

# 海中固定構造物に作用する 波力と断面形状の関係に関する一考察

## STUDY ON RELATIONSHIP BETWEEN WAVE FORCE ACTING ON FIXED-SUBMERGED STRUCTURE AND ITS SECTIONAL SHAPE

三倉寛明<sup>1</sup>・蟹江俊仁<sup>2</sup>・三上隆<sup>3</sup>・佐藤太裕<sup>4</sup>

Hiroaki MIKURA, Shunji KANIE, Takashi MIKAMI and Motohiro SATO

<sup>1</sup>学生会員 北海道大学 工学研究科 (〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)

<sup>2</sup>正会員 工博 北海道大学 工学研究科助教授 (〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)

<sup>3</sup>フェロー 工博 北海道大学 工学研究科教授 (〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)

<sup>4</sup>正会員 工博 北海道大学 工学研究科助手 (〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)

Recently, completely submerged structure resting on piles is expected as a new alternative structure to bridge and/or immersed tunnel for relatively shallow-water crossing. In case of those structures, no change in buoyancy can be expected and only pile must resist against external wave force. As a result, the piles should have enough length to exert their friction strength against pulling out force due to wave. Since high safety factor for pulling out is required, reducing vertical force acting on piles becomes important for economical design. This study aims to evaluate the effect of sectional shape on the wave force and to introduce the relationship between sectional shape and vertical wave force acting on supporting structure.

**Key Words :** Fixed-submerged structure, friction strength, sectional shape, mitigating rate

### 1. 研究背景と目的

海域利用構造物の新たな形態として、函体を連続的に海中に並べ、道路や通信用として利用する「海中固定型水中トンネル」がある。このような構造物を設計する場合、波力は最も支配的な荷重の一つであり、直杭で支持することを想定すると周期的に作用する押し込み、引き抜き力を的確に制御することが経済性を左右することになる。特にこのような構造物の場合、完全没水固定型であるために、浮力の変動は発生せず、また杭に作用する引き抜き力に対しては一般に高い安全係数が要求されることから、杭に作用する軸方向力の低減対策は重要な課題の一つである。

本研究では水深が15m程度の防波堤内側にこのような形態の構造物を計画した場合を一例として取り上げている。同種構造物として、「半没水型上部傾斜ケーソン」などがあるが、これらの特徴は、最大水平波力作用時に発生する鉛直方向力の

増加や位相差による滑動抵抗力の増加を期待するものであり、完全没水型構造物に対しても同様の効果が期待できないかを考えるものである。本研究では構造物の断面形状に着目し、形状変化による各波力への位相差の導入が、直杭に作用する軸方向力の低減にどのように寄与するかを明らかにするとともに、同種構造物の設計に当たっての知見を得ることを目的とする。

### 2. 構造概要

対象として考えた構造物は、沿岸から300m程度離れた人工島へのアクセスとして計画されたもので、両側2車線の道路と片側に遊歩道を有する幅10.6m、高さ5.7mの箱型断面構造物を基本としている。構造物の設置水深は、縦断線形に応じて変化するものの、波浪の最も強い影響を受ける付近で、およそ5mのかぶり水深を有しており、本検討ではこの値を採用するものとした。また、

支持構造物としては、海上での施工性を考慮して直杭を用いることとし、軸方向力の評価にあたっては、杭支持層の深さを変化させて検討を行った。本研究では、構造物の断面形状の違いが杭の軸方向力に与える影響を見ることを目的とするため、波浪の周期は5.0~10.0秒まで変化させるものの、波高は単位波高1mに固定し、構造物上面では砕波は発生しないものとして計算を行った。

### 3. 解析モデルと解析条件

基本モデルである箱型断面構造物の概念図は、Fig. 1に示す通りである。また、基本解析モデルに用いた解析諸元はTable 1に示す通りである。

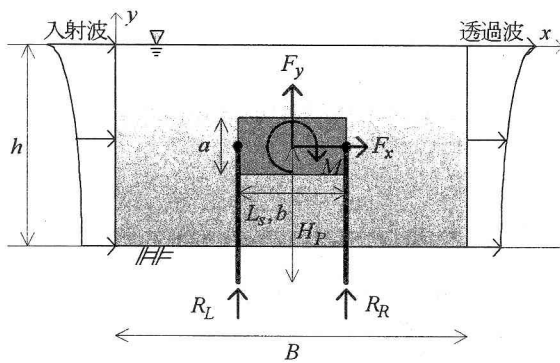


Fig. 1 基本解析モデル概念図

Table 1 基本解析モデルの解析諸元

水深 $h$	14.70 m	構造水平幅 $a$	10.60 m
水平幅 $B$	300.00 m	構造鉛直幅 $b$	5.70 m
構造断面 $A_s$	60.42m <sup>2</sup>	構造図心 $G$	$x = 150.00$ m $y = -7.85$ m

