

津波による漁船の係留ラインの張力について

誌名	水産工学研究所技報. 水産土木
ISSN	03892344
著者	中山, 哲巖 山本, 正昭
巻/号	6号
掲載ページ	p. 171-182
発行年月	1985年3月

津波による漁船の係留ラインの張力について

中山 哲巖*・山本 正昭*

目 次

1. はじめに……………	171	4.1 水位及び流速変動……………	174
2. 実験装置及び測定方法……………	171	4.2 張力……………	176
3. 実験ケース……………	172	4.3 浮力による張力の算定……………	178
4. 実験結果及び考察……………	174	5. まとめ……………	180

1. はじめに

津波に対して漁船等小型船舶がその難を逃がれるためには、津波が沿岸に達する前に十分水深の大きい地点すなわち沖へ避難することが最善であろう。

しかし、1983年5月26日12時0分日本海中部地震により発生した津波は、発生地点が陸岸に近いため震源に近い秋田・青森の沿岸では発生後7分足らずで到達していた。このとき、漁港及び港湾内に係留されている船舶が津波により係留ロープが破断し、船舶が港内外、陸上部を漂流、自らだけでなく他の構造物に損害を与えていることが比較的多かった。

港内に停泊中の船舶、周辺構造物の津波による被害を最小限に抑えるためには、係留ロープの破断による船舶の漂流を防止することも重要である。本研究では、津波によって発生する係留ロープの張力の挙動を実験によ

て調べ、津波来襲時の有効な係留方法について検討を加えた。

2. 実験装置及び測定方法

実験は、模型縮尺1/50を想定し、図1に示すような全長100m、深さ1.5m、幅1mの水路で行なった。水路後部は勾配1/10の斜面、続いて5mの水平床を有している。水平床部に図2に示すような4種類の岸壁模型を設置し、図3に示す模型漁船(船長86cm、船体重量4kg)を係留し、それぞれの係留ロープ(ナイロン製燃糸12号)に歪ゲージ式張力計を取り付け張力を測定した。また、容量式波高計を沖・船体直前に設置、プロベラ式流速計を船体直前、背後に設置して水位、流速の時間変動を同時に測定した。なお、測定機器の性能は表1の通りである。

