

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状は、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つあつて、之が綜合し遂に表面に波形を表はすのである。(圖参照)

されば波の形は傳播進行するが、其内部の水は前進せずして、一所に停滯廻轉しつつ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、但し此等の式が、築港に於てそのまま應用せらるゝことは稀れである。

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

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

$$V = \sqrt{\frac{g}{2\pi} L} = 1.25 \sqrt{L} \dots\dots\dots(3)$$

記號 L 波長、單位は米

T 一つの波の進む時間、即ち波の週期、單位は秒

V 波の速度、單位は米秒

g 重力の加速度 (9.81米秒²)

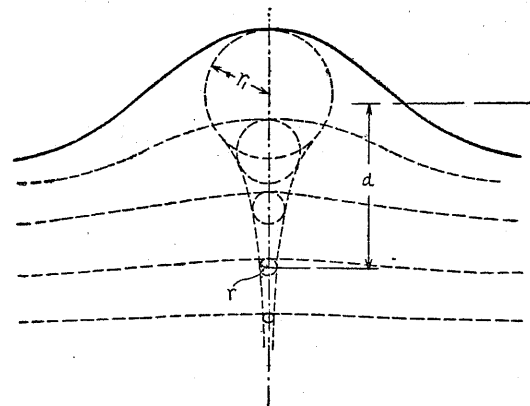
π 圓周率 (3.14)

此場合に於て、水分子が廻轉する圓周軌道の半徑、即ち分子軌道 (Orbit) の半徑は水面に於て最も大きく、深くなるに従て小さくなる、其關係を式に示せば

$$r = r_1 e^{-\frac{2\pi d}{L}} \dots\dots\dots(4)$$

記號 r 任意の水深に於ける、分子軌道の半徑

- r_1 水面に於ける分子軌道の半徑 (波高の半分に當る)
- d 任意の水深 (靜水面より起算す)
- e 自然對數底數 (2.718)



水分子廻轉圖

更に又水分子の回轉速度の、波長並に分子軌道の半徑等の關係は、次式の如くなる。

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

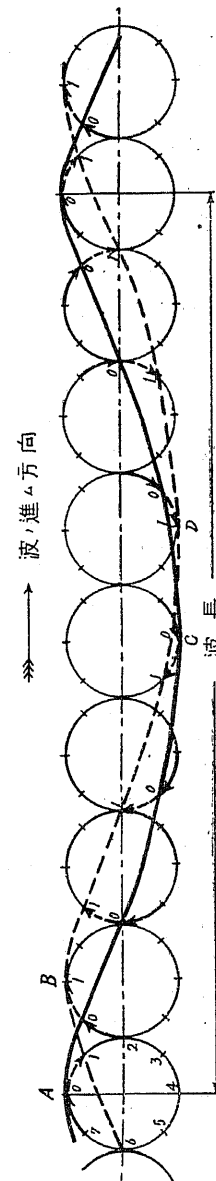
$$v_1 = r_1 \sqrt{\frac{2\pi g}{L}} = h \sqrt{\frac{\pi g}{2L}} = 3.92 h \sqrt{\frac{1}{L}} \dots\dots(6)$$

記號 v 任意の水深に於ける、水分子回轉の速度

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、茲に謂ふ淺海部とは、水深が波長の約半分以上の所を指すのである。



トロコイド曲線

〔例題 1〕 週期 9 秒なる時の、波長と波の速度とを算出せよ。

$$L = 1.56 T^2 = 1.56 \times 9^2 = 127 \text{ m} \dots \text{波長}$$

$$T = 0.64 V \text{ 故に}$$

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

或は V は $(L \div T)$ に依つても算出し得る。

〔例題 2〕 波高 8 米、波長 160 米、なる時、海面より 20 米の所に於ける、水分子回転の軌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)式を用ゐて、所要の半径 r を求め、又其 r を (5) 式に代入して、所要の速度 v を求むる。

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

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

但し上記計算の中 $e^{-0.785}$ はハイパボリック函数表、例へば林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。

浅海部の波浪 浅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。但し此等の式も亦築港に應用せらるゝことは、稀であるが唯だ参考に迄掲げるに過ぎない。

