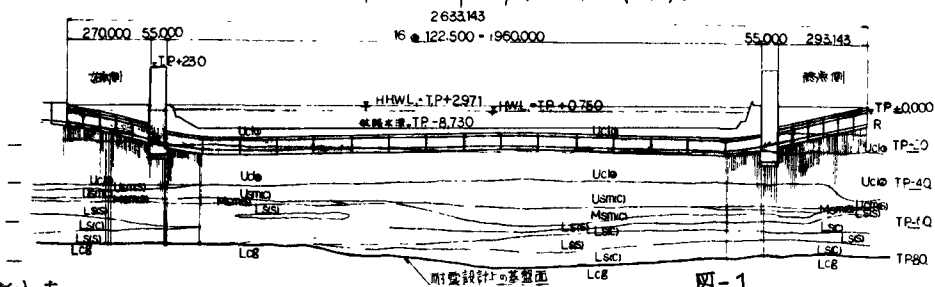


換気塔を含めた沈埋トンネルの地震応答解析

建設省土木研究所 正会員 栗林 栄一
 建設省土木研究所 正会員 羽立 隆幸
 日本技術開発 KK 正会員 O佐伯 光昭

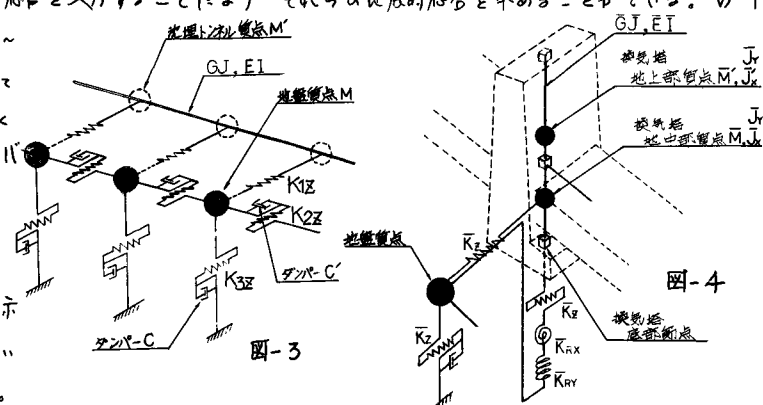
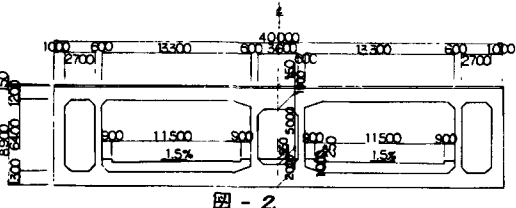
1. まえがき

本報告は 臨海部の河口を横断する手段として計画された道路用沈埋トンネルを対象に、沈埋トンネル部、換気塔部、アプローチトンネルを含めた全体系としての地震応答解析を行い、トンネルと換気塔との結合方式および解析モデルの相違がトンネル、換気塔の応答に及ぼす影響について調べたものである。図-1に対象としたトンネルの概要を、図-2には沈埋トンネル部の断面をそれぞれ示す。



2 解析方法

沈埋トンネルの地震応答解析には従来 周辺地盤をバネ~質量系、トンネルと弾性床工の「はり」とした集中質量法がよく用いられてきている¹⁾。ここでは、建設省土木研究所が開発した地盤およびトンネル、換気塔などの構造新材をそれぞれバネ~質量系、骨組構造系に置換した集中質量法による電算プログラムを使用した。この方法の基本的な考え方はつぎのとおりである。i) 構造物と支持する周辺地盤はせん断振動系のバネ~質量系モデルとする。ii) 地盤の剛性のばり依存性や非線形性を考慮する。iii) トンネルはバネ支承により保持された「はり」として、周辺地盤とバネ、タッシュボットで連結される。(図-3参照) iv) 換気塔はトンネルと同様に図-4に示すような骨組系と考慮し、免振の回転剛性を考慮するものとする。v) トンネルおよび換気塔はi)に述べた周辺地盤の地震時応答を入力することにより、それらの地震時応答と求めることができる。vi) トンネルエレメント間、トンネル~換気塔間での可塑性継手については、部材間の相対的な伸縮もしくは回転運動に弾性的に比例するバネによりモデル化を行う。