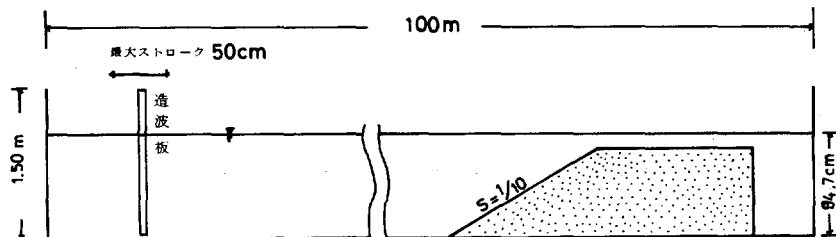


図1 実験水路

* 漁港水理研究室

3. 実験ケース

岸壁模型は、I, II, III, IVの4種類であり、それぞれ

れ次の様な場合を想定して設定された。(表2参照)
 。岸壁I: 岸壁と長周期波の進行方向が平行で後端に
 反射壁がなく、水粒子速度が大きい場合。

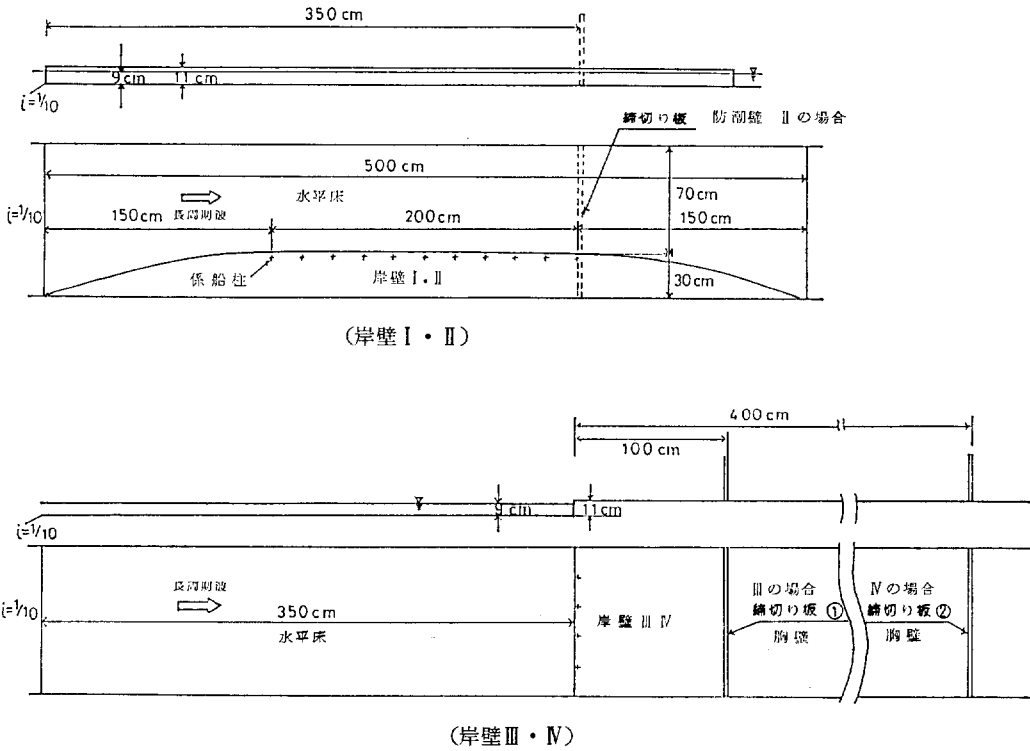


図2 実験ケース毎の岸壁模型形状

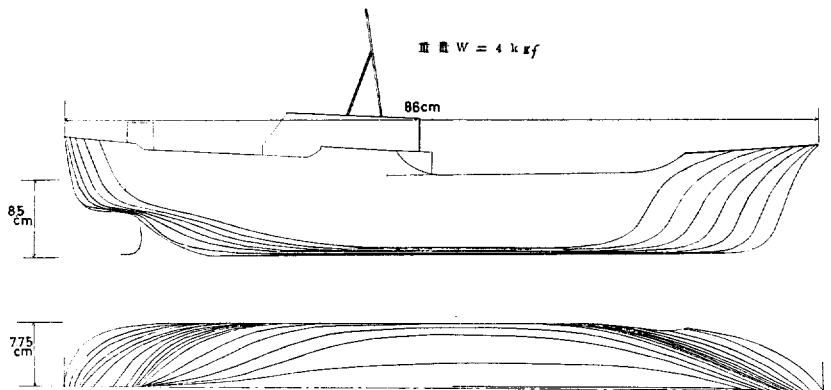
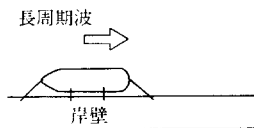
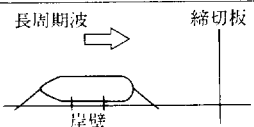
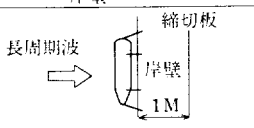
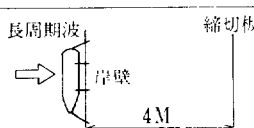


図3 模型船

表1 測定機器の性能

測定項目	水位	流速	張力
型式	容量式波高計	反射光検出方式正逆プロペラ流速計	ひずみゲージ方式リング式張力計
容量(FS)	200mm	± 100cm/s	5 kgf 引張り
直線性	± 1%/FS	± 1.5%/FS	1%/FS
感度	0.2mm	± 3cm/s	—
応答性	3 Hz	—	—
その他		プロペラ: φ5mm 8枚羽根, SUS製	リング: 径18mm幅5mm厚1.5mm, SUS製

表2 実験ケース

岸壁の種類	岸壁天端	水深	概略形状	係留ケース
岸壁 I	2 cm	9 cm		3LL 3LT 3SL 3ST 4LL 4LT 4SL 4ST 4XT
岸壁 II				同上
岸壁 III				4XTのみ
岸壁 IV				同上

○岸壁Ⅱ：岸壁と長周期波の進行方向が平行であるが岸壁端に防潮堤等の反射壁があり、岸壁Ⅰと比較して水粒子速度が小さく水位が大きい場合。

○岸壁Ⅲ：岸壁と長周期波の進行方向が直角で岸壁背後に胸壁等があり、岸壁背後用地が狭い場合。

○岸壁Ⅳ：岸壁と長周期波の進行方向が直角で岸壁背後用地が岸壁Ⅲより広い場合（背後用地面積Ⅲの4倍）

一方、係留方法は、係留ラインを緊張させて船の運動を拘束する方法と全ての係留ラインを1cm程長くして船をある程度自由にする方法の2種類とした（図4参照）。さらにそれぞれの場合に使用する係留ラインの本

数を3本、4本の2種類とし、船尾と船首の係留ラインの長さを2種類（13cm、30cm）とした。この他に特別な係留として、図4の最下段に示すような船首と船尾のラインが互いに交叉する（case 4XT）を実験に加え、合計9種類の係留ケースについて実験を行なった。係留ケース名は、最初の数字が係留ラインの本数、2番目の文字が船首・尾の係留ラインの長さ（L: Long, S: Short）、3番目の文字が緩く（L: Loose）緊張か（T: Tentioned）を示している。後の図に出てくる4番目の数字は岸壁の種類（Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ）を示している。

