

完全没水型海中固定構造物に作用する鉛直方向力の断面形状による低減効果について

Effect of Sectional Shape of a Fixed Submerged Structure on Vertical Wave Force

北海道大学工学部土木工学科
北海道大学大学院工学研究科
北海道大学大学院工学研究科
北海道大学大学院工学研究科

○学生員 三倉寛明(Hiroaki Mikura)
正員 蟹江俊仁(Shunji Kanie)
フェロー 三上 隆(Takashi Mikami)
正員 佐藤太裕(Motohiro Sato)

1. 研究背景と目的

浅海域の波浪場に交通・輸送を目的とする構造物を固定する場合、支持構造物には周期的に変動する水平方向波力(Sway)だけでなく常に鉛直方向波力(Heave)と回転方向波力(Roll)の影響も受けることになる。そのため支持構造物にはHeave・Rollによる上下方向力が作用することになる。浮体構造物の場合は、Heave に対して吃水深の変動による浮力で抵抗するが、完全没水型構造物の場合は浮力が一定であるため支持構造物の抵抗力に期待することになる。支持構造物が摩擦杭の場合、引き抜き力に対しては高い安全率が要求されるため、経済的な設計をする上で支持構造物に作用する上下方向力の低減が重要となる。本研究では与えられた機能要件下で構造物の断面形状と引き抜き力の関係を明らかにし、構造物の諸元決定の際の知見を得ることを目的とする。

2. 解析モデルと支配方程式

2.1 構造諸元

解析基本モデルは二車線道路用水中トンネルを想定した Fig.1 に示す長方形断面構造物とし、構造諸元を Table1 に示す。構造物は両端点で摩擦杭により固定支持されるものとする。入射波は微小振幅波理論に基づく浅海波の水粒子水平運動速度の式(1)で与えられる。

$$u(x, y, t) = \frac{\pi H}{T} \frac{\cosh 2\pi(h+y)/L}{\sinh(2\pi h/L)} \sin\left(\frac{2\pi}{L}x - \frac{2\pi}{T}t\right) \quad (1)$$

2.2 解析条件と支配方程式

構造物に作用する波力はポテンシャル理論に基づいて求めるものとし、以下の条件を仮定する。

- ・ 入射波の波高は単位高さ ($H = 1\text{m}$)。
- ・ 構造物上面で砕波は発生しない。
- ・ 解析する入射波の周期は $T = 5.00 \sim 10.00\text{sec}$ とする。
- ・ 流体は非圧縮非回転の完全流体を仮定する。従って支配方程式は式(2)に示すラプラス方程式となる。

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} = 0 \quad (2)$$

また、境界条件は式(3)および式(4)で与えられる。

$$\begin{aligned} \frac{\partial \phi}{\partial x} \Big|_{x=0} &= u(0, y, t), & \frac{\partial \phi}{\partial x} \Big|_{x=B} &= u(B, y, t) \\ \frac{\partial \phi}{\partial y} \Big|_{y=-h} &= 0, & \frac{\partial \phi}{\partial y} \Big|_{y=0} &= -\frac{\omega^2}{g} \phi \end{aligned} \quad (3)$$

構造物境界面上では、すべて完全反射を仮定した。すなわち、

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = 0 \quad (4)$$

ただし n は境界外向きの法線ベクトルである。

2.3 杭に作用する摩擦力の評価

杭に作用する摩擦力 F_f は以下の式で求める。

$$F_f = \frac{F_y}{2} + \frac{M}{L_s} \quad (5)$$

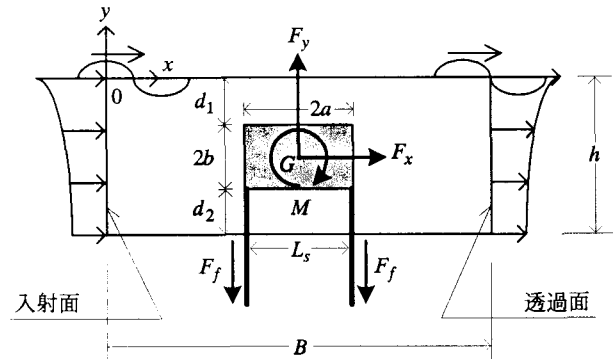


Fig. 1 解析基本モデル

Table 1 基本モデルの構造諸元

水深 h	14.70 m	構造水平幅 $2a$	10.60 m
水平幅 B	300.00 m	構造鉛直幅 $2b$	5.70 m
構造断面 A_s	60.42m ²	構造重心 G	(150.00, -7.85)

3. 境界要素法による解析

3.1 境界積分方程式の定式化

まずラプラス方程式を対象として重み関数を $\delta\phi$ とする重み付き残差式を導入する。

$$\int_A \left\{ \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} \right\} \delta\phi dA = 0 \quad (6)$$

ここで式(6)に Divergence の定理を適用し、2回部分積分を施すと、

$$\oint_s \frac{\partial \phi}{\partial n} \delta\phi ds - \oint_s \phi \frac{\partial \delta\phi}{\partial n} ds + \int_A \left\{ \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} \right\} \delta\phi dA = 0 \quad (7)$$

