

セミサブ型海上橋梁のための浮体式水中基礎に作用する波力の評価

渡邊英一* ・間瀬 肇** ・宇都宮智昭***
呉 冲**** ・高橋道生**** ・飯田 毅*****

1. はじめに

近年、長距離海上横断のための海上橋梁の需要はますます高まってきているが、従来の橋梁形式では大水深、あるいは、軟弱地盤域において海中橋梁基礎の施工が困難であり、このような条件下で有利と考えられる浮体橋梁の検討が始められている。既に比較的波浪条件の穏やかな水域においては、連続ポンツーン浮体を用いた浮体橋梁(Lwin, 1993)、あるいは、独立ポンツーン浮体を弾性支承として用いる橋梁(Sollandら, 1993)が海外において実現している。しかしながら、このような従来形式のポンツーン型浮体橋梁は波浪の影響を強く受けるため、波浪条件の厳しい我が国の海域においてそのまま適用することは困難である(運輸省港湾局技術課ら, 1991)。

そこで、耐波浪特性に優れる、緊張係留された水中浮体基礎で橋脚を支持する形式のセミサブ型海上橋梁について考える。浮体主要部を海中に沈めることでこれに作用する波力を低減し、また、緊張係留することで波浪動揺を大幅に低減する。このような形式の海上橋梁の実現性を検討するためには、まず、浮体式水中基礎に作用する波力や潮流力などの外力の把握が不可欠と考えられる。

以上のような背景のもと、本研究では浮体式水中基礎に作用する波力および潮流力に関する実験を行い、その評価法を確立することを目的とする。二次元造波水槽において1/100スケールモデルに対する波力を測定し、ポテンシャル理論に基づく理論値と比較を行い、その適用性について調べる。また、波力算定プログラムを用いた数値計算により最適なハル形状についての考察も行う。

2. 実験・解析方法

実験は、長さ30m×幅90cm×高さ100cmの寸法を有する二次元造波水槽で行った。造波機は油圧サーボ型ピストン式造波形式で、任意不規則波が発生可能であるが、本実験では規則波に対してのみの測定を行った。ま

た、水槽の側面に取り付けられた循環用パイプの中の水をインバータープロペラの回転数を制御することによって水槽内に定常流を発生させることができる。

模型の設置状況を図-1に示す。使用した構造物模型はアクリル製で実物の1/100スケールのモデルとし、直径10cm長さ30cmの円筒形浮体基礎(ハル)と、直径2.5cm高さ35.5cmの円形断面橋脚(カラム)を間隔25cmで2本有するものとし、2本のカラムの上部を一枚のアクリル板で接合した。このアクリル板の中心軸上に三分力検出器(日章電機 LMC-3501)を設置することによって、模型全体に働く流体力を測定できるようにした。

測定項目は、入射波高(容量式波高計:ケネックCH403A)及び、三分力検出器の出力による荷重値(F_x , F_y , M_z)とした。いずれも、A/Dコンバータを介してデジタルデータとしてパソコンに取り込んだ。

理論値の算出にあたっては、橋脚部(カラム)に働く波力についてはモリソン式で、浮体主要部(ハル)に働く波力については、ポテンシャル理論を用いて求める。ポテンシャル理論に基づく波力の算出にあたっては、著者らの開発した、微小振幅波理論に基づく三次元特異点分布法を用いた波力算定プログラム(Watanabeら, 1994)を利用した。