ここで、本解析における最大波長は約150mで、代表径の最小値は約6mとなるので、R.G.Dean<sup>1)</sup>によると本解析モデルにおける構造物に作用する波力は慣性力項が卓越する。したがって、構造物に作用する波力は線形ポテンシャル理論に基づいて求めることとし、抗力項については考慮していない。

流体は完全流体を仮定し、支配方程式は式(1)に示す通りである。

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} = 0 \quad (1)$$

上流側の入射波浪には、以下の浅海波の水粒子水平運動速度式で与えた。

$$u(x, y, t) = u_m \sin(kx - \sigma t) \quad (2)$$

ここに、

$$k = 2\pi/L \text{ (波数)} \quad (3)$$

$$\sigma = 2\pi/T \text{ (波の角周波数)} \quad (4)$$

$$u_m = \frac{\pi H}{T} \frac{\cosh 2\pi(h+y)/L}{\sinh(2\pi h/L)} \quad (5)$$

下流側は波浪ポテンシャルで与えられる完全透過条件とし、海水面は自由表面条件、構造物面上では完全反射条件を採用している。境界条件は式(6)で与えられる。

$$\begin{aligned} \left. \frac{\partial \phi}{\partial x} \right|_{x=0} &= u(0, y, t) & \left. \frac{\partial \phi}{\partial x} \right|_{x=B} &= ik\phi \\ \left. \frac{\partial \phi}{\partial y} \right|_{y=-h} &= 0 & \left. \frac{\partial \phi}{\partial y} \right|_{y=0} &= \frac{\omega^2}{g} \phi \\ \left. \frac{\partial \phi}{\partial n} \right|_{\text{at Structure}} &= 0 & & \end{aligned} \quad (6)$$

以上の条件の下、解析手法には二次元の境界要素法を採用した。このようにして求めた波力を、式(7)に適用することにより杭の軸方向力を求めることとした。

$$\begin{Bmatrix} R_R \\ R_L \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -F_y \\ M \end{Bmatrix} \pm \begin{Bmatrix} F_x H_p \\ L_s \end{Bmatrix} \quad (7)$$

なお、軸方向力の低減効果には左右の軸方向力のうち最大軸方向力を取り上げて検討した。

### 4. 解析結果

#### (1) 断面形状の影響評価

まず、断面積と断面図心を同一にしたまま、形状の差異による影響を検討するため、基本断面を含め3つの断面 (Fig. 2) を想定して検討を行った。

Fig. 3にはCase-1 (基本断面) とCase-2 (十角形断面)、Case-3 (楕円断面) の場合の波力を比較して示している。図から分かるように、鉛直方向の高さの増加を反映して、Case-3の水平方向波力はCase-1のそれよりも若干大きいものの、鉛直方向波力や回転モーメントは、顕著に低減されている。しかし、最大軸方向力  $R$  の低減率を図示すると、Fig. 4のようになる。この図は、波の周期と、基本断面に対する軸方向力の低減率の関係を杭の支持層の深さ別に示したものである。これによれば、杭が比較的短い場合を除いて、杭の軸方向力低減には矩形断面の採用が有利であり、断面形状を変化させたことによる効果が見られない。

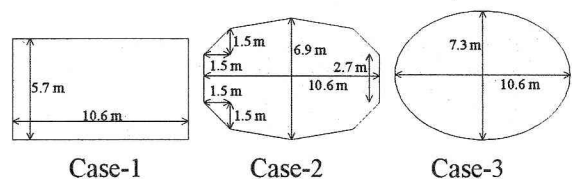
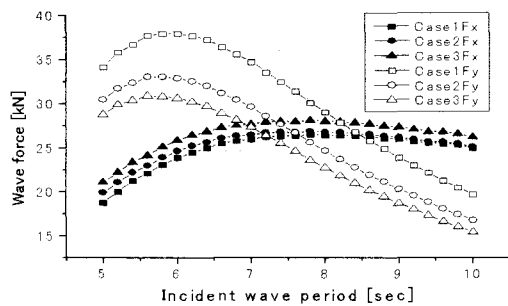
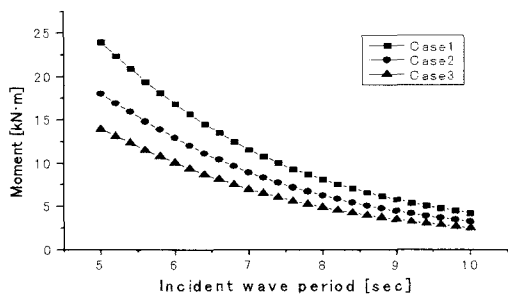


