

浮防波堤に関する一研究

本 間 仁*・堀川清司**・望月博正***

1. 緒 論

近年産業の急速な進展、拡張にとまない、工場用地を海岸、特に東京湾、伊勢湾、大阪湾、瀬戸内海、有明海などの沿岸における埋立地に求める傾向はいちじるしい。しかしながら、これらの海湾はいずれも、いわゆる高潮発生危険をとまなっており、また台風時の、あるいは季節風による高波に襲われる可能性が大きい。したがって高潮および波浪に対する考慮を十分にはらって埋立地周辺の地盤高、護岸の天端高、構造などの決定が行なわれる。これらの地域は海外に直面した部分とは異なり、長周期のうねりの襲来はほとんどなく、したがって荒天時を除いては、波浪もさして問題とならない。以上のような理由と、さらには埋立地の造成途上においてもしゅんせつおよびその他作業船の稼働日数を増し、埋立土砂の流出を防ぐためにも波浪から遮へいする必要があるという理由から、簡易な防波堤を使用して、その経費を軽減することが考えられ、再び簡易防波堤に対する関心が高まってきたように思われる。

簡易防波堤とは、通常用いられている防波堤とは違い、設置あるいは移動が比較的容易なように考案された防波堤のことである。そもそもこのような簡易防波堤が注目されたのは、例えば防波堤設置水深がいちじるしく大きい、あるいは地盤が軟弱なために、防波堤の建設費が非常にかさむような所に適用できる、経済的な様式と考えられるからであり、そのほかに可動性を持たせることもそのねらいである。さて、このような簡易防波堤として考えられている様式を大別すると、(1) 浮防波堤 (Floating Breakwater)、(2) 空気防波堤 (Pneumatic Breakwater) (3) 水力防波堤 (Hydraulic Breakwater) の3種となる。浮防波堤は浮体によって波を反射させることを主たる作用とし、空気防波堤は底面近くから圧縮空気を噴出させ、水力防波堤は水表面近くに噴流を生ぜしめて、進行してくる波を止めようとするものである。

浮防波堤の著名な例としては、第2次世界大戦中英国防陸軍工兵隊が Phoenix¹⁾ を、また英国海軍が Bombar-don²⁾ を製作して上陸作戦に適用して多大の成果を収めたという事例がある。その後 Beach Erosion Board

では³⁾ 重隔壁式浮防波堤の大型模型実験を、中国では⁴⁾ 各種の簡易な浮体による波高減衰効果の実験を行なっている。また最近大阪市立大学では⁵⁾、排砂管フローターを利用した浮防波堤の研究を試みている。一方理論的な取り扱いとしては、John⁶⁾ や Barakat⁷⁾ の研究が知られており、実用の例としては広島県音戸漁港の鉄筋コンクリート製ポンツーン型浮防波堤がある。

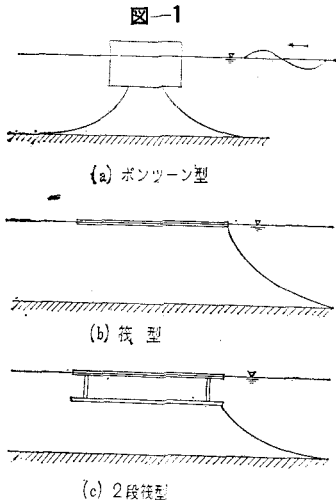
以上のように、従来数多くの研究がなされてきたにもかかわらず、その実用化にはなお疑問があった。それは、(1) 波高減衰の機構が明らかでない、(2) いかなる断面構造のものが有利であるか明らかでない、(3) 繫留方式特に張力について明らかでない、などである。われわれは新たに一連の研究を行なって実用化へ一歩近づけるために努力した。

2. 実験施設および方法

実験は2段階にかけて実施し、最初の部分は長さ25 m、幅0.6 m、高さ0.8 mの2次元波動水槽を用い、単純な周期波を対象とした。後半では現地条件にできるだけ近づけるために、風浪を用いて実験を行なうこととし、長さ36 m、幅0.6 m、高さ0.9 mの2次元風洞水槽を用いた。いずれも一様水深の条件下で実験を行ない、造波装置の水路反対側には消波装置を設置して、できるだけ反射波の生じないように努力した。波形は抵抗線式波高計を用いてペン書きオシログラフに記録させたが、入射波の測定にあたっては浮体を取り除いて実施した。また記録の読取りにあたっては、水路端あるいは浮体よりの反射波の影響のあらわれていない部分を使用した。

