(昭和 29 年 5 月 造船協会春季講演会に於て講演)

船首船底波浪衝撃に関する模型実験

正員 工学博士 吉 識 雅 夫

正員 工 学 士 山 本 善 之

正員 工 学 士 藤 田 讓

Abstract.

On the Slamming Test of a Wooden Model Ship.

By Masao Yoshiki, *Kogakuhakushi, Member,*Yoshiyuki Yamamoto, *Kogakushi, Member,*and Yuzuru Fujita, *Kogakushi, Member.*

The authors performed towing test of a wooden model ship under regular waves and measured the pressure distributions at forward bottom of the model when she was slamming, by using 19 specially designed pressure gauges.

The maximum pressure observed reached about 4 to 5 times of static pressure under regular waves and position of maximum pressure located about 0.1 L from F. P., and dynamical pressure became practically zero at about 0.25 L from F. P..

According to the experimental results, maximum pressure seemed to be related to the relative normal velocity of ship to wave rather than pitching or heaving velocity. And this result is expected from rough theoretical consideration written in Appendix and this maximum pressure can also be estimated from the pressure measured by falling test of flat or wedge shaped body on the surface of water.

Slamming appeared when the ratio of length of wave to that of ship became about 1.1 to 1.2 in this test.

§ 1. 序 言

船首船底のスラミングによる損傷は近年に於ても全く跡を絶つたとは云い難く、種々の研究が発表されている。この種の損傷の対策を考える為には、第一に船首船底に生ずる圧力の大きさ及びその分布を知ることが大切であるが、実験計測の困難の為に、未だ信頼すべき実験結果が発表されていない。

著者等は長さ 2.5 m の日聖丸（日産汽船）木製模型を使用し、その船首船底に F. P. から 0.3 L の間に 19 箇の水圧計を配置して、抵抗水槽で波浪中の曳行実験を行い、スラミング時の水圧分布を測定した。初めての試みであるから改善を要すべき点もあると思われるが、一応の結果を得たので、ここに発表して大方の御批判を仰ぎ、この種実験の発展を図り、併せて船首船底の損傷解明に寄与したいと考える次第である。

§ 2. 模型実験の概略

a) 模型船について

本実験に使用した模型船は日聖丸の 1/51.2 の模型で、その主要寸法その他は第 1 表に示す。

第 1 表

	排水量 kg	L_{0a} m	L_{pp} m	B m	D m	d m	C_B	V_s kt	V_{max} kt
模 型 船	100.82	2.699	2.500	0.342	0.204	0.161	0.728		
実 船	13,870	138.19	128.19	17.50	10.40	8.25	0.728	13.25	16.42

尚模型のピッチング及びヒービングの週期は夫々

$$T_p = 0.985 \text{ sec}, \quad \text{及び} \quad T_h = 0.945 \text{ sec}$$

に調整した。

b) 実験の方法及びその系列

東京大学工学部の船舶抵抗試験水槽に於て曳航実験を行つた。その方法は従来普通に行われている方法により、サージングに対してはバネで押えて $\pm 5 \text{ cm}$ 程度の動きを許し得る様にした。従つて実船の運動とは厳密には一致しない。

実験は波長 λ を 2.40 m にして、船の速度を $1.33, 1.03, 0.74, 0.52$, 及び 0.29 m/sec の5段階に、波高を各々の場合に $6, 9$ 及び 12 cm に変えた系列と、船の速度を 1.20 m/sec とし、波長を $3.20, 2.80, 2.40, 2.05$ 及び 1.70 m の5段階に、波高は同じく $6, 9$ 及び 12 cm の3段階に変えた2系列の実験を行つた。但し造波装置のスタビライザーの故障の為計画の波高、波長が得られなかつたものがある。

c) 水圧の測定

水圧の測定は先に著者の一人が発表した平面板の水面衝撃圧測定実験(1)に用いたものと同型の水圧計を用い

第1図 GAUGE No.24 検定曲線

た。即ち隣青銅の棒より直径 20 mm , 厚さ 0.3 mm に削り出した膜板に SR-4 型歪形を貼布して加圧時の歪から水圧を測るものである。第1図にこの水圧計の

検定曲線の一例を示す。この水圧計 19 箇を第2図に示す位置に模型船に孔を穿つて外板面と同一面に取付け、(写真1参照)間隙はアラルダイト樹脂を充填して水密を保たしめた。歪の測定には導線を電線上に導き、6素子動的歪測定装置を用い、6素子電磁オシログラムで記録した。同時には6点しか測れないので切換装置を用い走行中にスイッチ切換により全点を測定した。尚間隙充填の不工合から実験の進行と共に絶縁低下し、放棄の止むなきに至つた水圧計が数箇あつた。