3. 解析条件

3.1 構造条件

表-1に各部の断面諸定数を示す。可塑性継手のバネ係数については表-2を示すこととする。

本解析に用いたトンネル換気塔手の骨組モデルを図-5に示す。同図から判るよりに今回の解析では地盤節点数として37、構造物節点数としては45(DM), 35(SM-1), 25(SM-2)の3丁-2エを対象とした。また、同図中には可塑性継手の使用位置を◇印で示した。

3.2 地盤条件

図-1に地層構成の概要、耐震計算上の基礎面の位置

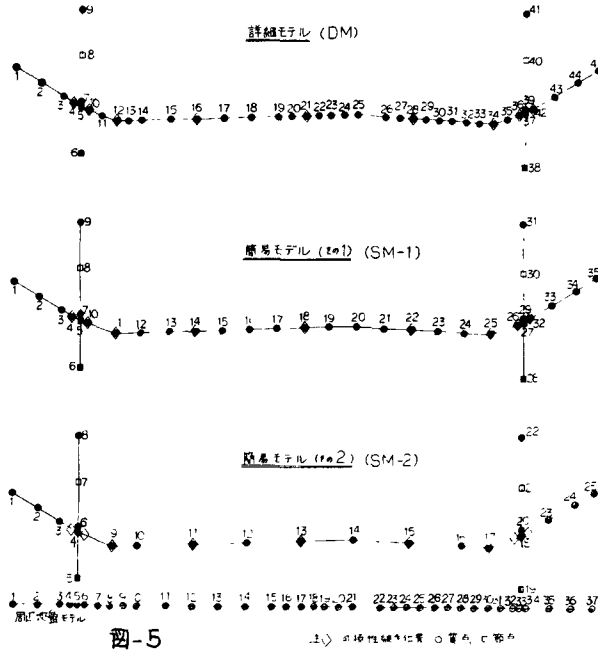


図-5

表-1 トンネル断面諸定数

	コンクリート 弾性係数 \$E_c\$	断面積 \$A\$ (m ²)	断面2次モーメント \$I\$ (m ⁴)	断面内径
始末側陸上部	\$2.70 \times 10^6\$	178 ~206	28300 ~43300	3440 ~4100
海底部	\$3.0 \times 10^6\$	137	20700	1640
始末側浮上部	\$2.70 \times 10^6\$	137 ~155	15800 ~18500	2280 ~2720

表-2 可塑性継手のバネ係数

	ジョイント間	ジョイント~ 換気塔側
岸田方向伸縮 \$K_x\$ (%)	\$2.68 \times 10^5\$	\$1.79 \times 10^5\$
鉛直方向せん断 \$K_y\$ (%)	\$1.00 \times 10^5\$	剛
水平方向せん断 \$K_z\$ (%)	\$1.00 \times 10^5\$	\$1.00 \times 10^5\$
鉛直方向回転 \$K_{\theta z}\$ (%)	\$8.00 \times 10^6\$	\$5.00 \times 10^6\$
水平方向回転 \$K_{\theta y}\$ (%)	\$1.50 \times 10^8\$	\$1.00 \times 10^8\$

表-3 表層地盤の土質諸定数 (摩擦係数 \$\mu=0.2\$)

地層名	層理	\$\gamma_i\$ (%)	\$N_{60}\$	\$V_s\$ (%)	\$G_0\$ (%)
沖積層	R 埋土	1.80	4	138	600~1120
	Ucl① 粘土	1.50	0	110	1200
	Ucl② 粘土	1.45	0	110	1160
層	Usmc 粘土	1.70	2	151	2570
	Usmc 砂質土	1.75	6	150	1480~1740
洪積層	MSm 粘性土	1.75	6	239	8450
	MSm 砂質土	1.80	25	307	13460~43300
	Sc 砂質土	1.70	15	282	11480
層	LSs 砂質土	1.85	50	334	16670~17940

