

## 羽幌港における波圧測定について (第二報)

正員 北海道開発局港湾部 栗 林 隆  
 正員 北海道開発局留萌開発建設部 宇田居 吾一  
 正員 北海道開発局土木試験所 村 木 義 男  
 正員 北海道開発局港湾部 高 橋 基 次  
 正員 同 上 石 田 直 之

## ま え が き

さきに第一報<sup>1)</sup>において観測の目的並びに観測施設についてその概要を述べたが、本第二報ではこれまでに得た観測結果についてその一部を報告する。

昨年(昭32)11月中旬観測計器の取付けをほぼ完了し、その後約2ヵ月にわたり観測を行った。多数の計器をすべて故障なく同時に作動させることは、特に野外を対象とする実験ではむずかしいことであつて、今回の観測もこの点十分なものではなかつたが、幸い観測期間中多くの時化にめぐまれ比較的良好な記録をとることができた。

本報告の内容は、先ず実際の海岸防波堤に仿らく波圧を形の上から分類し、次にこの分類に従つて、頻度、最大波圧、ケーソンの振動などについて二、三の性質を述べたものである。

## 1. 波 圧 の 形 態

## (1) 分 類

観測は昨年(昭32)11月中旬から約2ヵ月行われた。この間連日時化にめぐまれ、風浪、うねりをふくむ非常に多くの種類の波圧記録が得られた。波浪の規模も例年発生しうるほぼ最大のものが含まれている。したがつて、得られた記録は当港に來襲する波浪波圧の特性を十分表わしているものと考えられる。記録をみると波圧の形状は実にその種類が多い。これは勿論來襲する波の性質、海底地形、構造物の形状位置などに支配されるものと思うが、とも角考えられるすべての形状が含まれている感

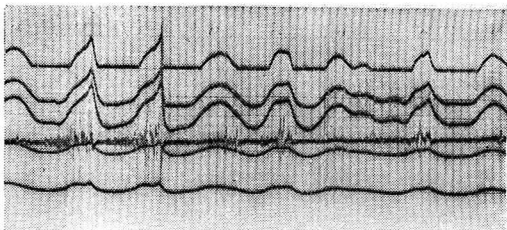


写真-1

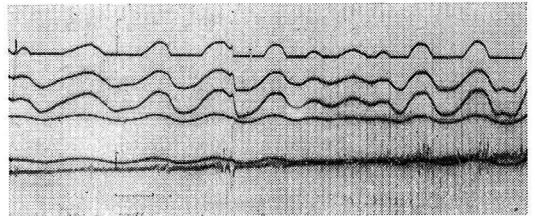


写真-2

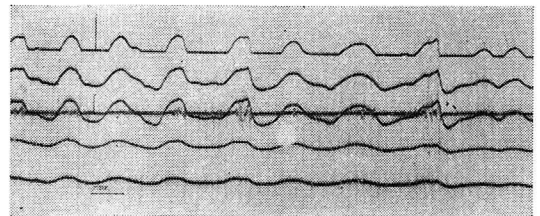


写真-3

じがする。記録の一例を写真-1~3に示した。

得られた波圧波形(静水面における波圧)を形の上から図-1のように分類した。すなわち、全体をA, B, C, Dに大別し、それぞれについてaからgまで細分した。もちろんこれらは縦横互いに関連があり、程度によりどち

|   | A | B | C | D |
|---|---|---|---|---|
| a |   |   |   |   |
| b |   |   |   |   |
| c |   |   |   |   |
| d |   |   |   |   |
| e |   |   |   |   |
| f |   |   |   |   |
| g |   |   |   |   |

図-1 波圧型分類

らにもとれる場合もあるが、この分類方法で今回の記録はすべて整理されたので一応適切な分類方法と考えてよからう。各型について若干の説明を加えると

a) A型： 前傾で頂部が丸みをもつた重複波的形状で、風浪、うねりいずれの場合も現われるが、概して風浪の場合に多い。ただし、gは頂部が角ばつてD型に近い。B、C型についても同じ。

b) B型： 前後対称で頂部が丸みをもつた重複波的形状で、風浪、うねりいずれの場合も比較的多い。

c) C型： 後傾で頂部が丸みをもつた重複波的形状で、風浪の場合も現われるが周期の長いうねり性の波の場合に多い。

d) D型： 前者はいずれも頂部が丸みをもつたものであつたが、この型は急峻な上昇をなし、しかも、頂部がシャープな角度をなしているのが特徴で砕波的風浪の場合に現われている。

