54 (1)

防波堤に対する波の作用

大阪大学教授　工学博士　田　中　清

1．防波堤の計畫・設計の諸要素

防波堤の計画には，港湾全体計画の１部として，泊地面積などの制約があるが，ここでは防波堤に対する波の作用を主として考察する。

（１） **來襲する波の諸要素の予知・想定**　暴風時に港を襲う波の波高や波長を予知・想定する方法として，

１．その港またはその附近の海岸における過去数十年にわたる観測記録より，最高波高の波やその頻度分布などを求め，設計波を定める方法がある。

波の観測は，目測程度のものが多く，相当に熟練した者であつても，目測は過大になり易く，波高などは２～３倍も大きく見られることがあり，ことに海岸よりの目測は著しく過大となることが多い。最近は波の測定装置の研究も進み，電気的計測や立体写真測定も行われてはいるが，暴風時の高波に対しては，その測定はまだまだ不完全である。

２．風速をもとにした波高の公式には，広井，Cornish, Rossby-Montgomery, Zimmerman, White, 佐藤らの公式があり，また対岸距離より求める波高公式には有名な Stevenson 公式があり，さらに風速と対岸距離の両方より求める波高公式には Börgen 公式がある。しかしこれらの公式は暴風時に来襲する波に適合していないし，またその信頼性も低かつた。

この才二次大戦中の Sverdrup-Munk の研究以来，波の予知の研究が進み，半ば理論的に誘導し，その係数を観測値から定めた，風速，吹送距離，風の継続時間と波高，波長，周期との関係式が提唱せられて，米国ではよく適合しているようである。しかしわが国で台風時の波に対して，この Sverdrup-Munk 公式を用いてみると，著しく過大な値を与えるようであり，わが国に適合する係数の修正が必要である。防波堤の設計には，たゞ単に最高波高の波を予知するだけでなく，海洋気象の記録，天気図より各波高の頻度分布や１年間の各波高の起る回数なども詳しく求めて，防波堤の工費と維持費および被害などの関係から最も合理的な設計波を決定せねばならない。

外海からの来襲する設計波が決定したならば，島，半島，岬，海岸線などの海岸地形および海底地形を表わす等深線図から，その波の屈折，回折を考慮して，防波堤位置における入射方向や局地的な波高，砕波位置などを求めておく必要がある。

（２） **港内の靜穩さと港内の波高分布**　港内の静穏さの限度は，その港の地理的，経済的な位置や性格とともに，出入船舶の種類や大きさ，繋船の方法，荷役の方法などで異なり，特に操船について船舶関係者の意見を聞く必要がある。特にわが国では台風時に船舶が港内にあるべきか，港外に避難すべきかについて，暴風の風力，風波，高潮に対する船舶の対風性能，対波性能との関係から研究する必要がある。

港内の静穏さを破る主な原因には，港口よりの侵入波とその回折波，防波堤を乗り越した波，風によつて港内で発生した波などがある。

港内の波高分布は防波堤の配置，港口の数，開口の巾と位置などによつて定まるものであり，防波堤の配置とその港口に応じて，波の回折理論から波高分布を近似的に計算することができるようになつた。この詳細は他に述べられているので省略する。港内の波高分布については，計算のみでなく港湾の模型実験を行つて確かめ，最も合理的な防波堤配置が研究せられている。波の分布などを港の模型で実験をする場合，その模型縮尺があまりに小さ過ぎると，表面張力や摩擦の影響が入り，また波の分布や波高，波速は d/L (d＝水深，L＝波長）の比に支配されるので，横長さの縮尺と縦長さの縮尺との異なる歪模型は用いることができない。たゞ d/L が $1/3.5$ 程度以上の L のみが支配的な深海波または d/L が $1/30$ 程度以下の d のみが支配的な孤立波に関する模型実験には，歪模型が許される。

（３） **防波堤の位置の選定と沿岸流，漂砂などに及ぼす影響**　防波堤の位置の選定には前に述べた波に対する考察以外に，その港湾およびその附近の広範囲にわたる沿岸流，河口流や漂砂に及ぼす影響を研究せねばならない。その海岸の水路学的，水理学的な調査，地形学的な調査，海岸と海底の地質調査などによつて，沿岸流，漂砂の現状を詳しく知るとともに，過去の記録，古地図などによつてその海岸の変化を調べ，さらに防波堤構築がその附近における沿岸流，漂砂，

海岸線浸食や堆積などに及ぼす将来の影響を理論的にまた模型実験によつて正確に推定しておく必要がある。また防波堤構築後はその影響変化について，長期間にわたり観測測定を続ける必要がある。これについては他に詳しく述べられるはずである。

（4） 防波堤の型式，構造，安定性 防波堤の型式としては，ブロック積やケーソンのような垂直壁をもつた防波堤，石張や枠などの急な斜面をもつた防波堤，ブロック積などで階段状の防波堤，捨石や捨ブロックのような緩い斜面をもつた防波堤，さらに捨石の上に直立堤をもつた混成防波堤などがある。

その型式の選定には材料の供給や運搬の難易，すなわち捨石堤ではその附近から所要の大きさの石塊を多量に産するかどうか，ケーソンやブロックなればその製作場所や運搬距離などが検討せられる。またこの型式は国情による慣例があり，ヨーロッパでは捨石堤とともに直立堤も多く築かれているが，米国では多くは捨石堤であり，わが国ではさまざまの型式が用いられており，混成堤も少なくない。

海底地質の良否は型式選定の重大な要素であり，海底地質が良好なれば直立堤の構築も容易であるが，軟弱地盤なれば順応性のある捨石堤または混成堤を選ばねばならないようになる。

波の作用からすれば，防波堤前面の水深が波高の1.4～1.6倍より浅くなれば砕波，跳波を起し，防波堤前面に衝撃的な波力を及ぼすので，直立堤はなるべく水深が波高の2倍以上の深さのところに用い，波を完全反射せしめて重複波（Clapotis）として作用する場合に限るものとされている。しかし防波堤は多くが海岸から沖に延びているから，その中間で必ず砕波，跳波の作用を受ける部分があり，設計波の取り方によつてはそれ以上の波高の場合に跳波の起ることも考えられ，特に干満潮の潮差の大きな場所では注意を要する。混成堤ではその捨石部の天端水深が十分深く，直立堤部前面で砕波，跳波とならないようにするか，直立堤前方の捨石部を長くして堤の前方で砕波に変ぜしめ，直立部に大きな波力のかゝらないようにするのがよい。波が急激な水深変化で浅い部分に入つて，砕波，跳波となる場合の水深と波高との関係およびその砕波位置についてはいまだ十分な研究がなく，緩傾斜の海浜における砕波理論を応用するか，経験的に直立壁前面の水深が波高の1.4～1.6倍以下となれば砕波，跳波が起るとする外はない。捨石堤ではその斜面上で必ず砕波となり，波が砕けることによつて波を殺すのであり，反射波は50%以下に減少する。捨石堤では波に対する水深の制約はないが，水深の大きなところでは，石塊の量が著しく多量となる。

防波堤の型式，材料に従つて，その構造，施工が定められる。防波堤の大きさ，構造はそれに作用する波力と基礎地盤の支持力により設計せられる。

波力についてはつぎの項で詳しく論ずることとし，防波堤の安定性については，波力による直立部の転倒，滑動，捨石部への力と重さの分布伝達，捨石部の崩壊，沈下および地盤の支持力などが論ぜられるが，これらについては，一般的な構造力学の応用に過ぎない。最近は海底の地盤支持力について特に研究せられ，大阪などの軟弱地盤上の防波堤の沈下も問題を残している。またわが国のような地震国では，地震による防波堤の被害が報告せられている。これらはわが国に課せられた今後の研究問題である。

