

波による防波堤の振動について

—— 羽幌港における観測結果 ——

村 木 義 男*・高 島 和 夫**

1. ま え が き

従来、防波堤の安定性に関する問題は、もっぱら静力学的立場において取り扱われてきたが、最近は動的な取り扱いにその研究方向が向けられてきた。筆者は、動的な取り扱いにあたって、まずできるだけ実際の現象をみる必要があると考え、羽幌港において防波堤の振動観測を実施した。

この種の振動観測は、これまでほとんどなされていないので、取りあえず加速度振動計による予備観測を実施した。この観測により、防波堤にはたえず周期0.2秒前後の振動が波によって生じていることを認め、この振動は、その周期から判断して、捨石基礎という弾性体の上に堤体という剛体が載った一つの振動系から生ずるものであるという推測をなし、これを先に報告¹⁾した。林博士はその後このような振動、いわゆるロッキング現象の存在を前提として、防波堤の安定性を動的に取り扱い、注目すべき新しい理論^{2), 3), 4)}を発表している。

筆者は、その後、あらたに変位振動計4台を設置して観測を行ない⁵⁾、先に報告した振動に関し、いま少しくわしくその挙動を知り得たので、ここにその結果を報告する。

2. 観 測 方 法

(1) 振 動 計

観測に使用した振動計の種類とその特性はつぎのとおりである。

a) 電気抵抗線ひずみ計型振動計 電気抵抗線ひずみ計を利用した振動計で、その固有振動数は比較的大きく、われわれの場合加速度振動計として使用した。使用数1組、製作メーカー共和電業 K K、その諸定数はつぎのとおりである。

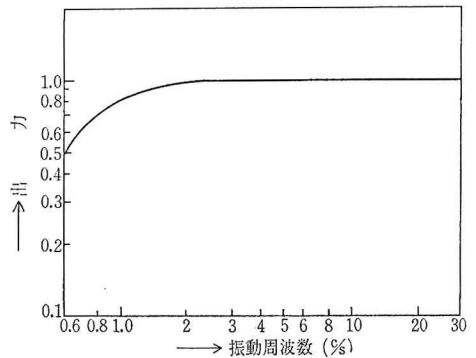
固有振動数	22 c/s
容 量	±1G
搬送周波数	5 000 c/s

b) 電磁型振動計 強力な磁石をもつ可動線輪型換振器と低周波積分増幅器とからなるいわゆる電磁型振動計で、比較的長い固有周期を有し、われわれの場合変位

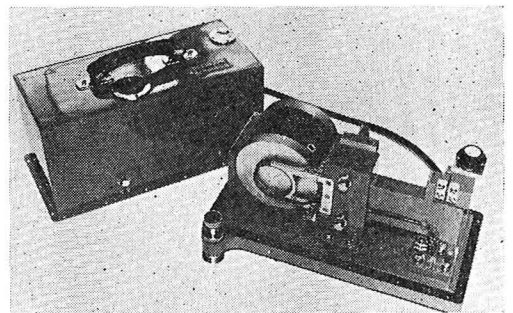
表—1

成 分	水 平 動	上 下 動
固 有 振 動 数 (c/s)	1.0	1.0
振 子 慣 性 能 率 (gr cm ²)	1.84×10^5	1.84×10^5
振 子 質 量 (gr)	2.5×10^3	2.2×10^3
振子重心回転軸間距離 (cm)	7.3	8.2
電 圧 感 度 (volt/kine)	0.27	0.27
コイル直 流 抵 抗 (Ω)	10	10
外 部 回 路 抵 抗 (Ω)	54	54
減 衰 係 数	0.64	0.64

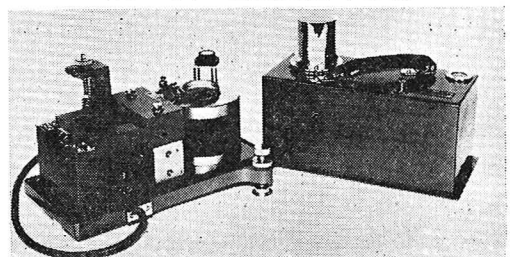
図—1



写真—1 (a) 電磁型振動計 (水平動)



写真—1 (b) 電磁型振動計 (上下動)



