

# (87) 川崎港海底トンネルの地震応答

運輸省港湾技術研究所 正員 菅岩 理  
 同 上 学生員 而澤 英隆  
 同 上 正員 横田 弘

## 1. まえがき

東京湾周辺には、既にノの粗前後の長大な沈埋トンネルが建設されている。軟弱な沖積層内に埋設されている沈埋トンネルの地震時の挙動を調べるために、数箇所の沈埋トンネルで地震応答観測が行われており、有用な知見がいくつか得られている。川崎港海底トンネルでは、1979年以来、トンネル内及び周辺地盤内に各種の測定計器を設置して地震応答観測を行っている。本報告では、地震の諸元と沈埋トンネルに生ずるひずみ量との関係及び、一、二、三の地震震動記録を対象に地震の規模によって本管状態がどのように異なるかを中心に述べる。

## 2. 地震応答観測の概要と取得された地震記録

地震応答観測に用いている計器の配置を図-1に示す。千鳥町及び扇島へ換気所近傍の地表(+1.5m)と地中(-60m)、沈埋トンネル内の地点に合計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3地点の側壁にコンクリート表面ひずみ計と鉄筋計とが対になって取付けられており、函体に生ずるひずみを計測できる。現在までに取得された地震記録は、表-1に示す21個である。表中のKWSKは記録の整理番号である。これらの記録の内、最大加速度は、7.6 Galである。

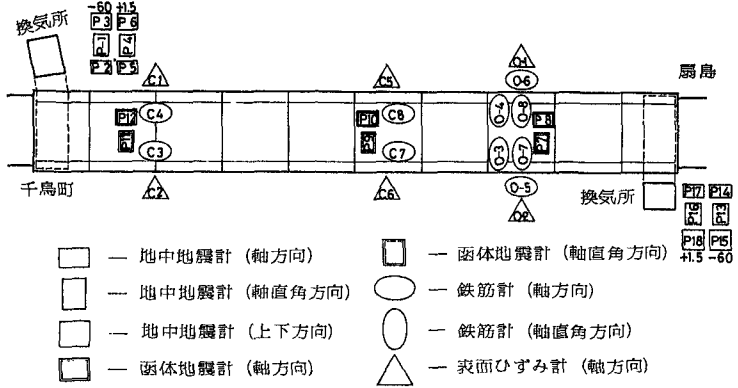


図-1 測定計器の配置図

## 3. 地震の諸元とひずみ量との関係

得られたひずみ変形での最大振幅値と地震の諸元(マグニチュード及び震央距離)との関係を図-2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くなると、また震央距離が短い程大きい値であったことがわかる。地震記録を集積個数は十分ではないが、各地震毎で得られた最大ひずみ量と地震の諸元との関係を回帰式で求めると次式を得る。

$$\log_{10}(E_{max} \div 10^6) = 0.52M - 1.36 \log_{10} \Delta - 0.12$$
 ここでM: マグニチュード,  $\Delta$ : 震央距離  
 前者は表浦港水底トンネルで、また因村らは、河野川トンネルで同様の地震応答観測を実施し

