

大断面矩形柱に働く波力

大阪市立大学工学部 正員 小田一紀
 " " " 入保直
 " " " 学生員 門口達彦

1. まえがき

矩形柱体に働く波力問題は井島ら¹⁾が任意形状の堤体による波の散乱問題に関連してGreen関数法を適用して理論的に解析しているが、実験による検証はしていない。Mogridgeら²⁾は $b < 0.64L$ (b :正方形断面の辺長、 L :波長) の範囲で正方形断面柱に働く波力をMacCamy & Fuchsの円柱に対する回折波理論を適用して近似的に解き、実験値との比較を行い、良い結果を得ている。また Isaacson³⁾は井島らと同様にGreen関数法を適用して任意形状柱体の波力を解析し、矩形柱に対して計算値と実験値の良好一致を確認しているが、波長に対する柱体断面の大きさはMogridgeらと同程度の、比較的小さな断面の柱体を対象としている。筆者らは本四橋鬼島・坂出ルートの2Pケーランの据付後の安定性問題の研究に関連して波長に比してかなり大きな断面の矩形柱に働く波力特性を前述のGreen関数法による理論と実験によって調べたので、ここに報告する。

2. 実験方法

16.5m×32.0m×0.7mの平面水槽に实物寸法で23m×57m(隅角部は曲率半径5mの円弧)、高さ15mの縮尺1/25の鉄製の橋脚ケーラン模型(底なし)を底面が水底に接触しないようにして吊架台から吊り下げて設置した。ケーラン模型はその内側の剛な2本のH型鋼柱に設置した6個のロードセル(共和電業製LU-50KE型、容量50t)にターンバフルを取り付けてケーランの長辺軸方向(x 軸方向)と短辺軸方向(y 軸方向)に平行に適当な初期張力を水平に引張って固定した。このような波力計測法はあまり採用された例はないが、ケーランの水平移動に対する吊材の剛性がロードセルの引張あるいは圧縮に対する剛性に比べて無視できる場合は正確な波力が測定できる。このことは静的荷重を水平にかけて予め確認した。

3. 理論的解析

任意断面形の柱体を対象とし、座標系を図-1のようにとる。水深 h は一定で、周波数 ω の正弦波が x 軸と β の角度で入射すると考える。流体運動は無渦運動とし、微小振幅波理論が適用できると仮定する。柱体壁面は不透過で完全反射性を有するものとする。このとき入射波および散乱波の速度ポテンシャルは次式で表わされる。

$$\Psi_w = A \frac{\cosh \alpha(z+h)}{\cosh \alpha h} \phi_w e^{-i\omega t}, \quad \Psi_s = A \frac{\cosh \alpha(z+h)}{\cosh \alpha h} \phi_s e^{-i\omega t} \quad (1)$$

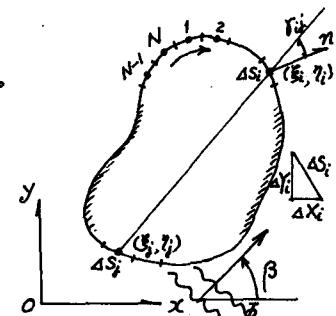


図-1 任意断面形柱体の座標系

$$\text{ここに, } A = -i\bar{g}H/2\pi, \phi_w = e^{i\bar{k}(x\cos\beta + y\sin\beta)} \quad (2)$$

$i = \sqrt{-1}$, H : 波高, $\bar{\delta} = 2\pi/T$, $\bar{k} = 2\pi/L$, \bar{g} : 重力加速度。

散乱波の速度ポテンシャルは Green 関数を用いると次式で表わされる。

$$\phi_s = \frac{i}{4\pi} \int_S f(\xi, \eta) G(x, y; \xi, \eta) dS \quad (3)$$

ここに, $f(\xi, \eta)$: 柱体断面周辺上の任意点 (ξ, η) におけるわき出しの強さ, $G(x, y; \xi, \eta)$: ラプラスの方程式, 放射条件, わき出し点での特異性を満足するグリーン関数で, ここでは $G(x, y; \xi, \eta) = i\pi H_0^{(1)}(kr)$, $r = \sqrt{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2}$, $H_0^{(1)}(kr) = J_0(kr) + iN_0(kr)$ の形のものを用いる。

