

大成建設(株) 正員 泉 博允 ○志波由紀夫 岩野政造  
東京都港湾局 池田智学

1 はじめに 沈埋トンネルの地震応答解析法としては、トンネル軸に沿った地盤を複数の1質点振動系で置換して地盤の応答変位を求め、これを弾性支承上のはりで置換したトンネルへ強制変位として与え、トンネルの断面力を求める方法<sup>1)</sup>(以下この方法をバネ・質点モデルによる方法と呼ぶ)が広く用いられており、その有用性が認められているが、この方法には、地盤振動のモデル化において、工学的判断による解析上の簡易化が多く含まれている。

著者らは、沈埋トンネルの地震時挙動が周辺地盤の挙動に大きく支配されるという観点から、地盤の高次振動の影響や地震動の下方および側方への逸散を考慮できるように改善した沈埋トンネルの軸方向地震応答解析法を提案した。この解析法の妥当性を検討するため、実際の沈埋トンネルにおける地震観測記録<sup>2)</sup>を利用して数値シミュレーションを行った結果、実測値との良好な一致が見られたので、ここに報告する。

2 沈埋トンネルの地震応答解析法 前述したバネ・質点モデルによる方法は、沈埋トンネルおよびその周辺地盤の振動性に関する以下の仮定に基づいて構成されている<sup>1)</sup>。

- ①トンネル周辺地盤の振動は、トンネルの存在による影響を受けないものとする。
- ②トンネル自体の固有振動は生じないものとし、トンネルは質量を無視して剛性のみを考え、弾性支承上のはりに置換する。
- ③トンネルの変形は、トンネル軸に沿った地盤の振動特性の差から生ずる相対変位によって発生し、その大きさは、トンネルの剛性と周辺地盤の剛性(弾性支承のバネ剛性)とで決定される。
- ④トンネル周辺地盤の振動については、剛基盤上の軟質層のせん断一次振動のみを考え、トンネル軸に沿った地盤を複数個のセグメントに分割し、各々のセグメントを一質点振動系で置換して地盤振動を表現する。

これらの仮定の中で、①、②および③については、沈埋トンネルを含めた各種地中構造物の模型振動実験や実際の構造物における地震観測の成果により、既に検証されたと考えられるが、④については、基盤設定深度が深い場合には地盤の高次振動の影響が無視できないこと、剛基盤を設定するために地震動の下方逸散による減衰効果を表現できないことなどにより、トンネルの挙動に支配的な地盤の振動を正しく表現できない場合もあり得る。

著者らは、バネ・質点モデルによる方法における上記の問題点につき、トンネル周辺地盤の地震応答をより現実に近づけるように改善した以下の解析方法を提案する。解析フローの概要を図-1に示す。

- ①トンネル軸に沿った地盤のボーリング調査、PS検層、標準貫入試験等の資料により、トンネル周辺地盤の物性値を把握する。
- ②同時に、地震動の入力基盤面を設定する。入力基盤面は、トンネル延長にわたって広く分布し、不陸の小さい層の上面に設定する。なお、この面以深では入力地震動の上昇波が平面波となっていることが必要条件である。
- ③入力地震動を設定する。入力地震動は、通常解析で行われているような剛基盤での震動加速度を規定するのではなく、地盤振動の解析領域内へ入射する上昇波として扱うことに注意を要する。
- ④F.E.M.により地盤の入力地震動に対する応答を計算し、トンネル各位置における応答変位の時刻歴を求める。この地盤応答解析においては、地震動の下方逸

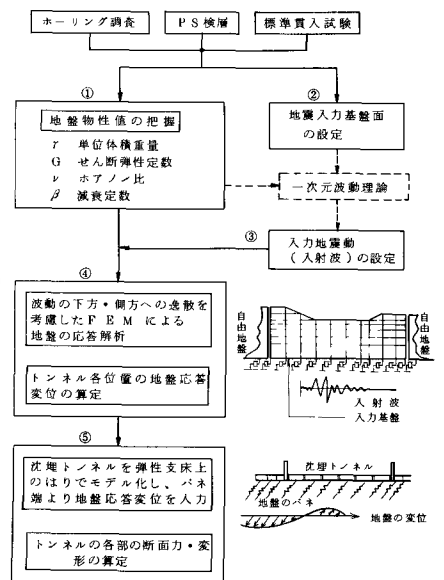


図-1 解析フロー

散を基盤層の波動インピーダンスを用いて評価し、側方に対しても伝達境界を設けることにより、地盤振動の側方への伝達を考慮する。⑤沈埋トンネルを弾性支承上のはりでモデル化し、④で得られた地盤の応答変位を弾性支承のパネ端より強制変位として入力し、トンネル各部の断面力・変形を求める。