浮防波堤をアンカーしている鎖に働く張力を知ることは、実用性を検討する上からはきわめて重要である。波によって浮防波堤が動揺するにもなると、アンカー・チェーンには断続的な張力が作用する。この張力を測定用磁わい管にかかる圧縮力としておきかえ、圧縮磁わい効果によって張力に比例した電圧を取り出しうるようにした。そして水槽底部にアングルを固定し、これに耐水構造とした受圧部を取りつけた。また張力方向に磁わい管が働くように、アングル前端に滑車を取りつけ、常に張力は同一方向に作用するようにした。この磁わい管による張力計の測定範囲は0~0.4 kg および0~1.2 kgの2段に切り換えられるようにしてあり、それぞれ張力の大きさに応じて切換えて使用した。実験記録の整理にあ

* 正員 工博 東京大学教授 工学部土木工学科
 ** 正員 東京大学助教授 工学部土木工学科
 *** 正員 八幡製鉄KK市場部



たつては、模型にとりつけた2本のアンカー・チェーンには均等な力がかからないことが多いので両者の代数和を求めて模型に働く全張力とした。なお、アンカー・チェーンの長さ、あるいは波高減衰効果との関係を知る目的でその長さが、水深の1~8倍に調節

なお測定の内容は表-1に示したとおりである。

3. 波浪減殺効果

(1) ポンツーン型浮防波堤

この種の浮体の運動の様相は、多分に浮体の固有振動周期 T_f と外力の周期 T との関係によって支配されるであろうことは容易に推測できる。すなわち $T \gg T_f$ の場合には入射した波はほとんどそのままの形で浮体を通してしまふであろう。また $T \ll T_f$ の場合には浮体の運動は外力の位相とかけはなれ、入射した波のエネルギーは大部分反射してしまふであろう。しかし $T \approx T_f$ のときは共鳴現象に近く、浮体の運動の振幅はいちじるしく大きくなり、アンカー・チェーンに働く力はきわめて大きく、破壊の原因となることは Bombardon の事例からも容易に推測される²⁾。以上の推論からしても、対象とする波の周期に比較して、浮体の固有振動周期をできるだけ大きくすることが必要になってくる。そこで透過波高 H_T と入射波高 H_I との比を支配する要素を抜きだしてみるとつぎのようになる。

$$H_T/H_I = f(T_f/T, H_0/L_0, d/L_0, B/d, h/d, l'/d) \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 H_0, L_0 : 沖波の波高および波長、 d : 設置水深、 B : 浮体の幅、 h : 吃水、 l' : アンカー・チェーンの長さ、である。上記において力学的相似は Froude の相似則により支配され、かつ繋留の方式は同じであると考へている。式(1)の右辺の各項の影響を調べるために、まず

できるようにフックを設けた。

浮防波堤の様式としては、従来研究に供されてきた種種の形式を検討し、かつ実現性を考慮した上で、下記に示すようなポンツーン型、筏型および2段筏型の3種を研究の対象とした(図-1)。

a) ポンツーン型 音戸漁港の浮防波堤とほぼ同型の実物を想定して、その1/25の縮尺のものを、かつ吃水もほぼ同じになるように、厚さ3mmの真鍮板で製作した。その寸法は長さ59cm、幅28cm、高さ18cmである。またポンツーンの固有周期を変化させる目的で、同型の模型を厚さ1mmの真鍮板で作成し、中仕切りに取りつけた鉛塊の位置を種々組み合わせて、全体の重量は同じに保ちつつ、重心の位置のみを変化させることができるようにした。なお吃水は全高の約2/3の11.4cmであった。

b) 筏型 鋼管径500mm、厚さ12mmのものを筏に組むことを想定し、これとほぼ同じ条件の1/25模型を製作するために、材料を種々検討した結果、硬質塩化ビニール管径22mm、管厚3mmの両端にゴム栓をはめ、これを27本組んで1単位の筏とした。したがって幅は59cm、長さは60cmとした。実験には4個まで組み合わせ、相互の連結はヒンジ、あるいは固定とした。アンカーは前面2箇所に取りつけた。

c) 2段筏型 筏型の1単位を2個上下に並べ前後4箇所を剛結したもので、上下の筏の間隔はおのおの5cm、10cm、15cmとし、アンカーは下の筏の前面に筏型と同じように取りつけた。

図-2 チェンの長さによる波高比の変化 (ポンツーン型, $T_f=2.03$ sec, $d=32$ cm)

