

施工上の問題もあるが、滑出し係数および水平力から見れば、 $-3.0\text{ m}$ までは深度の増加につれて安定性が増加している。水中棚を一応すべて $6.0\text{ m}$ と仮定して計算したのであるが、施工上の問題より考えれば水中鉄筋組立ての潜水作業の能率化からは浅い方が良く、起重機船の吃水にも関係してくる。

上部L型はP. Cスラブをはめるのであるが、応力の計算は三辺固定一辺自由端として計算するため、縦横比が1に近づく方がモーメント分配率がよく、鉄筋量が節約できる。

以上の理由より棚の水深を $-1.0\text{ m}$ と決定した。

まだ本工事は着工の段階には至っていないが、現在釧路港改修工事に課せられた最も重要な使命であり、現場技術者としてなお合理的な耐震設計に基く構造物について真剣に追求したい。

## 58. 造函台の構造力学的検討と進水時の 動水学的機構について

— 1 造函台上に2函塊を打設した場合の工事報告 1 —

留萌開発建設部 渡 部

### 1. ま え が き

ケーソンヤードの回転率の向上と、廻航などによる時期的制約とから造函工事のスピードアップが要求され、昭和31年度留萌港改修工事並びに導流堤災害復旧工事における函塊は、1造函台上に2~3函を打設し進水せしめるという造函法がとられた。これは造函台に対しては不对称偏載荷重状態となり、進水に対しては多函同時進水となるから、このような造函工法が確実に安全であるということをとえ直観的もしくは経験的に知っていたとしても、現場責任技術者としては一応理論的根拠をつかんだ上でなければ実施し難い。このための事前検討の方法としては、理論的な精密解を得るか、模型実験によるかであるが、本報告では単純なチェックの上に立脚した工事報告のみとするが、他港の参考になれば幸いである。

### 2. 造函台の構造力学的検討

ランチャーはスリップウェイ、造函台の構造は3本の樁木上に直交して緊結された10本の並列I形鋼の上に11本のストリンガーを直交させ、更にこの上に直交異方合着木床版を置いたものである。造函時は砂袋支柱でサポートされる。通常の造函様式は、函台中央に対称荷重状態に1函を打設するが、本ケースではフロアの片側に型枠を組立て、コンクリーティングして先ず1函を打設し、養生後型枠を取りはずして他側に再び組立て、第2函を製造するという具合である。したがって、第1函目の造函時に主として問題がある。すなわち、マツシブな荷重を不对称に偏載せしめるから、通常の方法に比してアブノーマルな力学的状態を惹起するのではないかと心配される。

まえがきの中で述べたように、精密な理論解あるいはそれを裏付ける模型実験などは、当時工期の最盛期で施行着手が急がれていた都合上時日に余裕がなく、多くの仮定を前提条件とした単純な机上計算に頼らざるを得なかつた。造函台は衆目のみるように、平面板構造と格子桁構造との組合せとみるのが至当のようではあるが、函塊とフロアを荷重と見なせば、ストリンガーは枕木と見なせるからプレートガーダー鉄道橋に類似させることも許されよう。ただ、砂袋支柱は塑性体でありかつ支柱とI型鋼とは特別には連関していないから、結局単純支

