

フラップ型波力吸収装置に関する基礎研究

Fundamental Research on flap-type wave power absorber

前 田 康 之*・木 下 健*・前 田 久 明*

Yasuyuki MAEDA, Takeshi KINOSHITA and Hisaaki MAEDA

1. はじめに

波浪外力やそれによる応答を制御する目的で、図1のような新型の受圧面式波浪エネルギー吸収装置（以下、フラップ型装置と呼称）を考案し、実験と理論計算を行ったので結果を本報に示す。特に理論値と実験値の比較、およびフラップ装置の前面板初期角度や水深など、各種パラメータを変えた場合の影響を中心に考察する。

2. 理 論

波浪中での浮体の動揺問題は一般に線形理論の範囲内でかなりよい推定値が得られることが知られている。フラップ型装置についても線形理論（前進速度の無い場合）が適用できるものとする。

流体力計算の方法論はいままでいろいろなものが提唱されている。今回、浮遊式構造物に吸収装置を付加し、浅海域に設置する場合を想定するに当たり、Yeung^(1,2)らによって提唱された固有関数展開法と特異点分布法のハイブリッド理論が最適であろうと判断した。以下に、この理論を概説する。

まず流体領域を3つの Section に分割して考える (Fig.1)。Section I については、特異点分布法によって Green の定理から積分方程式を立てる。特異点を境界線上の Q 点に分布し、同じく境界線上の P 点から Q 点を

観察する。P 点と Q 点の距離を r とすれば、速度ポテンシャル ϕ_{II} に対して方程式は、

$$\begin{aligned} \pi\phi_{II}(P) = & \int_{\Gamma_0} \phi_{II}(Q) \frac{\partial}{\partial n} \log r ds(Q) \\ & + \int_{\Gamma_{FR} + \Gamma_{FL}} \phi_{II}(Q) \\ & \left(\frac{\partial}{\partial n} \log r - \frac{\omega^2}{g} \log r \right) ds(Q) \\ & + \int_{\Gamma_n + \Gamma_i} \left(\phi_{II}(Q) \frac{\partial}{\partial n} \log r \right. \\ & \left. - \frac{\partial}{\partial n} \phi_{II}(Q) \log r \right) ds(Q) \\ & + \int_{\Gamma_b} \phi_{II}(Q) \frac{\partial}{\partial n} \log r ds(Q) \\ & - \int_{\Gamma_0} f(s) \log r ds(Q) \end{aligned} \quad (1)$$

となる。 $f(s)$ は浮体上の境界条件より与えられる。一方 Section II, III のポテンシャルは固有関数展開により、

$$\begin{aligned} \phi_{II}(x, y) = & A_0 e^{im_0 x} \frac{\cosh m_0^R (y + h^R)}{\cosh m_0^R h^R} \\ & + \sum_{k=1}^{\infty} C_k e^{-m_k x} \frac{\cos m_k^R (y + h^R)}{\cos m_k^R h^R} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \phi_{III}(x, y) = & A_0 e^{im_0 x} \frac{\cosh m_0^L (y + h^L)}{\cosh m_0^L h^L} \\ & + \sum_{k=1}^{\infty} C_k e^{-m_k x} \frac{\cos m_k^L (y + h^L)}{\cos m_k^L h^L} \end{aligned} \quad (3)$$

となる。ただし、 A_0, C_k は未定複素係数、 m_0, m_k は固有値であり、

$$\left. \begin{aligned} m_0 \tanh m_0 h &= \omega^2 / g \\ m_k \tan m_k h &= -\omega^2 / g \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

