

II-302 フレキシブル マウンドの地震時付加質量特性

清水建設(株) 技術研究所 (正) 大山 巧 (正) 田 中 正 博
 清水建設(株) 大崎研究室 (正) 清 川 哲 志
 建設省土木研究所 海岸研究室 (正) 宇 多 高 明 (正) 村 井 禎 美

1. はじめに

著者らは、新しいタイプの波浪制御構造物として可撓性膜の中に水を詰めた柔構造の潜堤(フレキシブルマウンド, 以下FLMと呼ぶ)を提案し、構造物の天端が低く、従来の潜堤では防波機能が期待できない場合でも、FLMでは波の透過率を低くできることを明らかにした¹⁾。FLMに作用する主な外力には、波力と地震時流体力があるが、FLMは多自由度振動系であるため、特に地震時の挙動は通常の剛構造物とは異なるものと考えられる。すなわち、剛構造物の付加質量係数は、表面波の影響を受けない範囲の振動数領域では一定であるのに対して、FLMの付加質量係数は、振動数に依存する。そこで本研究では、線形理論に基づいてFLMの付加質量係数を求める解析法を提案し、その特性を検討する。

2. 解析理論

(1) 可撓性膜のモデル化と運動方程式: 図-1に示すように、水深 h の海域にFLMがあり、膜の両側の固定点(膜と海底面との交点)が振幅 A_0 、角振動数 ω で水平に振動するものとする。流体を非圧縮、非粘性、非回転とし、線形ポテンシャル理論に基づいて膜の運動を考える。また可撓性膜を連続体として取扱うことは困難なので、本理論ではこれを質点-線形バネ系に離散化する。図-2は j 番目の質点に作用する力を示したもので、 F_j は膜内外の圧力差に伴う流体力、 f_j, f_{j-1} はバネ要素に発生する張力、 f_0 は質点の水中重量を表す。このとき質点の x, z 方向の運動方程式は、以下のように表せる。

$$-m_0 \omega^2 \begin{pmatrix} (a_x)_j \\ (a_z)_j \end{pmatrix} e^{-i\omega t} = \begin{pmatrix} (F_x)_j \\ (F_z)_j \end{pmatrix} + f_j \begin{pmatrix} \sin \theta_j \\ \cos \theta_j \end{pmatrix} - f_{j-1} \begin{pmatrix} \sin \theta_{j-1} \\ \cos \theta_{j-1} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 0 \\ f_0 \end{pmatrix} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ただし、 m_0 は質点の質量、 $(a_x)_j, (a_z)_j$ は質点の x, z 方向の運動振幅、 $(F_x)_j, (F_z)_j$ は F_j の x, z 成分である。式(1)において、 $(F_x)_j, (F_z)_j$ は膜の外側と内側の表面での速度ポテンシャル ϕ_1, ϕ_2 を用いて、また f_j と θ_j は質点の運動振幅 a_x, a_z を用いて表すことができ、式(1)を各質点についてたてるとにより、 $(\phi_1)_j, (\phi_2)_j$ ($j=1 \sim N, N$: 質点数)、 $(a_x)_j, (a_z)_j$ ($j=2 \sim N-1$)を未知数とする $2N-4$ 本の連立方程式を得る。ただし、 $(a_x)_1 = (a_x)_N = A_0, (a_z)_1 = (a_z)_N = 0$ である。

(2) 境界積分方程式: 流体領域 Ω_1 と Ω_2 に2次元グリーン関数法を適用すると、膜の外側と内側の表面での速度ポテンシャル ϕ_1, ϕ_2 と膜の法線方向速度に関する境界積分方程式を得る。この場合、領域 Ω_1 におけるグリーン関数 G_1 としては、表面波の影響がある範囲では通常の線形波動問題におけるグリーン関数²⁾を、振動数が高く表面波の影響が無視できる範囲では、自由表面上で $G_1=0$ を満たすグリーン関数を用いればよい。また、領域 Ω_2 におけるグリーン関数 G_2 としては、2次元ラプラス方程式の一般解を用いている。ここで、膜の法線方向速度を膜の運動振幅 a_x, a_z で表し、これらの積分方程式を線形要素を用いて離散化する

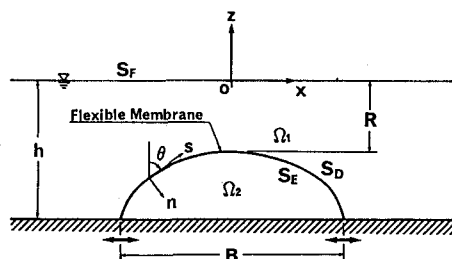


図-1 座標系と記号の定義

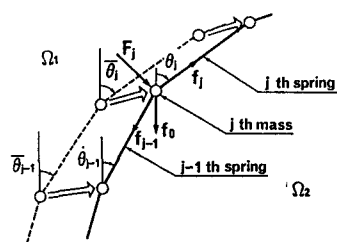


図-2 質点に作用する力

ことにより、 $(\phi_1)_j, (\phi_2)_j, (a_x)_j, (a_z)_j$ に関する2N本の連立方程式が得られ、前述の運動方程式と連立すれば全未知数が決定できる。

