

# 沈埋トンネルの地震応答

建設省土木研究所 ○ 岩崎 敏男

若林 進

若月 高晴

建設省近畿地方建設局 辻 勝成

## 1. まえがき

近年、わが国における交通運輸施設の整備広充にはめざましいものがあり、大都市においては土地空間の合理的利用の面から、渡河渡海の手段として沈埋工法によるトンネルの建設が活発となってきた。沈埋トンネルは、19世紀末米国東海岸で始めて建設されているが、わが国では大阪安治川河底を横断する2車線道路トンネル(全長80.2mのうち、沈埋区間はエレメント1基で49.2m)が、昭和19年に竣功している。現在、世界における沈埋トンネルの数は、建設中を含めて51箇所(このうちわが国のもの10箇所)と計上されている。これらのうち、強震地域に位しているものとしては、わが国の例を除くと米国およびカナダの西海岸のものがあげられよう。しかしながら、沈埋トンネルに関しては、確固たる耐震設計法が確立されてはいず、地震多発地域であるわが国における沈埋工法によるトンネル建設技術のなかには、耐震性を確保するための耐震設計および耐震工法が含まれていなければならない。

土木研究所では、昭和43年以来沈埋トンネルの耐震性に関連して、(1)地震活動度、(2)地中地震動の実測、(3)地盤震動の解析、(4)流動化発生の判定方法、(5)地震応答解析、(6)模型振動実験、(7)耐震設計法等の調査研究を進めてきているが、ここでは、これらのうち、沈埋トンネルの地震応答に関連して実施した、模型振動実験ならびに有限要素法による解析について報告する。

## 2. 沈埋トンネルの模型振動実験と地震応答解析

### (1) 模型ならびに実験の概要

沈埋トンネルは一般に軟弱な地盤に敷設されることが多く、従ってその地震時の挙動は、周辺地盤の挙動に大きく左右されることが予想される。実施した実験では、図1に示す例を対象とし、地盤をゼラチンで模型化して、振動台による実験を行った。現地における土質試験の結果を参照して、地盤を二層構造とし、上層の軟弱層はS波100m/s、下層の土丹層はS波300m/sと仮定した。模型の諸元は、長さの縮尺比=1/500、時間の縮尺比=1/5、密度の縮尺比=1/1.5~1/2を基本とし、バッキンガムの $\pi$ 定理に従って、定めることにした。

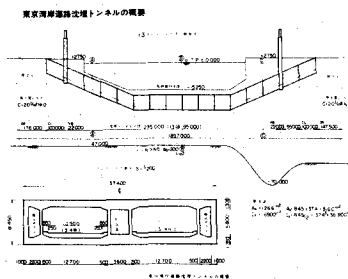


図1 対象とした沈埋トンネル案

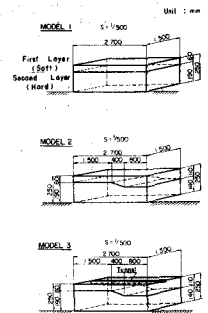


図2 実験モデル

模型振動実験は、科学技術庁防災科学技術センターが茨城県筑波学園都市に保有する大型耐震実験装置を用いて行われたが、入力的方式により、各モデルに対して水平2向につき、次の3種類の実験が行われた。

- 正弦波振動実験
- 自由減衰振動実験
- 地震波および不規則波による応答実験

振動振幅の計測は変位を中心に行い、光学式変位計ならび16mm撮影機を用いた。振動台自体の振動については、加速度計と変位計を用いた。

実験結果の一部として、図3に共振曲線を、図4～7に共振時におけるモード図を、また図8に地震波形および不規則波による応答変位波形を示した。これらより、モデルの減衰定数は非常に小さい(約1%)こと、一次のモードはせん断振動型であること、モデル2,3では地層の厚さの異なる部分がそれぞれ、別々の周期で共振すること等がうかがわれる。またモデルの隅角部は、他の部分と異なった挙動を示しており、これはモデルの境界を自由端とした影響と考えられる。

地震波形としてはE1 Centro記録(1940)のN-S成分ならびに十勝沖地震の八戸

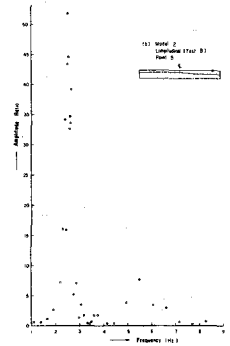


図3 共振曲線の例

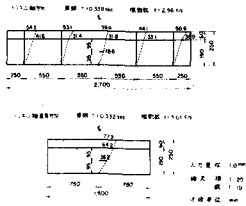


図4 モード図(モデル1)

