

孤立波に対する無係留半潜水型浮体構造物の運動応答に関する実験的研究

EXPERIMENTAL STUDY ON MOTIONS OF A FREELY FLOATING SEMI-SUBMERSIBLE STRUCTURE IN SOLITARY WAVE

飯塚智樹¹・新井信一²・長尾昌朋³・上岡充男⁴

Tomoki IIZUKA, Shinichi ARAI, Masatomo NAGAO and Mitsuo KAMIOKA

¹学生会員 足利工業大学大学院修士課程2年 (〒326-8558 足利市大前町268)

²正会員 工博 足利工業大学教授 工学部土木工学科

³正会員 工博 足利工業大学助教授 工学部土木工学科

⁴正会員 足利工業大学 工学部土木工学科

As semi-submersible structures have smaller resonant frequency in the heaving and rolling mode compared to surface vessels, the response of a freely floating semi-submersible structure for Tsunami is studied experimentally. The solitary wave is chosen as Tsunami. The maximum displacement and inclination of the structure show easy result to understand when the maximum slope of the solitary wave or the ratio of wave height to water depth is taken as a parameter like the wave period in regular waves. Approximately speaking, the structure climbs up to the wave height, moves horizontally as the same to the water particle, and inclines to the maximum slope of the solitary wave. The structure, however, climbs up and inclines a little more than those when the height-depth ratio is small, while a little less when the height-depth ratio is large.

Key Words : Solitary wave, semi-submersible structure, heave, sway, roll, wave height-water depth ratio

1. 緒言

半潜水型浮体構造物(以下、半潜水構造物)は、台船の様な浮体に比べて波による運動が小さいという特徴があり、沿岸の浮体式構造物として利用の可能性のある型式といえる。浅海域でのその運動の周波数応答特性は、抗力の取り扱い方などいくつかの問題が残されてはいるものの、概略の運動を推定することができる¹⁾。一方、浅海域では津波のような異常水波も構造物の安全性を検討すべき重要な自然環境条件になる。しかし著者らの知る限りでは、津波に対する構造物の応答は、台船に関する研究例^{2), 3)}を挙げられるものの、半潜水型の場合は、あまり調べられていない。半潜水構造物は上下揺れや横揺れなどの固有周期が通常、台船より長いので、津波に対するその過渡応答特性を調べておく必要がある。

そこで本研究では、津波の例として孤立波を取り上げ、この波に対する半潜水構造物の無係留時の過渡運動応答を実験的に調べ、応答の特性を明らか

にしようとした。無係留時の状況は、現地に構造物を曳航したがまだ係留していない時に津波が来襲した場合に対応する。

2. 実験模型と実験方法

実験には、図-1に示す半潜水型構造物模型を使用した。表-1に模型の詳細を示してある。また、同図に座標系も示してある。使用した実験水槽は、幅0.8mの二次元水路で図-2に示すようにピストン型造波機を有している。実験水槽に横波状態で浮体模型を浮かべ、それに孤立波を入射させた。また実験水槽には波速を調べるために容量式波高計を3本設置した。実験条件は表-2のように水深 h と孤立波高 $\eta_{\max}$ をかえた。

模型を1/100とすると発生させた孤立波は、波形勾配がやや小さいものの日本海中部地震津波の第一波程度のものとなる⁴⁾。

表-1 模型の諸元

幅(B)	248mm
高さ(D)	138.5mm
長さ(L)	450mm
重心位置	模型底部より上 71.25mm
喫水(d)	91mm
横揺れの慣性モーメント	$4.42 \times 10^5 \text{ gf} \cdot \text{cm} \cdot \text{s}^2$
上下揺れの固有周期	1.33(s)
横揺れの固有周期	2.50(s)

