

1, はじめに, <sup>3)4)5)</sup> 沈埋トンネル, 埋設管等の耐震性に関する現在までの各種実験結果から, 次のような結論が得られている。すなわち, 地震動に対しては地盤と埋設管は一体として振動し, 特に埋設管の固有振動数は問題にならない。また, 周囲の地盤の変位量と埋設管の変位量との関係は, 埋設管を弾性床上の梁と考<sup>5)</sup>えて取り扱うことができ, 埋設管の変位量は高々地盤のそれまでを考<sup>5)</sup>えればよいことも実験的に確められている。

以上のことを考えると, 沈埋トンネルや埋設管の耐震性は, 地震時における地盤の変形または歪みの量を推定する問題に帰着することがわかる。地震時に地盤内に平面的な歪みが生ずる理由として大きく分けて, 次の2通りが考えられる。第1に, 地表面に沿って伝播する波動によるものであり, 第2には, 基盤に一様な地震波が入射して来ても, 表層の地層構成や地形が一様でないため場所によって応答特性が異なり地表面附近における変位量および位相が違うために生ずるものである。沈埋トンネル建設地点における地震時の地盤の変形を全ての要素を取り入れて正確に推定することは, 不可能である。現在までに行なわれている推定法には2通りあり, その1つは, 強震記録から地盤変形の上限値を推定しようとするものであり, 他<sup>1)</sup>の1つは, 主として第2理由に着目してトンネル建設地点の地盤をモデル化し, 応答計算または模型実験によつて推定しようとする方法<sup>2)4)</sup>である。ここでは, 第1の上限値を取扱う方法(スペクトル法)について述べる。

はじめに, 強震記録から沈埋トンネル耐震設計用スペクトルの計算法について, 例を挙げて説明し, 続いて設計スペクトルを使用する場合の制限条件について述べ, 最後に応答計算との比較を行つてみる。

2. 設計スペクトル 後に述べる理由により, 強震記録を一方に水平に伝播している架空の波動(または地盤振動を全て一方に伝播している表面波と考える)から得られたものとし, その伝播速度として表層のS波の波速を取れば, 地震時の地盤変形の上限値を推定することができる。理由の第1は, ラブ波で水平方向の変位成分を持つ表面波を代表させるとすれば, ラブ波の波速の下限値は, 表層のS波の波速であること, 第2に, 地震時においても, 地盤の流動化, 断層または沁りのような不連続な変形がないものとするれば, 波動の一般的な性質として, 波長の長い波は小さな障害物によつて乱されることは少なくまた擾乱波の波長も一般的に長い。したがつて, 強震記録に含まれている種々の周期成分の振動が地盤に平面的な歪みを与えるものだとしても, その波動が下方から伝播して来た時の波長と, 地形や地層の不整によつて発生する水平方向の擾乱波の波長との間には関係がある。例えば, 図1に示すような極端に地層が不連続な場合について考えてみよう。振動の方向が図の面に垂直なせん断振動を考えると, 表層に

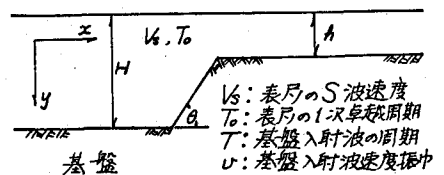


図1 地盤の振動モデル

発生するx軸方向のせん断歪み,  $\delta_x$  は,  $\delta_x(x, y) = f(\theta, v_s/v, H/h, T_0/T)$  の関係がある。このモデルについて,  $\theta = 90$ ,  $H/h = 3$  の場合を種々の  $T_0/T$  に対して FEMIC によつて  $\delta_x$  の最大値を計算してみた(結果は後に示す)が表面の振動の時系列から表層のS波速度を用いて推定した値より大きいものは得られなかつた。

このような前提のもとに, 表1に示すような式の経過を経て強震記録から設計スペクトルが計算できる。設計スペクトルは, 曲げ曲率, せん断力, 軸歪みおよび軸荷重に対する応答スペクトルとそれぞれに対する等価正弦波振巾スペクトルからなる。いづれの項目についても全く同様の方法で求められるので表1には曲げ曲率応答スペクトルとそれに対する等価正弦波振巾スペクトルについてだけ示してある。図2に, 8式を種々の  $\tau$  について計算した例を示してある。剛比周期,  $\tau$ , の

