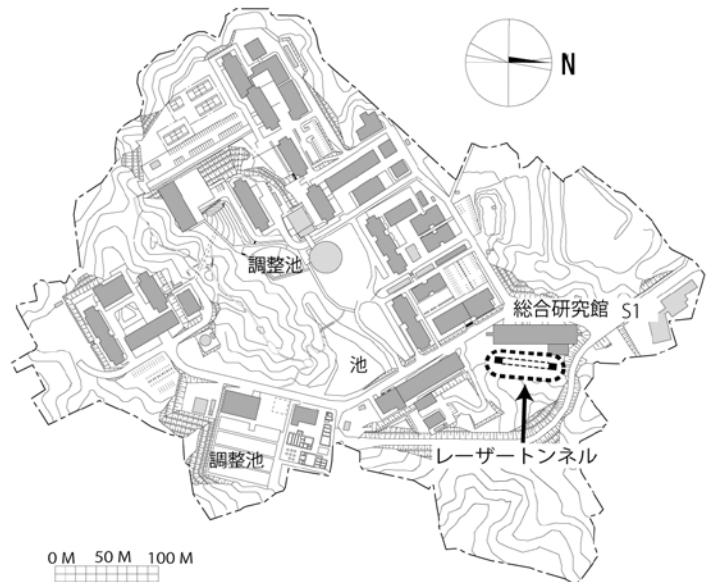


図1 キャンパス内のレーザートンネル設置位置



図2 トンネル内部



図3 ひずみ計

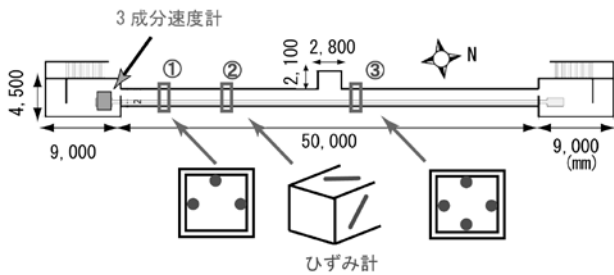


図4 トンネルの寸法および計器設置点

ひずみ計は南側の入り口から 11m の地点 (断面①) に 3 台、22m の (断面②) 地点に 2 台、27m の地点 (断面③) に 4 台の計 9 台が設置されている。断面①の 3 台は 2008 年 3 月に増設したものである。断面①、③では各面のトンネル軸方向のひずみを測定しており、断面②では天井、東面においてトンネルの軸から 45° 傾いた方向のひずみを測定している。

### 3.2 観測記録

2007年5月から2009年1月末までに、レーザートン

ネルでは45の地震が観測されている。表1は水平2成分を合成した速度の最大値が0.1cm/sec以上となった地震記録の一覧である。観測地点と震央位置を図5に示す。ひずみ計が9台設置されてから最も大きいひずみを観測した地震は、2008/6/14に発生した

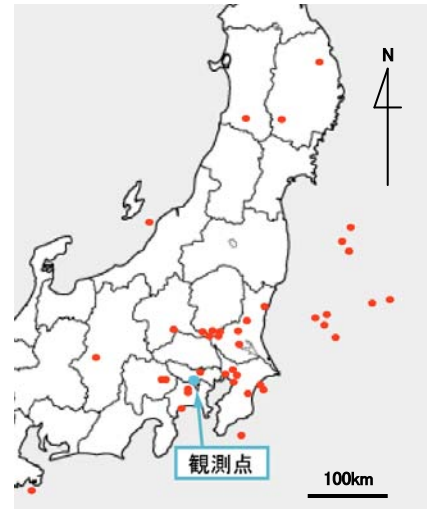


図5 観測された地震の震央位置

表1 観測された地震記録の一覧(最大水平速度 0.1m/sec 以上)

