

接岸時船舶の衝撃力について (第2報)

中央大学 教授 工学部 工学博士 林 泰 造
大成建設KK技術研究部 白井 増次郎

1. 結 言

船舶の接岸時の衝撃力の評価は緊船岸設計上重要な事がらである。前報¹⁾においては、これについて、船舶の平面回転、緊船施設 (防衝工もふくめて) の変形、および船舶のローリングを考慮した理論をたて、またその範囲内でのいろいろな一般図表を作製した。しかし、その際には船舶の仮想質量の影響についての考察を欠いていたので、本報においては、この影響を考慮して前報の理論結果を修正し、またその理論結果を実験により種々検討する。

2. 基本方程式

仮想質量をも考慮するという点を除いては前報におけると全く同一である。図-1 のような座標系をとるとき、重心の併進運動の方程式、船舶の平面形回転の方程式、およびローリング (ξ 軸まわりの回転) に関する運動の方程式はそれぞれつぎのようになる:

$$\ddot{y} + (c/M_y)y + a\ddot{\theta} + h\ddot{\phi} = 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\ddot{\theta} - (ca/I_\xi)\dot{y} = 0 \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\ddot{\phi} + (Wh/I_\xi)\dot{\phi} - (ch/I_\xi)y = 0 \quad \dots\dots\dots (3)$$

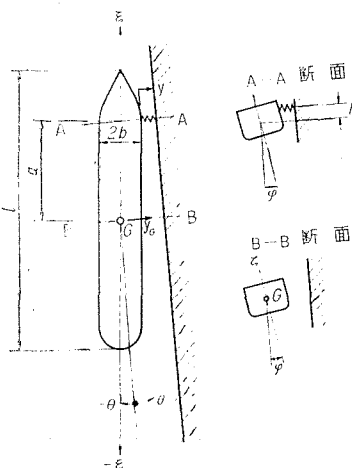
ただし、

M_y : 船舶の質量 + 併進運動の仮想質量 $= M_0 + M_y'$

c : 緊船施設全体 (防舷材をふくむ) と船舶の各変形を合わせた合成バネ係数

$I_\xi = M_\xi R^2$: ξ 軸まわりの船舶 (仮想質量をふくむ)

図-1 座 標 系



の慣性モーメント

M_ξ : ξ 軸まわりの回転に関係する船舶の質量 (仮想質量をふくむ) $= M_0 + M_\xi'$

R : 同上の回転半径

$I_\xi = M_\xi r^2$: ξ 軸まわりの船舶 (仮想質量をふくむ) の慣性モーメント

M_ξ : ξ 軸まわりの回転に関係する船舶の質量 (仮想質量をふくむ) $= M_0 + M_\xi'$

r : 同上の慣性半径

W : 船舶の総重量

h : メタセンター高さ

3. 基本方程式の解

つぎの初期条件に対する解を求めることにする:

$$(\varphi)_{t=0} = 0, (\phi)_{t=0} = 0, (y)_{t=0} = 0, (\dot{y})_{t=0} = v_0 \quad \dots\dots\dots (4)$$

これは船舶が初めはローリングなしに速度 v_0 をもって防舷材に当たる場合に当る。この場合の (1), (2) および (3) の解はつぎのようになる:

$$y = \frac{v_0}{\omega_1^2 - \omega_2^2} \left[\frac{\omega_1^2 - \omega_\phi^2}{\omega_1} \sin \omega_1 t + \frac{\omega_\phi^2 - \omega_2^2}{\omega_2} \sin \omega_2 t \right] \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$\phi = \frac{v_0}{r} \frac{h}{\omega_1(\omega_1^2 - \omega_2^2)} \left[\omega_1 \sin \omega_2 t - \sin \omega_1 t \right] \quad \dots\dots\dots (5)$$