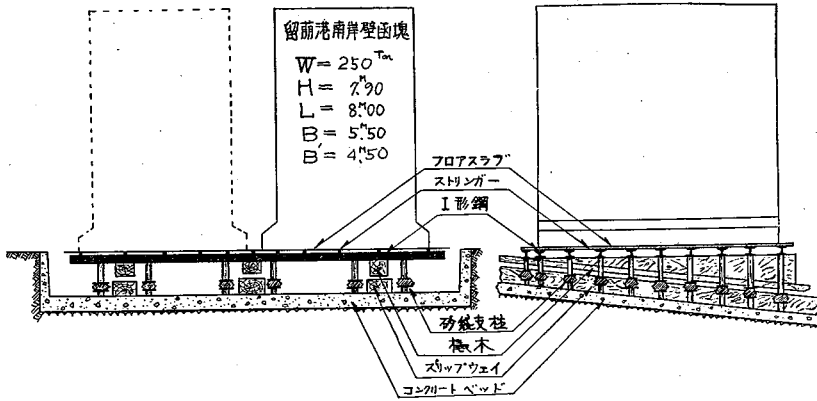


図 58-1 留萌港造函台および不对称偏載荷重函状態

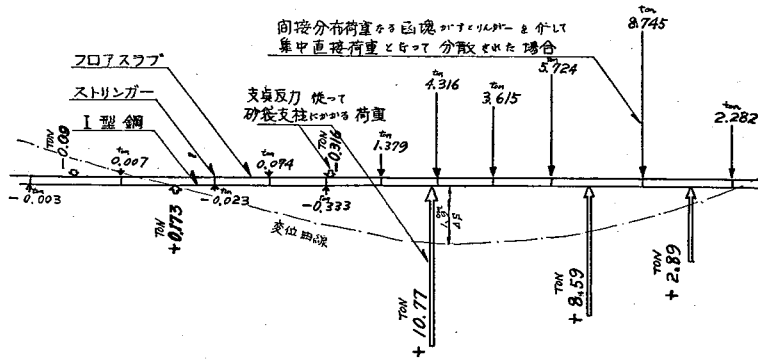


図 58-2 間接分布荷重なる函塊が直接集中荷重としてストリンガーの位置に分割された場合の砂袋支柱に伝達される外力(中央 I 形鋼の場合)および変位曲線

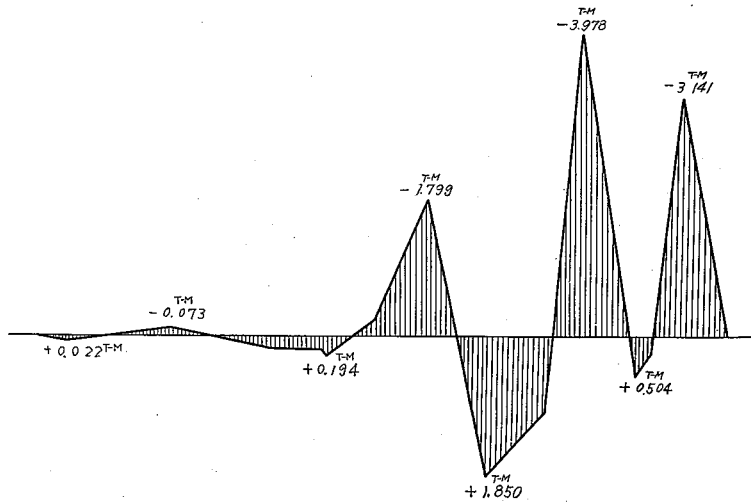


図 58-3 Bending Moment Diagram on Central I-Shape

点としての条件を完全に満足しない塑性支点上の連続多桁橋として解いた。したがって、結果的にみれば張出しスパンを有するものとして解いてもさしつかえないことがわかったが、各砂袋支柱の沈下量を知るため張出しスパンを考えなかつた。函台の沈下量を知るには、砂袋支柱の外力対圧密変形の特性曲線を知らねばならないが、乾燥砂の性質に注目して modelization すれば図 58-4 に示すように、dashpot と spring の並列結合に、slider を直列に結合させたものと見なすことができ、この中で spring 量は他の model elements に比し小さく、かつ

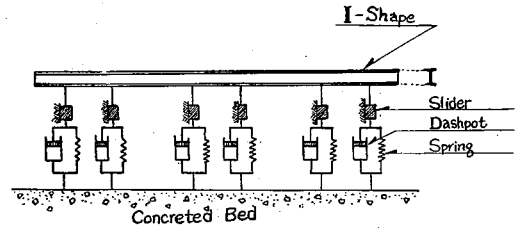


図 58-4 Modelization of Sand Bag Supporter

$$|FI|_{I\text{-Beam}} \gg |EI|_{\text{Sand}} \ll |EI|_{\text{Concrete Bed}}$$

であるから、外力や曲げモーメントのエネルギーは砂袋圧密塑性変形のために消費されると考えられるから、

$$ds/dp = -KS$$

とした。勿論精密な測定をして特性曲線を決定すべきであるが、測定装置が無かつたので止むを得なかつた。ただ、破壊時の極限荷重が 60 t であることと、其時の砂袋厚さが載荷前のその 1/2 となることだけは判明したので、この二条件を境界条件として上式を解き

