

(113) 羽田国際空港道路トンネルの地震応答観測と解析

運輸省港湾技術研究所 清宮 理
 運輸省港湾技術研究所 藤澤孝夫
 研修生(若築建設㈱) ○長廻幹彦

1. まえがき

東京国際空港では、現在滑走路の増設に伴う沖合展開工事が進められており、滑走路の下を横切る埋設道路トンネルが建設されている。道路トンネルが埋設されている空港内の表層地盤は非常に軟弱な沖積粘土で構成されている。またこの道路は環状7号線とターミナルを結ぶ幹線道路であり、地震時の安全性の確保が要求されている。このため観測計器をトンネル内と周辺地盤に配置して地震応答観測が行なわれている。本報告では、この地震応答観測結果と擬似三次元モデル¹⁾²⁾により表層地盤と道路トンネルの振動特性を計算した結果について併せて述べる。

2. 地震応答観測の概要

道路トンネルの概略を図-1に示す。道路は滑走路下に1.5mの土被りで埋設されている。トンネルは全長880mで鉄筋コンクリート製である。断面の高さは8.8m、幅は31.25mで6車線である。函体には耐震継手は配置されておらず、一

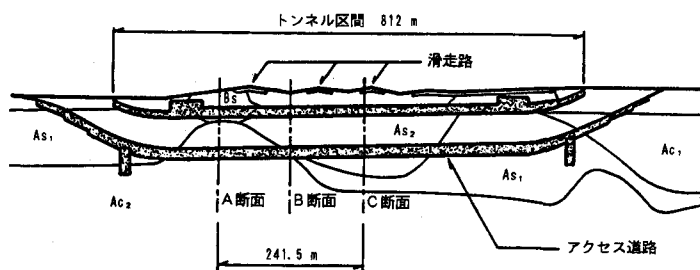


図-1 アクセス道路の概略図

体で連続している。函体の軸剛性は 3.54×10^{11} kg、曲げ剛性は 3.37×10^{17} kg \cdot cm²である。図-2に表層地盤の地層構成を示し、表-1に各土層の土質定数を示す。表層地盤は、厚さが約50mの軟弱な粘土層と砂層で構成されている。道路トンネル沿いの沖積層の地層構成と洪積層上面の形状は、かなり複雑である。上層の浚渫ヘドロ層は、ペーパードレーンで地盤改良を施してある。またトンネル周辺の砂層は、水抜き工法と碎石に置換する工法で液状化対策を施してある。

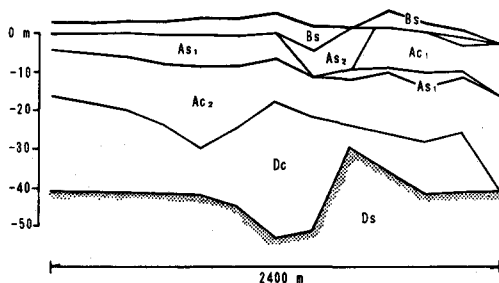


図-2 表層地盤の土質構成

表-1 各土層の土質定数

土質区分	記号	単位体積重量 γ (t/m ³)	せん断波速度 V_s (m/s)
盛土	Bs	1.8	182.0
沖積層	As ₁	1.8	174.0
	Ac ₁	1.6	71.0
	Ac ₂	1.6	114.0
改良土	As ₂	1.6	126.0
洪積層	Dc	1.7	174.0
	Ds	1.8	302.0

表-2 観測計器の配置数

計器の種類	A断面	B断面	C断面
加速度計(3成分)	2	—	2
加速度計(2成分)	1	1	1
鉄筋計(軸方向)	8	8	8
鉄筋計(軸直方向)	—	—	16
コンクリート応力計	—	—	4
傾斜計	—	—	2
間げき水圧計	2	2	2

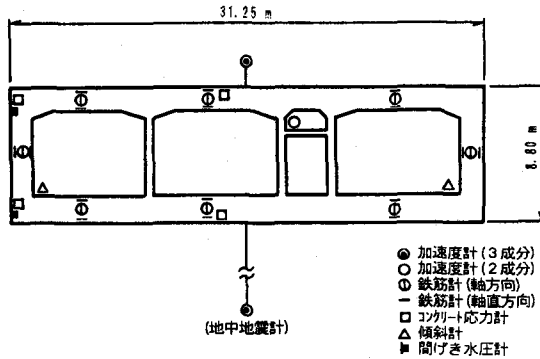


図-3 観測計器の配置(C断面)