以上の分類のうちA、B、C型はいわゆる重複波型、D型は砕波型であつて、室内実験で観察されるものとほぼ同様な形状を示している。各波圧型によりその性質が異なることは当然予想されるが、特にD型は後述するように特殊な性質をもっている。このD型波圧については最近特に注目され室内実験でも研究<sup>10,11)</sup>がすすめられているが、堤体の安定性という立場からみた場合、これは側圧分布、揚圧分布をも考慮した堤体の運動学的見地から検討される必要があると考える。

## (2) 各波圧型の頻度

防波堤の安定を論ずる場合、もちろん、その波圧の大きさが第一義的に重要であるが、同時にその頻度ということもあわせ考える必要がある。この意味において各波圧型の頻度を調べてみた。得られた記録43例（1例は10分から20分の観測である）、約3,900個の波圧波形を分類し、その頻度を示すと図-2および図-3のとおりである。図-2はA、B、C、Dに大別した場合で、図からわかるようにA型が非常に多く約45%、B型は約27%でこれにつき、C型は約24%、問題のD型はわずか4%にすぎない。これをさらに細分したものが図-3である。

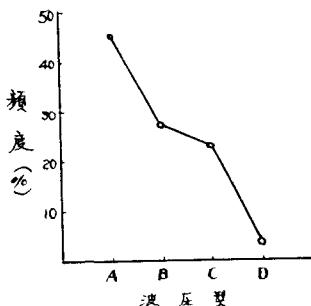


図-2

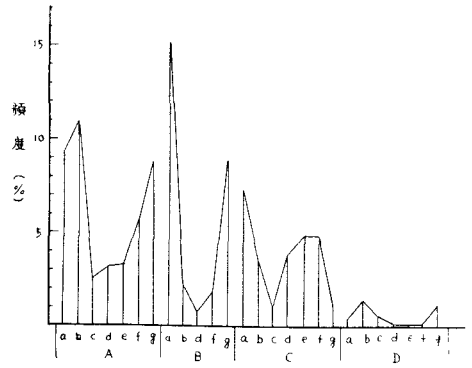


図-3

この図でD型ではb、gが多いが、これは砕波になりかかっているものであると判断される。半砕波的Dのc型は0.8%程度、純砕波的と思われるDのd型は、全波数約3,000個のうち、わずか2個か3個にすぎなかつた。

砕波的D型はいかなる場合に多く出現するか、これは図-4に示したように波の周期がほぼ8sec(1/3最大周期)前後のときに多く現われる。しかも、このときの波圧は比較的大きな値を示しており、波圧の大きな場合は当然波高も高い場合が多いから、この点を考えると当港においては、D型は周期8secくらいでSteepnessの大なる波の場合に多く出現するものと考えられる。いしかえれば、砕波的波圧D型は条件がある程度そろえば集中的に出現するものと考えられる。