柱体壁面における境界条件式を柱体周辺の分割要素中点 (ξ_i, η_i) に適用すると

$$f_i(\xi_i, \eta_i) + \sum_{j=1}^N \left\{ \frac{1}{2\pi} f_j(\xi_i, \eta_i) \frac{\partial G}{\partial n}(\xi_i, \eta_i; \xi_j, \eta_j) \Delta S_j \right\} = -\frac{2}{\pi} \frac{\partial \phi_w}{\partial n}(\xi_i, \eta_i) \quad (4)$$

(4)式を柱体周辺の各要素中点に適用し, 未知数 $f_i(\xi_i, \eta_i)$ に関する N 元連立一次方程式を擇出し法で解き, 離散化表示した(3)式に代入すると (ξ_i, η_i) 点における散乱波の速度ポテンシャルが求められる。求められた重と既知の重を圧力方程式に代入して全周辺にわたって積分すると波力成分が次式で求められる。ここに, $A_r = a \times b$: 矩形柱体断面積。

$$F_x = -A_r R_e(X_x e^{-i\omega t}), F_y = A_r R_e(X_y e^{-i\omega t}), A_r = \frac{1}{2} w_0 H A_r \frac{\tan k b}{\pi A_r}, X_x = \sum_{i=1}^N (f_{wi} + f_{si}) \Delta Y_i, X_y = \sum_{i=1}^N (f_{wi} + f_{si}) \Delta X_i \quad (5)$$

4. 理論値と実験値の比較

理論値と実験値の比較の一例として、現地換算値で $T=4.0 \text{ sec}$, $H=1.0 \sim 2.5 \text{ m}$, $R=10 \text{ m}$ の場合について最大波力の質量係数 C_m と入射角 β および最大波力の作用方向 α と β の関係を図-2 および図-3 に示す。分割要素長さは $L/8$ 以下にとった。これらの図から明らかのように、実験値は岸向き (F_{on} , α_{on}) と沖向き (F_{off} , α_{off}) に若干の相違があり、はらつきは見られるが、平均的には実験値と理論値の一致は良好である。現地周期 $T=3.0 \text{ sec}$ の場合は測定系の固有振動の影響により波力の実験値は理論値より少しだ大きくなつたが、 β による変化の傾向はよく一致した。以上の理論と実験による解析で興味あることは、矩形断面柱体では入射角と最大波力の作用方向角が必ずしも一致しないことであり、柱体の安定性を検討する場合には注意を要すると思われる。

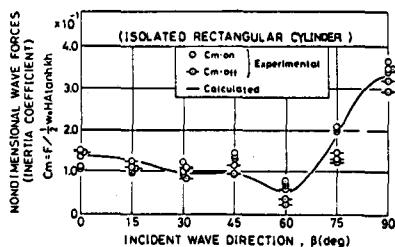


図-2. 矩形柱に働く最大波力の理論値と実験値の比較

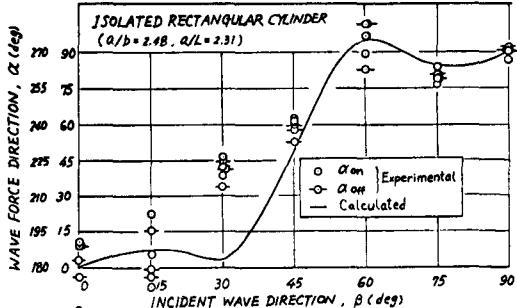


図-3. 最大波力の作用方向 α の理論値と実験値の比較

5. あとがき 本研究によって波長の 0.9~4.1 倍の边長を有する大断面矩形断面柱体に働く波力が Green 関数法で良好な精度で予測可能であることが実験による比較検証で明らかになった。境界周辺長が長いとかなり大容量の計算機がいるが、計算時間は 1 ケース、CPU タイムで 5 sec 程度とかなり短かいという利点がある。
 参考文献
 1) 井島成士・他：伝形形状の通過および不通過波による波の散乱波力, 第 20 回海講論文集, 17-77-87, 1973
 2) Magridge, G.R & W.H. Jamieson : Wave Forces on Square Caissons, Proc. of 15th ICCE, Honolulu, pp. 2271-2289, 1976.
 3) Isaacson Michael de St. Q. : Vertical Cylinders of Arbitrary Section in Waves, Journal of W.P.C.O. Division, pp. 309-326, 1978.