ただし、

$$\begin{aligned} \omega_1 &= \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\omega_y^2 \left(1 + \frac{M_y}{M_\xi} \frac{a^2}{R^2} + \frac{M_y}{M_\xi} \frac{h^2}{r^2} \right) + \omega_\phi^2} \\ &\pm \sqrt{\left[\omega_y^2 \left(1 + \frac{M_y}{M_\xi} \frac{a^2}{R^2} + \frac{M_y}{M_\xi} \frac{h^2}{r^2} \right) + \omega_\phi^2 \right]} \\ &- 4\omega_y^2 \left(1 + \frac{M_y}{M_\xi} \frac{a^2}{R^2} \right) \omega_\phi^2 \text{ (複号同順)} \dots\dots\dots (6) \end{aligned}$$

4. 平面回転およびローリングによる衝撃減少の割合

y の最大値は (4) において $dy/dt=0$ を満たす瞬間、すなわち次式を満たす瞬間 (それを t_m とおく) に現れる:

$$(\lambda_1^2 - 1) \cos 2\pi \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \frac{t_m}{T_2} = -(1 - \lambda_2^2) \cos 2\pi \frac{t_m}{T_2} \quad \dots\dots\dots (7)$$

ただし、

$$\lambda_1 = \omega_1 / \omega_0, \quad \lambda_2 = \omega_2 / \omega_0 \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$T_2 = 2\pi / \omega_2 \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$\lambda = \omega_y / \omega_0 \quad \dots\dots\dots (10)$$

t_m : y が最大値をとる瞬間

(7) を満足する t_m の値を (4) に代入すると y の最大値が得られてつぎようになる:

$$y_{\max} = \frac{v_0 / \omega_0}{\lambda_1^2 - \lambda_2^2} \left[\frac{\lambda_1^2 - 1}{\lambda_1} \sin 2\pi \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \frac{t_m}{T_2} + \frac{1 - \lambda_2^2}{\lambda_2} \sin 2\pi \frac{t_m}{T_2} \right] \quad \dots\dots\dots (11)$$

一方、船舶が重心で防舷材に当たる場合 ($a=h=0$ の場合) には、そのとき、 $y_{\max}$ は (4) から、

$$(y_{\max})_{a=h=0} = v_0 / \omega_y \quad \dots\dots\dots (12)$$

そこで、前報と同様に

$$\mu = \frac{\text{繫船施設が吸収する衝撃エネルギー}}{\text{船舶が重心で当たった場合に繫船施設に加わるべき衝撃エネルギー}} \quad \dots\dots\dots (13)$$

という記号を用いれば、

$$\mu = \frac{\frac{1}{2} c y_{\max}^2}{\frac{1}{2} c [(y_{\max})_{a=h=0}]^2} = \left[\frac{y_{\max}}{(y_{\max})_{a=h=0}} \right]^2 \quad \dots\dots\dots (14)$$

これに (11) と (12) を代入すれば、

$$\mu = \left[\frac{\lambda}{\lambda_1^2 - \lambda_2^2} \left(\frac{\lambda_1^2 - 1}{\lambda_1} \sin 2\pi \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \frac{t_m}{T_2} + \frac{1 - \lambda_2^2}{\lambda_2} \sin 2\pi \frac{t_m}{T_2} \right) \right]^2 \quad \dots\dots\dots (15)$$

特殊の場合として、 $h=0$ の場合には上式より次式をうる:

$$(\mu)_{h=0} = 1 / \left[1 + \frac{M_y}{M_\zeta} \cdot \frac{a^2}{R^2} \right] \quad \dots\dots\dots (16)$$

また、他の特殊の場合として $\lambda=0$ の場合 (すなわち $\omega_y=0$, したがって防舷材が無限に軟かい場合) においては、(15) からやはり同形の次式をうる:

$$(\mu)_{\lambda=0} = 1 / \left[1 + \frac{M_y}{M_\zeta} \cdot \frac{a^2}{R^2} \right] \quad \dots\dots\dots (17)$$

一般式 (15) は、要するに、 λ , $(M_y/M_\zeta) \cdot (a/R)$, および $(M_y/M_\zeta) \cdot (h/r)$ の3個の比値のみの関数であるから、この3比値の組合わせによりあらゆる場合の μ の値を計算することができる。