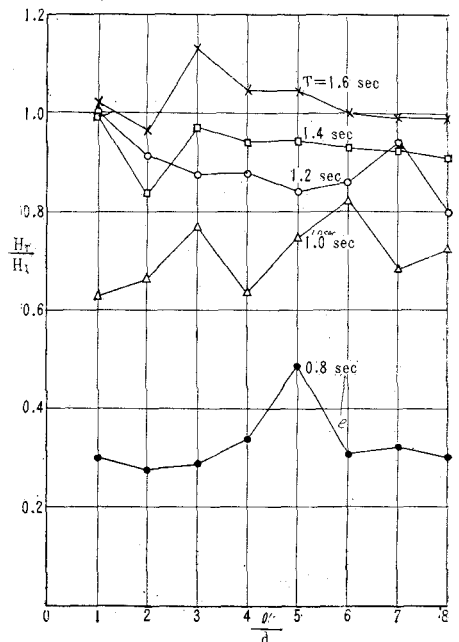
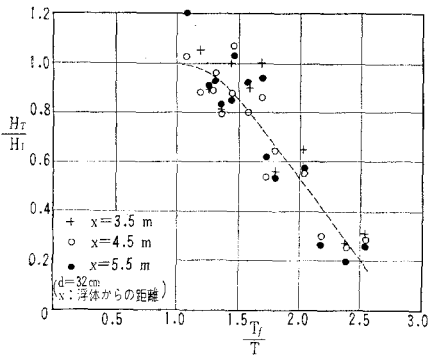


表-1 実験条件

	概 型	実 物
d	24, 32, 40 cm	6, 8, 10 m
T	0.8, 1.0, 1.2, 1.4, 1.6 sec	4, 5, 6, 7, 8 sec
H_0/L_0	0.005, 0.01, 0.02, 0.03, 0.04, 0.05	

U/d を種々に変化させた結果の一例を 図-2 に示すが、予想に反して波高減殺効果にはあまり大きな影響を及ぼさないようである。ただし張力に対しては後述のように、かなり影響するので、実用的な観点から $U/d=4$ とするのが妥当と考えた。そこで $U/d=4$ に統一し、かつ浮体は幾何学的に相似であるとすれば、残る要素は T_f/T , H_0/L_0 , d/L_0 である。多くの資料を比較した結果、 H_0/L_0 , および d/L_0 の影響は実験を行った範囲では、測定精度によるちらばりの内にかくれ、2 次的な影響しか与えないものと判断された。したがって式(1)は単純化され T_f/T の関数として表示される。図-3 は $T_f=1.74, 1.81, 2.03 \text{ sec}$ の3種の浮体模型によってえられた結果をとりまとめたものである。 T_f の範囲は十分に大きくなく、か $T_f < T$ の場合については実験しえなかったので明白ではないが、実用上つぎのように表示してもさしつかえないであろう。すなわち

図-3 ポンツーン型浮防波堤の波高比



$$\frac{H_r}{H_i} = \begin{cases} 1.0 & (1.0 \geq T_f/T \geq 0) \\ 1.0 \sim 0.9 & (1.4 \geq T_f/T \geq 1.0) \\ 1.83 - 0.65 T_f/T & (2.5 \geq T_f/T \geq 1.4) \end{cases} \quad (2)$$

これから知れるように、一般に比較的周期の短い波については効果があっても、周期が少し大きくなるとただちにその効果は小さくなるのが知れる。そこでポンツーンの固有周期を大きくすればよいわけであるが、浮体の安定性とも関連して一般にはなかなか困難である。

(2) 筏型浮防波堤

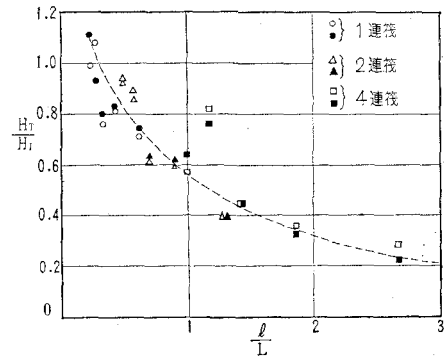
筏型の場合には鉛直壁面よりの反射はさして期待できないが、筏そのものがかかなり広範囲の水面をおおうことにより、流体の運動に変形を与え、したがって波高を低下させることが予想される。もちろん浮体の長さが波長に比して短い場合には、浮体が波にのせられて揺られ、したがって入射波はそのままの波高をもって通過してしまう。しかし浮体の長さが波長とほとんど同じ、あるいはそれよりも大きくなると、入射波に直接あたる部分では浮沈が目だが、反対側ではその振動はそれほど大き

