

講座

海洋・港湾構造物の設計 (2)

前号では、海洋・港湾構造物の外力として他の陸上構造物にはない、波浪について述べてみた。日本海周辺で発生した波や、それらを確率論を使って設計波に変換する手法について述べた。今号は、実際の設計について簡単なモデルを選定し計算してみる。

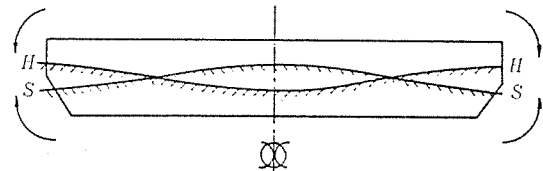
4

PC 製浮遊構造物の設計

ここでは、海洋・港湾構造物の中で浮いた構造物を取り上げて論じてみる。浮遊式構造物として知られているものは、浮棧橋、浮防波堤等が代表的である。近年大地震を想定した浮遊式耐震岸壁や沖合人工島に伴う大規模

表一 コンクリート製浮遊構造物の例

| | | |
|-------------|--|--|
| | アラスカ バルデス港 フローティングコンテナ ターミナル | 英国リバプール 浮遊式係船岸 |
| 設計 | ABAM Engineers, Inc. | Harris & Sutherland |
| 建造 | Concrete Technology Co. | Peter Lind & Co. Ltd. |
| 浮遊式の採用係船岸理由 | 潮位差が大きい海域には、浮遊式係船岸が適しているために建造された。 ポンツーンは、補修、維持費用を低減するためにプレストレストコンクリートが採用された。 | |
| 係船岸主要目 | $L \times B \times D - d$; 213.4 m × 30.5 m × 9.1 m - 4.4 m 排水量: 29000 tf ポンツーン: プレストレストコンクリート ポンツーンは、2分割で建造・曳航しバルデス港で1体に接合 | $L \times B \times D - d$; 350 m × 19 m × 5 m - 2.6 m 排水量: 約 14500 tf ポンツーン: プレストレストコンクリート 6個のポンツーンに分割して建造・曳航し、それぞれをヒンジ結合 |
| 設計条件 | 対象船舶: 50000 LT 貨物船, 15000 LT パージ 波浪: Normal $H_{max}=1.5\text{ m}$, $T=3.8\text{ s}$ Extreme $H_{max}=3.0\text{ m}$, $T=4.8\text{ s}$ 潮位差: ±2.4 m | 対象船舶: 4850 T までの貨物船, 客船, フェリー 波浪: 不明 比較的穏やかと思われる 潮位差: 10 m |



H: ホギングモーメント
S: サギングモーメント

図一 縦曲げモーメント

浮遊式構造物等がニーズとしてあがっている。

表一は、代表的な浮遊式構造物の例である。

(1) 断面力の算定

浮遊構造物に発生する断面力としては、大きく次の2つが考えられる。

i) 波によって構造物全体に発生する縦曲げモーメント, せん断力, ねじりモーメント

ii) 波によって局部部材に発生する局部モーメント

縦曲げモーメントを計算させる式は、いろいろ提案されている。たとえば NK ルール, ミューラーの式等である。実際は、波による浮体の動揺を考慮して計算するのが一番妥当であるが、計算が複雑なので、ここでは、ミューラーの式について述べる。

図二に示すような形で波が浮体に作用すると、その時、浮体に作用する断面力は次式で示される。

$$M(x) = M_0 \frac{\pi^2 \sin \gamma}{2 \gamma \beta^2} \left(\frac{4x^2 - L^2}{2L^2} \beta \sin \beta + \cos 2\beta \frac{x}{L} - \cos \beta \right)$$

$$V(x) = \frac{wBh \sin \gamma}{2 \gamma \beta} \left(L \sin 2\beta \frac{x}{L} - 2x \sin \beta \right)$$

