

運輸省 正員 ○野田節男  
〃 千葉忠樹  
〃 正員 上 部達生

### 1. まえびき

リアス式海岸の湾奥は水深が大きく静穏な泊地に恵まれ良港の条件を備えているが、地震時には地形の特徴として津波による被害を受ける可能性がある。よって、津波防護の目的で湾口に比較的大水深域に防波堤を建設する必要が生じて来た。これまでの建設実績から、その形式はマウンドと有するケーソン式混成堤が有力であるが、従来入波浪に対する防波堤の水深が高々20mであるのに対して、津波防波堤では60mのものまで計画されている。この場合、水深増大に伴いマウンドが高くなるので、耐震性の確保が重要な課題となる。筆者らは、高マウンドのケーソン式防波堤の耐震性に関する基礎的資料を得るために、ケーソンの滑動・沈下及びマウンドの崩壊に着目して模型振動実験を実施したので、以下にその概要を報告する。

### 2. 模型

防波堤の原型は試験断面の中より選定し、出来るかぎり相似則を満たすように模型の諸元を定める。模型と原型の間の基本的な相似比としては、長さ(高さ)の比 $\lambda = L_m/L_p = 1/75$ 、加速度の比 $\alpha = 1$ 、時間の比 $\tau = \sqrt{\lambda} = 0.115$ 、材料の単位体積重量の比 $\rho = \gamma_m/\gamma_p = 1$ である。表-1に原型及び実験に用いた4個の模型の諸元を示す。ここで、Model I, II のマウンドは相似比をほぼ満足する模型、Model IIIは法勾配をきつくして断面材少による工費節減を意図したもので、Model IV は大水深域で十分な締固めが出来ない場合を想定している。図-1はModel I, IIの断面を示している。

ここでは、マウンド内に発生する動の間接水圧が防波堤の全体挙動に及ぼす影響を把握するために、マウンド材の透水係数の相似比を満すようにした。マウンド内の水の流れはレイノルズ数 $Re$ が目的のため大きいと考え、透水係数は次式により求めた。

$$k = \sqrt{\frac{2gd}{5}} \frac{\Delta H}{\Delta s} \quad (1)$$

ここに、 $g$ :重力加速度 $980 \text{ cm/s}^2$ 、 $d$ :粒径 $5 \text{ cm}$ 、 $\Delta H/\Delta s$ :動水勾配 $1/10$ 、 $\tau$ :抵抗係数 $Re > 10^4$ の範囲では20である。原型のマウンド用割石は $d = 40 \sim 50 \text{ cm}$ であるが、透水係数と支配するものは $d = 5 \text{ cm}$ 程度の目づり材と考えた。模型マウンド材としては高砂(粒子比重 $2.65$ 、 $e_{\max} = 0.90$ 、 $e_{\min} = 0.65$ )を使用した。

### 3. 加振及び測定

振動実験には運輸省港湾技術研究所の電動型振動台(加振力 $12 \text{ ton}$ 、 $g$ 振動数範囲 $0.5 \sim 100 \text{ Hz}$ 、振動 $1.5 \times 5.0 \times 1.5 \text{ m}$ )を使用し、加振順序は、まず $10 \sim 100 \text{ gal}$ の範囲で一定加速度の正弦波を $5 \sim 50 \text{ Hz}$ まで $1 \text{ Hz}$ 間隔で10秒ずつ作用させた。その後、1968年十勝沖地震の際に八戸港で得られた強震記録を基礎の形状に於けるものを原型とした実験用地震波を、加速度レベルを順次増大させて加振した。

