

# (124) シールドトンネルの実地震時挙動のシミュレーション

東京大学 生産技術研究所 正員 田村重四郎  
東京電力輸送変電建設本部 正員 日向 泰山  
(株)熊谷組 技術研究所 正員○鈴木 猛康

## 1. まえがき

筆者等は昭和58年より横浜市の送電用シールドトンネル(φ5100mm)で地震観測を実施しており、これまでに約20の地震による観測データから、中小規模の地震時におけるトンネルの挙動をかなり詳細に解析してきた(1,2,3)。さらに地盤およびトンネルのモデル化に関して、観測や模型振動実験によって検証しながら、研究を進めてきた。ここでは、その過程で開発した擬似3次元地盤モデル(4,5)と、観測から得た等価剛性を導入した柱、梁要素からなるトンネルモデルを用いて、シールドトンネルの実地震時挙動のシミュレーションを実施し、実挙動と比較した結果について報告する。

## 2. 地震観測の概要

図1は横浜市南部で実施している地震観測地点の平面図である。沖積シルト質粘性土が両側の洪積泥岩(土丹)の丘の間に堆積し、溺れ谷地形が形成されている。シールドトンネルは、谷軸と約30度の交角で建設されており、図中の点線は、トンネル下端レベルの土丹層コンターを表している。

図2は地震観測地点の縦断面図である。地盤の挙動は、沖積地盤中に3点、土丹層中に1点埋設した加速度計により把握している。またトンネル中には、トンネル軸方向、及びトンネルの円周に沿ってひずみ計を設置し、トンネルの軸、曲げひずみと円周方向ひずみを観測している。沖積粘性土地盤のせん断弾性波速度は40~260m/secであり、土丹層では約750m/secである。従って地震応答解析を行う際は、この土丹層を基盤として扱う。

## 3. 擬似3次元地盤モデルによるモデル化

地震観測地点の地盤を、地質調査による沖積層の深度分布およびボーリング地質柱状図に基いて地盤性状を想定し、擬似3次元地盤モデルによってモデル化する。図3は有限要素メッシュを示している。それぞれの節点に、土柱の1次振動を表すバネ・マスを設置し、マスを相互に連結するために、土柱のヤング率、ポアソン比と1次振動モードを考慮した物性を持つ平板要素を導入している(4)。総節点数は451,要素数は414である。また図3の左右の境界は固定とし、谷の上面と下面で自由境界とした。メッシュは谷軸に沿って、地盤中の加速度計埋設位置およびトンネル位置に、節点を配置するように分割を行った。