（5） 防波堤の施工，維持管理と被害 防波堤の施工についても，その型式に応じてさまざまな新しい工法と施工機械とが用いられているが，それについては省略する。たゞ米国においては捨石堤の施工のために，波力との関連において模型実験などを行い，捨石堤の石塊を三つの大きさに分けて，心部石塊，押え石塊，装甲石塊とし，水深に応じて心部石塊の堆積高と押え石塊の厚さや勾配などを波による堆積石塊の移動より定めている。さらに築造後の暴風時の波による被害状況を模型実験から推定し，気象記録より毎年の被害回数や被害程度まで出して，その復旧維持の計画を立てゝ，工費と維持費との関係から最も経済的な設計に勉めている。

防波堤，特に捨石堤では，沈下や暴風の高波ごとに相当の被害の起ることは当然予期せらるところであり，その復旧と管理維持とは計画に基づいて経常的になされるべきであり，竣功したが最後，長年月にわたつて半壊のまゝ放置せられるようなことがあつてはならない。

2．波の作用，特に波力の公式

実際の海の波に関する観察は古くから行われてきが，その多くは目測程度の信頼度の低いものであつた。最近になつて立体写真測量などの手段でその複雑な性質が究明せられてきたが，暴風時における海岸附近の波高や波長とか防波堤附近の波の状態については，いまだ適切な測定装置がないようである。しかし複雑な波の分布について統計学が応用せられてきている。

また防波堤に対する波力の実測は，才14回国際航路会議（カイロ，1926）以来，ピエゾメーターや電磁計器によつて著しく発展はしてきたが，まだ多くの疑点を残している。実測としては，Stevenson 以来ゼノア

における Luigi Luiggi, ディエップにおける Rouville-Besson-Petry, その他 Gaillard, Eckhardt, Kunsnetzow, Lévy, Renaud, Cagli, Bruns など多くのものがあるが，特に注目されるのは最近における米国とソ連の実測である。この波圧の実測のときには，同時に必ず波の諸要素である入射角，波高，波長，周期，水粒子の軌道速度などを測定する必要があり，その精度まで論じると，なかなか十分なものはない。波や波圧の測定計器についても多くの研究があつて，Kunsnetzow（ソ連）の総合報告があるそうである。この外模型実験による波力の研究としては，Stucky, Larras, Malaward, Bagnold, Mitschin, Ferro, 松尾佐藤など多くのものがある。

波力の模型実験では，波高，水深と波長との関係から，長さの縮尺が縦横で異なる歪模型を用いることが許されない。模型実験の相似則としては，Froude 数をあわせる法則が用いられ，長さの縮尺を L_r, 水単位重量の縮尺を γ_r とすれば，時間と速度との縮尺は $L_r^{1/2}$ に，力の縮力は $L_r^3\gamma_r$ に，圧力の縮尺は $L_r\gamma_r$ に，エネルギーの縮尺は $L_r^4\gamma_r$ になる。波力の測定については，考慮を要する多くのものが残つており，波力とは何かという根本問題に直面する。ヒエゾメーターなどを用いると圧力 p が測られ，ピックアップの構造によつては力積 $\int pdt$ が測られる。さらに電磁計測が加わると回路特性などが混入し，広井式などの機械的変位による波力計では，波の仕事(エネルギー)または力積を測ることになつて，波力曲線の解明には相当の困難がある。跳波の波圧と時間との関係曲線として，ディエップで Rouville, Besson, Petry らが観測したものと， Larras が水槽で模型実験したものとを挙げるとつぎのようである。すなわち，波が直立壁に当つて跳波となると，0.1 sec 程度のきわめて圧力の高い衝撃部分とそれに続く 7 sec 程度のやゝ圧力の低い台状部分とからなつていて，爆薬の水中爆発における圧力曲線が衝撃圧力部 (Shock pressure) と後続の流動圧力部 (Surge pressure) とからなつているのと酷似している。

波力の根本となる障害物に対する波の作用は，実験的にも理論的にも全くわかつていないだけでなく，さらに海の波の理論自らが不完全であつて，浅海波について St. Venant-Flamant, Gaillard の楕円トロコイド波や Struik, Wiegel, Keulegan, 浜田，佐藤，田中などの研究があるが，変形せずに進行する有限振巾の表面波の存在には疑問があり，これらが有限振巾波の波力の理論的解析を一層困難ならしめている。防波堤の波力の解析には，Layleigh の方法のように波速の速度をもつた逆方向の流れを附加して，系全体を定常的ならしめる操作を用いることができない。

防波堤に当つて跳波となり巨大な波力を生ずるような波の作用は，個々の波自体の作用なのであろうか，または防波堤から反射した前の波が後続の波に干渉して 3～4 波目ごとに起る波群としての作用なのであろうか，研究の余地がある。

重複波は防波堤で波が完全に反射せられる場合，跳波は防波堤に当つて水が奔騰しほとんど反射波のない場合であるが，防波堤附近で反射波が明らかに認められるのは 1～2 波長の範囲で，それ以遠では前進波のみが卓越しているように見える。直立堤，捨石堤ともに前進波の何%が反射波となるのか，反射波の波高，入射角と反射角との関係，質量輸送を伴う有限振巾波の場合に前の波の反射波が後続波に及ぼす干渉などについては，ほとんど研究もないようである。防波堤に作用する波力の算定を論ずるには，防波堤の型式および海側前面の形状によつて，直立面，傾斜面，階段状面，曲面，捨石斜面に分類され，また波の状態によつて完全反射の干渉による重複波 (Clapotis), 壁面に当つて衝撃的に噴水を起す跳波，斜面で波頂から崩れる砕波の三つに分けられる。

（1） 直立面に生ずる重複波の波力 この直立壁に重複波が作用するときの波力を論じたものはきわめて多く，公式だけでも数十にのぼつている。これらの公式や実験値を参考にして，才16回国際航路会議（ブラッセル，1935）では重複波の波力として，波高が波長の $1/_{20}$～$1/_{25}$ 程度以下，水深が波高以上の場合，直立面に作用する波力分布をつぎのように定めた。すなわち，静水面では波圧は沖波の波高 $H=2h$ (H=波高，h=半波高) の静水圧に等しく，静水面上では波は波高 H または $1.5H=3h$ まで上昇し，その点で波圧は 0 として静水面から直線的に減少する。静水面下では水底に行くに従つて波圧はやゝ減ずるが，波長が長いとその減少は僅かになるので，安全側を取つて静水面の最大波圧 H を水底まで一様にとることにした。しかしその後に研究が進んで，ブラッセルにおける申し合せは，やゝ事実に合わないようになつている。今までに提案された公式の中から，有名なものや主要なものを挙げると，つぎのようである。

記　号

沖波波高 $=H$(m)， 壁面波高(静水面上) $=H^*$(m)，
水深(静水面下) $=d$(m)， 水の密度 $=\rho$(t/m^3)，
重力加速度 $g=9.8$(m/sec^2)， 波長 $=L$(m)，
波圧 $=p$(t/m^2)， 最大波圧 $=p_m$(t/m^2)，
壁面の波圧の作用最高点の波圧 $=p_s$(t/m^2)，

壁面の水底波圧$=p_b$(t/m^2)，静水面から p, p_s, p_m の作用点までの壁面距離$=y, y_s, y_m$ (m)，
周期$=T$(sec)，表面波の波速$=C, C_0$(m/sec)，
長波の波速$=\omega$(m/sec)，
波の速度ポテンシャル$=\phi$，
壁附近における波の平均水位の上昇$=\delta$(m)，
水粒子の軌道速度及び表面速度$=v, v_0$(m/sec)，
水粒子の軌道中心の上昇 $=\varepsilon_y$(m)，
波の水粒子の水平，鉛直軌道半径$=r, r'$(m)，
波の水粒子の位置の座標$=(x,y)$，静水時(x_0,y_0).

