

論文

[1113] 卵形タンクの振動制御に関する研究

正会員○中村秀明（山口大学工学部）

正会員 浜田純夫（山口大学工学部）

正会員 三浦房紀（山口大学工学部）

正会員 森川慎吾（浅野工事）

1. まえがき

現在、わが国の污泥処理施設では省資源、省エネルギーの社会的要請に伴い、嫌気性消化法が一般に採用されている。西ドイツで開発された下水道の污泥処理施設の一つであるPC卵形消化タンクは、消化機能、機械設備、維持管理などの面で優れた特徴を有しており、既に西ドイツでは1956年以来120基を越える卵形消化タンクが建設されている。わが国においても近年各地で建設されており、今後都市部の人工増大や下水道の普及率の上昇に伴い、数多く、しかも大型のタンクが建設されるこ

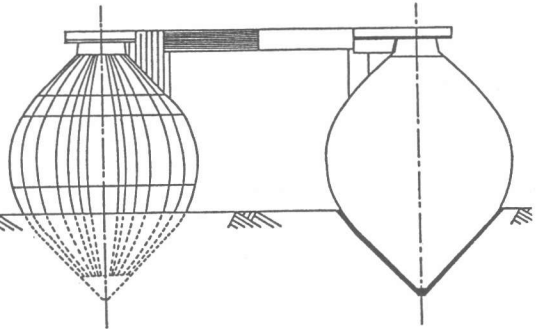


図-1 卵形タンク

とが予想される。しかし、地震多発国であるわが国においては、耐震性に対して十分な配慮を払わなければならない、しかも経済性を損なわない合理的な設計が要求される。そのためには卵形消化タンクの地震時挙動および応力を詳細に解明し、それに対して有効な配筋あるいはプレストレス量を決定しなければならない。従来、この様なタンクの地震応答解析においては、タンク単独あるいは有限の地盤を含めて解析が行なわれていた。著者らはこれまでの研究で、地盤に粘性境界を導入することにより半無限に広がる地盤を含めた構造物～地盤相互作用系の地震応答解析を軸対称有限要素法で行い良い結果を得ている。¹⁾ しかしながら、実際に卵形消化タンクが建設される場合、タンクが単体で建設されることは少なく、多くは複数のタンクが上部を連結されて建てられる場合が多い。（図-1参照）そこで、本研究では、複数タンク連成系の解析を行なうとともに、タンクの連結部をダンパー付きのジョイントで連結することによって、単なる地震応答解析だけではなく、地震に対する制振の効果も検討した。複数タンクの連成系を解析するのは容易ではなく、軸対称有限要素法をそのまま適用することはできない。従って本研究では、まず複数タンクを質点系でモデル化し、連結部に生じる力を求め、それを軸対称モデルに入力するという簡易的な方法で複数タンク連成系の地震応答解析を行った。

2. 解析方法

解析は、構造物を支える地盤の振動特性が全体の振動性状に及ぼす影響は大きいことが考えられるので、構造物・地盤連成系の振動性状に基づき動的相互作用を考慮に入れた解析を行なった。

まえがきでも述べたように複数タンクの連成系を軸対称有限要素法で解析することは不可能である。そこで本研究では、2-1に示すような簡易化した方法で複数タンク連成系の地震応答解析を行なった。さらに2-2には軸対称モデルの解析手法、2-3には質点系モデルの解析手法を示す。な

お、解析はすべて周波数領域で行なった。

2-1 複数タンク連成系の解析手法

(Ⅰ)タンクを軸対称要素でモデル化し、周波数
応答倍率、固有値を求める。(図-2参照)

(Ⅱ)タンクを質点系でモデル化し、周波数応答
倍率、固有値を求め(Ⅰ)で求めたものと一致す
る様、バネ定数、減衰定数を調整する。(図-
2参照)

(Ⅲ)質点系モデルをジョイントを用いて連結し、
連成モデルの周波数応答倍率およびジョイント
に生じる力 $f(t)$ を求める。(図-3参照)