地震発生日	場所	Mj	震源深さ (km)	最大水平速度 (cm/sec)	ひずみ最大値(μ)					
					床面	東面	天井	西面	東面45度	天井45度
2007/6/2	茨城県南部	4.6	50	0.11	0.24	0.24	0.35	0.04	0.13	0.23
2007/7/16	新潟県中越沖	6.8	17	1.34	4.01	3.91	3.85	0.37	1.66	1.26
2007/8/16	千葉県東方沖	5.3	31	0.24	0.70	0.53	0.70	0.07	0.35	0.29
2007/8/18	千葉県南部	5.2	20	0.14	0.35	0.28	0.38	0.04	0.18	0.17
2007/10/1	神奈川県西部	4.9	14	0.14	0.44	0.35	0.50	0.05	0.23	0.20
2007/10/6	神奈川県西部	4.2	32	0.25	0.54	0.39	0.66	0.08	0.49	0.46
2007/11/26	福島県沖	6	44	0.10	0.22	0.17	0.22	0.20	0.13	0.10
2008/2/10	千葉県南東沖	5	95	0.10	0.28	0.20	0.28	0.23	0.24	0.23
2008/4/4	茨城県南部	5	53	0.32	0.74	0.52	0.75	0.09	0.34	0.55
2008/4/17	秋田県沿岸南部	5.8	166	0.11	0.26	0.16	0.23	0.03	0.12	0.12
2008/5/8	茨城県沖	6.4	60	0.41	1.01	0.73	0.89	0.11	0.41	0.42
2008/5/8	茨城県沖	6.3	18	0.48	0.98	0.76	0.86	0.12	0.46	0.42
2008/5/8	茨城県沖	7	51	1.69	3.21	2.81	2.68	0.29	1.30	1.28
2008/5/9	千葉県北西部	4.6	74	0.13	0.30	0.19	0.26	0.06	0.24	0.21
2008/5/9	茨城県沖	5.8	69	0.16	0.43	0.29	0.38	0.04	0.17	0.16
2008/5/12	中国・四川省	7.9	19	0.53	0.55	0.40	0.49	0.09	0.25	0.20
2008/6/14	岩手県内陸南部	7.2	8	1.16	3.97	3.45	3.42	0.43	1.58	1.30
2008/7/15	山梨県東部	4.1	21	0.23	0.33	0.20	0.30	0.09	0.22	0.35
2008/7/15	山梨県東部	4.3	21	0.18	0.36	0.22	0.35	0.08	0.31	0.37
2008/7/19	福島県沖	6.9	32	0.87	1.68	1.45	1.65	0.24	0.71	0.60
2008/7/21	福島県沖	6.1	27	0.22	0.61	0.45	0.58	0.09	0.29	0.23
2008/7/24	岩手県沿岸北部	6.8	108	0.40	1.48	1.18	1.39	0.13	0.63	0.59
2008/8/8	神奈川県東部	4.6	30	0.57	1.20	1.06	1.12	0.20	0.58	0.75
2008/8/20	茨城県南部	4.6	45	0.12	0.30	0.23	0.33	0.05	0.18	0.18
2008/8/22	茨城県北部	5.2	56	0.17	0.28	0.22	0.27	0.04	0.14	0.14
2008/9/21	東京湾	4.8	71	0.22	0.55	0.50	0.62	0.13	0.41	0.48
2008/10/8	千葉県北西部	4.7	63	0.16	0.37	0.28	0.42	0.08	0.22	0.30
2008/12/20	関東東方沖	6.6	0	0.33	0.94	0.76	0.88	0.11	0.39	0.36
2008/12/21	福島県沖	6.2	0	0.16	0.47	0.33	0.43	0.06	0.19	0.17