實際上、起こりうる範囲は

$$\lambda = 0.3 \sim 1, \quad a/R = 0 \sim 1, \quad h/r = 0 \sim 0.6$$

と考えられる。一方、仮想質量の範囲は

$$M_y' = (0.9 \sim 1.2) M_0, \quad M_\zeta' = (1 \sim 2) M_0,$$

$$M_\zeta' = (0.05 \sim 0.15) M_0$$

と考えられており²⁾, したがって

$$M_y = (1.9 \sim 2.2) M_0, \quad M_\zeta = (2 \sim 3) M_0,$$

$$M_\zeta = (1.05 \sim 1.15) M_0 \quad \dots\dots\dots (18)$$

である。したがって、 λ , $(M_y/M_\zeta) \cdot (a/R)$, $(M_y/M_\zeta) \cdot (h/r)$ の値の起こりうる範囲はつぎのようである:

$$0 < \lambda < 1, \quad \frac{M_y}{M_\zeta} \cdot \frac{a}{R} = 0 \sim 0.8, \quad \frac{M_y}{M_\zeta} \cdot \frac{h}{r} = 0 \sim 1.2$$

この範囲について μ の値を図示する図表を作製したが、その一部が 図-2~5 に示される。

図-2 μ の値 ($\lambda=0.4$ の場合)

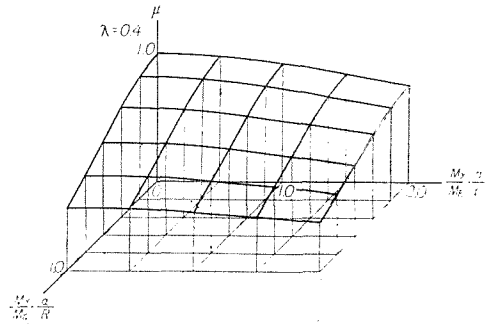


図-3 μ の値 ($\lambda=0.6$ の場合)

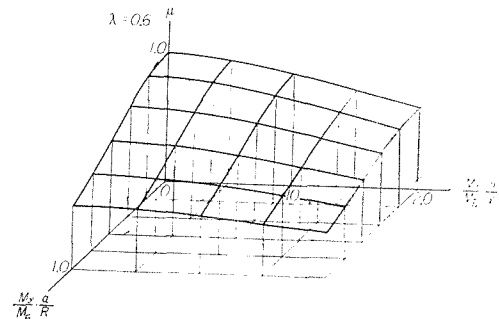


図-4 μ の値 ($\lambda=0.8$ の場合)

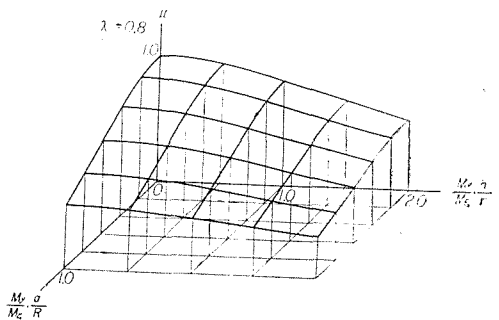
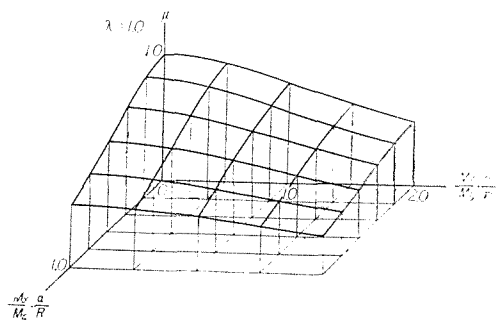


図-5 μ の値 ($\lambda=1.0$ の場合)