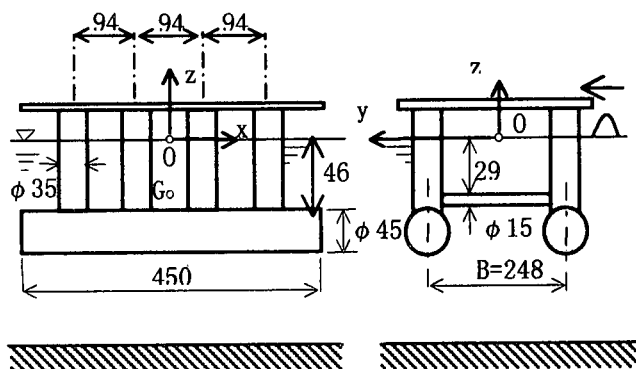


図-1 半潜水型浮体構造物模型(単位mm)

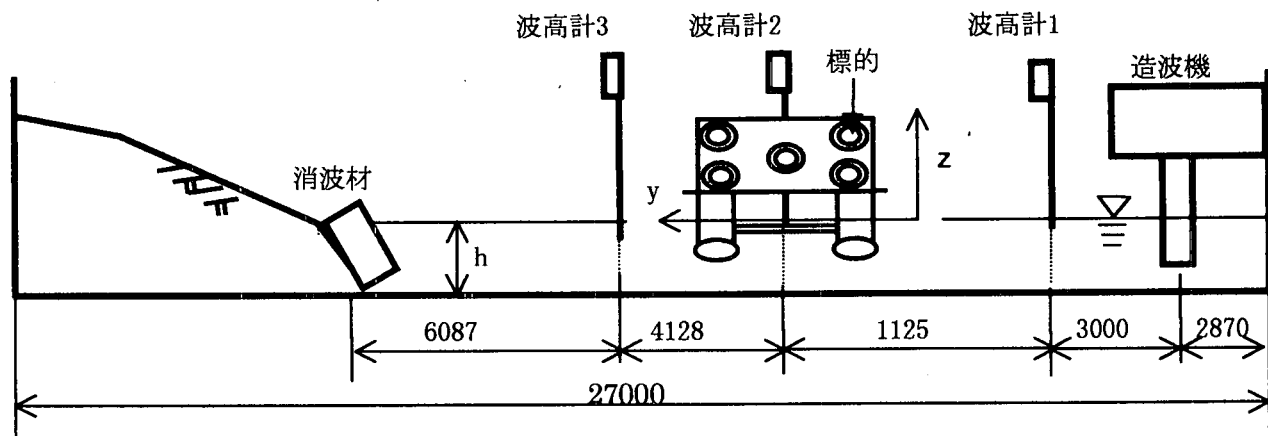


図-2 実験状況図 (単位mm)

表-2 実験条件

水深(cm)	波高(cm)
15	1, 2, 3, 4, 5
20	1, 2, 3, 4, 5
30	1, 2, 3, 4, 5

3. 運動計測方法

模型の運動は画像解析法により計測した。模型の甲板上に比較的軽いバルサ材により5点の標的をつけ、ビデオカメラでその運動を撮影した。その時、空間固定座標を確定するための標的4点を実験水槽に固定した。撮影された画像から、標的9点の画面上での座標をPIV法にて読みとり、実験水槽に取り付けた標的から模型に取り付けた標的の実座標を把握した。次に、模型の標的の実座標より最小自乗法を用いて模型の重心位置と模型の傾きを計算した。

4. 周波数応答特性

構造物の特性の一部として参考のため周波数運動応答特性を図-3に示す。図の横軸は周波数を無次元化したものであり、 B は模型の幅で、 g は重力加速度である。従って、これから周期を求めるには $T = 1.00\omega^{-1}$ とすればよい。 z_a は上下揺れの、 y_a

