

# (140) 川崎港海底トンネルでの地震応答観測 結果と変位法との比較

運輸省港湾技術研究所 ○野口孝俊  
同 上 清宮 理

## 1. まえがき

川崎港海底トンネルでは、1979年以来、トンネル内部および周辺地盤に各種観測計器を設置して、地震観測を行っている<sup>1)</sup>。また現在までに64個の地震波形記録が取得された。沈埋トンネルの軸方向の耐震設計法として、変位法と質点系モデルによる動的解析がある。計算方法が簡便であることから、基本設計の段階では変位法が広く採用されている。沈埋トンネルの地震時の挙動が周辺地盤の変位に支配されることは周知であるが、変位法に用いられる諸条件の妥当性については十分に吟味されていない。本報告では、川崎港海底トンネルでの地震応答観測結果を整理して、そこで実測されたひずみ記録を基に、変位法で沈埋トンネルの地震性状を把握する際、どのような諸定数を用いれば観測結果を説明できるか検討を行った。

## 2. 地震応答観測の概要

沈埋トンネルの全長は1160mで、鋼殻式で製作された。沈埋函同志は剛結合で、換気所と沈埋函は分離して建設されており、両者間は柔継手結合されている。

地震応答観測に用いられている計器の配置を図-1に示す。千鳥町および扇島側で換気所近傍の地表(+1.5m)と地中(-60.0m)、沈埋トンネル内の3地点に合計18成分の加速度計が設置されている。また沈埋トンネル内の加速度計が設置されている各地点の側壁には、2個のコンクリート表面ひずみ計および2個の鉄筋計が、また扇島側では上下の床版に軸方向と軸直角方向の鉄筋計が取り付けられ、函体に生じるひずみを計測している。

## 3. 取得された地震波形とひずみの記録

現在までに取得された代表的な地震記録を表-1に、地震の発生位置を図-2に示す。これらの記録の内、地震のマグニチュードは3.6~7.0、震央距離は20~700kmの範囲で、最大加速度は103.3Galであった。

