

大型ケーソンに働く揚圧力低減対策に関する研究

藤井俊二*・中村孝明**・勝井秀博***

1. ま え が き

大型防波堤や人工島など、マウンド上に設置された大型ケーソン構造物を計画する場合、波浪時に構造物が滑動しないように設計する必要がある。通常の防波堤等と同様に三角形分布の揚圧力が作用すると、構造物の底面積が広い場合、揚圧力の合力が非常に大きくなり、安定のため多量のバラストが必要となる。またバラスト室確保のため、構造物を大きくせざるを得ない場合がある。

そこで、比較的簡単な2つの揚圧力低減方法を検討した。この低減対策を取り入れた模型ケーソンを使用した室内水理実験を行い、低減効果を調べた。また境界要素法による数値解析を行い、これら対策工による揚圧力低減のメカニズムを明らかにし、対策工の形状と低減効果に関するパラメータスタディーを行った。

2. 揚圧力低減方法

石炭火力発電所の海洋立地を目的とした人工島の計画案¹⁾をプロトタイプとし、揚圧力低減方法を検討した。水深20mの海底地盤上に厚さ4mの捨石マウンドを建設し、平面形状150m×250m程度のケーソン6基を連続的に設置するものである。設計波高14.7m、周期12.4sec、波長は158mでケーソンの波進行方向長さ(幅とする)150mとほぼ等しい。この対象構造物のようにケーソン幅が広い場合、マウンド内の水粒子の運動は水平方向の一樣流に近いと考えられるが、後述の圧力方程式によると²⁾圧力勾配は水粒子速度(または加速度)に比例するので、ケーソン幅方向に圧力勾配一定、すなわち揚圧力分布は先端が最大、後端でゼロの三角形分布となると考えられる。そこでケーソン底部に鉛直方向への水粒子の逃げ道を作り、水平方向の水粒子速度を変化させ圧力勾配を変えることによって、揚圧力の低減をはかった。具体的な方法として次の2つの方法を検討した。a) ケーソンの適当な位置に井戸を設ける方法(井戸方式)、b) ケーソン底部に開口を持つ空気室を設ける

方法(空気室方式)。図-1にこれらの方法を模式的に示す。

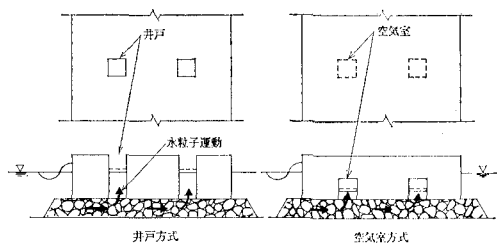


図-1 揚圧力低減方法概念図

3. 水理実験

(1) 実験方法

プロトタイプとの長さの相似比を1/100とし、フルード則に従った2次元縮尺模型実験とした。模型を図-2に示す。

模型ケーソンはアクリル製で、低減対策のないタイプA、井戸方式を2次元モデル化するため、模型ケーソンを3分割し各ユニット間にスリットを設けたタイプB(スリットモデル)、空気室を設けたタイプC(空気室モデル)の3種類とした。

タイプBではスリット幅を2cmと4cmの2通りに変えて実験した。

プロトタイプにおける空気室は円筒形で、断面積90.7m²容積523m³のものを22.5m間隔で配置するものを想定した。空気室部分の釣り合い条件は、ボイルの法則で微小項を無視すると次のようになる。

$$P_0 \Delta V + \Delta P V = 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに P_0 : 初期圧力=大気圧

ΔP : 圧力変化

V : 空気室容積

ΔV : 空気室容積変化

フルード則に従って、模型では空気室の水位変動1/100、空気室断面積(1/100)²、 ΔP 1/100、となるようにした。 P_0 はプロトタイプと模型で変わらないので、(1)式の成立のためには空気室容積は(1/100)²とする必要

* 工修 大成建設(株)技術開発部

** (株)アイエヌジー

*** 正会員 工修 大成建設(株)技術研究所

がある。そこでフルード則に従って寸法を縮小した2ケの内径 7.6 cm の円筒形のアクリル製空気室の他、ポリエチレン製の補助空気室を設け、空気室と連通させた。補助空気室、連通管も含めた全空気室の容積は52.3 l である。空気室内の水位は自由水面と同じとした。

