

大成建設 株式会社 浜田 政則
同 上 ○木村 洋行
芙蓉情報センター 幕田 好夫

1. はじめに

地中構造物の耐震性については、地震時の地盤の挙動の複雑さ等もあって明確にされていない面があるが、沈埋トンネルや埋設管については、模型実験や実測に基づき既に応答計算法が提案されており、実際の設計でも活用されている。一方、地下タンクの耐震設計法については、三次元有限要素法等を用い、地盤、タンクを一体とした解析する試みが成されているが、計算精度やコストの点から、十分な結果を得てないようであり、実用上有効な手法は未だ確立されていない。

筆者らは、沈埋トンネル、地下タンク等のいくつかの研究を基に、比較的簡便な地下タンクの地震応答解析法を提案したので、ここにその概略を報告する。

2. 本解析法の仮定

本解析法では有限要素法を用いているが、地盤を含めた複雑な計算モデルを作る事を避け、地下タンクの地震時挙動に影響を及ぼす主要な要素のみを考慮した。

応答解析は次の仮定によった。

- (1) 地盤の振動周波数特性は、地下タンクの存在によって影響を受けないものとする。
- (2) 地下タンクの地震時応力に最も大きな影響を及ぼすとみられる地盤の変位については、基盤より上の表面層のせん断振動のみを考える。
- (3) 地下タンクの地震時挙動に対するタンク自体の固有振動の影響は極めて小さいので、応答解析ではこれを考慮しないものとする。
- (4) 地下タンクの変形は、地盤の変形を地盤バネ（バネ特性は必ずしも線型とは限らない）を介在し強制変形として与えることによって求める。

以上の仮定に基づき、地下タンクに生じる応力及び変位を三次元的に解析する。ここでは円筒形地下タンクの場合に限り、円環要素を用いた有限要素法を適用して解析を行った。なお、地盤の変形を求める解析の手法としては、重複反射波理論、剪断バネマス系による方法、有限要素法等がある。

解析法の概念図を図-1に示す。

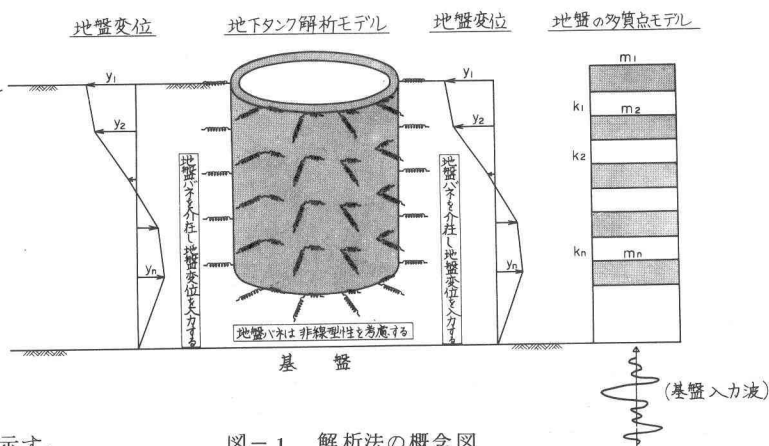


図-1 解析法の概念図

3. 計算理論

3-1 荷重及び変位の仮定

円柱座標における荷重及び変位を次のように記す。
添字の T は転置の意味である。

$$\begin{aligned} \text{変位} \quad \{U\}^T &= \{U_r, U_\theta, U_z\} \dots\dots\dots(1) \\ \text{物体力} \quad \{P\}^T &= \{P_r, P_\theta, P_z\} \dots\dots\dots(2) \\ \text{表面力} \quad \{S\}^T &= \{S_r, S_\theta, S_z\} \dots\dots\dots(3) \end{aligned}$$

