

I-481

砕波圧をうけるプレハブ式消波防波堤の動的応答

九州共立大学	工学部	正員	小坪 清真
九州工業大学	工学部	正員	○高西 照彦
九州工業大学	工学部	正員	多田 浩
九州工業大学	工学部	学生員	黍野 和彦

1. はじめに 近年、図-1に示すように堤体前面にスリット部を設けて、そこに到達した波の一部を透過させることによって、堤体に及ぼす波のエネルギーを減少させようとする防波堤が設けられるようになってきた。さらに、運搬性、施工性の面から、あらかじめ防波堤を数個のブロックに分割して製作しておき、これを現場において鋼棒により接合して防波堤(以後プレハブ式防波堤と呼ぶ)を構成することも考えられている。このような場合、堤体が波圧を受けたときの各ブロックの接合部に生ずる応力の大きさや防波堤自身の安定性が問題となる。本論は、砕波圧を受けたときのプレハブ式防波堤の動的応答を求めることによって、プレハブ式防波堤の滑動及び転倒に対する動的安定率及び動的な接合部応力について検討したものである。

2. 数値解析 図-2に防波堤の数値計算モデルを示す。防波堤を構成する各ブロックは剛体とし、ブロック間を接合する鋼棒は引張り及びせん断剛性を有するバネに置換した。捨石マウンド部はその弾性と等価な鉛直及びせん断バネに置換した。防波堤に対する面内振動の振動方程式は式(1)で与えられる。

$$[M] \{\ddot{y}\} + [C] \{\dot{y}\} + [K] \{y\} = \{Q\} \quad (1)$$

ここに、 $[M]$ は質量マトリクス、 $[C]$ は減衰マトリクス、 $[K]$ は剛性マトリクス、 $\{y\}$ は変位ベクトル、 $\{Q\}$ は外力ベクトルである。各ブロックは面内で水平、鉛直、回転方向の3自由度を持つとした。外力としては砕波圧を考えた。その分布形は図-3に示すように、合田によって提案されたものを用いた。実際の砕波圧は図-4(a)に示すように、その時間的変化が複雑であるが、本論ではこれを同図(b)に示すように三角波にモデル化して用いた。防波堤の動的安定性を検討するにあたっては、砕波圧の最大値 p_1 を一定とし、その継続時間 2τ (図-4(b)参照)をいろいろ変えたときの防波堤の滑動と転倒に対する安全率の時刻歴応答を算出して、それぞれその最小値を求め、この値をもって動的安定率と定義した。なお、接合部応力については、時刻歴応答の最大値を採用した。

(1) 滑動 滑動に対する動的安定率 F_{Ds} は次式によって求めた。

$$F_{Ds} = \mu (W - F - U - P_{N1} - P_{N2}) / P_s \quad (2)$$

ここに、 μ は底版と捨石マウンドとの間の動摩擦係数、 W はブロックの重量、 F は防波堤に作用する浮力、 U は揚圧力、 P_s は底版に作用するせん断力、 P_{N1} 、 P_{N2} は底版に作用する鉛直力であり、マウンドのバネ定

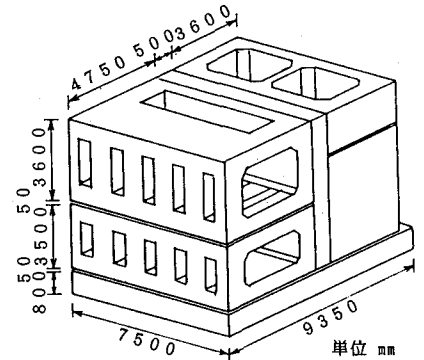


図-1 プレハブ式防波堤

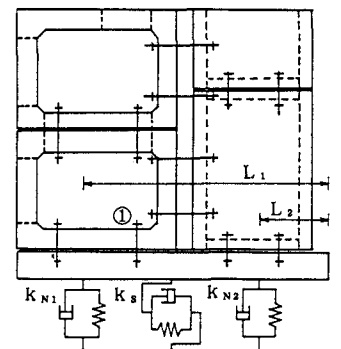


図-2 防波堤の振動モデル
+ は垂直及びせん断ばねを表す

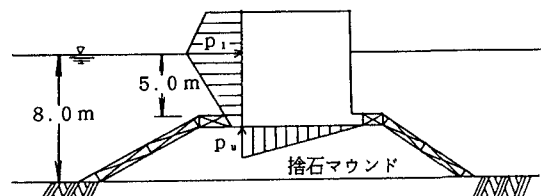


図-3 計算に用いた波圧分布

数及び減衰係数をそれぞれ k_s, k_{N1}, k_{N2} 及び c_s, c_{N1}, c_{N2} 、底版の時刻歴応答変位を $\delta_s, \delta_{N1}, \delta_{N2}$ 、速度を上付添字・で表せば、 $P_s = k_s \delta_s + c_s \dot{\delta}_s$ 等によって求められる。

(2) 転倒 転倒に対する動的 safety rate F_{DM} は底版の右下端点回りのモーメントを計算することにより、次式によって求めた。

$$F_{DM} = (M_w - M_f - M_u) / (P_{N1} \times L_1 + P_{N2} \times L_2) \quad (3)$$

