

第三章 波浪

第一節 波浪一般

波の理論 水面は、風の衝撃と吸揚とに依つて 波 (Wave) を起す。

一般的の波浪である深海に起る波の形狀は、トロコイド曲線(Trochoidal curve)である。即ち水の各分子は、何れも 圓周運動 をなしつゝあつて、之が綜合し遂に表面に波形を表はすのである(次頁の圖参照)。

されば波の形は、傳播進行するが、其の内部の水は、前進せずして、一所に停滞回転しつゝあるを以て原則とする。

深海に於ける、波長と速度と時間との關係は、次の諸式に依つて表はさる。但し是等の式が、築港に於てそのまま應用せらるゝことは、稀である。

$$L = \frac{g}{2\pi} T^2 = 1.56 T^2 \quad \dots \dots \dots \quad (1)$$

$$T = \frac{2\pi}{q} V = 0.64V \quad \dots \dots \dots \quad (2)$$

記號 L 波長、単位は 米

T 一つの波の進む時間、即ち波の周期、単位は 秒

V 波の速度、単位は 米秒

g 重力の加速度 (9.81 米秒秒)

π 圓周率 (3.14)

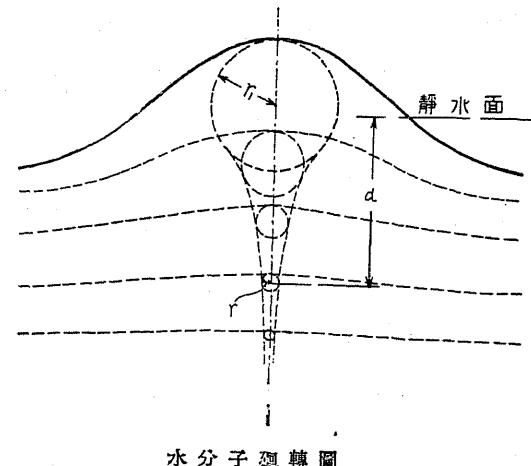
此場合に於て、水分子が迴轉する圓周軌道の半径、即ち分子軌道(Orbit)の半径は、水面に於て最も大きく、深くなるに従て小さくなる、其の關係式を示せば

記号 r 任意の水深に於ける、分子軌道の半径

r_1 水面に於ける、分子軌道の半径（波高の半分に當る）

d 任意の水深（静水面より起算す）

e 自然対數底数（2.718）



水分子廻轉圖

更に又水分子の廻轉速度の、波長並に分子軌道の半径等の關係は、次式の如くなる。

$$v = r \sqrt{\frac{2\pi g}{L}} = 7.85 r \sqrt{\frac{1}{L}} \quad \dots \dots \dots (5)$$

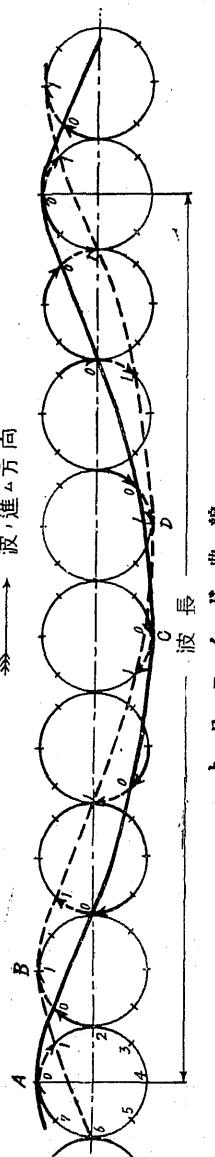
$$v_1 = r_1 \sqrt{\frac{2\pi g}{L}} = h \sqrt{\frac{\pi g}{2L}} = 3.92 h \sqrt{\frac{1}{L}} \quad \dots \dots \dots (6)$$

記号 v 任意の水深に於ける、水分子廻轉の速度

v_1 水面に於ける、水分子廻轉の速度

h 波高

以上の諸式は、深海部に於ける、一般的の波浪に關するものであつたが、淺海部に於ては、之と多少その



趣を異にする、茲に謂ふ深海部とは、水深が波長の約半分以上の所を指すのである。

〔例題 1〕 周期 9 秒なる時の、波長と波の速度とを算出せよ。

$$L = 1.56 T^2 = 1.56 \times 9^2 = 126 \text{ m} \quad \dots \dots \dots \text{波長}$$

$T = 0.64 V$ 故に

$$V = T \div 0.64 = 9 \div 0.64 = 14. \text{ m/sec} \quad \dots \dots \dots \text{速度}$$

或は V は $(L \div T)$ に依つても算出し得る。

〔例題 2〕 波高 8 m、波長 160 m、なる時、海面より 20 m の所に於ける、水分子廻轉の轨道半径と速度とを算出せよ。（但し築港に於て、實際如斯き計算を行ふことは少いから、唯だ参考に記すに過ぎない。）

(4) 式を用ひて、所要の半径 r を求め、又其の r を (5) 式に代入して、所要の速度 v を求む。

$$r = r_1 e^{-\frac{2\pi d}{L}} = \frac{8}{2} e^{-\frac{2 \times 3.14 \times 20}{160}} = 4 e^{-0.785} = 4 \times 0.456 = 1.82 \text{ m}$$

$$v = 7.85 r \sqrt{\frac{1}{L}} = 7.85 \times 1.82 \sqrt{\frac{1}{160}} = 1.11 \text{ m/sec}$$

但し上記計算の中 $e^{-0.785}$ はハイパボリック函数表、例へば朴桂一博士著のもの等を見れば、直に之を知る事が出来る。又 e は 2.718 であるから、之より直接算出してもよい。