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)
		緯 度	経 度			
KWSK-1	1980. 3.12	房 総 半 島 南 東 部	34°57' 140°31'	5.6	80	92
KWSK-2	1980. 3.31	京 都 府 北 部	35°30' 135°31'	5.9	360	384
KWSK-3	1980. 4.22	東 海 道 は る か 沖	32°09' 137°55'	6.6	400	409
KWSK-4	1980. 5.08	房 総 半 島 南 東 部	34°31' 140°27'	5.7	60	126
KWSK-5	1980. 6.18	千 葉 県 中 部	35°38' 140°01'	4.6	80	27
KWSK-6	1980. 6.29	伊 豆 半 島 東 方 沖	34°55' 139°14'	6.7	10	81
KWSK-7	1980. 8.15	房 総 半 島 南 東 部	34°51' 139°46'	5.0	90	73
KWSK-8	1980. 9.24	茨 城 県 南 西 部	35°58' 139°48'	5.4	80	51
KWSK-9	1980. 9.25	千 葉 県 中 部	35°31' 140°33'	6.1	80	37
KWSK-10	1981. 1.19	鹿 嶋 県 東 部	38°36' 142°58'	7.0	0	295
KWSK-11	1981. 4.14	山 梨 県 東 部	35°28' 138°55'	4.5	20	76
KWSK-12	1981. 6.25	神 奈 川 県 東 部	35°36' 139°31'	3.6	40	25
KWSK-13	1981. 9.02	茨 城 県 東 部	35°48' 141°08'	5.8	40	128
KWSK-14	1982. 2.21	八 丈 島 近 海	33°43' 141°14'	6.4	40	262
KWSK-15	1982. 3. 7	鹿 嶋 県 東 部	36°28' 140°39'	5.5	60	133
KWSK-16	1982. 7.23	茨 城 県 東 部	36°18' 141°48'	7.0	40	204
KWSK-17	1982. 8. 12	伊 豆 半 島 近 海	34°54' 139°32'	5.7	40	71
KWSK-18	1982. 9. 6	鳥 島 南 方 沖	29°30' 141°02'	6.9	190	677
KWSK-19	1982.12.28	三 宅 島	33°42' 139°40'	6.0	50	202
KWSK-20	1983. 2.22	千 葉 県 北 部	—	—	—	—
KWSK-21	1983. 2.27	茨 城 県 南 部	35°58' 140°06'	6.0	70	59

表-1 取得された地震記録

ている。この両トンネルで得られた最大ひずみ量と地震の諸元とを整理し、回帰式を得た。この結果を図-3に示す。ただし整理を行った地震のマグニチュードは、3.6~7.5、震央距離は、1.5~740kmの範囲であり、各地震記録での最大ひずみ量は、 $50 \times 10^{-6}$ 以下である。同一の性質を持つ地震に対して川崎港海底トンネルと多摩川トンネルでは、ほぼ同程度のひずみ量が、衣浦港木造トンネルでは、他の二箇所のトンネルよりも大きいひずみ量が与えられることが判る。

4. 軸ひずみと曲げひずみ

次埋トンネルの一断面に対してひずみ計が得られれば、軸ひずみと曲げひずみとに分離できる。各地震に対して扇島側のコンクリート表面ひずみ計で得られた最大軸ひずみ量と最大曲げひずみ量とを表-2に示す。最大軸ひずみ量と最大曲げひずみ量とは、KWSK-4, 8, 9では同程度、KWSK-19, 21では軸ひずみ量が卓越している。軸ひずみ量と曲げひずみ量とは、地震波の波長、速度振幅、加速度振幅及び外径等の要因の影響を受ける。次埋トンネルと同じく埋設地中構造物であるロイヤラインでは、通常軸ひずみ量が曲げひずみ量より大きい。ロイヤラインより外径の大きい次埋トンネルでは、地震の性質によっては、軸ひずみと同様曲げひずみもかなり発生すると言える。

5. 各地震記録に対する次埋トンネルの応答

KWSK-9の地震に対する応答を調べる。この地震は、千葉県中部に1979年6月25日に発生した、いわゆる直下型の地震である。記録開始後7~10秒付近に衝撃的に数波の地震波が次埋トンネルに到着している。図-4にこのひずみ波形を示すが、加速度波形で最大振幅が生じている付近で、軸ひずみ波形と曲げひずみ波形とも最大値をとり、その後振幅は減少している。また軸ひずみ