マウンド模型は高さ 4 cm で、金網製の枠内に豆砂利を詰めて作製した。豆砂利は粒径 2~3.5 mm, 空隙率 0.40 のものと、粒径 10~15 mm, 空隙率 0.38 のものの2種を使用し、タイプCではマウンド部分に豆砂利を詰めないケースの実験も行った。表-1 に模型タイプの一覧表を示す。

図-3 に実験装置を示す。水槽は日本大学理工学部海洋建築工学科の2次元水槽(長さ 30 m, 幅 1.35 m, 高

さ 1.4 m) を使用した。水槽中に海底に相当する架台を設置し、架台上的水深が 20 cm の状態で、波高 2.5 cm, 周期 0.8, 1.0, 1.2 秒の規則波による実験を行った。

図-2 に示す模型ケーソン底面の7ヶ所における圧力と、模型前面の波高を測定した。

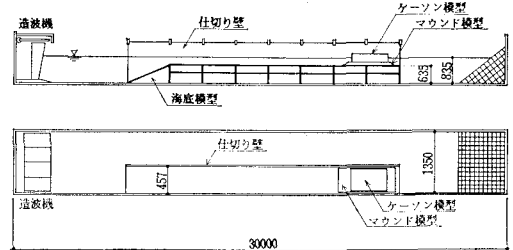


図-3 実験装置

(2) 実験結果

図-4 に波周期 1.2 秒の実験における揚圧力の時刻歴波形を示す。対策工のないモデルでマウンド粒径の大きい A-2 では各測定点ではほぼ同位相で変動するが、粒径の小さい A-1 ではケーソン後部でやや位相遅れが見られる。A-1 と A-2 で振幅には差が見られなかった。