淺海部の波浪 淺海部は、水深が波長の半分以下の所であつて、其所に起る波の水分子軌道は、多少水底の摩擦の影響を受けて、橢圓形となる、従て前掲の諸式は次の如くなる。但し是等の式も亦築港に應用せらるべきことは、稀であるが唯だ参考迄に掲げるに過ぎない。

$$L = \frac{g}{2\pi} \frac{b_1}{a_1} T^2 = 1.56 \frac{b_1}{a_1} T^2 = 0.78 \frac{h}{a_1} T^2 \quad \dots \dots \dots (7)$$

$$T = \frac{2\pi}{g} \frac{a_1}{b_1} V = 0.64 \frac{a_1}{b_1} V = 1.28 \frac{a_1}{h} V \quad \dots \dots \dots (8)$$

$$V = \sqrt{\frac{g}{2\pi} \frac{b_1}{a_1} L} = 1.25 \sqrt{\frac{b_1}{a_1} L} = 0.88 \sqrt{\frac{h}{a_1} L} \quad \dots \dots \dots (9)$$

$$v = \sqrt{\frac{2\pi gab}{L}} = 7.85 \sqrt{\frac{ab}{L}} \quad \dots \dots \dots (10)$$

〔註〕 昭和4年9月30日伏木港に於て、沖合の普通波と防波堤近くの碎波との波高を調査した所に依れば、普通波3.9mに対し、碎波は7mであつて、從て H と h の比は1.8に相當する。

進行波 (Translatory wave) 既述の普通波と異なつて、水分子が漸次移動し、多少の流速を有する波であつて、此進行性を帶びるに至つた原因は、水底の摩擦、障害物、風等に依つて下部の水より、上部の水が次第に前進するが爲である。

〔註〕 進行波に對して普通の波浪を 振動波 (Oscillatory wave) と言ふこともある。

水底の摩擦に依て起る進行波を、遷波と名付け、風力の存續に依て起るものと、掘波 (Forced wave) と呼ぶ。

波を打つ風力が益々加ふれば、波頭を吹き碎いて、海上に 白波 の躍るを見る。

餘波 (Swell) 直接風に吹かれて起る波でなく、他所に起つた波動を傳へ来る波を、餘波又はウネリと稱する。

例へば、風無きに襲ひ来る巨浪、或は風向と反対の方向より寄せ来る波、等は何れも此餘波に屬する。

餘波の特長は、普通の風浪に比して、其の波長が著しく大なることである。

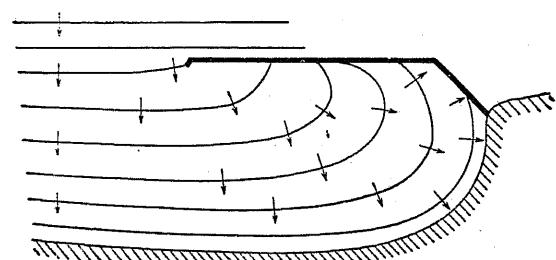
〔註〕 太平洋沿岸の本邦港灣に於ては、低氣壓の通過の前日頃より、既に餘波の襲來あるを例とする。又一般に暴風の通過後にも多少の餘波が殘る。

