

17 高速域における船舶の波浪衝撃水圧簡易計算法の検証

構造強度部 竹本 博安 佐久間 正明
岡 正義

1. 概要

大洋を航行するコンテナ船やバルクキャリア等の大型船から水面での動的揚力を利用している高速フェリーやプレジャーボートまで、波浪中を航走する船舶に作用するスラミングによる波浪衝撃荷重は、時には船体に重大な損傷を与えることもあり、設計段階での十分な検討が必要な荷重のひとつである。

著者等は船舶が波浪中で受ける水面衝撃水圧の簡易推定法を提案している[1]。この衝撃水圧簡易推定法と Chuang の 3次元模型実験[2]とを比較したところ、両者は比較的によく合っているが、前進速度が大きくなると推定値が実験値よりかなり大きくなることが確認された。この原因として、前進速度が大きくなると衝撃荷重が大きくなるため、加速度の影響があるのではないかと思われたが、検討の結果、加速度の影響は無視できることが判明した[1]。この検討の過程で衝撃荷重の大きさに対して実験装置の模型支持部の剛性が相対的に低いことが明らかになった。衝撃荷重が大きくなると模型支持部が弾性変形するために水面との相対速度が変化して、計測結果に影響を受けている可能性がある。

この現象を明らかにするために模型と落下装置をモデル化し、これに作用する荷重として、著者等が提案している衝撃圧推定法と等価な Wagner の理論による荷重を用いて、上記の 3次元模型実験に対応する水面衝撃現象の数値シミュレーションを行った。その結果、模型の落下速度、前進速度が大きくなると、模型に作用する衝撃荷重による模型支持部の変形により、相対速度、および衝撃水圧が大幅に変化し、低速時とは異なる傾向を示すことが明らかになった。このシミュレーションにより求められた衝撃水圧は、Chuang の模型

実験結果と非常に良く合うことが示された。

これにより著者等が提案している衝撃水圧簡易推定法が高速域でも問題なく使用できることが確認されたといえる。本論文ではその概要を報告する。

2. 経緯

2.1 衝撃水圧簡易推定法[1]の概要

ここで述べる衝撃水圧推定法は、(a) 対象とする物体表面および水面の向き、速度を用いて衝撃角、衝撃速度を求め、(b) これらから衝撃水圧のピーク値を計算、衝撃水圧の分布から対象とする物体表面にかかる平均水圧を求めるという手順からなる。

2.1.1 衝撃角、衝撃速度

この計算法では、船体表面に平行な速度成分は衝撃荷重を生じないこと、波面に垂直な速度成分と波面と物体のなす角度により衝撃荷重が決まることを前提としている。図-1に示すように船体表面の微少部分 s と波面 w を考え、それぞれの面に垂直な単位ベクトルを \mathbf{n}_s 、 \mathbf{n}_w とする。また、船体表面の微少部分 s と波面 w の速度ベクトルをそれぞれ V_s 、 V_w とする。

船体表面の微少部分 s と波面 w の相対速度 V_r は次式で与えられる。

$$V_r = V_s - V_w \quad (1)$$

船体表面の微少部分 s と波面 w のなす角 ξ は次式で与えられる。

$$\cos \xi = (\mathbf{n}_s \cdot (-\mathbf{n}_w)) \quad (2)$$

相対速度 V_r は船体に平行な成分 V_t と波面に垂直な成分 V_n に分解できる。

$$V_r = V_t + V_n \quad (3)$$

ただし、

$$V_t = v_t \cdot t_s \quad (4)$$

$$V_n = v_n \cdot n_w$$

この関係式から V_t 、 V_n を求めることが出来る。ここで t_s は船体表面に平行な単位ベクトルである。上式と n_s の内積をとると

$$v_n = -(V_r \cdot n_s) / \cos \xi \quad (5)$$

(5) 式の v_n が衝撃速度である。また、(2) 式で与えられる ξ が衝撃角である。この方法で三次元の水面衝撃問題を二次元の水面衝撃問題として扱うことが出来る。