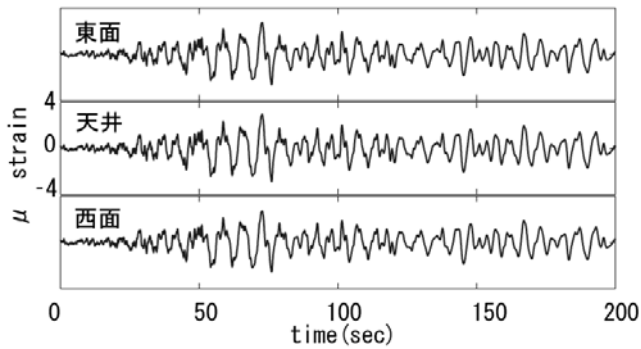


図6 各面のひずみ波形 (断面①)

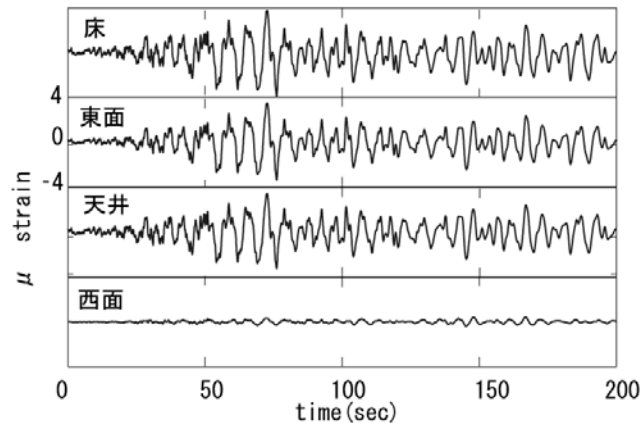


図7 各面のひずみ波形 (断面③)

岩手・宮城内陸地震である。図5、6にこの地震によって観測されたひずみ波形を示す。岩手・宮城内陸地震は深さ8kmを震源とするM 7.2の地震である。この位置はトンネルから北に約400kmにあたる。

図6から、断面①では各面におけるひずみの振幅や位相はほぼ等しいことが分かる。一方、図7から、断面③では西面のひずみが極端に小さいことが確認できる。

図8に軸ひずみと軸方向速度を示す。軸ひずみは断面③における天井と床のひずみを用いて以下の式(1)を用いて算出した。

$$\varepsilon = (\varepsilon_1 + \varepsilon_2) / 2 \quad (1)$$

$\varepsilon$ : 軸ひずみ  $\varepsilon_1$ : 天井のひずみ  $\varepsilon_2$ : 床のひずみ

図8中の30秒から90秒の軸方向速度と軸ひずみの相関係数をとると、軸方向で0.85となり、軸方向速度と軸ひずみは相関が高いことが確認できる。

#### 4. 軸方向速度と軸ひずみの関係

##### 4.1 最大値記録時間の差について

従来から、水平地盤ではトンネルの軸ひずみ $\varepsilon$ と同方向の地震動速度 $V$ は相関性が高く、次式のようにあらわせることが指摘されている<sup>3)</sup>。