## 4. 数値解析

### (a) モード解析

地震応答解析に先立ち、モード解析を実施した。Subspace法によって

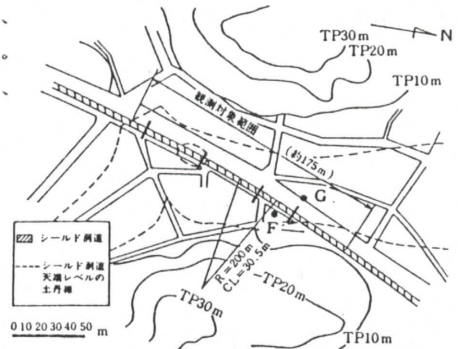


図1 地震観測地点の平面図

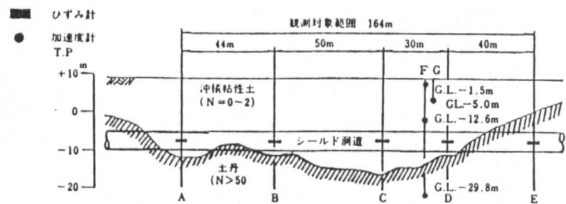


図2 地震観測地点の縦断面

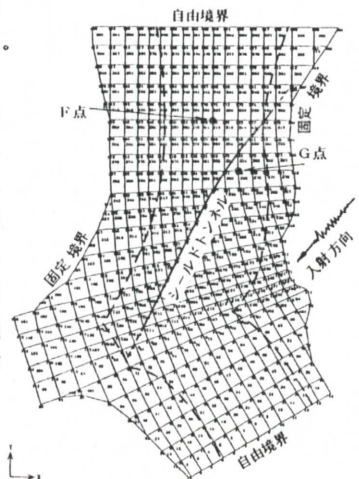


図3 有限要素メッシュ

低次の10モードまで求め、そのうち有効質量比の大きな順に4つの主要な振動モードを、それぞれ図4～7に示している。図中点線は変形後のメッシュを表しており、太線は節点の移動を表している。図4は2次モードであり、有効質量比が0.44でもっとも卓越する振動モードである。谷に沿った振動が明瞭に現れているが、予想したよりも解析領域の上部で振幅が小さい。もっとも振幅の大きな中央部の振動方向は、X軸と約60度の方向である。図5は5次モードで、解析領域上部は谷軸方向、中央から下部にかけては谷軸直交方向の振動が卓越している。有効質量比は0.16で、2次モードと合計すると約60%となる。図6、7はそれぞれ9次、1次の振動モードである。図6では、上部で谷軸方向の1次が、中央から下部にかけては谷軸方向の2次モードが現れ、全体として複雑な振動モードとなっている。図7では、下半部において谷軸直交方向の1次モードが卓越しているが、上半部はほとんど振動していない。1～10次の振動数は接近しており、これらが境界条件に微妙に影響されて現れるものと考えられる。

FREQUENCY = 1.34580 HZ PARTICIPATION FACTOR = 0.43561 FREQUENCY = 1.44420 HZ PARTICIPATION FACTOR = 0.15868

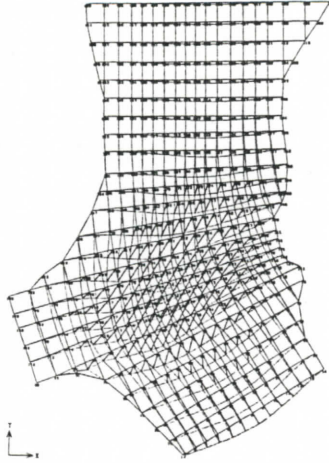


図4 振動モード(2次)

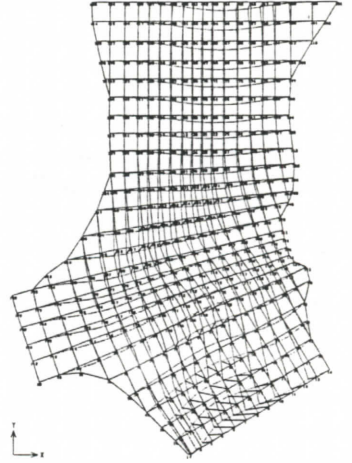


図5 振動モード(5次)

FREQUENCY = 1.49058 HZ PARTICIPATION FACTOR = 0.05508 FREQUENCY = 1.33440 HZ PARTICIPATION FACTOR = 0.02821

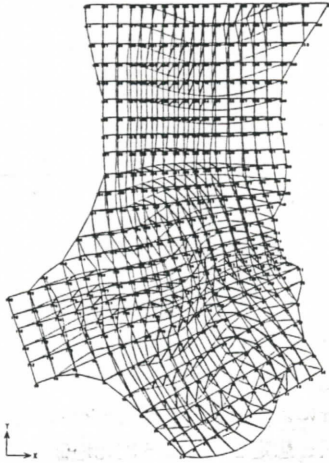


図6 振動モード(9次)

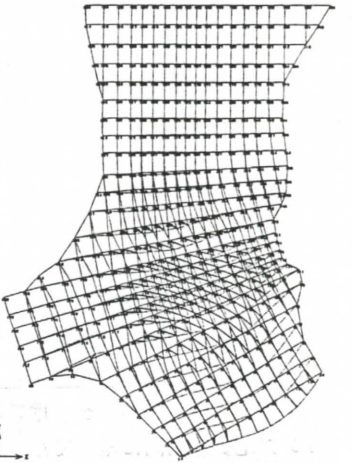


図7 振動モード(1次)

(b) 地震応答解析

擬似3次元地盤モデルを用いた地震応答解析例として、昭和60年10月4日千葉・茨城県境で発生した地震(M=6.2)における、当該観測地点の地盤およびシールドトンネルの実挙動のシミュレーションを実施した。基盤入力波形は、本地震の際、地盤F点の土丹層内(GL. -29.8m)で観測した加速度(X, Y方向成分)の10～30

秒の20秒間を用い、図3の震央方向から位相速度750m/secで入射させた。また減衰定数は、土質試験結果と地盤の実測せん断ひずみのレベルがら、2.5%とした。図8は、地盤F点のGL. -1.5mにおいて観測されたX、Y方向の加速度波形を示し、図9は応答解析結果を示している。F点の基盤波形を解析領域の端部より入力したため、その到達時間だけ解析結果に時間のズレが生じているが、両者の波形が良く一致していることがわかる。地盤G点についても同様に、観測結果と解析結果は良い対応を示した。入力位相差がない場合についても応答解析を実施したが、周波数特性はほぼ等しいものの、加速度の最大値の発生時間が異なり、観測結果と解析結果の対応は、図8、図9ほど良くなかった。F点、G点とも、X方向の最大加速度が、Y方向より大きく、モード解析の結果と矛盾しているようであるが、観測結果でもX方向の加速度の方が大きく現