Fig. 2 断面形状の比較



(a) 水平力・鉛直力



(b) 回転モーメント

Fig. 3 作用波力の評価

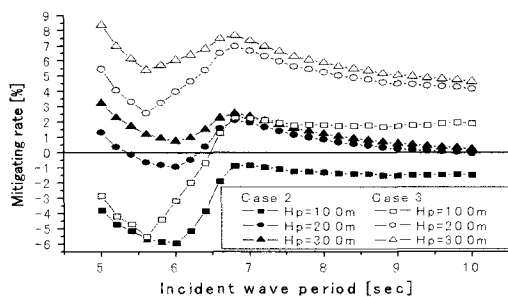


Fig. 4 最大軸方向力の低減率と杭長の関係

ここで、Table 2 に各波力および軸方向力の最大値、Table 3 にはそれぞれの水平波力からの位相差を波浪周期 5.0sec、杭長 10.0m の場合を例に示す。これによると、水平波力と回転モーメントがおおよそ 180°、水平波力と鉛直波力がほぼ 90° の位相遅れを有しており、回転モーメントは水平波力による杭軸方向力の抑制に寄与していることがわかる。このため、杭長が短い場合には回転モーメントの作用による軸方向力の抑制効果が期待できるものの、杭長が長くなると水平方向力の影響が顕著となるため、わずかな水平方向力の増加が軸方向力の増大をもたらすことになる。また、鉛直方向力の低減だけでは、杭に作用する最大軸方向力の低減はほとんど期待できないものと考えられる。

Table 2 波力および軸方向力の最大値

Amp	Fx [kN]	Fy [kN]	M [kN·m]	RL [kN]	RR [kN]
Case-1	18.80	34.19	24.00	24.70	21.29
Case-2	19.94	30.52	18.05	23.76	22.05
Case-3	21.11	28.84	13.97	24.01	23.05

Table 3 Fx に対する位相差[°]

Delay [°]	Fy	M	RL	RR
Case-1	81.48	-180.00	-136.80	-52.58
Case-2	85.69	-180.00	-140.18	-43.64
Case-3	87.58	-180.00	-143.13	-38.69

(2) 軸方向力の低減対策

水平方向力と回転モーメントの位相差はおおよそ 180° であることから、水平方向力の増加を抑えながら回転モーメントを増加させるような対策が有効と考え、具体的に Fig. 6 のような対策例を考え、軸方向力の低減効果を検討した。Fig. 3 と同様、基本断面に対する軸方向力の低減率と杭長の関係を Fig. 7 に示す。また、波浪周期 5.0sec、杭長 10.0m の場合を取り上げ、Table 4 には各波力および軸方向力の最大値、Table 5 には水平波力との位相遅差を示した。

Table 4 から明らかなように、Fig. 6 のモデルを採用すると、いずれも水平方向力の増加を抑えながら回転モーメントを増加させることができることが判明した。しかしながら、Fig. 7 から Case-4、Case-5、Case-6 の場合、長周期の波に対しては回転モーメントの増加の割合が小さく、杭長の長い範囲では良い低減が見られず、矩形断面の採用が有利である。一方、Case-7、Case-8、Case-9 を採用すると、回転モーメントは大幅に増加し、長周期の波に対しても杭長がかなり長くなる範囲まで軸方向力の低減効果が見られた。これより、断面形状に矩形や楕円形状を採用するよりも、回転モーメントの増加による軸方向力の抑制効果が高いことが判明した。

ここで、各モデルの最大軸方向力の低減率を横軸に波の周期をとって、杭長 10m、30m の場合を Fig. 9 に示す。これより、地盤支持層が浅い場合には本解析の例のような断面形状の工夫が軸方向力の低減に効果があるものの、支持層が深くなると矩形断面の採用が有利であることが確認できた。

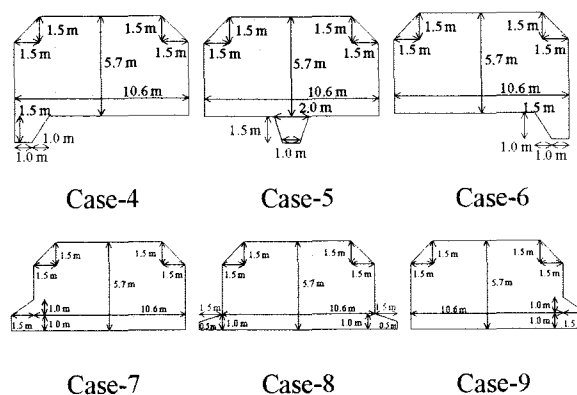
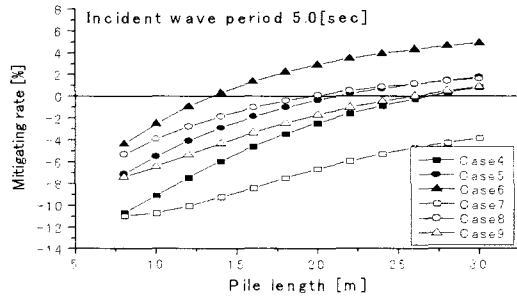
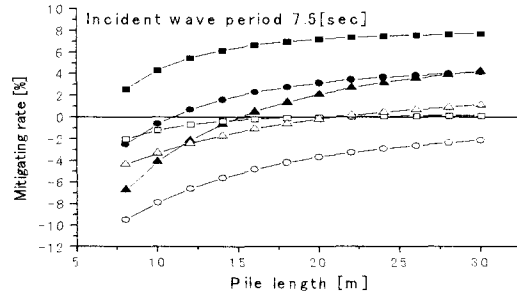