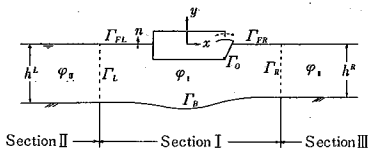


Fig. 1 Schema of the device and coordinate system

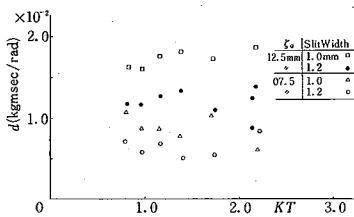


Fig. 2 Load damping

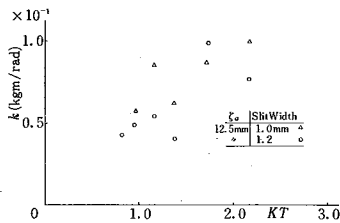


Fig. 3 Load reactance

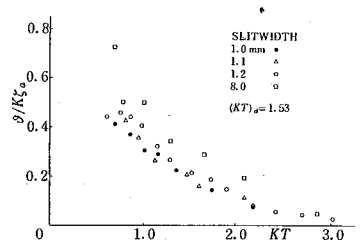


Fig. 4 Roll amplitude

* 東京大学生産技術研究所 第2部

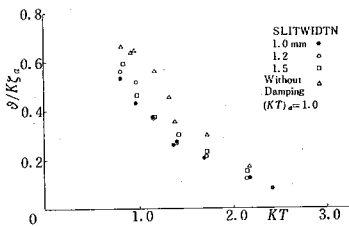


Fig. 5 Roll amplitude

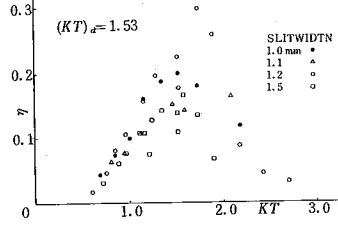


Fig. 6 Energy absorption coefficient

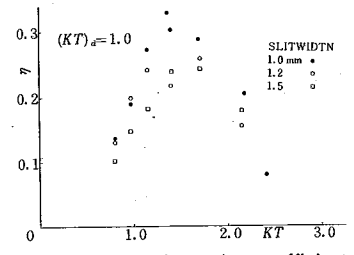


Fig. 7 Energy absorption coefficient

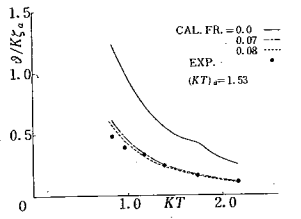


Fig. 8 Roll amplitude compared with calculation

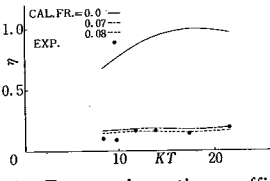


Fig. 9 Energy absorption coefficient compared with calculation

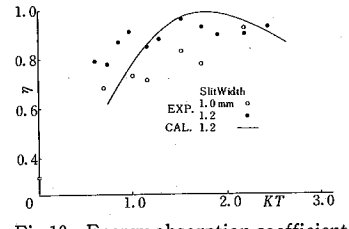


Fig. 10 Energy absorption coefficient derived from C_R and C_T

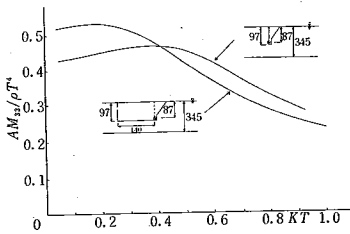


Fig. 11 Added mass coefficient (effect of float)

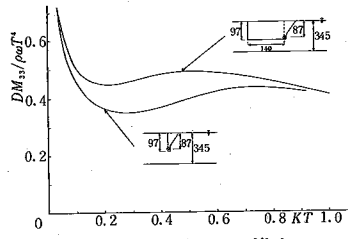


Fig. 12 Damping coefficient (effect of float)

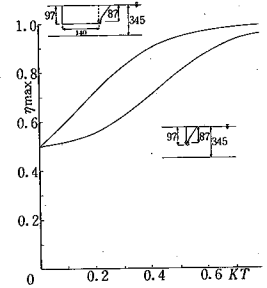


Fig. 13 Ideal max. efficiency

を満たす。ここで ω は入射波の円周波数、 g は重力加速度である。さて、仮想境界上で圧力と流速が等しいことから Section I を囲む境界条件が全て定まる。こうして得られた積分方程式を離散化手法を用い解くことにより境界上のポテンシャルと固有関数の未定係数が全て求まる。

