

清水建設(株)土木設計部 正会員 井畔 瑞人
 青藤 一郎
 ○中松 新

1. はじめに

我々はLNG地下タンクが軟弱地盤上に建設されることを想定して、地震時の動的挙動を把握するためにそれに対する地震応答解析を行った。軟弱地盤に設置される構造物は、その振動性状が地盤の振動に大きく影響を受ける。この点を考慮して、タンクと地盤を連成させた軸対称問題として、有限要素法を適用して解析した。解析例には、タンク周辺が未凍結状態と凍結状態を考慮、両者を比較することにより若干の考察を加えた。

2. 解析法

1) モデル化

次に示す3つの有限要素を用いた。

- i) タンク周辺の3次元的に広がる地盤に対して3角形リング要素を使用。
- ii) 地震時の地下タンクに生ずる断面力を算定するために軸対称シェル要素を使用。なお、両要素の変位成分を一致させるために、シェル要素の回転成分を静的釣合条件を導入して消去している。
- iii) 有限要素法を用いて動的問題を解析する場合に、しばしば側方境界でのエネルギー逸散効果をどの様に処理するかということが問題になる。我々は無限に続く地盤の境界処理として、半無限要素を軸対称3次元問題に拡張して使用した。

2) 解析法および減衰について

解析は直接積分法とモーダルアナリシスの両方が可能であるが、今回は後者で行った。減衰については、1次のモードに対して、実際に $\{U\}(C)\{U\}$ を計算して得られる対角項成分 C_{11} が、近似的に $2\omega_l h_1$ に一致するものとして

$$h_1 = \frac{C_{11}}{2\omega_l} \quad (1)$$

より減衰定数 h_1 を求めた。2次以下

のモードに対しては、

$$h_l = \frac{2\zeta_l}{\omega_l} h_1 \quad (l=2, 3, \dots) \quad (2)$$

により入力した。ただし減衰マトリックス(C)は次に示す方法で作成した。材料特性がフォークトモデルで表わされるものと仮定し、これにSeed等のいう等価減衰定数(履歴減衰)の考え方を導入すると

$$\eta = \frac{E_d}{E_s} \sin(\tan^{-1} e_d) \quad (3)$$

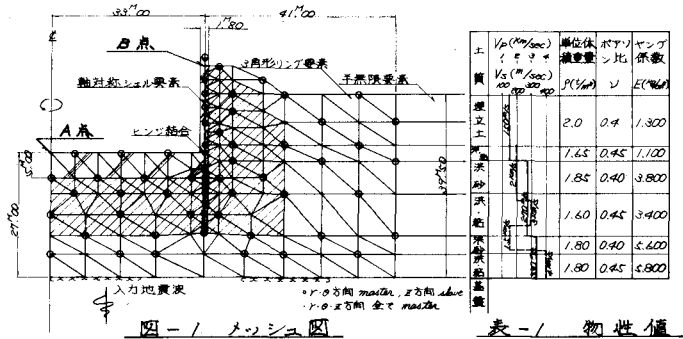
の関係が成立する。ただし η ; フォークトモデルの粘性係数, E_s ; 等価減衰定数, ω ; 固有振動数, E_d ; 動弾性係数である。3次元問題に対して応力-ひずみ関係が

$$\{\sigma\} = [D]\{\epsilon\} + \{\alpha\}\{\dot{\epsilon}\} \quad (\{\alpha\} = \frac{\eta}{2\omega} [D]) \quad (4)$$

で表わされるものとし、要素の減衰マトリックスを $(C)e = \int_{vol} (B)^T \{\alpha\} (B) dV$ で作成して、全体系の減衰マトリックス(C)を作った。ここで、[D]: 弾性マトリックス, [B]: ひずみマトリックス, μ, λ : Lamé定数である。具体的にはタンクシェル要素の η を2%, 地盤に対しては20%とし、 ω は固有値計算で得られた1次の固有振動数を用いた。

3) 解析例

図-1に示すモデルで計算した。物性値は表-1に示す通りである。未凍結状態、凍結状態の振動特性を比較するために次に示す2ケースについて計算した。



CASE 1 — タンク周辺が全て未凍土

CASE 2 — タンク周辺の図-1に示す斜線領域が凍結。その他の領域は未凍結。

なお、凍結土の物性は別の地盤で行った凍土試験結果³⁾を使用した。減衰定数は $\alpha=2$ に示した方法で算定し、 $\nu=7\%$ とした。入力地震波は、EL CENTRO N-Sを用い、最大入力加速度を 100 gal として始めの6.5秒を入力した。モードは1~5次までを重ね合わせた。