\$N_{60}\$ の場合の \$V_s\$ の値は表-3の値に示した。

置を示す。この基礎面より上方の表層地盤の諸定数を表-3に示す。

同表中の波速度 \$V_s\$ は各地層の \$N_{60}\$ 値から文献(2)により推定したものである。動的せん断変形係数 \$G_0\$ は \$V_s\$ と密度 \$\rho\$ とから求める微小ひずみでのせん断変形係数 \$G_0\$ には建設省土木研究所の実験結果を用いて地盤時に生じるせん断ひずみと沖積層では \$10^{-3}\$、洪積層では \$10^{-2}\$ と想定して定めた係数と乘じて求めたものである。図-3に示した地盤節点の質量 \$M_i\$、節点と基礎と隣りバネ係数 \$K_3\$、節点間のバネ係数 \$K_2\$ はそれぞれ次式により求めた。

$$M_i = (8/\pi^2) \cdot (\gamma_i/g) \cdot H \cdot L, \quad K_3 = 2GL/H, \quad K_2 = 8EH/\pi^2 L$$

ここで \$H, L, G, E, \gamma_i\$ はそれぞれ表層地盤の厚さ、節点間の距離、表層地盤のせん断変形係数および圧縮変形係数である。トンネルと地盤とを結ぶバネ係数 \$K_1\$ はトンネルと半無限弾性地盤内に置かれた帯状の板と看做して次式で求めた。

$$K_1 = K_{1x} = G \cdot L, \quad K_{1y} = E \cdot L \quad x: \text{軸方向}, \quad y: \text{鉛直方向}, \quad z: \text{トンネル軸内水平方向}$$

\$K_1, K_2, K_3\$ と求める際の \$G, E\$ は表層地盤を一層系と看做した場合の換算値である。換気塔部の基礎バネについては群ばねとしての剛性から回転およびねじりバネ係数 \$E\$、水平バネ係数については \$a\$ の他に換気塔の埋入地部の抵抗を考慮して、それぞれ求めた。

3.3 入力地震動条件

根室半島沖地震の際に静内橋の地下 40m (\$M=7.4, \Delta=305^{\circ}\$) で観測された加速度記録 (41 gal 最大) を用いた。実際の解析には最大値を水平 150 gal、鉛直 75 gal に正規化したものを採用している。図-6に原波形、図-7には

絶対最大加速度応答スペクトル倍率 β とそれぞれを示す。

4. 解析結果

表-4に長短側換気塔の1次の固有周期 T 、表-5には同じく短側換気塔の天端での最大水平変位、加速度および断面での最大曲げモーメントとそれぞれを示す。これらの結果からトンネルと換気塔間の結合方式、解析モデルの相違によって換気塔の振動状態、応答は大きな影響を受けないことが明らかとなった。

トンネル部の応答については軸力分布を図-8に、トンネル軸直方向水平面内の曲げモーメントの分布を図-9にそれぞれ代表例として示す。また図-10には可溶性継手の軸方向相対変位量(片振幅)の分布を示す。これらの図から以下の事項を指摘できる。
 i) トンネルと換気塔間の結合方式の相違によって換気塔に近いトンネルの応答断面力は大きく異なり、柔結合よりも剛結合の場合の方が大きくなることが確認された。
 ii) トンネルと換気塔間の結合方式と

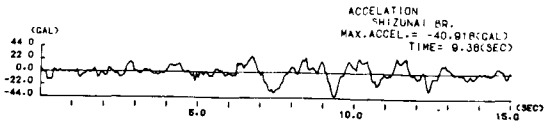


図-6 静内地震動

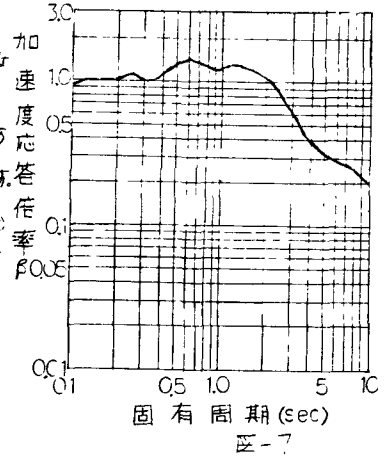


図-7

表-4 短側換気塔1次固有周期

モデル	方向	換気塔とトンネルの結合	固有周期
DM	軸	—	0.849
	軸直	—	0.960
SM-1	軸	0.904	0.842
	軸直	0.991	0.980
SM-2	軸	0.932	0.870
	軸直	0.994	0.987