$$S = s_0 e^{-0.012P}$$

となり、砂柱の初期厚が約 15 cm ほどであることから

$$S = 15 e^{-0.012P}$$

とした。ただし、 $S$  は砂袋厚さ (cm)、 $P$  は荷重 (t) とする。

さて、こういつた前提条件を満足する場合に留筋港改修工事南岸壁函塊 重量  $W=250$  t、高さ  $H=7.90$  m、長さ  $L=8.0$  m、幅  $B=5.5$  m (ただし、天端幅  $B'=4.5$  m) が偏載された時の函台の安全性および安定性は保証される。

函塊はフロアに分布荷重として載荷されるが、I 形鋼に対しては間接荷重であつて、ストリンガの位置に集中直接荷重となつて分配される。ストリンガーとフロアは負の荷重に対しては無意味となるが、一応ヒンジの支点条件を満足するものとして解けば、図 58-2 で示すように、函塊の載荷されていない側に負の荷重が生じ、したがって、砂袋支柱に伝達される外力も非載荷側に負の外力が生ずる。しかるに砂袋支柱は支点の条件を完全に満足しないから、当然 I 形鋼の跳ね上りを招来し、したがって、フロアの跳ね上り変形を許さざるを得ないことになる。また、I 形鋼の曲げモーメントも図 58-3 に示すように、載荷部分に異常に偏奇した分布を示す。しかし前述のような前提条件のもとに解を得れば、跳ね上り変形量も、沈下変形量も、モーメントに対する I 鋼材の強度もいずれも十分許容し得る範囲内であり、しかも他に特に不測の事故を誘発するような素因が認められないので、このような造函工法は一応安全かつ安定であると考え施工した。たとえば他に比べ最大の応力状態、したがって、変位量を招来するはずの中央部の I 形鋼について検すると、図 58-2 に示すような数値と方向の直接集中荷重とそれに対する砂袋支柱の反力、すなわち、伝達される外力を得ることになる。この場合の曲げモーメント図は、図 58-3 に示した。この最大曲げモーメント部の最大応力は、

$$\sigma = My/I = -726 \text{ kg/cm}^2$$

となる。

$$|\sigma| < \sigma_a = 1,200 \text{ kg/cm}^2$$

であるから、二函打設後の場合、単純に最悪時を考えれば

$$2|\sigma| = 1,452 \text{ kg/cm}^2 > \sigma_a = 1,200 \text{ kg/cm}^2$$

でやや注意を要するが、実際には沈下量が相当あるから、この程度にはならないと思われる。かくして外力が得られれば、前述の砂袋支柱の圧密変形の特性方程式によつて、その沈下量および跳ね上り量を計算できるわけである。計算例を示すと表 58-1 のとおりであつて、結果的にみて負の外力を無視し両端を張出しスパンと考えた場合が定性的には実際と適合するようである。この時の変位曲線も図 58-2 に示す。計算に用いた外力は、支点条件が満足する場合のものであるが、実際にはこの条件は満たされず、支点の礎着力は存在しないから、定量的には少し異なる。例えば平板では跳ね上り端の礎着力が存在しなければ変形は 2 割、モーメントは 1 割程度増すことが知られているが、I 形鋼にも当然そのような傾向がみられるから、できれば二函同時打設かもしくは型枠程度でも置くべきであるが、詳細は他の機会に譲る。

なお、参考までにこのような造函工法をとつた時の函台沈下量の実測値と、通常の一函中央対称載荷時の沈下量の実測値をそのまま表 58-2, 3 に示す。

表 58-1 中央 I 型鋼の変形量

砂袋支柱に作用する外力	-0.09 t	+0.173 t	-6.316 t	+10.77 t	+8.59 t	+2.89 t
計 算 値	Ca 0 cm	Ca 0 cm	+0.2 cm	-1.9 cm	-1.5 cm	-0.6 cm
負の外力を無視した場合	+0.7 cm	0 cm	-1.3 cm	-1.9 cm	-1.5 cm	-0.6 cm