れている。これは入力波の周波数特性によると考えられ、他の地震波を入力して際、Y方向の最大加速度がX方向の約1.5倍に達したケースも見られた。

次にトンネルひずみの応答解析について述べる。トンネルには柱・梁要素を用い、12のエレメントに分割した。図3のトンネル位置の節点の応答変位に変位関数を乗じて、トンネル埋設深度の地盤変位を求め、これを地盤～トンネル間のバネを通して伝達させている。なお、実測のセグメント部(50cm区間)とリングジョイント部(50cm区間)のひずみ比 $r$ から、以下の式を用いて等価剛性(EA)eq., (EI)eq.を決定し(6)、これらをトンネル剛性として与えている。なお本地震の際、実測から得られた $r$ は軸ひずみで約3倍、曲げひずみで約2倍であった。

$$(EA)eq. = (EA)seg \cdot \frac{9}{5r+4} \quad \text{---- (1)} \quad (EI)eq. = (EI)seg \cdot \frac{9}{5r+4} \quad \text{---- (2)}$$

ここで、(EA)eq.; トンネルの等価軸剛性、(EA)seg.; セグメントの軸剛性  
 (EI)eq.; トンネルの等価曲げ剛性、(EI)seg.; セグメントの曲げ剛性  
 $r$ ; ひずみ比(ジョイント部ひずみ/セグメント部ひずみ)

図10はトンネルのA～D断面で観測された軸ひずみ波形を示し、図11は応答解析結果を示している。観測結果はA断面を除きセグメント部のひずみで、解析結果は等価ひずみであるためスケールの相違があり、ま

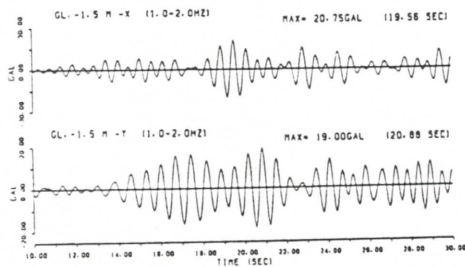


図8 地盤F点の加速度(観測)

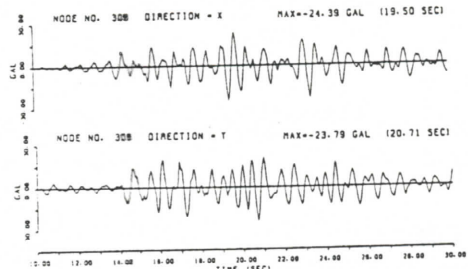


図9 地盤F点の加速度(解析)

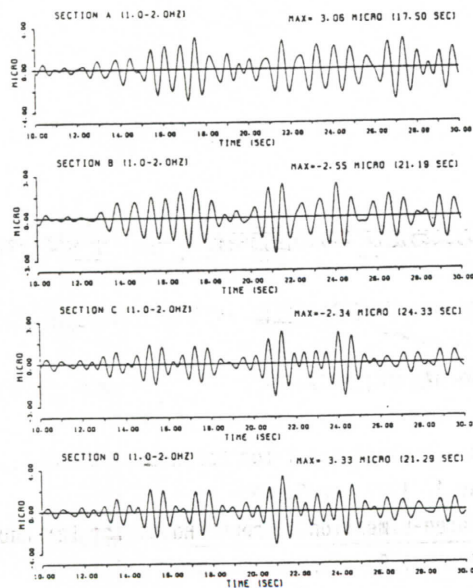


図10 トンネル軸ひずみ(観測)

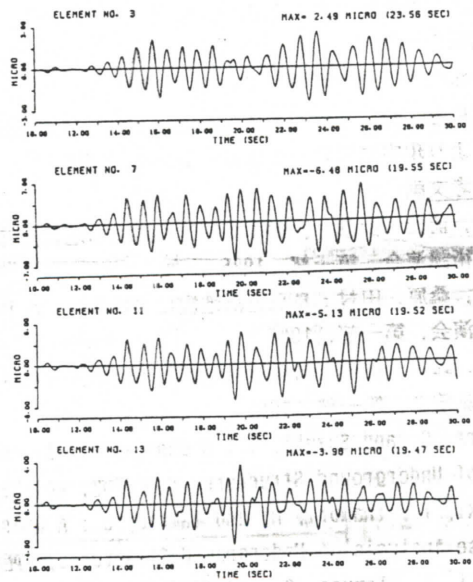


図11 トンネル軸ひずみ(解析)