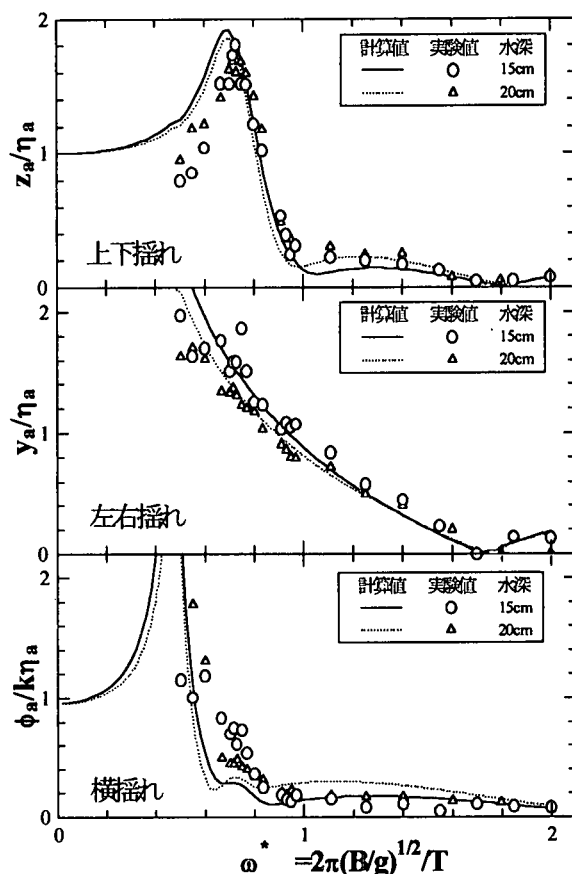


図-3 波周波数に対する運動応答特性

は左右揺れの、 ϕ_a は横揺れの振幅であり、 η_a は入射波の振幅である。また、 k は波数である。計算値は、参考のため載せたもので新井ら¹⁾の方法で求めたものである。

上下揺れは、1.33秒、横揺れは、およそ2.50秒で同調している。

5. 孤立波

本水槽では今回の実験で初めてピストン型の造波機を用いて孤立波を発生させた為、まずその孤立波を調べてみた。

実験波形と理論波形を図-4に比較した。ここに理論波形とは式(1)の第一次近似理論⁵⁾によるものである。

$$\eta = \eta_{\max} \operatorname{sech}^2 \left\{ \sqrt{\frac{3\eta_{\max}}{4h^3}} (y - Ct) \right\} \tag{1}$$

この波の波速は式(2)のごとく与えられる。

$$C = \sqrt{gh} \left(1 + \frac{1}{2} \frac{\eta_{\max}}{h} \right) \tag{2}$$

ここに η は水面高さ、 t は時間を表している。

実験で得られた波形は、水深が浅くなり波高が大きくなるに従いその後部に分散性を有する若干の水位変動を伴うが、そこを除いた水面形は理論値とほぼ一致する。図-5は、波速について比較したものである。実験値(C_{exp})は理論値(C_{cal})と良く一致する。以上のことから、ほぼ、所望の孤立波が発生していることがわかった。

6. 実験結果と考察

(1) 時系列

図-6は、模型重心点運動の時系列の一例として示した水深20cm、波高5cmの場合の計測結果である。入射波形は模型初期位置におけるものである。上下揺れと横揺れは、孤立波に揺すられた後に自由振動がのこること、左右揺れは、押されて移動しその後静止すること、などの特徴がみられる。

(2) 運動の最大変位

この様な図から、模型の上下揺れの最大上昇量 $z_{\max}$ 、左右揺れの最大移動量 $y_{\max}$ 、横揺れ最大傾斜角 $\phi_{\max}$ を求めて、すべての実験条件における結果を図-7に示した。横揺れの縦軸に使用した $(d\eta/dx)_{\max}$ は、入射波面最大勾配で、実験値である。これと模型の最大傾斜勾配 $\tan \phi_{\max}$ を比較した。水深により丸印、三角印、四角印で結果を区別した。