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

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

$$V = \sqrt{\frac{g}{2\pi} \frac{b_1}{a_1} L} = 1.25 \sqrt{\frac{b_1}{a_1} L} = 0.83 \sqrt{\frac{h}{a_1} L} \dots (9)$$

$$v = \sqrt{\frac{2\pi g a b}{L}} = 7.85 \sqrt{\frac{a b}{L}} \dots (10)$$

$$v_1 = \sqrt{\frac{\pi g a_1 h}{L}} = 5.55 \sqrt{\frac{a_1 h}{L}} \dots (11)$$

記號 a 任意の水深に於ける、水分子軌道の橢圓大徑

b 同上の橢圓小徑

a_1 水面に於ける、水分子軌道の橢圓大徑

b_1 同上の橢圓小徑 (波高の半分に當る)

尚ほ a_1, b_1, a, b 等の關係

は次の諸式に依て明かである、

其中で波高と水深 (D)

等の關係式は、エーリー氏

(Airy) の説に従つた。

$$a_1 = \frac{e^m + 1}{e^m - 1} b_1$$

$$b = \frac{h}{2}$$

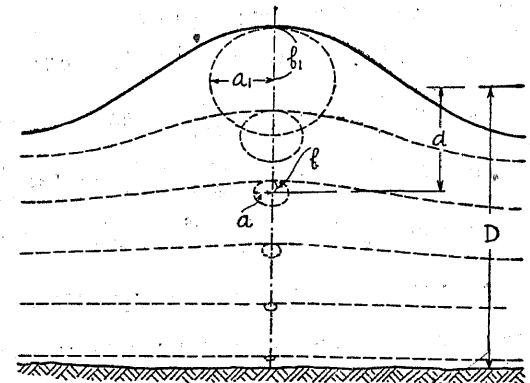
$$a = b_1 \frac{e^n + e^{-n}}{e^n - e^{-n}}$$

$$b = b_1 \frac{e^n - e^{-n}}{e^n - e^{-n}}$$

$$n = 2\pi \frac{D-d}{L}$$

$$m = 4\pi \frac{D}{L}$$

$$q = 2\pi \frac{D}{L}$$



浅海部に於ける水分子の回転

但し D は静水面より水底までの水深。

上式の中にて a_1 の式は a の式の n に $d=0$ とすれば同じ結果となる。

以上述べ來つたものは、普通の波形に就てあつた、然るに陸岸に接近し、或は障害物に衝突する時は、次に記すが如き種々なる異形の波を生ずる、而して普通の波形を持続し得る範圍は、水深が波高より大なる場合に限らる、之を式に表はせば次の如くであつて、此式は築港に於て屢々應用せらるゝ。

$$h \leq D \dots (12)$$

〔例題 3〕 水深 25 米の浅海部に於て、波高 8 米、波長 160 米なる場合の波速を求めよ。

(但し如斯き複雑なる計算は實際には用ゐない)

(9)式に依つて、速度 V を求むる前に、先づ a_1 を算出する爲めに m を求むる。

$$m = 4\pi \frac{D}{L} = 4 \times 3.14 \times \frac{25}{160} = 1.96$$

$$a_1 = \frac{e^m + 1}{e^m - 1} b_1 = \frac{e^m + 1}{e^m - 1} \times \frac{h}{2} = \frac{e^{1.96} + 1}{e^{1.96} - 1} \times \frac{8}{2} = \frac{7.10 + 1}{7.10 - 1} \times 4 = 5.31$$

$$V = 0.88 \sqrt{\frac{h}{a_1} L} = 0.88 \sqrt{\frac{8}{5.31} \times 160} = 13.6 \text{ m/sec}$$

【例題 4】 上記の波浪に於て、静水面下 10 米の所に於ける、水分子軌道の楕圓大徑と小徑を求めよ。(實際には用ゐることが少い)

$$n = 2\pi \frac{D-d}{L} = 2 \times 3.14 \times \frac{25-10}{160} = 0.59$$

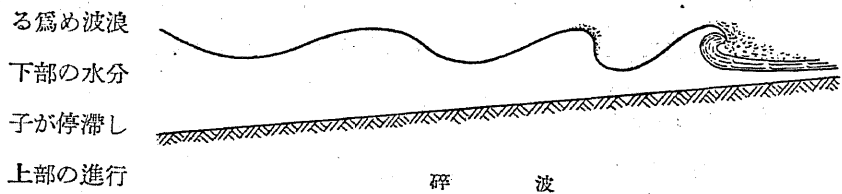
$$q = 2\pi \frac{D}{L} = 2 \times 3.14 \times \frac{25}{160} = 0.98$$