表-5 短側換気塔最大水平変位、加速度値、断面での最大曲げモーメント

モデル	方向	最大変位 (cm)		最大加速度 (gal)		換気塔とトンネル間の結合	
		剛	柔	剛	柔	剛	柔
DM	軸	26.2	—	236.5	—	364000	—
	軸直	26.4	—	225.7	—	307000	—
SM-1	軸	25.9	26.2	234.5	240.5	333000	295000
	軸直	26.7	27.1	224.5	229.3	304000	329000
SM-2	軸	26.6	27.1	244.3	253.3	356000	375000
	軸直	27.6	27.9	237.7	242.2	303000	378000

トンネルの応答断面力に及ぼす影響範囲は、せん断力も最も局部的で、そして曲げモーメント、軸力の順に換気塔から遠方に及ぶことが判明した。iii) 可溶性継手に生じる相対軸方向変位量についてはトンネルと換気塔との結合方式を剛結合とした場合換気塔に最も近いエレメント周の継手(図-10でのCおよびDの位置)での値が水底中央部の値に比べて倍以上となり、端部に集中する傾向を示すことが明らかとなった。iv) 水底部分のトンネルの応答断面力の大きさは解析モデル(骨格数)により影響されるようである。

上記i)の事項を定量的に調べるためにプロットしたものが図-11である。同図は横軸に断面力の種類、縦軸にはトンネルと換気塔との結合条件の影響を受け、最もと考えられる水底中央部でのトンネル応答断面力に対する換気塔直近でのトンネル応答断面力との比 α として解析モデルパラメータにしたものである。これにあればトンネルと換気塔間の結合方式を剛結合とした場合、 α は軸力に最も小さく

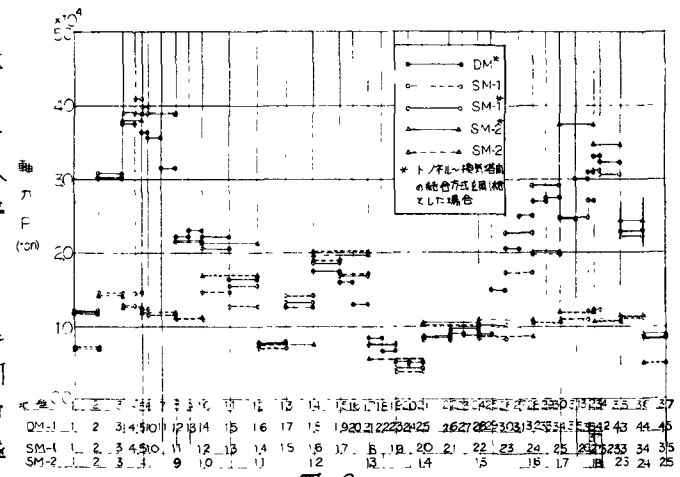
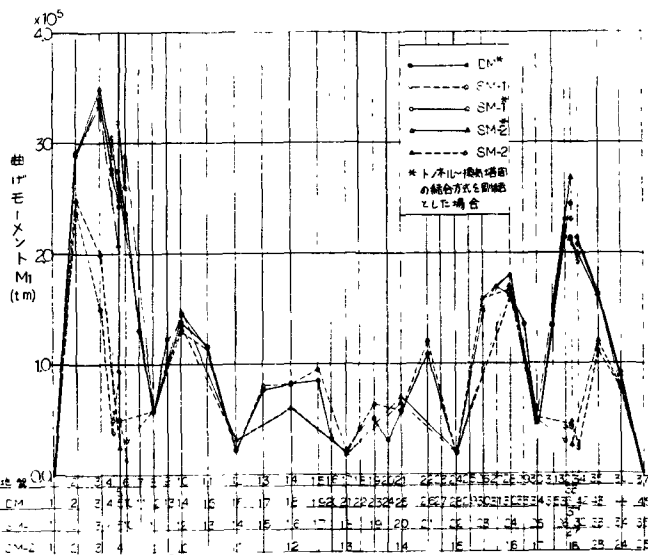