まず上下揺れについてだが、水深に関係なく

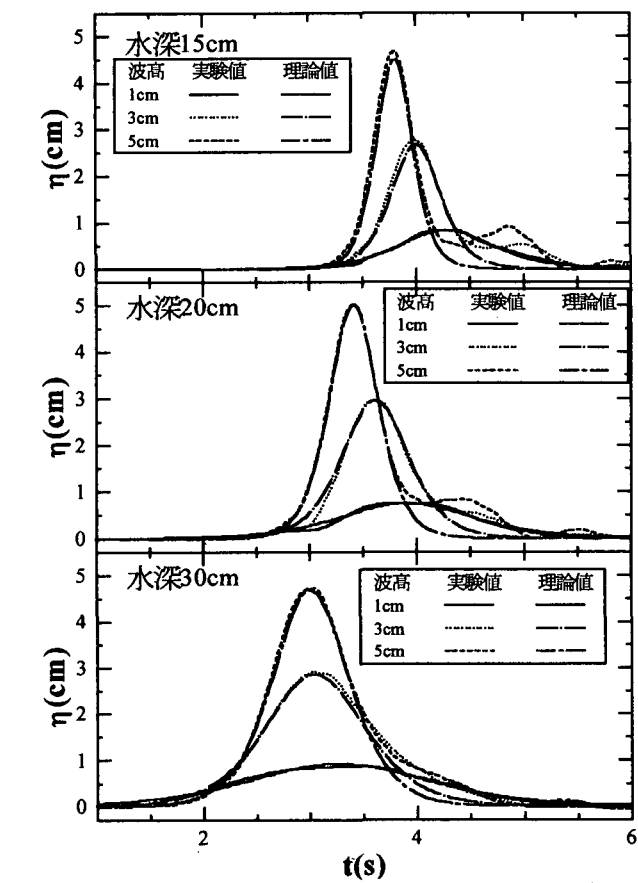


図-4 孤立波形の比較

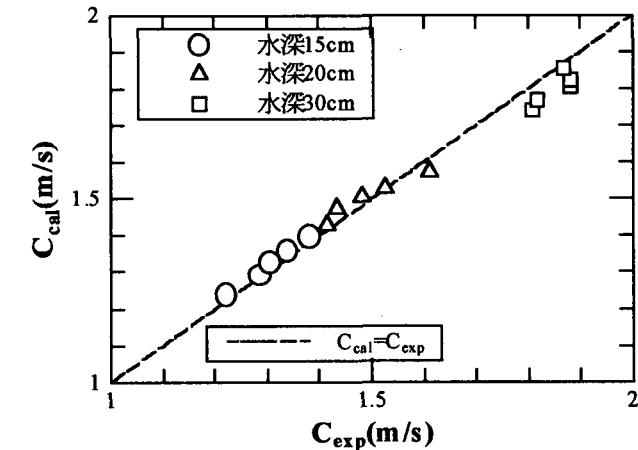


図-5 波速の比較

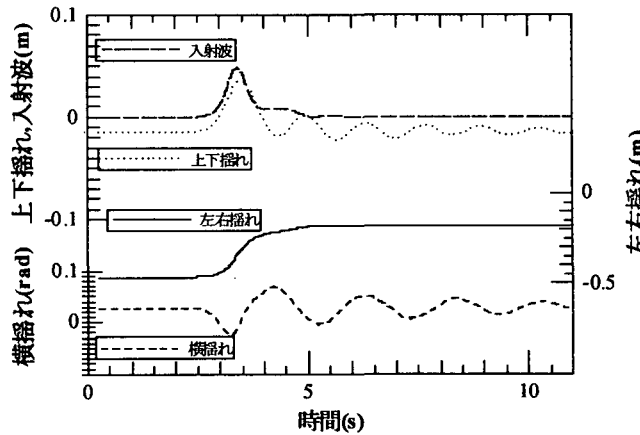


図-6 運動と入射波高の時系列

およそ入射波高と同程度上昇するだけであり、規則波中におけるような揺れの増幅現象はほとんど見られない。ただし、微妙ではあるが、入射波高が大きくなるに従って右下がりになっているといえる。その理由は図-4を見ればわかるように、入射波高が大きくなると波形勾配が大きくなり、一山の時間が短くなることがよみとれるが、その影響であると思われる。