$$\varepsilon = \frac{V}{C} \quad C: \text{一定値} \quad (2)$$

観測された各地震で $\varepsilon$ と $V$ の相関にはばらつきがある。図9は、横軸に気象庁マグニチュード、縦軸に

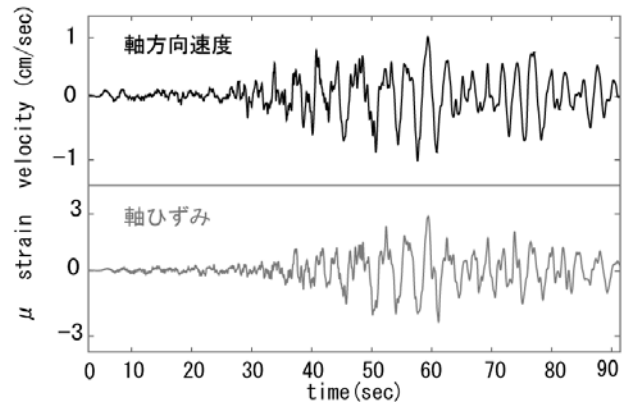


図8 軸方向速度と軸ひずみ

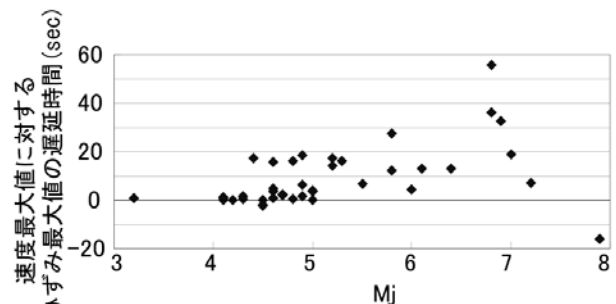


図9 軸ひずみと軸方向速度の最大値の時間差

軸方向の地震動速度の最大値記録時刻から軸ひずみの最大値記録時刻の時間差を示す。マグニチュードの大きい地震では、地震動速度に対してひずみが遅れて最大値を記録する場合があることを示している。

次にランニングスペクトルを用いて地震動速度とひずみの周期特性を調べ、最大値の時間差について考察する。用いた地震動記録は2008年2月10日に千葉県南東で発生したマグニチュード5、震源深さ95kmの地震によるものである。図10に軸方向速度のランニングスペクトル、図11に軸ひずみのランニングスペクトルを示す。

図10、11から軸ひずみと軸方向速度の関係は主要動部分と後続波部分で異なっていることが推定される。主要動部分では軸方向速度は周期1秒から2秒の周期が卓越しているのに対し、軸ひずみのピークは同じ周期に見られない。周期1秒以下の短周期側では軸方向速度と軸ひずみのピークは周期、記録時刻とも概ね一致している。

一方、後続波(20秒以降)の部分では、軸方向速度と軸ひずみはともに周期1秒以上の周期帯で卓越しており、そのピーク周期、記録時刻ともほぼ一致している。後続波については、表面波の影響などが考えられるが、その程度を評価することは難しい。また、震源が近い地震記録では主要動部分でのひずみが最も大きくなる傾向があることから、次に主要動部分に着目して軸方向速度と軸ひずみの関係を推定する。