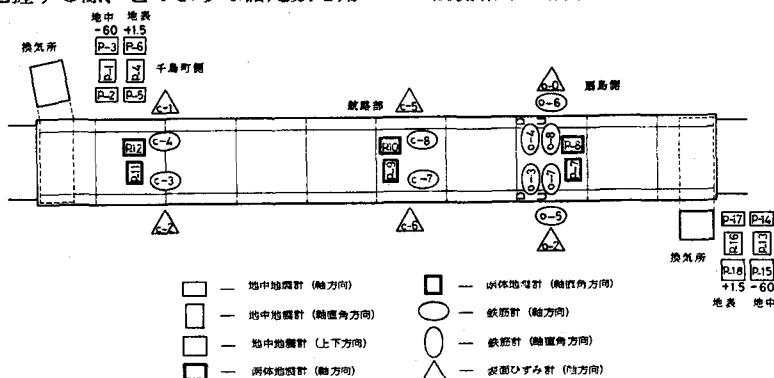


図-1 計測機器の配置

表-1 取得された地震の諸元

地震番号	発震年月日	震 源 地		マグニチュード	深 度 (km)	震央距離 (km)
		場 所	緯 度 経 度			
KMSK-1	1980.03.12	房総半島南東沖	34° 57' 140° 31'	5.6	80	92.2
KMSK-4	1980.05.08	房総半島南東沖	34° 31' 140° 27'	5.7	60	126.4
KMSK-9	1980.09.25	千葉県中部	35° 31' 140° 13'	6.1	80	36.6
KMSK-10	1981.01.19	宮城県沖	38° 36' 142° 58'	7.0	0	285.0
KMSK-12	1981.06.25	神奈川県東部	35° 36' 138° 31'	3.6	40	24.5
KMSK-16	1982.07.23	茨城県沖	36° 18' 141° 48'	7.0	40	204.2
KMSK-21	1983.02.27	茨城県南部	35° 58' 140° 06'	6.0	70	59.7
KMSK-26	1984.01.01	東海道はるか沖	33° 16' 136° 52'	7.4	400	360.9
KMSK-30	1984.08.14	長野県西部	35° 47' 137° 31'	6.9	0	205.1
KMSK-35	1985.04.11	鳥島近海	30° 03' 139° 14'	6.7	400	608.4
KMSK-36	1985.06.08	千葉県中部	35° 33' 140° 15'	4.8	65	44.3
KMSK-40	1986.06.24	房総半島南東沖	34° 50' 140° 43'	6.5	73	114.8
KMSK-43	1986.11.29	茨城県沖	36° 24' 141° 08'	5.8	44	156.4
KMSK-47	1987.04.07	千葉県沖	37° 17' 141° 54'	6.6	37	275.9
KMSK-52	1987.12.17	千葉県東部	35° 21' 140° 29'	6.7	58	67.2
KMSK-56	1988.3.18	東京都東部	35° 40' 139° 39'	6.0	69	20.4
KMSK-58	1988.8.01	伊豆半島東部	34.9° 139.2°	4.0	10	84.6
KMSK-64	1989.2.19	茨城県南西部	36° 00' 139° 55'	5.6	54	56.5

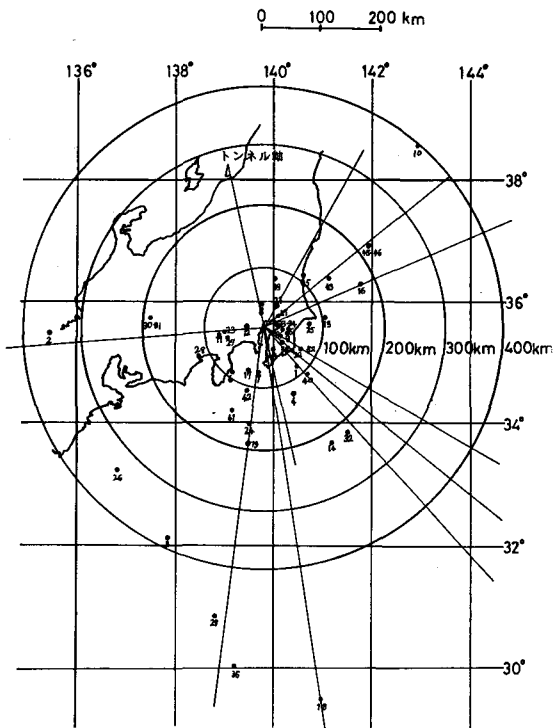


図-2 観測された地震の発生位置

得られたひずみ波形で最大振幅値と地震の諸元（マグニチュードおよび震央距離）との関係を図-3に示す。沈埋トンネルに生じたひずみ量は、マグニチュードが大きい程、また震央距離が短い程一般的に大きな値を示している。

記録の一例として、最も加速度が大きいKWSK-52の加速度波形とひずみ波形を図-4および図-5に示す。加速度波形についてみると、主要動部は記録取得開始後から10秒程の所にあり、その後比較的低い振動数の波が卓越している。ひずみ波形は加速度波形と比較してなだらかで、最大振幅値は加速度波形の主要動部を過ぎてから生じている。この地震では表面波成分の大きな箇所ではひずみの値が大きくなる。KWSK-52では表面波部分に大きな値のひずみ値を与えるが、直下型の地震では加速度振幅の大きい主要動部に大きな値のひずみ値を与える。

#### 4. 変位法の概要

変位法では、正弦波形をした地盤変位波形が、表層地盤を水平方向に伝播して沈埋トンネルに入射すると仮定して断面力を求める。断面力は強制変位を受ける弾性支承上の梁として計算する。断面力は軸力と曲げモーメントを考えるが、軸ひずみ ( $\epsilon_a$ ) と曲げひずみ ( $\epsilon_b$ ) は各々次式により求まる。