トロコイド波のときには，

$$x=x_0-r\sin\frac{2\pi x_0}{L},\quad y=y_0+\varepsilon_y+r'\cos\frac{2\pi x_0}{L},$$

$$C=\sqrt{\frac{gL}{2\pi}\tanh\frac{2\pi d}{L}},\quad \omega=\sqrt{g\left(d+\frac{3}{4}H\right)},$$

$$T=\frac{L}{C},\ \frac{L}{C_0},\ \frac{L}{\omega},$$

$$r=\frac{H}{2}\frac{\cosh\frac{2\pi}{L}(d+y_0)}{\sinh\frac{2\pi}{L}d},\quad r'=\frac{H}{2}\frac{\sinh\frac{2\pi}{L}(d+y_0)}{\sinh\frac{2\pi}{L}d},$$

$$\varepsilon_y=\frac{\pi rr'}{L},\qquad \varepsilon^*=\frac{\pi H^2}{4L}\coth\frac{2\pi d}{L},$$

$$v=\frac{\pi H}{T}\frac{\cosh\frac{2\pi}{L}(d+y_0)}{\sinh\frac{2\pi}{L}d},\quad v^*=\frac{\pi H}{T}\coth\frac{2\pi d}{L},$$

円軌道のときには，

$$r_0=\frac{H}{2}e^{\frac{2\pi y_0}{L}},\quad C_0=\sqrt{\frac{gL}{2\pi}},\quad \varepsilon_0=\frac{\pi r_0^2}{L},$$

$$\varepsilon_0^*=\frac{\pi H^2}{4L},\qquad v_0=\frac{2\pi r}{T},\qquad v_0^*=\frac{\pi H}{T}.$$

1) 実験，実測から求めた方法

1. Levi の結果 (1931〜4)．ゼノアにおける実測による。

$H<3$ m のとき，$H^*=H$;

$H>3$ m のとき，$H^*=1.5H$;

$y_m=0$ にて，$p_m=\frac{4}{5}\rho H^*$; $y_s=H^*$にて，$p_s=0$;
$y=d$ にて，$p_b=0$; p はp_mよりH^* または水底に向つて直線的に減少する。

2. Gaillard の結果 (1905)．ミシガン湖における実測によるもので，壁面の圧力分布は複雑な曲線状をしている。

$H^*\fallingdotseq 2H,\quad y_s=1.66H,\quad y_m=0,\quad p_m\fallingdotseq 0.068\,C_0^2.$

3. Cagli の結果(1935)．ゼノアにおける実測と実験によると，波圧は静水圧と動水圧とからなつている。 $H^*=2.2\sim2.5H,\ \delta=0.45\sim0.65H.$
y_m は静水面より下方にあつて，$p_m=H$,
$y_s=1.7H$ にて $p_s=0$.
$y>0$ (静水面より上) のときは，$p\fallingdotseq H^*-2\rho y/3$,
$y<0$ (静水面より下) では p は H/L によつて漸減し，$H/2<p_b<H$.

2) 動力学的な考察より導いた式

1. Engelsの公式．壁面 1m 当りにつき $p=\rho H\frac{C^2}{2g}$.

2. Wey (1920) の公式．静水面から水深 y までの間の1波長のエネルギーを E_y とすると，深海波として，

$$E_y=\frac{\rho gH^2}{16}\left(1-e^{\frac{4\pi y}{L}}\right),$$

この E_y の35%が波力として働くとして，

$$p=0.35E_y/|y|$$

を得る。たゞし静水面では $p=0$ となり，y_m は静水面下にある。

3. Jacoby (1936) の公式．トロコイド波に Wey の方法を加味したもので，波の x_1, x_2 における波高を y_1, y_2 とすれば，(x_1, x_2) の間のエネルギーは

$$\Delta E=\frac{\rho gH^2}{16}(x_2-x_1)(e^{4\pi y_2/L}-e^{4\pi y_1/L})$$

そこで $x_2-x_1=L/4-h/2$, $y_2-y_1=H/8$ に分けて，$L/2$ の区間だけ ΔE を累加すると，

$$p=\sum^{x}\Delta E/(y_2-y_1).$$

4. Butawand (1936) の公式．壁面 1m 当りについて，

$$p=\pi\rho H^2C_0^2/4,$$

この p は $(y_0+\varepsilon_0)$ 点の上下 $2r_0$ の間に作用する。

5. Latham の公式． $y_m=\varepsilon_0^*$, $p_m=0.125\,C_0^2$;
$y_s=H+\varepsilon_0^*$, $p_s=0$; $y=-(2.5\sim3)\,H$ にて $p=0$.
跳波となれば，$p_m=0.125\,\omega^2$ とする。

6. d'Auria (1890)の公式．$L/2C$ の間の運動量が $HLC/2g$ であるから，平均 $p=\rho HC^2/g$ の動水圧が作用し，$y_s=H$ として，$p=H+\rho HC^2/g$ が一様に分布する。

7. Molitor (1934) の公式． Gaillard の実測値によつて，波速と軌道速度とを用いて波圧公式を作つた。こゝでは完全反射の場合として，

$d>1.84H$(深海波)のとき，$H^*=H/2+2H^2/L$,
$d<1.84H$(浅海波)のとき，$H^*=H/2+4H^2/L$,

$y_m=0.785H^2/L=0.12H$にして，$p_m=k\frac{\rho}{2g}(\omega+v_0')^2$,

こゝに，定数 k は ft-lbs 系にて $k=1.8$ (Gaillard の実測値によると $k=1.30\sim1.71$) である。

軌道速度の水平成分は，

$$v_0'=\mu\frac{H}{2}\sqrt{\frac{2\pi g}{L}}=7.11\,\mu\frac{H}{\sqrt{L}}\quad(\text{ft/sec}),$$

こゝに，μ は水粒子の軌道係数であつて，d/L の函数として与えられる (**表—1**)。

$y>0$（静水面上）では，$y_s=H^*+y_m$ にて $p_s=0$,

$y<0$（静水面下）では，

$y=-(H^*/4-y_m)$ にて $p=0.72\,p_m$,

$y=-(H^*/2-y_m)$ にて $p=0$.

3）トロコイド波運動の壁面による停止で波力を発生すると考えた公式

表—1 水分子の軌道係数

d/L	μ
0.05	1.814
0.10	1.340
0.15	1.165
0.20	1.085
0.30	1.023
0.40	1.007
0.50	1.002
0.50 以上	1.000

1. Lira (1926) の公式．才14回国際航路会議に報告されたもので，波力が静水圧と動水圧とからなるものとしている。楕円トロコイド波を用い，$H^*=H/2+\varepsilon^*$, 動水圧を $p_D=k\rho v^2/2g$ として，

$y_m=0$, $p_m=k\rho v^{*2}/2g+\rho H^*$,

$y_s=H^*$, $p_s=k\rho v^{*2}/2g$,

$y_0<0$(静水面下) $p=k\rho v^{*2}/2g+\rho H^*$,

$y_0=-d$(水底), $p_b=p_s/\cosh^2(2\pi d/L)+\rho H^*$.

