

羽幌港における波圧測定について（第一報）

正員	開発局港湾部	栗 林 隆
正員	留萌開発建設部	宇 田 居 吾 一
正員	開発局土木試験所	村 木 義 男
準員	開発局港湾部	高 橋 基 次
準員	同 上	石 田 直 之

1. 要 旨

本文は従来発表された波圧公式を分類して、その不備な点を述べ、波圧側定の目的と羽幌港における波圧測定の諸施設についてその概要を述べる。

2. 緒 言

海の波の解析については、昔から各時代に応じた研究がなされてきたが、科学的な解析がなされたのは、15世紀後半からである。特に18世紀後半に入ると Airy の微小波高理論、Gerstner のトロコイド波理論、Stokes の有限波高のポテンシャル波理論を初めとして数多くの理論が、物理数学者によつて研究された。しかし現象があまり複雑のため、今世紀に入るやその研究は全く停止され、研究は物理数学者の手から放棄された感となつた。しかるに今次大戦に入つて、敵前上陸の必要から Sverdrup-Munk (1946) によつて波の予知理論が研究され、この研究が動機となつて新しく海岸工学の分野が開け、海の波の問題が再び研究されるようになった。そして今度は、研究が物理数学者の手から工学者の手に移つて来た。

Sverdrup-Munk の研究は、後に Bretschneider によつて補正され、SMB 法と呼ばれる波の予知理論となつた。その内容は、実際の海面の波に有義波の概念を導入して、風の切線応力と垂直応力による波の発達を考え波高、波長、周期および波向を風の風速、吹送距離、吹送時間の函数として、工学上の目的に充分な精度まで計算可能にした。また設計に選んだ波の深海から浅海への変形も、屈折図を描くことにより明らかとなるので、以上より構造物前面の波の諸特性を決定することが現在では可能となつた。一方、理論と平行して波の諸特性が多数の港湾において継続実測されている現状である。

他方、波が海中構造物に与える波圧については、従来

数多くの波圧公式が発表されているが、いづれも我々技術者が安全でかつ経済的な構造物を設計するのに確実な公式は、いまだに発表されていない。ともかく設計に用いられる波の特性が決定されるのと同じ精度で、構造物に加わる波圧を決定し、そして構造物の設計に際し、既知の安全率を選ぶことができるような理論的基礎を確立することが、海岸工学の目下の緊急な問題である。

この問題を解決する一助として、北海道開発局においては、羽幌港に大規模な波圧測定施設を設置し、今後継続して波圧および波の諸特性を観測することとした。

3. 従来の波圧理論

いままでに非常に数多くの波圧公式が発表されているが、これら各公式は波が衝突した時の波形に応じて、砕けない波に適用する公式と、砕け波に適用する公式との二つの種類がある。しかしこの兩者について、公式誘導の理論的基礎により大別すると、次の三種類に分類することができる。

- (1) 動力学的方法 Lira.* Iribarren. 広井.
Minikin.
- (2) 定常波の方法 Benezit.* Sainflou.*
Gourret.*
- (3) 実験的方法 Moliter.* Bagnold.

注一 1. * は砕けない波に、他は砕け波に対する公式である。

注一 2. 各公式による波圧分布を図一1に示す。

上記三方法のうち定常波の方法は、波が壁に当たった時エネルギーを放出することなく反射せられる定常波（重復波）に対する波圧公式で、流体力学の基本方程式から誘導された理論式である。このうち特に Sainflou の公式が有名であり、実測値にも良く適合すると言われている。しかしながら実際の構造物は、かかる重復波を許すような深い水深の箇所に建設されることは少なく、また水深