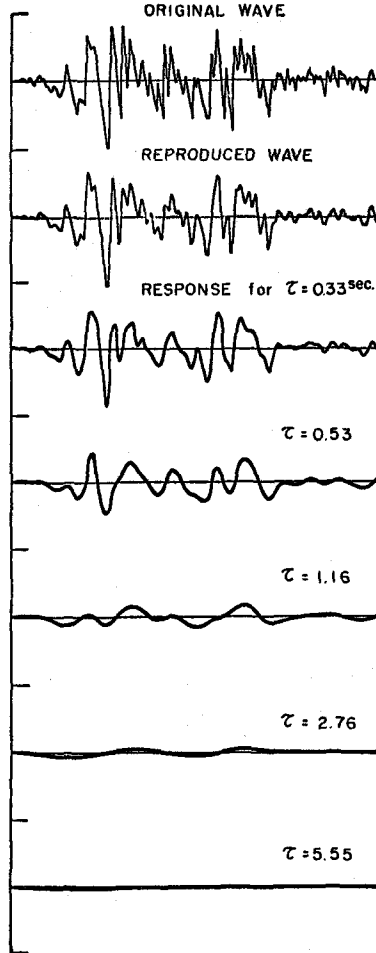


図2 計算過程の例

関数として9式により表わされるものが, 曲げ曲率応答スペクトルである。その例を図3に示す。この値は加速度の次元を持っており, 波速の2乗で割れば曲率が得られる。軸歪み応答スペクトルは, 速度の次元を持ち波速で割つて軸歪みを求めるようになる。図4~6に, その他の応答スペクトルの例を, 図7に10式の包絡線としての等価正弦波振巾スペクトルの例を示す。一種の地盤変位量が, 加速度記録から直接積分の過程を経ないで求められる点は興味深い。

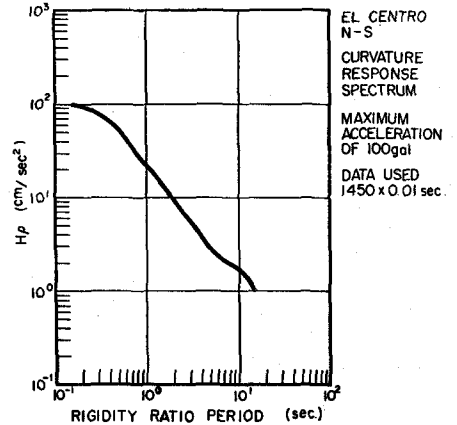


図3 曲げ曲率応答スペクトル

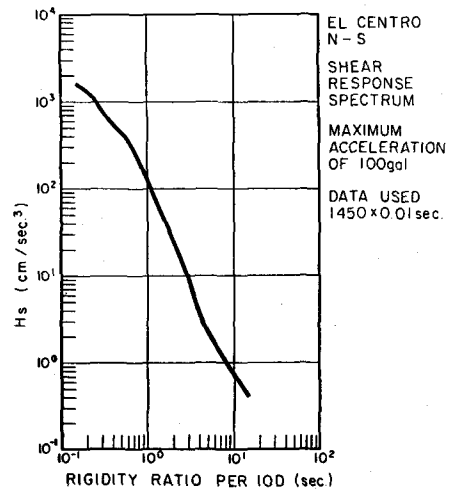


図4 せん断力応答スペクトル

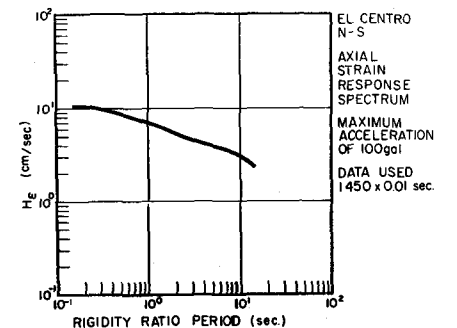


図5 軸歪み応答スペクトル

### 3. スペクトル使用上の制限

沈埋トンネルに発生する歪みは、地震動のうちトンネルの剛比周期に近い成分の影響を最も大きく受けるのであるが、建設地点の地盤が軟弱でトンネルの剛性が大きくなると剛比周期は長くなる。上層の卓越周期に比べて長い周期の成分については、ラブ波の場合基盤のS波々速に近づくし、地層や地形の不整による表層の攪乱の影響も少なくなつてほとんど基盤と表層は一体となつて動くことになる。上限値を推定する場合でも現実と推定値の開きが大きすぎるとは工学的に意味がなくなるので、この点について検討を加える。すなわち、表層が軟弱な場合は剛比周期が長くなるけれども、層厚が薄い場合は周期の長い波動が表層S波の速度で伝播すると考えるのは過大である。