$$a = b_1 \frac{e^n + e^{-n}}{e^q - e^{-q}} = \frac{8}{2} \times \frac{e^{0.59} + e^{-0.59}}{e^{0.98} - e^{-0.98}} = 4 \times \frac{1.80 + 0.55}{2.66 - 0.37} = 4.1 \text{ m} \dots\dots \text{大徑}$$

$$b = b_1 \times \frac{e^n - e^{-n}}{e^q - e^{-q}} = \frac{8}{2} \times \frac{e^{0.59} - e^{-0.59}}{e^{0.98} - e^{-0.98}} = 4 \times \frac{1.80 - 0.55}{2.66 - 0.37} = 2.2 \text{ m} \dots\dots \text{小徑}$$

特種の波 上述の普通波浪の外に、種々なる形状の波がある。

碎波 (Broken wave) 水深が急に浅くなる時には、海底の摩擦抵抗が急に増大する爲め波浪



の如く早くなく、遂に波の頂が前に墜落するに至る、此現象を碎波と言ふ。一般に海濱に打ち返す波、或は防波堤附近に押し寄せる波は、此碎波が多い。

普通の波が碎波の形状を呈する時は、著しく其高さを増す、即ち碎波の高(H)と普通波の高(h)との比は 1.5 倍乃至 2 倍ほどである。

即ち $\frac{H}{h} = 1.5 \sim 2.0$

【註】 昭和四年九月廿日伏木港に於て、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 3.9 米に對し、碎波は 7 米であつて、従て H と h との比は 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、此進行性を帶ぶるに至つた原因は、水底の摩擦、

障害物、風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、風力の存続に依て起るものを、煽波 (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自波の躍るを見る。

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來る波を餘波又はウネリと稱する。

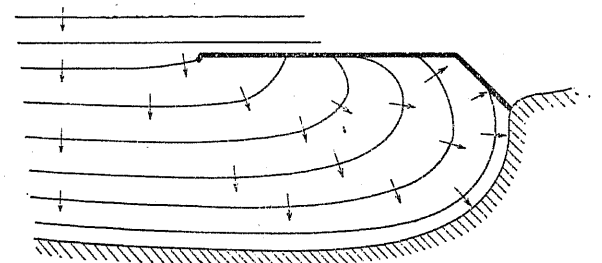
例へば、風無きに襲ひ來る巨浪、或は風向と反對の方向より寄せ來る波、等は何れも此餘波に屬する。

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残る。

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來るものを言ふ。

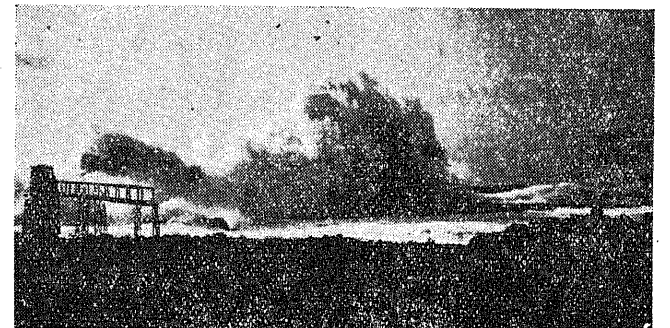


廻浪の一例

廻浪 (Wheeling) とは岬又は防波堤の突端より廻り來る波である。

(圖参照)

跳波 (Spray) 波浪が構造物にぶつかつて、水烟を高く跳ね上



留萌港防波堤の大跳波

げるものを、スプレー或ひは跳波と呼ぶ。

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、其反射波の断面は、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) 反射波の起つてたる海面を一般に 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、航海者の観測に依つて、18米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 米 | 北 | 明 41- 1-28 |
| 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 崩 | 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 (鯨) | 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 | 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 米以上に及ぶものは稀である。

次に築港技術に必要な、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。

我が國の港灣に於て観測せる波高の最大は、江角港(島根縣)の 8.8 米である。又留崩、網走、室津にては 7.5 米前後、酒田、八戸(鯨)等にては 6 米の巨浪を見た。