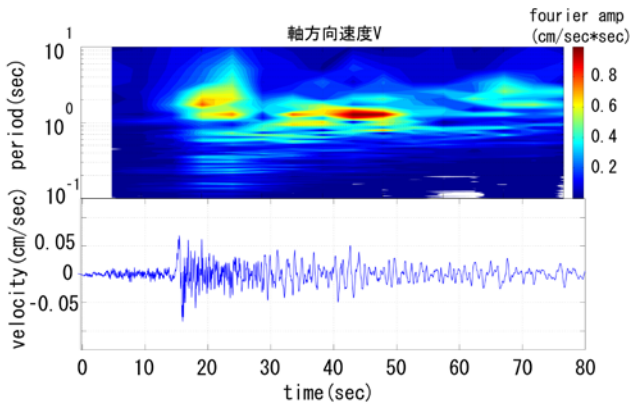


図 10 軸方向速度のランニングスペクトル

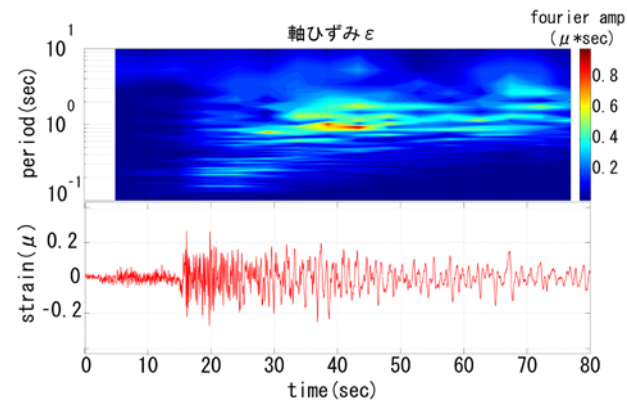


図 11 軸ひずみのランニングスペクトル

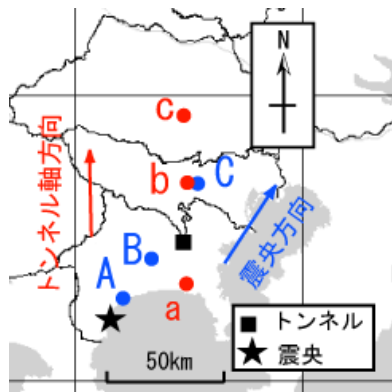


図 12 トンネル及び震央の位置と地震観測点

#### 4.2 伝播速度と軸ひずみの関係

神奈川県南西で発生した地震の走時から、地盤を伝わる主要動部分の水平面内の見かけの伝播速度を推定する。図 12 にトンネル、震央及び K-NET 地震観測点の位置を示す。震央とトンネルを直線で結んだ方向を震央方向とする。図中の震央方向、トンネル軸方向の測線上に位置する地震記録を示したものが図 13、14 である。太線の記録はトンネル内の速度計で記録されたものであり、速度記録の成分はすべてトンネル軸方向である。