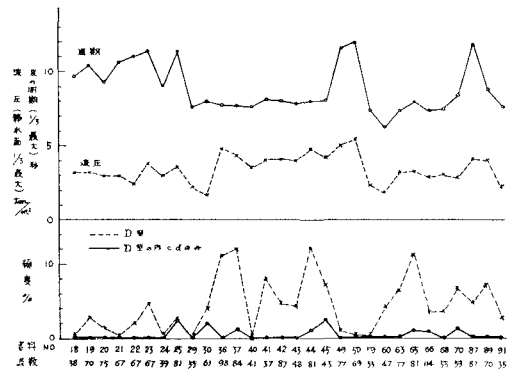


図-4

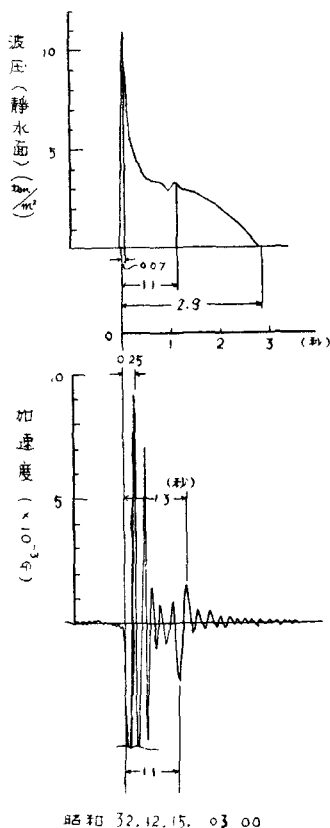
この砕波的波圧の出現およびその頻度は場所によつて異なることはもちろんであるが、当港の地形および構造物の大きさ、位置などは特に他と異なるものでないから、この点を考慮にいれば、上記のことは一応この近海に適用してさしつかえないものとする。わずか2ヵ月ほどの記録から得たもので十分とはいえないが、時期が年間の最も波浪来襲度の、大なる冬期であつたことからみて、かなり信頼してよいものと思う。

## (3) 観測された最も顕著な砕波型波圧の形状

室内実験における砕波型波圧波形 (Gifle および Bourrage をともなつた波形<sup>5)</sup>) の例はよくみられるが実際の海岸における例はほとんどみあたらない。

今回われわれが観測した最も衝撃的な波圧波形の形状 (昭 32. 12. 15. 03.00) は 図-5 に示したとおりである。上は静水面における波圧波形、下はケーソンの加速度振動の記録である。波圧の大きさは、Gifle (Peak, 平手打) で  $11 \text{ t/m}^2$  (観測中の最大値), Bourrage (腰掛) では  $3.2 \text{ t/m}^2$ , 両者の比は 3.5:1, また、Gifle までの時間は 0.07 sec (1/10 sec の order), 波浪周期は 7.3 sec であつた。図からわかるように実験室でみられる典型的な衝撃的波圧波形とほとんど同じ形状である。このように実際にも衝撃的波圧の顕著なものが存在することは、室内実験と実際との関連において重要な意味をもつものであり、今後の波圧研究の上にも、一つの新しい貴重な資料といえよう。また、このような衝撃的波圧の頻度がたとえ小さいものであつても、その作用いかによつては重視されるべきものであると考える。

下図振動は、この時に生じたケーソンの振動の加速度で、この大きさも観測中最大のものである。上図の波圧とくらべてみると波圧の Gifle に対応して一つの振動が



昭和 32. 12. 15. 03 00

図-5

現われ、また Bourrage に対応していま一つの振動が現われ、しかも Bourrage 部には振動周期に応じた圧力の変化が出ていることは興味ある現象である。

## 2. 最大波圧について

### (1) 波圧型と最大波圧および最多波圧

いかなる型の波圧が大きな値をもつか、また波圧型により最多波圧がどのように違うか、観測した範囲の資料を対象に波圧型による相異をしらべた。これらの関係を示すと 図-6 のとおりで、これから次のことがわかる。

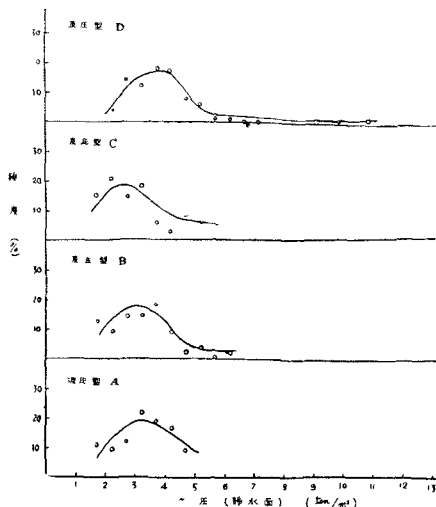


図-6

a) 波圧型 A では最多波圧  $3.5 \text{ t/m}^2$ , 最大波圧  $5 \text{ t/m}^2$  である。

b) 波圧型 B では最多波圧  $3.0 \text{ t/m}^2$ , 最大波圧は  $6 \text{ t/m}^2$  を越える。5~ $6 \text{ t/m}^2$  のものが少数ではあるが存在することは A 型と異なる点で、これは B 型にはうねり性の大きな波が入っているためである。