尚ほ夏期の 土用波 も亦餘波の一例である。

侵入波 (Send) 即ち

フレコミ、と稱する
は、外波が港口或は灣
口より内部に深く侵入
し来るものを言ふ。

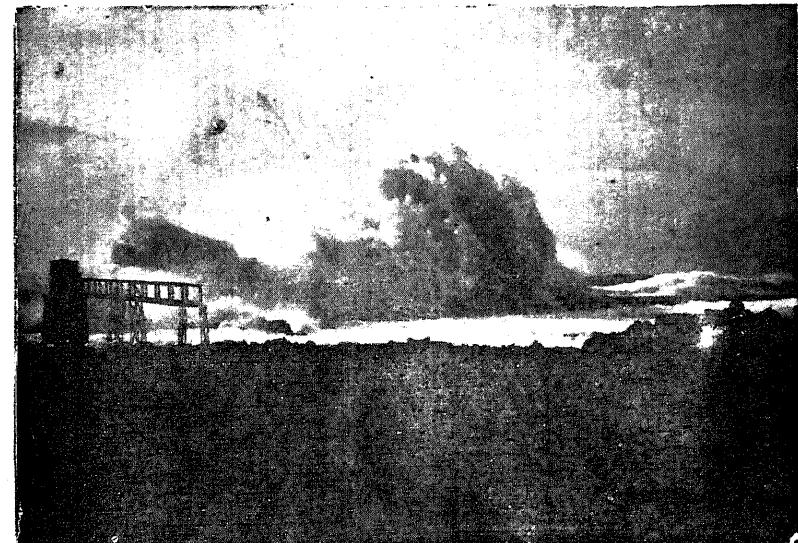
廻浪 (Wheeling) と
は岬又は防波堤の突端
より廻り来る波であ



廻浪の一例

る(圖参照)。

跳波 (Spray) 波浪が構造物にぶつかつて、水煙を高く跳ね上げるものを、スプレー或ひは 跳波と呼ぶ。



留萌港防波堤の大跳波

反射波 波浪が構造物に當り、其の返し波に依て、異形の波を現はすことがある、之を反射波と言ふ。

構造物が波向に直面するならば、其の反射波の斷面は、サイクロイド曲線 (Cycloidal curve) に近くなる。

構造物と波向とが、或る角度を以て衝突する場合には、所謂 三角波を生ずる。

〔註〕 反射波の起つてゐる海面を一般に Chopping sea と言ふ。

第二節 波 高

波高一般 大洋に於ける波高の最大なるものに就ては、航海者の觀測に依つて、18mに達することを知る、然し之は波が重複して特に高くなつた場合であつて、

本邦港灣最高波高表

港名	観測の最高記録		
	波高	波向	年月日
青森	1.8 m	北	明 41—1—28
名古屋	1.8	南々東	大 1—9—23
四日市	2.4	南々東	大 1—9—23
高雄	6.1	南 西	大 7—6—30
伊東	3.0	東	大 7—9—24
留萌	7.6	北 西	大 9—12—10
大連	3.0	東北東	大 10—8—
銚子	5.5	北 東	大 11—2—19
八戸(鰯)	6.1	北々東	大 15—12—21
敦賀	2.0	北	昭 2—12—24
網走	7.5	北 東	昭 3—1—4
今治	2.1	北 東	昭 3—8—17
境川	1.4	西南西	昭 3—8—30
室津	7.3	南々西	昭 3—11—29
酒田	6.0	北 西	昭 4—1—2
江角	8.8	西南西	昭 4—2—12
小松島	2.5	東北東	昭 4—8—15

單形の普通波にて 15 m 以上に及ぶものは稀である。

次に築港技術に必要なる 海岸近くに押し寄する波の高さは、大洋中の最高波より勿論小さい。

我國の港灣に於て觀測せる波高の最大は、江角港(島根縣)の 8.8 m である。

又留萌、網走、室津にては 7.5 m 前後、酒田、八戸(鰯)等にては、6 m の巨浪を見た。

然し四日市、小松島の如き灣内の港にあつては、最高約 2.5 m、更に内海に入

第二節 波高

つては 2 m 以下に過ぎない。尙ほ詳細は別表を見られたい。

但し、比較的短期間の觀測による是等の最高波が、必ずしも其の港に起り得る絶対の最高波でない事は、言ふ迄でもない。

從て防波堤等の設計に用ひる最高波は、安全の爲め上記の觀測波高より、更に一層大なるものと假定する。

本邦港灣に於ける 設計用 の最高波に就て、之が大略の標準は、次の如きものと思ふ。

I 外海に面する港………6~10 m

II 外海に近き灣内の港……4~6 m

III 内海及び湾内の港………2~4 m

勿論この標準は、大略の見當を示したに過ぎなくて、實際に或る地點に於ける、設計用の最高波を推定するには、後に述ぶる 對岸距離、海底の水深、其の他の環境條件を考慮して定むるのである。而して海岸に押し寄する波高の大小に影響ある諸種の 原因 を列記すれば次の如くである。

1. 對岸距離の大小
2. 波の狭窄と散布
3. 波の轉向と散布
4. 海底の深淺
5. 海中の障害物
6. 風の強弱

以上の諸原因と波高との關係に就て、詳しき説明は、以下順次之を述べる。

對岸距離と波高 ここに對岸距離 卽ち フエツチ (Fetch) とは、向岸に至るまでの海上の距離を言ふのであつて、例へば大阪港に於て、西南西のフエツチは、次頁の圖に示すが如く、淡路島に至る約 29 浬を指す。

此フエツチの長短は、波高の大小に至大の關係を持つ。そして其の關係はステ

$$\frac{h'}{h} = \sqrt{\frac{b}{B}} - 0.027 \left(1 + \sqrt{\frac{b}{B}}\right) \sqrt[4]{\delta} \quad \dots\dots\dots(15)$$

記號 *h* 港外の波高

h' 港口より δ だけ離れた所の波高

b 港口の幅員

B 港口より δ だけ離れた所に於ける、港内の擴大幅員

δ 港口よりの任意の距離

此公式は、多少不充分の點もあるが、然し他に是以上の式がないから、港内波高の計算には、屢々應用せらるゝ。

〔例題10〕 和蘭のエムイデン港 (Ymuiden) に於て、港外の波高 4 m の時、港口より 1,200 m 内に入れる所に生ずる港内波浪の高 (h') を計算せよ。

但し此港の港口幅員は 250 m、又 1,200 m 内の港内擴大の幅員は 1,180 m である。

(15)式に依つて計算すれば、次に示すが如く、所要波高は 0.9 m となる。

$$\frac{h'}{h} = \sqrt{\frac{b}{B}} - 0.027 \left(1 + \sqrt{\frac{b}{B}}\right) \sqrt{\epsilon}$$

$$h' = h\sqrt{\frac{b}{B}} - 0.027h \left(1 + \sqrt{\frac{b}{B}}\right) \sqrt{\delta}$$

$$= 4 \times \sqrt{\frac{250}{1180}} - 0.027 \times 4 \left(1 + \sqrt{\frac{250}{1180}}\right) \sqrt[4]{1200} = 0.9 \text{ m}$$

波の轉向と散布 岬或は防波堤等の突端よりの廻浪は、本來の波が進行する方向から、別に轉向し來るものであるが爲め、波勢は漸次散布せられて、其の波高を低減する。

そして、其の轉向 (Wheeling) の角度が大なる所ほど減少率が多く、從て靜穏であるは言ふ迄でもない。其の關係に就て廣井博士の貴重なる實驗の結果は、次の如くであつた。

記号 τ は廻浪の高、 h は本來の波高、 θ は廻轉の角度

海底の深淺 嘗て述べた如く、普通の波形を持續し得る範囲は、海底の水深が波高より大となる場合に限らる、従て(12)式に示すが如く、波高は、海の水深より大きくなり得ない。

例題8と9とに記した如く例へ、フェツチが如何に長大であつても、水深以上の波高を生ぜざるものとして、其の水深の數値を以て、此地點の最大波高と推定する場合が屢々ある。