解析結果を図-2~図-8に示す。タンクとタンク近傍地盤の変位、加速度応答値はタンクの剛性が大きいので、地盤の振動特性に抵抗するため、タンクから離れた地盤の応答値よりも小さくなる。ただし、半無限要素取り付け位置で応答が一定値に収束していない。構造物と地盤の相互作用の影響範囲を考え、半無限要素の取り付け位置をどの程度まで構造物に近づけることができるかという問題が残る。タンク周辺が凍結すると剛性がさらに大きくなるのでタンクの応答値は、未凍結状態に比べて小さくなっている。図-7によれば、A点とB点の応答波形は同位相で同一波形をしており、タンクが剛体変形をしていることが分かる。また入力波形にみられる短周期成分の波形が消滅し、1次の固有周期 $T=0.6$ 秒の波長のみが現われており、タンク全体が $T=0.6$ 秒のサイクルで振動している様子もよく分かる。

4. あとがき

解析モデルは現在地震観測中のタンクについて行った。観測波形と解析結果を対比させ、今後の解析法に対する検討資料にしたい。無限地盤を評価するために使用した半無限要素を軸対称動的の問題に限らず、他の分野にも適用したいと考えている。本解析ではタンク内部液体の影響を無視した。タンクと内部液体の相互作用を考慮した解析が今後残された問題である。

(参考文献) 1)川原、竹脇、斉藤;有限要素法による動的解析の一方法(土木学会年次学術講演集第29回)

2)竹脇、中松、田蔵;半無限要素の特性について(土木学会講演集第30回)

3)武川、大平、斉藤、竹脇、中松;地下構造物(LNG地下タンク)の地震応答解析について(第10回土木工学研究会)

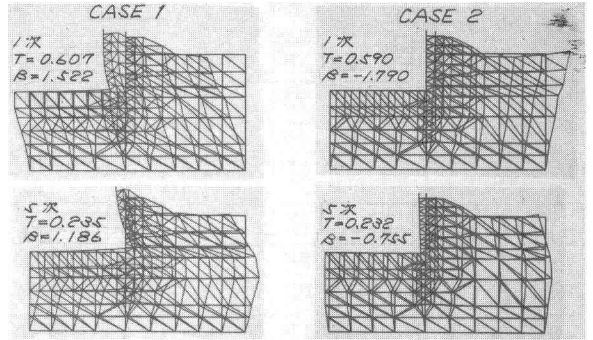


図-2 モード図

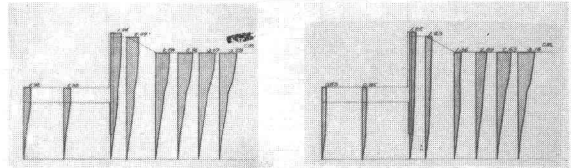


図-3 最大変位応答

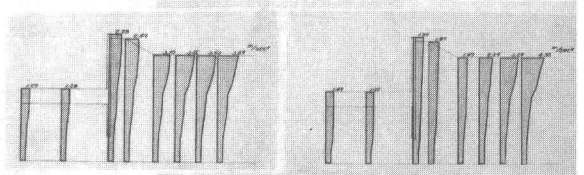


図-4 最大加速度応答

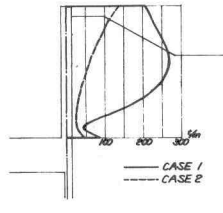


図-5 最大軸力(X方向)

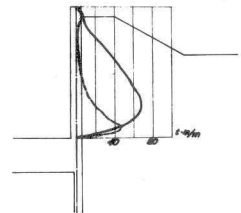


図-6 最大曲げモーメント(theta方向)

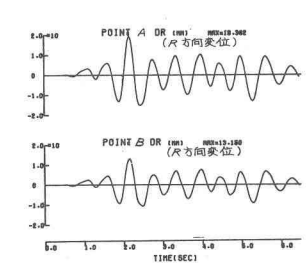


図-7 A点、B点の変位応答波形(CASE 1)

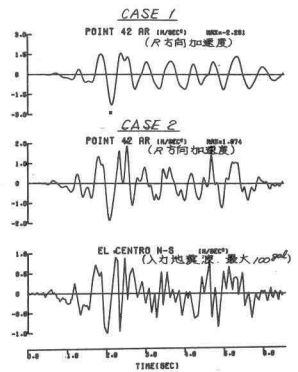


図-8 B点の加速度応答波形