c) 波圧型 C では最多波圧  $2.5 \text{ t/m}^2$ , 最大波圧は  $6 \text{ t/m}^2$  程度である。B 型にくらべ最多波圧が小さくなっている。最大波圧は  $6 \text{ t/m}^2$  でほぼ同じであるが、その頻度は大になつている。これはうねり性波浪が多く含まれているからである。

d) 波圧型 D では最多波圧  $4 \text{ t/m}^2$ , 最大は  $11 \text{ t/m}^2$  である。この型は最大波圧, 最多波圧ともに他のいずれよりも大きく特色ある存在である。

以上のことから、砕波の波圧 D 型が他と比較ならぬほど大きな波圧を示すこと、したがつて、波圧を大きさだけにおいて問題にする場合最も重視されるべきものであることがわかつた。また、当然当港の最大波圧はこの D 型により発生することが予想される。

### (2) 波の周期と最大波圧

波の周期と波圧との関係を示すと 図-7 のとおりである。図に示すように最大限界として (1), (2), (3) の三つの曲線を引くことができる。曲線 (1) は波圧型 D に対するもので、7~8 sec が最大を示す。(2) は A, B, C 型に対するもので、同じく 8 sec 前後が最大を示す。(3) は特にうねりに対するもので、11 sec が最大を示す。これらのことから風浪については 7~8 sec の波が大きい波圧を生ずることがわかる。観測中の最大波圧  $11 \text{ t/m}^2$  もこれに属する。また、D 型の最大は他の型の最大のほぼ 2 倍となっており、一方うねり性波浪は最大  $6 \text{ t/m}^2$  を示し、D 型にはおよばないが A, B, C 各型より大である。

以上のことから当港における最大波圧は周期 7~8 sec の波により発生することが予想できる。

### (3) Gifle (または Peak) までの時間と最大波圧

Gifle (Peak) までの時間と波圧との関係を示すと 図-8 のとおりである。最大限界は (1) の曲線で示したとおりで、Gifle までの時間が短いほど大きな波圧を生ずることを示している。この限界曲線はその場所特有のもので、その場所の最大波圧を規定する一つの特性曲線とみなすことができるのではなかろうか。この曲線から当港の最大波圧 (静水面における) を推定すればほぼ  $14 \sim 15$