表 58-2 留函函塊 No. 1 偏載打設時の 1 号函台沈下量 (昭和 31 年 8 月 25 日)

	6		5		4		3		2		1	
	Half Load	Full Load	H. L.	F. L.	H. L.	F. L.	H. L.	F. L.	H. L.	F. L.	H. L.	F. L.
10	0	+0.1	+4.2	+0.8	0	0		-0.7	0	-3.2	-1.8	-1.8
9	+0.2	+0.2	+1.8	+1.8	-0.2	-0.6	-0.2	-0.8	-0.4	-1.0	-0.4	-0.3
8	-0.1	0	0	-0.8	-0.3	-0.5	-1.0	-1.5	-0.9	-1.3	0	-1.2
7	+2.1	+2.1	+0.2	0	-2.2	-0.5	-0.7	-0.9	-0.5	-1.1	-0.5	-1.2
6	0	0	+0.2	-0.1	-0.4	-0.8	-0.6	-0.9	-0.6	-1.3	-0.5	-1.2
5	0	-0.3	+0.7	+0.4	-0.3	-0.8	-0.5	-0.8	-0.7	-1.4	-0.6	-1.4
4	0	0	+0.1	-0.1	-0.1	-0.5	-4.5	-5.0	-0.9	-1.5	-0.6	-1.4
3	0	0	-0.4	-0.3	0	+3.4	-0.6	-1.2	-0.5	-0.9	-0.7	-1.5
2	+0.3	+0.1	0	0	-0.2	-0.5	-0.4	-1.5	-0.4	-1.3		
1	-0.1	-0.1	+0.2	+0.4	-0.2	-0.7	0	-0.6	-0.1	-0.6	0	-0.4

表 58-3 天壳異形函塊を対称中央載荷打設した場合の函台沈下量

	6		5		4		3		2		1	
	Half Load	Full Load	H. L.	F. L.	H. L.	F. L.	H. L.	F. L.	H. L.	F. L.	H. L.	F. L.
9			0	-1.0	-1.2	-1.6						
8	-2.4	-2.4	-0.7	-1.3	-0.7	-1.2	0	-0.4	0	0	+0.4	+0.7
7	-4.7	-4.9	-0.1	-1.5	-0.9	-1.5	-0.2	-0.4	-0.1	+0.1	-0.1	+0.4
6	-0.7	-1.4	-1.0	-2.0	-1.2	-1.7	-0.2	-0.4	-0.2	0	0	+0.4
5	-0.8	-1.7	-0.9	-2.2	-1.0	-1.4	-1.5	-2.8	-0.1	-0.3	0	+0.3
4	-0.7	-2.5	-1.4	-1.8	-1.2	-1.7	-0.1	0	-0.1	-0.1	-0.2	+0.2
3	-0.5	-1.5	-0.9	-1.3	-0.9	-1.5	-0.2	-0.5	-0.2	-0.3	-0.2	+0.4
2	+0.1	-1.6	-2.5	-2.9	-1.0	-1.6	-0.4	-0.6	0	-0.2	0	0
1	-0.7	-1.3	-0.7	-1.4	-1.0	-1.6	-0.4	-0.5	-0.3	-0.4	+0.1	-1.5

### 3. 進水時の動水学的機構

ケーソンヤードのスリップの勾配は水上部で 1/10 であつて、起動装置はトリガーである。水上部での進水運動機構はほとんど問題がないが、安全に滑走するための条件を求めると、いま 傾斜  $\theta$ 、動摩擦角  $\phi$  なるスリップ上の函塊  $W = (P, Q)$  について考えると、摩擦抵抗  $Q_0$  は  $Q_0 = W \cos \theta \tan \phi$  で表わされ、函塊が自重で滑走するためには  $Q > Q_0$  でなければならないから、

$$Q = W \sin \theta > Q_0 = W \cos \theta \tan \phi$$

$$\therefore \sin \theta > \frac{\cos \theta}{\cos \phi} \sin \phi = \cos \theta \tan \phi$$