ここで $M_0 = \frac{wBL^2h}{2\pi^2}$

$$\beta = \frac{\pi L \cos \alpha}{d}$$

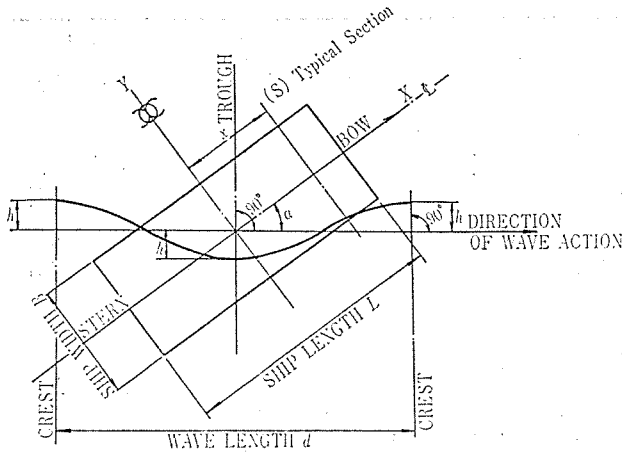


図-2 浮体に作用する波浪

$$\gamma = \frac{\pi L \cos \alpha}{d}$$

w = 海水の単位重量

L = 浮体長

B = 浮体幅

h = 波高 $\times 1/2$

α = 波の入射角

d = 波長

浮体の長手方向に沿って入ってくる波に対して、浮体中央の最大モーメント発生位置でのモーメントは、

$$M_{\max} = M_0 \frac{\pi^2}{2\beta^2} \left(1 - \cos \beta - \frac{1}{2} \beta \sin \beta \right)$$

となる。

ただし、この式の適用については、港湾技術研究所の上田海洋構造研究室長は次のように述べている。

「浮体の動揺を考慮した場合の規則波中の断面力とミーラーの式によって計算した断面力とを比較すると、その大小関係は波周期によって異なり、水深 10.5 m に対しては浮体長と波長との比 L/λ が 1.0 以下になる場合にはミーラーの式による計算値は浮体の動揺を考慮した計算値より小さくなる。したがって、長周期の波に対しミーラーの式を用いる場合には注意を要する。また、浮体に生ずる断面力が最大になる波の周期はミーラーの式の場合には $L/\lambda = 1.12$ となる周期の波であり、また、浮体の動揺を考慮した計算法では、 $L/\lambda = 1.0$ と

なる周期の波である。それらの周期の波における断面力の最大値を比較するとミーラーの式の計算値のほうが大きい」

5 計算例

次のような構造形式を考えて、プレストレスの算定を行ってみる。図-3 に概略形状を示す。

長さ 65 m

幅 10 m

高さ 3 m

この浮函の版厚寸法を 20 cm とすると、概略のコンクリート体積は、450 m³ となる。したがって、この浮函の無載荷状態の吃水は、

$$D = \frac{w}{A \cdot \gamma}$$

ここで、 w = 浮函重量 (= 450 m³ \times 2.5 t/m³ = 1125 t)

A = 浮体の水平方向断面積

γ = 海水の単位重量 (= 1.03 t/m³)

$$D = \frac{1125}{65 \times 10 \times 1.03} = 1.70 \text{ m}$$

この浮函は 1.70 m 海水中に没し、1.30 m 頭を出していることとなる。この浮函に次の条件の波が作用したとする。

$$H_{1/3} = 2.0 \text{ m}$$

$$T_{1/3} = 5.0 \text{ sec}$$

$$\text{水深} = -15 \text{ m}$$

この条件からミーラーの式を使って断面力を算定するわけであるが、この場合、波の長さを計算しなければならない。微小振幅波理論によると、次の式を解けば良い。

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh \frac{2\pi h}{L}$$

式が複雑なので、実際は運輸省港湾局が監修した「港湾の施設の技術上の基準・同解説」の 4.1.3 波の性質に示されている「水深・周期・波長及び波速の表」を使う。表から、水深 -15 m、周期 5.0 sec の波長は、38.42 m と読める。これはミーラーの式に代入して計算すると、