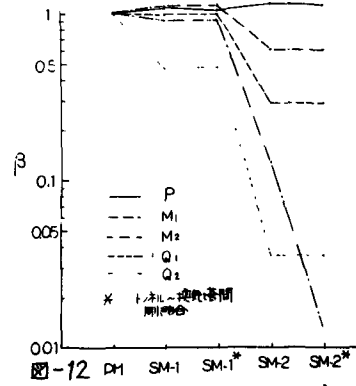
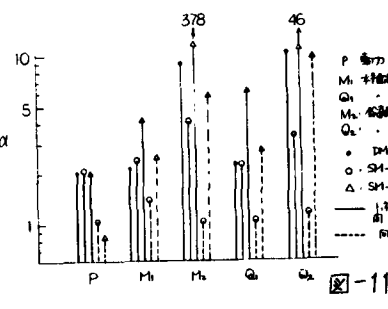
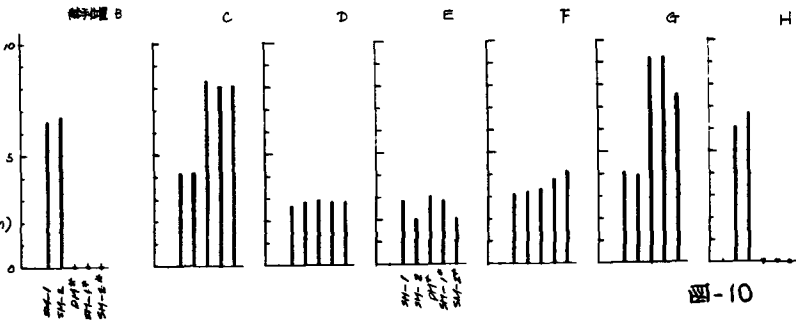
図-8

ついで水平面内の曲げモーメント、せん断力、鉛直面内の曲げモーメント、せん断力の順に大きくなっていること。換気すればトンネルと換気塔とを剛結合とした場合には軸力に打撃の影響が最小であることと示している。図-12は解析モデルの相違による水底中央部でのトンネル断面力の変化の状況と調べるために節点数の最も多いDMモデルの断面力に対する各モデルの断面力の比に注目してまとめた結果を示す。同図から軸力についてはモデルの相違による影響を受けないが、他の諸力についてはいずれも節点数の減少するにつれて、断面力は減少し、その程度は水平面内よりも鉛直面内の断面力の方が著しいことなどが明らかとなった。



5. 結論

延長約2.6km 6車線道路用沉埋トンネルにおいて換気塔を含む全体系の地震応答解析を基礎入力として根室半島沖地震の際、静内橋の地下40mで記録された加速度波形を水平150gal、鉛直75galに正規化したものを使用して行った結果次の事項が明らかとなった。1)換気塔の振動性状は換気塔トンネル間の結合方式には大きく影響されない。2)トンネルの断面力は換気塔との結合方式により影響され剛結合の場合には換気塔直下で増加するが、その影響範囲は断面力の種類により異なる。



今回採用した方法ではトンネル断面力はその解析モデル(節点間隔)により影響されるが、その程度は一律ではなく、曲げモーメントやせん断力は著しいに対し、軸力は殆んど影響を見られない。

《参考文献》1) 田村 岡本、浜田、Dynamic Behavior of a Submerged Tunnel during Earthquakes 東大生研報告 No.24, 1975 2) 岩崎、龍岡、佐伯、N値とU値が1/Eを考慮した波数との関係例 第12回土質工学研究発表会 1977