となる。ただし、 n は境界法線方向ベクトルである。ここで、重み関数に Green 関数 G を導入する。二次元のラプラス方程式に対する Green 関数は、

$$G = -\frac{1}{2\pi} \ln r \quad (8)$$

ただし、 r は観測点と特異点 ξ の間隔で $r = |x - \xi|$ で与えられる。特異点が境界上にあり内角 α を持つとき、 $\phi(\xi) = const$ を仮定すると、式(7)から式(9)の境界積分方程式が誘導される²⁾。ここで、 $l_x = -dx/ds$ 、 $l_y = dy/ds$ である。

$$\frac{\alpha}{2\pi} \phi(\xi) = \oint_s G \left[\frac{\partial \phi}{\partial x} l_y + \frac{\partial \phi}{\partial y} l_x \right] ds - \oint_s \phi \left[\frac{\partial G}{\partial x} l_y + \frac{\partial G}{\partial y} l_x \right] ds \quad (9)$$

離散化に当たっては、形状関数として一次線形要素を導入した。このため、境界条件が不連続になるようなかど点に対してその近傍に非適合要素を導入し、それぞれの境界条件に対する解を求められるよう処理を施した。

4. 解析結果

4.1 解析モデル

解析モデルは基本モデルの断面積と等しくなるような断面を有するものとして選定した。また構造図心は各ケースとも基本ケースと同じ値とする。

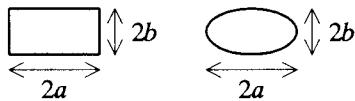


Fig.2 構造断面の定義

Table 2 解析ケースの構造諸元

解析ケース	a (m)	b (m)	A_s (m ²)	a/b
Case1 (長方形)	5.30	2.85	60.42	1.86
Case2 (円)	4.40	4.40	60.82	1.00
Case3 (楕円)	4.75	4.05	60.43	1.17
Case4 (楕円)	4.05	4.75	60.43	0.85
Case5 (楕円)	5.30	3.65	60.77	1.45

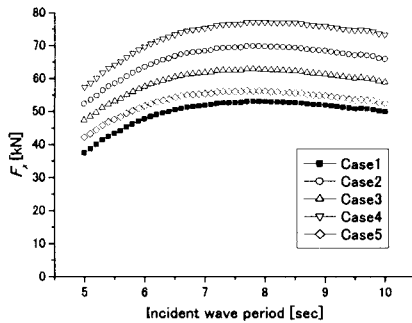


Fig. 3 Sway と入射波周期

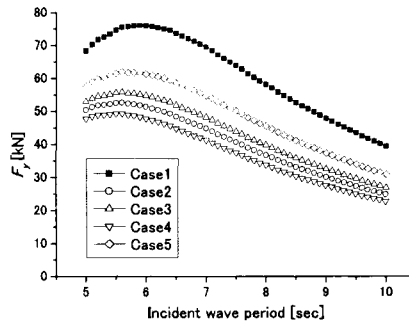


Fig. 4 Heave と入射波周期

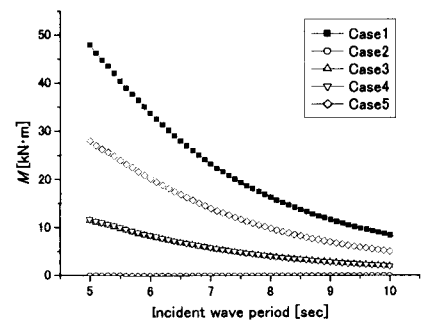


Fig. 5 Roll と入射波周期

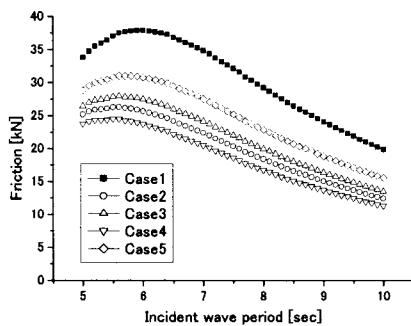


Fig. 6 杭の摩擦力と入射波周期

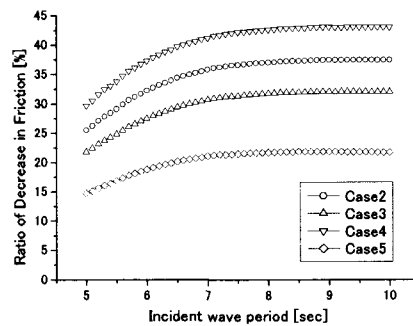


Fig. 7 形状変化と摩擦力軽減効果

4.2 解析結果

Fig.3, Fig.4, Fig.5 に水平・鉛直・回転方向波力と入射波周期の関係を、Fig.6 には杭に作用する摩擦力と入射波周期の関係を、Fig.7 には基本ケースに対する形状変化による摩擦力の低減率を示す。Fig.4, Fig.5, Fig.6 から、支持構造物に作用する鉛直・回転方向波力、支持構造物に作用する摩擦力はともに長方形構造物の場合が顕著で、円形に近いほど低減されることを確認できた。Fig.7 からは、断面形状の変化が約 2 割から 4 割程度の摩擦力低減に寄与することを確認できた。一方で Fig.3 から、逆に円形に近いほど水平方向波力が增加することも確認できた。

5. まとめ

本研究では純粋に等断面積を持つ構造物の断面形状の違いによる鉛直方向波力・回転方向波力・杭に作用する摩擦力の低減効果を確認することができた。これより、構造断面の形状選択が経済的な設計に有効であると考えられる。今後は構造物周辺のクリアランスや配置位置による鉛直方向力の低減効果、鉛直方向波力と水平方向波力のバランスについての検討を進めていく。

参考文献

- 1) 蟹江俊仁・三上隆・角田與史雄：水中浮遊式トンネルの波浪動揺特性について，土木学会論文集，No.556 /I-38, pp.159-168 (1997)
- 2) 田中正隆，松本敏郎，中村正行：境界要素法，培風館 (1991)