

## (24) 換気塔に注目した沈埋トンネルの地震応答解析

建設省土木研究所耐震研究室 上田 治  
同 羽立 隆幸  
○ オリエンタルコンサルタンツ 田中 努

### 1. はじめに

東京湾や大阪湾などの大規模沿岸地域における道路網上にいくつかの沈埋トンネルが計画されており、既に建設され供用されているものもある。沈埋トンネルの地震時挙動については、これまでに多くの研究者によって実験や解析が行われ基本的な性質が明らかにされているが、土木研究所ではさらに耐震上の技術的な問題の解明と合理的な耐震設計法を確立するために研究を進め、その過程で沈埋トンネルだけでなく換気塔の振動性状をもとり入れて解析できるプログラムを開発した。換気塔自体の構造は必ずしもこのような振動解析から断面が決まるものではないが、特に換気塔と沈埋トンネル間の可換性継手やとり合い部の構造検討には重要な解析手法となる。たとえば、可換性継手の設計においては、地震による相対変位が5cmなのか10cmなのかで全く別の構造形式を考えなくてはならないこともある。本研究では、東京湾岸道路に計画されたある延長2kmの沈埋トンネルをモデルとして換気塔の地震時挙動に注目した地震応答解析を行った。トンネルの延長が長いので地震動の多寡入力を行い、せん断波の伝播速度によって決まる位相差を考慮した。沈埋トンネルの解析では、入力の位相差を考慮した場合の応答は考慮しない場合に比べて、加速度や変位が同程度であっても断面力は2~3倍になることが多いので、設計レベルでどう対処すべきが問題になっている。

### 2. モデルの諸元と解析条件

#### (1) トンネル・地盤連成モデル

トンネルと地盤の連成モデルは図-1に示すような、トンネルに沿った表層地盤モデルと負載を有する梁で表わされるトンネル・換気塔モデルからなり、Penzienモデルと同様な考え方で組立てられている。表層地盤は洪積下部礫層上面を耐震計算上の基盤面としており、約40mの沖積層と約30mの洪積層とからなっている。構造物は、中央部約2kmの沈埋トンネルの断面が幅40m×高さ9m、両側の換気塔が底面60m×46m×高さ55mで杭基礎により支持されており、その外側の陸上トンネル断面は幅34m×高さ11mである。

#### (2) 入力地震動

入力地震動に用いた記録波形は静内橋(1973年根室半島沖地震)と板島橋(1968年日向灘沖地震)であり、共に基盤面で最大加速度を150galとした。両地震波の加速度応答倍率曲線を図-2に示す。また、せん断波が基盤を伝播することにより入力に位相差が生ずるものとして、伝播速度が $V_{sb} = 300, 1000, 3000$  m/secの3ケースを検討した。

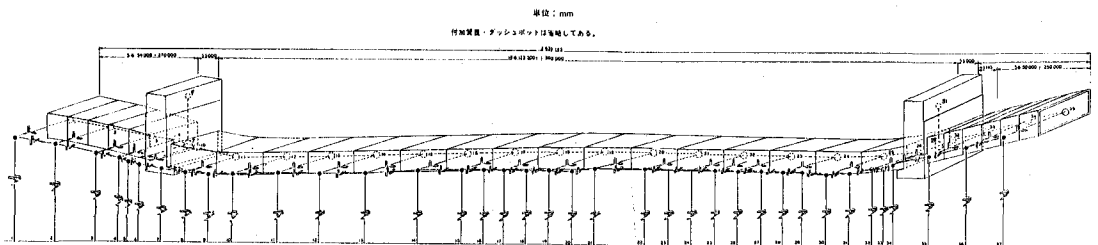


図-1 トンネル・地盤モデル

### (3) 可換性継手のバネ定数

換気塔とトンネルエレメント間の可換性継手の構造を2種類考えた。一つはゴムガスケットにより止水を行いPシケーブルを引張りに抵抗するバネとする構造で、既に実績があるものである。もう一つは、大きな許容相対変位量をとれるようなものを想定して前者のバネの $1/300$ 程度の軟かい継手構造とした。ただし、バネ定数の違いは軸方向バネと回転バネに現われ、軸直角方向のせん断バネはこれらとは独立であるので同一の値を用いている。

