

佛大杯組 正員 ○河村 秀紀  
佛大杯組 正員 後藤 洋三  
佛大杯組 正員 徳永 正博

## 1. はじめに

流体を考慮した構造物・地盤連成系の振動解析について報告する。本解析手法は地震時における流体の動液圧と液面動揺を算定することを目的として開発したもので、次に示す特徴を有する。全体系は有限要素法で解析し軸対称構造系に対称又は非対称荷重が作用するモデルを設定している。地盤のモデル化に際しては、逆散減衰を評価するために Wass<sup>(1,2)</sup>が提案したエネルギー伝達境界と、Lysmer<sup>(3)</sup>が提案した粘性境界と軸対称系に拡張し導入した<sup>(4)</sup>境界条件を含めて系全体は振動数領域での計算となり、フーリエ変換を用いて時間領域から振動数領域に変換している。解析にあたっては次の仮定を設定した。(1)地盤は弾性体で粘性減衰と逆散減衰を考える。(2)流体は非圧縮完全流体とする。(3)自由表面での液面動揺は微小振幅波とする。系全体の模式図を図-1に示す。

## 2. 基礎式

### (1) 流体

a) 自由表面上(ベルヌーイの式と微小振幅波理論)

$$\eta = \frac{1}{g} \frac{\partial \phi}{\partial t} - p_a - \rho \ddot{u}_g x \quad \dots (1)$$

$$\dot{\eta} = \frac{\partial \phi}{\partial x} \quad \dots (2)$$

ここで

$\eta$  : 波高

$\phi$  : 速度ポテンシャル

$p_a$  : 大気圧

$\rho$  : 流体圧

$\rho$  : 密度

$\ddot{u}_g$  : 加速度

b) 流体内部

$$\nabla^2 \phi = 0 \quad \dots (3)$$

$$p = \rho \frac{\partial \phi}{\partial t} \quad \dots (4)$$

\* 内部液を考慮する層流体も考慮

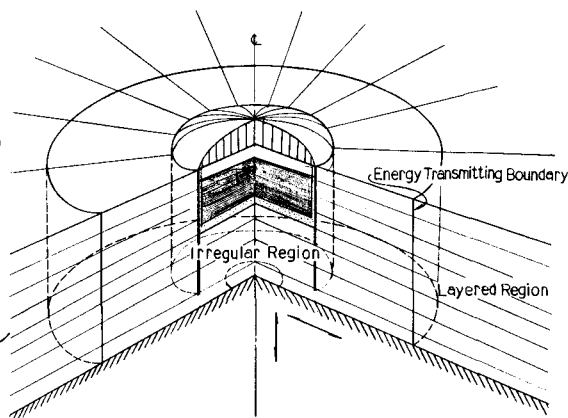


図-1 系の模式図

### (2) 流体・構造物相互作用

$$r \ddot{\omega} = r \phi_n \quad \dots (5)$$

$$r p n = r \ddot{f} \quad \dots (6)$$

相互作用の模式図を図-2に示す。(5),(6)式を離散化して相互作用要素として用いる。右辺は合成すれば0になる。

$\omega$  : シェルに垂直方向への変位  $n$  : シェルから流体内部に向うベクトル

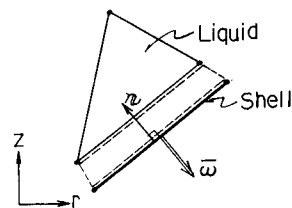


図-2 相互作用

### (3) 全体系の方程式(基礎加速度入力による相対変位系)

$$a) [M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = -\{m\}\ddot{y} - \{V\} + \{F\} - \{T\} \quad \dots (7)$$

$[M]$   $[C]$   $[K]$  : 質量, 減衰, 剛性マトリックス

$\{u\}$  : 相対変位

$\ddot{y}$  : 基礎加速度

$\{m\}$  : 加振方向に対応する質量ベクトル

b) {V} 粘性境界により生ずるバウトル (図-3)