然し四日市、小松嶋の如き灣内の港にあつては、最高約 2.5 米、更に内海に入つては 2 米以下に過ぎない、尙ほ詳細は別表を見られたい。

但し比較的短期間の観測による此等の最高波が、必ずしも其港に起り得る絶對の最高波でない事は言ふ迄でもない。

従て防波堤等の設計に用ゐる最高波は、安全の爲め上記の観測波高より、更に一層大なるものと假定する。

今本邦港灣に於ける 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 米乃至 10 米
- II 外海に近き灣内の港………4 米乃至 6 米
- III 内海及び灣内の港……………2 米乃至 4 米

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. 波の狹窄と散布
3. 波の轉向と散布
4. 海底の深淺

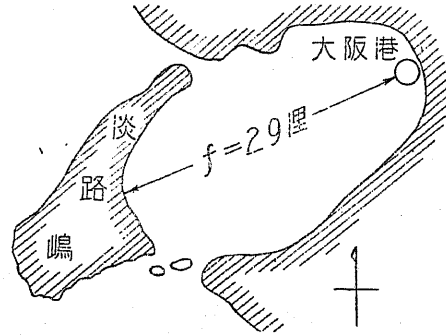
5. 海中の障害物

6. 風の強弱

以上の諸原因と波高との関係に就て、詳しく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

即ちフェッチ(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ェッチは、圖に示すが如く淡路嶋に至る約29哩を指す。



大阪港のフェッチ

此フェッチの長短は、波高の大小に至大の関係を持つ、そして其関係はステベンソン氏 (Stevenson) の公式に依つて表はされる。

$$h = 0.45\sqrt{f} \dots\dots\dots (13)$$

記號 h 最大波高 (單位は米)

f フェッチ (單位は哩を以て表はす、1 哩は 1852 米)

上記の式はフェッチが 39 哩以上 300 哩以下の時に適用せらるゝ、300 哩以上の遠距離に至れば、其フェッチの長短は、遂に波高に影響を及ぼさなくなる。

次にフェッチ 39 哩以下の短距離の場合には、上式を多少修正して次式の如き関係となる。

$$h = 0.45 \sqrt{f + (0.75 - 0.3 \sqrt{f})} \dots\dots\dots (14)$$

即ち、フェッチ 300 哩以下の港灣ならば、上記二式の中何れかに依つて、其地點の最大波高の概略を推定することが出来る。

但し其際波高と水深との關係式(12)を合せて考慮し、若しフェッチより算出たる結果が、水深の数値より大なる時は、水深の数値を以て所要の最大波と推定する。

【例題 5】 大阪港の最大波高をフェッチより算出せよ。

大阪港に於て最も激しき波浪を起す風の方向は西南西である、此方向に於けるフェッチを、海圖に依て求め、29 哩なるを知る、而て39 哩以下の場合であるから此數値を(14)式に入れて、最大波高約 2.4 米を得る、即ち

$$h = 0.45\sqrt{f} + (0.75 - 0.3 \sqrt{f}) = 0.45\sqrt{29} + (0.75 - 0.3 \sqrt{29}) = 2.4 \text{ m}$$

一般に波の計算には、小數點以下餘り細い計算を行ふ必要を認めない。

【例題 6】 フェッチ 46 哩の場合の最大波高を算出せよ。

本節の公式に於ける、フェッチの單位は哩 (1852 米) なるを以て、本題の料の單位を先づ哩の單位にする必要がある、然る後に之を(13)式に入れて最大波高 2.3 米を得る。即ち

$$f = 46.000 \text{ 米} \div 1852 \text{ 米} = 25 \text{ 哩}$$

$$h = 0.45\sqrt{f} + (0.75 - 0.3 \sqrt{f}) = 0.45\sqrt{25} + (0.75 - 0.3 \sqrt{25}) = 2.3 \text{ m}$$