次に左右揺れについてだが、入射波高の約5～13倍動くことがわかり、入射波高と反比例して小さくなり右下がりの傾向が見られる。また、水深による差が見られる。

次に横揺れについてである。左右揺れと同様に、水深により異なる結果が得られている。入射波高が大きくなると横揺れと入射波面最大勾配の比が小さくなり模型が孤立波に追従しなくなる現象が確認できる。

(3) 孤立波と左右揺れ

次に孤立波に対する応答を、左右揺れを例にとってさらに考察する。孤立波は周期が無限大である。しかしながら図-4をみると一山の時間が波高と水深によって変わることがわかる。この時間をここでは「みかけの周期」と以後称することとする。波面の時間勾配がこのみかけの周期に対応しているように思われるので、左右揺れを波面の時間勾配 $(d\eta/dt)_{\max}$ に対して整理してみた。ただし、波面の時間勾配は波速で無次元化して $(d\eta/dt)_{\max}/C = (d\eta/dx)_{\max}$ すなわち空間波面勾配とした。すると、図-8を得るが、図にみるようによく結果がまとまってくるのがわかる。

ところで、左右揺れの最大移動量 $y_{\max}$ と水粒子の水平移動量 $\xi_{\max}$ を比較しておく必要がある。図-9に示すように、造波板で押した体積 V の分だけ水面が上昇するから、孤立波形として式(1)を用いれば、 $\xi_{\max}$ は式(4)のごとく求められる。

$$\xi_{\max} = V/h = \int_{-\infty}^{\infty} \eta dx / h = \sqrt{\frac{16}{3}} \eta_{\max} h \quad (4)$$

一方、最大波傾斜は

$$\left(\frac{d\eta}{dx}\right)_{\max} = \sqrt{\frac{4\eta_{\max}^3}{9h^3}} \quad (5)$$