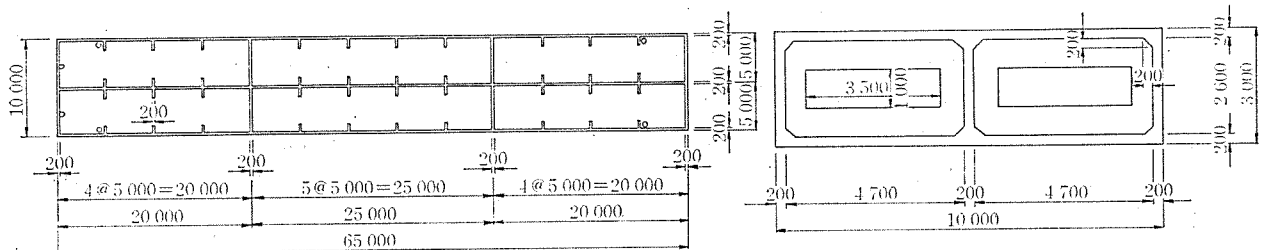


図-3 浮函構造図

表-2 水深・周期・波長および波速の表

| 水深 (m) | 3.0 | | 4.0 | | 5.0 | | 6.0 | | 7.0 | | 8.0 | | 9.0 | | 10.0 | |
|-----------|-----------|-------------|-----------|-------------|-----------|-------------|-----------|-------------|-----------|-------------|-----------|-------------|-----------|-------------|-----------|-------------|
| | 波長 (m) | 波速 (m/s) | 波長 (m) | 波速 (m/s) | 波長 (m) | 波速 (m/s) | 波長 (m) | 波速 (m/s) | 波長 (m) | 波速 (m/s) | 波長 (m) | 波速 (m/s) | 波長 (m) | 波速 (m/s) | 波長 (m) | 波速 (m/s) |
| 0.5 | 6.39 | 2.13 | 8.67 | 2.17 | 10.92 | 2.18 | 13.16 | 2.19 | 15.39 | 2.20 | 17.62 | 2.20 | 19.84 | 2.20 | 22.06 | 2.21 |
| 1.0 | 8.69 | 2.90 | 11.99 | 3.00 | 15.23 | 3.05 | 18.43 | 3.07 | 21.61 | 3.09 | 24.78 | 3.10 | 27.94 | 3.10 | 31.09 | 3.11 |
| 1.5 | 10.21 | 3.40 | 14.37 | 3.59 | 18.40 | 3.68 | 22.36 | 3.73 | 26.29 | 3.76 | 30.19 | 3.77 | 34.08 | 3.79 | 37.95 | 3.80 |
| 2.0 | 11.30 | 3.77 | 16.22 | 4.05 | 20.94 | 4.19 | 25.57 | 4.26 | 30.14 | 4.31 | 34.67 | 4.33 | 39.18 | 4.35 | 43.68 | 4.37 |
| 2.5 | 12.09 | 4.03 | 17.71 | 4.43 | 23.08 | 4.62 | 28.31 | 4.72 | 33.46 | 4.78 | 38.56 | 4.82 | 43.62 | 4.85 | 48.67 | 4.87 |
| 3.0 | 12.67 | 4.22 | 18.95 | 4.74 | 24.92 | 4.98 | 30.71 | 5.12 | 36.39 | 5.20 | 42.01 | 5.25 | 47.58 | 5.29 | 53.13 | 5.31 |
| 3.5 | 13.09 | 4.36 | 19.98 | 5.00 | 26.52 | 5.30 | 32.84 | 5.47 | 39.02 | 5.57 | 45.13 | 5.64 | 51.18 | 5.69 | 57.19 | 5.72 |
| 4.0 | 13.39 | 4.46 | 20.85 | 5.21 | 27.93 | 5.59 | 34.75 | 5.79 | 41.42 | 5.92 | 47.98 | 6.00 | 54.48 | 6.05 | 60.92 | 6.09 |
| 4.5 | 13.60 | 4.53 | 21.57 | 5.39 | 29.18 | 5.84 | 36.49 | 6.08 | 43.61 | 6.23 | 50.61 | 6.33 | 57.53 | 6.39 | 64.40 | 6.44 |
| 5.0 | 13.75 | 4.58 | 22.18 | 5.55 | 30.29 | 6.06 | 38.07 | 6.34 | 45.63 | 6.52 | 53.05 | 6.63 | 60.38 | 6.71 | 67.64 | 6.76 |
| 6.0 | 13.91 | 4.64 | 23.11 | 5.78 | 32.17 | 6.43 | 40.84 | 6.81 | 49.24 | 7.03 | 57.47 | 7.18 | 65.57 | 7.29 | 73.58 | 7.36 |
| 7.0 | 13.99 | 4.66 | 23.75 | 5.94 | 33.67 | 6.73 | 43.19 | 7.20 | 52.39 | 7.48 | 61.37 | 7.67 | 70.20 | 7.80 | 78.92 | 7.89 |
| 8.0 | 14.02 | 4.67 | 24.19 | 6.05 | 34.86 | 6.97 | 45.19 | 7.53 | 55.16 | 7.88 | 64.86 | 8.17 | 74.38 | 8.26 | 83.77 | 8.38 |
| 9.0 | 14.03 | 4.68 | 24.47 | 6.12 | 35.81 | 7.16 | 46.91 | 7.82 | 57.61 | 8.23 | 68.01 | 8.50 | 78.19 | 8.69 | 88.22 | 8.82 |
| 10.0 | 14.03 | 4.68 | 24.65 | 6.16 | 36.56 | 7.31 | 48.37 | 8.06 | 59.78 | 8.54 | 70.85 | 8.86 | 81.68 | 9.08 | 92.32 | 9.23 |
| 11.0 | 14.04 | 4.68 | 24.77 | 6.19 | 37.15 | 7.43 | 49.62 | 8.27 | 61.72 | 8.82 | 73.44 | 9.18 | 84.89 | 9.43 | 96.12 | 9.61 |