【例題 7】 フェッチ 64 哩の所に於て、其方向の風に依て起る最大波高を算出せよ。

フェッチ 3) 哩以上なるを以て(13)式を用ゐ、3.6 米となるを知る、即ち

$$h = 0.45\sqrt{f} = 0.45\sqrt{64} = 0.45 \times 8 = 3.6 \text{ m}$$

【例題 8】 フェッチ 225 哩に及ぶ港に於て、之が海底の水深が満潮時 5 米に達するに過ぎない場合にあつては、其最高波を何米に推定するが至當なるや。

單にフェッチのみより算出するとせば(13)式に依つて 6.7 米となる。即ち

$$h = 0.45\sqrt{f} = 0.45\sqrt{225} = 6.7 \text{ m}$$

然し、一方に於て水深迄での水深の影響を(12)式に就て考慮すれば、

$$h \leq D \quad h \leq 5 \text{ m}$$

即ちフェッチが如何に大であつても、水深が浅い爲め、此場合 5 米以上の波は起り得ないのである、故に此港の最大波高は 5 米と推定すべきである。

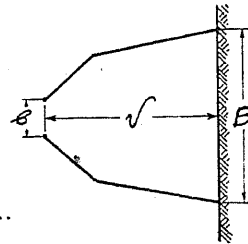
【例題 9】 フェッチは 350 哩、又海底の水深が満潮時 7 米を越えない港に於ける、最大波高は如何に。

フェッチの公式の應用し得る範圍は 300 哩が限度であるから此場合(13)式より算出するは不可である、從て海底の水深と波高との關係式(12)より之を求むる外ない、即ち次に記すが如く、所要の最高波は 7 米である。

$$h \leq D \quad h \leq 7 \text{ m}$$

皮の狹窄と散布 外海より押し寄する波浪が、港口或ひは灣口等の狹窄部を通過して、港内又は灣内等の、稍々廣い面積に散布する時には、波高の著しく減少するを見る。

そして波高減少の割合は、狹窄部の幅員 b 、狹窄部よりの距離(d)、内部の擴大せる幅員 (B) 等に依つて異なる、此關係をステベンソン氏は次の實驗式に依て表はした。(圖参照)



$$\frac{h'}{h} = \sqrt{\frac{b}{B}} - 0.027 \left(1 + \sqrt{\frac{b}{B}} \right) \sqrt{d} \dots \dots \dots (15)$$

記號 h 港外の波高

h' 港口より d だけ離れた所の波高

b 港口の幅員

B 港口より d だけ離れた所に於ける、港内の擴大幅員

d 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〕 和蘭のユムイデン港 (Ymuiden) に於て、港外の波高4米の時、港口より1200米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米、又1200米内の港内擴大の幅員は1180米である。

〔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米となる。

$$\begin{aligned} \frac{h'}{h} &= \sqrt{\frac{b}{B}} - 0.027 \left(1 + \sqrt{\frac{b}{B}} \right) \sqrt{d} \\ h' &= h \sqrt{\frac{b}{B}} - 0.027h \left(1 + \sqrt{\frac{b}{B}} \right) \sqrt{d} \\ &= 4 \times \sqrt{\frac{250}{1180}} - 0.027 \times 4 \left(1 + \sqrt{\frac{250}{1180}} \right) \sqrt{1200} = 0.9 \text{ m} \end{aligned}$$

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、其波高を低減する。

そして、其轉向 (Wheeling) の角度が大なる所ほど減少率が多く、從て靜穩で

あるは言ふ迄でもない、其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。

$$\tau = h \left(1 - \frac{\theta}{240} \right) \dots \dots \dots (16)$$

記號 τ は廻浪の高、 h は本來の波高、 θ は轉廻の角度

海底の深淺 嘗て述べた如く、普通の波形を持続し得る範圍は、海底の水深が波高より大となる場合に限らる、從て(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に記した如く例へ フェッ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〕 銚子港に於て觀測に依る、最大波高は前に記すが如く5.5米であつたが、防波設計用の最大波高は、海底水深である10.6米と假定せられた、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、波浪を殆ど遮斷するものゝ効果は言ふ迄でもない、其他水面以下に没してをる暗礁、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、沖にあつて一字形に横はる、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、濬(はえ)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。

$$h = S \div 3 \dots \dots \dots (17)$$

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。

風と波との關係式は、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

廣井式 $h = S^2 + 100$

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

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

ホワイト式 $V = 6.9 S^{\frac{1}{4}}$

其 他 $V = 11.6 \cdot S$

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、或は反對に 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、異差を生ずるものである。

- (イ) 暴風時には此比例一般に小さく、弱風になるに従つて大きくなる。
- (ロ) 海岸近くに於て、水底が急に浅くなる所にて、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。
- (ニ) 餘波に於ては、此比率が著しく大である。

