

## 内容液と地盤との相互作用を考慮した円筒タンクの地震応答解析

山口大学工学部 学生員 ○渡部 聖  
 山口大学工学部 正会員 中村秀明  
 山口大学工学部 正会員 浜田純夫

### 1. まえがき

従来、地上に建設される円筒形液体タンクの地震に対する安全性の検討は、タンク壁を剛体と仮定して地震力を静的な荷重に置換する慣用計算法を用いて行われており、タンク壁の弾性変形は考慮されていなかった。精度良い解析を行うためには、タンク壁面の変形が動液圧に及ぼす影響や、タンクの大形化に伴う地盤との相互干渉、地盤の減衰効果、杭の影響などを正しく取り入れる必要がある。そこで、本研究では内容液、タンク、地盤をすべて連成させた地震応答解析法を円筒タンクに適用する。

### 2. 解析方法

本解析手法は、半無限の広がりをもつ地盤の上に築造されている円筒タンクの地震応答解析を行うもので、地震力の各周波数成分に対する周波数応答を求め、フーリエ逆変換により時刻歴応答を求めるものである。内容液は理想流体と考え、速度ポテンシャル理論が成立つものとする。速度ポテンシャルを用いると内容液の運動は次式で表される。

$$\nabla^2 \phi = \frac{1}{r} \frac{\partial \phi}{\partial r} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \phi}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0 \quad (1)$$

式(1)にタンク壁面、タンク底面、自由水面での各境界条件を取り入れ、次のような内容液系の運動方程式が導かれる<sup>1)</sup>

$$[M_{\phi}]\{\ddot{\Phi}\} - [C_{\phi T}]\{\dot{U}\} + [K_{\phi}]\{\Phi\} = \{f_{\phi}\} \quad (2)$$

ここで、 $[M_{\phi}]$ は内容液の質量マトリクス、 $[C_{\phi T}]$ はタンクと内容液の連成マトリクス、 $[K_{\phi}]$ は内容液の剛性マトリクスであり、 $\{\Phi\}$ は速度ポテンシャル、 $\{U\}$ はタンク壁面の変位、 $\{f_{\phi}\}$ は荷重ベクトルである。

またタンク～地盤の動的相互作用については地盤の仮想境界に半無限地盤の効果を表す粘性境界を導入し解析を行った。粘性境界を導入したタンク～地盤の運動方程式は次式で表される。<sup>2)</sup>

$$[M]\{\ddot{u}\} + ([C] + [C_B] + [C_S])\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = -[M]\{I\}\ddot{u}_g + \{f\} + [C_S]\{\dot{u}_f\} + [G_S]\{u_f\} + [G_{CS}]\{\dot{u}_f\} \quad (3)$$

ここで、 $[M]$ 、 $[C]$ 、 $[K]$ はそれぞれ構造物・地盤系の質量、減衰、剛性マトリクス

$[C_B]$ : 底面での粘性境界マトリクス、 $[C_S]$ : 側方自由地盤における粘性境界マトリクス

$[G_S]$ : 側方自由地盤の変形に伴う境界剛性マトリクス、 $[G_{CS}]$ : 境界減衰マトリクス

$\{u_f\}$ : 自由地盤の変位、 $\{I\}$ : 加振方向により0,1を与えるベクトル、 $\ddot{u}_g$ : 基盤面加速度

式(2)と式(3)を連成させることにより次のような内容液～タンク～地盤連成系の運動方程式が導かれる。

$$\begin{bmatrix} M & 0 \\ 0 & M_{\phi} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u} \\ \ddot{\Phi} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C_T & C_{\phi T} \\ -C_{\phi T} & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{u} \\ \dot{\Phi} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K & 0 \\ 0 & K_{\phi} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u \\ \Phi \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} P_T \\ f_{\phi} \end{Bmatrix} \quad (4)$$

ただし、 $[C_T] = [C] + [C_B] + [C_S]$ であり、 $P_T$ は式(3)の右辺ベクトルである。

### 3. 解析モデル

解析モデルの概要を図-1に示す。タンクはコンクリート製で、地盤モデルとしては、道路橋示方書V耐震設計編<sup>3)</sup>に示されている地盤例の中からII種地盤のものを用いてモデル化した。また、地盤モデルの側方、底面には、遠方地盤の剛性や、エネルギー逸散効果を考慮するため、粘性境界を用いる。解析は、周波数領域において周波数間隔0.09766Hzで行い、入力加速度としては、El Centro NS成分の最大加速度を100galに修正したものをDeconvolutionによって基盤の加速度に変換し、モデルの基盤面より入力した。