くなく、背後の波高はかなり小さくなる。この場合に浮防波堤の前面では、波が筏の上に登って碎波する模様が見られ、単純な反射のみではないことが認められる。

ポンツーン型の場合と同様に種々の要素を抜き出して調べた結果、波高減殺効果を支配する主要な要素は、浮体の長さ l と波長 L との比 l/L であることがわかった。

図-4 は実験結果の一例を示すが、これは各単位の筏をヒンジで連結した場合であるが、固定あるいは一部固定、一部ヒンジにした場合もほぼ同じ結果をえている。

図-4 筏型浮防波堤の波高比 (d=32 cm)

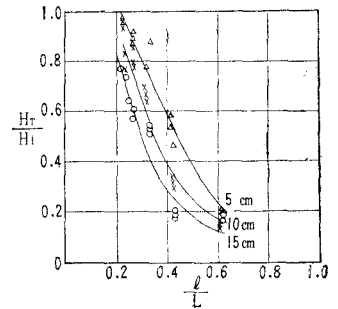


(3) 2 段筏型浮防波堤

図-4 からわかるように筏型の場合に、波高を30%に低下させようとするれば、波長の2倍の長さの筏を組立てる必要があり、よほど波の周期の短い場合を除いては実用的でないように思われる。そこで筏とポンツーンの運動の相違を考慮し、両者の中間的な性格をもつものとして2段筏型を考案した。観測の結果、周期の短い波に対してはほとんど振動せず、進入波は筏の上に登って碎波する模様がみられた。しかしながら周期の長い波に対しては筏は振動をするが、水中の筏がその運動を規制し、波の運動に対して位相が多少おくれ、このため筏の前面が浮沈するが、後端はその振幅はあまり小さくなく波高を低下させる効果が認められた。

この場合にも波長と浮体の長さとの比が重要な要素であり、さらに上下の筏の間隔が大きいほど波高減殺効果は大きくなる。

図-5 2 段筏型浮防波堤の波高比



上下筏間隔	△	×	○
	5 cm	10 cm	15 cm

図-5 は実験の結果を要約したもの

であり、浮防波堤として非常に有効な形式であることが認められた。

(4) 波浪のエネルギー・スペクトルによる検討

われわれが実際に対象とする波浪はきわめて不規則であり、したがって単一の周期波を用いてえた上記の結果が、果してどの程度有用であるかを検討しておく必要がある。2次元風洞水槽に風浪をおこして測定した波形記録を $1/12.5$ sec おきに読み取った。読み取り数 300~400 個を資料としてエネルギー・スペクトルを計算したが、その一例を 図-6 に示そう。これらの計算結果をもとに卓越周期および、エネルギーより求めた波高比 H_T/H_1 、卓越周期を周期として、 図-3, 4, 5 を用いて求めた波高比 H_T/H_1 を記入して比較したのが 表-2 である。これから両者の結果はほぼ妥当な一致を示していることが認められる。

図-6 エネルギー・スペクトル図

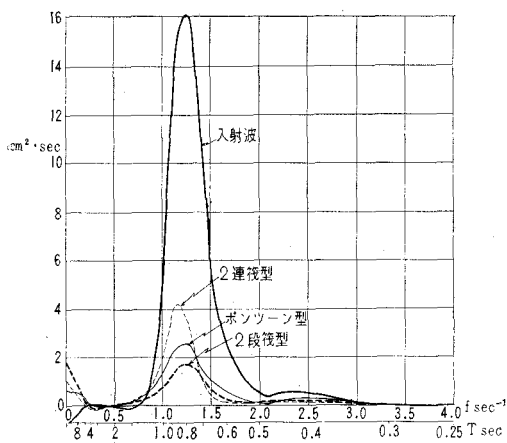


表-2

		卓越周期	波高比*	波高比**
入射波		0.80 sec		
透過波	ポンツーン型 ($T_f=2.03$ sec)	0.80	0.36	0.20
	2連筏型	0.85	0.43	0.47
	2段筏型(10cm間隔)	0.80	0.17	0.17