作用波の諸元は、表3に示す。ここに示す波高は、造

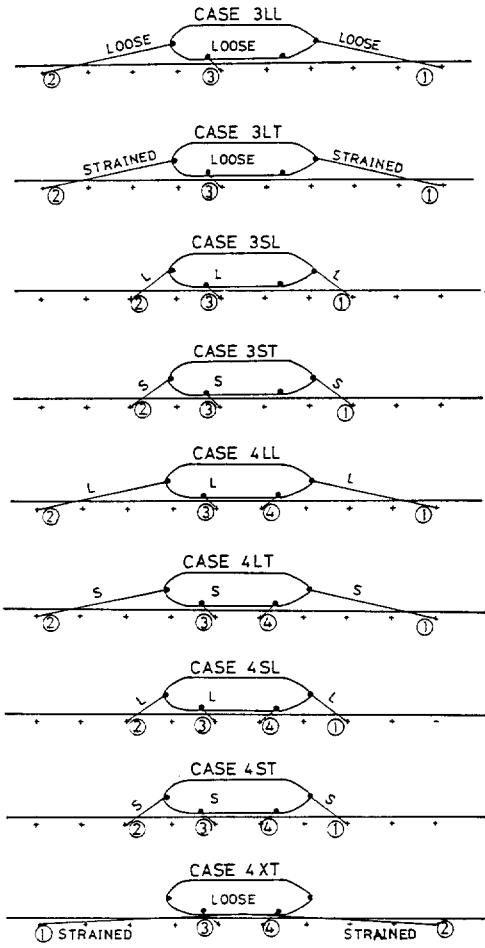


図4 係留のケース

表3 実験波の諸元

T	St	H (h=94.7cm)
30秒	250mm	6.5cm
	500mm	3.26cm
60秒	500mm	3.26cm

波される波が長波であるので造波板上の水粒子の流速振幅 \dot{u} から次のような長波の式を用いて推定したものである。

$$\begin{cases} H = 2 \dot{u} \sqrt{\frac{h}{g}} \\ \dot{u} = St \frac{2\pi}{T} \end{cases} \dots\dots\dots(1)$$

- H: 長波の波高
- g: 重力の加速度 (9.8m/S²)
- h: 造波部の水深 (0.947m)
- St: 造波板ストローク (m)

想定縮尺を1/50としているので現地スケールにすると津波の周期は約3.5分, 7分であり, 波高は1.63, 3.25mとなる。想定周期は一般の津波としては小さいが, 昭和58年の日本海中部地震津波においては, 青森県深浦の検潮記録ではその周期は10分程度であり, 一方, 秋田県沿岸の聴取り調査では3~5分となっており, 実験周期と近いものとなっている。

4. 実験結果及び考察

4.1 水位及び流速変動

図5に岸壁毎の模型船直前の水位, 流速変動を示す(図上段が流速, 中・下段が水位)。この図から, 岸壁Iと岸壁II, III, IVとの違いがわかる。すなわち, IとII~IVとは同じ周期, 同じ造波板振幅で見ると全般に前者の方が水位変化が少ない。特に T=60秒の場合, 後者は流速が極端に小さく測定限界以下となっている。また, 岸壁Iでは T=30秒, St=500mm で長周期波が段波状となって進行している。この場合の最高水位は静水面上約4.0cmである。これに対して岸壁II, III, IVでは最低水位が岸壁水深以下となり, その後段波状の波が進行し, これが, IIの場合の締切板, III・IVの場合の岸壁より反射され, 沖へ向かう段波となる。この時の最高水位は, 静水面上約8.0cmとなる。

図6に岸壁での最高水位 η_{max} と最高流速 U_{max} の関係を示す。この図で, T=30秒, St=250mmの各岸壁ケースを比較すると, 岸壁I (○) と岸壁II, III・IV (△, □) とで傾向が異なっている。すなわち岸壁Iと岸壁II, III, IVとは最高流速はほぼ等しいが, 最高水位については, 岸壁II, III・IVの方が岸壁Iの約2倍となっている。

T=60秒, St=500mmの場合, 岸壁Iと岸壁II, III・IVとは最高水位がほぼ等しく, 最高流速では岸壁Iの方が岸壁II, III, IVよりも大きい。これは, 岸壁II,