〔註〕 銚子港に於て観測に依る、最大波高は前に記すが如く 5.5m であつたが、防波堤設計用の最大波高は、海底水深である 10.6m と假定せられた、即ち此場合は $h=D$ である。

海中の障害物 防波堤或は露礁の如く、波浪を殆ど遮断するものゝ効果は言ふ迄でもない、其の他水面以下に没してゐる暗礁や砂洲の如き、障害物の効果も亦著しきものがある。即ち後者に於て、越波は多少あつても、波浪の下部のカイネチック・エネルギーが消滅する爲め、大に波高を減少せしむる。

例へば久慈港(茨城縣)の泊地の比較的安全なるは、沖にあたつて一文字形に横はる長大なる暗礁の爲めである。

〔註〕 露礁、暗礁等の海中の岩礁(Reef)は俗に磯(いそ)或は、磐(はん)と稱する。

風の強弱 が波高の大小に影響するは勿論である、そして海洋上に於て此關係の概略を表はした公式に、次の如きものがある。

但し、 h は波高を米にて表はし、 S は風速を、米/秒にて表はす。

風と波との関係式は、總ての場合に適用できない、即ち既述のフェッチ、水深、其の他の影響に負ふものが多いから、單に風速のみにて波高を決定することは、困難である。

次に風の吹く持続時間が長ければ、波高が次第に高くなるは言ふ迄でもない。

[註] (17)式の外にも種々なる公式がある。即ち

$$\text{廣井式} \quad h = S^2 : 100$$

$$\text{White 式} \quad h = \frac{3}{4} S^{\frac{2}{3}}$$

〔註〕 風速と波速 風速と波高との関係を記したついでに、波速との關係式等を附記する。

$$\text{ホワイト式} \quad V = 6.9 S^{\frac{1}{4}}$$

$$\text{其 他} \quad V = 11.6 S$$

記號 V は波の速度、 S は風速、その単位は何れも 米/秒 である。

以上の記事に依つて、波高の大小に影響を及ぼす諸原因を大凡知つた。更に波高と波長、波高と静水面等の関係を述べ、尙ほ波高観測の方法、及び實際の波高等を以下順次に記す。

波高と波長 普通 港灣附近に起る波浪に於て、波長(L)と波高(h)との比例は 20 倍前後のものが多い。即ち

$$\frac{L}{h} = 20$$

但し之は極めて大略の値であつて、實際は、15 倍以下に下り、或は反対に 30 倍以上に及ぶものがあつて、必ずしも一様でない。

〔註〕 此波高と波長との比率の長短は、次に列記せる諸種の事情に依つて、差異を生ずるものである。

- (イ) 暴風時には、此比率一般に小さく、弱風になるに従つて大きくなる。
- (ロ) 海岸近くに於て、水底が急に淺くなる所にて、此比率は小さくなる。
- (ハ) 波長大なる波に於て、此比率は大である。
- (二) 餘波に於ては、此比率が著しく大である。

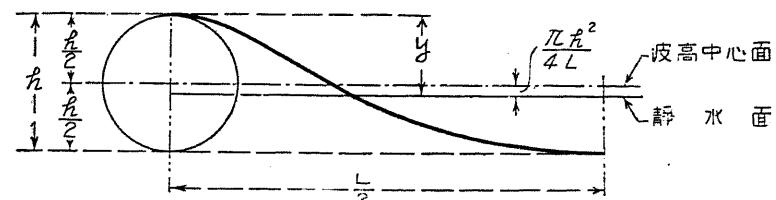
〔註〕 餘波の性質を帶びた波浪の波長は、時に 300~600 m に及ぶが、直接風に依つて起る波の波長が 180 m 以上になることは稀である。

〔註〕 本邦にて波長観測の實例は、留萌港に於て大正 9 年 12 月 4 日の暴風時に起つた大波である、其の波長は 106 m、波高は 7.6 m、即ち波長は波高の 14 倍であつた。

波長観測の方法は、後述の波高観測に於けるが如き、竹竿を波向の直線上に幾本も立て、之を目標として、其の波長を測定するのである。

又船舶の長さと比較して、測定することもある。

波高と静水面 こゝに静水面とは、波が鎮まつたと、假定せる時に当る水面である、換言すれば、其の平面より上の山の水積と、其の平面より下の谷の空積と等しき場合である。



静水面の位置

静水面は圓に示すが如く、波高の中心面より

$$\frac{\pi h^2}{4L} \text{ 即ち } 0.785 \frac{h^2}{L}$$

だけ低い、今山の頂より静水面までを y とし、之と波高 h との関係を式に表はせば、次の如くであるは言ふ迄でもない。

$$h = 2 \left(y - \frac{\pi h^2}{4L} \right) \quad (18)$$

然し實際に於ては、近似數を取つて、次式の如き簡略のものを用ひる、此式は後に述ぶる、波高観測の時に屢々應用せらるゝ。

$$h = 1.8 y \quad (19)$$

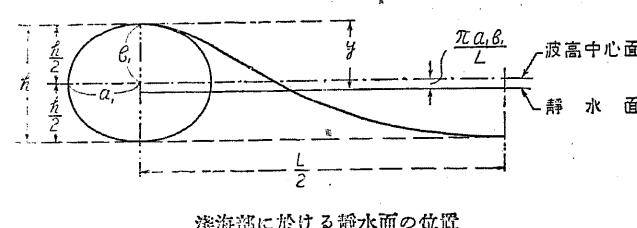
〔註〕 濱海部に於て、水分子の運動軌道が橢圓なりと假定すれば、静水面と中心面との差は $\frac{\pi a_1 b_1}{L}$

