

§ 1. 緒言

最近沈埋トンネルの建設が数多く行われているが、これの地震時における安全性の検討は未だ充分に行われていない。特に沈埋トンネルは比較的軟弱な地盤に埋設されることが多いこと、又、トンネル軸方向に沿って地盤の振動性状が相当変化していることなどより、地震時の安全性を検討することは急務である。そこで筆者は現在までの地中構造物に関する実験や地震観測結果を検討し、大胆な仮定のもとに沈埋トンネルの地震応答計算モデルを作成した。この応答計算モデルを使用して沈埋トンネルの動的応答計算を行い、耐震設計上の資料として活用しているので、ここに報告する。

§ 2. 地震応答計算モデル

応答計算モデルは次の仮定に基づいて作成された。

- (1) 地中に完全に埋設された沈埋トンネルは自己振動を起さず、地盤の振動に支配される。沈埋トンネルは地盤より押されて変位する。
- (2) 地盤の振動は剪断振動とし、1次振動のみを考慮する。

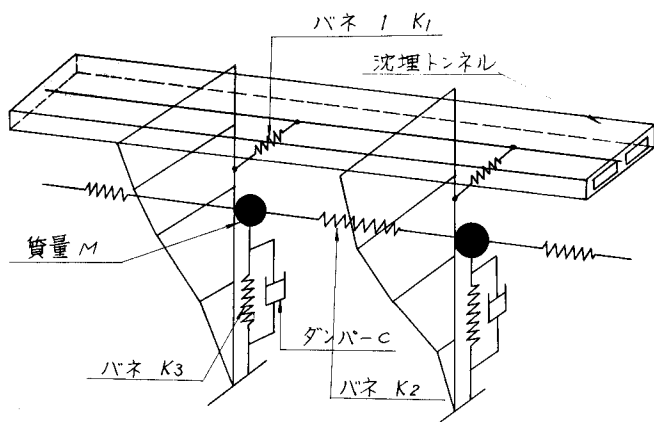


Fig-1 沈埋トンネル応答計算モデル構成要素

有限要素法を用いて地盤の卓越周期及び剪断振動の1次モードをもとめている。ここでは地盤の各層に弾性定数を与える必要があるが、これはP,S検層の結果を用いている。又、計算上の精度より有限要素法のモデルの水平巾Bは層厚Hの約5倍程度をとっている。一質点系のモデルの質量Mは

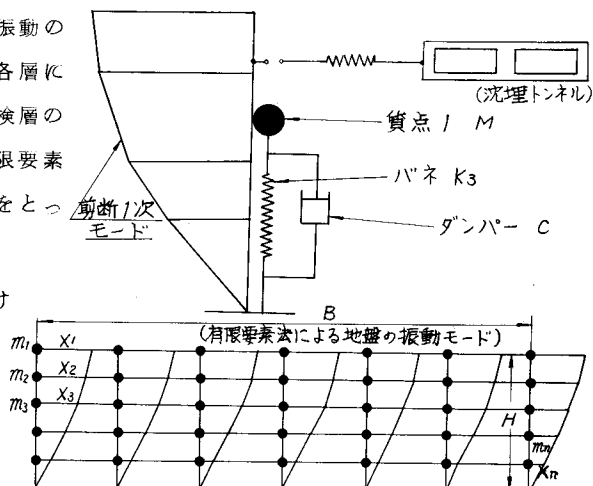
$$M = \frac{(\sum_{i=1}^n m_i x_i)^2}{\sum_{i=1}^n m_i (x_i)^2} \quad \left(\begin{array}{l} \text{有限要素法のモデルにおける} \\ \text{1次振動の有効質量} \end{array} \right)$$

ここで m_i : 各節点の集中質量

x_i : 剪断1次振動のモード

沈埋トンネルの応答計算モデルはFig-1に示される質量及びバネ及び各地盤における振動モードにより構成される。沈埋トンネルの軸に沿った各地点において地盤の振動を一質点系に置換する。一質点系の構成要素は地盤の有効質量M、バネ K_s 、ダンパーC及び剪断振動の1次モードよりなる。質量Mやバネ定数の値の決定はFig-2に示す方法による。Fig-2ではトンネル軸に沿う各地点の地盤に対し