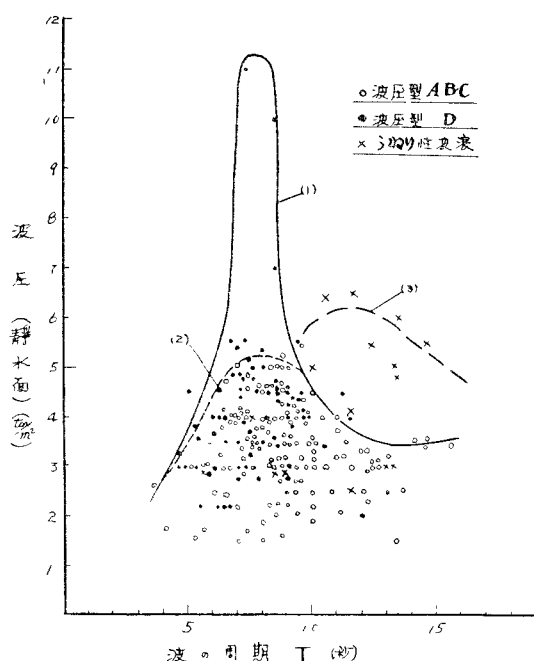


図-7

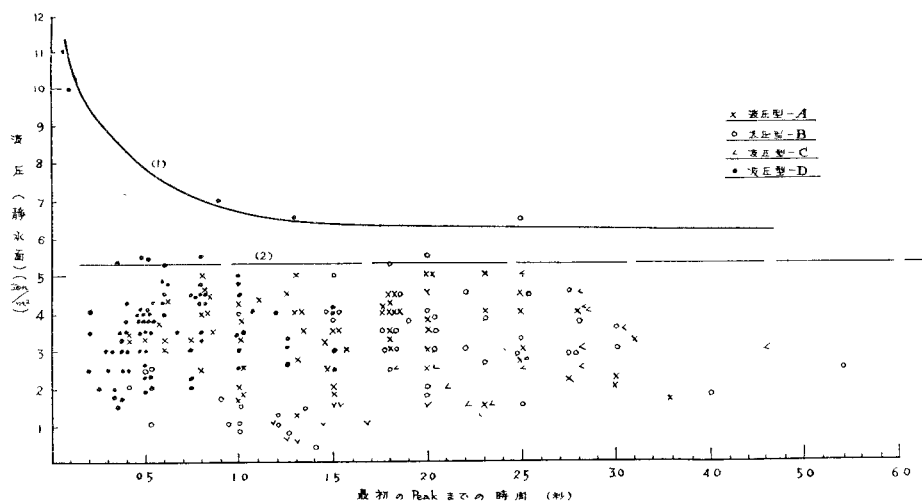


図-8

$\text{t/m}^2$  となる。

以上述べたことから、羽幌港における最大波圧は周期 8 sec 前後の砕波性波圧 D 型により発生し、その大きさはほぼ  $14 \sim 15 \text{ t/m}^2$  と推定される。

広井式によりその時の波高を逆算すれば約 10 m となるが、当港現島堤付近ではこのような大きな波の出現はこれまでの観測最大波高 4.5 m から考えて到底予想することができない。また、Minikin の式<sup>6)</sup>により逆算すれば 1.3 m となるが、これは時化の状況から判断して小さすぎる。これらのことから考えると、静水面における波

圧は、広井式では危険側にあり、どちらかといえば Minikin の傾向を示しているようだ。しかし、その作用時間は非常に短いので、これの堤体におよぼす影響については今後の研究を必要とする。

### 3. 砕波型波圧の Bourrage 圧

砕波型波圧 (D の c, d 型) の Bourrage (腰掛) 部の性質について室内実験と比較する意味で波の周期と Bourrage 圧力との関係をしらべた。図-9 はこの関係を示すものでプロットした点は大部ばらつくが一つの直線的関

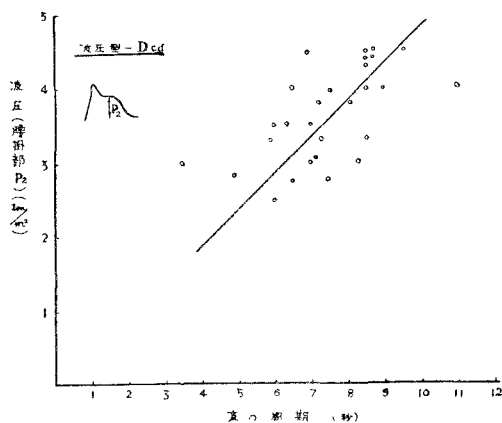


図-9

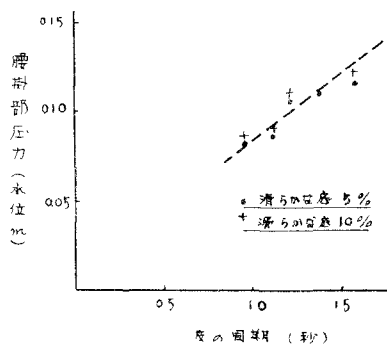


図-10

係にあるとみれる。図-10は Larras<sup>9)</sup> の行つた実験結果を示したものであるが、実験と実際とほぼ一致するといえる。

#### 4. ケーソンの振動測定

##### (1) 測定の目的

堤体の安全性を研究するには、その原因となる波浪およびこれにともなう堤体に似らく圧力をしらべることはもちろん必要であるが、さらに、これら原因によつて堤体自体がどのような運動をするかをしらべなければならぬと考える。これらの間の関係が明らかになつて始めて解決が得られ、構造物設計についての対策がたつものとする。この意味においてケーソンの振動測定を実施した。われわれの場合変位振動そのものがほしいのであるが、今回はとりあえず電気抵抗歪計式加速度計（共和無線製、固有振数 22 c/s、容量  $\pm 1$  G）1個を取りつけ、変位振動計選定の基礎資料をとることを直接の目的とした。