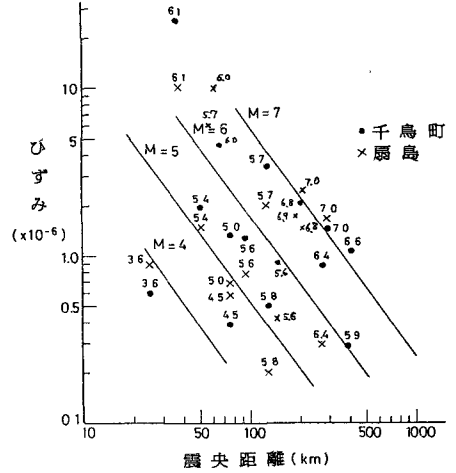


図-2 ひずみと地震の諸元との関係

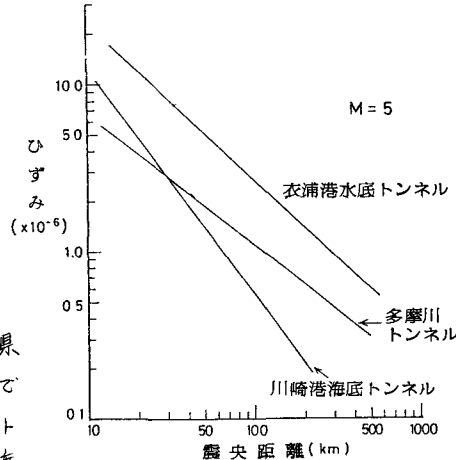


図-3 回帰式と比較

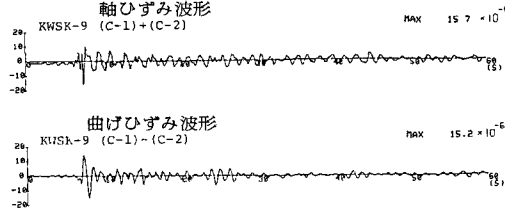


図-4 ひずみ波形(KWSK-9)

地震番号	軸ひずみ量	曲げひずみ量
KWSK-4	1.9	1.3
KWSK-8	1.0	0.9
KWSK-9	9.1	7.3
KWSK-19	2.0	0.6
KWSK-21	4.4	1.9

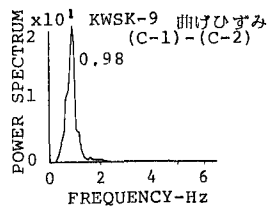
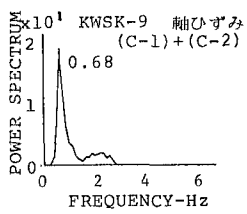
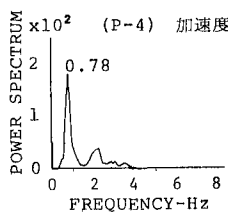


表-2 軸ひずみと曲げひずみ ( $\times 10^{-6}$ )  
図-5 (左図) 地震波形のパワースペクトル(KWSK-9)

形の方が曲びやすいため卓越周期が長い傾向がある。次にKWSK-6の地震記録で検討を行う。図-6に得られた加速度波形を示すが、主要動部が記録取得開始後から十数秒までである。その後振幅は小さいが、0.3 Hz前後の比較的共振数が増加している。この地震記録では、良好な波形が取得できなかったため、トンネル内の加速度記録を積分して得られた変位波形からトンネル内に生じた軸ひずみを求めた。この結果を図-7に示すが、ひずみ波形はただらからで、加速度記録での主要動部を過ぎた60秒前後で振幅が最大となる。この区間での地震波の波形の性質を調べる。いま970m離れた地中の2点間での地震波の相互相関係数をとると、地震波が南島から千鳥町側へ約2400m/sの速度で伝播していることがわかる。トンネル軸線と震央方向とのなす角度が46度であるので、地震波の伝播速度は約1600m/sと推定できる。千鳥町側の地中地震計で得られた加速度波形から計算した変位波形に着目する。この変位波形では、約0.3 Hzの共振数が増加しているが、この変位波形にフィルターをかけ、0.2~0.33 Hz、0.1~0.2 Hzの共振数を持つ波形に分離する。0.2~0.3 Hzの変位波形では、鉛直面内で円形を示し、波の進行が震央方向に対して反転している。また水平面内では、震央方向の座標軸に関して振動しているように見える。また図-9に示す上下成分と震央方向成分の積での波形は正弦波である。この共振数域では、レリー波が優勢であることが解る。一方0.1~0.2 Hzの領域

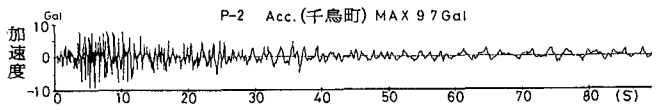


図-6 加速度記録(KWSK-6)