3. 数値解析結果

(1) 剛構造物との特性比較：図-3は、 $\omega^2 h/g$ に対する付加質量係数 C_M の特性に関して、FLMと剛構造物で比較した結果を示したものである。ただし、 $C_M = (\text{水平方向の流体力の振幅}) / \{(\text{FLM内部の流体の質量}) \times (\text{入力加速度振幅})\}$ である。また剛構造物の形状は、静水時のFLMの形状に一致させている。FLMの C_M は、理論上 $\omega^2 h/g$ のほかに、 $B/h, R/h, E/\rho_m B g, P_0/\rho g h, \rho_m/\rho, \varepsilon/h$ (E, ε : 膜の弾性率と厚さ、 P_0 : FLM内部に付加する圧力、 ρ_m, ρ : 膜と流体の単位体積重量) の無次元パラメータに支配されるが、これらはそれぞれ3.0, 0.5, 1000.0, 0.1, 1.2, 0.03としている。なお、質点数はいずれも61とし、 $\omega^2 h/g = 30$ までは G_1 として表面波の影響を考慮したグリーン関数を用いている。図に示すように、剛構造物の C_M は、低振動数領域では表面波の影響で値が変化しているが、 $\omega^2 h/g$ が20以上の高振動数領域では一定の値を持つようになる。一方、FLMの C_M の特性には、図中に矢印で示すように共振振動数 (FLMの固有振動数) が複数現れており、振動数の変化に対して C_M の値も大きく変動するのがわかる。特に、表面波の影響がない (造波減衰が0になる) 高振動数領域では、共振振動数で C_M は無限大になる。また逆に共振振動数の間には、 C_M が0になる振動数が現れる。図-4は、図-3の結果に現れている共振振動数付近における膜の動き (相対変位) を模式的に示したものである。水平加振のみを考えた関係で、膜の中点の相対変位はいずれの場合も0 (節) になるが、振動数が高くなるにつれて節の数が増えているのがわかる。

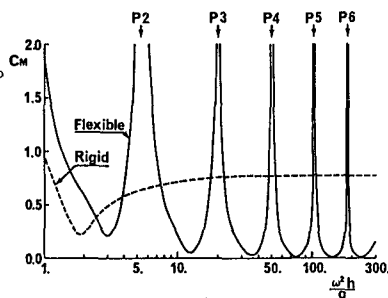


図-3 付加質量特性

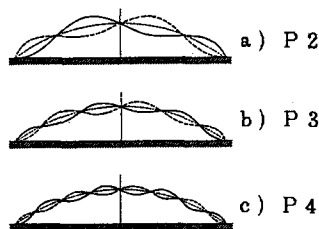
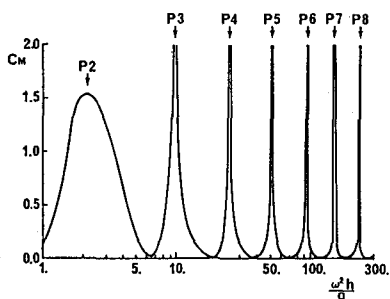
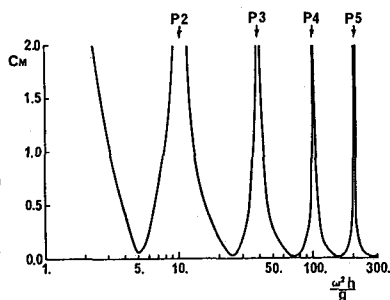


図-4 膜の振動形



a) $P_0/\rho g h = 0.05$



b) $P_0/\rho g h = 0.20$

図-5 付加圧力による特性の変化

(2) 付加水圧の影響：図-5は、無次元パラメータのうち、 $P_0/\rho g h$ が付加質量特性に及ぼす影響を示したものである。なお他のパラメータの値は、図-3に示した場合と同様である。図-5からわかるように、 $P_0/\rho g h$ が大きくなると、共振振動数、すなわちFLMの固有振動数は高振動数側にずれてくる。ただし、表面波の影響がない範囲では、共振振動数で C_M が無限大になること、共振振動数間では $C_M = 0$ になる振動数が存在することといった基本的な性質は変わらない。なお、 $P_0/\rho g h = 0.5$ の特性において、低振動数領域で有限な極大値が現れているが、これは造波減衰の影響によるものである。

4. おわりに

FLMの地震時付加質量係数 C_M を線形理論に基づいて求め、その特性を検討した。その結果、FLMの C_M は、通常の剛構造物と異なり振動数に強く依存し、 C_M が無限大になる共振振動数が複数存在するとともに、共振振動数間には $C_M = 0$ となる振動数が存在することが明らかになった。今後は、本解析結果を実際の地震波に適用するために、地震波の周波数不規則性を考慮したスペクトル応答解析を行う予定である。

- 1) 田中 他: フレキシブルマウンドによる透過・反射特性の実験的検討, 第34回海岸工学講演会論文集, pp.492~496, 1987.
- 2) John, F.: "On the Motion of Floating Bodies II", Communication in Pure and Applied Mathematics, Vol. 3, pp.45~101, 1951.