(Ⅳ)軸対称モデルの上部に(Ⅲ)で求めた力 $f(t)$
)を入力する。この時の応答がタンク連成系の
応答となる。(図-4参照)

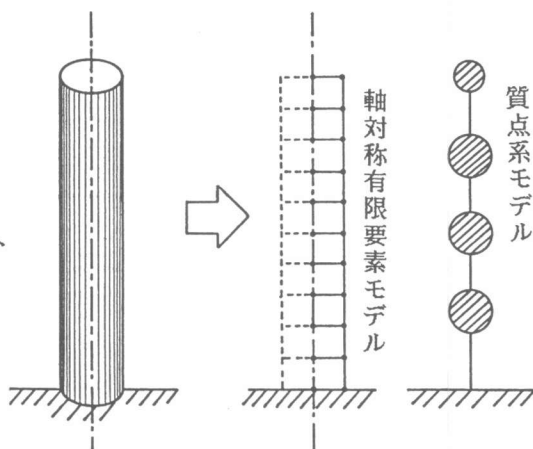


図-2 構造物の軸対称、質点系へのモデル化

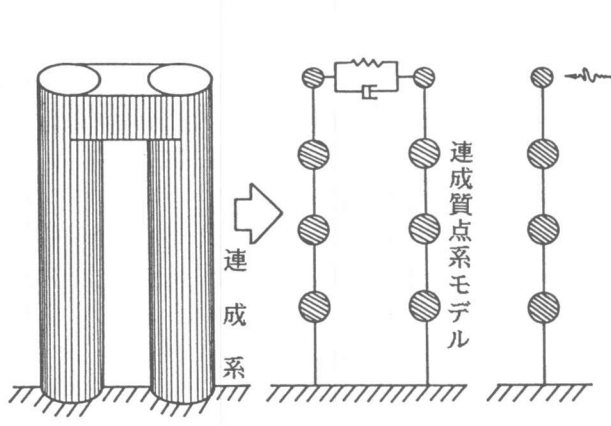


図-3 複数構造物連成系の質点系モデル

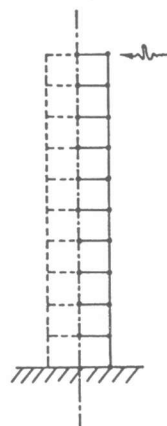


図-4 軸対称モデル複数連成系

2.2 構造物・地盤連成軸対称モデル

非軸対称荷重を受ける軸対称有限要素法は、円周方向に荷重および変位をフーリエ級数展開し、これらの任意の分布を表現するものである。解析は地盤～構造物の相互作用効果を考慮し、また地盤モデルの側方境界には遠方の地盤の剛性やエネルギー逸散効果を仮想境界で表わした粘性境界を用いた。地動加速度 $\{\ddot{u}_g\}$ を受ける粘性境界を導入した系の運動方程式は(1)式で与えられる。

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} + [C_b]\{\dot{u}\} + [C_s](\{\dot{u}\} - \{\dot{u}_r\}) \\ = [M]\{\ddot{u}_g\} + [G]\{u_r\} + [G_{cs}]\{\dot{u}_r\} \dots\dots\dots(1)$$

これを未知量と既知量に分けて周波数領域での運動方程式に書き換えると(2)式を得る。

$$(-\omega^2[M] + i\omega([C] + [C_B] + [C_s]) + [K])\{U\} = \omega^2[M]\{U_g\} + i\omega[C_s]\{U_f\} + [G_s]\{U_f\} + i\omega[G_{cs}]\{U_f\} \dots\dots\dots(2)$$