### 3 実際の沈埋トンネルへの適用例

本解析法の妥当性を検討するため、東京港第二航路海底トンネルにおける地震観測記録を用い、このトンネルの軸方向振動の数値シミュレーションを行った。本トンネルは、図-2に示す13号その2埋立地と中央防波堤内側埋立地とを結ぶ4車線の道路トンネルで、総延長は1084.8mである。このうち沈埋トンネル部は744mで、幅28.4m、高さ8.8m、長さ124mのRC沈埋函6函より成り、沈埋函相互および立坑は、PCケーブルおよびゴムガセットで構成される可撓性継手により連結されている。図-3に当トンネルにおける地震観測計器の配置を示す。

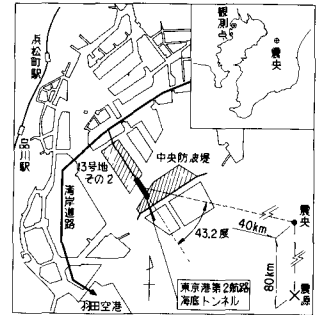
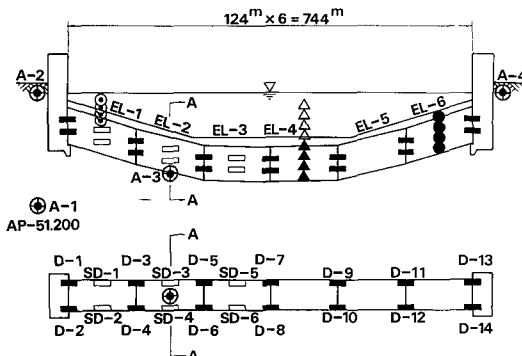


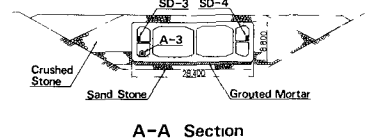
図-2 沈埋トンネルおよび震央の位置

シミュレーションの対象とした地震記録は、昭和55年9月25日に千葉県中部を震央として発生した地震によるものである。

この地震はマグニチュード6.1、震央距離40km、震源深さ80kmであり、トンネルに対して直下型と考えられる。地盤加速度の最大値は、13



Symbol	Instrument	Number	Remarks
⊕	Accelerometer	4	Dynamic
□	Strain-gauge	6	Dynamic
▨	Strain-gauge (Concrete)	14	Dynamic
⊙	Strain-gauge (Steel Bar)	4	Dynamic
●	Strain-gauge (Concrete)	4	Dynamic
△	Strain-gauge (Steel Bar)	4	Dynamic
▲	Strain-gauge (Lateral Steel Bar)	4	Dynamic



A-A Section

図-3 地震観測計器配置図

号地側AP-5 1.2m (A-1)で約2.1gal、地表(A-2)で約5.3gal、卓越周期は0.40秒および1.24秒である。函体のひずみは曲げひずみに比較して軸ひずみが卓越した。シミュレーションの概要を、解析フローに従って以下に記す。

### 3.1 地盤の物性

図-4にトンネル周辺地盤の地質縦断図を示す。13号地側および中央防波堤側の両埋立地においてPS検層が行われており、AP-9 3.5m以深にせん断波速度700m/s前後の第3紀固結シルト層が広く分布することが確認されている。地盤物性は図-5に示すように、トンネル軸に沿ってA~Eの5つのゾーンに分けて設定した。AおよびEゾーンについてはPS検層の資料を参照して、せん断弾性定数およびポアソン比を決定した。B、C、Dゾーンについては詳細な土質資料が不足しているため、