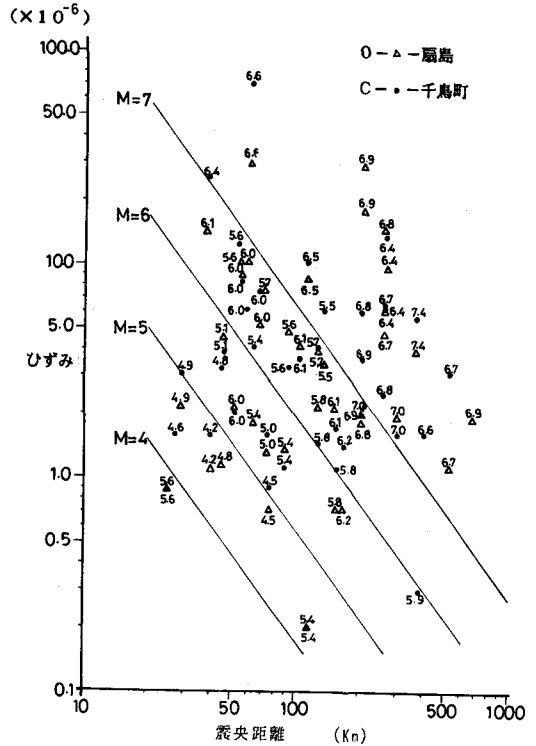


図-3 ひずみと地震諸元との関係

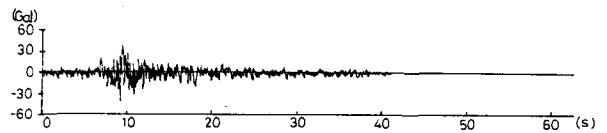


図-4 加速度波形 (KWSK-52 P-2)

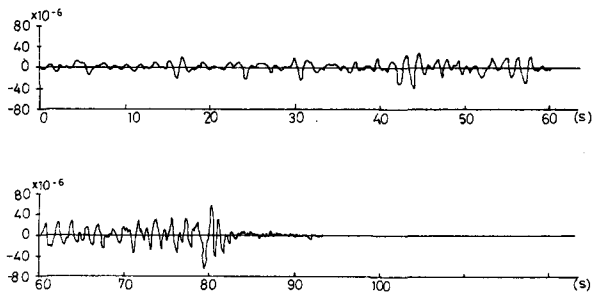


図-5 ひずみ波形 (KWSK-52 C-2)

$$\text{軸ひずみ} \quad \epsilon_a = \frac{Ug \frac{2\pi}{L}}{1 + \frac{EA}{K_a} \left( \frac{2\pi \cos \phi}{L} \right)^2} \cos \phi \sin \phi \quad (1)$$

$$\text{曲げひずみ} \quad \epsilon_b = \frac{Ug \frac{2\pi}{L}}{1 + \frac{EI}{K_b} \left( \frac{2\pi \cos \phi}{L} \right)^4} \cos \phi \left( \frac{2\pi}{L} \right) \cos \phi \quad (2)$$

$$\text{合成ひずみ} \quad \epsilon_s = \sqrt{\epsilon_a^2 + \epsilon_b^2} \quad (3)$$

ここで  $Ug$  : 変位波形の振幅、 $L$  : 変位波形の波長、 $\phi$  : トンネル軸と入射角とのなす角度、

$EA$  : 沈埋トンネルの軸剛性、 $EI$  : 沈埋トンネルの曲げ剛性、 $K_a$  : 沈埋トンネルと地盤を結ぶ軸方向ばねの定数、 $K_b$  : 沈埋トンネルと地盤を結ぶ軸直角方向ばねの定数