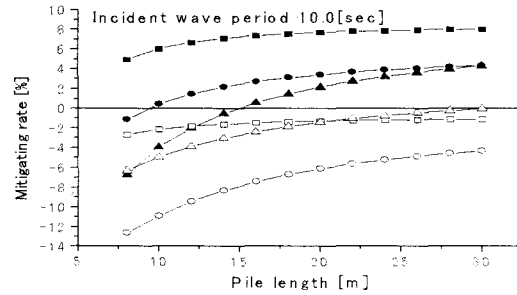
Fig. 6 低減対策工



(a) 入射周期 5.0sec



(b) 入射周期 7.5sec



(c) 入射周期 10.0sec

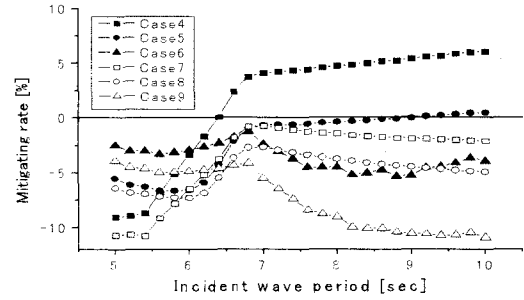
Fig. 7 軸方向力の低減率と杭長の関係

Table 4 波力および軸方向力の最大値

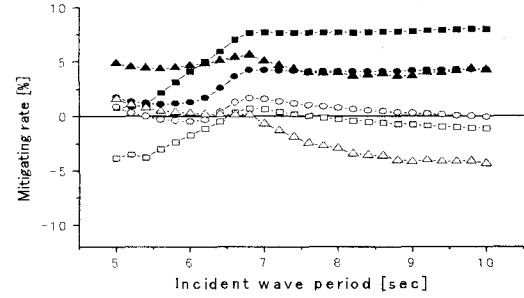
Amp	Fx [kN]	Fy [kN]	M [kN·m]	RL [kN]	RR [kN]
Case-4	20.20	30.88	31.23	22.46	22.17
Case-5	19.81	30.73	25.36	23.34	21.41
Case-6	20.27	31.15	31.41	24.08	20.68
Case-7	19.30	32.01	34.19	22.06	21.82
Case-8	20.05	32.77	40.97	23.11	21.35
Case-9	19.53	32.15	35.27	23.73	20.28

Table 5 Fx に対する位相差

Delay[°]	Fy	M	RL	RR
Case-4	103.58	177.90	-145.87	-26.77
Case-5	95.60	180.00	-149.25	-28.05
Case-6	88.02	182.10	-150.73	-30.60
Case-7	102.01	166.50	-141.00	-29.28
Case-8	95.16	180.43	-143.83	-32.93
Case-9	87.53	193.81	-148.69	-34.93



(a) 杭長 10m



(b) 杭長 30m

Fig. 9 最大軸方向力の低減率

## 5. 考察とまとめ

海中に完全没水した構造物を杭で支持する場合、楕円形状などの採用による回転モーメント成分の波力低減が必ずしも適切ではなく、むしろ杭の軸方向力にとっては悪い影響をもたらすことが明らかとなった。

このような構造物の経済設計を行うには、波力の位相差を活かして回転モーメントによる軸方向力の抑制を図るなどの工夫が考えられる。特に地盤支持層の浅い場合には、断面形状による低減効果が期待できることが判明した。

今後は、今回解析的な手法で求められた結果を実験等と比較・検証することにより、浅海域における完全没水型海中固定構造物の設計の一助となるよう研究を進めたい。

## 参考文献

- 1) Dean, R.G et al: Interaction of Structure and Waves, Estuary and Coastline Hydrodynamics, McGraw-Hill, 1966
- 2) 三倉寛明, 蟹江俊仁, 三上隆, 佐藤太裕: 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, 土木学会北海道支部論文報告集, 第 60 号, p.84-85, 2004