|      |                             | 原型               |                      | 模 型                  |                      |                      |                      |
|------|-----------------------------|------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
|      |                             | 設計値              | 目標値                  | 実験値 Model I          | 実験値 Model II         | 実験値 Model III        | 実験値 Model IV         |
| マウンド | 高さ (cm)                     | $40 \times 10^2$ | 55                   | 55                   | 55                   | 55                   | 55                   |
|      | 法勾配                         | 1:2              | 1:2                  | 1:2                  | 1:1.6                | 1:1.6                | 1:2                  |
|      | 単位体積重量 (g/cm <sup>3</sup> ) | 1.8              | 1.8                  | 1.6                  | 1.6                  | 1.6                  | 1.4                  |
|      | 平均粒径 (cm)                   | 1.0              | 1.0                  | 0.99                 | 0.99                 | 0.99                 | 0.84                 |
|      | 内部摩擦角 (°)                   | 20               | 27.0                 | $1.4 \times 10^{-1}$ | $1.4 \times 10^{-1}$ | $1.4 \times 10^{-1}$ | $1.4 \times 10^{-1}$ |
| ケーソン | 高さ (cm)                     | 35               | 35                   | 32                   | 32                   | 32                   | 29                   |
|      | 透水係数 (cm/s)                 | 7.0              | $8.1 \times 10^{-1}$ | $6.4 \times 10^{-1}$ | $6.4 \times 10^{-1}$ | $6.4 \times 10^{-1}$ | $8.4 \times 10^{-1}$ |
|      | 単位体積重量 (g/cm <sup>3</sup> ) | 2.1              | 2.1                  | 2.1                  | 2.1                  | 2.1                  | 2.1                  |
| 地震動  | 波 形                         | ハフ222            | 修正ハフ222              | 修正ハフ222              | 修正ハフ222              | 修正ハフ222              | 修正ハフ222              |
|      | 振動時間 (s)                    | 6.0              | 6.9                  | 6.9                  | 6.9                  | 6.9                  | 6.9                  |
|      | 卓越振動数 (Hz)                  | 1~4              | 8.7~35               | 8.7~35               | 8.7~35               | 8.7~35               | 8.7~35               |
|      | 最大加速度 (gal)                 | 200              | 200                  | 750                  | 120                  | 120                  | 430                  |
| その他  | 水深 (cm)                     | $60 \times 10^2$ | 80                   | 80                   | 80                   | 80                   | 80                   |
|      | 堤 長 (cm)                    | $60 \times 10^2$ | $8 \times 10^2$      | 150                  | 150                  | 150                  | 150                  |

表-1 原型及び模型諸元

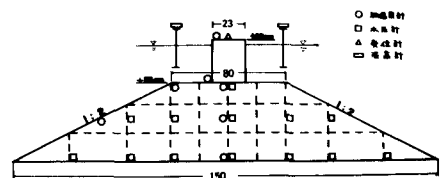


図-1 Model I, II断面と測定器配置

模型の振動・変形状況は、図-1に示す如く、主に加速度計と水圧計により測定した。その他に、マウンド内と表面の変形やケーソンの移動をVTRと変位計で記録した。

#### 4. 実験結果

(i) 防波堤の全体安定——300~400 galの地震波に対しては、マウンド斜面の崩壊やケーソンの顕著な沈下・滑動は認められなかった。マウンド天端の沈下は、Model I, IIで台加速度が660~752 gal になつて1.5 cm (堤高の2.7%に相当)、Model IVでは、428 gal の時に1.0 cm (堤高の1.8%) 発生した。いずれの場合も、ケーソンの滑動は認められなかった。そのため、原型の防波堤は強大な地震動に対してもかなり安全性が高く、沈下によるケーソン天端高の減少も津波防護機能を損うほどではないと予想される。

(ii) 防波堤の振動応答特性——防波堤の振動特性の一例と図-2に示す。いずれの模型においても、台加速度10~15 gal に対し29~36 Hzの時に8~14 (ケーソン上端)、5~6 (マウンド上端) の応答倍率を示した。このピークについては、台加速度の増大と共に振動数・応答倍率が減少しており、マウンド内のひずみ増加に伴うせん断剛性の低下と減衰効果の増大を示している。台加速度が小さい時の13~17 Hzにおけるケーソン上端の応答はケーソンのロッキング振動によると思われるが、これは台加速度が50 gal を越えるとは見られない。図-3は、台加速度の増大に伴いケーソン上端の応答倍率が低下する様子を示している。