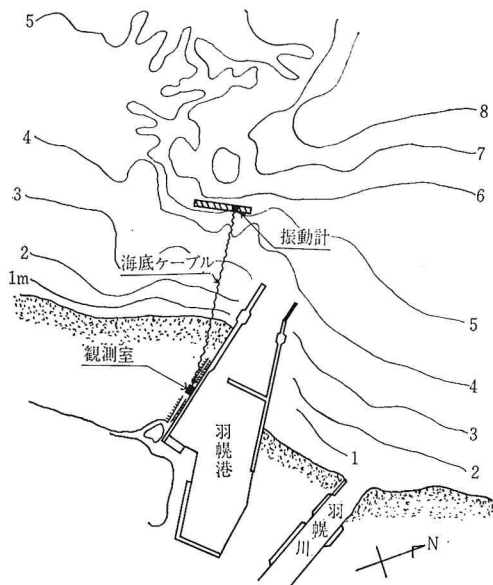
* 正会員 工博 北海道開発局土木試験所
** 北海道開発局土木試験所

振動計として使用した。使用数上下動、水平動各2組、製作メーカー勝島計器 K K、換振器のみの諸定数は表—1 のとおりである。また、積分増幅器と組み合わせた場合の総合周波数特性は 図—1 に示すとおりである。写真—1 (a),(b) に水平動、上下動それぞれの換振器の外観を示した。

(2) 観測方法

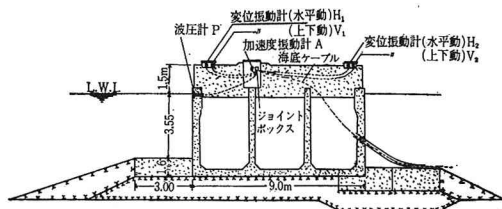
図—2 (観測実施時の羽幌港平面図) に見られる 離岸堤の一箇に加速度振動計ならびに変位振動計を取付け、海底ケーブル約 400 m を経由、陸岸に設けられた観測室内にてこれを増幅し、電磁 オッシロ グラフ により記録した。

図—2 羽幌港平面図



図—3 は、観測に使用した堤体の断面図で、加速度振動計はほぼ中央にあるマンホール内に、変位振動計は上下、水平を一組とし前端(沖側)と後端(岸側)に設けたマンホール内にそれぞれ設置した。写真—2、写真—3 は変位振動計の現地取付け状況を示す。

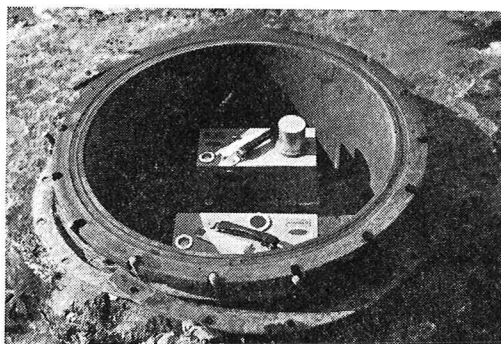
図—3 防波堤断面図



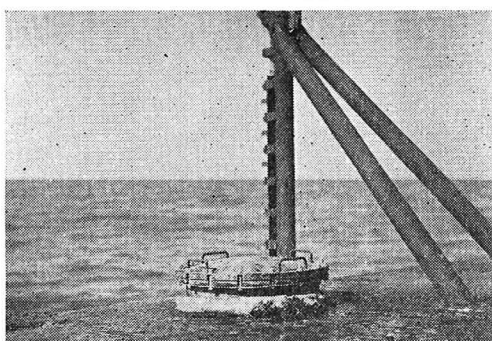
3. 加速度振動計による予備観測

防波堤の振動性状を調べるには、変位振動計を用い直接変位を測定したほうがよいが、波によって生ずる防波堤の振動については、これまで実測された例がほとんどないので、われわれはまず変位振動計選定の基礎資料を

写真—2 振動計現地設置状況



写真—3 振動計現地設置状況

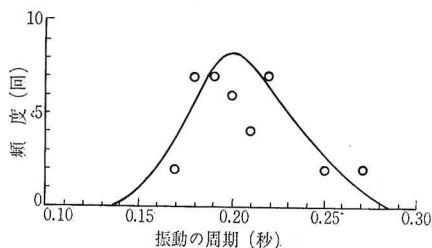


ることを主な目的として、前記した電気抵抗線ひずみ計型振動計による予備観測を実施した。これについては先に報告¹⁾してあるが、ここでおもな結果を記しておく。

(1) 卓越振動周期

波圧がある程度以上大きければ、波圧型のいかんを問わず常に堤体に振動が認められ、比較的明確な記録を基に振動周期の頻度分布を調べてみると 図—4 に示すとおりで、卓越振動周期はほぼ 0.2 秒であることがわかった。この振動周期は、使用した振動計の固有周期 0.045 秒に対し十分大きいので、加速度振動を測定したと考えて差し支えない。またこの振動は、捨石基礎部という弾性体の上に堤体という剛体が載った形で生じているものと推測される。