| 12.0 | 14.04 | 4.68 | 24.84 | 6.21 | 37.60 | 7.52 | 50.69 | 8.45 | 63.44 | 9.06 | 75.80 | 9.48 | 87.85 | 9.76 | 99.67 | 9.97 |
| 13.0 | 14.04 | 4.68 | 24.89 | 6.22 | 37.95 | 7.59 | 51.60 | 8.60 | 64.98 | 9.28 | 77.96 | 9.74 | 90.59 | 10.07 | 102.98 | 10.30 |
| 14.0 | 14.04 | 4.68 | 24.91 | 6.23 | 38.22 | 7.64 | 52.38 | 8.73 | 66.35 | 9.48 | 79.93 | 9.99 | 93.14 | 10.35 | 106.07 | 10.61 |
| 15.0 | 14.04 | 4.68 | 24.93 | 6.23 | 38.42 | 7.68 | 53.03 | 8.84 | 67.58 | 9.65 | 81.73 | 10.22 | 95.51 | 10.61 | 108.98 | 10.90 |
| 16.0 | 14.04 | 4.68 | 24.94 | 6.23 | 38.57 | 7.71 | 53.58 | 8.93 | 68.66 | 9.81 | 83.39 | 10.42 | 97.71 | 10.86 | 111.71 | 11.17 |
| 17.0 | 14.04 | 4.68 | 24.95 | 6.24 | 38.68 | 7.74 | 54.04 | 9.01 | 69.63 | 9.95 | 84.90 | 10.61 | 99.77 | 11.09 | 114.29 | 11.43 |
| 18.0 | 14.04 | 4.68 | 24.95 | 6.24 | 38.77 | 7.75 | 54.42 | 9.07 | 70.49 | 10.07 | 86.29 | 10.79 | 101.68 | 11.30 | 116.71 | 11.67 |
| 19.0 | 14.04 | 4.68 | 24.95 | 6.24 | 38.83 | 7.77 | 54.74 | 9.12 | 71.25 | 10.18 | 87.56 | 10.95 | 103.47 | 11.50 | 119.00 | 11.90 |
| 20.0 | 14.04 | 4.68 | 24.95 | 6.24 | 38.87 | 7.77 | 55.00 | 9.17 | 71.92 | 10.27 | 88.72 | 11.09 | 105.14 | 11.68 | 121.16 | 12.12 |
| 22.0 | 14.04 | 4.68 | 24.95 | 6.24 | 38.93 | 7.79 | 55.39 | 9.23 | 73.03 | 10.43 | 90.76 | 11.35 | 108.14 | 12.02 | 125.12 | 12.51 |
| 24.0 | 14.04 | 4.68 | 24.96 | 6.24 | 38.96 | 7.79 | 55.65 | 9.28 | 73.89 | 10.56 | 92.46 | 11.56 | 110.76 | 12.31 | 128.66 | 12.87 |
| 26.0 | 14.04 | 4.68 | 24.96 | 6.24 | 38.98 | 7.80 | 55.83 | 9.30 | 74.54 | 10.65 | 93.86 | 11.73 | 113.04 | 12.56 | 131.83 | 13.18 |
| 28.0 | 14.04 | 4.68 | 24.96 | 6.24 | 38.98 | 7.80 | 55.94 | 9.32 | 75.03 | 10.72 | 95.02 | 11.88 | 115.01 | 12.78 | 134.66 | 13.47 |
| 30.0 | 14.04 | 4.68 | 24.96 | 6.24 | 38.99 | 7.80 | 56.02 | 9.34 | 75.40 | 10.77 | 95.97 | 12.00 | 116.72 | 12.97 | 137.19 | 13.72 |
| 35.0 | 14.04 | 4.68 | 24.96 | 6.24 | 38.99 | 7.80 | 56.11 | 9.35 | 75.96 | 10.85 | 97.64 | 12.20 | 120.03 | 13.34 | 142.38 | 14.24 |
| 40.0 | 14.04 | 4.68 | 24.96 | 6.24 | 38.99 | 7.80 | 56.14 | 9.36 | 76.22 | 10.89 | 98.61 | 12.33 | 122.26 | 13.58 | 146.25 | 14.63 |
| 50.0 | 14.04 | 4.68 | 24.96 | 6.24 | 38.99 | 7.80 | 56.15 | 9.36 | 76.39 | 10.91 | 99.46 | 12.43 | 124.71 | 13.86 | 151.16 | 15.12 |
| 60.0 | 14.04 | 4.68 | 24.96 | 6.24 | 38.99 | 7.80 | 56.15 | 9.36 | 76.42 | 10.92 | 99.72 | 12.46 | 125.71 | 13.97 | 153.68 | 15.37 |
| 70.0 | 14.04 | 4.68 | 24.96 | 6.24 | 38.99 | 7.80 | 56.15 | 9.36 | 76.42 | 10.92 | 99.79 | 12.47 | 126.10 | 14.01 | 154.91 | 15.49 |
| 深水波 | 14.04 | 4.68 | 24.96 | 6.24 | 38.99 | 7.80 | 56.15 | 9.36 | 76.43 | 10.92 | 99.82 | 12.48 | 126.34 | 14.04 | 155.97 | 15.60 |