5. 繫船施設に加わる衝撃エネルギーと衝撃力

(13) から明らかなように、繫船施設に加わる衝撃エネルギーは次式で与えられる:

$$E = \mu \frac{1}{2} M_y v_0^2 \quad (19)$$

また、繫船施設に加わる衝撃力の最大値を $F_{\max}$ をもって表わせば、

$$\frac{1}{2} c F_{\max}^2 = E$$

であるから、これと (19) とから $F_{\max}$ はつぎのように定められる:

$$F_{\max} = \sqrt{\mu c M_y} \cdot v_0 \quad (20)$$

一方、もし仮想質量なしの船舶が重心点で接岸する場合 (すなわち $a=h=0$ の場合) の $F_{\max}$ を $F_{\max 0}$ とすると、(20) から

$$F_{\max 0} = \sqrt{c M_0} \cdot v_0 \quad (21)$$

これを (20) に代入すると、(21) は書直されて、

$$F_{\max} = \sqrt{\mu \frac{M_y}{M_0}} \cdot F_{\max 0} \quad (22)$$

となる。 $M_y/M_0=1.9\sim 2.2$ であるから、上式からつぎの関係式が得られる:

$$F_{\max} = \sqrt{(1.9\sim 2.2)\mu} \cdot F_{\max 0}$$

6. 数値計算例

基本諸数値はつぎのようなものとする:

$$W = M_0 g = 58\,000\text{ t (大型タンカー)}$$

$$k = 3.60\text{ m, } h = 6\text{ m または } 0\text{ m}$$

$$R = 70\text{ m, } r = 10\text{ m}$$

$$c = 500\sim 2\,000\text{ t/m}$$

$$a = 60\text{ m (ほぼ } 1/4 \text{ 点衝撃) および } 0\text{ m}$$

$$M_y' = 1.2 M_0, \quad M_z' = 1.2 M_0, \quad M_s' = 0.15 M_0$$

いろいろな c の値に対して μ の値を図-2~5 などより求めると表-1 のようになる。

表-1 衝撃減少率 μ

c (t/m)	$\omega_y = \sqrt{c/M_y}$ (rad/sec)	$T_y = 2\pi/\omega_y$ (sec)	$\lambda = \omega_y/\omega_0$	μ					
				a=0m		a=60m			
				h=0m	h=6m	h=0m	h=6m	⑧/⑦	⑨
①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑧/⑦	⑨
500	0.196	32.0	0.354	1.000	0.922	0.577	0.557	0.965	
1000	0.277	22.7	0.500	1.000	0.880	0.577	0.530	0.919	
2000	0.392	16.0	0.708	1.000	0.819	0.580	0.490	0.846	

つぎに、 $v_0=10\text{ cm/sec}$ として、表-1 の各場合の E および $F_{\max}$ の値をそれぞれ (19) および (20) で計算すると表-2 および表-3 のようになる。これらの表中には比較のために、仮想質量なしの船舶が重心点で接岸する場合の $E (= \frac{1}{2} M_0 v_0^2)$ および $F_{\max 0} (= \sqrt{c M_0} \cdot v_0)$ の値も記入してある。

表-2 繫船施設が吸収するエネルギー (単位 t-m)

c (t/m)	a=0m		a=60m		$\frac{1}{2} M_0 v_0^2$
	h=0m	h=6m	h=0m	h=6m	
500	65.1	60.1	37.6	36.2	29.6
1000	65.1	57.3	37.6	34.5	29.6
2000	65.1	53.3	37.7	31.9	29.6

表-3 繫船施設に加わる衝撃力の最大値 (単位 t)

c (t/m)	a=0m		a=60m		$F_{\max 0}$
	h=0m	h=6m	h=0m	h=6m	
500	255	245	194	190	172
1000	361	338	274	262	243
2000	510	462	389	357	344

また、繫船施設 (防舷材をふくむ) の最大たわみを $\delta_{\max} = F_{\max}/c$ で計算したものが、表-4 に示される。同表中の $\delta_{\max 0}$ は仮想質量なしの船舶が重心点で当る場合の繫船施設の最大たわみである。

表-4 繫船施設 (防舷材をふくむ) の最大たわみ (単位 m)

c (t/m)	a=0m		a=60m		$\delta_{\max 0}$
	h=0m	h=6m	h=0m	h=6m	
500	0.510	0.490	0.388	0.380	0.344
1000	0.361	0.338	0.274	0.262	0.243
2000	0.255	0.231	0.195	0.179	0.172