3. 実験結果及び考察

3.1 波力と入射波高の関係

実験結果は時刻歴データとして採集されるので、測定

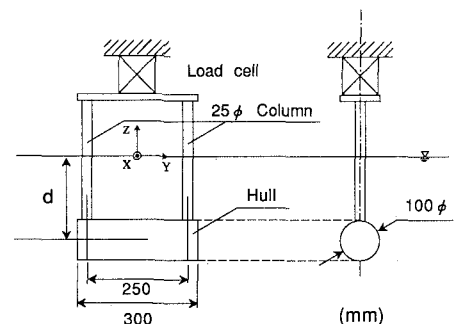


図-1 浮体式水中基礎模型

* 正会員 工博, Ph.D. 京都大学教授 工学部土木工学科
** 正会員 工博 京都大学助教授 工学部土木工学科
*** 正会員 工博 京都大学助手 工学部土木工学科
**** 学生会員 京都大学大学院 工学部土木工学科
***** 正会員 工博 住友金属工業(株) 建設技術部次長

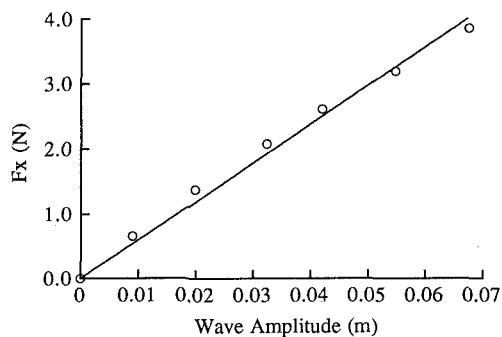


図-2 波力と入射波高の関係

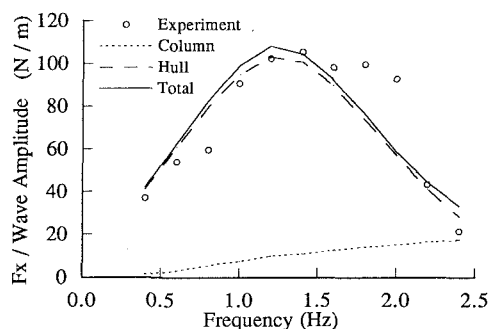


図-3 X方向波力と入射波周波数の関係

継続時間における波高, 波力の推移を知ることができる。構造物に働く波力として最も重要なのはその振幅であり, これを求めるために得られたデータの極大値, 極小値を取り出し, その絶対値の平均を求め, 振幅値とした。

図-2に, 水深 $h=65$ cm, ハルの設置水深 $d=15$ cm, 波の入射角 $\alpha=0^\circ$ (α : 構造物の x 軸と波の入射方向とのなす角) において周波数 $f=0.8$ Hz の波を入射させたときの波高振幅と波力振幅の関係を示す。両者はほぼ比例関係にあり, 原点を通る回帰直線の傾きより入射波の単位振幅あたりの波力を求めることができる。

なお, 実験においては波高の増加にともない, 次第に波の峰が尖り波の谷が平坦になり, 微小振幅波理論の適用範囲から有限振幅波 (ストークス波) の適用範囲となる。図-2の周波数 $f=0.8$ Hz の時は, 微小振幅波の適用範囲は $H/L < 0.03$ の条件より, 振幅 $\zeta_a < 0.037$ m となる。理論値は微小振幅波理論に基づいているので, 実験値も微小振幅波理論の適用範囲内のデータのみで回帰直線を考えるべきであるが, 波高の低いデータのみでは必要な実験精度を確保することが難しいため, ここでは有限振幅波の領域も含めて直線性のなりたつ範囲について回帰計算をおこなっている。

3.2 理論値との比較

水深 $h=65$ cm, ハルの設置水深 $d=15$ cm, 波の入射角 $\alpha=0^\circ$, 90° の場合の単位振幅あたりの波力と入射波の周波数の関係を図-3, 4に示す。図中の理論値は, 橋脚部 (カラム) に働く波力についてはモリソン式で, 浮体主要部 (ハル) に働く波力については, ポテンシャル理論を用いて求めたものである。