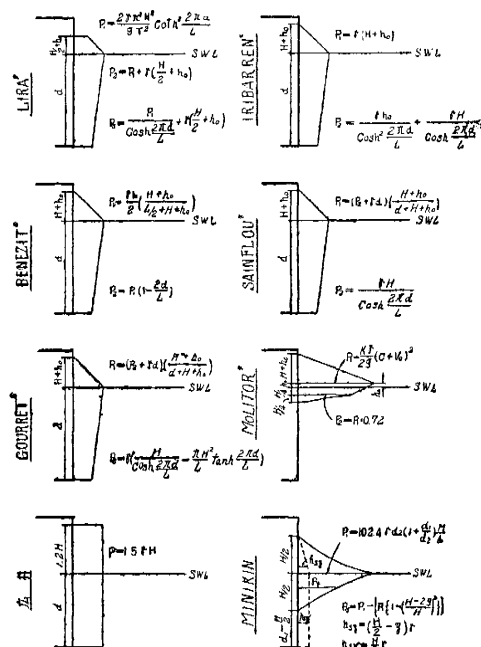


図-1 波 圧 図

が波高に対して浅くなるにつれて公式の精度が低下してゆくの、こう言つた意味では実用性に乏しいと言えよう。

動力学的方法および実験的方法は、いずれも動水圧と静水圧の和として表現されている。すなわち、

$$\frac{p}{r} = h_s + f \frac{v^2}{2g} \quad \left\{ \begin{array}{l} p: \text{圧力の強さ} \\ r: \text{水の単位容積重量} \end{array} \right.$$

上式において、衝突速度 v の表現の仕方および係数 f の取り方の違いによつて、種々の波圧公式が導かれてくる。いま静水圧はさておいて、動水圧について考察して見る。

$$\frac{p_d}{r} = f \frac{v^2}{2g}$$

と置いて、各公式の v と f の違いを次表に示す。

砕けない波に適用する Lira, Iribarren の両公式とも衝突速度として、橢円軌道の頂点における水分子速度を用いているが、かかる軌道は鉛直壁に沿うことができないこと、言いかえれば、波圧は波頂がきた時突如として挿入された平面に対して作用すると仮定している所に問題がある。広井公式は、深海波の軌道速度を用いているが、これは残海波に対する値を用いた方が合理的である。

係数 f については、定常噴流の理論から図-2 (a), の場合 $f=2$ となり、(b) の場合 $f=4$ となり、Lira, Iribarren, 広井公式はこれら定常噴流の理論より f を決定している。一方 Bagnold は全く新しく、砕波の波圧は (c) に見るように壁と波とに挟まれた空気層の衝撃圧であるとし、この実験に基づいて Minikin の公式が導かれた。

今 Minikin 公式により、 $H/L = 1/20$, $d_1/d_2 = 0.5$ の場合について計算して見ると $f=10$ となり、定常噴流理論による f に較べて非常に大きな値となる。これについては、恐らく Minikin, Bagnold の示す衝撃圧は極めて短時間 ($1/10$ 秒以下) の間、静水面付近の極く狭い面積に作用するものと見られるが、定量的には不明である。また Bag-