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

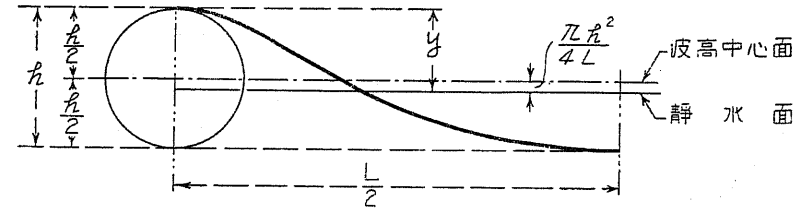
〔註〕 本邦にて波長観測の實例は、留萌港に於て大正九年十二月四日の暴風時に起つた大波である、其波長は 106 米、波高は 7.6 米、即ち波長は波高の 14 倍であつた。

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、假定せる時に占むる水面である、換言すれば其平面より上の山の水積と、其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

静水面は圖に示すが如く、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。

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

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ゐる、此式は後に述ぶる、波高観測の時に屢々應用せらるゝ。

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

〔註〕 淺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

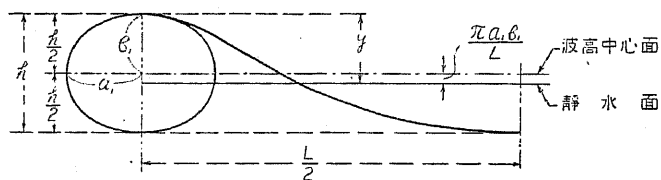
$$\frac{\pi a_1 b_1}{L}$$

であつて (18) 式は次の如くなる。但し $a_1 b_1$ は嘗て淺海部の波浪の所に説明した。

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

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のが普通である。

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



淺海部に於ける静水面の位置

$$h = 1.8y = 1.8(j-t) \dots\dots\dots(20)$$

記號 j 基準面上より波頂までの高さの讀數

t 觀測當時の潮位讀數、即ち基準面上より静水面に至る高さ

〔註〕 海中に立つる目標には竹を用ふる、此竹竿は屢々波浪に依て捻ぢちらるゝを以て幾本も立てる要がある、又留萌港にては其根元の近くに、シャツクルを附し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、但し之も亦屢々破壊せらるゝことがある。

此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、波高を定むることとできる。

〔註〕 江角港(島根)にては、目標を用ゐずして、陸岸の傾斜面を利用し、其所に、レベルを据へて觀測した、即ちレベルの水平視線と波頂とが一致するまで、何回も据へ直して測定する、此觀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米に達する波浪の波高を求む。

(19)式に依つて5.4米となる。即ち

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

〔例題12〕 目標に依つて測り、其波頂が基準面上6米に達した波浪に就て、其波高を求む。但し其觀測せる時刻の潮位は基準面上2米であつた。

(20)式に依つて所要の波高は7.2米となる。即ち

$$h = 1.8(j-t) = 1.8(6-2) = 7.2 \text{ m}$$

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、諸種の事項に關し其詳細を盡した。

其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、フェツチの二つである、尙ほ觀測波高も亦參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。

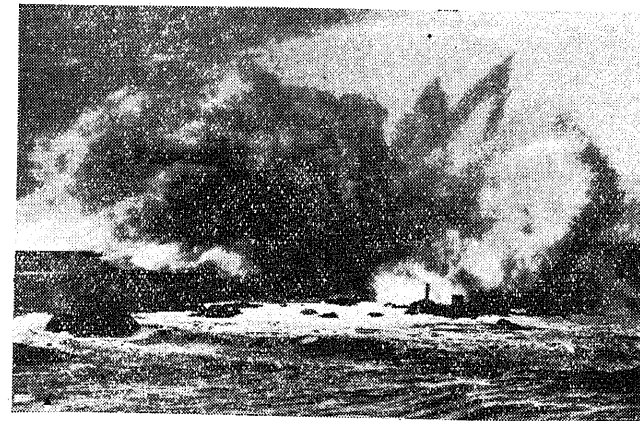
第三節 波 力

波力一般 波の力は極て強大であつて、港灣の工作物に對して屢々其暴威を逞しくする。例へばアルダーニー港(Alderney)に於ては嘗て9噸の石塊を13米の高きに吹き上げた、又ウィツク港(Wick)にては2600噸の大塊を倒した。