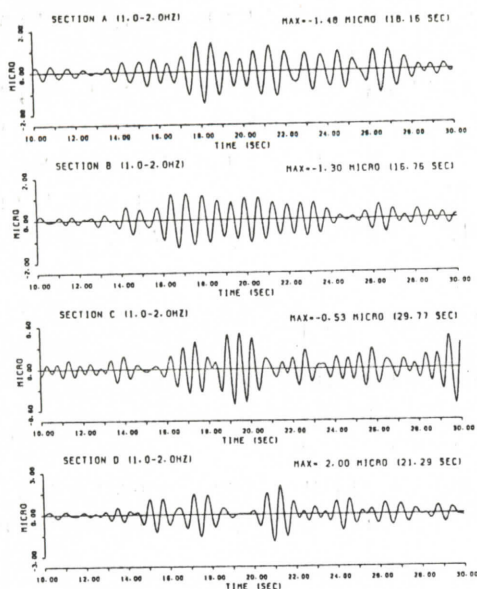


図12 トンネル曲げひずみ(観測)

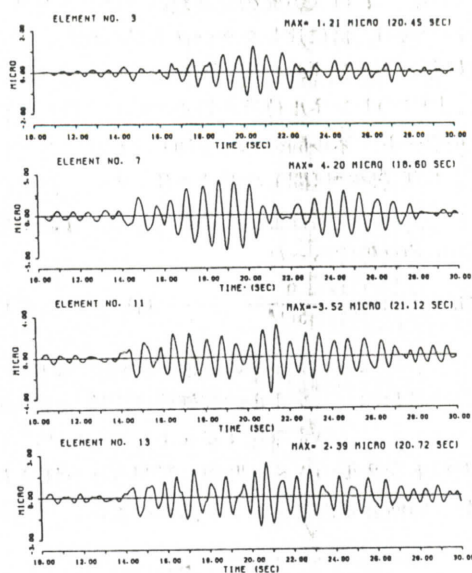


図13 トンネル曲げひずみ(解析)

た加速度と同様に多少の時間のズレはあるが、両者の波形が良く一致していると思われる。トンネル下の基盤の起伏が激しい割にはトンネル要素の分割数が少ないが、両者を絶対値で比較してもまずまずの精度で一致した。図12はトンネルのA～D断面で観測された曲げひずみ波形を示し、図13は応答解析結果を示している。観測結果は図11と同様A断面を除きセグメント部のひずみで、解析結果は等価ひずみである。曲げひずみでは軸ひずみほどではないが、かなり波形をシミュレートできていると思われる。

## 5. まとめ

擬似3次元地盤モデルを用い、シールドトンネルの実地震時挙動のシミュレーションを行った。ここでは解析結果の一例を紹介したが、震央方向が異なる鳥島近海地震(昭和59年3月6日)に関しても同様に、本解析手法の妥当性が示されている。本解析手法の特徴を列挙すると、(1) 擬似3次元地盤モデルを用いた、(2) 震央方向からの位相差入力を適用した、(3) 実測から求めたトンネルの等価剛性を採用した。本手法により、より現実に近いシミュレーションが可能となった。

## 6. 参考文献

- 1) 田村, 前田, 田部井, 鈴木: トンネル内の地震記録から求めたひずみの伝播特性の一例, 土木学会第40回年次学術講演会, 第一部, 1985
- 2) 鈴木, 桑原, 田村: 鳥島近海地震におけるシールド洞道のひずみ伝達特性について, 土木学会第41回年次学術講演会, 第一部, 1986
- 3) 桑原, 鈴木, 田村: 鳥島近海地震におけるシールド洞道の軸方向ひずみ分布について, 土木学会第41回年次学術講演会, 第一部, 1986
- 4) Tamura, C. and Suzuki, T.: A Quasi-Three-Dimensional Ground Model for Earthquake Response Analysis of Underground Structures, 生産研究, Vol.39, NO.1, 1987, pp.37-40.
- 5) Suzuki, T., Inamori, M. and Tamura, C.: A Quasi-Three-Dimensional Ground Model for Earthquake Response Analysis of Underground Structures, 生産研究, Vol.39, NO.2, 1987, pp.20-23.
- 6) Suzuki, T., Tamura, C. and Maeda, H.: Earthquake Observation and Response Analysis of Shield Tunnel, Proc. 7th Japan Earthquake Engineering Symposium, 1986, pp.1903-1908.