であつて (18) 式は次の如くなる。但し $a_1 b_1$ は當て濱海部の波浪の所にて説明した。

$$h = 2 \left(y - \frac{\pi a_1 b_1}{L} \right)$$

波高の観測 海中又は岩礁、防波堤等の上に目標を立て、之を目標にして、波頂の高さを、肉眼或は望遠鏡等を以て、測定する事が普通である。

如斯くして得たる讀數より波高(h)を算出するには(19)式を應用するがよい。



記號 1 基準面上より波頂までの高さの讀數

t　観測當時の潮位讀數、即ち基準面上より靜水面に至る高さ

〔註〕海中に立つる目標には、竹を用ひる、此竹竿は屢々波浪に依て捻ぢ切らるゝを以て幾本も立てる要がある、又留萌港にては、其の根元の近くに、シャツクルを附じて竹竿を廻轉自在ならしめ、以て捻切を多少防ぎ得た。

次に沖合にある岩礁、或は防波堤の上に立つる目標は、最も強固にしなければならぬ普通太いレールの如きものを混凝土にて植込む、但し之も屢々破壊せらるゝことがある。

是等の目標には、約半米置きに目印を塗り置く。

〔註〕又一法としては、沖合に浮標(Buoy)を浮せ、之が浮沈を測つて、波高を定むることもできる。

〔註〕江角港(鳥取)にては、目標を用ひずして、陸岸の傾斜面を利用し、其所に、レベルを据えて観測した、即ちレベルの水平視線と波頂とが一致するまで、何回も据え直して測定する、此観測法は、地勢の如何に依て有効である。

〔例題11〕 波頂が静水面上 3 m に達する波浪の波高を求む。

(19)式に依つて 5.4 m となる。即ち

$$h = 1.8 \cdot 7 = 1.8 \times 3 = 5.4 \text{ m}$$

〔例題12〕目標に依つて測り、其の波頂が基準面上 6m に達した波浪に就て、其の波高を求む。但し其の観測せる時刻の潮位は、基準面上 2m であった。

(20)式に依つて、所要の波高は 7.2 m となる。即ち

$$h \equiv 1.8(i-t) \equiv 1.8(6-2) \equiv 7.2 \text{ m}$$

波高結論 以上述べ來つた所に依て、波高の大小に影響を及ぼす諸種の事項に

「其の詳細を表した。

其の中で普通の港灣に於ける、最大波高の推定に最も重要な事項は、海底の水深、フェッヂの二つである。尙ほ観測波高も亦参考資料として必要であるが、短期間の記録を以て、直に設計用の最大波高となすの不可なるは、既述の如くであつて、之に相當の餘裕を附して、充分安全なる波高を假定すべきである。

第三節 波 力

波力一般 波の力は極めて強大であつて、港灣の工作物に對して屢々其の暴威を逞しくする。例へばアルダー＝港(Alderney)に於ては嘗て9庵の石塊を 13 m の高きに吹き上げた、又ウイック港(Wick)にては 2,600 庵の大塊を倒した。

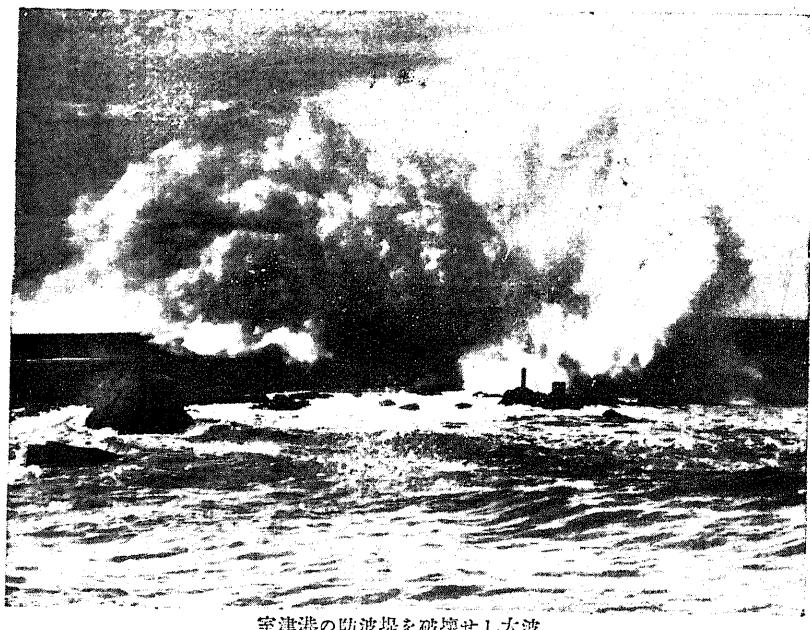
又本邦に於ても、此波力發現の顯著なる實例がある、即ち留萌港と網走港とにては 2,000 吨の大函塊を破壊せしめ、又昭和 3 年室津港の防波堤が大破した跡の調査によれば、目方 350 吨の大破片が約 20 m の遠方に飛散してゐる。

〔註〕強大なる波力發現の實例は、上記の外にも澤山にある、其の中で有名なものを記せばゼノア港(Genoa)にて 40 両の大塊を 50 m の遠方に飛ばし、又エムイデン港(Ymuiden)にては 20 両の混成土塊を約 3.5 m の高さに持ち上げた、次にエジストン燈臺(Edgestone)にては満潮面上 20 m の高所にある 60 両の構造物を破壊せしめた。

本邦に於て波による防波堤破壊は前記のものゝ外に、串木野、能生、網代、浦河、杏形、高雄、新潟、瀧、多度津、鞆、横濱、其の他之が例例は甚だ多い、尙ほ又護岸、海壁の破壊に至つては、更に多數である。