### 5. 変位法による予備検討

この変位法で川崎港沈埋トンネルでのひずみを計算する場合、波長、入射角およびばね定数の設定がひずみにどの程度影響を及ぼすか調べた結果を図-6~8に示す。ここで  $Ug=1.0\text{cm}$ 、 $K_a=5.0 \times 10^5 \text{tf/m}$ 、 $K_b=1.0 \times 10^6 \text{tf/m}$ 、 $EA=3.05 \times 10^8 \text{tf}$ 、 $EI=1.0 \times 10^{10} \text{tf}\cdot\text{m}^2$  に設定した。図-8の計算では、 $K_a$ を変化させて求めた。図-6に示すとおり、波長が長くなれば軸ひずみ、曲げひずみとも低減する。波長が短いときには、軸ひずみ、曲げひずみとも値が大きいが、波長が400m以上となると軸ひずみが大きく卓越し、曲げひずみはほとんど生じない。図-7に示すように、波長が180mと短い場合には、入射角が0~60度の範囲で合成ひずみが最大となる。波長が長い場合、入射角が45度付近で合成ひずみが最大となる。また図-8に示すように、軸方向ばね定数がひずみに与える影響は小さい。

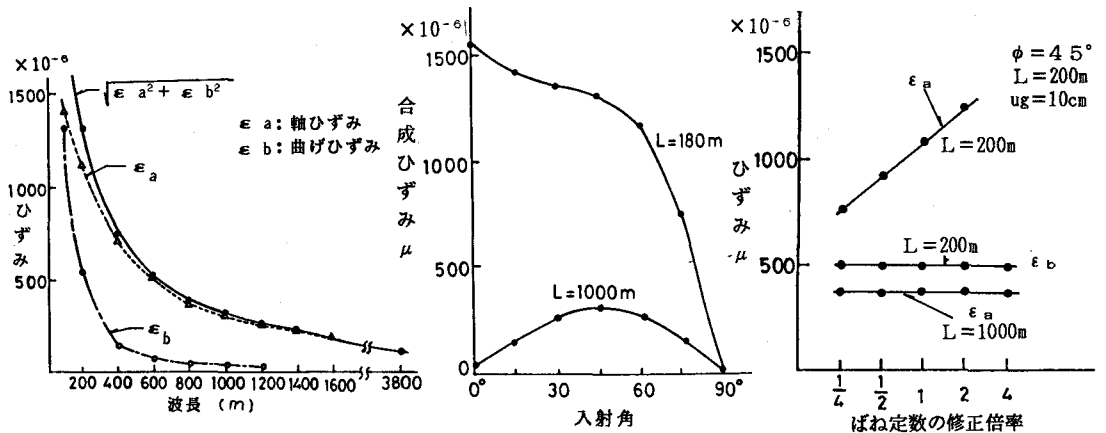


図-6 波長とひずみとの関係 図-7 入射角とひずみとの関係 図-8 ばね定数とひずみとの関係

### 6. 変位法による計算の概要

これまでの観測記録で得られた情報をできる限り式(1)および式(2)に反映して沈埋トンネルに生じるひずみを計算する。ここで変位波形の振幅は、地表面に設置してある加速度計の値を2回積分して得られた波形の振幅を用いた。 $\phi$ は沈埋トンネル軸線と震央とを結ぶ線の角度(図-2参照)で、ばね定数は弾性波探査によって得られた地盤条件を基に有限要素法によって求めた値(設計値)である。この際、SHAKEを使用して沈埋トンネル軸線に沿った表層地盤のひずみ依存性を考慮し、ばね定数を低減させた。

変位波形の波長は、2点間の各々で取得された地震波の位相差から得られる伝播速度を用いて求めることができる。しかし、伝播速度は地震動の性質、入射方向等の影響によって容易に設定できない。例えば直下型の地震では地震波が主に下方より伝播し、2点間の伝播速度は変位法で定義している水平方向に伝播する地震動とは性質が異なり、あくまでも見掛け上の伝播速度となる。一方遠距離で生じた地震では、