実験値と理論値を比較すると, 全般的に両者はほぼ一致している。ハルに働く波力は周波数依存性を有しており, ほぼ, 周波数 $f=1.0\sim 1.4$ Hz 付近で最大値を有している。カラムに働く波力は, 入射角 $\alpha=0^\circ$ の時は周波数とともに増加するが, 入射角 $\alpha=90^\circ$ の時は周波数 $f=1.2$ Hz 付近で極大値をとった後, 減少し始め $f=1.8$ Hz 付近で極小値をとった後再び増加し始める。これは $f=1.8$

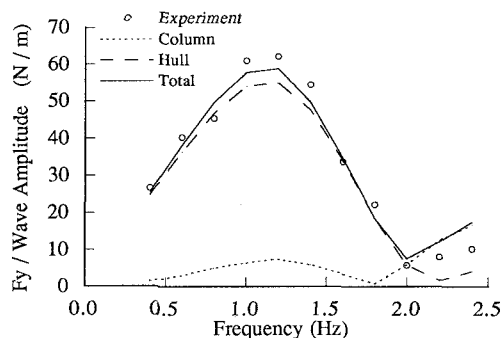


図-4 Y方向波力と入射波周波数の関係

Hz の時の波長は 48 cm であり, その半波長がハル間隔 25 cm にほぼ等しいため 2 本のハルに働く力が打ち消しあうためである。また, ハル間隔が波長と等しいときは, 2 本のハルに働く力が全く打ち消されないので大きな波力を生じる。今回の実験では $f=2.4\sim 2.5$ Hz 付近の時である。

ハルに働く力とカラムに働く力の位相を考慮した上で全波力を求めると, ハルに働く力が支配的になる。なお, カラムに働く力は慣性力と抗力からなっており, これらの合力はハルに働く力とは $\pi/3$ から $\pi/2$ ほど位相がずれているため, ハルに働く力の大きさとカラムに働く力の大きさの単純和が模型に働く波力の大きさとなるわけではない。入射角が $\alpha=90^\circ$ の場合は高周波域でカラムに働く力が大きくなるので, この力が支配的になる。

3.3 ハルの設置水深による影響

水深 $h=65$ cm, 波の入射角 $\alpha=0^\circ$ の場合において, ハルの設置水深 d を 10, 15, 20 cm にしたときの実験結果を図-5に示す。設置水深別に F_x/ζ_a の実験値の最大値を調べると, $d=10$ cm の時は 149.19 N/m, $d=15$ cm の時は 105.42 N/m, $d=20$ cm の時は 92.82 N/m であり, ハルを沈めるほどこれに作用する波力は小さくなるのがわかる。深海においては, 水深が深くなるほど水粒子の

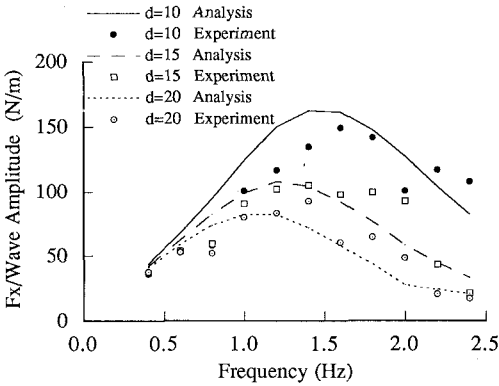


図-5 ハル設置水深による波力の変化

移動加速度は小さくなるため、ハルの受ける波力は小さくなる。

深海における微小振幅波理論及びモリソン式を使って F_x/ζ_a について考えると次式のように表される。

$$\frac{F_x}{\zeta_a} = C_m \rho g k V e^{-kd} \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 k ：波数、 V ：浮体式水中基礎の体積、 d ：静水面からハルの中心までの深さである。上式より、 F_x/ζ_a の値はハルの設定水深 d に関して $\exp(-kd)$ の項により指数関数的に減少する事がわかる。このことから、ハルに作用する波力を低減する上で、この設置水深を深くすることが有利であることがわかる。

F_x/ζ_a が極値をとるときの周波数は次式を満たす。

$$\frac{\partial}{\partial k} \left(\frac{F_x}{\zeta_a} \right) = 0 \dots \dots \dots (2)$$