次に毎平方米當りの波力を、後述の波力計にて測定する時は、屢々強大なる數値が現はれることがある。然し之は小局部に起る波力であつて、大きな面積に當る平均の波力は、夫よりも遙に小である。例へば前に記したウイツク港の實例に於ても、毎平方米當り平均 12 班餘に過ぎなかつた。

故に本邦に於て、設計に用ひる平均波力の最大は、毎平方米に付き、大略次の如き見當であらう。



室津港の防波堤を破壊せし大波

外海に面する港 9~15席

内海及び灣内の港 3~6 頁

勿論この標準は、概略の見當を示すに過ぎない、即ち實際に或る地點に於ける、設計用の最大波力を推定するには、後に述ぶるが如く主として 波高、或は 水深、並に波向等より算出するのである。

〔註〕 波力計に現はれた最大波力の記録は毎平方米につき Dunkar にて 38 トン、Buckie にて 33 トン、Sherryvore にて 30 トン、Bell Rock にて 16 トン、小樽にて 35 トンであつた。

波力の計算 は特に防波堤の設計に當つて、最も重要な問題である。

一般に波の有するエネルギー (Energy) は之を二種に分けて考へ得る。即ち

1. 位勢 (Potential energy)
 2. 動勢 (Kinetic energy)

位勢とは、波の山に依る、水面の局部的上昇より生ずるエネルギーである。

動勢は、既述の水分子の迴轉運動より生ずるエネルギーである。

波力の強弱が、是等のエネルギーの多少に起因する事は、言ふ迄でもない。

而してエネルギーの多少は、主として波高の大小と、波長の长短、或は波速等に關係するのである。

殊に波高との関係は、稍々明瞭であるが故に、波力の公式は、多く波高より之を求める。即ち一般に

記號 p_0 單位面積、即ち $1 m^2$ に當る波力(単位は施)

w 水 $1 m^3$ の重量、即ち 1.03 魁

h 波高(単位は米)

k_1 系數 約 1.6

〔註〕 系数 k_1 に就て各大家の意見を列記すれば Rayleigh 氏は 1.96, Dubuat 氏は 1.85 Thibault 氏は 1.85, Joessel 氏は 1.62, Gaillard 氏は 1.31, Mariotte 氏は 1.25, 以上の平均 1.6

[註] 若し(21)式の誘導算出の経過を知らんとせば Cunningham 著 Harbour Engineering 176 頁を参照されたい。

〔註〕 一般に波長の大なる波浪の有するエネルギーは、大であつて波力も亦強い。例へばウネリの波力が、意外に大なるは此爲である。

波力の公式を求むる場合に、此波長に就ては、港附近に於て起る普通の波長を假定し、單に波高のみのフワシクションとなし、以て式を簡易化するのである。

記号 p_0 w k_1 は前掲と同様、 V は波速を米/秒にて表はす、 g は重力加速度即ち
9.81米 秒秒

此公式は(21)式を、誘導する當初の假定に近い。

参考書は Ottoschulze, Seehafenbau B¹, 150 頁。

本邦に於て最も多く用ひられる廣井博士の波力公式は、同じく波高より算出するのであるが、(21)式よりも一層簡単であつて、然も公式誘導の理論整然たるものである。

記号 p_0 單位面積、例へば 1m^2 に當る波力（単位は穂）

w 水 $1 m^3$ の重量、即ち 1.03 吨

h 波高（単位は米）

尙ほ嘗て記した水深と波高との関係式(12)を考慮して h の代りに D と置きて波力を算出し得る場合もある(勿論既に波高を推定する時に、水深の影響を考慮してあるならば、前式だけで足りる)。

但し D は海底の水深、単位は米

以上の諸式は波向が、防波堤線に直角に押し寄せる場合のみに、適用するものであつて、若し之が圖に示すが如く、或る角度(α)を以て斜に来るのは、次式の如く波力は低減せらる。

記号 p 堤體を直角に押す力、単位は防波堤側面の 1m^2 に付き施(即ち圖の p' が、防波堤の長 1m 、高 1m に當る力を p とする)。

p_0 既述の波力、即ち波向に向つて真ともに押す力、単位は 1m^2 に付き kg 。

α 防波堤線と波向となす角度

p_0 も p も既述の如く、何れも単位面積(1m^2)に當る波力であるが、堤の側面全體の受ける波力は、 p_0 若くは p に其の面積を乘すべきは言ふ迄でもない、即ち

A 堤體の側面積、但し防波堤の長手に於て、単位長(1m)の側面積である、例へば側面高を *i* とすれば *A* は $(1 \times i)$ 平方メートルである。

P 側面積 A に當る波力、単位は瓩

嘗て碎波の所で述べた如く、普通の波は防波堤の直前にて、碎波の形狀を呈し、波の持つエネルギーは、恰も水鐵砲の如く水束となつて、堤體にぶつかり、茲に最大の波力を現はす。此現象を捕へて算式に誘導したのが上掲の公式である。