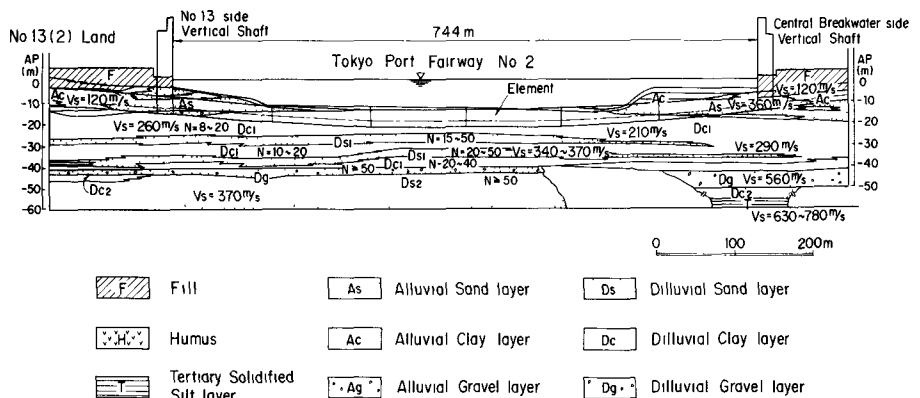


図-4 地質縦断図

AおよびEゾーンの物性を参照し、せん断弾性定数に対して有効上載圧による補正を行い決定した。

A					B					C					D					E									
$\rho$	$G$	$\nu$	$\beta$		$\rho$	$G$	$\nu$	$\beta$		$\rho$	$G$	$\nu$	$\beta$		$\rho$	$G$	$\nu$	$\beta$		$\rho$	$G$	$\nu$	$\beta$						
1	1.70	6940	0.49	5	6	1.70	5270	0.49	5	10	1.70	3600	0.49	10	14	1.75	23000	0.47	5	20	1.70	4000	0.49	5					
2	1.82	12300	0.48	5	7	1.82	9900	0.48	5	11	1.82	7500	0.48	5	15	1.65	5500	0.49	5	21	1.65	7400	0.49	5					
3	1.96	26800	0.48	5	8	1.96	23400	0.48	5	12	1.96	20000	0.48	5	16	1.95	12750	0.48	5	22	2.10	18000	0.48	5					
4	2.05	41500	0.46	5	9	2.05	39780	0.46	5	13	2.05	38050	0.46	5	17	2.13	30000	0.48	5	23	2.30	39000	0.48	5					
5	2.10	105000	0.41	5	10	2.05	39780	0.46	5	14	2.05	38050	0.46	5	18	2.06	22500	0.47	5	24	2.15	25000	0.47	5					

$\rho$  単位重量  
 $G$  せん断弾性係数  
 $\nu$  ポアソン比  
 $\beta$  減衰定数

減衰定数は、加速度記録 A-1 と A-2 との間のスペクトル比を参照

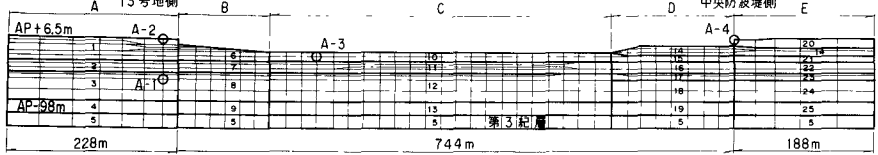


図-5 地盤応答解析モデルおよび物性値

して決定し、Cゾーンの最上層を10%とした他は、一律に5%とした。

### 3.2 地震入力基盤面

通常、地震入力基盤面はN値5.0以上、せん断波速度300m/s程度以上の層の上面を目安として設定されており、当地盤についてはAP-40m付近の洪積砂レキ層がこれに該当するが、この層以深の地盤物性に不均質な部分が存在することから、トンネル延長にわたって広く分布する第3紀固結シルト層を基盤層とし、この層の上面の平均的な深度AP-98mを地震入力基盤面とした。

### 3.3 入力地震動

図-5のAゾーン地層について一次元波動理論を適用し、トンネル軸方向の加速度記録A-2を地震入力基盤面まで引き戻し、ここでの入射波(上昇波)を求めて入力地震動とした。図-6にA-2, A-1および入力地震動を比較して示す。