よって、

$$f_{peak} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{d}} \dots \dots \dots (3)$$

$d=10$ cm のとき $f=1.576$ Hz、 $d=15$ cm のとき $f=1.287$ Hz、 $d=20$ cm のとき $f=1.114$ Hz と計算される。図-5 においてもこれらの値付近で最大値をとっており、ハルの深さを変えることによって F_x/ζ_a の分布が低周波側へ移動するといえる。また、この時の F_x/ζ_a の値を (1) 式により求めると、

$$F_x/\zeta_a = C_m \rho g V / (ed) \dots \dots \dots (4)$$

となる。ここで $C_m=2.0$ とすると、 $d=10$ cm のとき $F_x/\zeta_a=170$ N/m、 $d=15$ cm のとき $F_x/\zeta_a=113$ N/m、 $d=20$ cm のとき $F_x/\zeta_a=85.0$ N/m となり、ほぼ実験値に一致する。従って、式(3)、(4)は近似式として有効に用いることができる。

3.4 潮流力について

造波水槽に付設されている定常流発生部を作動させて潮流を起し、模型が流れ方向に受ける力を測定した。

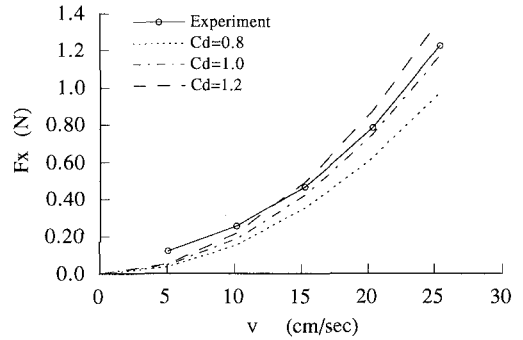


図-6 X方向潮流力と流速の関係

ハル及びカラムに作用する力は次の抗力式を使って評価する。

$$F_{drag} = \frac{1}{2} C_d \rho A v^2 \dots \dots \dots (5)$$

ここで、 A ：投影面積、 v ：流速である。実験は水深 h を 65 cm、ハルの設置水深 d を 15 cm として入射角 α が $0^\circ \sim 90^\circ$ の場合について、流れ方向に受ける力を測定した。実験値と抗力式による計算値を $\alpha=0^\circ$ の場合について図-6 に示す。この場合、抗力係数を 0.8~1.0 とすれば抗力式で潮流力を評価できる。また、 $\alpha=0^\circ \sim 90^\circ$ の領域で、 $C_d=0.8 \sim 1.2$ 程度となることがわかった。

4. ハル形状の効果に関する数値解析

浮体式水中基礎を使って海上橋梁を作る場合、基礎部分の浮力一定 (体積一定) の条件のもとでこれに働く波力がより小さい方が望ましい。ここでは、先に述べた波力算定プログラムによって流体力学的に有利なハル形状を考える。

4.1 単ハル形状の効果

まず水中にハルが1つだけある場合を考える。ハルの形状としては同底部投影面積、同体積を有する、円筒 (Cylinder)、直方体 (Hexahedron)、両端半球付き円筒 (Cylinder with half-spheres) の3種類を考えた。ハルの形状図を図-7 に示す。ハルの設置環境は水深 $h=65$ cm、ハルの設置水深 $d=15$ cm とし、波の入射波 α が 0° の場合について計算を行った。 $\alpha=0^\circ$ のときの F_x/ζ_a 、 F_z/ζ_a と周波数の関係を図-8、9 に示す。

入射波が 0° のときの F_x/ζ_a について考える。形状別の波力の大きさを考えると周波数によらず、円筒と両端半球付き円筒はほぼ等しい、あるいは両端半球付き円筒が円筒をやや下回っている。直方体については、周波数 $f=1.6$ Hz 以下の領域において2者より多少大きな値をとる。周波数 $f=1.2$ Hz 付近の波力が最大となる領域で、この違いが大きい。ただし、 F_x/ζ_a は 1.8 Hz 以上の領域で2者より小さな値をとる。