図8に、ラブ波の速度と周期の関係を示してある。また、同じ図の中に先に述べた図1のモデルの応答計算結果も示してある。これは、モデル表面の振動の時系列から表面の水平方向の歪みの最大値を推定するとき応答計算結果と同一の値を与えるような見かけの波動伝播速度を周期に対してプロットしたものである。この図から、卓越周期に比べて周期の長い成分はラブ波も含めて見かけの速度が早くなることがわかる。応答計算について今回ここに示したものは、条件も限られたものであり数も少ないので、今後各種条件について検討し下限値を確めるつもりである。

以上のことから、剛比周期が地盤の卓越周期より長い場合は、図8にもとずいて振動周期と波速の関係を修正してよさそうである。

### 4. 応答計算との比較

ここに述べて来たスペクトルによる方法と、<sup>6)</sup> 応答計算との比較を曲げモーメントについて行つたのが表2である。

対象としたトンネルは、図9に示するような2種類のトンネルである。スペクトル法においては、トンネルと地盤との間のバネ定数と表層のS波速度の決定は重要な問題であるが、ここでは応答計算に用いた値(FEMによる)をバネ定数ではそのまま用い、

表1 設計スペクトルの計算式

$$EI \frac{d^2 u_t}{dx^2} = K(u - u_t) \quad (1)$$

$$u = \int \sin \frac{2\pi}{L} x \quad (2)$$

$$u_t = \frac{U}{\frac{EI(\frac{2\pi}{L})^4}{K} + 1} = \frac{U}{\frac{EI(\frac{2\pi}{L})^4}{K} + 1} \sin \frac{2\pi}{L} x \quad (3)$$

$$p = \frac{d^2 u_t}{dx^2} = -\frac{U(\frac{2\pi}{L})^2}{\frac{EI(\frac{2\pi}{L})^4}{K} + 1} \sin \frac{2\pi}{L} x \quad (4)$$

$$pV_s^2 = -\frac{U(\frac{2\pi}{L})^2}{\frac{L^4}{T^4} + 1} \sin \frac{2\pi}{L} x = -\frac{a_g}{\frac{L^4}{T^4} + 1} \sin \frac{2\pi}{L} x \quad (5)$$

$$\therefore L = VT, \quad x = V_s t, \quad a_g = U \left(\frac{2\pi}{L}\right)^2 \quad (6)$$

$$\tau = \frac{2\pi}{V_s} \sqrt{\frac{EI}{K}}$$

$$a_e(t) = \sum a_n \sin \left( \frac{2\pi}{T_n} t + \phi_n \right) \quad (7)$$

$$pV_s^2 = -\sum \frac{a_n \sin \left( \frac{2\pi}{T_n} t + \phi_n \right)}{\frac{L^4}{T_n^4} + 1} \quad (8)$$

$$H_p(\tau) = \left| \sum \frac{a_n \sin \left( \frac{2\pi}{T_n} t + \phi_n \right)}{\frac{L^4}{T_n^4} + 1} \right|_{\max} \quad (9)$$

$$U_{eg} = H_p(\tau) \left( \frac{T}{2\pi} \right)^2 \left( \frac{\tau^4}{T^4} + 1 \right) \quad (10)$$

- |   |  |
|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>EI : トンネルの曲げ剛性</li> <li>H<sub>p</sub> : 曲げ曲率応答スペクトル</li> <li>K : 地盤反力係数</li> <li>L : 地盤変位の波長</li> <li>T : 周期</li> <li>U : 振巾</li> <li>U<sub>eg</sub> : 等価正強波の振巾</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>V<sub>s</sub> : 表層の波速</li> <li>a<sub>e</sub>(t) : 強震記録のノイズ除去</li> <li>a<sub>g</sub> : 地盤変位の加速振巾</li> <li>U : 地盤の変位</li> <li>U<sub>t</sub> : トンネルの "</li> <li>p : トンネルの曲げ曲率</li> <li>τ : 剛比周期</li> </ul> |
|---|--|

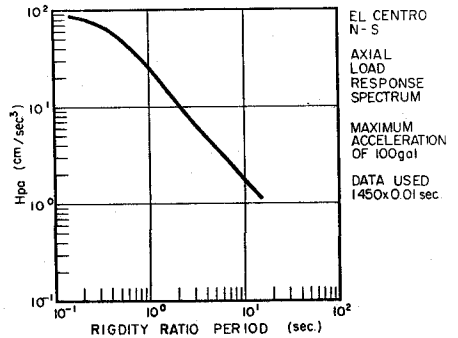


図6 軸荷重応答スペクトル

一次の卓越周期,  $T_0$ , と層厚,  $H$ , から  $V_s = 4H/T_0$  として S 波速度の平均値を決めた。

この結果をみると スペクトル法と応答計算では, 相当の違いがあるのがわかる。特に CASE II の斜面部では, 応答計算結果が著しく小さな値となつている。その理由として種々の要因が想像されるが, 両計算法について今後検討する必要がある。