であるから、両式より、水粒子水平移動量と波高の比として、

$$\frac{\xi_{\max}}{\eta_{\max}} = 2.018 / (d\eta/dx)_{\max}^{1/3} \quad (6)$$

を得る。これを図-8に実線で示したが、これが浮体の左右揺れ移動量とほぼ同じになることがわかる。

一方、孤立波は波高水深比 $\eta_{\max}/h$ を与えれば一意に定まるから、これによる整理を考える。

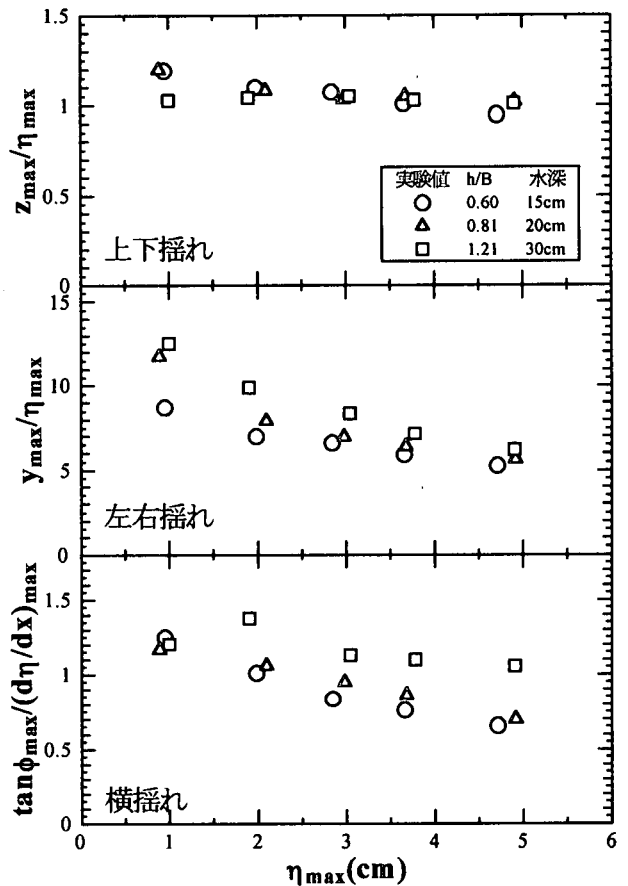


図-7 運動と入射波高の関係

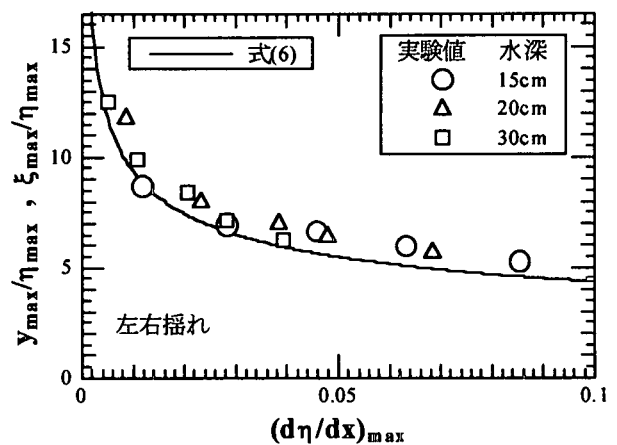


図-8 左右揺れ最大移動量と最大波傾斜の関係

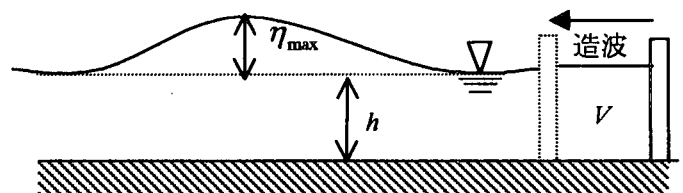


図-9 孤立波

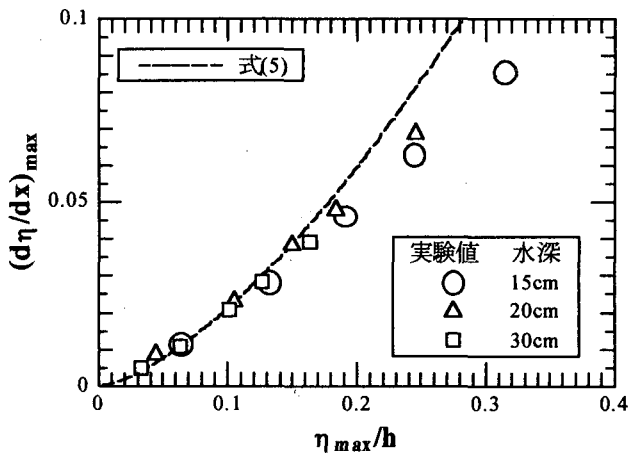


図-10 波高水深比と最大波傾斜の関係

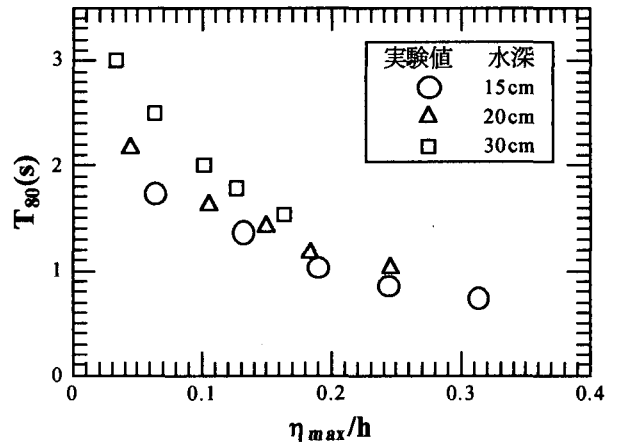


図-12 80%周期と波高水深比の関係

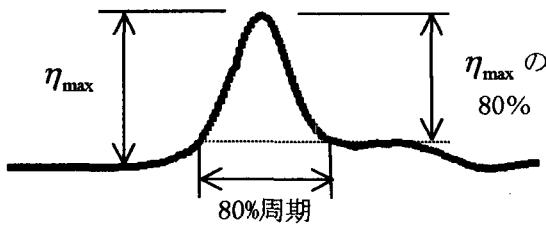


図-11 80%周期 T_{80} (s)