* エネルギー・スペクトルより求めた値

** 図-3, 4, 5 より求めた値

4. アンカー・チェンに働く張力

(1) ポンツーン型浮防波堤

まずアンカー・チェンの長さにより、張力がどのように変化するかを調べた。ここにいう張力は前述のように幅 60cm あたりの全張力であり、各波ごとに張力を記録するので一応平均張力として整理したのが 図-7 である。 l'/d が一般に小さいと張力はかなり大きく、 l' が長くなるとかなり急激に減少する。波高減殺効果にはあまり大きく影響しないことは前述のとおりであり、潮差を

考慮して、平均水深の 4~5 倍位にアンカー・チェンの長さをとるのが実用的と考えられる。実験は $H_0/L_0 \approx 0.02$, $T_f=2.03$ sec の場合しか行なわなかったので、諸要素の影響を明確にすることはできなかった。 $l'/d=4$ として各波高 H ごとに各測定張力 P をプロットしたのが 図-8(a) である。個々の値はかなり大きく変動しているが、最大張力はほぼ $P \propto H^2$ の関係であらわすことができよう。

図-7 チェンの長さによる張力の変化
(ポンツーン型, $T_f=2.03$ sec, $d=32$ cm)

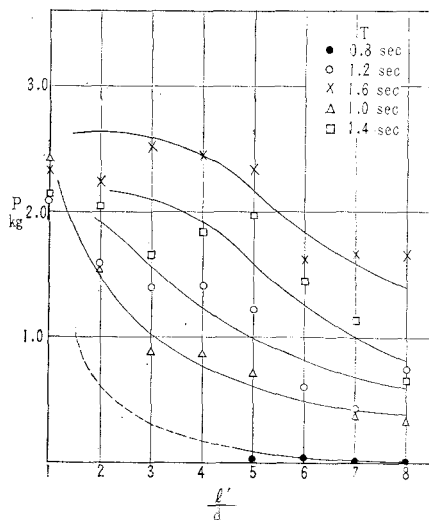
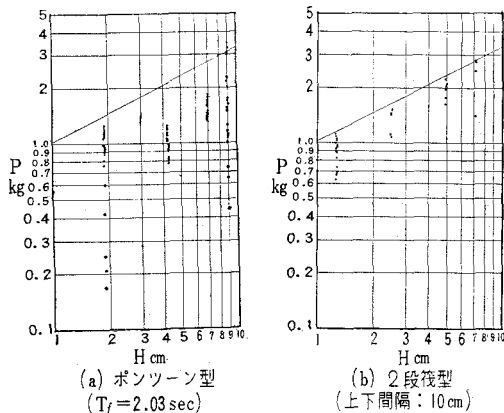


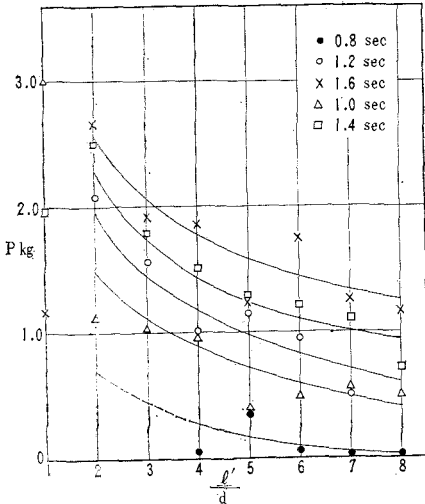
図-8 張力の波高による変化
($H_0/L_0=0.02$)



(2) 2段筏型浮防波堤

波高減殺効果から筏型は実用的でないと考えられたので張力の測定は2段筏型について実施した。ポンツーン型の場合に各波ごとに張力が記録されたのに対し、2段筏型の場合には2~4波目ごとに張力が作用し、したがって個々の値のちらばりは非常に大きいことになる。図-9は l'/d による測定平均張力の変化を示したものであ

図-9 チェンの長さによる張力の変化
(2段筏型, 上下筏間隔 10 cm, $d=32$ cm)