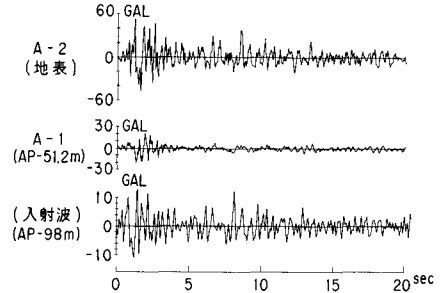


図-6 観測加速度と入力地震動

### 3.4 トンネル周辺地盤の応答解析

図-5に示した地盤の有限要素モデルの下方および側方に粘性境界および伝達境界を設け、上記の入力地震動に対する応答を求めた。

A-1, 2, 4の位置における応答加速度と実測値との比較を図-7に、A-2, 3, 4の位置における応答変位と実測値との比較を図-8に示す。加速度A-4については実測値との相異がやや見られるが、概ね、地盤の振動が良好に表現された。

### 3.5 沈埋トンネル部の応答解析

図-9にトンネルの弾性支承上のはりモデルを、表-1にトンネル各部の諸元ならびに可携性継手および地盤のパネ定数を示す。地盤のパネ定数はトンネル延長にわたって一定値とし、応答解析による函体のひずみ振幅が実測値と良好な一致を示すよう数回の試算を行い、結果として軸方向単位長さ当たり10000 t/m<sup>2</sup>の値を得た。

前節で得られた地盤の応答変位を、図-9に示すように20~30m間隔で地盤のパネ端から入力し、沈埋トンネル各部の応答を求めた結果を、図-10, 11, 12に示す。図-10は1号函および3号函中央の軸方向ひずみの時刻歴を、図-11

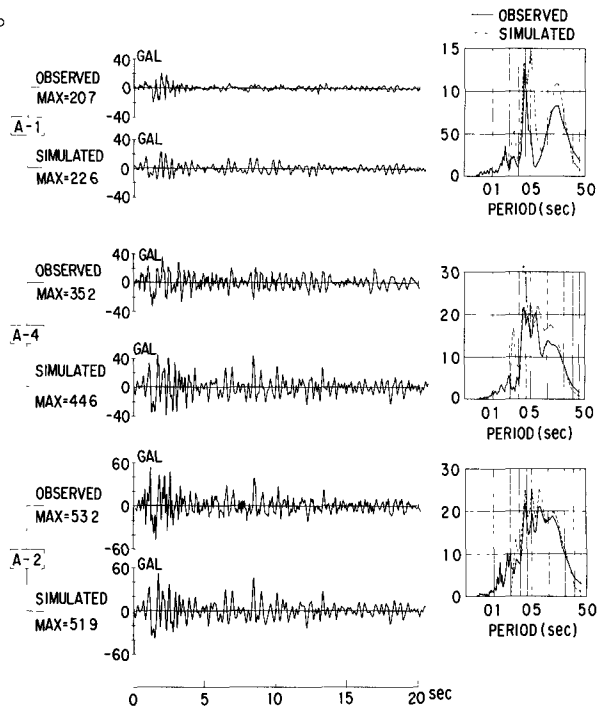


図-7 地盤応答加速度と実測値との比較

は可撓性継手の軸方向相対変位の時刻歴を、図-12はこれらの最大値の分布を、それぞれ実測値と比較して示したものである。これらの図より、航路中央部分でのトンネルの挙動については実測値との一致性が悪いが、変形の大きい両埋立地付近での挙動については、良好な精度で挙動を再現できたと見ることが出来る。航路部分での解析精度の低さは、この部分の地盤物性の把握が十分でないことが一因と考えられる。

4. まとめ 数値解析結果と実測値との比較から、以下の結論を得た。①地震動の下方および側方への逸散を考慮した有限要素解析法により、地盤の振動を精度良く再現することができた。②地盤の振動が精度良く表現されれば、弾性支承上のはりモデルにより、沈埋トンネルの地震時挙動を実用上十分な精度で求められることが確認された。③地盤物性の把握が十分でない部分での解析精度が低かったことを除けば、本解析法は実用上有効と考える。