Fig-2 地盤の一質点系への置換



次に一質点系モデルのバネ K_3 は有限要素法により算定された地盤の卓越周期をもつように設定される。

$$w = \sqrt{\frac{K_3 \cdot g}{M}} \quad \therefore \quad K_3 = \frac{Mw^2}{g}$$

ここで w : 有限要素法によりもとめた地盤の剪断 1 次振動の円固有振動数

又、地盤の振動を示す 1 質点系モデルのダンパー C は地盤の減衰係数 $h \approx 0.2$ 程度であることを考慮して適当に決定する。

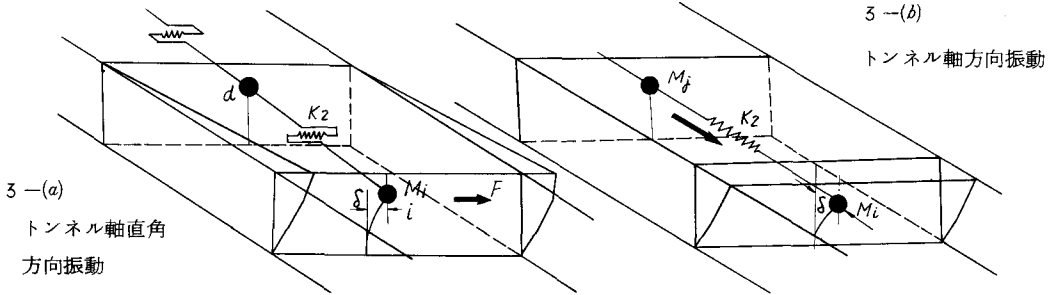


Fig-3 質点相互を連結するバネの算定

Fig-1 において地盤の一質点系の質点相互を連結するバネ K_2 は Fig-3 に示す方法で算定する。例えば、トンネル軸方向と直角に地盤が振動する場合、質点 M_i を δ だけ変位させ、質点 M_j を静止した状態を考慮する。地盤の変位は Fig-3-(a) のようになる。このような剪断変形を起すのに必要な力を F とすると、質点 i と質点 j を結ぶバネ K_2 は

$$K_2 = \frac{F}{\delta}$$

で示される。トンネル軸の方向に地盤が振動する場合も Fig-3-(b) で示される変形 δ を起すのに必要な力 F をもとめることより質点 i, j 間のバネを算定することが出来る。

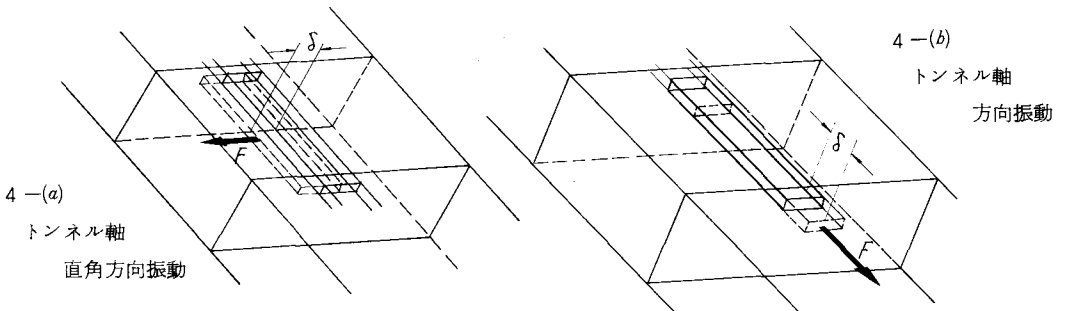
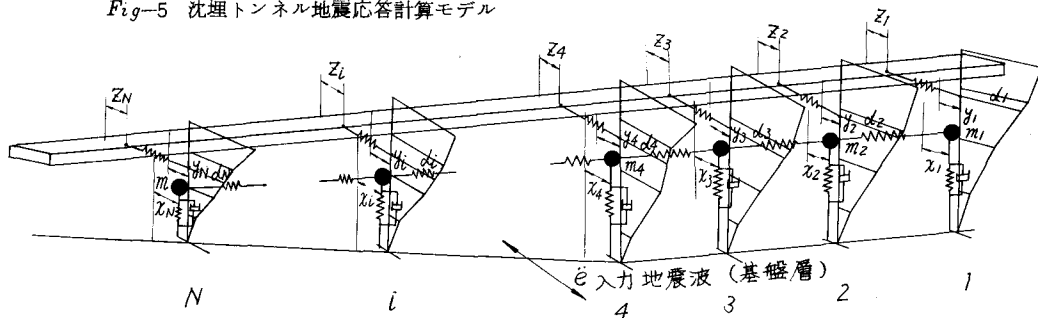