表面波の伝播速度を考える。この際の基盤は、沈埋トンネルの耐震設計で設定する工学的基盤面（N値50以上）より深い基盤を設定する必要がある。それについては、島等によって得られた東京での基盤構造<sup>2)</sup>から得た表面波の分散曲線（図-9）が参考となる。このように地震の性質によって波長の設定が異なる。波長の設定では現在「ガス導管耐震設計指針（案）」<sup>3)</sup>に示されている方法（工学的基盤面以上、表層地盤の周期を1秒と設定）と「共同溝設計指針」<sup>4)</sup>に示される $L=2L_1L_2/(L_1+L_2)$ 〔ここで $L_1$ は表層地盤での波長、 $L_2$ は基盤での波長である〕の方法がある。ここでは地震波の波長として、工学的基盤面以上の表層地盤の平均的なせん断弾性波速度（S波）と固有周期から設定した180m、「共同溝設計指針」から求めた280m、「ガス導管耐震設計指針（案）」での800m、図-9での表面波を想定したときの3800mの4種類を考える。

### 7. 観測結果と計算結果の比較

変位法による計算結果と実測値の比を図-10に示す。計算は表-1の中で比較的加速度値の大きい地震を対象とした。計算値と実測値の比が1であるとき、両者の値が一致した所であるが、全般的にばらつきは大きい。しかし、震央距離が100km未満の地震では、波長が180m、280mの場合は、比の値が1に近く、震央距離が100km以上では波長が800mのとき、比の値が1に近いと言える。また波長が3800mの時は、計算値の方が実測値よりかなり小さい値となった。

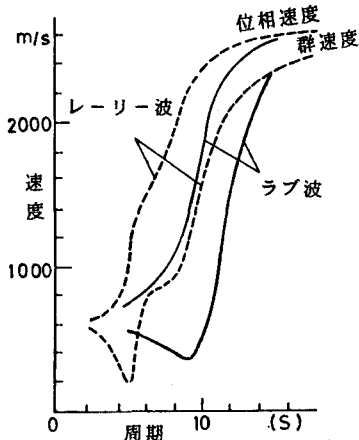


図-9 表面波の分散曲線

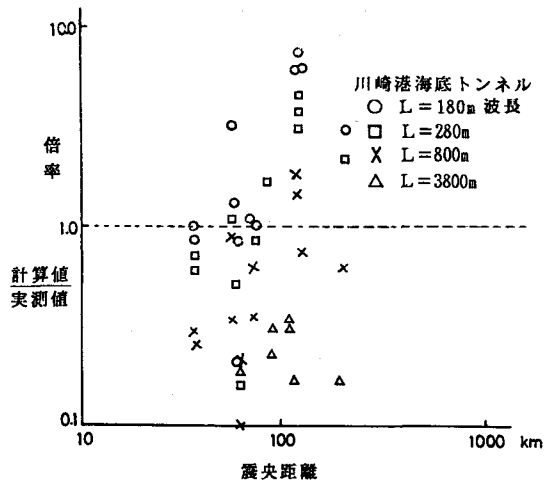


図-10 計算値と実測値との比較

### 8. 結論

川崎港海底トンネルでの観測結果を基に変位法の検討を行い、以下の結論を得た。

(1) 変位法では、地震波の波長、変位振幅、入射角の設定がひずみに与える影響は大きい。しかしばね定数がひずみの値に与える影響は小さい。

(2) 変位法を用いる際の地震波の波長として、近距離の地震を対象とする時には、工学的基盤面以上の表層の地盤条件から設定される値を用いると良い。遠距離の地震を対象とする際には、より深い地層の影響を考えて地震波の波長を設定するのが良いが、その目安として「ガス導管耐震設計指針（案）」に示される方法が、妥当な値を与えるものと考えられる。ただし波長が2、3km以上の長い地震では沈埋面に発生するひずみは小さいので、波長の影響は考えなくてもよさそうである。

参考文献 1) 清宮 理 他：川崎港沈埋トンネルでの地震応答観測と解析、港湾技研報告、Vol.22、No.3、1983年9月、pp.253~299

2) 島 悦三 他：東京の基盤構造その4、地震研究所速報、Vol.53、1978年、pp.1245~1255

3) 日本ガス協会：ガス導管耐震設計指針（案）、昭和57年3月

4) 日本道路協会：共同溝設計指針、昭和61年3月