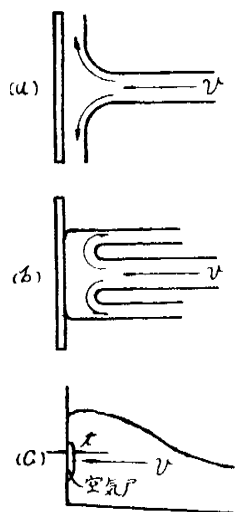


図-2

表-1 波圧公式に現われる動水圧

公式発表者	動 水 圧	f	v
Lira	$\frac{p_d}{r} = 4 \frac{v_0^2}{2g}$	4	橢円トロコイド波の分子軌道速度
Iribarren	$\frac{p_d}{r} = 2 \frac{v_0^2}{2g}$	2	同上と橢円トロコイド波の伝達速度の積
広 井	$\frac{p_d}{r} = 2 \frac{v^2}{2g}$	2	砕波の落下速度とトロコイド波の分子軌道速度との合成速度
Minikin	$\frac{p_{max}}{r} = 400 \frac{d_1}{d_2} \frac{H}{L} \frac{v^2}{2g}$	$400 \frac{d_1}{d_2} \frac{H}{L}$	$\sqrt{g \frac{d_1+d_2}{2}}$ $\left\{ \begin{array}{l} d_1: \text{防波堤直立部の水深} \\ d_2: \text{防波堤前面の水深} \end{array} \right.$
Molitor	$\frac{p_{max}}{r} = (1.3 \sim 1.8) \frac{(v_{10} + c)^2}{2g}$	1.3~1.8	橢円トロコイド波の水表面における分子軌道速度と同じく伝達速度
Bagnold	$\frac{p_{max}}{r} = 1.08 \frac{H}{t} \cdot \frac{v^2}{2g}$	$1.08 \frac{H}{t}$	t = 空気層の厚さ 図-2 参照 水の実質部の移動速度

nold の実験から考えて、構造物の天端が低い時、あるいは壁が斜面である時は、このような強い衝撃圧は生じないものと考えられるが、その限界条件は明らかでない。

4. 波圧測定のための目的

以上に、既に発表された波圧公式について述べたが、更に完全な波圧公式とするために、今後次の研究が必要と考えられる。

- (1) 砕けの程度の函数として波を定義し、この波の全ての領域にわたって最大強度の衝撃圧の生ずるのに必要な限界条件を完全に示すこと。
- (2) 高圧が同時に働くような面積と時間を明らかにすること。
- (3) 高圧の発生する頻度を決定すること。
- (4) 揚圧力について明らかにすること。
- (5) 波圧時間曲線（揚圧力を含む）と構造物の運動との関係を見出すこと。

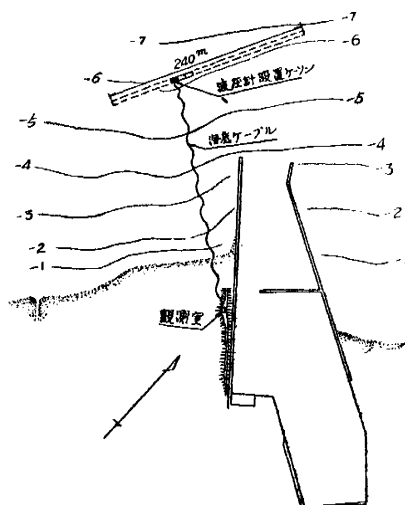
(6) 最終的には設計波圧（圧力強度、圧力分布）を設計に選んだ波の特性を函数として表現すること。そして構造物の安全率を既知の理論的基礎の上におくこと。

上記の研究を遂行する上に、実測が不可欠であることは明白である。実測には、実験室での水路模型実験と、実際の海の波についての現場測定があるが、この二方法は共に平行して進められるべきである。現場測定は機構解析に困難を伴うが、問題を直接的に取扱う点に意義があり、特に上記 (3)、(5) の各項についてその感が強い。水路実験では現象を簡潔にすることができるので、微視的な解決が望まれる。例えば上記 (1) のごときである。ともかく研究に当つては、この両方法が互に連絡を密にすることが必要であり、これによつて研究の無駄を省き、研究の成果を高めるのに役立つのである。

5. 羽幌港における波圧測定について

波圧測定の目的は前に述べたとおりであるが、その事例は我国は勿論、外国にもその例が非常に少ない。そこで北海道開発局では、率先して羽幌港に、我国最初の大規模な波圧観測所を設置した。羽幌港（図—3）は、日本海に面し、冬期間大波浪の襲来が絶えない。また羽幌港では、目下防波堤の建設を急ぎつつあり、このため既設防波堤と違つて計器の取り付けが容易であり、基礎が新しいので揚圧力の測定に都合良く、また潮差の少ないことなど波圧測定に非常に適している。防波堤の法線は $N30^{\circ}E$ 方向にあり、風波の主方向に対して直角に面している。計器を取りつけたケーソンは、汀線から約 250 m の距離にあり、水深は -6.0 m である。