$$\{V\} = [C_v]\{\dot{u}_i - \dot{u}_f\} \quad \dots (8)$$

ここで  $[C_v]$  ; Partial Viscous Boundary matrix

$\{\dot{u}_f\}$  ; Free Field の速度応答

c) {F} Free Field 内の鉛直面に作用する力 } (図-4)  
{T} エネルギー伝達力

$$\{F\} = [G]\{u_f\} \quad \dots (9)$$

$$\{T\} = \{[R] + [L]\}\{u_i - u_f\} \quad \dots (10)$$

ここで  $[G]$  ; Free Field の複素弾性定数

$[R]$  ; Rayleigh 波の吸収システム

$[L]$  ; Love 波の吸収システム

d) 入力, 変位のフーリエ変換

$$\ddot{y}(t) = \text{Re} \sum_{n=0}^{\infty} \ddot{y}_n \exp(i\omega_n t) \quad \dots (11) \quad \{u\} = \text{Re} \sum_{n=0}^{\infty} \{u\}_n \exp(i\omega_n t) \quad \dots (12)$$

$$\{u_f\} = \text{Re} \sum_{n=0}^{\infty} \{u_f\}_n \exp(i\omega_n t) \quad \dots (13)$$

e) (8)~(13)式を(7)式に代入して

$$([K] + [R] + [L])_n + i\omega_n[C] + i\omega_n[C_v] - \omega_n^2[M] \{u\}_n = -[m] \ddot{y}_n + ([G] + [R] + [L] + i\omega_n[C_v]) \{u_f\}_n \quad \dots (14)$$

f) (14)式を  $\ddot{y}_n = 1$  に対する複素応答として求めておく。  $\{F\}_n$  ; 基礎の単位入りの運動に対する応答

$$[K]_n \{F\}_n = \{P\}_n \quad \dots (15)$$

$$\{F\}_n = [K]_n^{-1} \{P\}_n \quad \dots (16)$$

$$g) \{u\} = \text{Re} \sum_{n=0}^{\infty} \{F\}_n \ddot{y}_n \exp(i\omega_n t) \quad \dots (17)$$

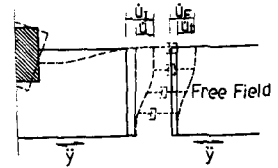


図-3 粘性境界概念図

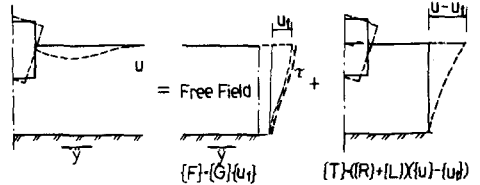


図-4 伝達境界概念図

### 3. 解析手法

上記基本式の複素応答を求める手法として Irons<sup>5)</sup>が発表したウェーブフロント法を複素数領域まで拡張したものを導入している。流体系, 構造系, 地盤系それぞれ固有の周波数特性が異なる点に着目し, 特に短周期領域と, やや長周期領域 (1~10 sec) での現象を解析する場合 Δt のステップ幅を調整することにより計算時間の短縮をはかった。

### 4. 解析モデル

流体を考慮したモデルとして図-5に示す地下式貯槽を設定し, 入力としては短周期成分を含むものと長周期成分を含む2波を選定し, 上下, 水平方向入力として現行解析中であり, 結果は講演会で報告する。

### 5. おわりに

本プログラム開発にあたり (株) 受容情報センター・中川氏 (御入林組技術研究所) 白砂氏に多大なる協力をいただきました。ここに深く感謝いたします。

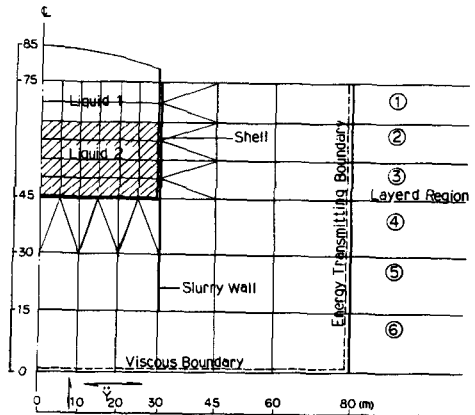


図-5 解析モデル

#### <参考文献>

- 1) Wass, G. 'Linear Two-Dimensional Analysis of Soil Dynamics Problems in Semiinfinite Layered Media'
- 2) Kausel, E. 'Forced Vibration of Circular Foundations on Layered Media'
- 3) Lysmer, J. and R.L. Kuhlemeyer, 'Finite Dynamic Model for Infinite Media'
- 4) 白砂, '地盤-構造物系動的相互作用における分散波の検討', 第35回土木学会大会, 1985
- 5) Bruce M. Irons 'A Frontal Solution Problem for Finite Element Analysis'