荷重及び変位が円周方向（ θ 方向）にフーリエ展開出来るものとする。 0° と 180° を結ぶ直線に関して荷重が対称であるとする、次のように書ける。

$$\begin{aligned} \{U\} &= \sum_n [\Phi_n] \{U_n\} \dots\dots\dots (4) \\ \{P\} &= \sum_n [\Phi_n] \{P_n\} \dots\dots\dots (5) \quad \text{ここで } [\Phi_n] \equiv \begin{bmatrix} \cos n\theta & 0 & 0 \\ 0 & \sin n\theta & 0 \\ 0 & 0 & \cos n\theta \end{bmatrix} \dots\dots\dots (7) \\ \{S\} &= \sum_n [\Phi_n] \{S_n\} \dots\dots\dots (6) \\ \{U_n\} &\text{等は } n \text{ 次のフーリエ係数である。又、後に出る } \sigma_n \text{ 等も同様。} \end{aligned}$$

3-2 基礎式の算出
 仮想変位を $\{\bar{U}\}$, 仮想ひずみを $\{\bar{\epsilon}\}$ にとすると、 $\sin$, $\cos$ の直交性から、 n 次における仮想仕事の原理が導かれ、

$$\int \{\bar{\epsilon}_n\}^T \cdot \{\sigma_n\} r \, dr \, dz = \int \{\bar{U}_n\} \cdot \{P_n\} r \, dr \, dz + \int \{\bar{U}_n\} \cdot \{S_n\} r \, d\ell \quad (n=0,1,2,\dots) \dots\dots (8)$$

(8) 式を有限要素法の手法に従って定式化を行うと、

$$[B] \{\omega_n\} = \{F_p\} + \{F_s\} \dots\dots\dots (9)$$

$$[B] = \int ([Q_n][N])^T [D] ([Q_n][N]) r \, dr \, dz \dots\dots\dots (10)$$

$$\{F_p\} = \int [N]^T \{P_n\} r \, dr \, dz \dots\dots\dots (11)$$

$$\{F_s\} = \int [N]^T \{S_n\} r \, d\ell \dots\dots\dots (12)$$

$\{\omega_n\}$ は、三角要素の節点変位、 $[D]$ は弾性マトリックス、 $[N]$ は形状関数によるマトリックスである。

また、

$$[Q_n] = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial r} & \frac{1}{r} & 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial z} & -\frac{u}{r} \\ 0 & \frac{n}{r} & 0 & \frac{\partial}{\partial z} & 0 & \frac{\partial}{\partial r} - \frac{1}{r} \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial z} & -\frac{n}{r} & \frac{\partial}{\partial r} & 0 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (13)$$

応力は $\{\sigma_n\} = [D] ([Q_n][N]) \{\omega_n\} \dots\dots\dots (14)$ で求められる。

3-3 地盤パネの評価

地盤パネは図-2 のようなパイ . リニア型のパネを想定しており

$\{S_n\}$ を介して入れる。

$$\{S_{on}\} = [K] (\{U_{on}\} - \{U_n\}) \dots\dots\dots (15)$$

ここで

$$[K] = \begin{bmatrix} k_r & 0 & 0 \\ 0 & k_\theta & 0 \\ 0 & 0 & k_z \end{bmatrix} \dots\dots\dots (16)$$

k_r, k_θ, k_z は各々 r, θ, z 方向のパネ常数である。

$\{U_{on}\}$ は、パネ端に与える強制変位（地盤変位）である。パネを入れた場合(9)式は次のようになる。

$$([B] + [B_o]) \{\omega_n\} = \{F_p\} + \{F_s\} + \{F_{os}\} \dots\dots\dots (17)$$

$$[B_o] = \int [N]^T [K] [N] r \, d\ell \dots\dots\dots (18)$$

$$\{F_{os}\} = \int [N]^T [K] [N] \{\omega_{on}\} r \, d\ell \dots\dots\dots (19)$$

$\{\omega_{on}\}$ は節点で、パネ端に与えられる強制変位である。

4. 計 算 例

解析は著者らが現在、地震観測を実施している地下タンクに対して行った。地盤は概ね砂質シルトから成っている。タンクは内径 24 m 、深さ 10.3 m の地中連続壁と内巻きコンクリートによる二重RC構造である。タンクの概略寸法を図-3 に示す。地盤パネはせん断パネを考慮し、地層に応じて変化させた。地盤を多質点系モデルに置換し、平均応答スペクトル（土研）を用いて地盤変位を求めた。なお、基盤最大加速度を 1.00 gal とし、地盤の減衰定数を 5% とした。1次振動と2次振動に対する地盤変位を図-4 に示す。