一般に本邦の港灣に於ける、防波堤設置の箇所は、大略 満潮面下 15 m 以内の淺い水底部であつて、上掲の廣井式は最もよく適用せられる。

[註] 廣井波力式の誘導算出は、同博士著の築港前編 62 頁以下を見られたい。

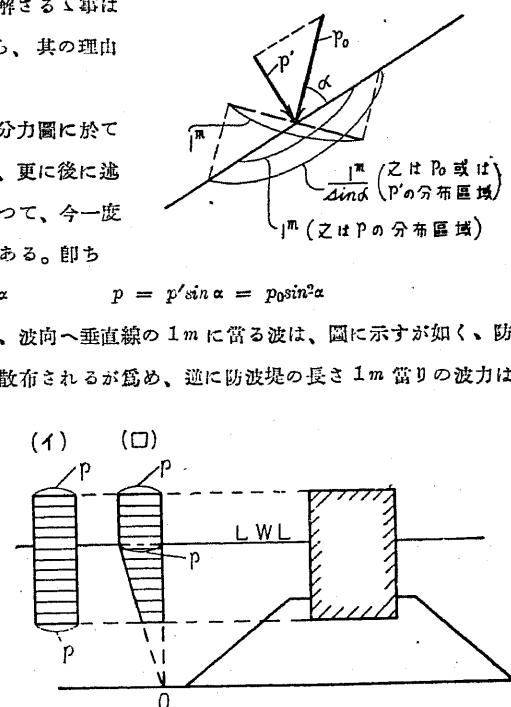
尙ほ(25)式に於て、屢々誤解される事は
 \sin^2 の二乗なることであるから、其の理由
を説明するの必要がある。

二乗となれる理由は、先づ分力圖に於て
 p_0 に $\sin \alpha$ を乗じて p' を得、更に後に述
 ぶる防波堤の長さの影響に依つて、今一度
 $\sin \alpha$ を乗じて p を得るのである。即ち

$$p' = p_0 \sin \alpha \quad p = p' \sin \alpha = p_0 \sin^2 \alpha$$

茲に長さの影響と言ふのは、波向へ垂直線の $1m$ に當る波は、圖に示すが如く、防波堤方向の $(1 \div \sin \alpha)$ の長さに散布されるが爲め、逆に防波堤の長さ $1m$ 當りの波力は、更に $\sin \alpha$ を乗じたものに
減少するのだ。

〔註〕 余は安全の爲めに、
 P を計算するに際して、單
位波力は側面の全高に亘つ
て、イ圖に示すが如く、總
てが均一に働くものと假定
したのであるが、然し時と



しては図に示すが如く、干潮面にては p_0 であるが、それより以下漸次直線状に減少せしめて、海底に於て之を零とするものがある。此図の假定は水深が大きくて、波高が比較的に小さい場合に適する。

次に護岸の場合の如く、波高の小さい割合に、胸壁の頂までの高さが、著しく高い時には、前記の如く、波力の分布を、其の頂まで、均一の強さに取ることは、安全過ぎる。故に護岸に對しては、第十五章第七節の註に述ぶるが如き、特別の假定に依るがよい。

〔例題13〕 波高 4m の時、その波力を算出せよ。

(23)式に依つて、每平方米に付き 6.2 脈となる。

$$p_0 = 1.5wh = 1.5 \times 1.03 \times 4 = 6.2 \text{ t/m}^2$$

一般に波力の計算には、小数點以下餘り細い計算をする必要がない。

〔例題14〕 大阪の北港を被覆せんとする防波堤に就て、其の単位面積に當る波力を算出せよ。但し設計用の最大波高は、例題(5)に依て求めた 2.4m を用ひ、又西南西の波向と計画防波堤線となす角度を 60 度とする。

式(23)と(25)とに依つて、所要の波力は、每平方米につき 2.8 脈となる。即ち

$$p_0 = 1.5wh = 1.5 \times 1.03 \times 2.4 = 3.7 \text{ t/m}^2$$

$$p = p_0 \sin^2 \alpha = 3.7 \times \sin^2 60^\circ = 3.7 \times 0.866^2 = 2.8 \text{ t/m}^2$$

〔例題15〕 フェッチ 46 km の港に於て、最大波に直面する防波堤の、1 m² に受ける波力を算出せよ。

第二節例題(6)に於て計算せし如く、フェッチ 46 km の地點に於ける、最高波は 2.3 m である。

此波高を(23)式に入れて、所要の波力 3.6 脈を得る。即ち

$$p_0 = p = 1.5wh = 1.5 \times 1.03 \times 2.3 = 3.6 \text{ t/m}^2$$

〔例題16〕 例題(7)の如く最大波高 3.6 m の波を、直角に受くる防波堤の全波力(但し單位長、即ち 1 m に付けて)を算出せよ。但し此防波堤の側壁高は 9 m である。

式(23)と(26)とに依つて、所要の波力は 50 脈となる。即ち

$$p_0 = 1.5wh = 1.5 \times 1.03 \times 3.6 = 5.56 \text{ t/m}^2$$

波を垂直に受くるのであるから、 p と p_0 とは同一である。

$$P = pA = 5.56 \times (1 \times 9) = 50,040 \text{ kg} = 50 \text{ t}$$

〔例題17〕 例題(8)に於けるが如く、満潮時の水深 5 m を以て、最大波高とみなすべき港の最大波力を算出せよ。

式(24)に依て、毎平方米につき 7.7 脈なるを知る。即ち

$$p_0 = 1.5wh = 1.5 \times 1.03 \times 5 = 7.7 \text{ t/m}^2$$

〔例題18〕 例題(9)に於けるが如く、満潮時の水深 7 m を以て、最大波高とみなすべき港に於て、波向と防波堤線と 48 度の角度をなし、又防波堤の側壁高 10 m なる場合に、其の堤體に受くる 最大の全波力(但し單位長 1 m につき)を計算せよ。