ここに、 $[M]$ 、 $[C]$ 、 $[K]$ はそれぞれ質量、減衰、剛性マトリクス、 $\{U\}$ は未知の変位ベクトル、 $\{U_f\}$ は $\{U_g\}$ 入力時の自由地盤の変位ベクトル、 ω は $\{U_g\}$ の円振動数である。 $[C_B]$ は基盤面における粘性境界マトリクス、 $[C_s]$ 、 $[G_s]$ はそれぞれ側方自由地盤との境界における粘性境界マトリクス、境界剛性マトリクスである。なお、各マトリクスの詳しい誘導過程については、文献[1]を参照されたい。また、減衰マトリクス $[C]$ 及び境界粘性マトリクス $[G_{cs}]$ はRayleigh減衰を仮定して、それぞれ次式で与えられるものとした。

$$[C] = \frac{h}{\pi f} [K], \quad [G_{cs}] = \frac{h}{\pi f} [G_s] \dots\dots\dots(3)$$

ここに、 f は一次の固有振動数であり、 h は f に対する減衰定数である。

(2)式を解くことにより未知変位 $\{U\}$ が求まり、あとは通常行なわれているフーリエ変換を用いた手法によって系の時刻歴応答が求まる。

2.3 構造物・地盤連成質点系モデル

解析に用いた構造物・地盤連成質点系モデルを図-5に示す。モデルは構造物・地盤の連成系列と構造物の影響を受けない自由地盤系列の2系列から構成し、地盤との相互作用効果については、バネ、ダッシュボットで表現する。

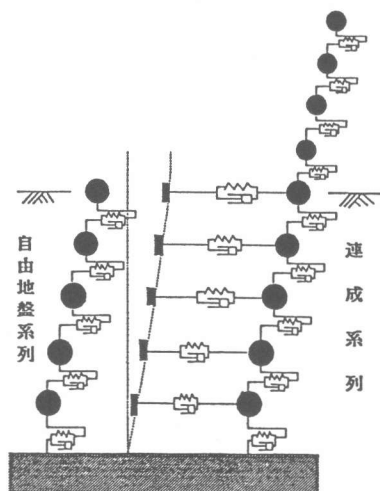


図-5 質点系モデル

〈運動方程式〉地動加速度 $\{\ddot{u}_g\}$ を受ける系の運動方程式は、自由地盤系列については(4)式であり、連成系列について(5)式である。応答計算は各時刻で両式を連立して解く。

$$[M_f]\{\ddot{u}_f\} + [C_f]\{\dot{u}_f\} + [K_f]\{u_f\} = -[M_f]\{\ddot{u}_g\} \dots\dots\dots(4)$$

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = -[M]\{\ddot{u}_g\} + [C_h]\{\dot{u}_f\} + [K_h]\{u_f\} \dots\dots\dots(5)$$

ここに、 $[M_f]$ 、 $[C_f]$ 、 $[K_f]$ は自由地盤の質量、減衰、剛性マトリクス、 $\{u_f\}$ は自由地盤の変位、 $[M]$ 、 $[C]$ 、 $[K]$ はそれぞれ地盤～構造物の質量、減衰、剛性マトリクス、 $[C_h]$ 、 $[K_h]$ は地盤の伸縮減衰、伸縮剛性マトリクスである。

〈バネ定数〉連成系列の構造物は、せん断型モデルとし、地盤は構造物の底面積の3～5倍程度の土柱で質点系モデルに置換し、各質点間はせん断バネで結ぶ、水平方向伸縮バネは上下方向フリー奥行き方向拘束の平面歪問題としている。これらのバネ定数は(6)、(7)に示す簡単な方法で求め、地盤の各質点の重量は(8)のように求める。

$$\text{せん断バネ} \quad k = GA / \ell \dots\dots\dots(6)$$

$$\text{水平バネ} \quad k = EA' / (1 - \nu^2) \cdot \ell' \dots\dots\dots(7)$$

$$\text{地盤重量} \quad W = \frac{\rho_i A \cdot H_i}{2} + \frac{\rho_{i+1} A \cdot H_{i+1}}{2} \dots\dots\dots(8)$$

G ：地盤のせん断弾性係数	E ：地盤のヤング係数	ν ：地盤のポアソン比
A ：底面面積	A' ：側面面積	ℓ ：高さ
ρ ： i 層の土の単位体積重量	H ： i 層の層厚	ℓ' ：長さ