計でそれぞれ計測する。道路トンネル下方の-54.5mの洪積層内に地中地震計を配置し工学的基盤面での加速度記録を取得するとともに、241.5m離れたA断面での地中地震計の加速度記録と比較することにより工学基盤面での地震波の伝播状況や入射方向も把握できる。

3. 取得された地震記録

地中地震計で1Gal以上を感知した時記録の取得が行なわれる。1989年の観測開始以来32個の地震記録を取得した。図-4に取得した地震の震源地の分布を示す。マグニチュード4.0~6.0の地震が大半で、いずれの地震でも最大加速度は20Gal以下と小さい。図-5に取得された記録の一例を示す。地震の規模が小さいので、函体のひずみ量、間げき水圧などの値は非常に小さく函体にほとんど影響を及ぼしてないと言える。図-6に地震記録毎に函体に生じた最大ひずみ量と震央距離との関係を示す。従来から指摘されているように震央距離が短いほどひずみ量は大きくなる。この24個のデータより最小二乗法を用いて回帰式を求めると次式となった。

$$\varepsilon = 0.354 \times 10^{0.221M} \times L^{-0.177}$$

ここで、 ε ; 函体ひずみの最大値 (μ)

M ; マグニチュード

L ; 震央距離 (km)

図-7に他のトンネルで同じように整理したマグニチュード5.0での結果を示す^{3),4)}。ひずみのレベルは多摩川トンネル、川崎港海底トンネル等と類似しているが、距離減衰については異なった結果となった。一方東京第二航路海底トンネルでは、柔継手が函体間に設置されているのでひずみ量は他のトンネルより小さくなる傾向がある。取得された地震記録の中で比較的最大加速度が大きいHANE9とHANE27(地震記録の整理番号)を対象に、工学基盤面での地震波の見掛け上の伝播速度を求める。この

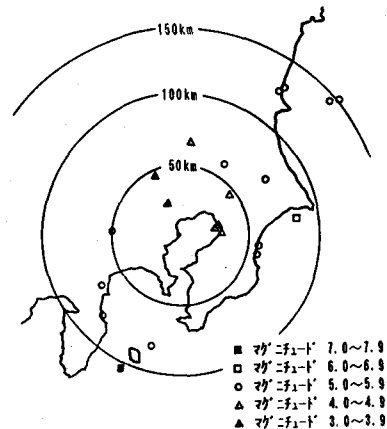


図-4 観測された地震の震源地分布

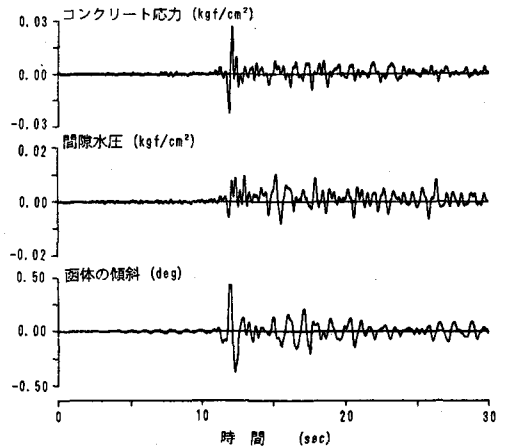


図-5 取得された地震波形(HANE27)