註 各断面に於ける数字は Girth に沿つての距離 (cm) を表わす

第2図 模型水圧計配置概略

写真1

§3. 実験結果及びその考察

実験結果水圧計で測定した船底部に於ける最大圧力(水頭 cm にて)を第2表に示す。第2表には大体船首船底が水上に現れて水面衝撃をしたと思われるものを採録したが、※印を附したものは果してスラミングをしているかどうか疑わしいものである。尚オシログラムの例を第3図に示す。記録された変位は空中に出たもので

第2表 最大圧力測定値

実験番号	波高($2a_w$) cm	波長(λ) cm	heaving($2a_h$) cm	pitching($2\theta_p$) degree	船速(V) m/sec	最大圧力 (P_{max}) cm H	P_{max} を示す Gauge 位置	備 考
16	8.5	234	1.6	3.7	1.383	27	A ₁	
17	10.3	227	3.9	7.2	.276	28	A ₁	
18	11.1	214	3.7	5.0	.562	36	A ₁	
19	11.3	221	2.6	6.8	.745	48	B ₁	
20	11.5	226	1.9	5.3	1.098	43	C ₁	
21	12.2	168	1.4	1.0	.772	30	A ₁	43(A ₂)
22	11.5	190	1.2	1.6	.744	23	A ₁	32(A ₃)
23	11.0	236	3.7	3.8	.723	42	B ₁	
24	12.3	290	6.9	5.6	.766	46	B ₅	
26	8.9	175	9.9	0.3	.760	20	B ₅	34(A ₃)
27	9.1	220	10.1	2.3	.743	38	B ₅	45(A ₂)
28	9.4	238	3.1	3.8	.716	50	B ₁	
29	9.4	276	4.6	4.3	.725	40	B ₂	76(B ₆)
30	11.1	335	11.2	6.0	.741	54	B ₂	
31	11.6	318	9.8	5.3	.985	65	B ₁	
32	12.2	290	6.1	5.9	.718	60	B ₁	
33	13.1	302	7.9	2.7	.512	33	B ₅	
34	13.6	299	4.9	4.8	.285	42	B ₁	
73	6.6	346	5.6	3.2	.743	20	B ₂	※
74	5.0	283	3.8	2.7	.755	24	B ₁	※
75	4.2	267	3.2	2.1	.698	20	B ₂	※
76	6.6	232	1.3	1.7	.710	20	A ₁	※
77	6.4	186	0.8	1.0	.716	14	A ₁	※
78	5.9	195	1.0	0.5	.693	10	A ₁	※
79	12.2	346	12.8	6.3	1.314	63	B ₁	
89	9.2	269	3.6	5.6	.744	50	B ₁	
91	6.0	195	1.0	1.0	.780	18	B ₂	※
92	4.5	268	1.6	3.2	.783	24	S ₁	※
93	6.3	292	2.2	3.7	.765	25	S ₁	※
94	5.2	254	1.0	3.2	.765	29	S ₁	※

註 ※印は、最大圧力を示す Gauge が水面に出たかどうか疑わしいものを示す。又備考中の数字は全体の最大圧力が船側部に生じたもの及びその測定位置を示す。

第3図

一番大となると考えられるが、船底の扁平度等の関係から、0.1L 附近が最大圧力を与えるものと考えられる。

この最大圧力を出会週期をもとにしてプロットしたのが第5図である。図で見る様に出会週期と固有週期との比が 1.0~1.1 附近で大きな圧力を示す。尙当然のことながら波高は大なる程圧力は大きくなっている。

は、直ちに圧力の絶対値を示すが、運動中全く没水状態にあるものは圧力変化の量のみを示すことになる。空中に出たものは図中に水平部を有するので判別される。又水圧分布の一例を第4図に示す。大体 B₁ 点附近即ち F. P. から 0.1L 附近で最大圧力を示すが、船底と波面との相対運動は複雑であるので、B₁ 点以外の点で最大圧力が示されるものも相当数ある。船底と波面の相対速度は F. P. で一