3. 実 験

波浪中におけるエネルギー吸収実験および運動計測実験を行った。吸収実験の際、最も大きな問題は、負荷をいかに最適に設定するかである。今回はスリットによるオリフィス空気抵抗を用いたので、これが負荷システムとして適しているかも合わせて検証した。

3.1 負荷抵抗 Fig.2 に入射波高 ζ_a に対する負荷抵抗の計測値を示す。波高が2倍になると負荷もほぼ2倍になっている。無次元周波数 KT ($K = \omega^2/g$, $T =$ 吃水) に対してはほぼ一定、すなわち周波数依存性は無いと考えてもさしつかえない。よって、実験範囲内では負荷の非線型性を考慮しなくてもよい。

3.2 負荷リアクタンス 空気の圧縮性より生じる負荷

リアクタンス成分のグラフは Fig.3 に 1 例のみ示す。 KT に対して右上がりの特性を示しているが、これはたとえば、当研究室で以前、ソルター型装置の負荷システムに採用したラミネータープの特性と定性的一致が見られる。絶対値としては静水圧による復原項などに比べて小さいので運動方程式内では大きな影響を及ぼさない。

3.3 横揺れ角 Fig.4, Fig.5 はそれぞれ設計周期 $(KT)_a = 1.53, 1.00$ における横揺れ角で、縦軸は $K\zeta_a$ で無次元化してある。Fig.4 においてスリット幅 8 mm とは、ほぼ無負荷の状態である。いずれも同調周期で若干の起伏が見られるが突出はしていない。Roll モードは Heave や Sway に比較して、造波ダンピングが大きいため一般にピークが現れにくいということが確認できる。

3.4 エネルギー吸収効率 $(KT)_a = 1.53, 1.00$ についてそれぞれ吸収効率を Fig.6 と Fig.7 に示す。Fig.6 のピークは同調点によく一致している。

研究速報

4. 実験値と計算値との比較

さて、理論計算と実験値を比較する。まず、Fig.8はスリット幅1.2mm入射波高 $\zeta_a=2.5$ cmの場合である。実験値は理論の半分程度である。これを模型スケールが小さいための摩擦影響と考え、負荷ダンピングに対応する摩擦ダンピングを想定してあるのが点線である。次に効率であるが、振幅とタンク内圧力から算出した効率は理論値に比べて低い。Fig.9に摩擦を考慮した場合、よく一致することを示す。

実験の反射率 C_R 、透過率 C_T から求めたエネルギー吸収効率は負荷と摩擦の両方の仕事を含むが、それは理論値とよい一致を示し極めて高い値である (Fig.10)。

5. 諸影響の数値計算による検討

Yeungのハイブリッド理論により作成したプログラムを用いて流体力学特性を求めた結果について述べる。運動モードは全て前面板のロールのみである。

5.1 吸収装置単体と付加浮体の影響 吸収装置の後方に矩形浮体が付加されたもの (以下モデルA) と吸収装置単体 (以下モデルB) について流体力学係数比較をした。Fig.11, 12, 13にそれぞれ付加質量、造波ダンピング、最大吸収効率を示す。

5.2 水深影響 モデルAについて水深影響を見る。実験の水深0.345mはモデル吃水0.097mに対して3.6倍であり、実験周波数範囲内では、無限水深とほとんど変わらない。それに対比して、 $h=0.184$ mと0.10mについて計算した。(Fig.14, 15, 16参照) 造波ダンピング

は長周期側で水深が浅いほど、大きくなる傾向をもつ。最大吸収効率は水深が浅いほど長周期側で有利となる。Fig.17は、ディフラクション問題を解いて得た C_T, C_R である。水深が浅いほど C_T が小さい。すなわち波を透過しにくいことが確かめられる。