Lira は $k=4$ にとつて，$p_D=200\,v^2$ としている。

2. Richter の公式．Lira の方法と Benezit の方法とを混用したもので，$H^*=H+\varepsilon_0^*$ とし，動水圧 p_D は

$$d/L>0.30,\qquad p_D=k\rho v_0^2/2g;$$

$$d/L<0.30,\qquad p_D=k\rho v^2/2g$$

とし，$k=2$ として $d/L<0.30$ のとき $p_D=100\,v^2$ としている。

波による飛沫の上昇高 H' を，$H'=\dfrac{3}{2}H+\varepsilon_0^*$ として，

$y=H'$, $p=0.8\,p_s$,

$y=H^*$, $p_s=k\rho v^{*2}/2g$（または $k\rho v_0^{*2}/2g$），

$$y_m=0,\quad p_m=p_s+\rho H^*\frac{L}{2}\Big/\left(\frac{L}{2}+H^*\right),$$

$y_0<0$（静水面下），

$$p=\frac{k\rho v^2}{2g}+\rho H^*\left(\frac{L}{2}+y\right)\Big/\left(\frac{L}{2}+H^*\right),$$

$y_0=-d$（水底），

$$p_b\fallingdotseq p_s/\cosh^2\frac{2\pi d}{L}+\rho H^*\left(\frac{L}{2}-d\right)\Big/\left(\frac{L}{2}+H^*\right).$$

3. Iribarren (1938)の公式．$y=y_0+\varepsilon y+r'$ における静水圧 p_D と静水圧 p_S は，

$$p_D=\rho\frac{H}{2}\cosh\frac{2\pi}{L}(d+y_0)\Big/\cosh\frac{2\pi}{L}d,$$

$$p_S=(p_D)^2\frac{\pi}{\rho L}\coth\frac{2\pi d}{L}+p_D;$$

$H^*=H+\varepsilon^*$; $y_s=H^*$, $p_s=0$; $y_m=0$, $p_m=\rho H^*$;

$y_0<0$, $p=p_S+p_D$

$$=\rho\varepsilon^*\cosh^2\frac{2\pi}{L}(d+y_0)/\cosh^2\frac{2\pi d}{L}$$

$$+\rho H\cosh\frac{2\pi}{L}(d+y_0)/\cosh\frac{2\pi d}{L};$$

$$y_0=-d,\quad p_b=\rho\varepsilon^*/\cosh^2\frac{2\pi d}{L}+\rho H/\cosh\frac{2\pi d}{L}.$$

4. Trenjoukhinn(1926) の公式．波力が二つの部分 p_1, p_2 よりなるとしており，Molitor の考えに似ている。

$$p_1=k\rho\frac{1}{2g}(C+v^*)^2=200(C+v^*)^2,\quad H^*=\frac{H}{2}+\varepsilon^*.$$

$H^*>y>-(H-H^*)$ の静水面附近では $p=p_1$ が作用し，$y<-(H-H^*)$ ではつぎの p_2 が作用する。

$$p_2=k\rho v^2/2g=200\,v^2.$$

$y_0=-d$ にて，$p_b=(k\rho/2g)v^{*2}/\cosh^2(2\pi d/L)$.

4）トロコイド波の完全反射による重複波理論

1. Benezit (1923) の公式．深海波である円軌道トロコイド波の重複波の波力であつて，$H^*=H\pm\varepsilon_0^*$ として，

$y_s=H+\varepsilon_0^*$, $p_s=0$,

$$y_m=0,\quad p_m=\rho(H+\varepsilon_0^*)\frac{L}{2}\Big/\left\{\frac{L}{2}+(H+\varepsilon_0^*)\right\},$$

$$y_0<0,\quad p=\rho y_0+\rho\frac{\pi H^2}{2L}\left(e^{4\pi y_0/L}-\frac{1}{2}\right),$$

$y_0=-d$, $p_b=p_m(1-2d/L)$.

波が防波堤の方向と角 θ をなして入射するときは，

$$p=\rho y_0+\rho\frac{\pi H^2}{2L}\left(e^{4\pi y_0/L}\times\frac{1+\cos^2\theta}{2}-\frac{1}{3}\right)$$

とし，さらに実用的には，つぎのようにしている。

$p_m=HL/6$, または $p_m=2H^2$.

2. Sainflou (1928) の公式．現在のところ重複波に対して最も信頼性のある公式として広く用いられている。防波堤前方の水深が $2H$ より深く，H/L があまり大きくない場合には実験ともよく合つているが，波の衝撃的作用について不十分な点も残つている。楕円トロコイド波の反射波の干渉により，

$$x=x_0+2r\cos\frac{2\pi x_0}{L}\sin\frac{2\pi t}{T},$$

$$y=y_0+\frac{4\pi rr'}{L}\sin^2\frac{2\pi t}{T}+2r'\sin\frac{2\pi x_0}{L}\sin\frac{2\pi t}{T},$$

とすれば，Lagrange の方程式を2乗項程度で近似的に満足する。

$$\delta_y=\frac{4\pi rr'}{L}=4\,\varepsilon_y,\quad \delta=\frac{\pi H^2}{L}\coth\frac{2\pi d}{L}=4\,\varepsilon^*.$$

一般には $H^*=H\pm\delta$ として，

$y_s=H^*$ にて，$p_s=0$;

$$p=\rho y_0\pm\rho H\left\{\frac{\cosh\frac{2\pi}{L}(d+y_0)}{\cosh\frac{2\pi d}{L}}-\frac{\sinh\frac{2\pi}{L}(d+y_0)}{\sinh\frac{2\pi d}{L_0}}\right\};$$

$y_0=-d$（水底）にて，$p_b=\rho d\pm\rho H/\cosh\frac{2\pi d}{L}$．

$H^*=H+\delta$ のときには，

$y_s=H+\delta,\ p_s=0;$

$y_m=0,\quad p_m\fallingdotseq\left(\rho d+\rho H/\cosh\frac{2\pi d}{L}\right)\frac{H^*}{d+H^*};$

$y_0=-d,\quad p_b=\rho H/\cosh\frac{2\pi d}{L}.$

$H^*=H-\delta$ のときには，

$y_s=0$（静水面），$p_s=0;$

$y_m=-(H-\delta),\ p_m\fallingdotseq-\left(\rho d-\rho H/\cosh\frac{2\pi d}{L}\right)\frac{H^*}{d-H^*};$

$y_0=-d,\quad p_b=-\rho H/\cosh\frac{2\pi d}{L}.$

3. 佐藤（1943）の公式．Sainflou 公式に補正項を加えて近似度を高め，

$$p=\rho y_0\pm\rho H\left[\frac{\cosh\frac{2\pi}{L}(d+y_0)}{\cosh\frac{2\pi d}{L}}-\frac{\sinh\frac{2\pi}{L}(d+y_0)}{\sinh\frac{2\pi d}{L}}\right]+\rho\frac{\pi H^2}{L}K,$$

$$K=\frac{\cosh^2\frac{2\pi}{L}(d+y_0)+\sinh^2\frac{2\pi}{L}(d+y_0)}{\sinh\frac{2\pi d}{L}\cosh\frac{2\pi d}{L}}-\frac{\sinh\frac{2\pi}{L}(d+y_0)\cosh\frac{2\pi}{L}(d+y_0)}{\sinh^2\frac{2\pi d}{L}}-\tanh\frac{2\pi d}{L}.$$

5）流体力学の基本方程式からポテンシャル運動の重複波の波圧を求める理論　有限振巾のポテンシャル波として，反射波の干渉を論ずるのが最も正しい方法であつて，2, 3 の試みもあるが，いまだ成功していない。