以上の計算は接岸速度 $v_0=0.10\text{ m/sec}$ に対してのものであるが、もし $v_0=0.20\text{ m/sec}$ とする場合には、表-2, 3, 4 の計算値はそれぞれ 4 倍、2 倍および 2 倍の大ききとなることはいうまでもない。

7. 実験装置および計測法の摘要

前節までに得られた理論式の妥当性のための実験を行なう。

(1) 全体的配置

実験水槽としては平面水槽 (5.5m×8.0m×0.5m, コンクリート造り) を使用し、これの一侧面にアングルおよびチャンネルを組立てて造った模型岸壁をとりつけ、模型船を浮べて実験を行なう (写真-1)。

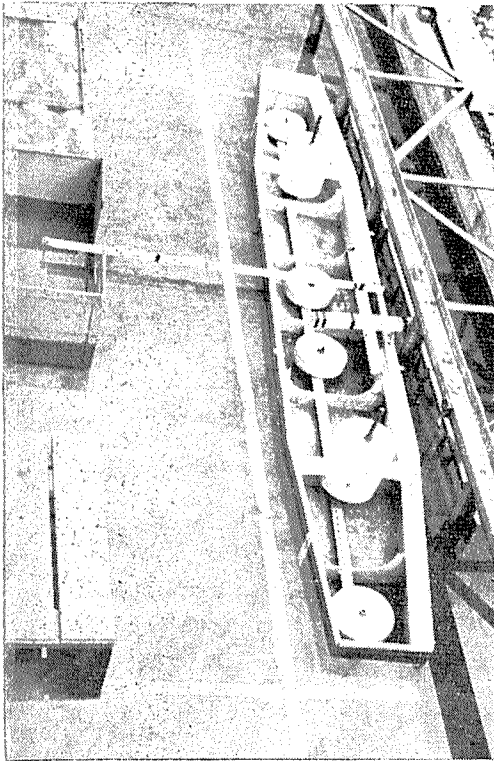
(2) 模型船

一応 60 000 t 大型タンカーを対象とし、その 1/50 の縮尺で幾何学的に相似に製作された鉄製のもの (長さ 4.00m, 巾 0.560m, 深さ 0.300m) で、総重量は 49.8.54 kg, $R=1.15\text{ m}$, $r=0.1915\text{ m}$, のものである。

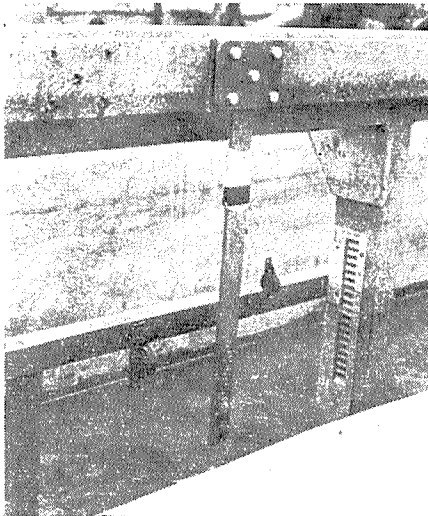
(3) 模型繫船岸および防舷材

繫船岸の全体的形状は写真-1 に示されている。その構造物が船舶接岸時に実際の繫船岸および防舷材の弾性に応ずる弾性を与えるように、それに鉛直に平鉄片を片持ばり状にとりつける (写真-2)。実際に使用したこの平鉄片のバネ常数は 0.429~1.290 kg/mm である。

写真—1 実験設備全景



写真—2 緊船施設の弾性に応じた弾性を与えるための片持ばり形のパネ



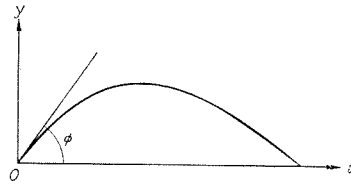
(4) 接岸力の測定

模型船の接岸力は、防舷材に当てて使用した平鉄片が船舶に接する点の変形量を測定すれば求められる。このために、鉄片根元に抵抗線ひずみ計を取りつけ、その曲げひずみをオシログラフに記録測定する。