表-1 モデルの物性値

	断面積 A	弾性係数 E
13号地側陸上トンネル	①	86 88 m <sup>2</sup>
	②	104 59
	③	114 14
沈埋トンネル	94 92	"
中央防波堤陸上トンネル	④	104 89
⑤	100 47	"
継手のバネ定数 K <sub>x</sub>	17 × 10 <sup>6</sup> t/m	
地盤のバネ定数 K	10 000 t/m <sup>2</sup>	

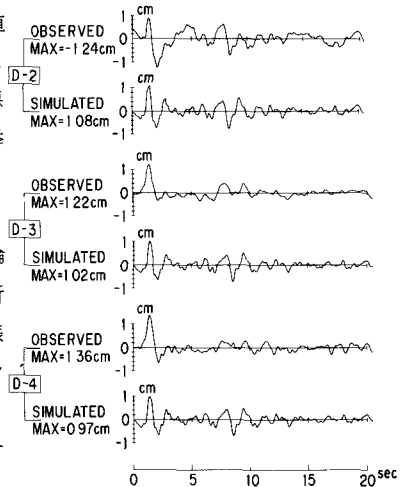


図-8 地盤応答変位と実測値との比較

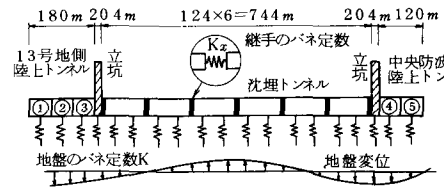


図-9 弾性支承上のはりモデル

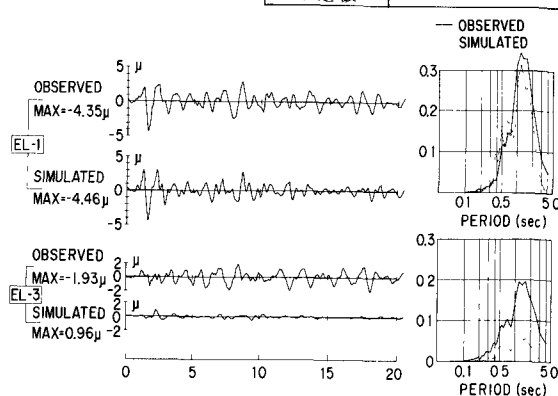


図-10 沈埋函の軸方向ひずみの比較

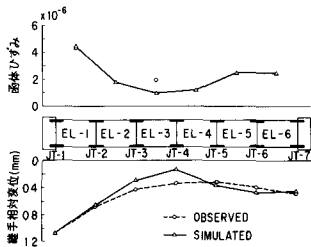


図-12 最大値分布の比較

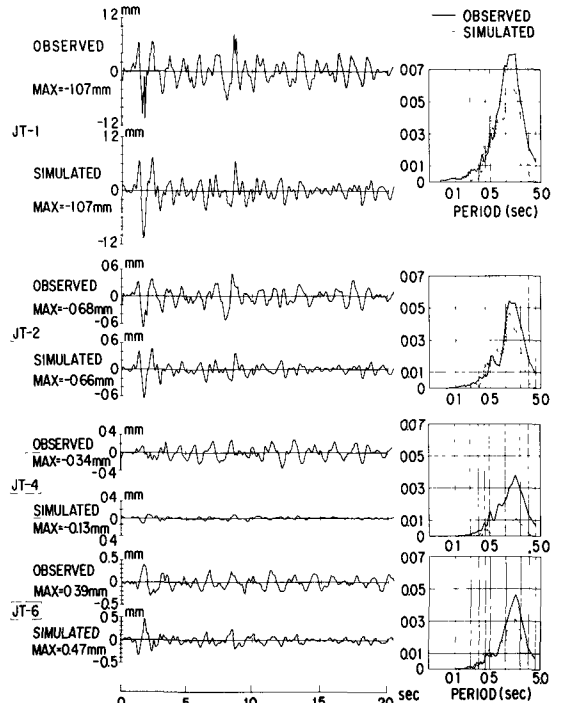


図-11 可撓性継手の軸方向相対変位の比較

参考文献 1) Tamura et al. : Dynamic Behavior of a Submerged Tunnel during Earthquakes, 生産技術研究所報告, 第24巻 第5号, 1975 2) 池田 他: 東京港第二航路海底トンネルの地震観測と応答解析, 第6回日本地震工学シンポジウム講演集, 1982