自由地盤系列は並列する別の系として単位面積の土柱を質点系モデルで表わし、この系列の応答を先に求めて、その応答変位、速度を水平バネ・ダッシュポットを介して強制外力として連成系に作用させる。

〈減衰定数〉構造物・地盤連成系の減衰はRayleigh減衰を仮定して、(9)式で与えるものとする。

$$[C] = \frac{h}{\pi f_1} [K] \dots \dots \dots (9)$$

水平方向については(10)式で与えられ、自由地盤系列の減衰は(9)式により計算される。

$$[C_h] = 2 h_h \cdot \sqrt{M \cdot K_h} \dots \dots \dots (10)$$

3. 解析モデル

解析に用いた卵形P Cタンクの軸対称モデルを図-6に示す。解析は内容液が入っているタンクと空のタンクが上部を連結されている場合を想定して行なった。タンクを構成する材料は全て一様とみなし、断面剛性の評価では、コンクリートの全断面を有効とした。表-1にその材料定数を示す。内容液と壁面との連成は本研究では考えず、内容液は固定水(付加質量)として扱った。これは、卵形P Cタンクが水平振動を行なう際には、内容液の93%以上が付加質量として働くという、小坪らの研究結果²⁾に基づくものである。また地盤は2層からなるものとし、その材料定数を表-2に示す。質点系のモデルを図-7に示す。

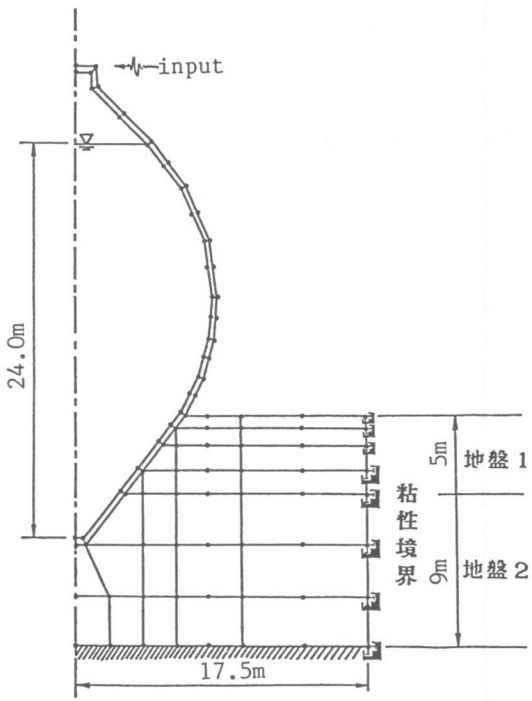


図-6 タンクの軸対称モデル

表-1 タンクの材料定数

単位体積重量 γ	2.5	t/m ³
ヤング係数 E	3.5×10^5	kg/cm ²
ポアソン比 ν	0.2	
せん断波速度 V_s	2390.0	m/sec
減衰定数 h	0.05	

表-2 地盤の材料定数

	地盤 1	地盤 2
単位体積重量 γ	1.6	1.8 t/m ³
ポアソン比 ν	0.4	0.4
せん断波速度 V_s	200.0	500.0 m/sec
減衰定数 h	0.1	0.1

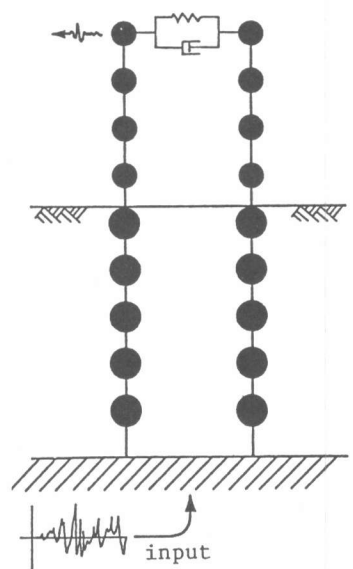
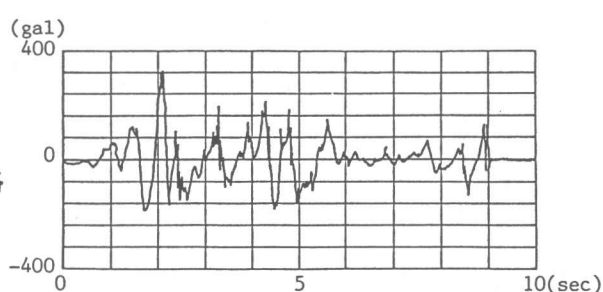