ここに、 M_w は自重によるモーメント、 M_f は浮力によるモーメント、 M_u は揚圧力によるモーメント、 L_1, L_2 はそれぞれ底版右下端からバネまでの距離（図2参照）である。

3. 解析結果及び考察 計算に用いた諸定数は次の通りである。堤体重量は 746 t、マウンドの鉛直及びせん断バネ定数は 5000 tf/m^3 、 1900 tf/m^3 、減衰係数は $4 \text{ tf} \cdot \text{s/m}$ 、 $4 \text{ tf} \cdot \text{s/m}$ である。マウンドと底版との間の動摩擦係数は $\mu = 0.6$ とした。堤体を構成する各ブロック間の接合部のバネ定数は、鉛直方向については垂直バネが $5.37 \times 10^6 \text{ t/m}$ 、せん断バネが $7.0 \times 10^6 \text{ t/m}$ 、水平方向については垂直バネが $1.71 \times 10^6 \text{ t/m}$ 、せん断バネが $1.37 \times 10^6 \text{ t/m}$ であるとした。砕波圧の最大値 p_1 は有義波高 $H_{1/3}$ を 3.4 m として算出した値 $p_1 = 4.61 \text{ tf/m}^2$ を採用した。

波圧低減率は 0.9

にとった。揚圧力は $p_u = 3.02 \text{ tf/m}^2$ （一定）とした。

表-1 に防波堤の固有振動数を示す。応答計算で採用した振動次数は4次までである。第1次から3次までは堤体のロッキング及びスウェイが卓

越する振動である。図-5 (a), (b) に、それぞれ滑動、転倒に対する安全率を示す。横軸には砕波圧の継続時間の半分 τ を防波堤の1次の固有周期 T_1 で割って無次元化した値 τ/T_1 をとった。同図中の水平な直線は、防波堤が最大波圧 p_1 をうけたときの静的安全率を示している。図-6 には、図-2 に示した各接合部（直径 2.3 cm の鋼棒）のうち、 τ/T_1 に対する応力の変化が一番大きい接合部 ① の接合部応力を示した。

図-5 から、本論で取り扱ったプレハブ式防波堤については、動的及び静的のいずれの場合においても、滑動に対する安全率の方が転倒に対するそれより小さいことが判る。また、動的安全率はいずれの場合も $\tau/T_1 = 0.5$ 近傍において最小値をとり、その値は静的安全率よりも小さくなる。 τ/T_1 が 0.2 より小さくなると、動的安全率の方が静的安全率より大きくなり、 τ/T_1 が 1 より大きくなると動的安全率は静的安全率に漸近することが判る。図-6 から接合部の応力は、 $\tau/T_1 = 0.5$ 近傍において静的なそれよりもかなり大きくなることが判る。

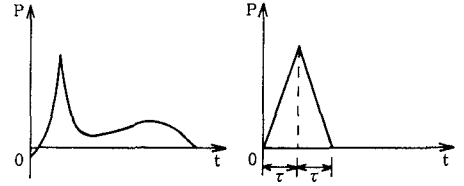
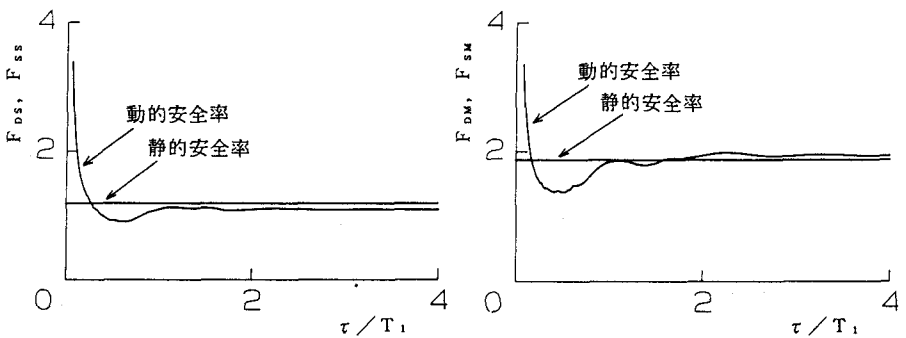


図-4 砕波圧の時間的变化 モデル

表-1 防波堤の固有周期

振動次数 s	固有周期 秒
1	0.21692
2	0.09569
3	0.08396
4	0.01068
5	0.00853



(a) 滑動に対する安全率

(b) 転倒に対する安全率

図-5 防波堤の安全率

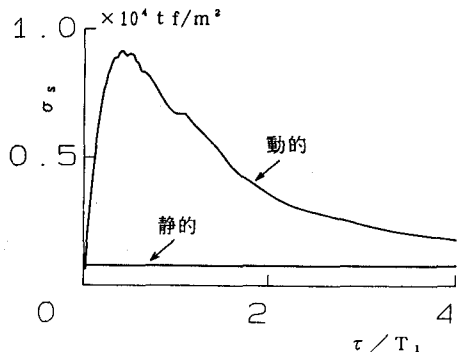


図-6 接合部 ① の応力