図—4



これまでに知られている防波堤の振動測定例としてアルジェー港における実測例²⁾があるが、これによると、1~1000 c/sec の範囲では堤体の固有振動は認められず、堤体が波によってゆれるだけという結果が得ら

れている。われわれの観測ではこれとは異なった結果が得られた。

(2) 振動発生位置

記録された波圧波形と振動波形とを対比してみたところ、振動発生位置が波圧波形に対しかなり一定した関係にあることがわかった。多くの資料から大体つぎのようなことがいえる。すなわち、重複波型波圧の場合、波が静水面付近に達したとき(微小)、波圧のピーク近傍(大)、ピークまでの中間(やや大)、波が静水面付近に復したとき(微小)それぞれ振動を生じ、また砕波型波圧の場合は、波が静水面付近に達したとき(微小)、Gifle(平手打部)の近傍(極大)、Bourrage(腰掛部)付近(大)、波が静水面付近に復したとき(微小)それぞれ振動を生じている。

(3) 波圧の大きさと振動振幅の関係

波圧の大きさと加速度振動振幅の最大限界との関係は図-5のとおりで、砕波型波圧と重複波型波圧とでは発生最大限界が異なり、砕波型波圧では重複波型波圧よりかなり大きな加速度を生じている。

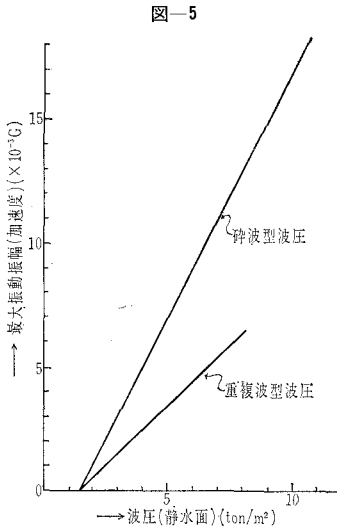


図-5

4. 変位振動計による観測

予備観測の結果、防波堤には波によって絶えず0.2秒前後の周期の振動が生じていることがわかったが、これは加速度振動として認められたもので、変位としての挙動についてはわからない。そこでわれわれは、0.2秒の振動を直接変位として記録することを企図し、あらたに振動計4台を設置し観測を行なった。

使用した振動計は先に述べた電磁型振動計である。上下動と水平動を一組とし、これを防波堤の前端および後端に一組ずつ設置した。

(1) 記録された振動波形

写真-4.1~4.8に各種波圧型および波圧の大きさに対する振動記録の例を示した。これらの記録例からわかるように、見かけ上二つの振動が認められる。すなわち、その一つは周期1~2秒とみられる比較的長い周期の振動、いま一つは周期0.2秒前後とみられる比較的短い周期の振動である。短い周期の振動は長い周期の振動

の上に載った形で現われている。

長い周期の振動は、波圧波形がゆるやかな上昇を示している場合には現われていないが、波形が前かがみになるにしたがって現われ出し、砕波型のように上昇が急しゅんな場合には顕著に現われている。使用した振動計では、1~2秒の周期の振動については、それが突然始まる連続した変位振動の場合は、ある時間経過後はある程度忠実な記録(修正必要)が得られるが、孤立した変位による強制振動の場合は記録は現象に対し忠実でなく、また振子の固有振動が大きく誘発され第2動、第3動が記録される。波圧による防波堤の運動は、突然始まる連続した変位振動とみるよりは、むしろ孤立した強制振動とみたほうがよい。したがって記録に現われている長い周期の振動は、初期の部分をのぞいては、誘発された第2動、第3動である公算が大きい。このように長い周期の振動については、その初期部は強制振動をいくぶん示しているものと考えられるが、全般的に種々問題があり、今後さらに固有周期の長い振動計により測定検討する必要があるので、本報告ではこれ以上言及しないことにする。