(iii) マウンド内の動的間げき水圧——マウンド内部に発生した動的間げき水圧は、同一高さでは堤体中心で小さく斜面へ近づくにつれて増大しており、この傾向はマウンド内の加速度分布と似てゐる。動的間げき水圧の値を(2)式のWestergaardによる動水圧の算定式と比較すると、ほぼ0.5~1倍となつてゐる。

$$p = \pm \frac{1}{8} \rho g \delta_w \sqrt{H R} \quad (2)$$

ここに、 $p$ : 動水圧、 $\rho$ : 震度、 $\delta_w$ : 水の単位体積重量、 $H$ : 水深、 $R$ : 動水圧を求める点の水深である。

動的間げき水圧とマウンド内の応力との比の一例として図-4に、Model II, IVの堤体中心における場合を示す。ここで、マウンド内応力はケーソンからマウンドに作用する偏心傾斜荷重とマウンドの自重により発生するとし、分布状態は図-5に示すように仮定した。両者の比はかなり大きく、マウンドのせん断抵抗は著しく減少すると考えられる。防波堤が外観的には安定を保っている原因は、マウンドの透水係数が大きいために間げき水圧は極めて短時間しか継続せずに直ちにマウンドの強度が回復するからと思われる。

引続き防波堤の安定性に重要な要因となる基礎地盤を考慮した実験及び実験結果と数値解析とに対応について検討を進めてゆきたい。

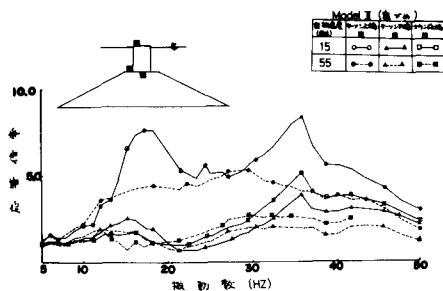


図-2 振動応答特性

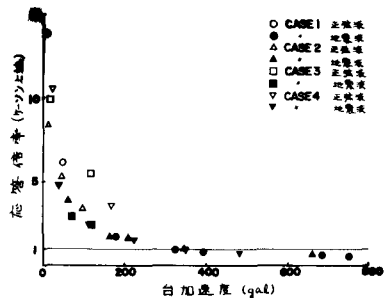


図-3 応答倍率と台加速度

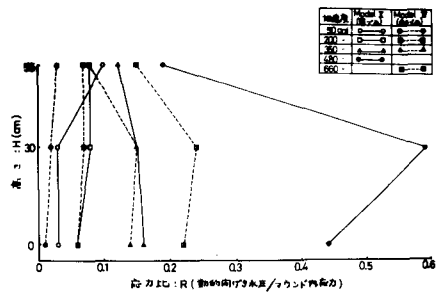


図-4 応力比の高さ方向分布

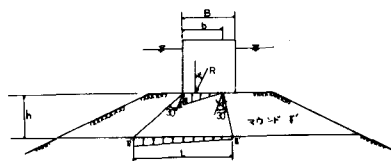


図-5 マウンド内応力分布

$$P = \frac{b}{L} R + \delta' R \quad (3)$$

ここに、 $R$ : 偏心傾斜荷重、 $\alpha$ : 傾斜角  
 $e$ : 偏心量、 $\delta'$ : マウンドの水圧係数、 $R$ : 水深  
 $B$ : ケーソン幅、 $b$ : 荷重分布中三角形分布部分  
 $b = 3(\frac{B}{2} - e)$ 、台形分布で  $b = B$ 。  
 $L$ : マウンド内の荷重分布中  
 $L = b + R \{ \tan(30^\circ + \alpha) + \tan(30^\circ - \alpha) \}$