これは  $\phi < \theta$  の場合のみ満足するから、

$$\phi < \theta$$

は必要条件である。他方斜路は  $\theta \approx 6^\circ$ 、樁木の動摩擦角は  $\phi \approx 13^\circ$  で上記の必要条件を満足しないので、軟石鹼とマシン油を 2.2:1 の比の混合剤を塗布すれば、 $\psi = 5^\circ$  (ただし、 $\psi$  は塗布剤の剪断時、もしくは樁木との間の内部摩擦角) であるから上記の必要条件を満足する。しかし、この条件が滑走中継続されなければならないから、オイルフィルム

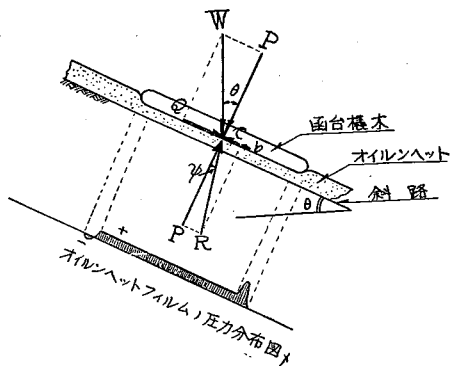


図 58—5 安全滑走のための必要条件説明図

が破壊しないことが必要である。塗布剤を使用した場合の摩擦抵抗を  $Q_0'$  とすれば、オイルフィルムが破壊しないための条件は、

$$Q_0' \frac{\cos \psi}{\sin \psi} = Q_0' \cot \psi = R \cos \psi \geq P = W \cos \theta$$

この 2 条件は安全滑走のための必要条件である。本港の場合は十分満足した。次に運動は滑走時函塊に働く力を  $q$  とすれば、 $q = m \, dv/dt$ 、オイルンハットの cohesion を無視すれば、