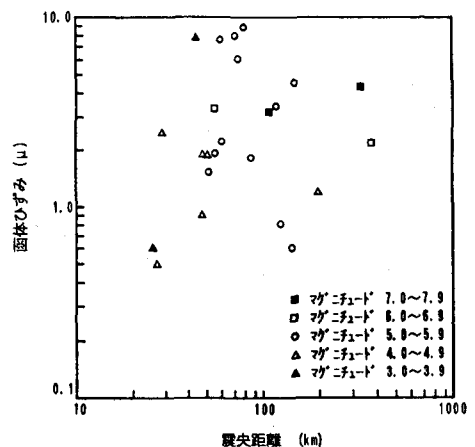


図-6 函体ひずみの最大値と震央距離の関係

際空港内の他の箇所に設置されている地中地震計の記録も利用した。ここでHANE9は1989年10月10日に東京湾で、HANE27は1990年8月23日に千葉県中部で発生した地震である。HANE9の地震のマグニチュードは4.8、震央距離は28.9kmで、HANE27ではそれぞれ5.4、59.1kmである。加速度記録の卓越振動数も約3Hzと比較的高い。伝播速度は二点間の加速度記録の相互相関を計算して求めた。この結果、HANE9では道路トンネル軸方向に1044m/s、軸直角方向に位相差なし、HANE27では軸方向に667m/s、軸直角方向に同じく位相差なしとなった。道路トンネル軸線の延長上に震央は存在しない。両地震とも比較的の深度が深く震央距離が短いので地震波が斜下方(約50度)から工学的基盤面に到着したのを見掛け上の伝播速度がこのように計算されたと考える。

4. 動的応答計算

本道路トンネルの耐震設計は変位法により行なわれた。しかし道路トンネルの耐震性の評価をするには、空港内の表層地盤の複雑さや地震波の伝播状況などの条件を合理的に考慮できる擬似三次元モデルによる動的応答計算を用いるのが適切である。このモデルでは、表層地盤を平板要素とばね要素に置換する。図-8に計算モデルを示す。現在埋立が完了している範囲をモデル化しており、モデルの南北の距離は4600m、東西の距離は2800mである。総節点数は261個、総要素数は322個である。道路トンネルは埋設部分を16個のはり要素に分割し、道路トンネルと周辺地盤を結ぶばねの定数は二次元F. E. M.により計算する。また表層地盤の減衰定数は、各入力地震波に対してSHAKEを用いて平均的な値を設定する。今回は3%である。

表-3にこのモデルでの固有値解析の結果を示す。モードとしては、10次、9次、5次、1次・・・が卓越している。図-9に10次のモード図を示す。これら関与関数の大きいモード次数では、いずれも多摩川の河口付近の沖積層の厚い箇所に変位ベクトルが大きくなっている。この固有周期は約2秒である。

2つの地震(HANE9、HANE27)で得られた地中地震計の加速度記録を入力地震波とし、動的応答計算を行なった。図-10にHANE9、図-11にHANE27での道路トンネルの断面力(軸力と曲げモーメント)の軸線沿いの分布、および実測ひずみから得られた断面力を示す。軸力はA地点、曲げモーメントはトンネル節点15付近で最大となった。計算の際入力加速度の見掛け上の伝播速度と入射角度を考慮してある。実測値の断面力は3地点

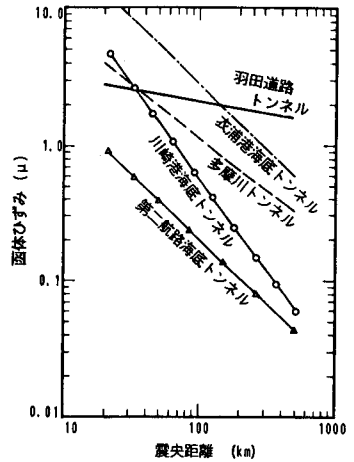


図-7 マグニチュード5.0における回帰式の比較

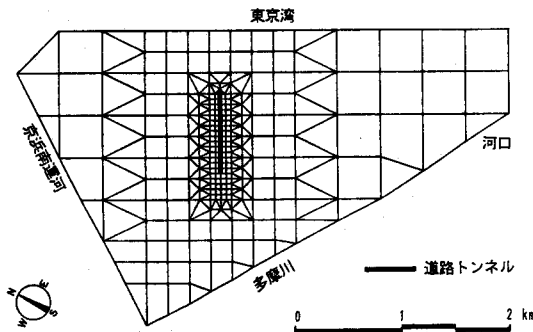


図-8 擬似三次元地盤モデル(平面図)

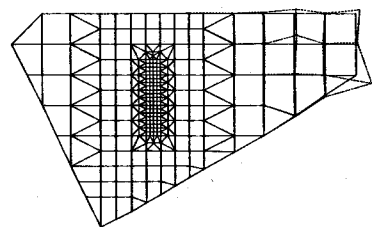


図-9 モード図(10次)