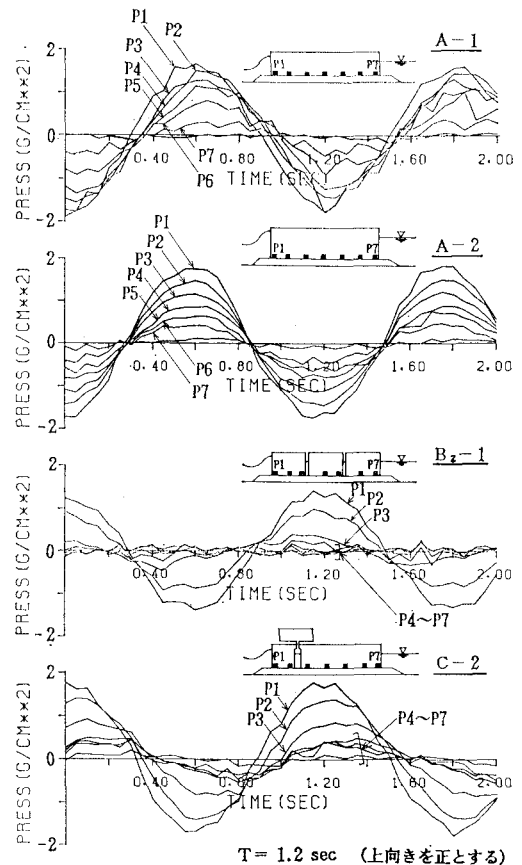


図-4 揚圧力時刻歴

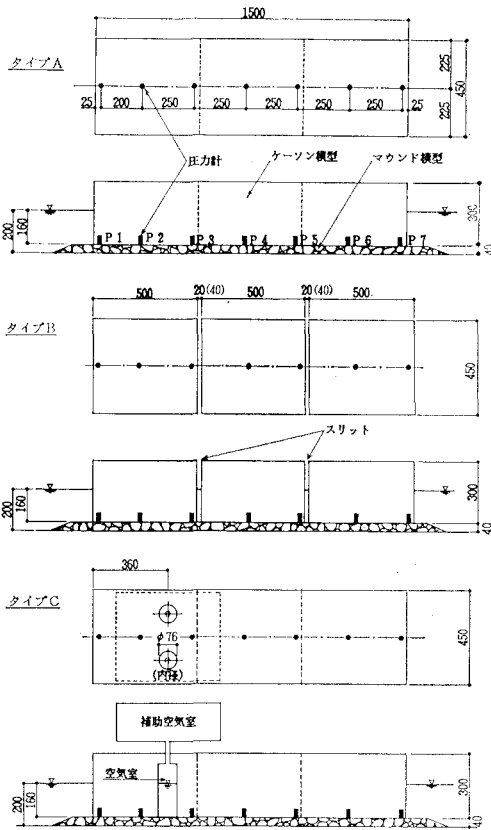


図-2 模型

表-1 模型タイプ一覧表

対策工	なし	スリット (幅: cm)	空気室
マウンド	なし	なし	C-0
空隙	なし	なし	C-0
砂利 2~3.5 mm	A-1	B ₂ -1(2) B ₄ -1(4)	なし
砂利 10~15 mm	A-2	なし	C-2

対策工のある B_2-1 , $C-2$ ではケーソン後部の圧力に位相遅れが見られ, 対策工のないモデルと比較して振幅も小さかった。

図-5 にケーソン単位長さ当りの揚圧力の合力の時刻歴波形を示す。揚圧力の合力は, 測定点を直線補間して求めた。対策工がない $A-2$ と比較して, 対策工のある B_2-1 , $C-2$ では揚圧力の合力の振幅が小さいことが分かる。揚圧力が上向きで最大となる時刻の分布を図-6 に示す。各モデルで前端での圧力 $P1$ には大差はないが, 対策工のない場合の分布がほぼ三角形であるのに対し, 対策工のあるものはケーソン前面近くでの圧力低下が大きく, そのため合力が小さくなっていることが分かる。

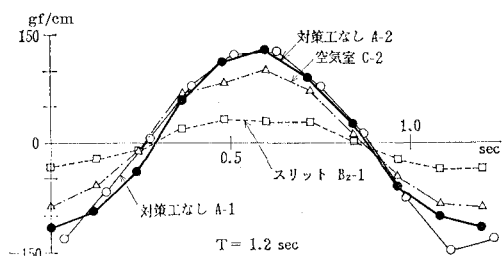


図-5 揚圧力の合力の時刻歴

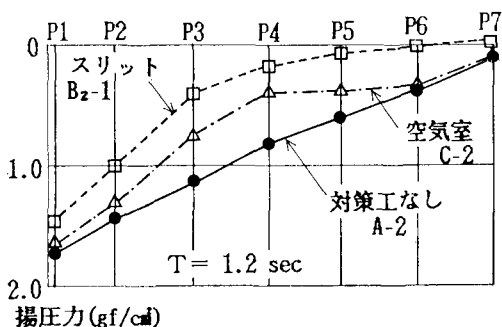


図-6 揚圧力分布

図-7 に波周期と正の揚圧力合力（上向き）の最大値の関係を示す。対策工のないモデルでは揚圧力合力は周期の長い波ほど大きく, マウンド粒径の異なる $A-1$ と $A-2$ で大きな差は見られなかった。一方スリットモデル B_2-1 , B_4-1 は波周期に対してはほぼ一定値であった。次に対策工のあるモデルの揚圧力合力の $A-1$ に対する比を図-8 に示す。タイプ B では $0.4 \sim 0.65$ で, 周期の長い波のケースほど比が小さかった。またスリット幅の広い B_4-1 のほうが B_2-1 よりもやや小さかった。すなわちスリットモデルでは揚圧力低減の効果が大きく, 特に長周期の波に対して低減効果が顕著であることが分かる。またスリット幅の広いほうが低減効果は大きい, 差は比較的小さかった。