図-7 タンクの質点系モデル

入力加速度としては地表面の加速度 (gal) であるEl Centro NS成分無修正 (Imperial Valley地震 1940 最大加速度326 gal 卓越振動数1.15Hz) をDeconvolutionによって基盤面の波形に変換し、各モデルの基盤より入力した。基盤面の波形を図-8に示す。



4. 解析結果

図-9に単独タンクを質点系モデルで解析した場合と軸対称有限要素法で解析した場合のタンク頂部における変位の周波数応答倍率を示す。両者は地盤を含めているため地盤のモデル化、境界処理の違いなどのため、地盤を含めない場合に比べ一致の程度はやや劣るが、だいたい一致している。図-10には単独タンクと連成タンクの頂部における周波数応答倍率を示す。卵形PCタンクが地震動を受けた時は、タンクが独立して建てられている場合よりも上部が結合されている連成系の方が加速度の周波数応答倍率で約30%の低減がみられ、耐震上有利であることがわかる。図-11にはEl Centro波形入力時の単独タンク、連成タンクの頂部における時刻歴応答を示す。これらの波形は、全体的に一次の固有振動数が卓越しており、振幅も比較的大きくなっている。これは、単独タンク、連成タンクともに系全体の固有一次振動数がEl Centro波形の固有一次振動数1.15Hzとほぼ一致しており、系全体が共振状態になっているためと考えられる。最大加速度は単独タンクの場合1400gal、連成タンクの場合で1000galとなりこれも同様に連成タンクの場合約30%の低減が見られる。次に地震力を受けた場合、応力が集中されることが予想される地表面との境界付近の要素について、その応力 σ_r の時刻歴を単独モデル、連成モデルの場合についてそれぞれ図-12~15に示す。単独モデル、連成モデルいづれも根入れ部分の要素よりも地表部分の要素の方が応力が大きくなっている。これまで行なわれた同様の解析ではタンクと地盤の境界付近に応力が集中することがわかっているが、

図-8 基盤面加速度

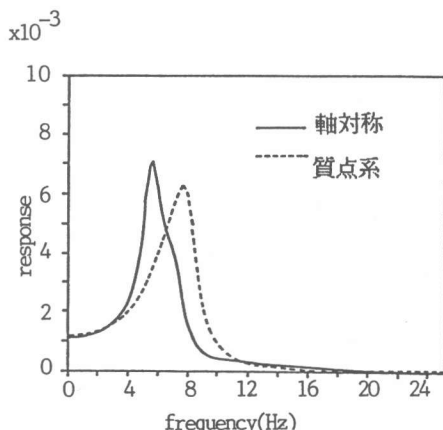


図-9 単独タンクの変位周波数応答倍率

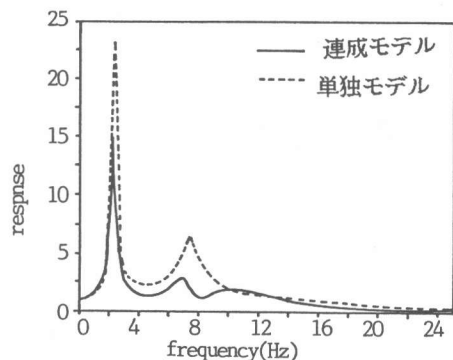


図-10 軸対称モデルの加速度周波数応答倍率

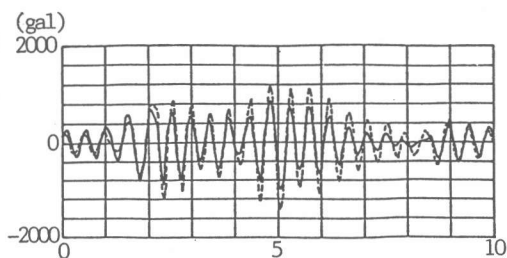


図-11 軸対称モデルの加速度時刻歴(sec)