1. Gourret（1935）の公式．

$$\phi=-\frac{H}{T}\left(L/\sin\frac{2\pi d}{L}\right)\cos\frac{2\pi x}{L}\cosh\frac{2\pi(d+y)}{L}\times\sin\frac{2\pi t}{T}.$$

いま $p/\rho=gy-\partial\phi/\partial t$ として，

$$\delta=\frac{\pi H^2}{L}\left\{\left(\tanh\frac{2\pi d}{L}-\coth\frac{4\pi d}{L}\right)+\frac{1}{2}\coth\frac{4\pi d}{L}\Big/\sinh^2\frac{2\pi d}{L}\right\}$$

$H^*=\delta\pm H;\quad y_s=H^*$ にて，$p_s=0;$

$y=-d$（水底）にて，

$$p_d=\rho d\pm\rho H/\cosh\frac{2\pi d}{L}-\rho\frac{\pi H^2}{L}\tanh\frac{2\pi d}{L}.$$

従つて Sainflou の p_b に補正項 $\left(-\rho\frac{\pi H^2}{L}\tanh\frac{2\pi d}{L}\right)$ を加えたものとなる。

2. Miche（1944）の公式．Lagrange の方程式より導き，

$$\frac{p}{\rho g}=y_0+\frac{H\sinh\frac{2\pi}{L}y_0\sin\frac{2\pi}{L}x_0\sin\frac{2\pi}{T}t}{\sinh\frac{2\pi d}{L}\cosh\frac{2\pi d}{L}}+\frac{\pi H^2}{4L}\frac{\sinh\frac{2\pi}{L}y_0}{\sinh^2\frac{2\pi d}{L}}\left[\cosh\frac{2\pi}{L}(2d-y_0)\left\{\frac{\cos\frac{4\pi}{L}x_0}{\cosh^2\frac{2\pi d}{L}}-4\sin^2\frac{2\pi t}{T}\right\}+\frac{2\pi Hd}{L}T\sinh\frac{2\pi}{L}(2d-y_0)\times\left\{1-3\sin^2\frac{2\pi t}{T}\right\}+3\cos\frac{4\pi}{L}x_0\cos\frac{4\pi}{T}t\left\{\frac{\cosh\frac{2\pi}{L}y_0}{\sinh^2\frac{2\pi d}{L}}-\frac{2\cosh\frac{2\pi}{L}(d-y_0)}{\cosh\frac{2\pi d}{L}}\right\}\right].$$

$x_0=L/2$ のときに圧力と最大となり，

$$\frac{p}{\rho g}=y_0\pm H\frac{\sinh\frac{2\pi}{L}y_0}{\sinh\frac{2\pi d}{L}\cosh\frac{2\pi d}{L}}+\frac{\pi H^2}{4L}\times\frac{\sinh\frac{2\pi}{L}y_0}{\sinh^2\frac{2\pi d}{L}}\left[\cosh\frac{2\pi}{L}(2d-y_0)\left(4-\frac{1}{\cosh^2\frac{2\pi d}{L}}\right)-\frac{4\pi Hd}{L}T\sinh\frac{2\pi}{L}(2d-y_0)+3\left\{\frac{\cosh\frac{2\pi}{L}y_0}{\sinh^2\frac{2\pi d}{L}}-\frac{2\cosh\frac{2\pi}{L}(d-y_0)}{\cosh\frac{2\pi d}{L}}\right\}\right],$$

$$H^*=H+\frac{\pi H^2}{L}\coth\frac{2\pi d}{L},$$

$y=-d$（水底）では，

$$\frac{p_b}{\rho g}=\frac{H}{\cosh\frac{2\pi d}{L}}\left[\pm1-\frac{\pi H}{L}\left(\sinh\frac{2\pi d}{L}-\frac{3}{4\sinh^3\frac{2\pi d}{L}}\right)\right]$$

Miche の方法はもつと吟味する必要がある。なお，Stokes 型の有限振巾波の重複波理論はまだ求められていない。

（2）直立面に生ずる跳波の波力　防波堤前面の水深 d が 1.4～1.6H（H=波高）となれば，波は壁面で砕けて水塊が高く上昇して跳波となり，巨大な波力を発生する。この現象について流体力学の理論から説明したものはまだ一つもない。この波の砕ける限界水深については，古くは Boussinesq の理論があり，傾斜面について J. J. Stoker，浜田，佐藤などの理論がある。

佐藤氏によれば，水深 d にて波高 H, 波長 L の波が，水深 D にて砕波となるものとすれば，

$$\left(\frac{D}{d}\right)^{8/4}-\frac{7H}{L}\left(\frac{D}{d}\right)^{5/4}-\frac{3H}{4d}\left(\frac{D}{d}\right)^{3/4}+19.124\frac{H^2}{4Ld}=0$$

としている。

Bagnold, Minikin などはこの跳波現象を詳しく説明し，波の峯が谷よりも前進して巻き込んで行つて，壁面との間に空気層（空洞）を持ち，これが波の水塊にて圧縮せられて大きな波力を発生し，その後に結果として水柱が高く上昇するのであるとしている。波圧の時間曲線を見ると水中爆発と類似しているので，この空洞の圧潰が影響しているものと思われる。実験では跳波の波力の範囲は，壁面の前面に空気層のある部分に限られている。

1）波の前進運動が波力に転ずると考える方法

1. 広井公式. 波は静水面上 H^* の高さに上昇し，波圧は H^* の高さから水底まで一様につぎの p が仂く。 $H^*=H(1.5+\pi H/4L)$, $p=1.5H$.

なお，跳波の場合には，波圧は p_m となるが，これは波の水の落下速度 v を用いてつぎのように求めることもできる。

$$p_m=3.2H;\ v=\sqrt{gH(3+\pi H/L)},\ p_m=200\,v^2.$$

2. Hansen (1940) の公式.

$$p_m=k\rho\omega^2/g=0.100\,\omega^2,$$

この波圧は静水面に作用し，つぎのようにとる。

$$k\fallingdotseq 0.95,\quad \omega=\sqrt{g(d+3H/4)}.$$

3. Kandiba-Tukholka (1926) の公式.

$$p_m=k\rho\omega^2/(2g)=0.083\,\omega^2,$$

この波圧は静水面に作用し，$k\fallingdotseq 1.6$ としている。

4. Betz (1936) の公式. Hütte にあるもので，S_w を水中の音速 (1,495 m/sec), S_c をコンクリート中の音速 (2,530～3,000 m/sec) として，

$$p_m=\rho\{S_wS_c/(S_w+S_c)\}\omega=0.96\,\omega.$$

2）空気中間層を考えた跳波の波力理論

1. Bagnold (1939)の公式. 水深 18 in., 巾 21 in., 長さ 36 ft. の水槽実験から求めたものである。一般に波の峰が前進して直立壁に当つたときに空洞ができると，衝撃圧が発生する。いま，b を空気中間層の厚さ，m を空気層を圧縮する水柱の長さ，v を水柱の速度，ρ を水の密度とすると，単位断面積の水柱の運動量は ρvm である。しかして圧力の実測による圧力－時間曲線から力積 $\underline{pdt}$ が求められ，$m=\int(pdt/\rho v)$ となる。なお $v=\sqrt{gL/2\pi}=\sqrt{gH/2}$ であつて，一般に $m\fallingdotseq H/5$ となる。従つて波の空気層になす仕事から，

$$p_m=2.7\,\rho v^2m/b\fallingdotseq 0.54\,\rho v^2H/b\quad(\text{ft-lbs 単位})$$

が得られる。Morison (1948) の実験によると $b\fallingdotseq 0.02$ ft である。

2. Minikin (1950)の公式. Bagnold の研究に基づいているが，単位面積当りの波のエネルギー E が壁面の空気層になす仕事に等しいとして，

$$E=\pi\rho H^2/16=p_mb,\ \therefore p_m=\rho\pi H^2/(16\,b).$$

Bagnold と同様にして，$p_m=k\rho v^2H/(2\,b)$,

こゝに，$v=\sqrt{gd}$ とすれば，

$$k=\pi H/(8v^2)=(\pi/8g)H/d.$$

いま，$d\leqq H$（砕波）として，波長が πd に減少するものと仮定し，防波堤より前方の砕ける前の水深を d' とすると，

$$p_m=\kappa\frac{\pi d}{L}\frac{\rho H}{d'}v^2=\kappa\frac{\pi d}{L}\frac{\rho H}{d'}gd,\ (\kappa=\text{定数})$$