波圧計は、電気抵抗線歪計を利用した運研型波圧計を使用した。この他に計器を比較した不測の事故に基



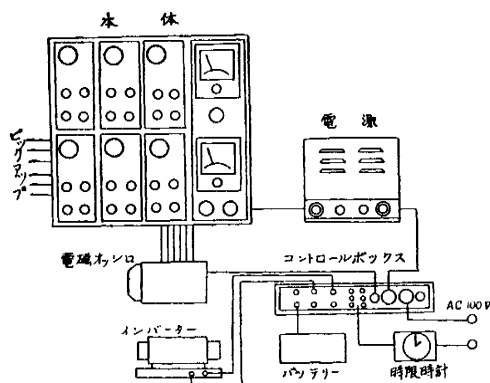
図—3 羽幌港平面図

えて、開発局土木試験所の広井式改造型と、前述運研型波圧計と同じ機構の土試型波圧計の以上 3 種を設置した。

波圧計を設置したケーソンには、この他にステップ型波高計および加速度計を取りつけたが、以下これらの計器について述べる。

(1) 抵抗線歪計型波圧計運研型

構成は図—4 に示すとおり波圧計ピックアップ、本体、電磁オシログラフ、電源、コントロールボックス、時限時計、インバーターおよびバッテリーからなつてい



図—4 運研型波圧計の構成

る。ピックアップは原理的にリング型の鋼材に Bonded Type Strain-Gauge を取り付けて波圧によつて生ずるリング内の Strain を検出し、電気的出力に変換する。本体は、ピックアップに加える電圧を発振増幅する発振部と、ピックアップからの電気出力を増幅し、位相弁別する増幅部よりなつている。発振部はウィングリッジ回路により 1,500 c/s を発振している。電源部においては、AC 100 V を昇圧整流し、電圧安定装置により電圧を安

定にし、直流 250 V を本体に供給している。コントロールボックスは時限時計により、2 時間毎に 15 分間電源が入り、後の 10 分間本体が作動するようになっている。また停電の時は、コントロールボックス内のリレーが自動的に作動して、インバーターにより AC 100 V を得るようになっている。以上各部性能は下記の通りである。

- i 電 源 AC 100 V, 50 c/s または 60 c/s, あるいは 24 V バッテリー
- ii 消費電力 AC 100 V の時約 250 W, インバーターの時約 420 W
- iii 測定精度 フルスケールの $\pm 2\%$ 以内
- iv 測定方法 偏位法
- v 搬送周波数 1500 c/s $\pm 10\%$

(2) 抵抗線歪計型波圧計土試型

当初波圧計として磁歪式を取りつける予定であつたので計器の比較の意味で取りつけることとしたのであるが、磁歪式を抵抗線歪計型に変更したので同一型式となつたが、一応計器の予備として当初の計画どおり取りつけることとした。機構は前記迎研型のと同じである。

(3) 広井式改良型波圧計

波圧計としての構造は広井式と同じであるが、記録部をローラー接触による抵抗変化を記録する方法に改造したものである。遠隔方式には、取扱いのできる限り簡単なしかも安定性および直線性のよい図—5 に示した電気回路を採用してある。抵抗 R の両端に一定電圧をかけ、可変幅間タップ T と (—) の間に電圧計 V を入れると、 V の内部抵抗が R に対し相当大きい場合、電圧計 V はタップ T の変化量に比例した電圧変化を示す。この図—5 の回路は基本回路であつて、実際の波圧計は、タップ T の変動を受圧板の変位に、電圧計 V をオシログラフのガルバーにおきかえたもので、 $R=500\Omega$, V の内部抵抗 $\approx 8\text{ K}\Omega$, $E \approx 20\text{ V}$ である。