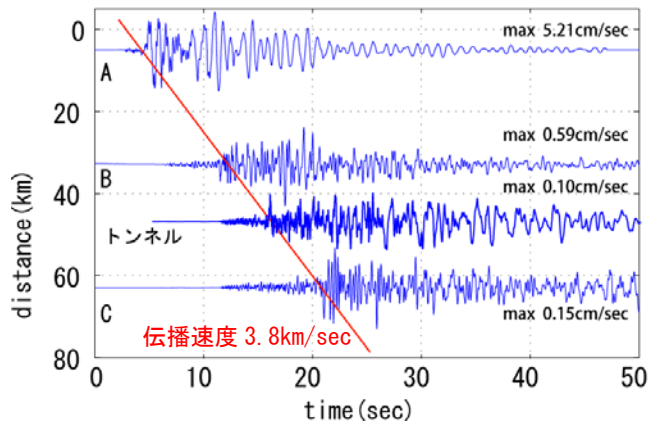


図 13 震央方向の測線上での地震記録

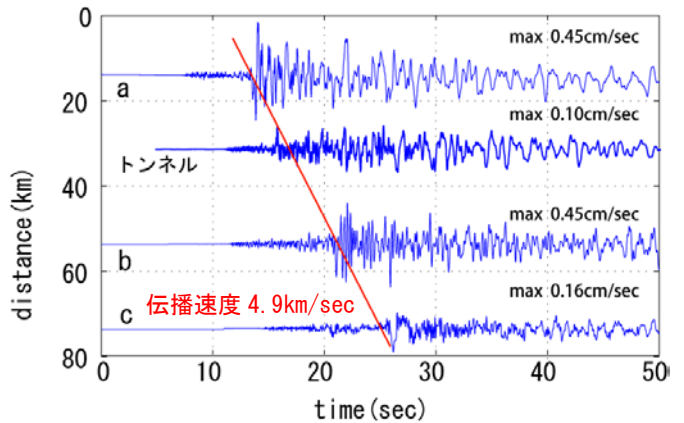


図 14 トンネル軸方向の測線上での地震記録

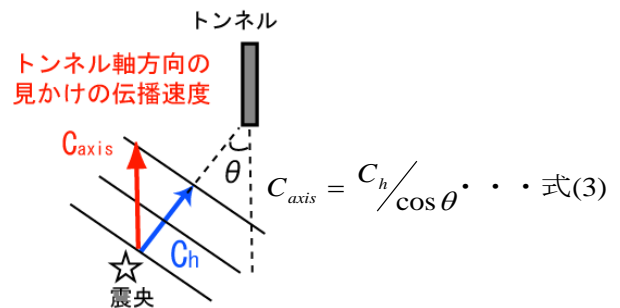


図 15 トンネル軸方向の見かけの伝播速度

二つの図面から主要動の震央方向及びトンネル軸方向の見かけの伝播速度を求めると、前者で 3.8km/sec、後者で 4.9km/sec となり、トンネル軸方向の見かけの伝播速度が震央方向の見かけの伝播速度より速いことが確認できる。これは図 15 で示すように震央がトンネル軸方向から  $\theta$  だけ傾いている位置にあるとき、震央方向の見かけの伝播速度を  $C_h$  とすると、トンネル軸方向の見かけの伝播速度  $C_{axis}$  は式(3)のように表せることに起因するものと考えられる。

式(2)から軸方向の地震動速度と軸ひずみの比は軸方向の見かけの伝播速度となることが考えられる。観測された全地震について軸方向速度と軸ひずみの

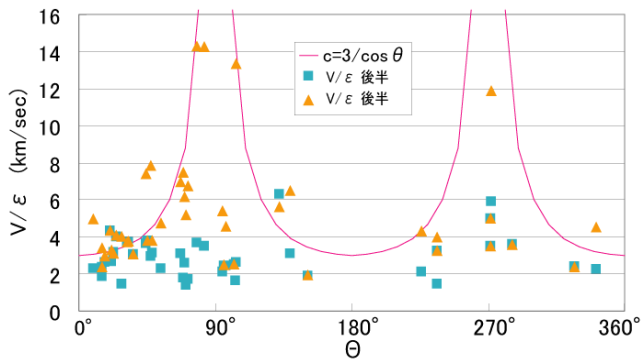


図 16 軸方向速度と軸ひずみの比

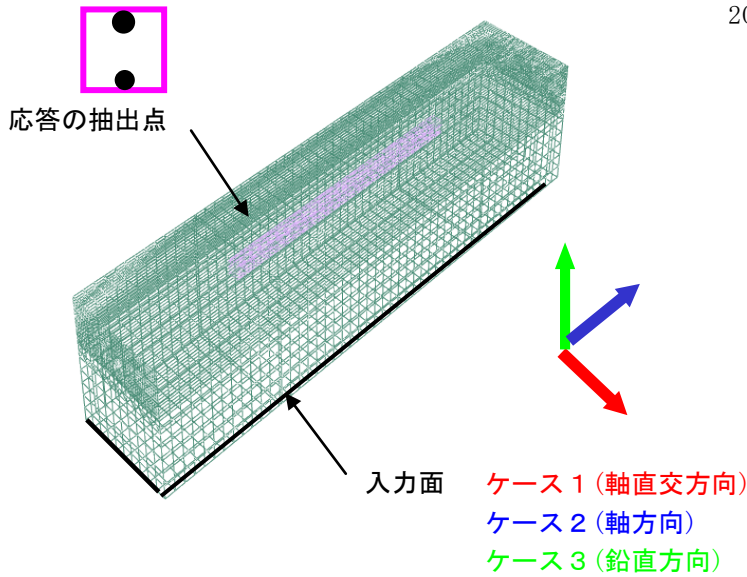


図 17 解析モデル

比を求めたものが図 16 である。横軸は各地震の図 15 中の  $\theta$  を表している。また図中の点線は式(3)によって表されるトンネル軸方向の見かけの速度である。震央方向の見かけの伝播速度  $c$  は地震によって変化するが、ここでは  $3\text{km/sec}$  として算出した。

また、各地震に対して▲（主要動部分）、■（後続波部分）の二つの時点での地震動速度  $V$  と軸ひずみ  $\epsilon$  の比の値をプロットした。

主要動部分での比の値は、実線で示した式(3)の伝播速度の値と概ね良い対応を見せる。よって主要動部分において軸ひずみは軸方向速度と比例関係にあり、式(2)に示す  $c$  はトンネル軸方向の見かけの伝播速度であることが推定される。しかし、 $\theta$  が  $90^\circ$  や  $270^\circ$ 、つまりトンネルの軸に直交する方向で伝播してくる場合、各地震によって比の値はばらつきが大きい。