表-3 表層地盤の固有値解析結果

モード次数	固有振動数 (Hz)	関与係数 (%)
10	0.482	5.72
9	0.480	2.90
5	0.442	2.28
1	0.344	2.19
7	0.467	1.41
8	0.478	1.28
3	0.365	1.04
2	0.353	0.89
4	0.404	0.10

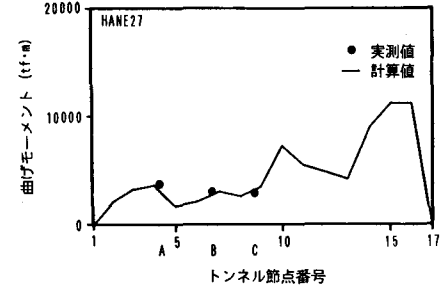
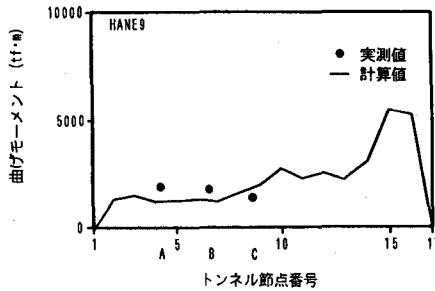
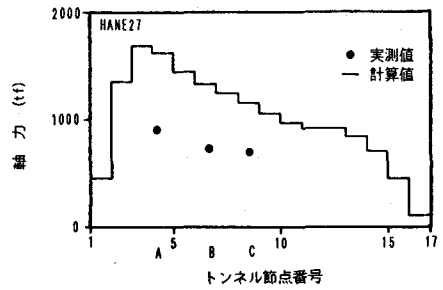
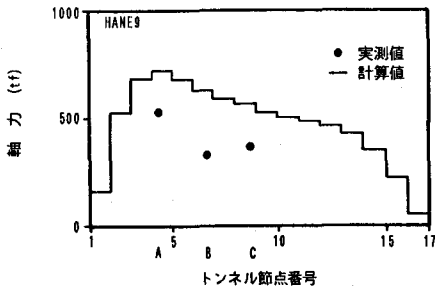


図-10 トンネル断面力の分布 (HANE9)

図-11 トンネル断面力の分布 (HANE27)

ともほぼ同じである。両地震波とも、曲げモーメントに関して実測値と計算値はよく一致している。軸力に関しては、計算値の方が5割ほど大きな値となっている。また軸力では、解析時に伝播速度を考慮しないと両者の差は更に大きくなる。

5. まとめ

- ①地震応答観測の結果からすると、羽田国際空港内に埋設されている道路トンネルで地震時に生じるひずみの大きさは、付近に存在する他の2,3の沈埋トンネル（剛接合）とほぼ同じであった。
- ②空港埋立地全体をモデル化した擬似三次元モデルによる固有値計算では、沖積層の厚い多摩川河口付近に大きな地盤変形が計算される。
- ③地震応答観測から得られた道路トンネルの断面力と擬似三次元モデルでの計算による断面力との比較では、曲げモーメントに関してよく一致したが軸力に関してはよい一致をみなかった。この際工学的基盤面での入力地震波の見掛け上の伝播速度を考慮した方が軸力に関して両者の値の差は小さくなる。

あとがき

地震応答観測を始めて以来大きな地震記録が取得されていない。このため今回の検討が直ちに地下埋設トンネルの設計法に結びつかないが、地震時の空港内のトンネルの挙動の傾向を知ることができたと思う。今後継続して検討を継続していきたい。

【参考文献】

- (1) 田村重四郎, 鈴木猛康: 地下構造物の地震応答解析のための擬似三次元モデルの提案, 生産研究, Vol. 39, No. 1, 1987年
- (2) 清宮 理, 野口孝俊, 長廻幹彦: 擬似三次元地盤モデルによる地震応答計算の沈埋トンネルへの適用, 港湾技研資料, Vol. 696, 1990年
- (3) 清宮 理, 西沢英雄, 横田弘: 川崎港海底トンネルの地震応答, 第17回地震工学研究発表会, 1983年10月
- (4) 東京都港湾局: 東京第二航路海底トンネル耐震性解析, 昭和63年 (内部資料)