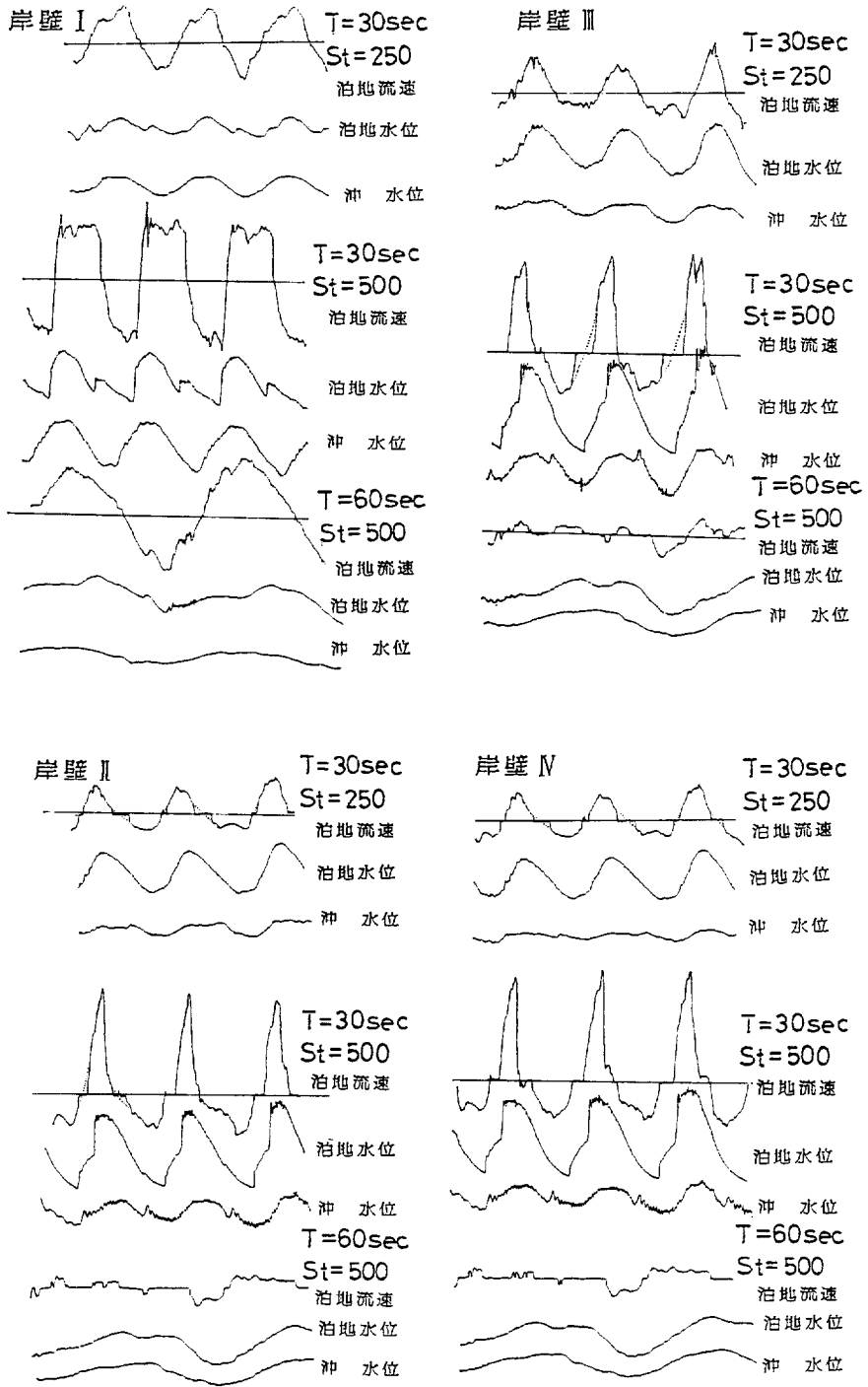


図 5 岸壁配置別の水位流速の経時変化

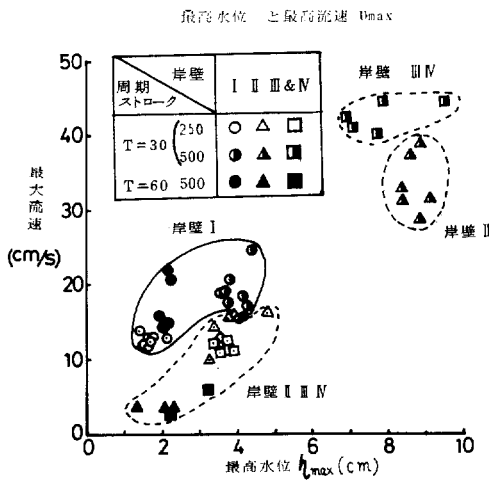


図6 最高水位と最高流速

III, IVでは締切板があるために流速が抑えられるのに対して岸壁Iでは締切板がないので流速がそれ程抑えられないためと考えられる。

T=30秒, St=500mm の場合, 最高流速・最高水位ともに岸壁II, III, IVの方が岸壁Iの約2倍となっている。ここで流速が岸壁II, III, IVの場合大きいのは図5を見てもわかるように激しい段波となって, 波が泊地に進行してくるためである。

全体的傾向としては, 同じ外力条件(同一周期・ストローク)では, 岸壁Iの方が他より最高水位が小さくなる。

4.2 張 力

(1) 張力の発生パターン

各係留ロープに発生する張力は, 係留方法によって大きく異なる。図7にてT=30秒, St=500mmでの各岸壁各係留方法での張力の変動例を示す。これらを見るとゆるい係留方法(3LLI, 3LLII, 3SLI, 3SLII)と緊張係留方法(3LTI, 3LTV, 3STII)とで張力の変動特性が異なる。以下, 代表的な例を上げて述べる。

①CASE 3LL (ゆるい係留) : 岸壁Iの場合(3LLI), 船首ライン(図中①)に最初のショック的ピークが出現しているが, 船尾ライン(②)は0であり, ①のピーク後は①, ②ともに0である。プレスト(舷側ライン③)は, ①のピークとほぼ同時にピークが出現し, それ以後はほぼ0である。ところが, 岸壁II(3LLII)の場合船首ライン①の最初のピークが岸壁Iに比べ大き

くなり, 作用時間も長くなる。船尾ライン②は二山のピークが現われる。さらにピーク出現以後はほぼ両ラインとも0となる。一方舷側ライン③は①, ②のピーク出現後ゆるやかに増加している。

岸壁Iの場合のピークは, 段波状の波が船に衝突したためである。岸壁IIの場合の二つのピークは, 進行してきた段波によるものと締切板によって反射された段波によるものである。すなわち4.1で述べたように最低水位が岸壁水深以下となるので船は着底している。この状態で段波が船に衝突し, 段波の流体力により, 船首・尾ラインに衝撃的張力が生ずる(第1のピーク)。続いて, 締切板によってこの段波が反射され沖に向かい, 船尾に衝突し, 両ラインに再び衝撃的張力が生ずる(第2のピーク)。それ以後両ラインが0となり, 舷側ライン③がゆるやかに上昇しているのは, 段波通過後は流速は小さくなり(図5参照), 水位のみ上昇するがこの水位上昇による船の上方への運動を③が拘束しているためである。岸壁Iの場合, 船首ライン①, 舷側ライン③にピークがあるだけであり, それ以後3本ともほぼ0となるのは, 岸壁IIと比べ水位の変化量が少なく係留ラインが依然ゆるい状態となっているためである。

②CASE 3LT (船首ライン①, 船尾ライン②, 舷側ライン③を20~40g程度の張力で張ってある場合)