### 3. 換気塔モデルの改良

本研究では、換気塔の地震時挙動に注目するために、換気塔モデルに次のような改良を加えた。

#### (1) 表層地盤の変形モード

沈埋トンネルの地震応答計算をする場合、通常、表層地盤は均質な一層地盤のせん断1次モードで振動するものとしてモデル化される。しかし表層地盤が沖積層と洪積層とからなる場合、両者の剛性が大きく違うために多層地盤として求めたモードと異なり、特に洪積層での変形に大きな差がある(図-3参照)。したがって換気塔の底面や杭のように深い位置では考慮すべき地盤の振動にかつりの差が生ずることになるので、本解析では換気塔の位置だけ多層地盤のモードを用いることにした。

#### (2) 杭基礎を表わすバネ

一般に杭基礎のモデルは、図-4のようにせん断バネと回転バネとで表わされることが多い。しかしせん断バネは杭頭に水平力が作用したときの反力から求めるので、杭が地盤の変形に追従しきれない場合にはバネの評価が異なることになる。また回転バネは杭基礎全体の抵抗を表わすが、固定された各杭頭に水平変位によって生ずるモーメントを表現できない。したがって図-3の多層地盤のような変形モードを考慮する場合には、図-5のように杭部材を設けた方が良くと思われる。

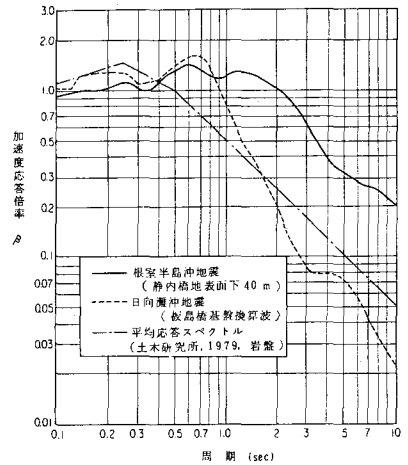


図-2 加速度応答倍率( $r_s=20\%$ )

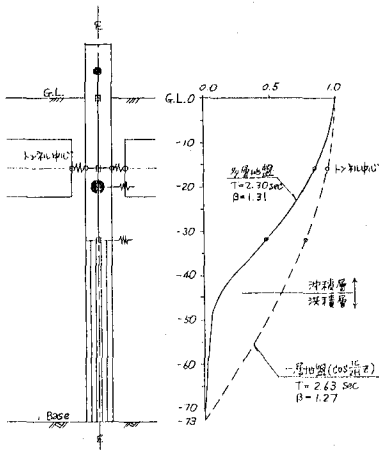


図-3 地盤の変形モード

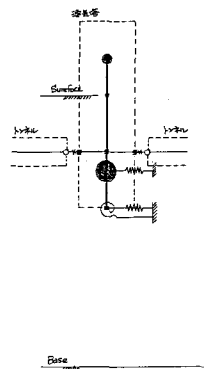


図-4 換気塔モデル(A)

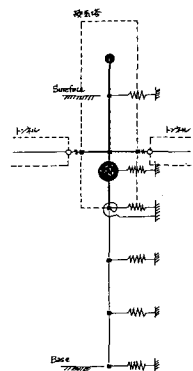


図-5 換気塔モデル(B)

#### 4. 解析結果

##### (1) 固有値

固有値解析の結果、トンネルに沿う地盤モデルの1次の固有周期は軸方向・軸直角方向共 2.7 sec であり、最も卓越すると思われるモードの周期は共に 2.1 sec (ただし軸方向では3次, 直角方向では5次) である。これらのモードを図-6に示す。また両方向とも 2.0 sec のモードまでで有効質量比の累積が 80% を越えており、この範囲の応答倍率(図-2)を見ると、静内橋の地震波の倍率は板島板の地震波の約5倍と大きく、そのためトンネルの応答もそのような大小関係になっている。