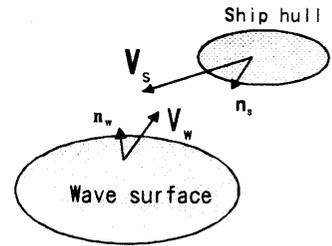


図-1 船体と水面の関係

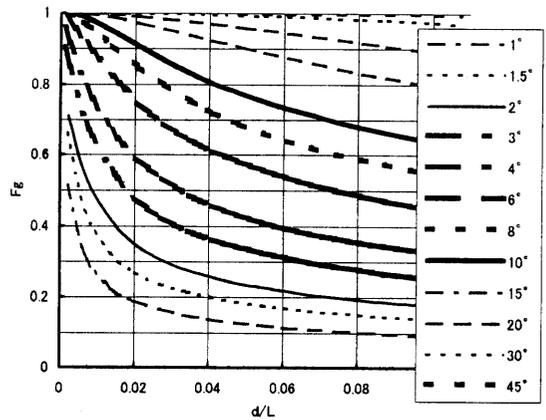


図-2 圧力減少係数: F_g

2.1.2 衝撃水圧および等価平均水圧

2次元の水面衝撃水圧の計算法として、Wagner の理論式[4]を用いる。衝撃角が大きい部分では、Ferdinande の理論[5]が成り立つ。衝撃角が大きい範囲にたいしては、Ferdinande の理論値と Wagner の理論値との比をとり、Wagner の理論値に対するピーク値の修正係数という形で処理する。

Wagner の理論による衝撃水圧は次式で与えられる。

$$P = \frac{1}{2} \rho V_i^2 \left[\frac{\pi}{\beta \sqrt{1 - (x/L)^2}} - \frac{(x/L)^2}{1 - (x/L)^2} \right] + \frac{1}{2} \rho V_i^2 + \rho z \sqrt{L^2 - x^2} \quad (6)$$

(6) 式で β は衝撃角 ξ に、 V_i は衝撃速度 V_n に当たる。

衝撃荷重を計算する場合には衝撃水圧の分形状に関する情報が必要であるが、これは衝撃圧減少係数 F_g として導入される。 F_g は次式で与えられる。 a は対象としている部分の面積である。 P_i 、 $P_{i,max}$ はその部分に働く水圧およびその最大値である。

$$F_g = \frac{1}{a P_{i,max}} \int_a P_i da \quad (7)$$

衝撃圧減少係数 F_g は対象としている部分に働く衝撃圧力の平均値と衝撃圧の最大値の比として定義される。これは衝撃水圧の分布幅 L と対象としている部分の幅 s の比で決まる。この F_g を Wagner の理論により求め、すべての衝撃角に適用する。図-2 は Wagner 型の

衝撃水圧が作用する場合の Chuang の実験の水圧センサに対応する圧力減少係数のグラフである[3]。衝撃角が小さい場合に計測値が大幅に低下することがこの図から読み取れる。

2.2 Chuang の3次元模型実験

Chuang の柱状体の三次元水面衝撃[2]について衝撃水圧の推定を行った。

2.2.1 模型の形状と実験方法

図-3 に模型と落下試験装置の形状を示す。模型の長さ約 1.8m、幅約 0.4m である。模型は3種類あり、a : 船底が平坦なもの、b : 船底の deadrise angle が船尾で 0° から船首に向かって 20° まで変化するもの、c : deadrise angle が 10° で一定のものがある。

実験では、高速曳航水槽で図-3の装置を用いて模型を前進速度一定、トリム角一定の状態、平水面に落下させ、船体模型底面に設置された水圧センサーにより衝撃水圧を計測する。Chuang は、計測値のピーク値を模型の落下速度に対してまとめている。

2.3 衝撃圧実験値と推定値との比較の例

Chuang の模型実験と本推定法による値の比較は全般によくあっているが、水平速度が大きくなると傾向が異なってくるのが分かった[1]。最も高速な前進速度を含む実験が、c 模型 (deadrise angle 一定: 10°) により、トリム角一定: 6° で行われている。図-5はこの実験に対する実験値と推定値の比較を示している。低速域で両者はよく合っているが、高速域では大きさにかなりの差が見られる。その原因について検討の結果、模型支持部の弾性変形による模型と水面の相対速度の低下が無視できないことが分かった。

以下にその解析の概要を報告する。

3. 模型実験の数値シミュレーション

3.1 解析モデル

Chuang の3次元模型実験の落下装置の概要を図-3に示しているが、模型は比較的細いロッドで落下装置に結合されている。実験での全体の落下重量は一定 (160kg) であるが、模型、治具等の個別の重量は不明である。また、模型の慣性能率、模型支持ロッドの剛性等も不明である。したがって、模型重量、模型の慣性能率、模型支持ロッドの剛性等を推定される範囲で変化させてシミュレーションを行い、その影響を検討した。