現在までのケーソン振動測定の例としては、アルジエー港における例<sup>7)</sup>がある。これはピエゾ水晶加速度計を用いたもので、振動計の性能は固有周期 0.001 sec、容量 0.5 gal ( $\text{cm/sec}^2$ ) である。これを鉛直、平行、直角に 3

組用い、3箇所測定したもので、その結果は

a) 1~1,000 c/sec の範囲では波による堤体の固有周期は認められなかつた。

b) ケーソンが波によりゆれるだけであつた。の二点である。

##### (2) 測定された振動の周期

測定された振動周期は図-11のとおりで、 $0.2 \pm 0.05$  sec である。これはチャート紙の送り速度の比較的速い明確な記録から得たものである。1個の波浪により発生する振動の各部における周期差はあまりないので、全体の平均をその波浪による振動の周期とした。振動計の固

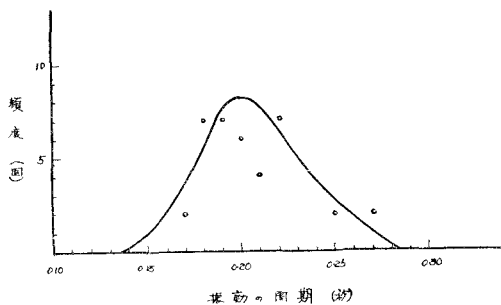


図-11

有周期が 0.05 sec 程度であるから両周期を比較すると、われわれは加速度を記録したと考えてよい。この測定された振動周期が普通の地盤の固有周期の order であることから考えると、この現象は地盤と同じような弾性体の上にケーソンという剛体がのつて振動しているというように解釈される。平行、回転の運動をどのようにともなっているかは未知であり、今後の研究課題である。

ともかく今回の観測により周期 0.2 sec 程度の振動の存在することがわかつたが、これは前記アルジエー港における観測結果と異なつたものであり、この点注目値すると思われる。

##### (3) 測定された加速度の最大

測定された加速度の最大は図-5に示した最大波圧に伴うもので、その大きさは  $18 \times 10^{-3}$  G 程度であつた。

#### 5. 波圧と振動との関係

##### (1) 位相関係

記録された波圧波形と振動波形とを比較してみると、振動発生位置が波圧波形に対し、一定した位相的關係にあることがわかつた。数多くの資料からこれらを分類してみると、先に分類した波圧型と密接な関係にある。図-12, 13にこれらを模式的に画いて示した。図の波圧は静水面の波圧である。これから次のことがわかる。