なお最適な断面ではないかも知れないが, 配筋量の概算を行つてみると 約 1.7% の鉄筋(全断面)を入れると

表2 スペクトル法と応答計算の比較

	卓越 周期	スペクトル法**		応答計算***	
		制限なし	制限あり	最大250gal	最大350gal
海底部(共通)	1.53 sec	55.2	50.0	-	-
斜面部(CASE I)	2.82	45.2	32.5	-	-
		57.0	47.6	49.0	68.8
斜面部(CASE II)	2.08	53.0	45.5	41.3	57.8
		70.0	69.2	26.8	37.6
		58.5	45.1	14.3	20.0

注)\* 曲げモーメントの値は  $10^4$  t-m。上段は十勝沖地震(1968)青森港の記録(S-235, N-S), 下段は El Centro N-S (1940)に打込む。  
 \*\* スペクトル法は最大加速度を250galとした。  
 \*\*\* 3次までのモードを考慮した地震表に於ける最大応答加速度に打込む。

$65 \times 10^4$  t-m の耐力が得られる ( $\sigma_c = 3000$  %)。この場合のひびわれモーメントは  $33 \times 10^4$  t-m ( $\sigma_{uc} = 30$  %), 終局モーメントは  $118 \times 10^4$  t-m ( $\sigma_c = 3000$ %,  $\sigma_s = 3500$ %,  $\epsilon = 0.003$ ) となる。1.7% の鉄筋比は小さくないが, 破壊に対して2倍近い安全率を持つていることは耐震設計の観点から重要なことであろう。

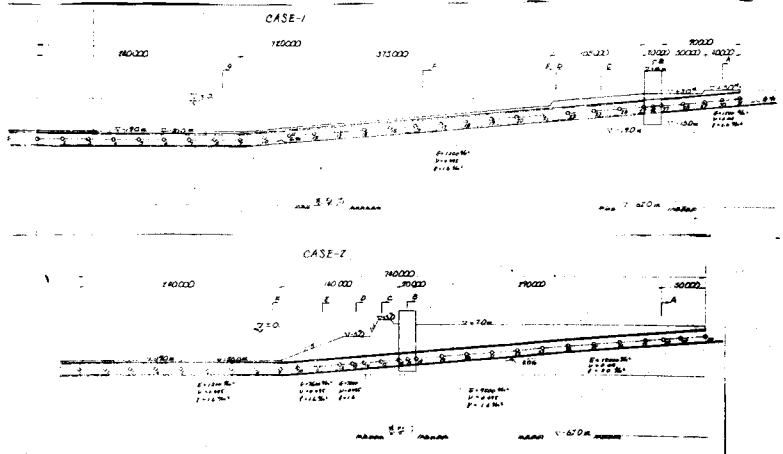


図9 沈埋トンネル縦断面

- 文献 1) 土研; 水底トンネルに関する外国文献(3), 土研資料 Ⅱ6415 43-10 等  
 2) 浜田; 沈埋トンネルの地震応答計算, 26回年次学術講演会 46-10 等  
 3) 桜井; 埋設パイプラインの耐震性, 土質工学会北海道支部講演会 45-10  
 4) 田村他; 沈埋トンネルの模型振動実験, 11回地工学研究発表会 46-7 等  
 5) 青木他; 沈埋トンネルの野外模型振動実験, 港研報告 Vol.11 Ⅱ2 47-6  
 6) 運輸省航空局, 港研; 関西国際空港調査報告書 46-04-付2 47-3

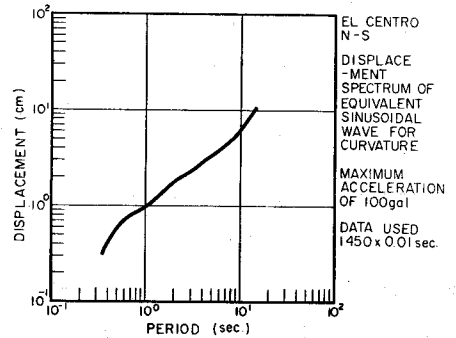


図7 変位振巾スペクトル

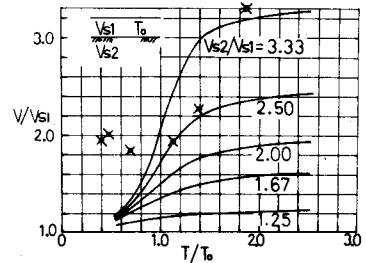


図8 見かけ速度と周期