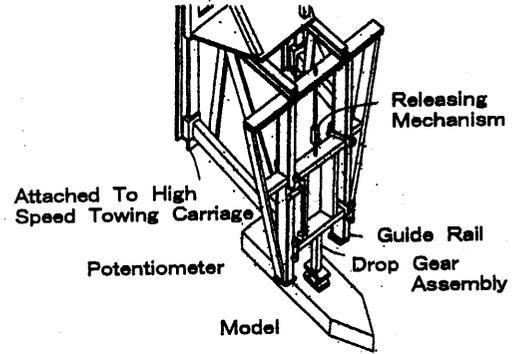


図-3 柱状体模型と落下試験装置

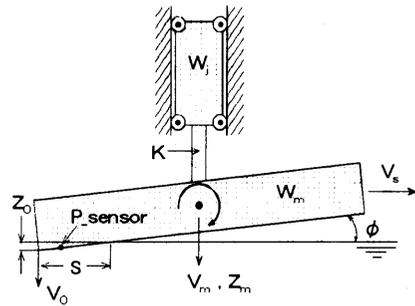


図-4 3次元水面衝撃実験装置

図-4に示す解析モデルを考え、各部の特性を以下のように設定した。

- (1) 落下治具と模型はロッドで弾性支持されており、ロッドの曲げ変形による模型の回転、トリム角変化を考慮する。

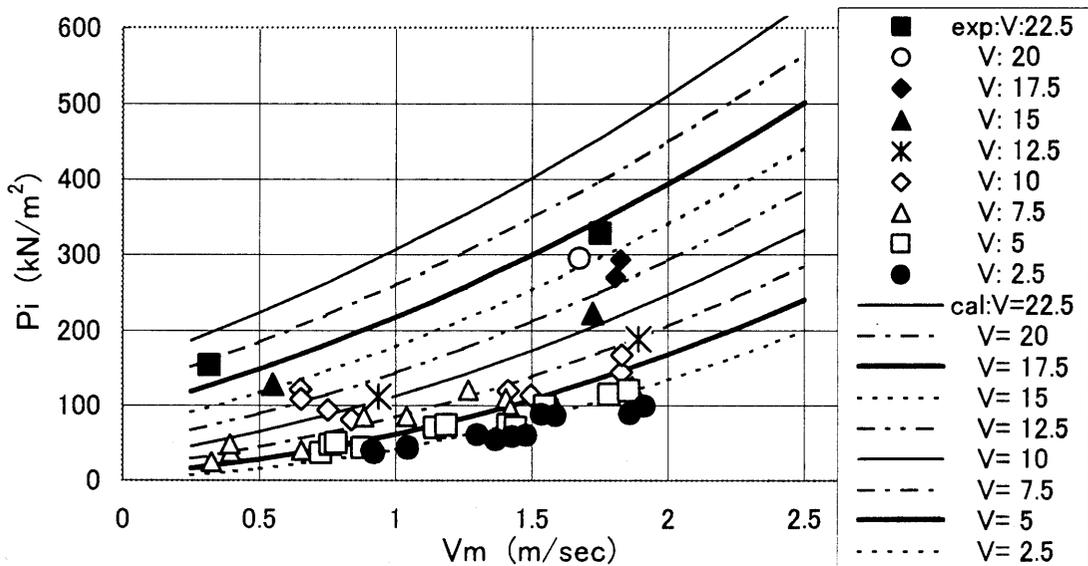


図-5 Chuang の3次元実験結果と推定値の比較: c 模型、トリム角 6°

(2) 荷重は Wagner の理論に従い、トリム角の変化を考慮する。

(3) 模型を楔形の底面を持つ一様断面の均質な柱状体とする。

(4) 模型後端部のチェーン部が接水するまでの現象を対象とする。

模型の重量を W_m 、落下治具の重量を W_j とする。模型は一定の断面を持ち長さ方向に均質であるものとし、模型の慣性モーメントを I_m とする。

計算に使用するパラメータ

模型と落下治具の重量 (kg) : $W=160$

模型の重量 (kg) : W_m

80、90、100、110、120

模型の長さ (m) : $L=1.7m$

模型の慣性モーメント :

$$I_m = \int \rho x^2 dx = \frac{W_m L^2}{12}$$

ロッドの曲げ変形に対するバネ定数 :

$k=150kN \cdot m/rad$ 、およびその 0.5、1.5、2.0 倍を考える。

($k=150$ は 50mm 角鋼製パイプ、肉厚 5mm、長さ 500mm の場合に相当する。)

落下高さ : H_0 0.0~0.22 m

3.2 模型に加わる荷重 :