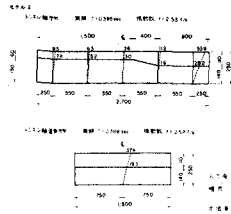


図5 モード図(モデル2)

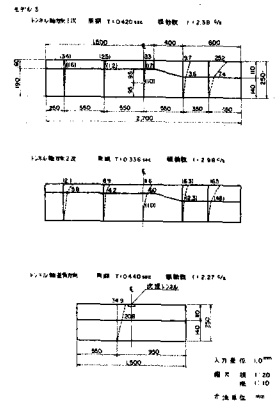


図6 モード図(モデル3)

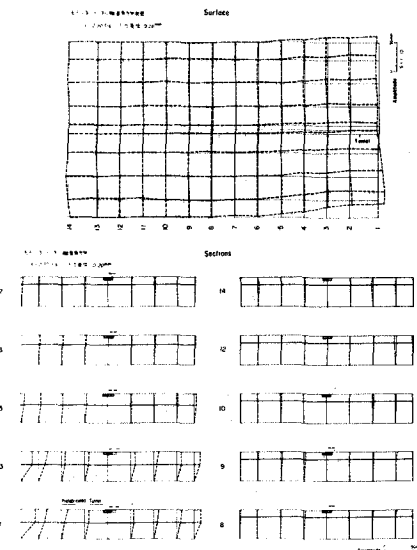


図7 モード図(モデル3,軸直角方向)

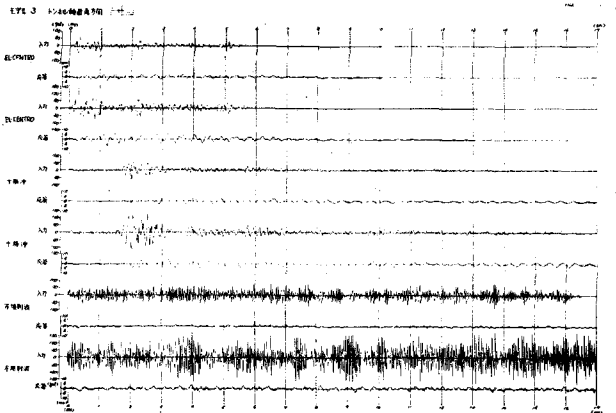


図8 地震波形等による応答変位(モデル3,軸直角方向)

記録(1968)のE-W成分を採用した。また不規則波形は、ある周波数帯域(模型に対して1~25 Hz)で加速度振幅一定のピンクノイズを目標にした。応答実験の結果は(3)に概述する。

(2) 地震応答解析の概要

図2に示した3種の実験モデルを対象として、表1の○印のケースについて、有限要素法による地震応答解析を行った。計算は、各モデルの代表的断面(図2参照)につき、平面歪状態を仮定した上で、2次元弾性体として実施した。解析モデルの諸定数と形状を表2および図9に示す。表1で固有振動解析は固有周期と振動モードを求めるもので全次数につき行った。平均スペクトル応答解析は土木研究所平均応答スペクトルを入力としたときの最大応答値の解析であり、地震波形応答解析はEl Centro N-S成分を入力としたときの各時刻の応答を計算するもので、最大加速度は共に120galとした。解析は全て実験モデルに対するものであるため、時間軸は全て実物の1/5になっている。解析における減衰定数は1~2%とした。

各モデルに対する固有周期と振動モードの結果から下記のことが判明した。モデル3 Tは、モデル1 Tにトンネルを敷設したものであるが、トンネルの有無にかかわらず1~10次まで両者の固有周期と振動モードがほぼ一致している。このことから、トンネルは地盤の固有振動で振動しており、地盤の変形に応じて変形しているといえよう。軟弱層の厚さが変化するモデル2 Lでは、1次振動のとき表層の厚い部分がよく振動し、表層の薄い部分はほとんど振動しない。一方、表層の薄い部分がよく振動するのは2次振動のときで、このときは逆に厚い層の動きは小さい。このように層厚に変化のある場合は、各部の挙動は一様でないので、トンネルは複雑な振動をすることになる。図10はモデル3 Tの場合のEl Centro 波形に対する、中央断面3点の応答変位波形を示したものである。

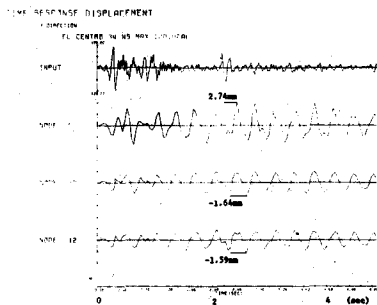


図10 解析による応答変位波形(モデル3 T)

表1 実施した解析の種類(○印)