Fig-4 沈埋トンネルと地盤を連結するバネの算定

Fig-1 において沈埋トンネルと地盤の振動モードとを連結するバネ K_1 は Fig-4 に示す方法で決定する。沈埋トンネルの軸に直角な一断面を取り出し、沈埋トンネル自体に軸方向及び軸直角方向に単位変形を与えるのに必要な力をもとめてバネ係数とする。この時のバネ係数の算定には平面及び立体の有限要素法を用いている。

Fig-5 沈埋トンネル地震応答計算モデル



以上の様な予備段階の計算を終了後、Fig-5 に示される全体的な応答計算モデルを作成する。応答計算は次に示す(1), (2), (3)式を解析することにより行う。

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [Kg]\{x\} = -[M]\{\ddot{e}\} \quad (1)$$

$$\{y\} = [\alpha] \cdot \{x\} \quad (2)$$

$$\{z\} = [Ke] \cdot \{y\} \quad (3)$$

(1), (2), (3)式において

$$[M] = \begin{bmatrix} M_1 & 0 \\ & M_2 \\ 0 & M_n \end{bmatrix} \quad \text{：各地盤において地盤の剪断1次振動を示す1質点系モデルの質量より構成される質量マトリックス。}$$

$$[C] = \begin{bmatrix} C_1 & 0 \\ & C_2 \\ 0 & C_n \end{bmatrix} \quad \text{：各地盤において地盤の剪断1次振動を示す1質点系モデルの減衰定数より決定される減衰マトリックス。}$$

$$[Kg] = [kg, ij] \quad \text{：各地盤における地盤の一質点系モデルのバネ係数 } K_1 \text{ 及び質点相互を連結するバネ } K_2 \text{ より構成されるスティフネス・マトリックス。}$$

$$[\alpha] = \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_n \end{bmatrix} \quad \text{：各地盤の剪断1次振動モードにおいて、沈埋トンネルが埋設されるべき位置での刺激係数より構成されるマトリックス。}$$

$$\{x\}^T = [x_1, x_2 \quad x_n] \quad \text{：各地盤における地盤の一質点系モデルの質点変位より構成されるベクトル。}$$