##### (2) 入力の位相差の影響

入力の位相差を3種類設定して解析した結果、最大応答値は図-8~12のようになった。換気塔位置の地表面の応答加速度波形は図-7のようになっており、振幅は  $V_{SB} = 300 \text{ m/sec}$  の時に小さく、 $V_{SB} = 1000, 3000 \text{ m/sec}$  の時は共に大きくなっている。同図は静内橋の地震波に対する応答であるが、この傾向は地震動の違いや振動方向の違いに関係ないようである。波形の周期成分はどの場合も約2秒の周期の波が基本になっているが、 $V_{SB} = 300 \text{ m/sec}$  の時は短周期の波が重なり、 $V_{SB} = 3000 \text{ m/sec}$  の時には中程度の周期の波が重なっている。

図-8~12より換気塔の最大応答値と位相差との間に簡単な関係は見い出せないが、概ね、 $V_{SB} = 300 \text{ m/sec}$  の時に小さく、 $V_{SB} = 1000 \text{ m/sec}$  の時に大きく、 $V_{SB} = 3000 \text{ m/sec}$  の時は  $1000 \text{ m/sec}$  の時と同程度かやや小さくなると思われる。その傾向は図-7の地盤の応答値からも推測されるものである。

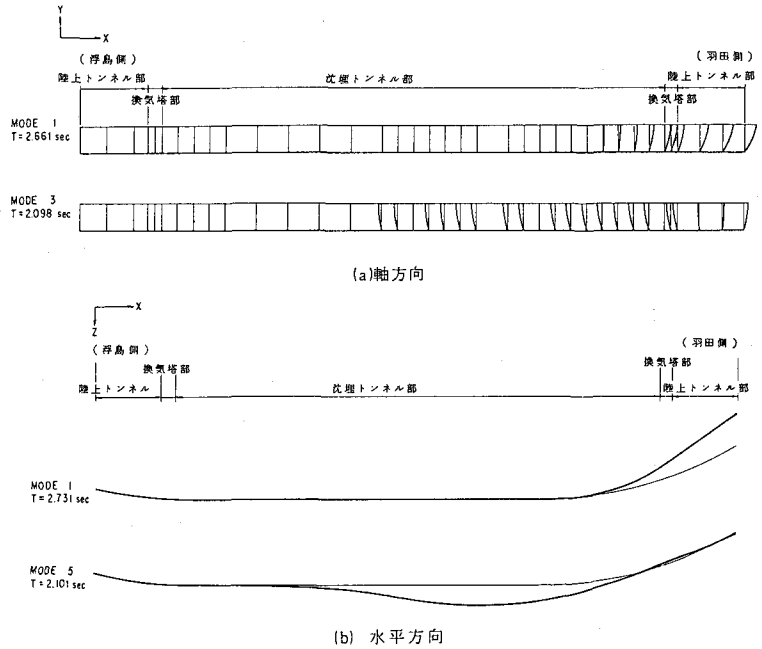


図-6 地盤の卓越モード

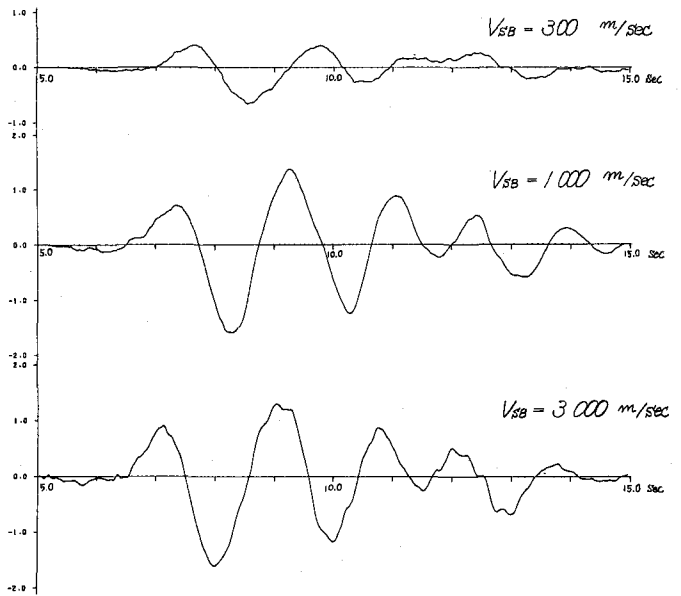


図-7 換気塔位置の地盤の加速度波形(軸方向・静内橋)