船首・尾ラインは①, ②ほぼ同時に最初のピークが出現するが作用時間は長くなっている。岸壁Iではピーク出現以後, ①, ②とも大きな張力が出現していない。一方岸壁IIでは, ピーク出現以後でも①, ②にはかなり大きな張力が働いている。また, 舷側ライン③については3LLとは異なり, ①, ②のピーク出現以後徐々に増加しており, 岸壁IIではさらに張力が増加している。

これは, 最初から船の運動を拘束しているため水位上昇分が直接船首, 尾及び舷側ライン(①, ②, ③)にかかるためである。

③CASE 3SL (緩い係留) : 岸壁Iの場合は3LLとはほぼ同じ傾向であるが, 岸壁IIの場合3LLと異なっている。すなわち, 3LLでは衝撃的な張力が船首・尾両ライン(①, ②)に発生後, ①, ②はほぼ0となり, 舷側ライン③が増加しているのに対して, 3SLでは①, ②の衝撃的張力の発生後も張力が③と同様に働いている。

④CASE 3ST (③と同様に緊張係留)

ここでも, 岸壁の場合の3SLと異なり船首・尾両ライン①, ②, の張力は0とならず, 逆に舷側ラインが0となっている。また, 岸壁IIでは①, ②の張力が増加傾向で終わっているが, これは船が岸壁に乗り上げた後泊地

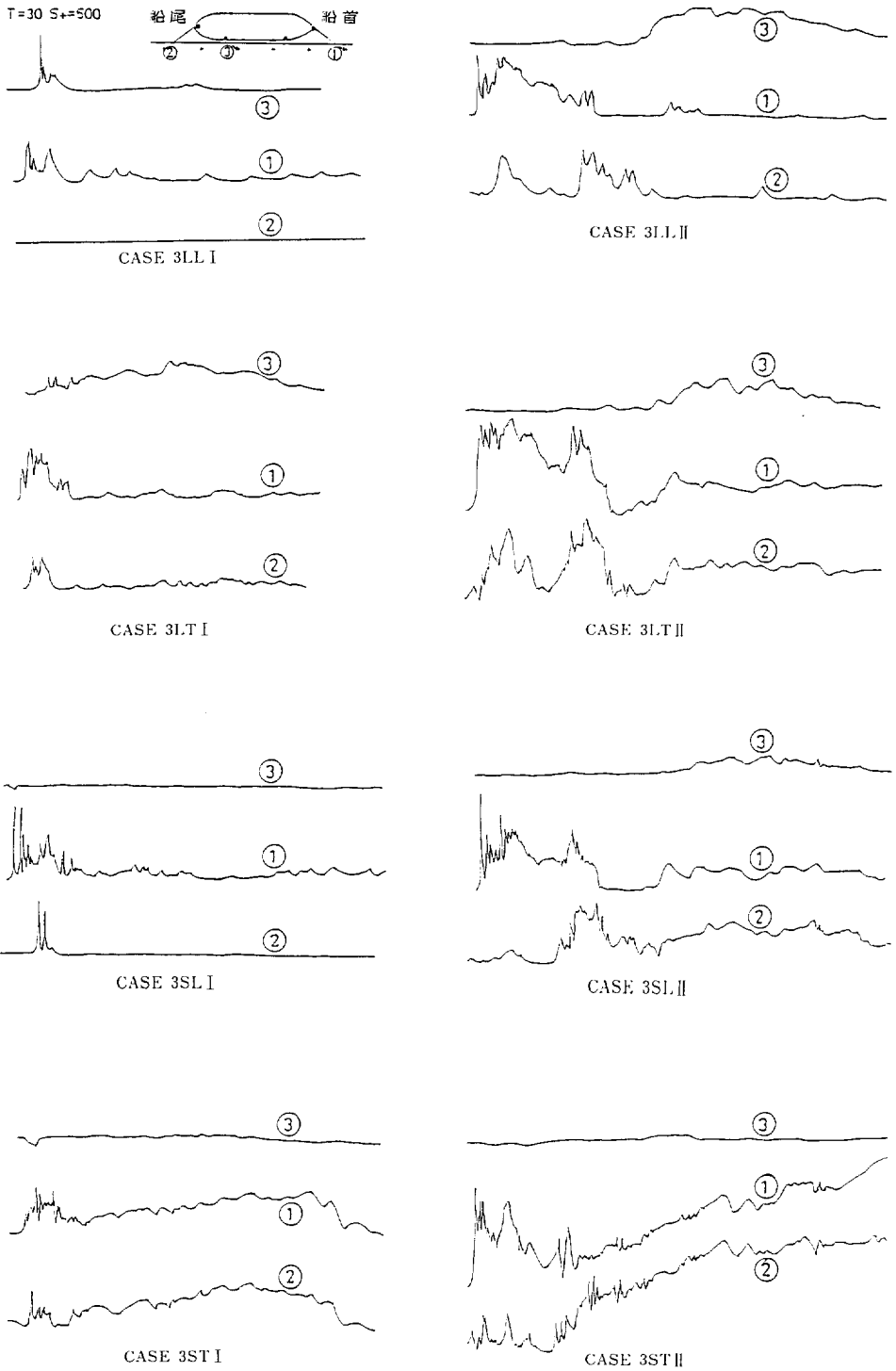


図7 張力の変動

水位が減少する時泊地に転落しようとする船の重量の一部をライン①, ②が支えるためである。

④, ⑥, ③, ①と述べてきたが, それぞれの係留方法によって各係留ラインの張力の発現が異なってくる。これは, 係留ラインの張り方によって船の拘束条件が異なるためである。