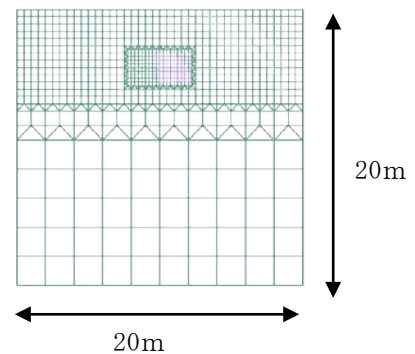
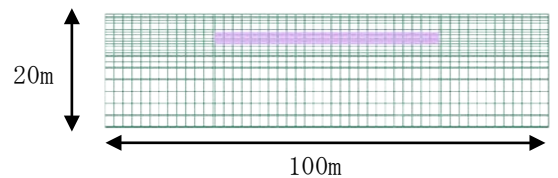
後続波の部分では主要動部分と比べて、 $\theta$  による変化は見られない。比の値はほぼ  $1\text{km/sec}$  から  $6\text{km/sec}$  の速度値を示し、比較的安定している。

## 5. 地震応答解析

トンネルの地震応答特性を把握するために、トン

表 2 解析モデルの物性値

	トンネル	地盤
密度 $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	2400	1800
ヤング率 $E$ (N/m <sup>2</sup> )	$2.2E+10$	$1.7E+08$
ポアソン比 $\sigma$	0.2	0.438
$V_s$ (m/sec)	3190	180



ネルを含む一層地盤の 3 次元モデルを用いて地震応答解析を行った。図 17 に示す解析モデルの大きさは高さ 20m、幅 20m、長さ 100m とした。トンネルのモデルは実際の寸法を考慮し長さ 50m、断面は内空  $2 \times 2\text{m}$  の正方形断面で、コンクリートの厚さは  $0.25\text{m}$  とした。トンネルは地下 3m に位置している。トンネル、地盤の物性を以下の表 2 に示す。地盤は一層地盤とし、その物性はトンネル周辺で行われたボーリング調査を参考に設定した。

ここでは、2008 年 7 月 15 日に山梨県東部で発生した地震 (M4.3) の記録を再現解析した際の結果について述べる。各方向の速度が軸ひずみに与える影響を調べるため、まず三成分別々に剛基礎底面に一様に入力した。以下では、

ケース 1 : 軸直交方向のみ入力

ケース 2 : 軸方向のみ入力

ケース 3 : 鉛直方向のみ入力

として、各ケースで得られたトンネルの軸ひずみを観測記録と比較する。また、入力地震動はトンネルでの応答が、実際の速度記録と一致するように設定した。

図 18 にケース 1 ~ 3 について、軸ひずみの観測

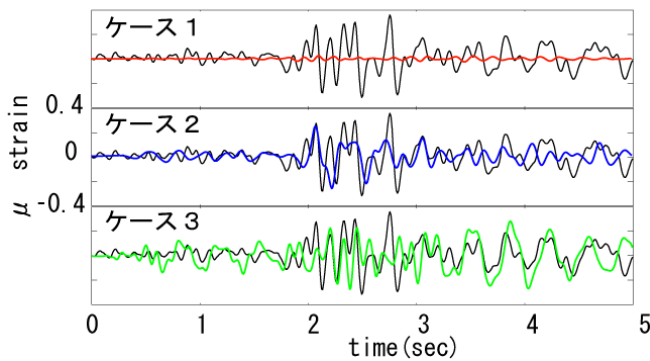


図 18 軸ひずみの観測記録と  
数値計算の比較

記録（黒線）と数値計算の結果の時刻歴波形を示す。軸ひずみは観測記録の解析と同様に、天井と床の軸方向の直ひずみの平均として算出した(式 (1))。

図 18 から以下のことが指摘される。

ケース 1（軸直交方向のみ入力）

数値計算によって得られた軸ひずみは最大値でも  $0.03\mu$  となり、観測記録の最大値  $0.36\mu$  と比較すると著しく小さい値である。よって軸直交方向の速度は軸ひずみにほとんど影響を与えていないことが推定される。