$$q = W (\sin \theta - \cos \theta \tan \psi)$$

$$\therefore dv/dt = g (\sin \theta - \cos \theta \tan \psi)$$

よつて等加速度運動、初期条件  $t = 0 \implies v = 0$  を考慮して

$$v = \int g (\sin \theta - \cos \theta \tan \psi) dt$$

$$= g (\sin \theta - \cos \theta \tan \psi) t$$

また滑走距離は、

$$x = \int \int dv/dt$$

$$= \frac{1}{2} g (\sin \theta - \cos \theta \tan \psi) t^2$$

前述のように  $\theta = 6^\circ$ 、 $\psi = 5^\circ$  であるから

$$\alpha = 0.147 \text{ m/sec}^2$$

$$v = 0.147 t \text{ m/sec}$$

$$x = 0.0735 t^2 \text{ m}$$

水上部スリップ長は実滑走部で 22.0 m であるから、

$$\text{海中突入時速度 } v_E = 2.6 \text{ m/sec}$$

$$\text{海中突入までの所要時間 } t_E = 18 \text{ sec}$$

運動機構は単純なものであり、定量的にも特別心配すべき点も認められないので、水上部の滑走については問題

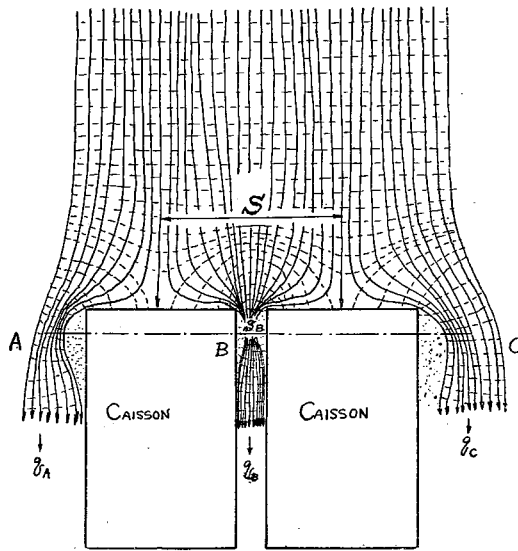


図 58-6 流線および速度ポテンシャル線

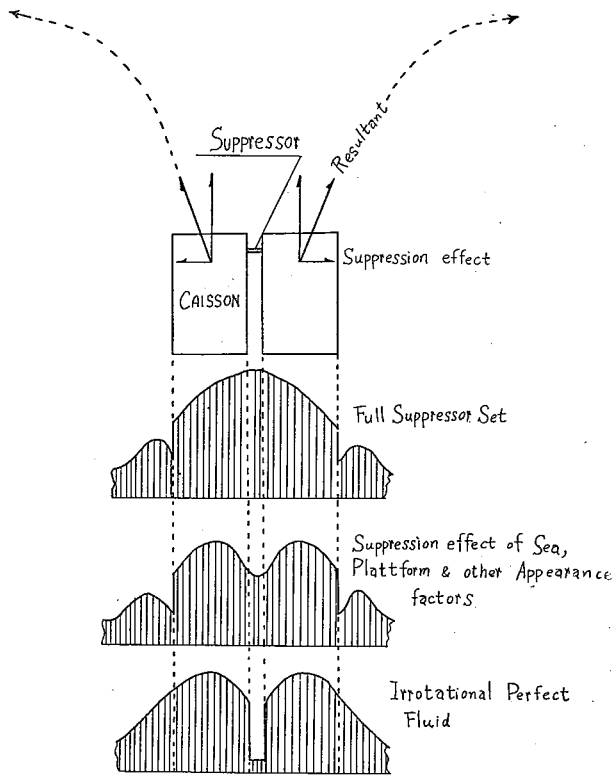


図 58-7 Suppressor, Suppression effect & Pression Line

がない。ただ、二函同時進水の場合は重量も増すので、第二条件式によつてフィルム圧を検することを忘れてはならない。問題は海水に突入してからの運動機構であるが、今回は二函並置同時進水の場合に心配される相互の接触あるいは衝突についてのみ述べる。したがつて、問題を2次元平面に限定すると、函塊周囲の流線は直交する二平面壁に沿う流れの組合せと解し、 $w = cz^{\pi/\alpha}$  (ただし  $\alpha$  は二平面壁の交角) なる写像函数から、

$$\phi = cr^{\pi/\alpha} \cos \frac{\pi}{\alpha} \theta$$

$$\psi = cr^{\pi/\alpha} \sin \frac{\pi}{\alpha} \theta$$

が得られ、 $\alpha = \pi/2$ ,  $\alpha = \pi$ ,  $\alpha = 3\pi/2$  の場合の  $\phi$  を組合せて 図 58-6 の流線と速度ポテンシャルを得る。任意点の速度の大きさ  $q$  は、

$$q^2 = u^2 + v^2 = \left| \frac{dw}{dz} \right|^2 = \frac{c^2 \pi^2}{\alpha^2} r^{2\left(\frac{\pi}{\alpha}-1\right)}$$

であるから、

$$q = \frac{c\pi}{\alpha} r^{\frac{\pi}{\alpha}-1}$$

函塊の両肩部は、 $\alpha = 3\pi/2 > \pi$  の時に該当するから  $q \rightarrow \infty$  となり、Bernoulli の定理から両肩部の圧力は  $-\infty$  となり、これは物理的に不可能であるから流線は壁面から離れて死水領域を作る。

この非回転完全流体の条件を更に押し進めて、図 58-6 で  $A, B, C$  各位置の動水圧を比較すれば、

$$qS = q_B S_B$$

$S > S_B$  であるから、

$$q^B > q \equiv q_A = q_C$$

となり、Bernoulli の定理から  $B$  点の動水圧  $P_B$  は、

$$P_B < P_A = P_C$$

よつて二函塊は衝突する。しかし、実際には海水の粘性、函塊壁と海水の摩擦抵抗、函台断面による遮蔽などによつて、衝突接触は起り難い。しかし、より安全性を望むためにも、二函を左右に分離せしめるための特別の処置をとることが望ましい。そのためには、

$$P_B > P_A = P_C$$

の範囲で Maximum  $P_B$  を与えてやればよい。Max  $P_B$  は  $q_B \rightarrow 0$  に対して与えられ、 $q_A = q_C \equiv 0$  なることから