第4図 No.28 水圧分布図

第5図

次に最大圧力を上下揺の振幅の自乗、縦揺角の自乗及び船と波の相対速度の自乗を現すものとして $A^2 n^2$ を横軸にとってプロットしたのが夫々第6図、第7図及び第8図である。但し

$$A^2 n^2 = (a_h^2 + a_p^2 + a_w^2) n^2 \quad (1)$$

a_h , a_p 及び a_w は夫々上下揺、縦揺及び波の振幅であり、 n はその円振動数である。(附録参照) 尚上式は正確

第6図

第7図

第8図

には相対速度の自乗を現さないが、一応の目安としてとつた。以上の図から判る様に、スラミング時の最大圧力は、本実験に於ては上下揺により主として支配されるとの説[2]、縦揺により主として支配されると云う説[3]よりも、第8図の相対速度により主として支配され则认为の方が適当の様である。図中に引いた直線は著者の一人が先に平板の水面落下衝撃実験で得た結果[4]の式

$$P_{\max} = 0.5 \pi \rho (A n)^2 / (0.63 \tan \theta) \quad (2)$$

但し θ は船底と波面のなす角度、 ρ は水の密度。

を用いて計算した値で、 $\theta = 9^\circ$ と採ると大体実験値の平均を通るという意味である。船の場合

に θ をいくらにとれば良いかは難しい問題であるが、この値は左程実情と離れているとは思われない。

本実験で得られた最大圧力は静水圧の約 4~5 倍程度であるが、これは規則波中の値であり不規則波の場合に

はもつと大きな値を示すであろうことは想像に難くない。尚規則波の場合も過渡現象的には更に大きい値が現出する。又船側部に船底部よりも大きな圧力が計測された例があるが、これは波と船との間の不規則な運動のあつたことを示している。

§ 4. 結 言

著者等は日聖丸の木製模型を使つて、波浪中を曳航実験を行い、スラミングの際に船首船底に受ける衝撃圧力を特に製作した水圧計を用いて測定した。その結果

- 1) 本実験に於ては衝撃圧力は F.P. から大体 $0.1L$ の附近で最大値を示し、普通に実船で経験される結果と同じ傾向であつた。そして $0.25L$ より後では殆んど圧力は問題にならない。
- 2) 最大の圧力は本実験の如く規則波の場合には静水圧の約 4~5 倍で、大体船の波面に対する相対速度に係して決まると考えて良い。そしてその圧力は平板の水面落下衝撃の際の値から推定し得る。
- 3) スラミングの激しく現れるのは波長が船長の約 $1.1 \sim 1.2$ 倍附近で起る様である。

最後に本実験は文部省科学研究総合研究「波浪中に於ける船体の強度並びに運航性能について」の一部として研究費の補助を得て行われたもので、ここに記して感謝の意を表する。又水槽実験輻輳の折柄にも不拘水槽使用の許諾を与えられた山県教授、並びに実験に従事された関係諸氏の厚意に感謝の意を表したい。

附 録

§ 1. 船と波の相対運動

静水面上に x, y 軸をとり、 x 軸が船の進行方向に一致する様に定め、 z 軸を垂直上向にとる。波長 λ の波が $V_w = (g\lambda/2\pi)^{1/2}$ の速さで x の負の方向に進むものとする。簡単の為に波形を sine 型とすると、時間 t に於ては

$$z = a_w \cos 2\pi(V_w t + x)/\lambda \quad (1)$$

船型は Σ に対し対称とし、重心も Σ にあるものと仮定する。船の速さを V とし、 Σ の位置を $x = V \cdot t$ で表す。

船の運動による波形のくずれ等の二次的のものを無視すると、 Σ に於ける波の高さ z_Σ 、傾斜 z'_Σ は夫々次の様になる。

$$z_\Sigma = a_w \cos nt, \quad z'_\Sigma = a_w \cos \left(nt + \frac{\pi}{2} \right) \quad (2)$$

但し $n = 2\pi(V_w + V)/\lambda = 2\pi V_e/\lambda$ 。

船は z_Σ 及び z'_Σ に比例する力で上下揺及び、縦揺を強制されるが、減衰力は相当大であるから [5] 強制動揺の項のみを考える。上下揺及び縦揺角は夫々次の様になる。

$$a_h \cos(nt - \varepsilon_h), \quad \theta_p \cos \left(nt + \frac{\pi}{2} - \varepsilon_p \right) \quad (3)$$

但し $a_h > 0$, $\theta_p > 0$ 及び $\pi \geq \varepsilon_h$ ($\varepsilon_p \geq 0$),

a_h, θ_p は a_w 並びに夫々の固有週期 T_h, T_p 及び減衰力で定まる。

時間 $t=0$ で坐標 $(l, y, -h)$ の外板上の点 Q に於ける波の高さ z_Q は次式で与えられる。

$$z_Q = h + a_w \cos(nt + \varepsilon_w) - a_h \cos(nt - \varepsilon_h) - a_p \cos(nt + \pi/2 - \varepsilon_p)$$