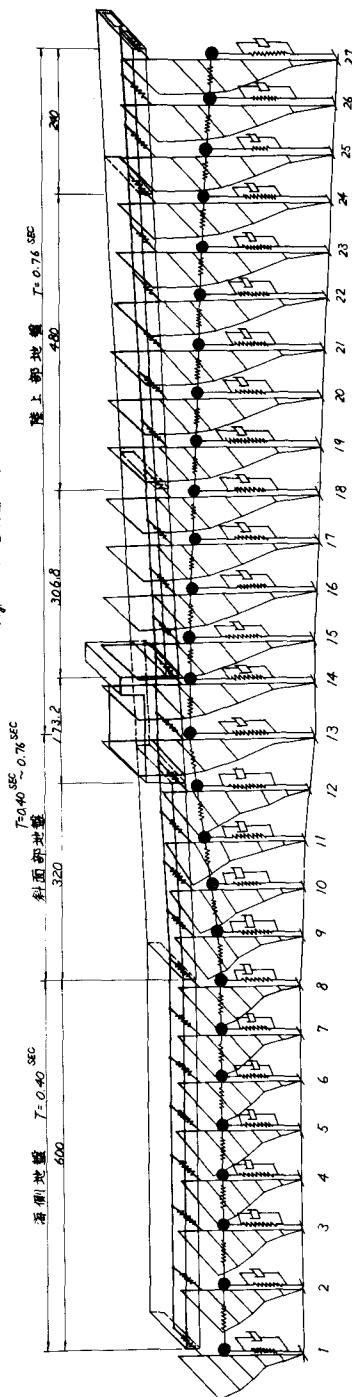
$$\{y\}^T = [y_1, y_2 \quad y_n] \quad \text{：各地盤において沈埋トンネル埋設されるべき位置での地盤変位より構成されるベクトル。}$$

$$[Ke] = [ke, ij] \quad \text{：沈埋トンネルと地盤のモードとを連結するバネ } K_3 \text{ より構成されるマトリックス。}$$

$$\{z\}^T = [z_1, z_2 \quad z_n] \quad \text{：沈埋トンネルの各点における変位。}$$

(1)式によりまず各地盤における各質点の変位 $\{x\}$ を算定する。これに沈埋トンネルの埋設されている位置での刺激係数で構成される $[\alpha]$ をかけて、沈埋トンネルの埋設されるべき位置での地盤そのものの変位 $\{y\}$ を算定する。これは沈埋トンネルが埋設されていない時の沈埋トンネルの軸線に沿っての

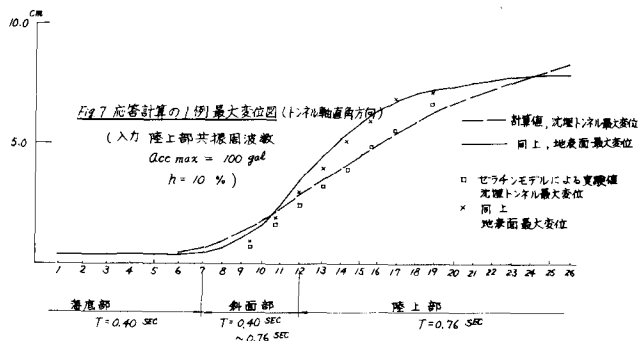
Fig-6 応答計算モデル例



変位を示すベクトルである。この $\{y\}$ を(3)式に代入して沈埋トンネルの変位 $\{z\}$ をもとめる。この時の $[Ke]$ は沈埋トンネルと地盤とを結ぶバネ K_i により構成されるマトリックスであるが、(3)式は地盤の変位 $\{y\}$ を K_i というバネを介して静的に沈埋トンネルに伝達することを意味している。沈埋トンネルを弾性床上の梁として取扱っている。

§ 3. 応答計算例

Fig-6 に示す振動モデルについて応答計算を行った。このモデルの場合、陸上部の地盤の固有周期 $T = 0.76 \text{ SEC}$ 海底部の固有周期 $T = 0.40 \text{ SEC}$ としている。Fig-7 は陸上部の地盤の固有周期の正弦波を入力させ、陸上部地盤を共振させた時の最大変位を図示したものである。ここで $\square$, $\times$ 印はゼラチンモデルによ



る実験値であるが良好な一致を示している。

§ 4. 応答計算モデルの問題点

以上述べた応答計算モデルの問題点を次に挙げる。

(1) 地盤の剪断振動の 1 次振動のみを考慮しているので、地盤の変位に対して高次振動の影響が大きい時は問題がある。

(2) 上下動に対する検討はこのモデルでは不可能である。

参考文献

- (1) 田村, 岡崎 “沈埋トンネルの模型実験” 第 11 回地震工学研究発表会 1970
- (2) 浜田 “沈埋トンネルの耐震設計々算法に対する一試案・第 3 回日本地震工学シンポジウム 1970