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2000噸の大函塊を破壊せしめ、又昭和三年室津港の防波堤が大破した跡の調査によれば、目方350噸の大破片が約20米の遠方に飛散してゐた。

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

本邦に於て波に依る防波堤破壊は前記のもの外に、網代、浦河、杵形、高雄、新潟、瀧、多度津、鞆、横濱等其他之が實例は甚だ多い、尙ほ又護岸、海壁の破壊に至つては更に多數である。



室津港の防波堤を破壊せし大波

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ィツク港の實例に於ても毎平方米當り平均 12 噸餘に過ぎなかつた。

故に本邦に於て、設計に用ゆ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。

外海に面する港 ……9 乃至 15 噸

内海及び灣内の港 ……3 乃至 6 噸

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 Dunbar にて 38 噸 Buckie にて 33 噸 Sherryvore にて 30 噸 Bell Rock にて 16 噸、小樽にて 35 噸であつた。

波力の計算 は特に防波堤の設計に當つて、最も重要の問題である。

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、水分子の廻轉運動より生ずるエネルギーである。

波力の強弱が、此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、波長の長短、或は波速等に関係するのである。

殊に波高との關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むる。即ち一般に

$$p_0 = k_1 wh \dots\dots\dots(21)$$

記號 p_0 單位面積、即ち一平方米に當る波力 (單位は噸)

w 水一立米の重量、即ち 1.03 噸

h 波高 (單位は米)

k_1 係數 約 1.6

〔註〕 係數 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, Goillard 氏は 1.31, Mariotte 氏は 1.25, 以上の均 1.6

〔註〕 若し(21)式の誘導算出の經過を知らんとせば 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、單に波高のみのフロンクシヨとなし、以て式を簡易化するのである。

〔註〕 次に波速の大なるものほど波力は大である、故に波力の算式を、波の速度(V)より求むるものがある、但し公式は餘り用ゐないが參考迄に記す。

$$p_0 = k_1 w \frac{V^2}{2g} \dots\dots\dots(22)$$

記號 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

此公式は(21)式を、誘導する當初の假定に近い。

參考書は Ottoschulze, Seehafenbau BI, 150 頁。

本邦に於て最も多く用ゐらるゝ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)式よりも一層簡單であつて、然も公式誘導の理論整然たるものがある。

$$p_0 = 1.5wh \dots\dots\dots(23)$$

記號 p_0 單位面積、例ば一平方米に當る波力 (單位は噸)

w 水一立方米の重量、即ち 1.03 噸

h 波高 (單位は米)

尙ほ嘗て記した水深と波高との關係式 (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。)

$$p_0 = 1.5wD \dots\dots\dots(24)$$

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) を以て斜に來る時は、次式の如く波力は低減せらる。

$$p = p_0 \sin^2 \alpha \dots\dots\dots(25)$$

記號 p 堤體を直角に押す分力、単位は一平方米に付き吨

p_0 既述の波力、即ち波向に向つて眞ともに押す力、単位は同上

α 堤防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(一平方米)に當る波力であるが、堤の側面全體に受ける波力は、 p_0 若くは p に其面積を乗すべきは言ふまでもない、即ち

$$P = pA \dots\dots\dots(26)$$

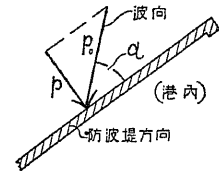
A 堤體の側面積、但し防波堤の長手に於て、單位長(一米)の側面積である、例へば側面高を i とすれば A は $(1 \times i)$ 平方米である。

P 側面積 A に當る波力、単位は吨

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 米以内の浅い水底部であつて、上掲の廣井式は最も好く適用せられる。

〔註〕 廣井波方式の誘導算出は、同博士著の築港前編 62 頁以下を見られたい。



〔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、總てが均一に働くものと假定したのであるが、特に深い所で、干潮面にては p であるが、それより以下漸次直線狀に減少せしめて、海底に於て之を零とする人がある。

〔例題13〕 波高 4 米の時、その波力を算出せよ。

(23)式に依つて、每平方米に付き 6.2 吨 となる。

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

一般に波力の計算には、小數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、其單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 2.4 米を用ゐ、又西南西の波向と計畫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 吨 8 となる。即ち