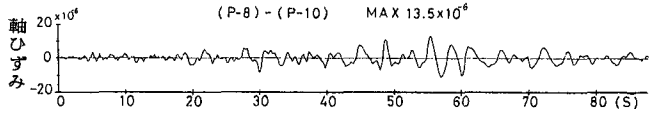


図-7 計算されたひずみ波形

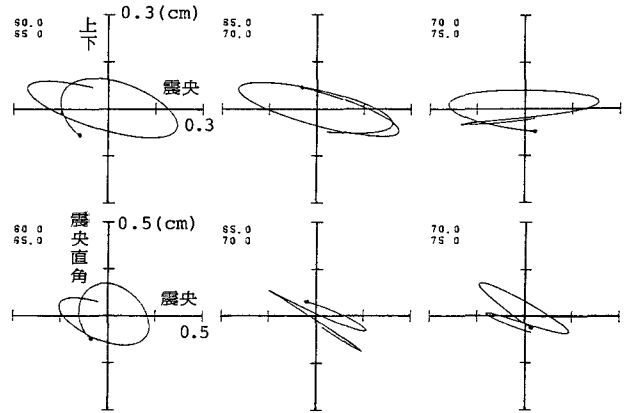


図-8 0.2~0.33 Hzの波形の軌跡図

0.2~0.3 Hzの変位波形では、約0.3 Hzの共振数が増加しているが、この変位波形にフィルターをかけ、0.2~0.33 Hz、0.1~0.2 Hzの共振数を持つ波形に分離する。0.2~0.3 Hzの変位波形では、鉛直面内で円形を示し、波の進行が震央方向に対して反転している。また水平面内では、震央方向の座標軸に関して振動しているように見える。また図-9に示す上下成分と震央方向成分の積での波形は正弦波である。この共振数域では、レリー波が優勢であることが解る。一方0.1~0.2 Hzの領域

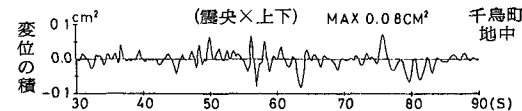


図-9 変位波形の積

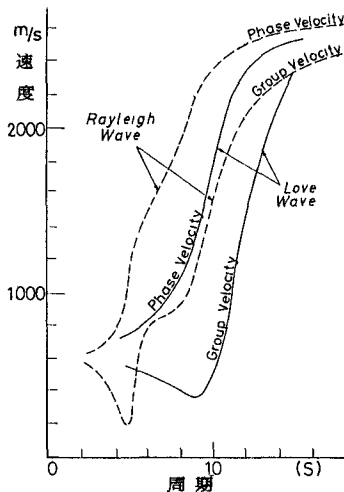


図-11 表面波の分散曲線  
(文献より作成)