この結果より、タンクの根入れ部分よりも地表面付近により応力が集中することがわかる。また連成系モデルの方が単独モデルよりも応力の値が小さくなっている。

5. まとめ

本研究は、軸対称有限要素法では今まで不可能であった複数タンクの連成系を簡単な手法を用いて軸対称有限要素法で解析した。今回はその手法の妥当性を評価でき、さらに以下のことがわかった。

①複数の連成タンクを質点系でモデル化し、そのジョイント部に生じる力を軸対称モデルに入力することによって、軸対称モデルでも連成系を解析することができる。

②ここでの結果はほんの一例にすぎないが、タンク単独の場合より連成させたほうが応答が低減する場合がある。

③タンクに生じる応力はタンク単独、連成系ともに、根入れ部分よりも地表面付近により応力が集中する。

今後、さらに多くモデルについて解析を行なう予定である。

【参考文献】

- 1) 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、1986、pp.67~76
- 2) 小坪清真、高西照彦、吉岡民夫、鳥野 清：卵形消化槽中の内容液による地震時壁面衝撃圧の一解法、土木学会論文集第356号 I-3、1985、pp.343~352
- 3) 武藤 清、本橋章平：鋼製原子炉格納容器の振動解析、日本建築学会論文報告集第338号、1984、pp.19~28
- 4) 周 義敦、大沢 胖：建物・地盤連成系振動解析による建物の振動性状に関する一考察、日本建築学会大会学術講演梗概集、1986、pp.561~562

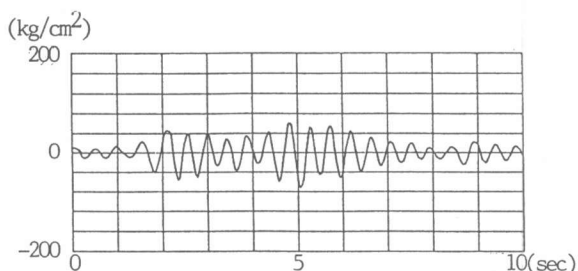


図-12 単独モデル応力 σ_r の時刻歴（根入れ部分）

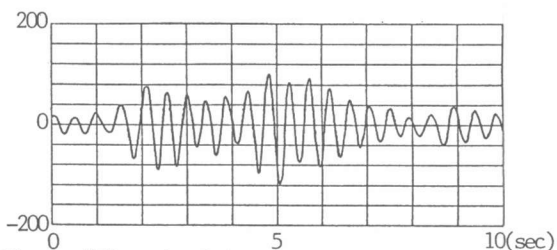


図-13 単独モデル応力 σ_r の時刻歴（地表面部分）

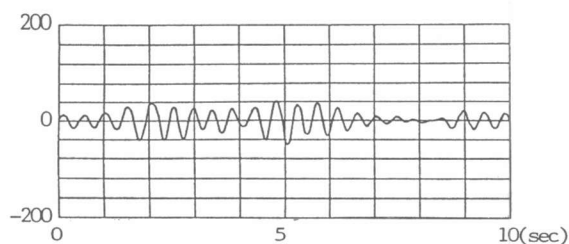


図-14 連成モデル応力 σ_r の時刻歴（根入れ部分）

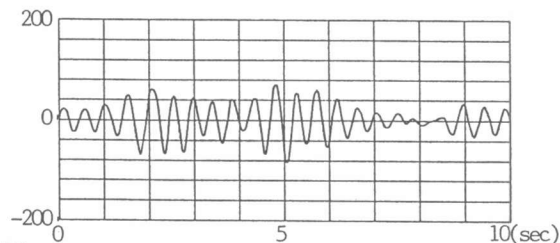


図-15 連成モデル応力 σ_r の時刻歴（地表面部分）