水面からの荷重 (上向き) : Q_{w1} 、 Q_{w2}

落下装置からの荷重 (下向き) : R_z

重力による荷重 (下向き) : $W_m \cdot g$

荷重によるモーメント

(重心周り、反時計回り) :

$$(Q_{w1} \cdot L_{y1} + Q_{w2} \cdot L_{y2})$$

重心と衝撃荷重の中心の距離 : L_{y1} 、 L_{y2}

ロッドの回転に抗するモーメント : $-k\phi$

ϕ : 模型の時計回りの回転角 : radian、

k : 回転に対するバネ定数

落下装置に加わる荷重

模型からの荷重 : $-R_z$

重力による荷重 : $W_j \cdot g$

添記号 m : 模型、 j : 落下治具

1 : 速度に関係、2 : 加速度に関係

3.3 運動方程式

模型と落下治具の垂直方向の平衡条件から

$$\frac{W}{g} \ddot{z}_m = W - Q_{w1} - Q_{w2} \quad (1)$$

模型の回転の平衡条件から

$$\frac{I_m}{g} \ddot{\phi} = Q_{w1} L_{y1} + Q_{w2} L_{y2} - k\phi \quad (2)$$

ただし、 $W = W_m + W_j$ 、 $z_m = z_j$

ここで ϕ と z_m の関係を次式に書き換える。

$$\phi = 2^*(z_m - z_0)/L + \phi_0 \quad (3)$$

ϕ_0 は初期値。 z_0 : 模型後端の垂直変位

z_m : 模型重心の垂直変位

また、 Q_{w1} 、 Q_{w2} は次式で与えられる。計算の簡略化のために、速度の模型長さ方向の変化は少ないものとして、一様な速度に対する荷重分布とその着力点 L_{y1} 、 L_{y2} (重心からの距離) を求め、求めた着力点の速度 v_c を用いて荷重を求める。

$$\begin{aligned} Q_{w1} &= F_2(z_0^2) v_c^2 \\ &= F_2(z_0^2) (\dot{z}_c + V_s \tan \phi)^2 \end{aligned} \quad (4)$$

落下装置からの荷重

$$Q_{w2} = F_1(z_0^3) \ddot{z}_0 \quad (5)$$

加速度の影響は少ないので、簡単のため着力点の代わりに模型後端の値を用いた。

(1) 式に (4)、(5) 式を代入して次式を得る。

$$\frac{W}{g} \ddot{z}_m + F_1(z_0^3) \ddot{z}_0 = W - F_2(z_0^2) (\dot{z}_c + V_s \tan \phi)^2 \quad (6)$$

次に (2)、(3)、(6) 式を用いて、(7) 式を得る。

$$\begin{aligned} &\left(\frac{W}{g} + (1+3\delta \zeta_2) F_1(z_0^3) \right) \ddot{z}_0 \\ &= W - (1+3\delta \zeta_1) F_2(z_0^2) (\dot{z}_c + V_s \tan \theta)^2 \\ &\quad + \frac{12\delta k}{L^2} (z_m - z_0) \end{aligned} \quad (7)$$

ここで、

$$\frac{W}{I_m} = \frac{W}{W_m L^2} = \frac{W}{W_m} \frac{12}{L^2} = \delta \frac{12}{L^2}$$

$$\frac{1}{\delta} = \frac{W_m}{W}, \quad \frac{L_{y1}}{L/2} = \zeta_1, \quad \frac{L_{y2}}{L/2} = \zeta_2$$

最終的には、(6)、(7) 式を解くことになる。

ここで使用するパラメータを以下に整理する。

$$f_1 = \frac{1}{3} m_1 \left(\frac{\pi}{2 \tan \beta} \right)^2 \frac{1}{\tan \phi}$$

$$f_2 = \frac{1}{2} m_2 \left(\frac{\pi}{2 \tan \beta} \right) \frac{1}{\tan \phi}$$

$$m_1 = \rho \left(\xi_0 \sqrt{1 - \xi_0^2} + \sin^{-1} \xi_0 \right)$$

$$m_2 = \rho \left(\frac{\pi}{\beta} \sin^{-1} \xi_0 + \xi_0 + \frac{1}{2} \ln \left| \frac{\xi_0 - 1}{\xi_0 + 1} \right| \right)$$

$$\xi_0^2 = \frac{\pi^2}{2 \beta^2} \sqrt{1 - 4 \left(\frac{\beta}{\pi} \right)^2}$$