ケース 2（軸方向のみ入力）

1 秒から 2 秒の範囲で数値計算と観測記録は良く一致している。また、3 秒付近のピークでも概ね良い対応を見せる。

ケース 3（鉛直方向のみ入力）

2 秒から 2.5 秒の範囲で数値計算と観測記録は良く一致している。また、3.5 秒以降でも振幅の大きさには違いはあるが、位相は概ね一致している。

地震応答解析によって、実際に観測された軸ひずみは、時間によって影響を受ける地震動速度の方向が変化していることが推定される。既往の研究<sup>3)</sup>によって軸方向速度と軸ひずみの相関が高いことが指摘されているが(式(2))、解析では軸方向だけでなく鉛直方向も軸ひずみを生じさせることがわかった。これは、底面に一様に地震動を入力しているの、軸方向の波の伝播がないことが原因として考えられる。また、解析対象とした地震の震央はトンネルからほぼ真西に位置しており(図 19)、実際の地震動においても再現解析と同様に、軸方向の地震動の伝播が無く、軸方向と鉛直方向の速度によって軸ひずみが発生したことが推定される。

## 6. まとめ

本研究では、主として浅いトンネルで観測される地震動速度( $V$ )と地震時ひずみ( $\epsilon$ )の関係について調べた結果、次のことが明らかになった。

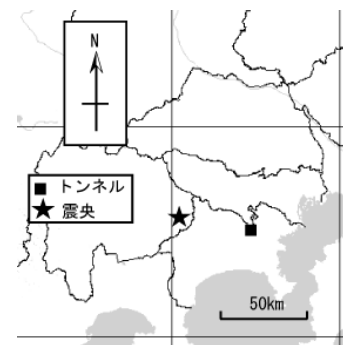


図 19 2008 年 7 月 15 日に  
発生した地震の震央位置

- 1) トンネル軸方向に限定しても、従来指摘されているように  $V/\epsilon=C$  (一定) の関係式が成り立つとは限らない。
- 2) 前式の  $C$  は、主要動部分においてトンネル軸方向と震央方向のなす角度( $\theta$ )や震源深さあるいは震源距離によって変化する。特に  $\theta$  が  $90^\circ$  や  $270^\circ$  のとき、 $C$  の値のばらつきは大きくなる傾向がある。
- 3) 軸ひずみの最大値は主要動部分で発生する場合と後続波で発生する場合がある。前者では 1 秒以下の周期、後者では 1 から 2 秒の周期で卓越する傾向がある。また、後続波部分では前式の  $C$  は  $1\text{km/sec}$  から  $6\text{km/sec}$  の速度値を示し、主要動部分に比べ安定している。
- 4) トンネル軸直交方向からの波動伝播に関しては、底面に地震動を一様入射し数値計算によって求めた軸ひずみと観測された軸ひずみは良く一致していた。このことから実際にもトンネルに対して鉛直下方から一様に地震動が入射されたと推定でき、トンネル軸方向に伝播する波動は発生しないので、 $V/\epsilon=C$  (一定) の関係式は成り立たないと考えられる。

## 参考文献

- 1) 岩本利行、山路忠雄、長尾小二：埋設管路の地震時挙動予測(地盤ひずみと伝播速度)、第 20 回土木学会地震工学研究発表会梗概集、pp323-326、1989
- 2) 水野剣一、大町達夫、井上修作：東工大レーザートンネルの地震時挙動における地震動と地震時ひずみの観測、土木学会第63回年次学術講演会講演概要集、部門 I、pp. 295-296、2008
- 3) 中村正博、片山恒雄、久保慶三郎：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