(2) 張力の合計と最高水位

図8に各係留ラインの単純な張力の和の最大値 T_{total} と最高水位 η_{max} の関係を示す。パラッキが大きい η_{max} が大きくなる程 T_{total} が大きくなっている。また, 全体として(1)で述べた2つのタイプ④ゆるい係留(図中黒塗り)⑥緊張係留(図中白抜き)を比較すると最高水位が2.0cm程度では④, ⑥共に大きな差はないが, 最高水位が2.0cm以上では④の方が⑥よりも T_{total} が小さい傾向にある。特に CASE 3LL の場合(黒丸), 岸壁 I, II ともに最小となっている。岸壁 I と II との相違は, $\eta_{max}=4.0\text{cm}$ で岸壁 I の場合段波状となるが, II の場合 $\eta_{max}=4.0\text{cm}$ では段波状とはならず連続的な水位変化を示すことである。 $\eta_{max} \div 4.0\text{cm}$ 付近で二者を比較すると, 段波状の場合の T_{total} はそうでない場合の T_{total} よりも大きくなっている。特に, 前者は, 後者の約2倍となる。これは段波状の場合, まず船首に大きな浮力及び流体力が働き船首が急速に上方に加速されるので船首部分の係留ラインに大きな力が働くためと考えられる。

一方, 陸上の溢水面積が大きいことによる効果を岸壁 III と IV で比較すると(係留方法は 4XT のみ), 係留のケースは 4XT と唯一であるが, T_{total} には両者に明確な差が見られないが, 背後溢水面積が大きい場合には岸壁を越波した水が再び, 岸壁を流れ落ちる時間が長くなり, 流れが船腹, 甲板に衝突するため非常に危険である。岸壁 IV ではこの為に船に水が侵入し, ほとんど沈没の状態のケースもあったが, 岸壁 III ではこのようなことは見られなかった。このことから陸上に打上った水塊による戻り流れが, 係留船舶へ及ぼす影響も無視できないことが示唆される。

このように来襲する長周期波が段波上になるか, ならないかにより係留ラインに働く力が大きく異なるが, 今回の実験では全体的に緩い係留方法の場合の方が, 津波等の長周期波に対して有効であり, 特に 3LL が最も T_{total} が小さかった。

4.3 浮力による張力の算定

長周期波が段波状にならなければ, T_{total} は流れによる影響はあるもののほぼ最高水位 η_{max} の関数となる。

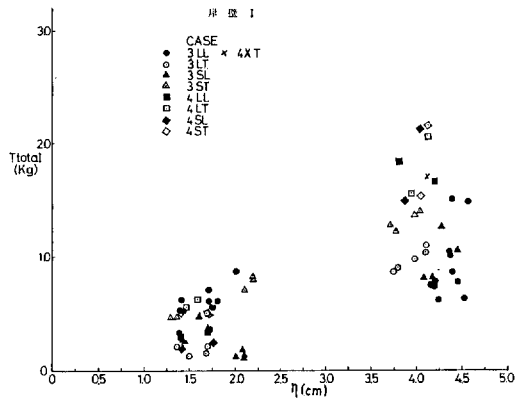


図8 (a) T_{total} と 最高水位関係(岸壁 I)

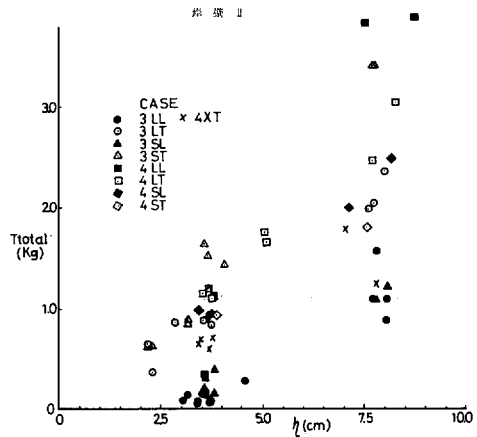


図8 (b) T_{total} と最高水位の関係(岸壁 II)

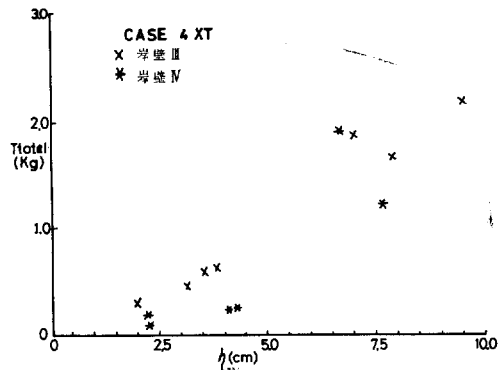


図8 (c) T_{total} と最高水位の関係(岸壁 IV)