$$F_1 = m_1 \int x_0^2 dy$$

$$= f_1 Z_0^3 \eta_0 (\eta_0^2 - 3\eta_0 + 3)$$

$$F_2 = m_2 \int x_0 dy$$

$$= f_2 Z_0^2 \eta_0 (2 - \eta_0)$$

ここで η_0 は次式で与えられる。

$$\text{for } L \leq S \quad \eta_0 = \frac{L}{S}$$

$$\text{for } L \geq S \quad \eta_0 = 1$$

$$\text{where } S = \frac{Z_0}{\tan \phi}$$

3.3 初期条件

次の初期条件の元に (6)、(7) 式を Runge-Kutta 法で解く。

$t=0$ で

$$z_0 = 0, \quad z_j = 0$$

$$\dot{z}_0 = \sqrt{2gH_0}, \quad \dot{z}_j = \sqrt{2gH_0}$$

$$\phi_0 = 6 \text{ deg.}$$

3.4 解析結果

図-6 は前進速度 22.5m/sec の場合の垂直速度 V_m 、 V_0 の時系列データの例を示している。図中のパラメータは初速度である。模型重心速度 V_m に対して模型接水部速度 V_0 が大きく減少することが示されている。この傾向は前進速度が大きい程顕著である。これは前進速度により衝撃力が大きくなるために生じている。