a) 波圧型 A, B, C については次のおのこの時に振動が発生する。一部しか発生しない場合もある。

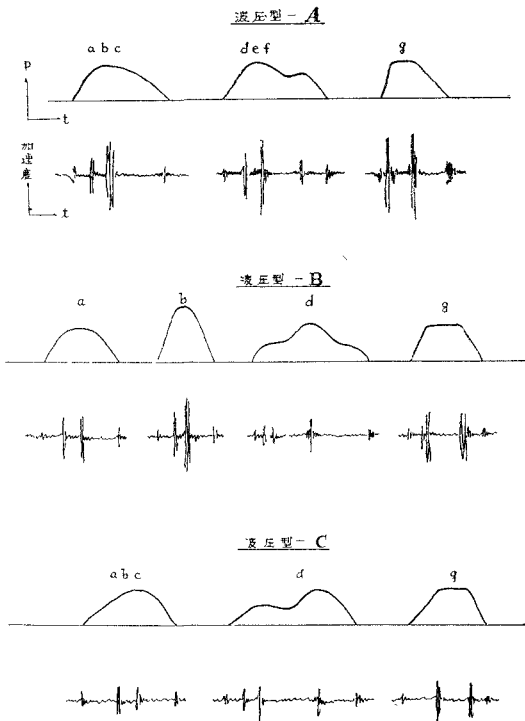


図-12

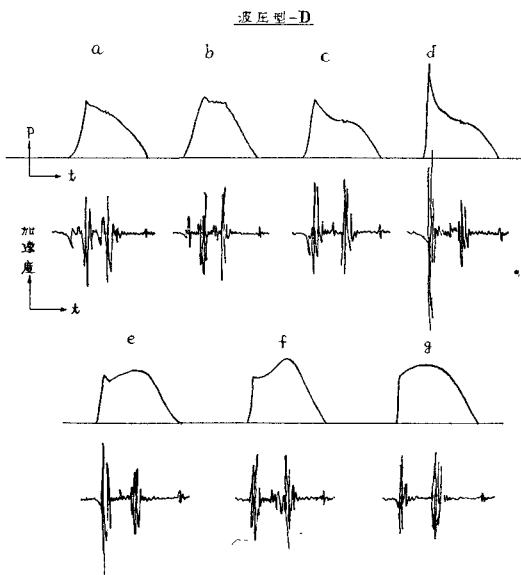


図-13

- i) 波が静水面（受圧部）付近に達したとき
- ii) Peak との間における変曲点付近（ほぼ波が天端に達したとき）
- iii) Peak 近傍
- iv) 再び静水面に復したとき
- b) 波圧型 D については、次のおのののときに振動

が発生する。

- i) 波が静水面（受圧部）付近に達したとき
- ii) 第 1 Peak 近傍 (Gifle)
- iii) 第 2 Peak 近傍 (Bourrage)
- iv) 再び静水面に復したとき

この D 型の場合の振動の大きさは A, B, C いずれよりも大きい。また、上記振動発生のおののの iii) の場合はこれの対応する波圧の部分 (Bourrage) にほとんど必ず微小な圧力変化が記録される。これは興味ある現象で、現体振動が逆に圧力変化として現われるのではないかと考えられる。

## (2) 大きさ関係

波圧と振動（加速度）の振幅の大きさ関係を示すと図-14～17 のとおりである。これから次のことがいえる。

- a) 波圧型により、発生する加速度の最大限界が異なる。すなわち、D 型が最も大なる加速度振動を生じ、A 型がこれに次ぐ。B 型は A 型よりずつと小さく、C 型は B 型よりさらに小さい。
- b) A, D 型では波圧の増大にともない最大加速度の大きさも直線的に顕著に増す。
- c) B, C 型では波圧が増大しても最大加速度の大きさはほとんど変わらない。

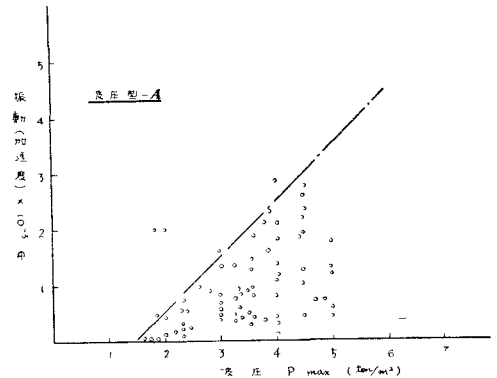


図-14

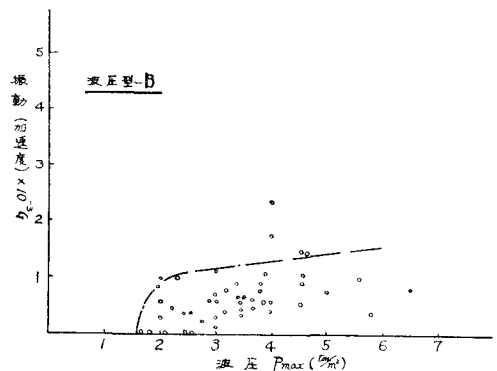


図-15

## 6. 結 言

現在までの資料からわかつたことを要約すると次のとおりである。

(1) 波圧の形態は多種多様であるが、重複波型 (A, B, C 型) と砕波型 (D 型) に大別される。

(2) 羽幌港における各波圧型の頻度は A, B, C, D の順で砕波型 D はわずか 4% にすぎない。しかし条件がある程度そろえば集中的に現われるものと考えられる。