図-5 はタンク内壁の変位を立体的に表わしたものである。

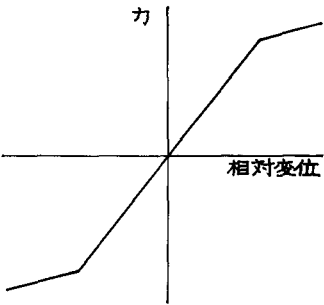


図-2

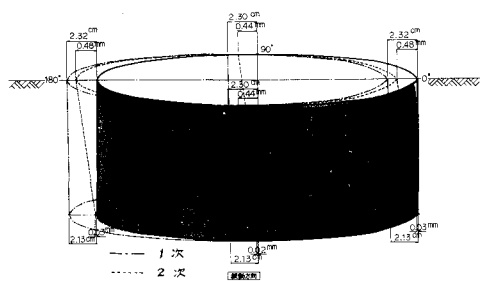


図-5 タンク内壁の変位

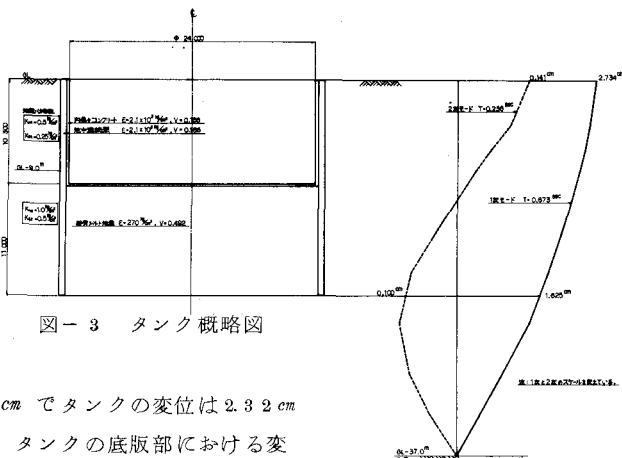


図-3 タンク概略図

1次振動では地表面における地盤変位は2.73cmでタンクの変位は2.32cmとなり、0.41cmの相対変位を生じている。又、タンクの底版部における変位は2.13cmであり、天端との変位差が殆ど生じず、全体的に並進する結果

がみられる。一方、2次振動については、1次振動に比べて地盤の絶対変位量が小さいためタンクの変位量が極めて小さくなっているが、底版の変位は殆どなく天端だけが変位する傾向を示している。これは地盤の2次振動モードの節がタンクの底版部にほぼ一致する事によるためと思われる。

図-6はタンク内壁の応力分布を示している。振動方向鉛直断面では σ_θ が最も大きく、1次振動では、タンク天端で2.05kg/cm²である。一方 σ_x は σ_θ に比べて小さな値を示し、側壁底部で0.42

kg/cm²、 σ_θ の5分の1となっている。又、 $\tau_{r\theta}$ 、 $\tau_{\theta z}$ は

ほぼ0となっている。2次振動についても同様の傾向がみられるが、1次振動に比べてかなり小さい。又、振動直角方向断面では σ_θ 、 σ_z 、 σ_r はほぼ0となり、 $\tau_{\theta z}$ 、 $\tau_{r\theta}$ が大きい。なお、本計算例では地震観測結果を検討する目的を持っており、タンク自重及び常時土圧を考慮していない。

5. あとがき

本解析は前述したような地中構造物の一般的な動特性を基本としている。これらの解析仮定は現在進めている地震観測及び模型実験の結果をもって検証したい。又、本解析法ではタンクに作用する地盤バネの評価の仕方が、タンクの地震時応力に大きな影響を及ぼすので、この点の検討を進めたい。なお、内容物の振動がタンクの応力に及ぼす影響及び危険物の溢出等の問題は今後に残された重要な課題である。

最後に、本研究を進めるに当たって多大な援助を頂いた大成建設坪根康雄、芙蓉情報センター中川克也の両氏に深く謝意を表します。