Bagnold の $0.54/b$ の代りに $\kappa\pi d/Ld'$ を用い，衝撃運動量を求めると，

$$I=(\kappa\pi d/Ld')\rho H\sqrt{gd}$$

となる。一方 Bagnold の式から $I=\rho vm$ とすれば，$\kappa=2$ となり，Rouville-Petry の値を用いると $\kappa=2\sqrt{d}$ となる。

$$\therefore\ p_m=(2\pi d/Ld')\cdot\rho H\cdot gd\fallingdotseq 5.8\,dH/L\quad(\text{ton/ft}^2)$$

この p_m は静水面に作用し，静水面の上下 $H/2$ において $p=0$ となり，p_m より放物線状をなして波圧は減少し，全波圧は $p_mH/3$ となる。なお，静水圧として，静水面およびそれ以下に $H/2$ が加わる。

（3） 傾斜壁面，曲壁面に作用する波力 壁面が急斜面，曲面をなす場合に作用する波力についても，Miche, Gourret などの研究があるが，その解法は複雑を極め，疑問の点が少なくない。

（4） 捨石斜面の石塊，ブロックに作用する波力

米国では捨石堤が好んで用いられ，多くの実験が行われているが，波の現象を無視して斜面上の石塊の安定を論じたものが多く，公式として代表的なものは Iribarren (1940) のものである。

W＝斜面上の石塊，ブロックの重量 (kg)
H＝波高 (m)，ρ_r＝石塊，ブロックの比重，
ρ_w＝海水の比重，θ＝捨石斜面が水平となす角，
ϕ, μ＝石塊，ブロックの息角および摩擦係数，
T＝波の週期，L＝波長，d＝水深，k＝係数.

1. Castro (1933) の公式.

$$W=\frac{704\rho_rH^3}{(\cot\theta+1)^2(\rho_r-1)^3\sqrt{\cot\theta-2/\rho_r}}$$

2. Iribarren (1940) の公式.

$$W=k\rho_rH^3/\{(\rho_r-1)^3(\cos\theta-\sin\theta)^3\}$$

k の値は Iribarren によれば，天然石 $k=15$，人工ブロック $k=19$，同じく Abecasis によれば，それぞれ 23，29 である。

石塊，ブロックが水深 d の水中にある場合には，上式の H の代りにつぎの H' を用いる。

$$H'=\frac{\pi H^2}{L}\Big/\sinh^2\frac{2\pi d}{L}.$$

斜面では水深 d が浅くなるにつれて波高 H が増大し，斜面法尻水深 d_0 における波高 H_0 との関係は，

$$H=H_0\sqrt{\frac{\coth\frac{2\pi d}{L}}{\coth\frac{2\pi d_0}{L_0}}}\sqrt{\frac{1+\left(\frac{4\pi d_0}{L_0}\right)\Big/\sinh\left(\frac{4\pi d_0}{L_0}\right)}{1+\left(\frac{4\pi d}{L}\right)\Big/\sinh\left(\frac{4\pi d}{L}\right)}}$$

砕波となる限界 $H_0/2=d$ に対しては $\theta=(8/T)\times\sqrt{H/2g}$，また全部が砕けずに，1部分が反射する場合をとれば，$H_0=gT^2H^2/16$ となる。

3. Hudson (1951) の公式．これは Iribarren の公式を修正したものである。水中の斜面上の石塊に作用する重力は $(\rho_r-\rho_w)W/\rho_r$ であり，斜面に沿つた重力成分と摩擦力とから，波力に対する抵抗力は

$$(\rho_r-\rho_w)(\mu\cos\theta-\sin\theta)W/\rho_r$$

となる。一方，石塊の断面積は $(W/\rho_r)^{2/3}$ に比例し，波力は $\rho_w(W/\rho_r)^{2/3}v^2$ に比例する。従つて砕け波に対して $v=\sqrt{gd}=\sqrt{gH/2}$ とすれば，

$$(\rho_r-\rho_w)(\mu\cos\theta-\sin\theta)W/\rho_r=k\rho_w(W/\rho_r)^{2/3}\cdot H,$$

$$\therefore\quad W=\frac{k\rho_r\rho_w{}^3\mu^3H^3}{(\rho_r-\rho_w)^3(\mu\cos\theta-\sin\theta)^3}.$$

4. Epstein-Tyrrell (1949) の公式．

$$W=\frac{k\rho_r\rho_w{}^2\cos^3\theta H^3}{(\rho_r-\rho_w)^3(\mu\cos\theta-\sin\theta)^3}=\frac{k\rho_rH^3}{(\rho_r-1)^3(1-\tan\theta)^3}$$

5. Mathews (1948) の公式．

$$W=\frac{6\rho_rTH^2}{(\rho_r-64)^3(\cos\theta-0.75\sin\theta)^2}.$$

たゞし，ρ_r は石の単位重量 (lbs/ft^3) とする。

6. Rodolf の公式．

$$W=\frac{\rho_rTH^2}{600\tan^3(45^\circ-\theta/2)(\rho_r-1)^3}.$$

7. Kaplan (1952) の公式．

$$\sqrt{\sin(\phi-\theta)}=(NH/W^{\frac{1}{3}}T)\cosh\frac{2\pi}{L}(d-y)\Big/\sinh\frac{2\pi d}{L}.$$

こゝに，d は斜面法尻水深，y は石塊の水深であつて，

$$N=k(\rho_wW^{1/3}/g)^{1/2}\rho_r{}^{-1/3}\doteqdot1.15\ (\text{実測値}).$$

8. Larras (1952)の公式．重力による石塊の安定力は $(\rho_r-1)W/\rho_r$，波力は $(W/\rho_r)^{2/3}\cdot H$ に比例するから，捨石斜面の安定勾配 θ は，

$$\sin(45^\circ-\theta)=0.175\frac{\rho_r{}^{1/3}H}{W^{1/3}(\rho_r-1)}\frac{4\pi d/L}{\sinh(4\pi d/L)}$$

$d\geqq H/2$ として，上式を変形すると，

$$W=K\frac{\rho_r}{(\rho_r-1)^3(\cos\alpha-\sin\alpha)^3}\times\frac{\pi^3H^6}{L^3\sinh^3(4\pi d/L)}$$

となり，Iribarren の公式において，水中にある石塊に作用する波力とほとんど一致している。

9. その他

$$W=8.1\left(\frac{1+\cos\theta+\sin\theta}{1+\cos\theta-\sin\theta}\right)^3\frac{\rho_rTH^2}{\rho_r-1}.$$