但し $\varepsilon_w = 2\pi l/\lambda$, $a_p = \theta_p \cdot l$ 。

上式を書直すと

$$z_Q = h + A \cos(nt - \varepsilon) \quad (4a)$$

$$A = [a_w^2 + a_h^2 + a_p^2 - 2a_w\{a_h \cos(\varepsilon_h + \varepsilon_w) + a_p(\varepsilon_p + \varepsilon_w)\} - 2a_h a_p \sin(\varepsilon_h - \varepsilon_p)]^{1/2} \quad (4b)$$

$$\tan(\varepsilon + \varepsilon_w) = \{-a_h \sin(\varepsilon_h + \varepsilon_w) + a_p \cos(\varepsilon_p + \varepsilon_w)\} / \{a_w - a_h \cos(\varepsilon_h + \varepsilon_w) - a_p \sin(\varepsilon_p + \varepsilon_w)\}. \quad (4c)$$

上下揺及び縦揺の理論 [5, 6] によると、 a_h/a_w は λ/L が 1.0 程度以上で、 a_p/a_w は λ/L が 0.8 程度以上で急激に大となることが知られている。(4) 式に於て共振の場合を考え、 $\varepsilon_p = \pi/2$, $\varepsilon_h = \pi/2$ (船の場合 $T_h = T_p$ のことが多いから共に共振にあるとする) とすると

$$A = \{a_w^2 + a_h^2 + a_p^2 + 2a_w(a_h^2 + a_p^2)^{1/2} \sin(\varepsilon_w - \varepsilon_1)\}^{1/2} \\ \tan(\varepsilon + \varepsilon_w) = -\cos(\varepsilon_w - \varepsilon_1) / \{a_w(a_h^2 + a_p^2)^{-1/2} + \sin(\varepsilon_w - \varepsilon_1)\} \quad (5)$$

$$\tan \varepsilon_1 = a_p/a_h$$

となり、振幅 A 、位相 ε は共に ε_w 即ち l/λ の変化によつても変化し、その模様は複雑である。

§2. 船首船底の受ける圧力についての考察

水面衝撃の理論 [4, 7, 8] によると, 衝撃圧力は大略

$$[m'(z_k)\dot{z}^2 + m(z_k)\ddot{z}]/b(z_k) \quad (6)$$

の形で与えられる。但し z_k は竜骨からの水位で, $m(z_k)$ はそのときの水の附加質量, $b(z_k)$ は吃水面の幅である。

スラミングの様に船底が水面上に出て衝撃する様な場合には (4) の関係は厳密には成立しないが, (4) が成立つものとして (6) に代入して考えると, 圧力は $A^2 n^2$ に比例する項と An^2 の項とより成ることがわかる。扁平な船底が水面を衝撃するときは $m'(z)$ の値が大きな値となり, 第1項の $A^2 n^2$ の項が大きくなることが考えられる。又 V 型の船底の場合には $m(z) \propto m_0 [b(z_k)]^2 = m_1 z_k^2$ となるので, 同様に両者とも $A^2 n^2$ に比例することになる。

尚衝撃圧力の大きさ及びその時間的变化の詳細を議論するには, 二次的に生ずる波の影響, 渦抵抗の影響等をも考えねばならぬ。前者の影響は第2項の普通の意味の附加質量の効果と同様な形で, 附加質量とは反対の影響を生ずる。[9] この場合 $n\{b/g\}^{1/2}$ が小さいから船幅程度の波となり, この影響は可成りのものと思われる。渦抵抗については $\dot{z} < 0$ の場合, 即ち船が波から相対的に浮上する場合にのみ存在し, (6) の第1項と同じ形となり符号は逆となる。この影響によつて圧力の波形が没入時と浮揚時とで非対称となることが説明される。

以上の考察には静水圧のことを省略したが, 全圧を求めるには静水圧を加えねばならぬことは当然である。

文 献

- [1] 藤田 譲; 平板の水面衝撃について, 造船協会論文集, 第94号 p. 105
- [2] J. L. Kent; The Cause and Prevention of Slamming of Ship in a Seaway. Trans. N-E. C Inst. Vol. 65 (1948-9) p. 451
- [3] 渡辺 恵 弘; 船首底衝撃について, 造船協会論文集, 第93号 p. 65
- [4] 藤田 譲; 水面衝撃理論, 東大二工卒業論文 (昭 21)
- [5] Ch. Igonet; Pitching Experiments on Models Moored at One Point, Shipbr. April (1940) p. 138
- [6] 造船協会編; 船舶工学便覧, 第2巻 (昭 25) p. 136-140
- [7] H. Wagner; Über die Landung von Seeflugzeugen. Z.F.M. Bd. 22 (1931) s.1
- [8] 渡辺 恵 弘; 波浪による船首底衝撃の一般理論, 九大流研報告 第3巻 (昭 21) p. 1
- [9] 山本 善之; 周期運動をする没水体について, 造船協会昭 21 年秋期講演会にて発表