(3) 室内実験で観測されるような非常にシャープな典型的な衝撃的波圧が実際に観測された。

(4) 羽幌港における最大波圧は周期 8 sec 前後の砕波の波圧により発生し、その大きさは  $15 \text{ t/m}^2$  程度と推定される。

(5) この最大波圧は作用時間が非常に短かいものであるから、ケーソンに対する作用については今後の研究が必要である。

(6) Bourrage における波圧と周期との関係は Lorrass の実験におけるものとはほぼ同じ傾向を示した。

(7) 観測されたケーソンの振動周期は 0.2 sec 前後である。

(8) ケーソンの振動発生と波圧波形とは位相的に一定の関係がある。

(9) 砕波型波圧 D が最も大きな加速度振動をともしその値は波圧の増大とともに直線的に増す。

以上のとおりであつて、現在までのところ問題点と定性的概観をしり得たにすぎない。今後は波浪と波圧との関係、側圧分布揚圧分布の特性など定量的段階に入り、また堤体の運動についても関係計器を充実してその運動機構を調べたいと考えている。

## 参 考 文 献

- 1) 栗林・宇田居・村木・高橋・石田：羽幌港における波圧測定について (第一報)；技術資料，第 14 号，昭 33，土木学会北海道支部。
- 2) 浜田・光易・長谷：構造物に作用する波力；海岸工学講演集，1956，土木学会。
- 3) 林・服部：孤立波の砕波とその波力について；海岸工学講演集，1956，土木学会。
- 4) 永井・八銀：砕波の波圧について；海岸工学講演集，1957，土木学会。
- 5) 松尾訳：防波堤に作用する力特に砕波に関する研究；港湾，第 17 巻，第 8 号。
- 6) R. R. Minikin: Wind, Wave and Maritime Structures; 1950.
- 7) 松尾訳：鉛直壁面に有する防波堤に作用する波力；港湾，第 18 巻，第 3 号。

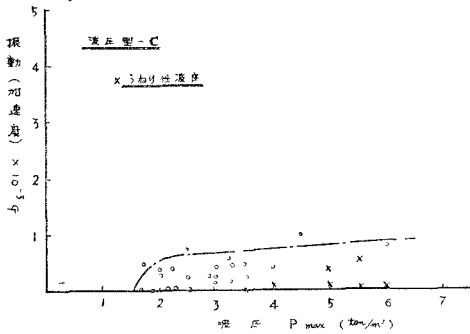


図-16

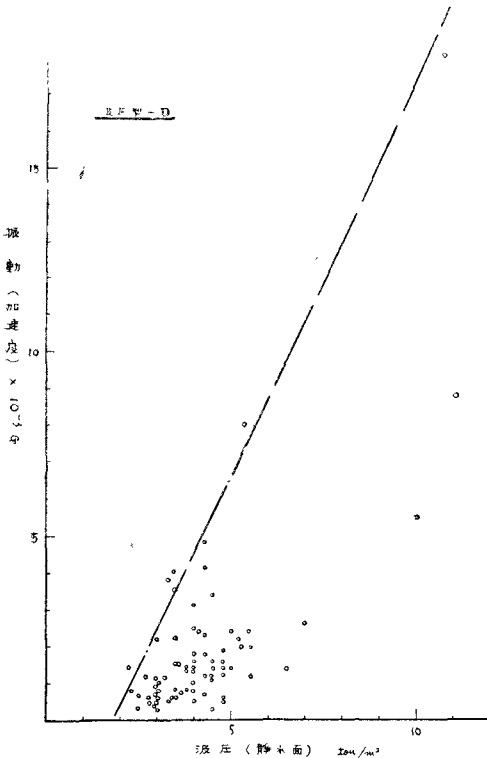


図-17

以上のことから波圧の大きさと加速度の大きさとの間に比較的明瞭な関係のあることがわかつたが、これはあくまでも加速度についてであつて、ケーソンの運動変位、運動機構についてはまだなんらわからない。しかし、少なくとも波によりケーソンが絶えず振動していることは明らかである。たとえわずかな振動でも、これがたえずくり返されることは注目すべきことで、これによりケーソンが傾斜することは十分考えられる。現に当ケーソンは前端において 15 cm 程沈下傾斜している。