4. 解析結果と考察

動液圧が最大値を示す時刻の動液圧分布を図-2に示す。図中実線は本手法による解析値である。比較のため、地盤を考慮せずタンク底面を固定とし、底面に最大100galの加速度を入力したものを一点鎖線で示し、また、水道施設耐震工法指針・解説<sup>4)</sup>に示されているBessel関数を用いた地震時動水圧算定式による動水圧分布（水平震度 $k_h = 0.05$ , 入力加速度50gal相当）を点線で示す。

本手法により求めた動水圧は地盤を考慮しないものに比べ小さな値となっており、分布形状も異なっている。これは地盤によってタンクが弾性支持されているためタンク壁面の変位により動水圧が小さくなっているものと思われる。図中一点鎖線で示される地盤を考慮せずタンク底面を固定したものは、動水圧分布が歪んでいるが、これはタンク壁面の断面変化の影響によるものである。点線で示される動水圧算定式はタンク壁面を剛と仮定し、水平震度 $k_h = 0.05$ として求めたものである。これは入力加速度に換算すると50galに相当するもので、内容液との連成を考慮したものは、動水圧算定式で求めた値の約半分の値になっている。

5. まとめ

本研究は、地盤との相互干渉の効果や、タンク壁面の変形が動水圧に及ぼす影響を考慮するため、軸対称FEMを用いて内容液～タンク～地盤連成系の地震応答解析を行ったものである。II種地盤上のコンクリート製タンクに本手法を適用した結果、タンク壁面の変形や地盤との連成を考慮することにより動水圧は小さくなることがわかった。

【参考文献】

- 1) 中村秀明、三浦房紀、浜田純夫：内容液と地盤との相互作用を考慮した液体貯蔵タンクの地震応答解析、山口大学工学部研究報告第43巻第1号,1992,10（投稿中）
- 2) 三浦房紀、浜田純夫、森川慎吾：非軸対称荷重を受ける地盤～構造物相互作用系における粘性境界、山口大学工学部研究報告第37巻第2号,1987
- 3) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説V耐震設計編,1990.5
- 4) 日本水道協会：水道施設耐震工法指針・解説,1979

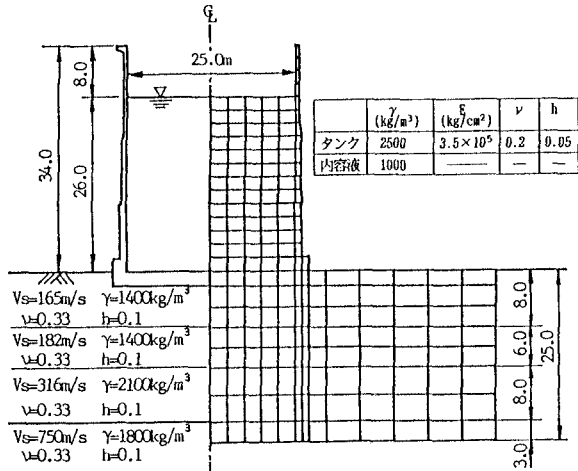


図-1 解析モデルの概要

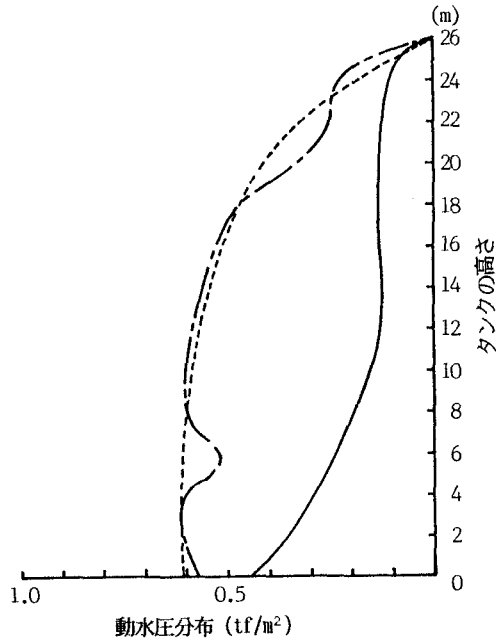


図-2 タンク壁面の動水圧分布