(5) **波の水底洗堀力** 防波堤脚部における波の水底洗堀力についても多くの研究がなされている。

3．特種防波堤

普通の直立壁をもつた防波堤や捨石防波堤のほかにも様々の考案が試みられているが，巨大な波力に対して構造物を保持することの困難さと管理維持費を多額に要すること，防波効果が確実でないことなどから，実用の域に達したものがない。

たゞ特種の目的から潜防波堤と浮防波堤（ポンツーン防波堤）とを用いることがあり，また海岸浸食防止のために沿岸防波堤を造ることもある。このような特種の防波堤が考慮せられるのは，1. 工事などのための臨時応急の仮設防波堤，2. 軍事目的などで急速設置及び移動を要する場合，3. 台風時の港口閉塞などのために急設，除却の自在を要する場合，4. 浸食防止などのために防波程度の低くてよい場合，などである。

防波作用を考察するには，波の現象に応じて波の反射，散乱，屈折，干渉，エネルギーの消費などが応用されるが，それらの関係を具体的に述べるとつぎのようである。

1. 波の反射現象に応じて壁面反射が用いられるが，これは防波堤の主要原理であつて，直立壁防波堤は全面的にこの原理に立脚したものである。しかし反射を用いるときには，必ず波力の問題が従属してくる。

2. 不整面壁や杭群，群氷によつて，波が乱反射，散乱を受けると，防波性を生ずる。

3. 海底地形による水深変化があれば波の屈折が起り，海底溝なども防波性をもつている。また波は前進方向を横切つて流れる強い沿岸流によつても屈折を受け，その波高も変化する。

4. 前進方向や位相の異なつた二つ以上の波が出会うと干渉を起し，適当の条件を満足すると，干渉波の波高を減ずることができる。また波が局部的な流れに出会つたときも，流れとの干渉と攪乱とによつて，防波性が現れることがある。

5. 波の乱れや海底摩擦によつても波のエネルギーが消費されるが，波が砕けることによつて波のエネルギーは完全に消費される。捨石防波堤はこの原理によつているが，砕波する瞬間に巨大な波力を発生する。

（1） **異型防波堤** 普通の直立堤や斜面防波堤のような重力式のものにも，それに仂く波力を軽減するための考察を加えたものがある。例えば，斜面を階段状にし波力を分割して順次作用せしめてその合力を減少せしめたり，また防波堤の線形を連続アーチ型にし波力の作用範囲に時間的ずれを持たせて合力を軽減し，あわせて乱反射の干渉効果をねらつたものなどがある。

（2） **応急仮設防波堤** ケーソンや船防波堤を所定位置に曳航し，満水して沈設したもので，排水すれば浮き上つて撤去することができる。軍事目的や仮設移動を要する工事などに用いられる。鋼矢板を水底に打ち込んだものでは，防波効果は非常によく，その弾性振動による波の透過率は1%以下にとまるが，波力に対する抵抗性に問題がある。

（3） **潜堤防波堤** 天端が静水面以下にあるもので，防波性が不十分なために一般に用いられないが，波による海岸浸食防止のために海岸に平行に設けることがある。大潮差のところでは不適当である。潜堤としては鋼矢板，捨石積，蛇籠などが用いられるが，なるべく透過堤にするのがよい。潜堤の防波作用には二つあり，天端が静水面より比較的深いときには砕波とならずに反射効果が発揮されるが，その防波性は低くかなりの透過波がある。しかし短波長の波には相当の効果があつて，透過波は平らになり峻度が減じている。他の一つは天端が静水面に近いときで，波が潜堤のところで砕けるためである。防波効果はこの方がよいが，巨大な波力を受けて維持が困難である。

潜堤が海岸に平行なときは，それを越して波の質量輸送がある関係上，沿岸流を発生して漂砂を起すことがあるから，注意が必要である。

潜堤については，米国の海浜浸食局の模型実験や，Johnson, Morison, Dean, Hein, 新潟県などの研究があるが， Johnson, Fucks 及び Morison が単位時間のエネルギー伝達を不変として求めた関係は，つぎのようである。

潜堤の巾が無視される場合には；

$$\left[\frac{H_i}{H_s}\right]_d=\sqrt{1-\left(\sinh\frac{4\pi h}{L}\cdot f(h)\right)\Big/\left(\sinh\frac{4\pi d}{L}\cdot f(d)\right)},$$

ただし． $f(h)=\frac{1}{2}\left(1+\frac{4\pi h}{L}\Big/\sinh\frac{4\pi h}{L}\right),$

$$f(d)=\frac{1}{2}\left(1+\frac{4\pi d}{L}\Big/\sinh\frac{4\pi d}{L}\right).$$

潜堤の巾が大きい場合には；

$$C_a=\frac{gT}{2\pi}\tanh\frac{2\pi d}{L},\quad \left[\frac{H_i}{H_s}\right]_a=\sqrt{\frac{C_a f(d)}{C_a f(a)}}\left[\frac{H_i}{H_s}\right]_d$$

ここに，a は潜堤天端の静水面からの水深，d は水深，$h=d-a$ は潜堤の高さ，H_s は沖波の波高，H_i は潜堤を越した透過波の波高，L_s は沖波の波長，L は波長，T は周期，C は波速である。また $C_a, f(a)$ はそれぞれ $C_a, f(d)$ にて d の代りに a を用いたものであり，$[H_i/H_s]_a$ は天端上の値を示す。

浅海波 $2\pi d/L\ll1$ の場合には，

$$[H_i/H_s]_d\fallingdotseq\sqrt{1-h/d},\quad [H_i/H_s]_a\fallingdotseq\sqrt[4]{1-h/d}.$$

深海波 $2\pi d/L\gg1$ の場合には

$$\left[\frac{H_i}{H_s}\right]_d\fallingdotseq\sqrt{1-4e^{-4\pi d/L}\sinh\frac{2\pi h}{L}\cdot f(h)}$$

となり，潜堤天端の水深が大きい場合には近似的に $\sqrt{1-e^{-4\pi a/L}}$ となる。

新潟県の報告では，

$$\left[\frac{H_i}{H_s}\right]=\sqrt{\left(\sinh\frac{2\pi d}{L}\cosh\frac{2\pi d}{L}\sim\sinh\frac{2\pi h}{L}\times\cosh\frac{2\pi h}{L}\right)\Big/\left(\sinh\frac{2\pi d}{L}\cosh\frac{2\pi d}{L}+\frac{2\pi d}{L}\right)}.$$

これらには反射波が考えてないので不完全である。Carr は反射波の波高を H_r, エネルギーの保存則より $H_i^2=H_r^2+H_s^2$ とし，波の水粒子の速度の水平成分が潜堤の前後で連続として質量の連続式より求めることを提唱している。しかし潜堤ではエネルギーの保存則よりむしろ運動量の保存則によるべきものと思われる。

（4） **浮防波堤** 海面に船体，ポンツーンなどの浮体を浮かして波を反射せしめるもので，将来の発展の余地がある。浮防波堤の長所としては，1. 材料の節約 2. 基礎に無関係であること，3. 沿岸流や漂砂に影響しないこと，4. 堤脚部が浸食されないこと，5. 潮差に関係がないこと，6. 移動運搬ができること，などがあげられるが，防波性，波力に対する抵抗性，ローリング，ピッチング，上下振動などによる応力と二次的波の発生，所定位置への碇着方法などに難点がある。特に大波力に対しては，碇着方法が問題である。

この防波堤は才二次大戦中に軍事目的から研究せられ，鋼製十字形断面のポンツーンが考案されたが，上下振動やローリングを減じ，海面浮遊状態におけるローリング，ピッチング，上下振動の自己振動周期を長くして，波と共振しないようにする必要がある。防波性は良好であつて，透過波高を50%に減ずることに成