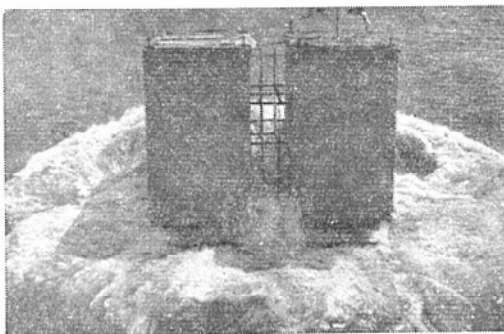


写真 58-1 留萌港南岸壁函塊の  
二函同時進水  
(ただし中央の組材は Suppressor ではない)

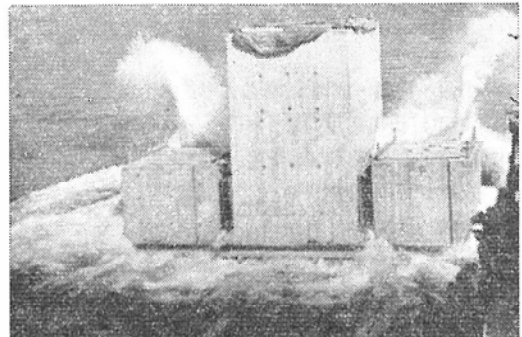


写真 58-2 留萌港南岸壁函塊と導流堤  
函塊との三函同時進水  
(Suppressor はないが実在海水の場合)  
の Suppressor effect は現われている



写真 58-3 (既に両側函塊は分離し始めている)

も  $q_B = 0$  が  $\max P_B$  を与える。このための特別の効果を仮に抑制効果 (suppression effect) と名づけるならば、この目的のために、二函同時進水の場合は、 $B$  部の海水流通を遮断し、分離力を生ぜしめる抑制力 (suppressor) なるものを付加すべきであろう。この時、函塊に最大の分離力を生じ、二函の進水軌跡は、進水慣性力との合成ベクトル、すなわち、斜右沖・斜左沖に向つて大きなスパイラルを描いて分離しながら進水してゆく。留萌港の場合を写真 58-1, 2, 3 で示す。

この時は別に抑制力を付置しなかつた。この場合の分離力の定量的な数字やその安全率などについては別の機会に譲ることとして、要するに定性的にはこういった性質を十分把握した上で、多函進水には注意をしなければならぬ。写真でわかるように、三函同時進水の場合は、海中突入後数秒で明瞭な分離現象を呈している。

#### 4. あとがき

前述のような造函工法および進水法は特殊な事故を誘発する素因は認められない。函台の跳ね上りおよび沈下量は施工にさしつかえない程度の量であるが、二函打設は過重となり易いから、寧ろ強度的に注意すべきである。留萌港の場合はせいぜい 500 t 止りである。進水については、水上部では安全滑走のための二必要条件を満足することが必要である。したがつて、オイルンハットに注意すべきである。海中突入以後の衝突事故は、前述の抑制力を与えることによつて完全に避けることが可能であるが、実在流体と、函台全体の前述のような諸因を計算してその必要がないと認める時は、特に考慮するにおよばない。

今回は工事報告に限つたので、はなはだ概略かつ定性的なことしか述べられなかつたが、詳細は後日の機会に譲りたい。

#### 参 考 文 献

- 1) 小西・横尾・成岡：構造力学；第 1 巻，丸善。
- 2) 山口：山口応用力学；アルス。
- 3) 落合：一般物理学；上巻，朝倉書店。
- 4) 友近：流体力学；共立。
- 5) 本間：水理学；丸善エンジニアスライブラリー。
- 6) 山内：物理数学；最上：土質力学；坪井：平面構造論；