式(24)(25)(26)等に依て、所要の波力は 60 脈となる。即ち

$$p_0 = 1.5wh = 1.5 \times 1.03 \times 7 = 10.8 \text{ t/m}^2$$

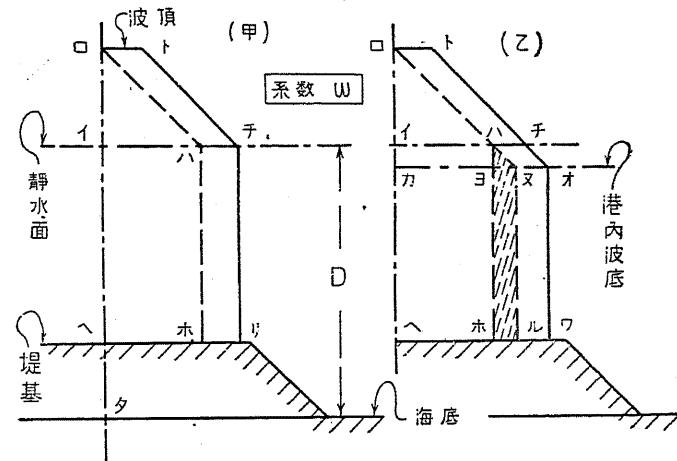
$$p = p_0 \sin^2 \alpha = 10.8 \times \sin^2 48^\circ = 10.8 \times 0.743^2 = 6.0 \text{ t/m}^2$$

$$P = pA = 6.0 \times (1 \times 10) = 60 \text{ t}$$

〔註〕 既述

の如く、本邦港湾に於ける普通の防波堤設計には、上記廣井式が最もよく適合するを以て、更に他の式を知る必要はない。

然し特別



に水深大きく、然も直立部の高き構造のものにあつては、碎波の形狀を取らずして、波浪の有する位勢、動勢、のエネルギーが、そのまま堤體に働く、其の際の波力計算の方法を参考にまで附記する(水利と土木第三卷第一號拙文参照)。

甲圖 は港内側に著しき波浪なき普通の場合である。其の中で

値の太略 $\overline{イハ}$ を以て表はす。但し

$$\overline{イロ} = \overline{イハ} = \overline{ホ} = \frac{h}{2} + \frac{\pi a_1 b_1}{L} = \frac{h}{2} + \frac{3a_1}{2L}$$

動勢は大略 ロトチリホハ を以て表はす。但し

$$\overline{\text{ロト}} = \overline{\text{ハチ}} = \overline{\text{ホリ}} = k_2 \frac{v_1^2}{2g} = \frac{v_1^2}{5}$$

式中の記号は、總て皆て淺海波浪(7)式以下に用ひたものと同様である、其の時に無かつた k_2 は定数であつて、略最大にあたる 4 を取つた。

位、動のエネルギーは、静水面を下るに従て減少し、海底にては、略零となるのであるから、ハタ、チタ、と連結すべきであるが、安全の爲め、ハ、及び、チ、より各垂線を下ろした。

此圖に於て、要するに堤側にあたる壓力は、ロトチリヘ、の多角形の面積に、系數 w (1.03種) を乗じたものである。

乙圖 は港内に相當著しき波浪の起る場合である。其の際最も危険の場合は、堤の外側へ、外波の波頂があると同時に、その内側には港内波の波底が接する場合である。

即ち静水面と港内波底との差(イカ)だけの水壓が、餘分に加はることとなる。之を圖に示せば、ハヌルホヨ、の如くなる。

イカ は港内波高の半分より小であるが、安全のため其の二分の一とする。

但し港内波浪が、港外波より小なるは勿論であるから、カオ、を外波の波底迄で下げる必要はない。

以上の解法の根據は、主としてエーリー氏の所説に發したのであるから、同じ論據によるリラ氏 (Jorge Lira) の解法 (Genie Civil 1927 年 2 月號 141 頁) と近似であるが唯だ、ホリを零とする事、或は港内波浪等に關し所説を多少異にする。

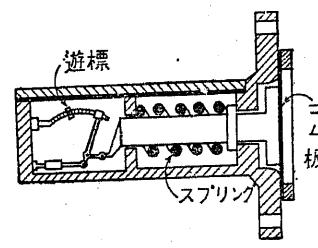
波力の測定 には波力計 (Wave-dynamometer) を岩礁又は防波堤に、取付けて之を測る。

波力計に於て、波が直接當る所は、ゴム板或は鐵板にて造られ、之に受けた壓力をバネ、即ちスプリング (Spring) 或は液體等に依つて傳へる。

バネ仕掛……廣井式、Stevenson 式

液體裝置……Gaillard 式

本邦にては、専ら廣井式が用ひらるゝ(圖参照)。



嘗て記した如く、是等の波力計の示す最大波力は、小局部に受くるものであつて、防波堤の如き廣い場面に受くる最大波力より、遂に強大なる數字が現はれる。

從て實際に防波堤等の設計には、此測定の最大波力を用ひずして、寧ろ波力公式に依て算出した最大波力をとる。

[註] 廣井式にてはゴム製の圓蓋の内方に接してバネを附し、其の壓縮の程度に依つて波力を知るのである、又廣井式には單記と自記とある、前者は最大波力のみを一つ示すものである、後者は時計仕掛けつて、波力が時に依つて變化した跡を記すのである、普通は、簡便なる單記が多く採用せらる。

波力計は干潮面以上の各所に於て、小穴を掘つてなるべく多數之を取付けるがよい。

波力結論 波力は、防波堤或は海壁等の設計資料として、極めて重要な事項である、而して此波力を推定するには、主として波力公式に依て之を算出する、今之が計算順序の要領を記せば、次の如くなる。

1. フェツチ、水深、其の他より設計用の最大波高を推定する。
2. 此波高を(23)式に代入して、波に向つて眞ともに押す波力を算出する。
3. 防波堤と波向とのなす角度を豫想し、之と前記の波力とを(25)式に入れて、堤體が直角に押さるゝ力を算出する。
4. 堤側面の高と前記の力とを(26)式に代入して、堤側面に當る波力を算出し、此外力に耐ゆる様に、防波堤等を設計するのである。