功している（例， Bombardon）。台風時に港内を静穏にするために，港口の一時的閉塞をするのに利用できるようである。

浮防波堤については，Carr, Lochner などの研究があり，波の作用に関しては造船方面にも研究が少なくない。H_i, H_t をそれぞれ入射及び透過波高，d を水深，w を海水の単位重量，W を浮体の単位長当りの重量，T を波の周期，L を波長とし，S を浮体の上下振動の自己周期，K を浮体の碇着状態による弾性係数（自由浮体では $K=0$）とすれば，Carr の研究によつて，

$$S=2\pi\Big/\sqrt{gK/W},$$

$$H_t/H_i=1\Big/\sqrt{1+(T^2/S^2-1)^2(\pi W/wLd)^2}.$$

また浮体に作用する波力F 及び反射波高 H_r は，

$$F=wdH_r/\{1-(S/T)^2\},\quad H_r=\sqrt{H_i^2-H_t^2}$$

となる。浮体の振動に基づく二次的波については，John などの研究がある。

（5） **浮遊物防波帯** 群氷のような多量の浮遊物が密在する海面地帯を波が通過すると，波の乱反射による散乱，浮遊物の乱振動によるエネルギーの消費などによつて，防波性が現われる。Shapiro, Simpson, Peters, Weitz, Keller 及び Goldstein などは，波に対する群氷の作用を研究して波高の減衰を明らかにしている。実用上では波に対し浮遊物を所定位置に碇着することに難点がある。

（6） **群杭防波帯** 海中にレール，コンクリートポール，木杭などを数列に打ち列べた杭群によつて，波を乱反射，乱回折せしめて防波性をうる方法であつて，実施しやすく，海岸浸食防止などに応用せられる。Costello (1951) の実験的研究もあるが，杭の半径を r，杭の間隔を b，杭列からの距離を D，波長を L として，田中が計算したところによると，1杭列を波が通過したときの波高減衰率は

$$\mu_D=k\gamma^2/(b\sqrt{DL}),\quad \text{たゞし}\ k:\text{係数}$$

であり，同じく L 行の杭列の場合は，

$$\mu_L\fallingdotseq 1-(1-\mu_l)^{L-1}(1-\mu_D)$$

となる。こゝに，μ_l は上の μ_D の関係式で D の代りに杭の列間隔 l を用いたものである。

杭に仂く波力については，Mason (1952), Munk, Morison, O'Brien, Johnson, Schaaf など多くの研究がある。

（7） **空気防波堤** Philip Brasher (1907) の特許に始まり，G. I. Taylor (1943) の理論があるが，栗原博士の報告にゆずることにする。

（8） **防波膜** 表面張力で波を減衰せしめる方法で，従来から船舶で油を流して波を静める効果が述べられている。Keulegan, Dorn は粉石けんを水面にまくと防波効果があるというが，実用性に乏しい。

（9） **流れ帯の防波性** 波が向い流れやある角度をなした流れに出会うと，その波長や峻度が変化する。流れ帯の境の不連続面における波の入射角を α，屈折角を β とし，流れの速度を U，流れ帯の外側の波長，波速，波高を L_0, C_0, H_0，同じく流れ帯内のものを L, C, H としたとき，Johnson (1947) の与えた関係は，

$$\sin\beta=\sin\alpha/(1-U\sin\alpha/C_0)^2,$$

$$\frac{H}{H_0}=\frac{L}{L_0}\sqrt{\frac{\cos\alpha(1-U/C_0\sin\alpha)^6}{\cos\beta(1+U/C_0\sin\alpha)}}$$

である。流れが 3〜4 m/sec の速度になると防波性が現われ，波速の ¼ に達すると砕波して，波のエネルギーが消費される。

Carr (1950) は流れ帯の内外の波の群速度を C_g, C_{g0} とし，水深 d のところで，浅海波に対しつぎの関係を導いている。

$$\frac{L}{L_0}=\frac{\sqrt{gd}}{C_0}\sqrt{\tanh\frac{2\pi d}{L}\Big/\frac{2\pi d}{L}}+\frac{U}{C_0},$$

$$(H/L)/(H_0/L_0)=\sqrt{C_{g0}/C_g}\cdot L_0/L.$$

流れの速度が増すとその流れ帯を波が横切れないようになつて，完全な防波性が現れるが，その限度は $U=-C_g$，すなわち流れの速度が群速度に等しくなつたときであつて，その実現は困難である。

Yi-Yuan Yu (1952) は流れが波の方向 ($U>0$) または反対の方向 ($U<0$) になつたときの関係を，

$$m=\sqrt{1+4\frac{U}{C_0}},\quad \frac{L}{L_0}=\left(\frac{1+m}{2}\right)^2,\quad \frac{H}{H_0}=\sqrt{\frac{2}{m(1+m)}}$$

とし，波が反対方向の流れに出会つて砕波となるのは，$-C_0/U$ が 4〜7 の間であるといつている。

海の表層だけに流れがあつたり，中間層だけに流れがあつたりすると，波は破壊的な干渉を受け，波動機構が乱されて減衰する。また局部的な上昇流や下降流に出会つても，同様にして減衰する。前述の空気防波堤も，この原理によるものである。速度の大きな流れ帯の防波への応用は実用的に困難がある。

（10） **波の干渉による防波性** 波高が H である同じ波を位相を ϕ だけ差をつけて干渉せしめれば合成波の波高は $(H/2)\sqrt{2(1+\cos\phi)}$ となり，もし $\phi=180°$，すなわち半波長の位相差をもたせば，干渉の結果波高が減少して防波性が現れる。波を長さの異なる2水道を通して導き干渉させればよいが，各波で波長も異なり，もし失敗すればかえつて悪い結果となり，その実

用性は少ない。

(11) **海底地形による防波性**　海底地形によつて水深が変化すれば，波速，波高が変化し，等深線に斜入射すれば波の屈折が起りレンズのような現象が見られる。水深 d_0 から d に変わる等深線への入射角を α 屈折角を β，水深 d_0，d の波速を C_0，C とすれば，

$$\sin\beta/C=\sin\alpha/C_0$$

であり，波の峯線に直交線群を引いたときに，2直交線の間隔が発散すれば，波高の減少が起る。この原理より波底に凸レンズ状の浚渫溝または凹レンズ状の人工浅瀬を設ければ防波性を生じ，特に凸レンズ状溝が有効である。これについては田中が論じたことがあり，実験では比較的水深が浅く，地形の規模が半波長より大きい場合にのみその効果が見られる。

波の屈折による波高変化は，水深 d_0 および d のところでそれぞれ波高 H_0，H，群速度 C_{g0}，C_g，直交線間隔 b_0，b とすれば，

$$H/H_0=\sqrt{b_0/b}\sqrt{C_{g0}/C_g}$$

によつて与えられる。

海底の水深が急激に変化して段状に深くなる場合，その水深不連続線において入射角 α が臨界角 α_0 ($\sin\alpha_0=C/C_0$) より小さくなれば，波は全反射してその水深不連続線を通ることができないので防波性が現れる。これについて Isaacs, Williams 及び Eckert (1951) が研究している。田中も実験を試みたが，全反射の実現は困難であつた。

以上簡単ながら各種の防波方法の考案を列挙したが，有望なのは浮防波堤のみで，特殊の目的，例えば海岸浸食対策には潜堤，防波杭群なども用いられようが，多くの考案は防波性能の不確実，維持の困難，経費の多額によつて，その実用性はほとんどない。

（頁数が多くなつたため説明のための図表と文献とを省略したことを了承せられたい。）