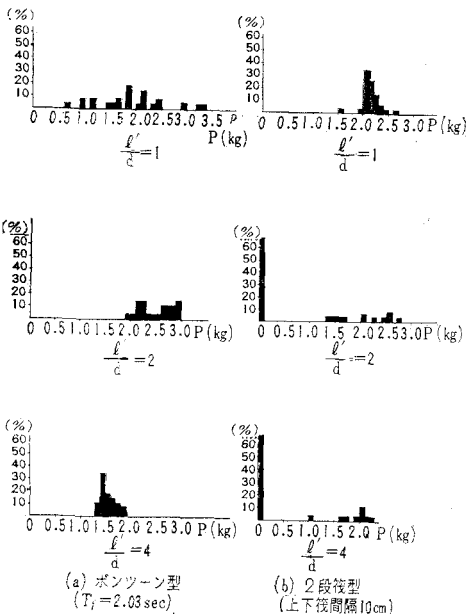
り、傾向はポンツーン型と同じであるが、予想に反しやや張力は大きめにでるようである。これはデータの整理の仕方によるのであり、最大張力を比較すればほとんど同じである。また $l'/d=4$, $H_0/L_0 \approx 0.02$ の場合の各波の張力を図示したのが図-8 (b)である。この場合も最大張力としてはやはり $P \propto H^3$ として表わすことができよう。

(3) 張力出現頻度分布

つぎに、実際にある張力のあらわれる頻度を調べてみ

図-10 張力出現頻度分布

($T=1.4$ sec, $H_0/L_0=0.02$, $d=32$ cm)



よう。図-10(a) はポンツーン型の場合で、それぞれ $l'/d=1, 2, 4$ の条件でえられたものである。 $l'/d=1$ のときには、かなり広範囲にちらばるのに対し、 l'/d が大きくなるとちらばりが小さくなる。一方、2段筏型の場合には、 $l'/d=1$ のときにはポンツーン型と大差ないが、 l'/d が大きくなると張力0の回数が多くなり、したがって、ときどき張力が作用する結果となる。最大張力そのものは大差ないが、くり返し荷重として見る場合、アンカー・チェンの疲労度は小さく、安全度は大きいと考えられる。

5. 結 論

以上3種類の浮防波堤について、比較検討してきた結果を総合すれば、つぎのようである。

まず波高減殺効果について考えれば、2段筏型が最もすぐれているように思われる。しかしポンツーン型についても、対象とする波の周期に比して浮体の固有振動周期を十分に大きくするように設計すれば、その効果は期待できる。さらに平時の利用面から考えれば、浮橋としての兼用も可能である。アンカー・チェンについて考えれば、ポンツーン型、2段筏型ともにほとんど変わりなく、波高 2.5~3 m 程度では十分に実用に供しうる。長さは水深の4倍程度が種々の観点からみて適当であろう。表-3には実験結果を用いて実物を設計するとした場合の諸元を参考のために掲げた。なお製作にあたっては、特に2段筏の場合に、上下筏の連結部材の設計、各単位の連結の問題など十分慎重に考慮しなければならない。

図-3

設計条件: $H_I=2.5$ m, $T=5$ sec, $d=8$ m, $H_T=0.8$ m

	所要特性	延長15m当りの全張力	一本当り張力*	所要チェン径
ポンツーン型	$T_T=11.6$ sec	24.7t	8.2t	30mm
筏型	$l=69.8$ m	—	—	—
2段筏型	$l=15.7$ m 併し間隔2.5m	24.6t	8.2t	30mm

* 延長 15m あたり 3本で繋留すると考える

本研究は昭和36年度ないし昭和37年度にかけて、八幡製鉄KKの依頼により実施した研究の一部であり、実験ならびに資料の整理には東京大学工学部土木工学科港湾研究室員の協力をえた。また電子計算機の使用にあたっては東京大学理学部 永田 豊助手ならびに八幡製鉄KKの援助を受けた。ここにこれら多くの方々々に謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) Woods, C. R. J. : Phoenix, The Civil Engineer in War, The Inst. of Civil Engineers, 1948.
- 2) Lochner, R. O., Fabar and W. G. Penney :

- The Bombardon Floating Breakwater, The Civil Engineer in War, The Inst. of Civil Engineers, 1948.
- 3) Ross, C. W. : Model Tests on a Tripple-Bulkhead Type of Floating Breakwater, Beach Erosion Board, Tech. Memo. No. 99, 1957.
- 4) 余広明・王永鈞：水面暴風浮結構消波浪作用試験報告研究試験報告彙編，中華人民共和國水利部南京水利実験処，1955.
- 5) 永井莊七郎・久保弘一：浮防波堤に関する研究，第17回土木学会年次学術講演会講演概要，1962.
- 6) John, Fritz : The Action of Floating Bodies on Ocean Waves, Annals of the New York Academy of Sciences, Vol. 51, Art. 3, 1949.
- 7) Barakat, R. : Vertical Motion of a Floating Sphere in a Sine Wave Sea, Jour. Fluid Mech., Vol. 13, Part 4, 1962.