(4) 加速度計

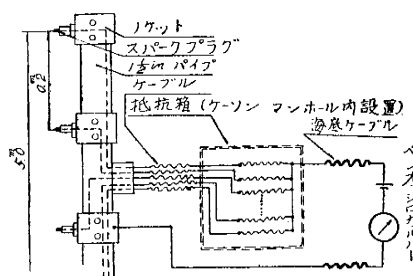
ケーソンに波圧が加つた時、ケーソン自体の運動を知るために加速度計を設置した。

使用した加速度計は、容量土 1 g, 搬送周波数 5000 c/s, 固有振動数 22 c/s, 公称ブリッジ抵抗 120 Ω , 最大入力電圧 22 V, 一方向成分の加速度を測定できる。

(5) ステップ型波高計

衝突波高を測定するために図—6 に示すステップ型波高計を取付けた。スパークゲージは腐食の点で白金製が望ましいのであるが、高価のため今回は真鍮製とし、腐食の都度交換する方針とした。またプラグが波をかぶつ

た後、直ちに水滴がプラグから離れて絶縁状態となることが必要で、このためにプラグにシリコンオイルを塗布することにした。

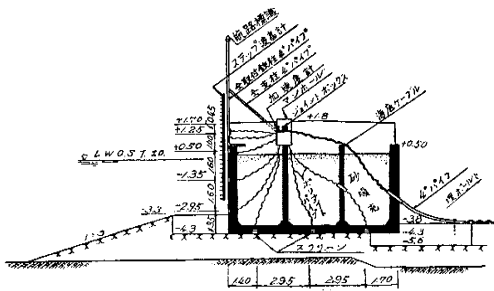


図—6 ステップ型波高計

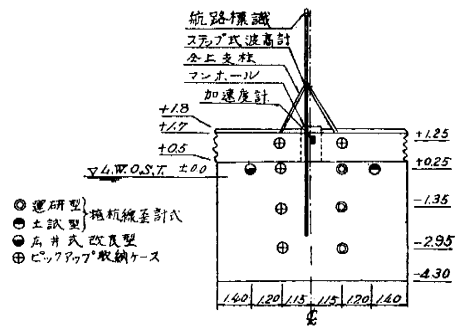
波圧計ピックアップの取付け位置は図—7、図—8に示すように、底面に 3 個、正面壁に 5 個、その他に将来他の型式の波圧計を取付け得るようにピックアップ収納ケースを 5 個取付けた。この収納ケースは留萌港ケーソンヤードにおいて、ケーソン製作と同時にケーソン壁内に埋設した。特にケーソン底面収納ケース前面には写真に見るようにスクリーンを設けてケーソン据付の際、波圧計受圧面と基礎と接触するのを防ぐ構造とした。ピックアップからのリードは、ポリナイトパイプを通してジョイントボックスで海底ケーブルと連結せしめた。ジョイントボックスは、ケーソン上部のマンホール内に収められ、修理検査および保守に便ならしめ、またマンホール自体水密構造になっているが更にジョイントボックスも水密構造とし不測の事故にそなえるようにした。海底ケーブルは図—9 にその断面を示したが、ポリエチレンで被覆された 1.2 mm の線心を 4 心撚り合せ、更に充実形にポリエチレン被覆したものを 9 本集合し、その周りに 6 mm 亜鉛鍍鉄線 26 本をもつて鍍装したものである。この際各ピックアップの 4 心ずつは各々その隣接する部分のピッチを適宜変えることにより、各回路相互間の電氣的干渉を防止し得るようになっている。海底ケーブルはマンホール内ジョイントボックスと陸上観測室間 330 m (実延長 310 m) 敷設した。ケーブル敷設はケーソンから陸上部へ向つて行い、その要領は解船にケーブルドラムを乗せ舵からテコでブレーキをかけながら敷設して行き、浅くなつた所で曳船に横抱きした解船を、汀線に平行に走らせ、ケーブルの下に伝馬船を入れてから、ケーブルを陸上へ引き張りあげた。敷設に当つては、ケーブルと地盤との摩擦を極力避けるよう充分に注意を払つた。

6. 結 語 (今後の観測について)