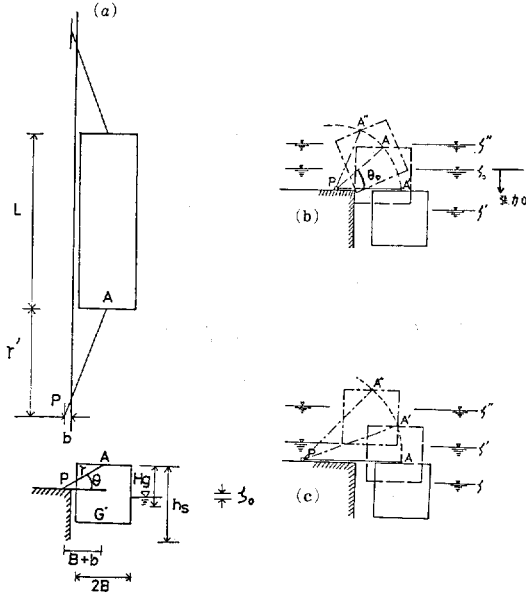


図9 係留モデル

そこで第一近似として流れによる流体力を無視し、浮力のみによる係留船舶の釣合いを考える。図9(a)に示すように船は長さL、高さ h_s 、幅 $2B$ の直方体と仮定し、重心は船の上面から Hg の高さにあるとしている。係留ラインの長さを R とし、ラインと水平となす角度を θ とする。船の傾きを ξ とする。今、係留ラインの張力の発生する最低の水位を ζ_0 とする。 $(\zeta_0$ は静水面と異なる)尚、 ζ_1 、 ζ_2 は岸壁天端を0として、上方を正としている。そのときの係留ラインの傾きを θ_0 とする。ただし、図9(c)に示すように船が岸壁に接触せずに水位によって上下動する場合はここでは除いている。この時、 ζ_0 と θ_0 の関係は、

$$\tan \theta_0 = \frac{h_s + \zeta_0 - w / (2B \cdot L \cdot \gamma_w)}{B + b} \dots\dots\dots(2)$$

である。ただし、 γ_w は水の単位体積重量、右辺の分子の第3項は船の吃水を示す。

ζ_0 よりも水位が上昇した場合図9(b)に示すような状態となる。このときは、船上のA点は、Pを中心とした半径 r の円上になければならない。ここで r とは、図9(a)に示すように船を船首船尾方向から見た係留ラインの正射影長である。したがって、この条件を満足するためには次のような関係になければならない。

$$r \cos(\theta - \zeta) - b \cos \zeta = B \dots\dots\dots(3)$$

θ : 係留ラインの角度

b : 係船柱と岸壁との距離

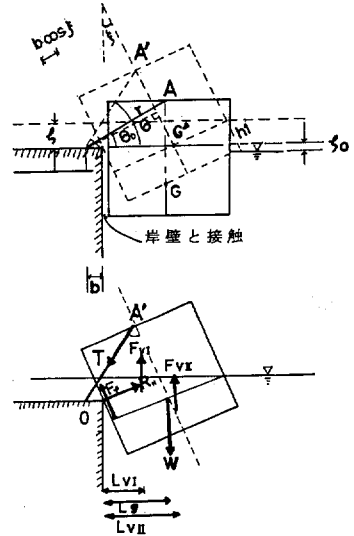


図10 船の状態

これから、 θ と ζ の関係が求まる。すなわち、

$$\cos \zeta = \frac{1}{1 - 2 \frac{b}{r} \cos \theta + \left(\frac{b}{r}\right)^2} \left\{ \frac{B}{r} \left(\cos \theta - \frac{b}{r} \right) + \sin \theta \sqrt{1 - 2 \frac{b}{r} \cos \theta + \left(\frac{b}{r}\right)^2 - \left(\frac{B}{r}\right)^2} \right\} \dots\dots\dots(4)$$

この状態での力の釣合いを考える。図10に示すように船に働いているのは、浮力 F_V 、張力 T 、岸壁からの反力 R_N 、摩擦力 F_f 、船の重力 W である。

まず、鉛直方向の釣合は、

$$W + T \sin \theta - R_N \sin \xi - F_f \cos \xi - F_{VI} - F_{VII} = 0 \dots\dots\dots(5)$$

ここで、

F_{VI} : 水没部分のうち三角柱による浮力

F_{VII} : 水没部分のうち直方体による浮力

$$F_V = F_{VI} + F_{VII}$$

である。

水平方向の釣合は

$$T \cos \theta - R_N \cos \xi + F_f \sin \xi = 0 \dots\dots\dots(6)$$

(6)式より

$$R_N = \frac{\cos \theta}{\cos \xi - \mu \sin \xi} T \dots\dots\dots(7)$$

ここで

$$F_f = \mu R_N$$

μ : 船腹と岸壁の摩擦係数

とした。

(7)式を(5)式に代入して T について解くと

$$T = \frac{1}{\frac{\sin \xi + \mu \cos \xi}{\cos \xi - \mu \cos \xi} \cos \theta - \sin \theta} \cdot (W - F_{VI} - F_{VII}) \dots\dots\dots(8)$$

F_{VI} , F_{VII} は次のようになる。

$$\begin{cases} F_{VI} = 2 B^2 L \tan \xi \cdot \gamma_w \\ F_{VII} = 2 B h_1 L \cdot \gamma_w \end{cases} \dots\dots\dots(9)$$

ここで、

$$h_1 = h_s - \frac{r \sin \theta - \zeta}{\cos \xi} - B \tan \xi \dots\dots\dots(10)$$

さらに岸壁との接点のまわりのモーメントの釣合を考えると

$$T \cdot b \sin \theta + F_{VI} \cdot L_{VI} + F_{VII} \cdot L_{VII} - W \cdot L_G = 0 \dots\dots\dots(11)$$