空気室モデル $C-2$ は波周期 1.2 秒で比は 0.8 程度であり, スリットモデルほどではないが低減効果があることが分かる。

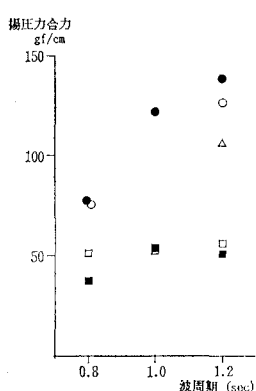


図-7 波周期と揚圧力合力

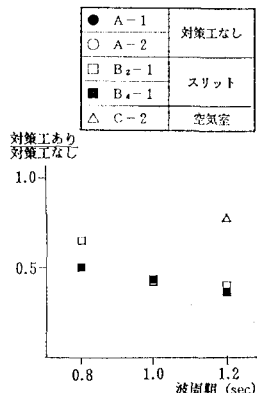


図-8 揚圧力合力の比

4. 数値解析

(1) 解析方法

2次元境界要素法による解析を行った。解析領域は図-9 に示すように, 構造物前後の (I), (III) とマウンド部 (II) の3領域とし, 領域 (I) では入射波と反射波, 領域 (III) では通過波のみ存在するものとした。マウンド部と外部領域 (I), (III) との境界 S_a では, 流速と圧力が等しくなる境界条件とした。

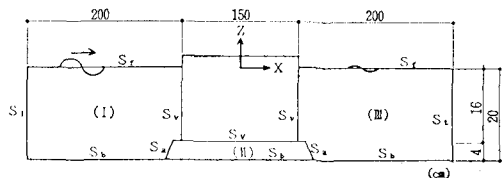


図-9 解析領域

マウンド内では, 井島らの研究²⁾にならい速度と加速度に比例する抵抗を受けるものとした。連続の方程式と運動の方程式は次のようになる。

$$\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial W}{\partial z} = 0 \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} = -\frac{1}{\lambda} \left\{ \mu_1 + (1 + \mu_2) \frac{\partial}{\partial t} \right\} U \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} = -\frac{1}{\lambda} \left\{ \mu_1 + (1 + \mu_2) \frac{\partial}{\partial t} \right\} W - g \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここに, λ : 空隙率, U, W : 流体の水平および鉛直の局所平均流速, P : 流体圧力, ρ : 密度, g : 重力加速度, μ_1, μ_2 : 速度および加速度に対する抵抗係数。

速度ポテンシャルを Φ とすると, 式 (2), (3), (4) から速度ポテンシャルに関する次の方程式が得ら

れる。

$$\frac{P}{\rho} = -\frac{1}{\lambda} \left\{ \mu_1 + (1 + \mu_2) \frac{\partial}{\partial t} \right\} \phi - gz \quad \dots\dots\dots (5)$$

スリット部分、空気室部分でも解析における境界はマウンド上面に取った。スリット部分の境界では、スリット内の水面変動 η に対して、 $\eta \rho g$ の圧力変動があり以下の式で表される。

$$\Delta P = \eta \rho g \quad \dots\dots\dots (6)$$

空気室は断面積が等しいスリットに置換して2次元にモデル化した。空気室部分では、スリットモデルと同様に水面変動による圧力変動 $\eta \rho g$ に加えて、ボイルの法則に基づいた空気圧の変動分 $\Delta P'$ が加わるため、圧力変動は以下の式で表される。

$$\Delta P' = -\frac{A\eta}{V} \cdot P_0 \quad \dots\dots\dots (7)$$

ここに、 A : 空気室断面積

$$\Delta P = \eta \rho g + \Delta P' \quad \dots\dots\dots (8)$$

スリット部分、空気室部分の境界条件は、式(6)及び(8)で表される圧力変動と等価なばねでモデル化した。

この実験で用いた空気室モデルでは圧力変動の内 $\eta \rho g$ と $\Delta P'$ の割合は 1: 1.7 程度であった。

(2) 解析結果

a) スリットモデル まず抵抗係数 μ_1 , μ_2 の解析結果への影響を調べた。 μ_1 の基準値は既往の透水抵抗試験の結果³⁾をベースにして 2.4 とし、 μ_2 は井島らの研究²⁾にもとずいて 0.5 として、 μ_1 , μ_2 とも 1/10 および 10 倍に変動させた。波周期 1.2 秒における解析結果を、実験結果と比較して図-10 に示す。 μ_1 , μ_2 とも基準値の 10 倍とすると揚圧力の解析結果は小さくなるが、逆に基準値の 1/10 にしても解析結果に大きな影響は見られなかった。基準値を用いた解析値は実験結果と良く一致しており、以後の解析はこれら基準値を用いて行うものとする。