図-10は波高水深比と最大波傾斜の関係を示したものである。破線は式(5)であり、実験値はほぼこれに一致した結果となっている。ただし、波高水深比が大きくなると実験値が理論値からずれた値を示すようになるが、造波された波が式(2)の第1次近似式では不十分になるからであろう。

孤立波の見かけの周期を表す便法として、図-11に示すように、波高の80%の部分の時間幅をとることにして、これを80%周期と呼ぶことにする。80%としたのは孤立波後部に発生している腰掛け部の影響が見かけの周期に入らないようにした結果である。

図-12はこのような周期と波高水深比の関係を示したもので、まとまりがよいとはいえないが、波高水深比が大きくなると見かけの周期(80%周期)が短くなる状況を確認できる。以上より、図-10と12から、波高水深比で整理すれば波面勾配の大きさと見かけの周期を取り入れた形で考察することができるといえる。なお、図-12からは、上下揺れの固有周期1.33秒は実験における見かけの周期の範囲に対して真ん中にあり、横揺れの固有周期2.50秒はそのはずれにあることが認識できる。

(4) 波高水深比と運動

そこで、横軸に波高水深比を採ることとし、浮体の上下揺れ最大値は波高 $\eta_{\max}$ で、左右揺れの最大移動量は水粒子の移動量 $\xi_{\max}$ で、また、横揺れ最大角は最大波傾斜 $(d\eta/dx)_{\max}$ でそれぞれ無次元化

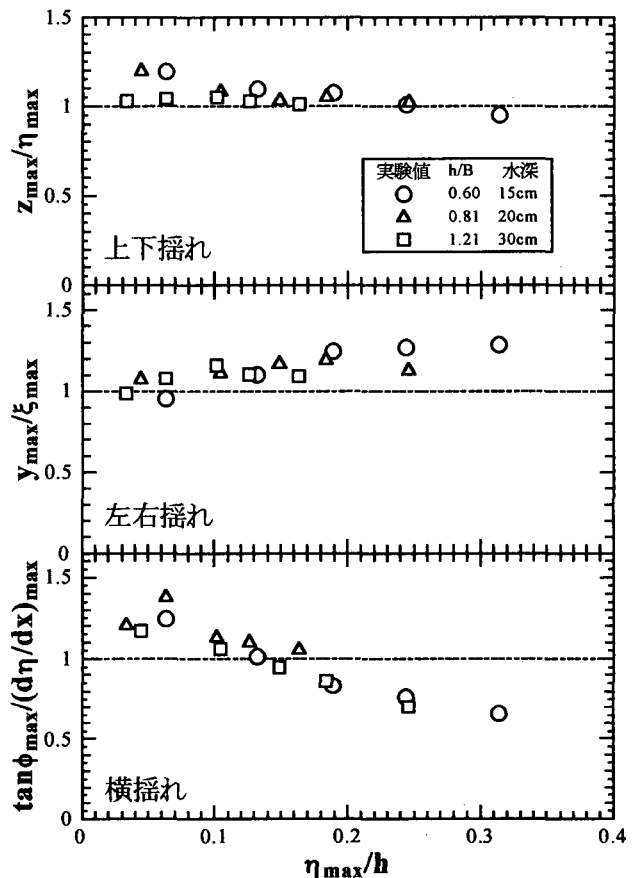


図-13 運動と波高水深比の関係

してプロットすると図-13を得る。この結果によると、まず、上下揺れは入射波高との比がおおむね1といえるが、厳密に言えば若干1より大きい場合がある。

図-3の上下揺れ周波数応答特性によれば固有周期

では入射波高の2倍近くまで大きくなるが、孤立波の場合にはその固有周期に近い見かけの周期の波がきても高々1.2倍程度であるといえる。孤立波の波高水深比が増加すると上下揺れは少し小さくなる傾向を有するが、波形が急峻になってくると浮体が水面上昇に追従しにくくなるからと考えられる。