(5) 接岸速度

緊船岸にとりつけた平鉄片の変位をオシログラフ上に記録したものの $t=0$ における接線(図—6)のなす角度

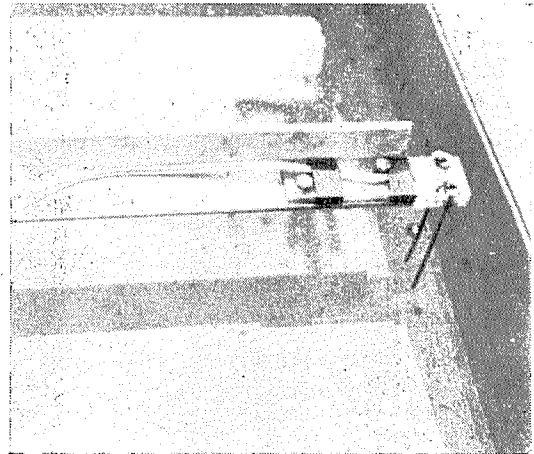
の $\tan$ をとればこれが接岸速度 v_0 を表わすはずであるから、このようにして v_0 を測定算出する。

図—6 接岸速度の算定 ($v_0 = \tan \phi$)

(6) 船舶のローリング

船舶から横方向にはり出した片持ばりの先端に電気的水位計をつけ(写真—3)、これをオシログラフに電気的に接続してローリングを記録する。

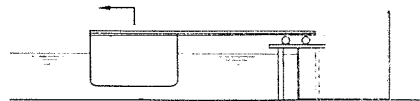
写真—3 ローリング測定のための船からはり出した横バーにとりつけられた電気的水位計



(7) ローリング拘束の実験とローリング自由の実験

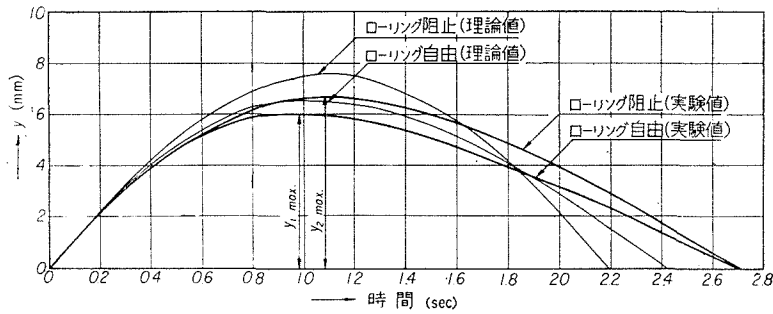
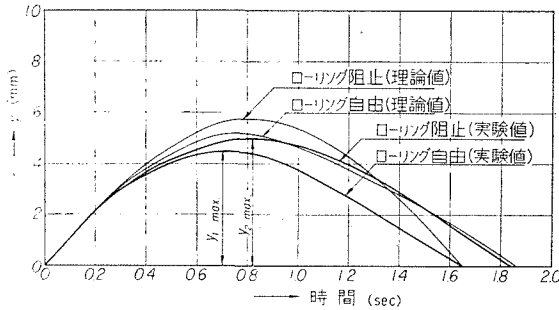
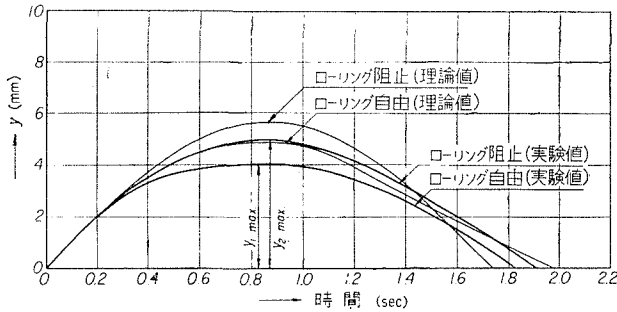
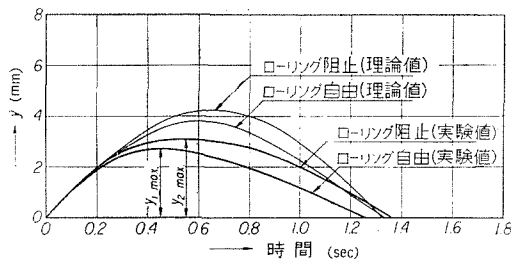
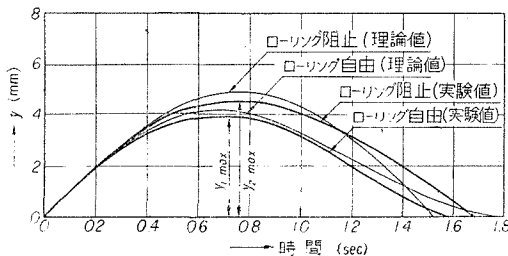
ローリングの影響を実験的にも明らかにするためには、同一の船舶についてローリング拘束の状態での接岸と、ローリング自由の状態でのその2種類の実験を行ない比較することが必要である。ローリング拘束の状態での接岸させるためには、図—7のように、船舶から横に出るバーに滑車を取りつけ、その滑車を平面台上に拘束して滑べらせる。