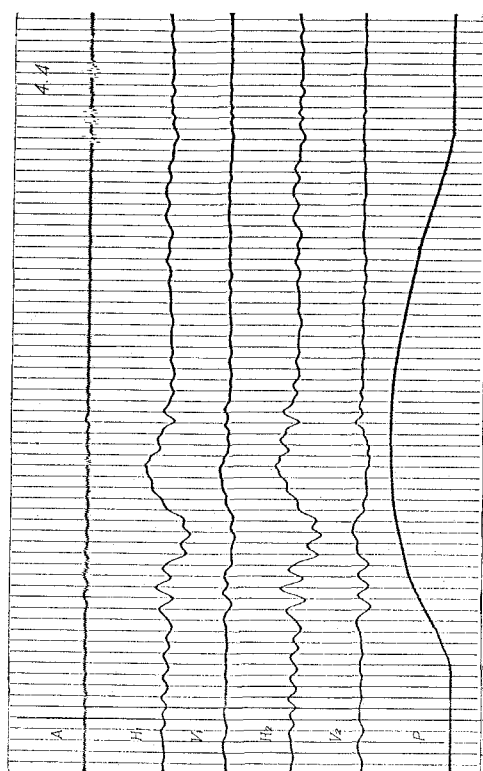
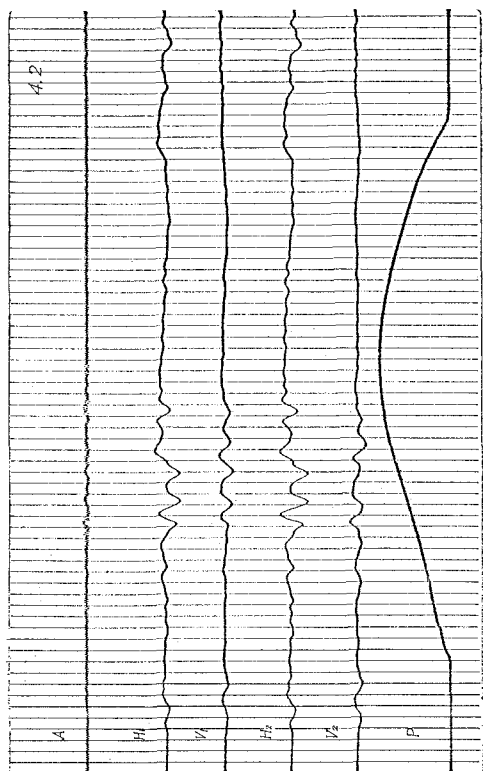
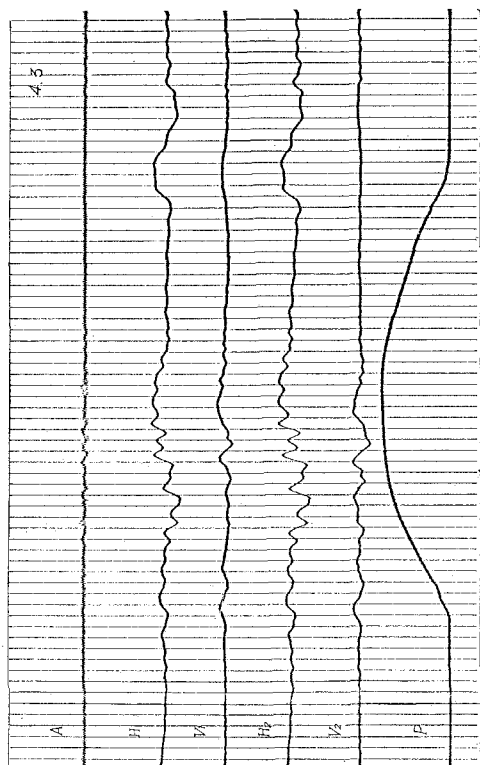
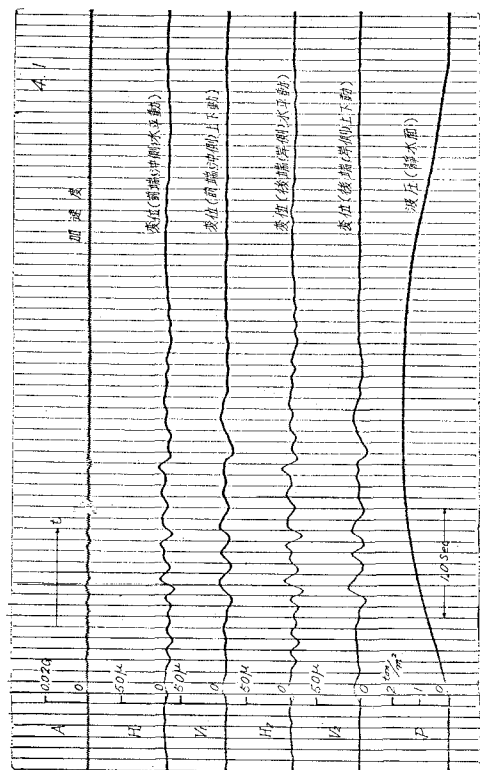
短い周期の振動は、波圧波形のいかんを問わず波圧がある程度以上大きければ常に認められる。写真に載せた例においてもいずれの場合も現われている。この振動の場合その周期は振動計の固有周期にくらべ十分小さく、また、ほぼ連続した振動として現われているので、記録された振動はほぼ忠実な変位振動を示しているものと考えられる。この振動について、前端、後端両者の各水平動(H_1, H_2)および各上下動(V_1, V_2)を対比してみると、波形ならびに位相に非常によい相関がみられる。また、Bourrageにみられる波圧の微小変動と変位振動とは、その位相がよく対応しているのがわかる。