5.3 初期設定角度影響 モデルBについて、フラップの前面板の初期角度の影響をみた。Fig.18, 19, 20, 21, 22にそれぞれ付加質量、造波ダンピング、最大吸収効率、浪強制力、その位相を示す。

なお今回作成したプログラムの精度は、通常範囲内で、ハスキントの関係を1%未満の誤差で満足する。

6. 応用

6.1 漂流力軽減効果について フラップ型装置の応用例として、大型バージに付加することにより漂流力を軽減する場合を考える。バージの受ける漂流力 F_D は、エネルギー吸収も散逸もない場合入射波を ζ_a 、反射波係数を C_R とすれば、

$$F_D = \rho g \zeta_a^2 C_R / 2 \quad (5)$$

である。さて、フラップ装置を取り付け、効率 η でエネルギー吸収する場合 (本計算では各周波数で同調させ、かつ最適負荷をあたえている。) はディフラクションによる反射波 $\zeta_R = C_R \zeta_a$ と吸収装置のラディエーション発散

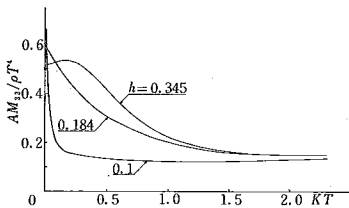


Fig.14 Added mass coefficients for various water depth

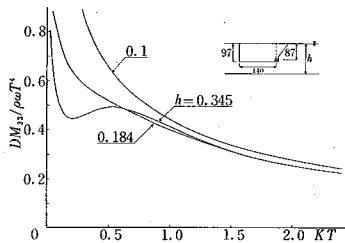


Fig.15 Damping coefficients for various water depth

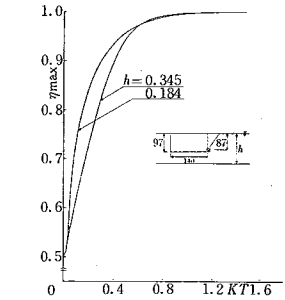


Fig.16 Ideal max. efficiencies for various water depth

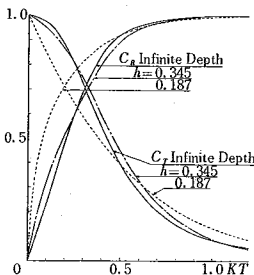


Fig.17 Transmission and reflection coefficients

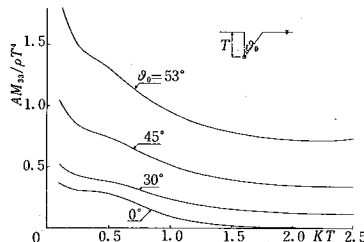


Fig.18 Added mass coefficient (effect of flap angle)

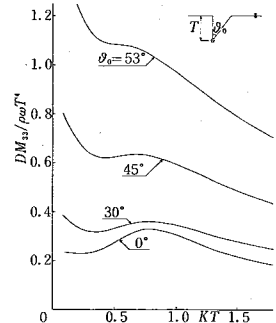


Fig.19 Damping coefficient (effect of flap angle)

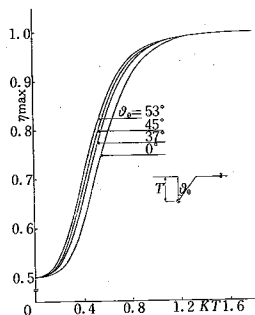


Fig.20 Ideal max. efficiency (effect of flap angle)

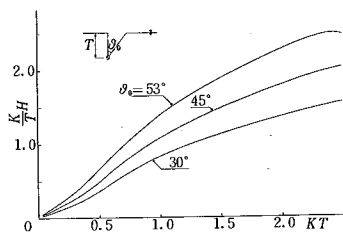


Fig.21 Wave exciting moment (effect of flap angle)