図—7 ローリングの拘束



8. 実験結果

図—8~15は実験結果の中の代表的と思われるものの数例を示したものである。これらの諸ケースについての要項は表—5のようである。図—8~15の中の細線は比較のために示された理論値(本報理論)である。

図-8 中央点接岸の場合 ($\lambda=0.48$ の場合)図-9 離心接岸 ($\lambda=0.480$ の場合)図-10 中央点接岸 ($\lambda=0.604$ の場合)図-11 離心接岸 ($\lambda=0.604$ の場合)図-12 中央点接岸 ($\lambda=0.690$ の場合)

これらの諸図をみると、実験値の方が理論値よりもいずれもやや小さ目に出ていることが認められる。この原因として考えられる主なものは水の抵抗であって、本報理論にはとり入れなかった水の抵抗が船舶の運動に作用して接岸中の衝撃をそれだけ減ぜしめるからと考えられる。この傾向は離心接岸のとき

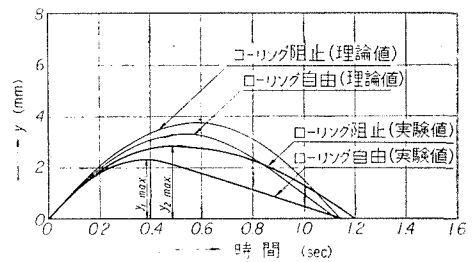
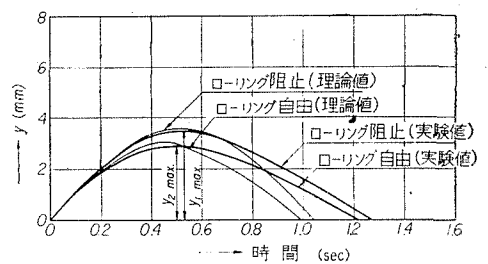
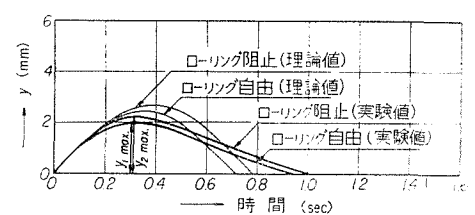
図-13 離心接岸 ($\lambda=0.690$ の場合)図-14 中央点接岸 ($\lambda=1.010$ の場合)図-15 離心接岸 ($\lambda=1.010$ の場合)