つぎに加速度振動の記録(A)をみると、その周期、発生位置とも前節で述べた予備観測結果と一致していることがわかる。またこの加速度振動(A)と前記した変位振動(H_1, H_2)を対比してみると、その位相がほとんど完全に対応していることがわかる。このことは、先に述べた加速度振動計により認められた周期0.2秒の振動が、変位振動として確認されたことを意味するものである。そこでつぎにこの短い周期の変位振動について、卓越周期、回転軸、振幅などいま少しくわしく調べてみることにする。

(2) 卓越振動周期

一つの波によって生じた一連の振動は、波圧のピーク以前に生じたものと、それ以後に生じたものとで多少様子が異なるように見えるので、この両者を区別して卓越振動周期を調べてみる。図-6は波圧ピーク以前に現われた振動に対するもの、図-7は波圧ピーク以後の振動に対するものである。これらの図からわかるように、波

写真—4.1~4.8 記録例



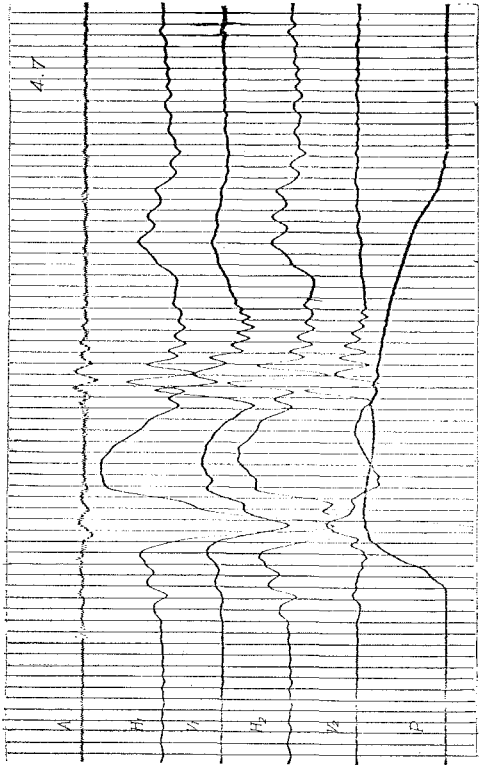
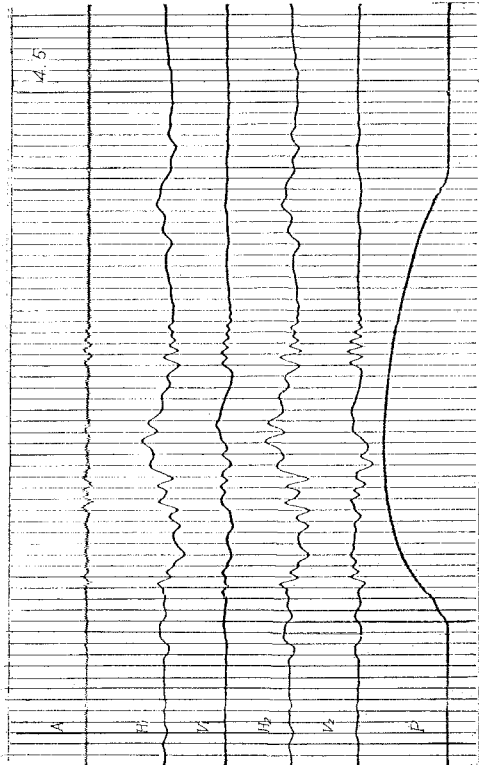
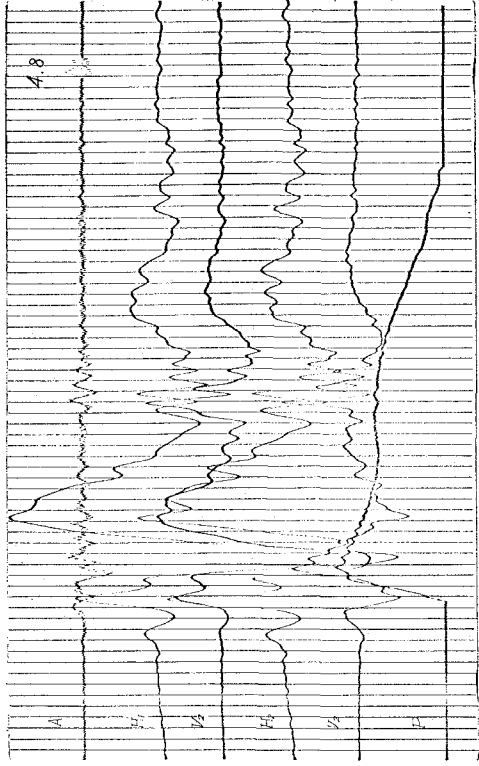
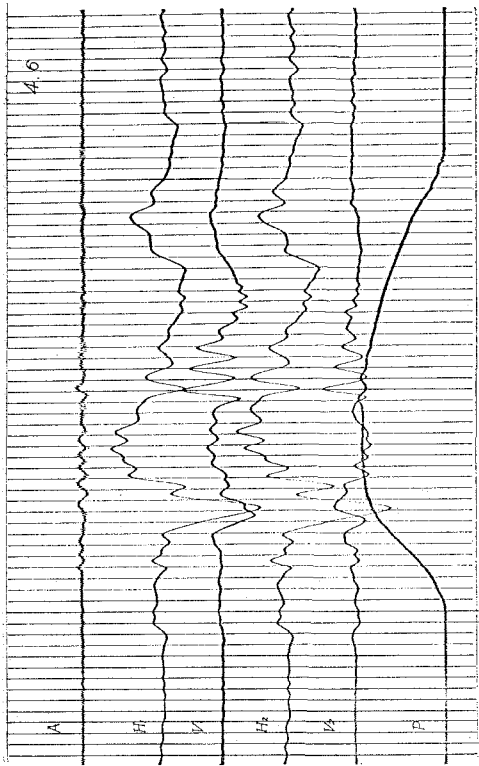


図-6

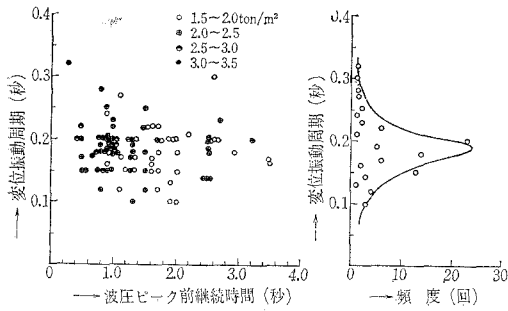
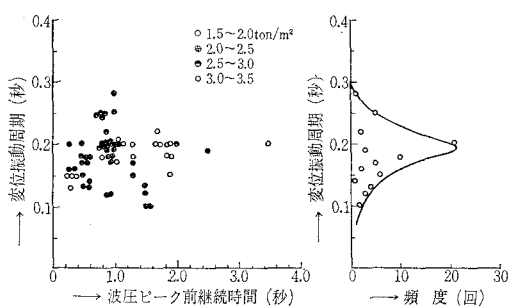