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

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

〔例題15〕 フェツチ 46 軒の港に於て、最大波に直面する防波堤の、一平方米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、フェツチ 46 軒の地點に於ける、最高波は 2.3 米である。

此波高を(23)式に入れて、所要の波力 3.6 吨を得る。即ち

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

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

式(23)と(26)とに依つて、所要の波力は 50 吨 となる。即ち

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

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。

$$P = pA = 5.56 \times (1 \times 9) = 49.8 \text{ 吨} = 50 \text{ 吨}$$

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

式(25)に依て、每平方米につき 7.7 吨なるを知る。即ち

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

〔例題18〕 例題(9)に於けるが如く、満潮時の水深 7 米を以て、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 米なる場合に、其堤體に受くる、最大の全波力(但し單位長 1 米につき)を計算せよ。

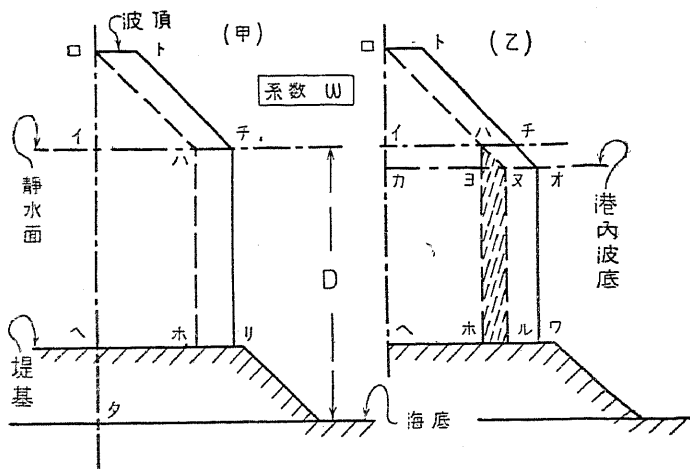
式(24)(25)(26)等に依て、所要の波力は60越となる。即ち

$$p_0 = 1.5wD = 1.5 \times 1.03 \times 7 = 10.8 \tau/m^2$$

$$p = p \sin^2 x = 10.8 \times \sin^2 45 = 10.8 \times 0.743^2 = 6.0 \tau/m^2$$

$$P = pA = 6.0 \times (1 \times 10) = 60 \tau$$

〔註〕 既述の如く、本邦港湾に於ける普通の防波堤設計には、上記廣井式が最も適合するを以て、更に他の式を知る必要は少い。



然し特別

に水深大きく、然も直立部の高さ構造のものにあつては、碎波の形状を取らずして、波浪の有する位勢、動勢、のエネルギーが、そのまま堤壁に働く、其際の波力計算の方法を参考にまで附記する。(水利と土木第三巻一號拙文参照)

甲圖 は港内側に著しき波浪なき普通の場合である。其中で

位勢は大略 ロハホへ を以て表はす。但し

$$\frac{\text{イロ}}{\text{イハ}} = \frac{\text{へホ}}{\text{ハチ}} = \frac{h}{2} + \frac{\pi a_1 b_1}{L} = \frac{h}{2} + \frac{3a_1}{2L}$$

動勢は大略 ロトチリホハ を以て表はす。但し

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

式中の記號は、總て皆て淺海波浪(7)式以下に用ゐたものと同様である、其時に無かつた k_2 は定數であつて、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從て減少し、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壁にあたる壓力は、ロトチリへ、の多角形の面積に、係數 w (1.03越) 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。其際最も危険の場合、堤の外側へ、外波の波頂があたると同時に、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×ルホ、の如くなる。

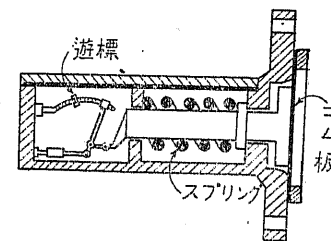
イカ は港内波高の半分より小であるが、安全のため其二分の一とする。

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ものであるから、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。



廣井式波力計

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ゐらるゝ。(圖参照)

嘗て記した如く、此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、遙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 of 最大波力を用ゐずして、寧ろ波力公式に依て算出した最大強力をとる。

〔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、後者は時計仕掛があつて、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、而て此波力を推定するには、主として波力公式に依て之れを算出する、今之が計算順序の要領を記せば次の如くなる。

1. フェッチ 水深 其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、波向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。