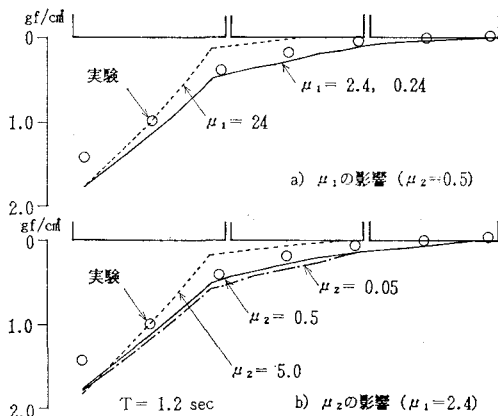


図-10 抵抗係数と解析結果 (B₂-1)

波の周期ごとに揚圧力の解析値を実験結果と比較した。図-11 に揚圧力が正で最大の時刻の分布形状を比較して示す。対策工の無いモデルの解析及び実験値も示したが、両者は良く一致していた。スリットモデルの解析値は対策工のないモデルの解析値よりもかなり小さく、各周期ともケーソン前端からスリットの間で圧力低下が大きいという実験で見られたスリットモデルの揚圧力分布の特徴が、解析で良く再現できている。

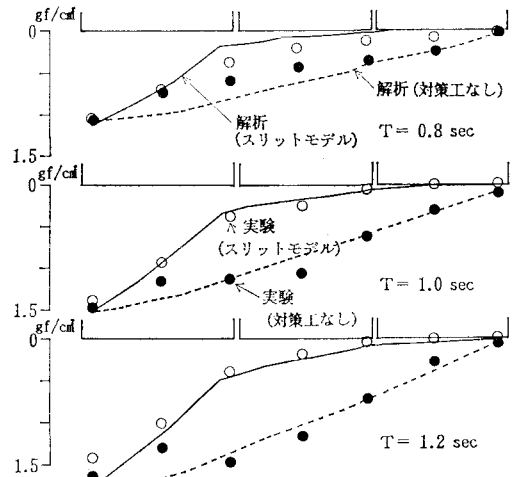


図-11 揚圧力の解析値と実験結果 (B₂-1)

次にスリット幅と揚圧力の関係を調べた。波周期 1.2 秒のケースについて図-12 にスリット幅と正の揚圧力の合力の最大値の関係を示す。スリット幅が大きくなるほど揚圧力合力は低下するが、スリット幅が小さい範囲ほどわずかなスリット幅の拡大で揚圧力合力は大きく低下する。すなわちスリット幅は比較的小さくても低減効果があること、また広くしても効果はある程度以上は向上しないことが分かる。スリット幅 2 cm, 4 cm について実験結果も示したが、解析値は実験結果と比較的良く一致していた。

解析から求めたマウンド内の水平方向の水粒子速度振幅を図-13 に示す。スリット幅が大きいほど前方の速度 U_1 が大きく、中間の U_2 , 後方の U_3 が小さくなっており、前方のスリットにより多くの流れ込みが生じる解析結果となっている。

圧力勾配に関する式(3)は次のように書き直すことができる。

$$\frac{\partial P}{\partial x} = -\frac{\rho}{\lambda} \left\{ \mu_1 + (1 + \mu_2) \frac{\partial}{\partial t} \right\} U \quad \dots\dots\dots (9)$$

水平方向の圧力勾配 $\frac{\partial P}{\partial x}$ は、マウンド内の水平流速 U と比例関係にある。スリットモデルでは図-13 に示した通り、スリット幅が大きいほど大きく、そのためケ