次に、左右揺れは、およそ水粒子の移動距離と同じではあるが、波高水深比が大きくなると、それよりも若干大きく動く傾向が現れている。水粒子以上に動くことは考えにくいので、これは孤立波後部の腰掛け状の波が影響したためと思われる。左右揺れの津波による最大移動量は岸壁や係留ドルフィンなどからの待避距離として重要である。これを予測するには波高のみで処理するのではなく、津波の全波長にわたる水面波形を検討対象にしなければならないといえよう。

最後に横揺れである。波高水深比が小さいところでは浮体傾斜量が孤立波最大波傾斜より大きくなるが、見かけの周期が横揺れの固有周期に近くなるからであると考えられる。波高水深比が大きくなると波面勾配まで傾斜しなくなり、上下揺れ以上に波に対する追従性が悪くなるが、それは、横揺れの固有周期が上下揺れのそれよりも長いことによると思われる。

7. 結言

台船のような構造物と比較して長い固有周期を有する半潜水構造物について、孤立波に対するその運動応答を調べ、以下の結果を得た。

- (1) 孤立波の最大波面勾配で運動応答を整理すると左右揺れの結果が良くまとまる。また、孤立波の波高水深比は、これが大きくなると波が急峻になり見かけの周期が短くなる性質を有し、これをパラメータとして用いても、運動の特性に関して見通しのよい結果が得られる。
- (2) 孤立波に対する半潜水構造物は、概略、波

高と同じだけ上昇し、波面勾配と同じだけ傾くといえる。しかし、厳密に見れば、波高水深比が小さいときは構造物は波高より若干大きく上昇し、波面勾配より若干大きく傾く。そしてそれは規則波中の同調現象のように大きくはならない。一方、波高水深比が大きくなるにつれこれらの上昇と傾斜は波に追従しにくくなっていく。

- (3) 左右揺れの移動量は、概略、水粒子の水平移動量と同じであるといえる。ただし、波高水深比が大きくなると孤立波後部の腰掛け部分が影響する様になるため、孤立波の理論的水粒子移動量よりも大きく移動する。左右揺れは、実波形全体の効果を考慮してこれを求める必要がある。

謝辞：本研究を実施するに当たり、本学平成10年度卒業生、小川裕司、佐藤直、村田美保、山崎敦司の諸氏には実験で多大なご協力をいただいた。ここに記して感謝する次第である。

参考文献

- 1) 新井信一、長尾昌朋、上岡充男、飯塚智樹：半潜水型浮体構造物の波浪中での同調運動、海洋開発論文集、Vol. 14, pp.137-142, 1998.
- 2) 高村浩彰、増田光一、宮崎剛、橋本剛：孤立波による浮体構造物の応答並びに係留索張力の応答特性に関する水理実験的研究、海洋開発論文集、Vol. 13, pp.213-218, 1997.
- 3) 関田欣治、松宮秀樹、太田英美、鳥井正志：大規模浮体の孤立波に対する係留力と上下応答の実験、第14回海洋工学シンポジウム、pp.155-160, 1998.
- 4) 首藤伸夫：秋田県北部海岸における日本海中部地震津波、東北大学工学部津波防災実験所研究報告第一号(昭和58年5月26日 日本海中部地震津波に関する論文及び調査報告)、pp. 12-26, 1984.
- 5) 堀川清司：[新編]海岸工学、東京大学出版会、pp. 37-38, 1991.

(1999. 4. 19受付)