図-7



圧ピーク前の振動についても、また波圧ピーク後の振動についても、振動周期と波圧ピーク前継続時間（波圧のピークまでの時間）との間には一義的な関係は認められない。いずれの場合もプロットした点は 0.1 秒から 0.3 秒の間に分散している。また波圧の大きさにも無関係のようである。これの頻度分布は図中右に示してあるとおりで、両者とも大体 0.2 秒にピークをもつ分布となっている（平均値は両者とも 0.18 秒）。これらのことからこの短い周期の振動は、波圧型、その大きさに無関係に、0.2 秒前後の周期をもち、波圧の大きさがある程度以上大きければ常に現われるものであると解される。したがってこの振動は、波圧による強制振動そのものではなく、波圧によって誘発された防波堤の固有振動の一つであると考えられる。なお、この振動の卓越周期は予備観測において得られた振動の卓越周期（図-4）とまったく一致している。

(3) 振動の回転軸

数多くの振動について、防波堤の前端と後端における水平動および上下動の記録 H_1 , H_2 , V_1 , V_2 を対比し、その位相の関係から振動の回転軸の位置を想定したところ、表-2 のような結果を得た。これからわかるように、回転軸の位置としては、防波堤底面の前端、中央、

表-2

回転軸の位置	波圧ピーク以前に発生した振動	波圧ピーク以後に発生した振動
底面中央部を軸とする場合	76 %	48 %
底面前端を軸とする場合	10	36
底面後端を軸とする場合	6	8
不明確な場合	6	8

後端いずれの場合も生じている。その頻度は、底面中央の場合が最も多く、底面前端（沖側）の場合がこれにつき、底面後端（岸側）の場合は最も少ない。なお、一つの波による一連の振動において、その回転軸が相互に移行する 경우가多々みられる。

(4) 振 幅

波圧型および波圧の大きさとの短い周期の振動の振幅との関係を調べたのが 図-8 および 図-9 である。図-8 は波圧ピーク以前に発生した振動に対するもの、図-9 は Bourrage（砕波型波圧腰掛部）に発生した振動に対するものである。これらの図からわかるように、いずれの場合も、波圧ピークまでの時間が短いほど、したがって波圧の形態が砕波型化するほど、また波圧の大きさが大きくなるほど振幅が大きくなる傾向がみられる。

図-8

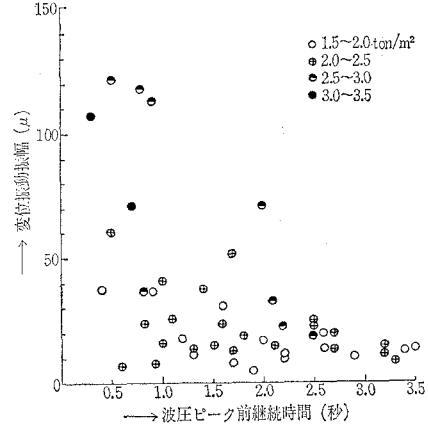
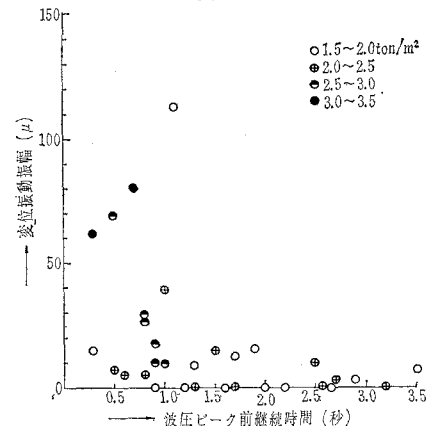


図-9



以上述べた諸種のことから、観測された短い周期の振動は、堤体底部のほぼ中央部もしくは前端を回転軸とする周期はば 0.2 秒の変位振動で、これは堤体の固有振動の一つであり、またこれは予備観測において加速度振動として得られた振動と同一の堤体振動であることが理解される。

5. 捨石基礎部の弾性係数

前節において、短い周期の振動は堤体の一つの固有振動であることを述べたが、この振動は、捨石基礎を弾性体とし、これに載った堤体を剛体とみなしたときに生ずるいわゆるロッキング現象と考えるのが妥当であろう。ここで、このような考え方の妥当性をチェックする意味で、振動周期の実測値を用い捨石基礎部の弾性係数を求めてみる(以下 林 博士文献²⁾参照)。