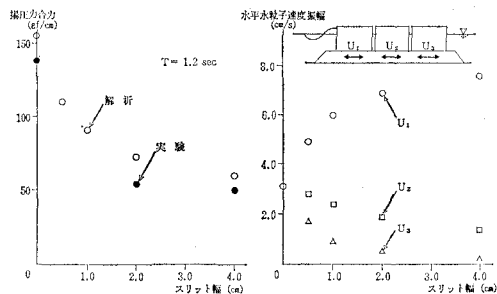


図-12 スリット幅と揚圧力合力

図-13 水粒子速度

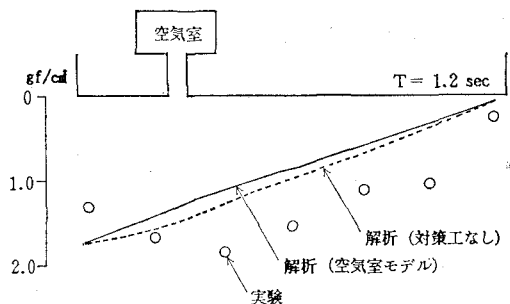


図-15 揚圧力の解析値と実験結果 (C-0)

ーソン前端からスリットの間で圧力低下が大きくなり、揚圧力合力の低下につながったと考えられる。

b) 空気室モデル 図-14 に波周期 1.2 秒に対する解析値を実験結果と比較して示す。比較のため対策工のないモデルの解析値も示した。空気室モデルの解析値は、空気室の位置を境として圧力勾配が変わる折れ線状の分布形状で、実験結果と良く一致していた。

しかし今回実験した空気室モデルでは、低減率は 20% 程度で十分な効果とは言えない。そこで空気室の断面積を 2 倍に拡大したモデルについて解析を行って効果を検討した。結果を図-14 に併記した。空気室を拡大したモデルの揚圧力の解析値では大幅な低下が見られる。解析値の揚圧力合力を(空気室モデル)/(対策工なし)の比で見ると、実験で使用了モデルの 0.75 に対して、空気室を拡大したモデルでは 0.54 となり、空気室の拡大によって十分な低減効果を得られる可能性があることが分かる。

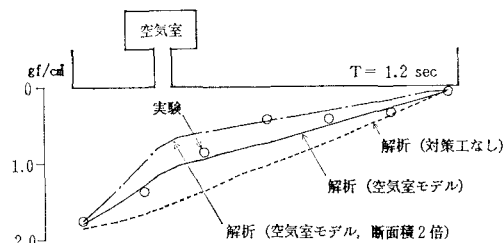


図-14 揚圧力の解析値と実験結果 (C-2)

図-15 に空気室モデルでマウンド部に豆砂利を詰めない C-0 について、揚圧力分布の解析値と実験結果を示す。実験結果は空気室付近が最大となる分布で、マウンド部に豆砂利のある C-2 と異なる結果であった。こ

れは空気室部分で共振現象が起こって大きな水面変動が生じ、空気室からマウンドの前後方向への水の流れが生じるためと思われる。しかし解析ではこの実験結果を再現できなかった。

5. 結 語

揚圧力低減対策工の効果をも型実験と解析から検討した。結果をまとめると次のようになる。

(1) スリットモデルの実験及び解析結果から、井戸方式によって揚圧力の大幅な低減が可能であると考えられる。低減効果は井戸の面積(スリット幅)が大きいくほど大きい、ある程度の面積以上では一定となる傾向がある。

(2) 空気室方式は井戸方式ほどではないが、低減効果が見られた。空気室の拡大によって十分な低減効果を得られる可能性がある。

(3) これらの対策工の効果も含めて、境界要素法によって比較的うまくシミュレーションができた。しかしマウンドのない空気室モデルの挙動は再現できなかった。

今後の問題点としては、対策工やケーソンそのものの 3 次元性を含めた効果の評価と、この実験や解析から実構造物の性状を推定するに於けるマウンド部の流体抵抗の相似則の検討があげられる。

参 考 文 献

- 1) 藤井俊二: 免震効果を考慮した着底型人工島の試設計、土と基礎, Vol. 34, No. 1, pp. 49~55, 1986.
- 2) 井島武士・松井 創・永田修一: 任意断面形の空隙浮体の 2 次元運動と波の変形, 土木学会論文報告集, 第 296 号, pp. 25~38, 1980.
- 3) 田淵幹隆・滝川 清: 透過性構造物の流体抵抗について, 第 25 回海岸工学講演会論文集, pp. 402~406, 1978.