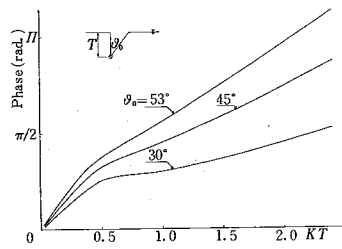


Fig.22 Phase of wave exciting moment (effect of flap angle)

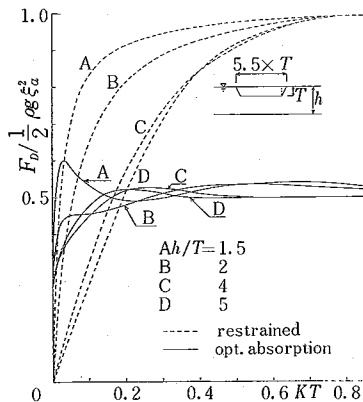


Fig.23 Drift force

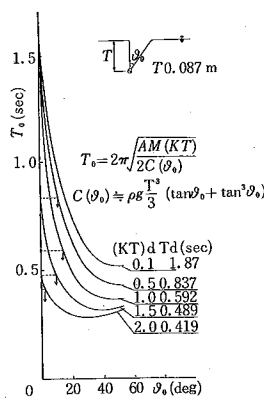


Fig.24 Tuning chart for flap angle

波 A_R の位相差を含めた和である反射波 ξ_R とすれば漂流力は、

$$F_D = \rho g \xi_a^2 / 2 + \rho g \xi_a^2 \eta / 4 \quad (6)$$

となる。Fig.23 に (5) 式を点線で、(6) 式を実線で示す。なお A, B, C, D は浅海影響である。

図から明らかなように、きわめて長波長の側では、本来透過して漂流力にはならない波エネルギーを吸収することにより漂流力が増加している。しかし、その他の全周波数では、エネルギー吸収によって漂流力を軽減することができる。周波数無限大における理論値は、無吸収のとき漂流力は最大となり、

$$(F_D)_{\max} = \rho g \xi_a^2 / 2 \quad (7)$$

であり、これに対し完全吸収時は $(F_D)_{\max}$ の 1/2 となる。

6.2 同調周期操作について フラップ型装置の持つ特徴のひとつに、前面板初期角度を操作することにより同調周期を変化させることがある。その 1 例を Fig.24 に示す。このチャートは、フラップ自重をゼロと考え、バネ項には、静水圧による復原モーメントの 2 倍を想定している。なお、静水圧による復原モーメント C は、初期角度 θ_0 の関数であって、微小振幅を仮定し一次成分のみとれば、

$$C(\theta_0) = T^3 \rho g (\tan \theta_0 + \tan^3 \theta_0) / 3 \quad (8)$$

である。

7. 結 び

従来、単体として取り扱われてきた波浪エネルギー吸収装置を浮遊式構造物に組み込むことを想定し、シンプル形状で、小型で長周期に同調するものとしてフラップ装置を提案し、ハイブリッド計算法により、その流体力学特性を明らかにした。さらにこの装置の特徴を生かし、同調周期の操作が比較的容易にできることを示した。また漂流力軽減装置として利用できることを示唆した。

本研究に際して、本所研究員の日本大学増田講師と防衛大学経塚助手にご協力をいただきました。末筆ながら感謝の意を表します。 (1984年11月8日受理)

参 考 文 献

- 1) Yeung, R. W. : A Hybrid Integral-Equation Method for Time-Harmonic Free-Surface Flow : the First International Conference on Numerical Ship Hydrodynamics, Gaithersburg, Maryland, October 20-22, 1975, pp. 581-607
- 2) Yeung, R. W. & Bouger, Y. C. ; Hybrid Integral-Equation Method for the Steady Ship Wave Problem : the 2nd International Conference on Numerical Ship Hydrodynamics, Berkeley, Calif., September, 1977, pp. 160-175