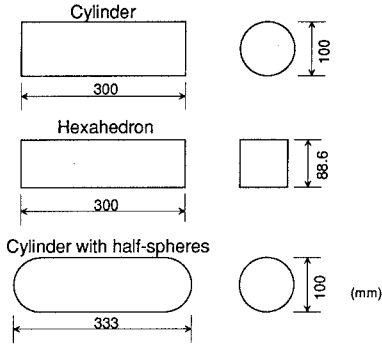


図-7 ハル形状図

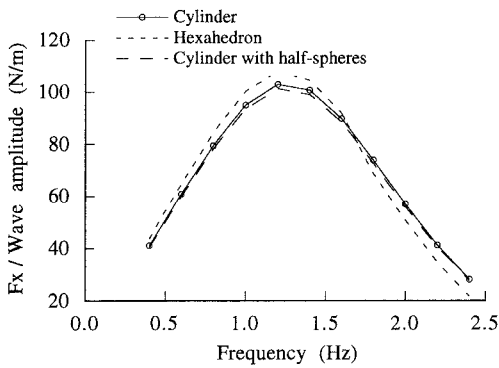


図-8 X方向波力のハル形状による変化

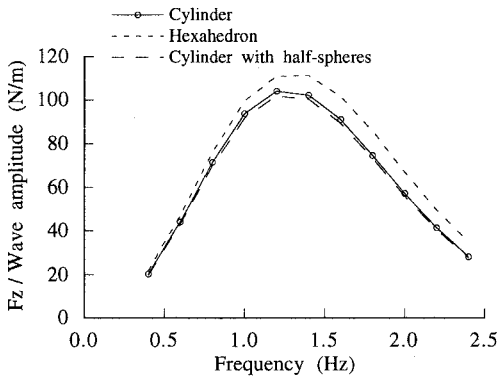


図-9 Z方向波力のハル形状による変化

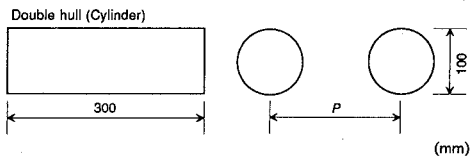


図-10 ダブル・ハル構造の形状図

次に F_z/ζ_a について考える。円筒と両端半球付き円筒の値はほぼ等しいが、周波数 $f=1.0$ Hz 以上の領域において、直方体は2者よりも多少大きな値を示しており、鉛直方向に大きな力をうけることがわかる。以上のように波力の影響を考えると、ハル形状として直方体は不利であり、ここで検討した中では半球付き円筒形が最も有利となる。

4.2 ダブル・ハル構造の効果

浮体式水中基礎を現実の設計に用いる場合、静水力学的安全性を増すために、基礎として2つのハルを持った構造を考えることがありと思われる。そこで、このダブル・ハル構造の効果についての検討を行った。ハルとして長さ30 cm、直径10 cmの円筒を間隔 $P=20, 25, 30$ cmで配置した場合を比較する(図-10)。設置環境は水深 $h=65$ cm、設置水深 $d=15$ cmとした。

入射角 $\alpha=0^\circ$ のときの F_x/ζ_a と周波数の関係を図-11に、 $\alpha=90^\circ$ のときの F_y/ζ_a と周波数の関係を図-12に示す。