モデル	断面	節点数	固有振動解析	平均スペクトル応答解析	地震波形応答解析
1T	T-T	72	○	○	○
2T	T <sub>1</sub> -T <sub>1</sub>	72	○	×	×
3T	T <sub>2</sub> -T <sub>2</sub>	72	○	○	○
1L	L-L	90	○	○	○
2L	L-L	91	○	○	○

表2 解析モデルの諸定数

モデル 定数	地盤		トンネル
	上層	下層	
ヤング係数E (gr/cm <sup>2</sup> )	70	280	12000
ポアソン比ν	0.495	0.495	0.495
単位重量γ (gr/cm <sup>3</sup> )	1.0	1.0	1.0



図9 解析モデル

### (3) 実験と解析の比較

次に振動実験の結果と地震応答解析の結果を比較してみよう。表3は1次固有周期について対比したものである。これから両者は、よく合致していることが判る。次に振動モードについて比較したところ、1次(モデル3に関しては1~2次)の振動モードはよく合致していることが判った。次に応答変位を比較したのが、図11である。実験と解析とを直接比較

表3 1次固有周期の比較

単位: sec

モデル 方向	1		2		3	
	L	T	L	T	L	T
実験値	0.338	0.332	0.395	0.388	0.420 (2次)0.336	0.440 (2次)0.336
計算値	0.346	0.346	0.388	0.402	—	0.346
計算値 実験値	1.02	1.04	0.98	1.04	—	1.03

注) L:トンネル軸方向, T:トンネル軸直角方向  
モデル3 Tについては, 実験値の2次と対応している。

較しうる資料は2例(EI Centro波形に対するモデル1 Tと2 Lの応答)しかないが、いずれも実験値が解析値を上まわっている。図11の右側の縦軸は、相似律に従って換算した、原型の地表面変位の推定値である。ただしここでの値は、原型の減衰定数が模型のそれと等しいと仮定した場合のものである。原型の減衰は実際には、かなり大きいことが予想されるので、実際の応答値は、図11の値より、かなり低下する(実物の減衰定数を10%と考えると5割程度、20%と考えると4割程度の応答値となる)ものと判断される。

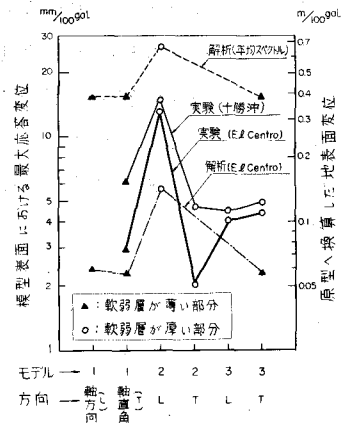


図11 実験と解析における応答変位の比較

### 3. 結語

- (1) 沈埋トンネルの地震時の挙動を把握する方法として、振動台による模型振動実験は、構造物と地盤の3次元的な挙動を大極的に観察できるため、有効な方法と言えよう。また実験と並行して、有限要素法による地震応答解析も、各部の詳細な挙動を知る上に強力な武器となろう。しかし現在までのところ、これらの実験ないしは解析から構造物や地盤の終局強度の判定を行える段階には、まだ達していない。
- (2) 軟弱地盤の変形が、沈埋トンネルの変形を誘起する主要な要素となる。地震時に、ある部分の地盤が共振現象を起こし、トンネルに大きな変形を起こす可能性がある。トンネルの長さ方向にみて、地層構成(表層の軟弱層の厚さ)が急変する地点付近では特にこの影響が大きい。これは、一方の地盤が、他方の地盤に比べて、より大きな振幅で振動することに起因する。
- (3) 今回記述しなかったが、沈埋トンネルの耐震性に関連する重要検討事項として、地中における地震動の特性、地震動の横方向の波動伝播を考慮したトンネルの挙動、地盤の流動化現象などの問題が指摘される。

(参考文献) 1) 栗林・木本・辻・佐藤・石沢: セラチン等地盤模型振動実験材料の弾性特性, 第12回地震工学研究発表会

- 2) 栗林・岩崎・辻: 沈埋トンネルの模型振動実験, 第7回土質工学研究発表会, 土研資料747号
- 3) 土木研究所・福山コンサルタント: 沈埋トンネルの地震応答解析報告書, 47年3月
- 4) 土木学会: 沈埋トンネルの耐震性に関する研究報告書, 47年3月
- 5) 伊吹山・栗林・岩崎: 沈埋トンネルの耐震性について, 日米天然会議, 耐風耐震第4回合同部会, 47年5月
- 6) 岩崎: 沈埋トンネルなど地中構造物の耐震に関する研究, 土研資料660号, 45年10月