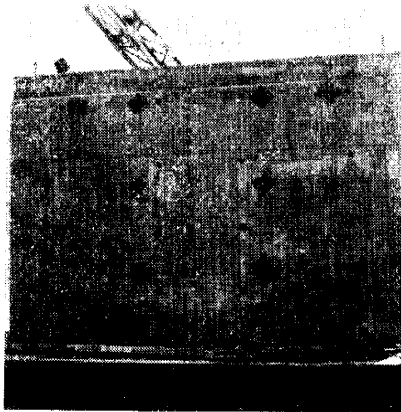
今年度は抵抗線型波圧計迎研型 6 個、土試型 1 個、広井式改良型波圧計 1 個計 8 個を以つて 6 箇所の波圧を



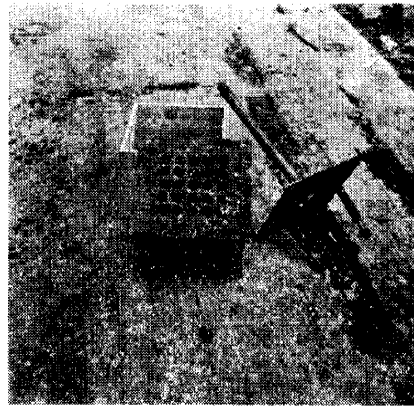
図—7 防波堤断面図



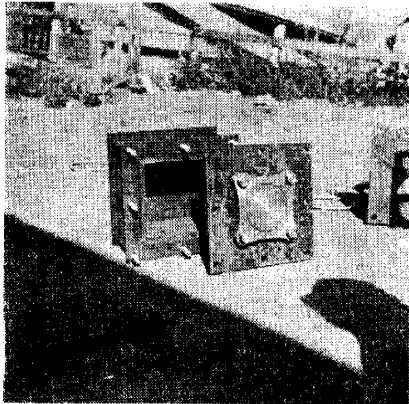
図—8 防波堤正面図



写真—1



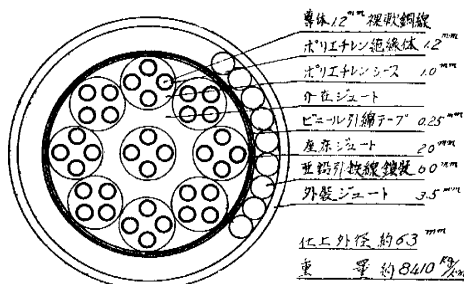
写真—2



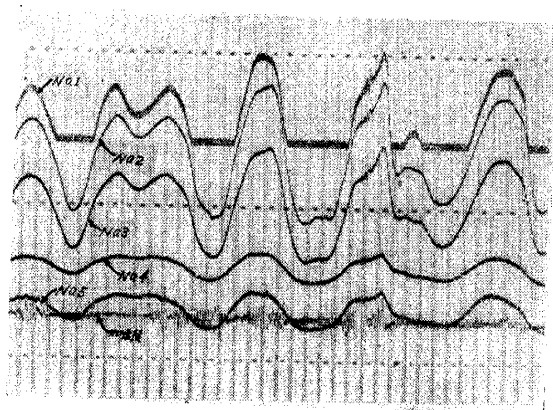
写真—3



写真—4



図—9 海底ケーブル断面図



写真—5 観測記録の一例

観測し、同時に水圧式波高計 2 台、宇多居式波高計 1 台を以つて 3 箇所の沖波を、またステップ型波高計をもつて衝突波高を観測し、更に加速度計により、ケーソンに波によつて生ずる振動を取らえる予定である。これら観測結果は、第二報以下に報告する予定である。

なお、来年度は、波圧計の比較として、録数式、磁歪式などの計器も取付けて見たいと考えており、また、変位計を取付けて、ケーソンの加速度と同時に変位についても調べる予定であり、文字どおり波圧センターとしての規模を備えて行く方針である。前に述べたごとく、海の波は現象として非常に複雑であり記録の解析も容易でないことが想像されるが、パイオニヤーとしての気魄をもつて今後の調査に当る所存である。