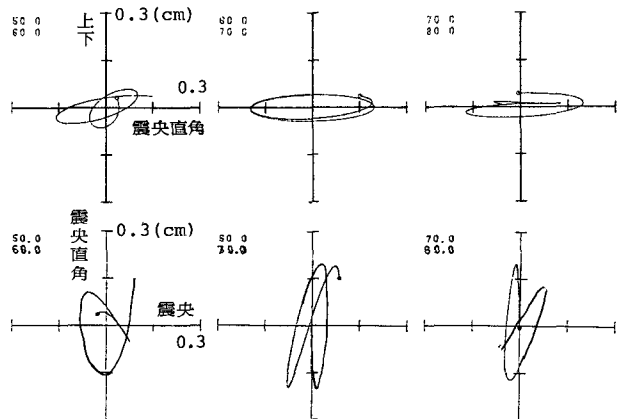


図-10 0.1~0.2 Hzの波形の軌跡図

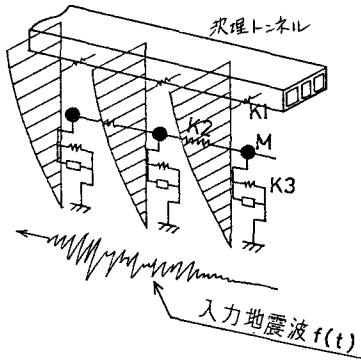


図-12  
質点系  
モデル

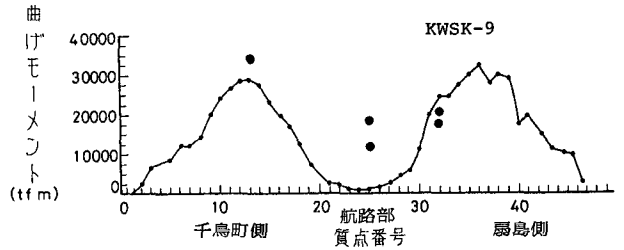


図-13 曲げモーメントでの比較

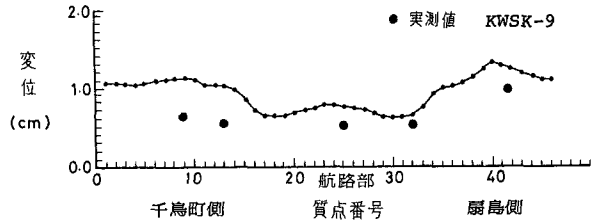


図-14 太管変位での比較

域の変位波形では、鉛直面内でほぼ水平方向に、水平面内で震央直交方向に振動していることが解る。ここでの変位数値域の較では、ラフ表が優勢であることが解る。

### 6. 動的応答計算

沈埋トンネルの耐震設計は、図-12に示す質点系モデルを使って行われる場合が多い。実体振が優勢なKWSK-9の地震を対象に、質点系モデルによる計算値と実測値との比較を行う。地盤の力学定数は、弾性波探査で得られたF波断面弾性波速度等を基に設定した。SHAKE(プログラム名)を用いて沈埋トンネル軸線に沿った表層地盤

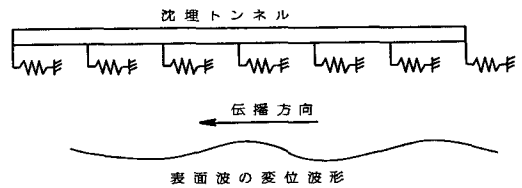


図-15 弾性支承上の梁モデル

盤の力学定数の必ずみ依存性を考慮した。曲げモーメントで計算値と実測値との比較を図-13に示す。地形条件が変化する機界部に、大きな値の曲げモーメントが計算されたが、航路部では小さな値となっている。千鳥町側と扇島側へ沈埋面での実測値は、ほぼ計算値と同程度である。ただし航路部では、実測値の方が計算値よりも大きな値となっている。図-14に太管変位に関して、計算値と実測値(加速度波形の積分値)との比較を図-14に示す。計算値の方が実測値よりも若干大きな値を与えつつ、分布の傾向はほぼ同一である。一方KWSK-9の地震のように入面波が優勢な地震に対して、質点系モデルによる動的太管計算法は、必ずしも合理的であると言えない。そのため質点系モデルでは、表層地盤のせん断振動に着目して下り、表面波が表層地盤を水平方向に伝播する際の表層地盤の振動を考慮して行った。今回は、表面波に対する沈埋トンネルの地震応答を求めるため、図-15に示す簡単な力学モデルを考えた。すなわち、沈埋トンネルを弾性支承上の梁と設定する。入力地震波は、変位波形とし、両側の端部から強制変位として力学モデルに入力する。変位波形は、梁モデルの一端から他端へ伝播するとする。入力波形は、地中地震計で実測された加速度記録を積分して求め、振幅値は、沈埋トンネル位置に押圧を施す。計算結果の詳細については、当日発表する。

### 7. 総括

沈埋トンネルの地震応答特性は、地震波の性質によって異なる。観測結果から、実体振のみならず表面波も沈埋トンネルの地震応答特性にとって重要であることが確認できた。表面波成分が優勢に注目される地震波記録の集積数も、少くとも参考を行いたい面もあったが、観測を継続して行い、現象の解明を図りたい。

参考文献 1) 田村重四郎：地中構造物の耐震設計法としての変位法に関して、生産研究 29巻5号, 1977年

2) 扇島三, 柳本高任, 佐間信作：首都圏の基礎構法, 第5回地震工学シンポジウム, 1978年