図-10

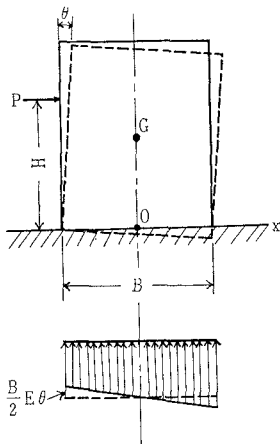


図-10 において、

x : 堤体底面中点 O を原点とし水平に岸側にとられた軸

θ : 堤体底面の弾性変角

P : 堤体前面に作用する波圧の合力

H : 合力 P の作用点の高さ

B : 堤体底部幅

G : 堤体重心点

O 点のまわりの堤体の回転運動の方程式は、

$$I\ddot{\theta} = P \cdot H - M \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 I は O 点のまわりの堤体の慣性モーメント、 M は基礎部の弾性反力が中点 O のまわりにつくる抵抗モーメントで、捨石基礎部の弾性係数を E とおくと、

$$M = (1/12)EB^3\theta \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、

$$K = (1/12)EB^3 \quad \dots\dots\dots (3)$$

とおけば、

$$M = K\theta \quad \dots\dots\dots (4)$$

式(4)を式(1)に代入すると回転の運動方程式は、

$$\ddot{\theta} + \frac{K}{I}\theta = \frac{P \cdot H}{I} \quad \dots\dots\dots (5)$$

となる。したがってロッキングの振動角速度 ω は、

$$\omega = \sqrt{\frac{K}{I}} \quad \dots\dots\dots (6)$$

となり、またこれの周期 T は、

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{I}{K}} \quad \dots\dots\dots (7)$$

となる。式(3)と式(7)から弾性係数 E は、

$$E = \frac{4\pi^2}{T^2} \cdot \frac{12I}{B^3} \quad \dots\dots\dots (8)$$

となる。式(8)に周期の実測値および堤体の実際の値、

$$T = 0.2(\text{sec})$$

$$I = 12450 \times 10^{10}(\text{CGS})$$

$$B = 9(\text{m})$$

を代入すると、

$$E = 2.02 \times 10^9 (\text{dyne/cm}^2)$$

となる。

一般に岩石の弾性係数は $\times 10^{11}$ の order、地山岩石のそれは $\times 10^{10}$ の order⁷⁾ であることから考えて、得られた捨石基礎部の弾性係数 $2 \times 10^9 (\text{dyne/cm}^2)$ はほぼ妥当な値であると考えられる。

これまで述べた諸種のことからロッキングの存在は確実と思われる。

6. むすび

波によって生ずる防波堤の振動を変位振動計を用いて観測し、短い周期の振動と長い周期の振動を記録上みとめた。短い周期の振動は、防波堤底面のほぼ中央部を軸とする周期ほぼ 0.2 秒の振動で、これは、捨石基礎部を弾性体、この上の堤体を剛体とみなした場合に生ずるロッキングであることがほぼ明らかにされた。長い周期の振動は、強制振動の存在を示しているようにも思われるが、これを詳細云々するには、より長周期の振動計を用い測定検定する必要がある。実測振動周期を用い、捨石基礎部の弾性係数を求め、その値として $2 \times 10^9 (\text{dyne/cm}^2)$ を得た。

以上がこの観測で得られた結果であるが、複雑な防波堤の振動についてその挙動の一端を知ることができたと考える。

参 考 文 献

- 1) 栗林 隆・宇田居吾一・村木義男・高橋基次・石田直之：防波堤に働く波圧について、第5回海岸工学講演会講演集、土木学会(1958)。
- 2) 林 泰造・服部昌太郎・林 憲吉：砕波の圧力と壁体の滑動、第7回海岸工学講演会講演集、土木学会(1960)。
- 3) 林 泰造・服部昌太郎：砕波の波圧について、第10回海岸工学講演会講演集、土木学会(1963)。
- 4) 林 泰造・今井 孝：砕波の圧力と堤体の滑動、第11回海岸工学講演会講演集、土木学会(1964)。
- 5) 村木義男・高島和夫：波によって生ずる防波堤の振動の観測、北海道開発局土木試験所月報、第126号、昭和38.12(1963)。
- 6) 松尾春雄記：鉛直壁面を有する防波堤に作用する波力、港湾、第18巻、第3号。
- 7) 星野 寛・山下幸男：超音波による地山の弾性係数の測定、北海道開発局土木試験所月報、第111号、昭和37.9(1962)。