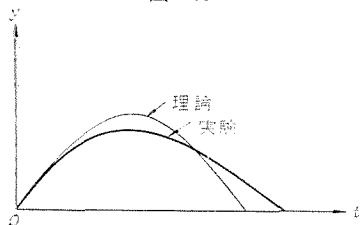
表-5 図-8～15 の実験ケースの要項

番号	$\lambda = \frac{\omega_y}{\omega_\phi}$	$\frac{h}{r}$	船舶の接岸点 接岸点	a/R	ローリング拘束の有無	備 考 v_y (cm/sec) c (kg/cm)	実験結果
①	0.480	0.56	中央点	0	両方	1.10 4.285	図-8
②	0.480	0.51	舷側 1/4 点	0.87	両方	1.10 4.286	図-9
③	0.604	0.51	中央点	0	両方	1.02 6.186	図-10
④	0.604	0.51	舷側 1/4 点	0.87	両方	1.02 6.186	図-11
⑤	0.690	0.51	中央点	0	両方	1.03 8.580	図-12
⑥	0.690	0.51	舷側 1/4 点	0.87	両方	1.03 8.580	図-13
⑦	1.010	0.51	中央点	0	両方	1.08 12.900	図-14
⑧	1.010	0.51	舷側 1/4 点	0.87	両方	1.08 12.900	図-15

にさらに顕著である。

また、これらの図において、理論値においては $y_{\max}$ を中心にして時間的に y の曲線形が左右対称(図-16)

図-16



であるのに、実験結果においてはやや左右非対称となり、 $y_{\max}$ をすぎた後の曲線形が尾をひく傾向にあることが認められ

る。この原因のおもなるものもまた水の抵抗であって、船舶の沖側へのもどりの水の抵抗によるものと考えられる。

9. 結 論

接岸時の船舶の衝撃力については、従来不明の点が多かったので、この問題につき新しく一般理論を立て、また、それを実験により確かめた。本研究全体を通じての総合的結論を記すとつぎのようになる。

1) 接岸時衝撃力の最大値は(22)で表わされる。すなわち、

$$F_{\max} = \underbrace{\sqrt{\mu}}_{\text{接岸方式による衝撃力減少係数(平面回転とローリングの影響の項)}} \cdot \underbrace{\sqrt{M_y/M_0}}_{\text{仮想質量の項}} \cdot \underbrace{\sqrt{cM_0} \cdot v_0}_{\text{船舶の重量と速度、船体設計のバネ常数による項}}$$

μ の値は一般図表(図-2~5 等)に示されるようである。 M_y/M_0 の値は従来の研究によれば 1.9~2.2 の程度とされているから、 $F_{\max}$ が $\sqrt{cM_0} \cdot v_0$ より小さくなるのは $\mu < \frac{1}{1.9} \sim \frac{1}{2.2}$ の範囲の場合に限る。

2) 前項に示されたように、接岸時の衝撃力に対する μ の影響は仮想質量の影響により相殺されると考えねばならぬ場合が多いから、船舶の平面回転やローリングの影響を考慮しても衝撃力を仮想質量なしの船舶の重心接岸時衝撃値 ($= \sqrt{cM_0} \cdot v_0$) より小さく評価することは一般には困難である。

3) 前項のような意味においていえば、接岸時船舶の衝撃力に最も影響をもつものは船舶の仮想質量であり、つぎに船舶の接岸箇所(すなわち平面回転)、第3番目のものとして接岸点の高さ(すなわちローリング)、ということになる。

4) 実験室で行なった実験の結果は理論と一般にかなりの一致の傾向を示している。しかし、衝撃力については、実験値の方が常に多少小さ目になっており、これは理論にはとり入れることのできなかつた水の抵抗が船舶の運動に作用して接岸中の衝撃をそれだけ減じしめたからと考えられる。したがって水の抵抗は本報理論に対して安全側の誤差を与えるものと考えることができる。

付記 本研究の遂行に当っては、終始、当時中央大学学生であった成行淳、土屋一両君の熱心な協力を得た。両君に深く感謝する。

参 考 文 献

- 1) 林 泰造: 接岸時の船舶の衝撃力, 海岸工学講演会講演集, 昭和35年11月, pp. 101~109.
- 2) 元良誠三: 船体運動学, 共立出版, 昭和32年.