注) 周期 2.0 秒以下については、表 (a) および表 (b) (省略) の水深および波長の値を 0.01 倍し、周期および波速の値を 0.1 倍して換算する。

$$M_0 = \frac{wBL^2h}{2\pi^2} = \frac{1.03 \times 10 \times 65^2 \times 1.8}{2\pi^2} = 3970$$

$$\beta = \frac{\pi L \cos \alpha}{d} = \frac{\pi \times 65 \times 1.0}{38.42} = 5.315$$

(波高は、最大波高を使うこの場合、有義波高の 1.8 倍として計算する。波向は、浮体長手方向に入射して来る波とし、 $\alpha=0$ とする。)

$$M_{\max} = M_0 \frac{\pi^2}{2\beta^2} \left(1 - \cos \beta - \frac{1}{2} \beta \sin \beta \right)$$

$$= 3970 \times \frac{\pi^2}{2 \times 5.315^2} \left(1 - \cos 5.315 - \frac{1}{2} \times 5.315 \times \sin 5.315 \right) = 1820 \text{ t} \cdot \text{m}$$

浮函の中央にホッピング状態、サッキング状態で (図-1 参照) 1820 t・m のモーメントが発生することとなる。次にこのモーメントに見合った量だけプレストレスを導入すれば良いわけである。ただし気をつけなければならないのは、同じモーメントが正負で発生することである。すなわち、プレストレスは、図-3 で示した浮函断面に均等に導入するということである。図-3 の形状の断面係数 Z は、5.984 m³ と計算される。したがって必要プレストレス量は、

$$\sigma = \frac{M}{Z} = \frac{1820 \text{ t} \cdot \text{m}}{5.984} = 304 \text{ t/m}^2$$

すなわち、30 kg/cm² のプレストレス量が必要なわけである。

断面積 A は、5.72 m² であるので、必要導入力は、
 $P = A \times \sigma = 5.72 \times 304 = 1740 \text{ t}$

19 本より線 $\phi 21.8$ を使うとすると、その有効引張力を 32 t として、

$$n = \frac{P}{P_e} = \frac{1740}{32} = 55 \text{ 本}$$

55 本配置すれば良いこととなる。

6 おわりに

以上、浮遊構造物の波に対する計算の方法について述べてみた。このあとは、局部部材の応力検討を行えば良いわけである。その方法は、限界状態の各種の状態に応じて行わなければならない。ここでは限界状態設計法についてはふれないこととした。海洋・港湾構造物の設計がさほど難しくないとわかっていただけたら幸いである。

参考・引用文献

- 1) 運輸省港湾局監修：港湾の施設の技術上の基準・同解説、昭和 54 年 3 月
- 2) 上田茂ほか：箱型浮体の波浪によるせん断力と縦曲げモーメントの計算方法、港湾技研資料、No. 505, Dec. 1984

【記：古賀尚宏 ピー・エス・コンクリート (株) 技術部】