計算結果から、水圧センサーが接水する瞬間の模型重心の落下速度と接水部の速度の比、模型のトリム角を求め、模型の重量および支持部のバネ常数との関係について整理した。

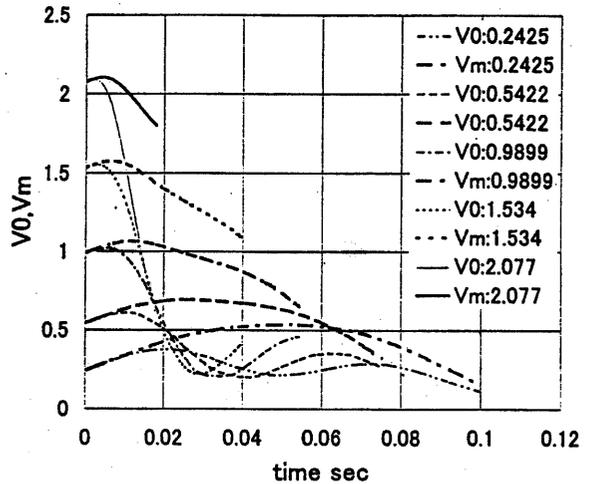


図-6 模型落下速度の時系列

$V_s=22.5\text{m/sec}$ 、 $m=110\text{kg}$ 、 $k=150\text{kN}\cdot\text{m/rad}$ 。

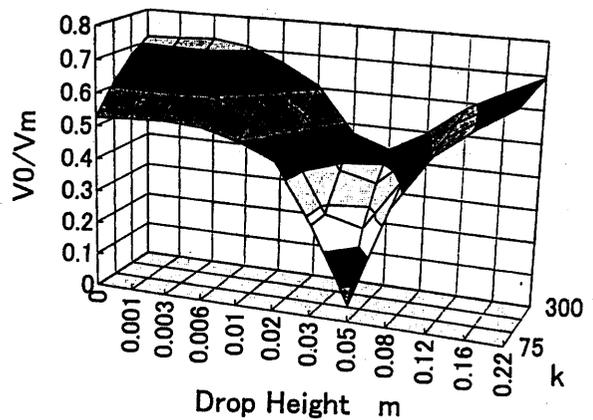


図-7 衝撃速度と支持部弾性係数の関係

$W_m=110\text{kg}$ 、 $V_s=22.5\text{m/sec}$

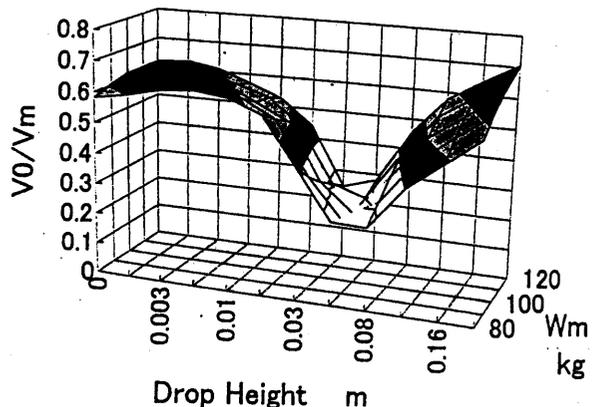


図-8 衝撃速度と模型重量の関係

$V_s=22.5\text{m/sec}$ 、 $k=150\text{kN}\cdot\text{m/rad}$ 。

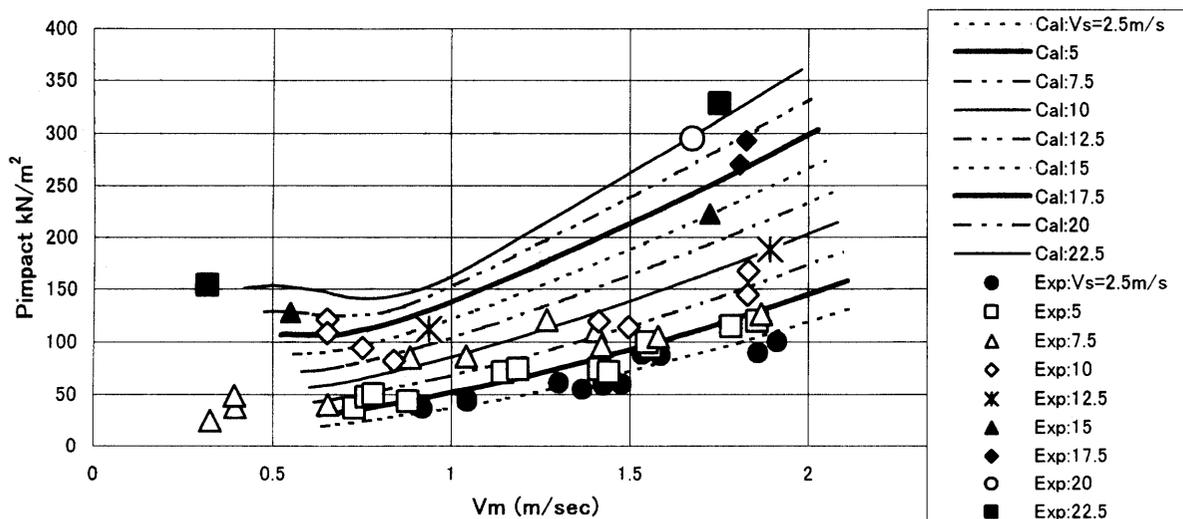


図-9 Chuangの落下実験における衝撃速度の補正を考慮する場合の推定値との比較

3.4.1 模型支持部の弾性係数

図-7に示すように模型支持部の弾性係数は V_0/V_m に大きく影響する。ここでは実際の寸法に近い $k=150\text{kN}\cdot\text{m}/\text{rad}$ の値を採用する。

3.4.2 模型重量

図-7に示すように模型重量により V_0/V_m はピークを生じる条件に若干のずれは生じるが、値の範囲はほとんど変わらない。ここでは $W_m=110\text{kg}$ を採用する。

3.5 衝撃水圧推定値と模型実験との比較

上記の模型支持部の弾性係数、模型重量の値を用いて、水圧センサー接水時の接水部速度、模型重心速度およびトリム角を求める。トリム角は高速域では若干小さくなるが、結果的にあまり影響はない。これらを用いて衝撃水圧のピーク値を求め、水圧センサーの圧力減少係数を用いて計測される水圧値に変換する。Chuangの実験では、衝撃速度として本解析の V_m に対応する模型の落下速度を用いているので、図-9ではこれらを模型重心速度 V_m に対して、実験値とともに図示している。本解析法による推定値はChuangの実験値と大きさ、傾向共に非常によく合っている。

他の模型の実験結果についても、同じようなシミュレーションが可能であると考えられる。

4. 結論

著者等の提案する水面衝撃水圧簡易推定法とChuangの3次元模型実験の比較を行い、非常に高速な前進速度を有する場合にも本推定法が有効であることを確認できた。

参考文献

- [1] 竹本博安他：船舶の波浪衝撃水圧簡易計算法について、西部造船会会報、第101号（2001年3月）
- [2] Chuang S.-L., "Slamming Tests of Three-Dimensional Models in Calm Water and Waves", Report of NSRDC 4095, (Sept. 1973)
- [3] 竹本博安：水面衝撃水圧に関する一考察、日本造船学会論文集、第156号（1984年12月）
- [4] Wagner, H., "Über Stosse und Gleitvorgänge an der Oberfläche von Flüssigkeiten", Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechnik, Vol.12, No.4 (1932)
- [5] Ferdinande, V., "theoretical Considerations on the Penetration of a Wedge into the Water," Journal of Ship Research, Vol.13, No.140 (April 1966)