ここで、

$$L_{VI} = \frac{2}{3} B \cos \xi + \frac{4}{3} B \tan \xi \sin \xi - \zeta / \cos \xi \dots\dots\dots(12)$$

$$L_{VII} = B \cos \xi + \left\{ 2 B \tan \xi + \frac{1}{2} h_1 \right\} - \zeta / \cos \xi \} \sin \xi \dots\dots\dots(13)$$

$$L_G = r \cos \theta + H_G \sin \xi - b \dots\dots\dots(14)$$

(8)式を(11)式に代入すると、 ζ , θ , ξ の関係式が得られる。しかし、 θ と ξ は(3)式の関係があるので、(11)式は θ と ζ の関係となる。したがって水位 ζ を与えれば θ が求まり、(8)式を用いて T を求めることができる。実際の係留ラインの張力 T_{total} は、

$$T_{total} = \frac{R}{r} T \dots\dots\dots(15)$$

から求めることができる。以上の計算により、張力を求めたものが、図11の実線(3ST)及び点線(3SL)である。この算定値は実験値と比較してほぼ妥当な値となっている。しかし、岸壁及び係留船を図10のように見た場合、船の運動は実際の係留ラインの長さでなくこの方向から見た係留ラインの長さ r によって決定される。したがって同じ場合、すなわち CASE 3SL と CASE 3LL, CASE 3ST と CASE 3LT での船の運動は等しく、 T も等しいことになり、結局実際の張力 T_{total} は(15)式により求められるが(15)式からわかるよう

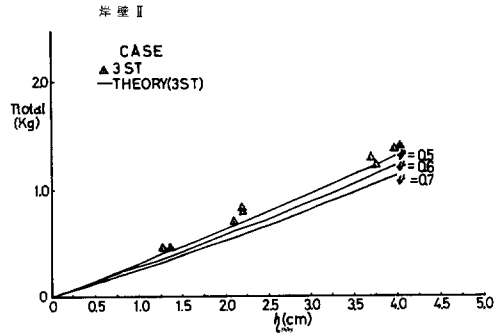


図 11 (a) 計算値と実測値

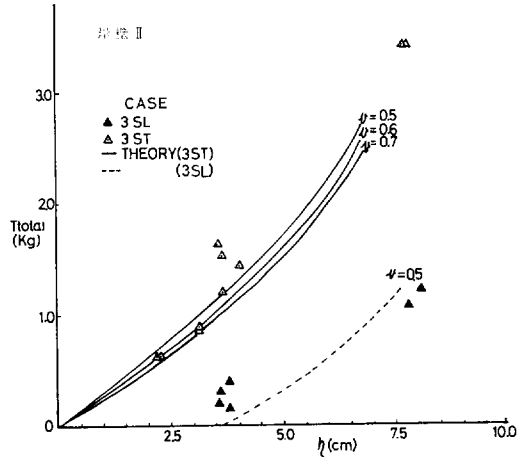


図 11 (b) 計算値と実測値

に係留ラインが長い程 T_{total} は大きくなる。ところが、実験結果では T_{total} にはそのような傾向は見られず、むしろ係留ラインが長い程 T_{total} は小さい傾向が見られる(図8(a), (b)参照)。これは、本計算では係留ラインを剛体と見なしており、伸びを考慮していないことによる。CASE 3SL, CASE 3ST では、係留ラインが短いため張力による伸びが小さく本計算の船の拘束条件とほぼ等しいが、CASE 3SL, CASE 3LT では係留ラインが長い程張力による伸びが大きくなり、本計算の拘束条件と異なってしまったと考えられる。このような場合係留ラインの弾塑性を考慮に入れた計算を行なう必要がある。また、津波が段波状に来襲する場合の流体力を考慮した動的解析も必要と考えられる。

3. まとめ

これまで述べたことから次の事が言える。

- (1) 津波の流速が大きく水位変動が小さい場合、船の慣性によって、緩く張られた係留ラインに衝撃的な張力が発生する。しかし、流速が小さく水位変動が大きい場合では張力は静的であり、流体力を無視した簡便な計算法によってある程度推定できることが実験によって確認された。この場合、係留ラインの伸びが無視し得ない時は、係留ラインの弾塑性を考慮することが必要であり、
- 本計算法は適用できない。
- (2) 船を係留する場合、係留ラインを緊張させず長めにしておくと静的水面変動に対して有効であることが、実験及び計算により確認された。
- (3) 津波が段波状になって来襲する場合は特に大きい衝撃力が働くため、大型船の係留ラインの破断を防ぐのは困難であろう。

On Mooring Forces of a Fishing Boat due to Tsunamis

by

Akiyoshi NAKAYAMA, Masaaki YAMAMOTO

Tsunamis are very dangerous to small boats like fishing boats which navigate on the shallow sea or are moored at wharfs in fishing ports. The best way for such boats to escape from tsunamis is to take refuge at the deep sea.

But in case that tsunami's origin is near the coast, there is not enough time for small boats in fishing port to take refuge at the deep sea, before the tsunamis reach the coast.

In this report, authors discuss mooring boats at wharfs, in such a way to prevent damages by tsunamis to them, based on the results of experiments in which mooring forces of a fishing boat were measured.

If amplitude of tsunamis at wharfs is less than 1.5 m and water surface elevation moderately changes, it will be effective to moor small boats at a wharf with long ropes which are not strained under normal conditions. However in case that tsunamis advance like hydraulic bore, it seems inevitable that mooring ropes will be broken by shock forces due to the hydraulic bore.