ダブル・ハル構造に入射角 $\alpha=0^\circ$ で入射する波による合波力は、位相差を考慮することによって次式で近似的

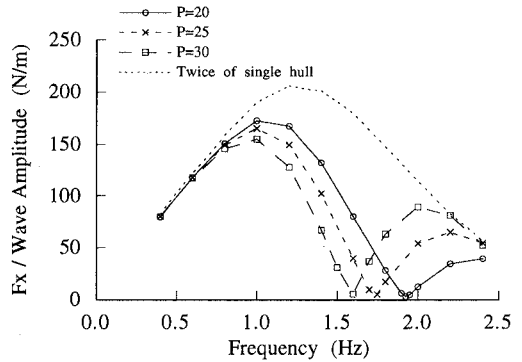


図-11 X方向波力のハル間隔による変化

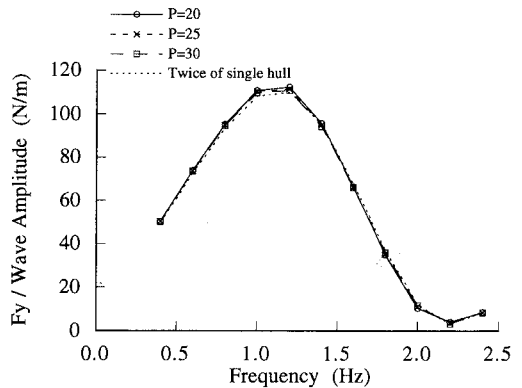


図-12 Y方向波力のハル間隔による変化

に表せる。

$$F_{\text{total}} = 2F_0 \cos\left(\frac{\pi P}{L}\right) \dots\dots\dots (6)$$

ここで、 F_0 ：単一ハルに作用する波力、 P ：ハル間隔、 L ：波長である。

すなわち、ダブル・ハル構造では入射角 $\alpha=0^\circ$ で、ハル間隔 P が半波長 $L/2$ に等しいとき、構造物に働く波力は打ち消し合う。この時の周波数 f_c を求めると

$$f_c = \sqrt{\frac{g}{2\pi L}} = \sqrt{\frac{g}{4\pi P}} \dots\dots\dots (7)$$

となる。これを計算すると、 $P=20$ cm のとき $f=1.98$ Hz、 $P=25$ cm のとき $f=1.77$ Hz、 $P=30$ cm のとき $f=1.61$ Hz となり、いずれも数値解析値と一致している。

逆に、ハル間隔が波長と等しいときは、2つのハルに同位相で波が入射するため単一ハル2本分の波力が働き、低減効果は見られない。単一ハル2本分の波力とダブル・ハル構造に働く合波力を比較すると、ダブル・ハル構造を採用することによって構造物に働く波力を低減でき、有効と思われる。また、 $\alpha=90^\circ$ のときはダブル・ハル構造と単一ハル2本分の波力ではほとんど差がない。

5. 結 言

本報告の主要な結論をまとめると、以下ようになる。

(1) 波力算定プログラムによる理論値は、実験値とほぼ一致した。よって、ハルに働く波力はポテンシャル理論で、カラムに働く波力はモリソン式で求めればよいことがわかった。また、ハルに働く波力をモリソン式による近似式((1)~(4))で近似的に評価することができる。

(2) 水中浮体基礎に働く潮流力は、抗力式で評価でき、 $C_d=0.8\sim 1.2$ を用いればよい。

(3) 波力算定プログラムによる計算結果より、ハル形状としては、今回比較した三者の中では、両端半球付き円筒が有利となる。またダブル・ハル構造にすることにより、基礎に働く合波力を低減させることができる。

参 考 文 献

- 運輸省港湾局技術課・(財)沿岸開発技術研究センター(1991): フローティングブリッジ開発基礎調査報告書, 72 p.
- Lwin, M. M. (1993): The Lacy V. Murrow floating bridge, USA, Structural Engineering International, March, pp. 145-148.
- Solland, G., S. Haugland and J.H. Gusyaven (1993): The Bergsøysund floating bridge, Norway, Structural Engineering International, March, pp. 142-144.
- Watanabe, E., C. Wu and T. Utsunomiya (1994): Wave forces on large offshore structures: an effective calculation of Green's function, Proc. of the Fourth ISOPE, pp. 252-255.