### (3) 可撓性継手の剛さの影響

換気塔と沈埋トンネル間の可撓性継手として、2種類の継手構造を考慮して検討したが、軸直角方向の場合応答値がほとんど等しく、継手の回転パネの違いが応答にあまり影響しないことがわかる。軸方向の場合には応答の違いが見られる。図-11に示した継手の相対変位には、軟らかい継手パネの方が大きな相対変位を生ずる傾向が入力地震毎に顕著に現れている。一方、図-9の換気塔の傾斜角を見るとパネの違いによって大きな差が生じており、硬い継手パネの場合、軟らかいパネの10倍近い応答になっている。前後のトンネルと軟らかい継手パネで結ばれて free に近い状態で応答が小さく、硬い継手パネで結ばれた場合に応答が大きくなるのは、換気塔自体の振動は本来小さいが、接続するトンネルの振動によって押し引きされているものと考えられる。

### 5. 結び

本解析では3つの条件の違いが換気塔の応答に与える影響を調べたが、この内、地震入力の位相差と応答値との関係はあまり明らかにできなかった。今後、地盤内の地震波の伝播や位相差という点から、既に蓄積された記録を見直すとともに、これを目的とする沈埋トンネルや埋設管のアレーによる地震観測が設計サイドからも強く望まれる。

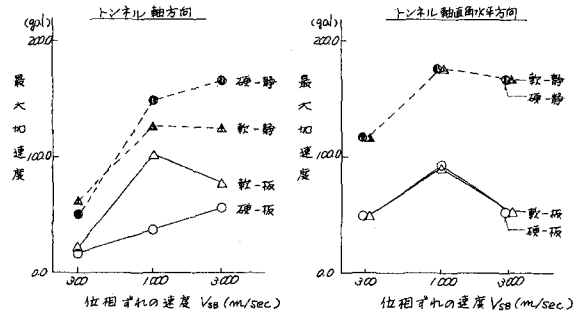


図-8 換気塔地上部の最大加速度

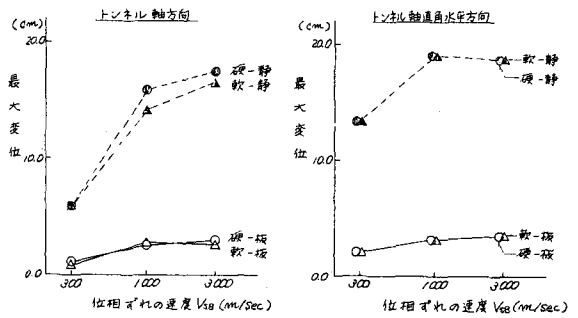


図-9 換気塔地上部の最大変位

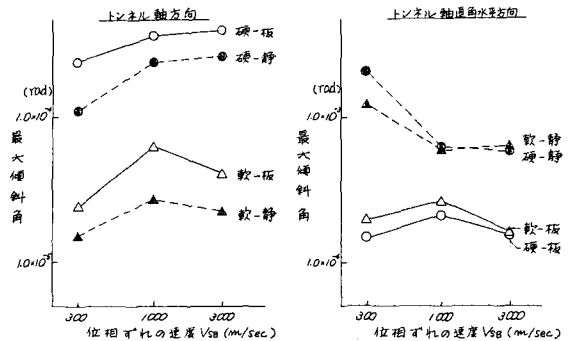


図-10 換気塔の最大傾斜角

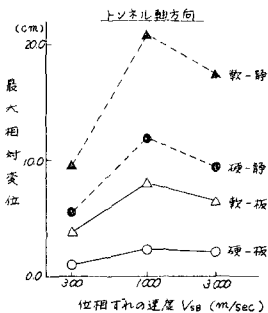


図-11 継手の最大相対変位

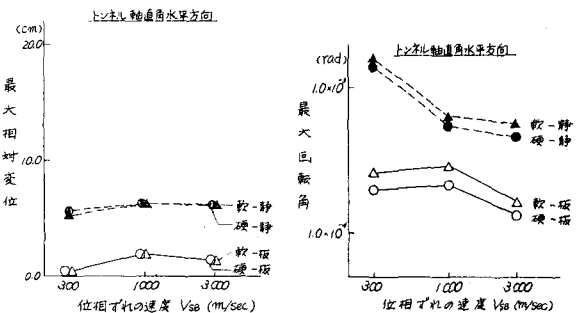


図-12 継手の最大回転角