

ケーソン式護岸の模型振動実験に対する 間隙水の影響を考慮した解析手法の適用

東電設計(株) 正会員 中瀬 仁 正会員 安中 正
東京電力(株) 正会員 藤谷昌弘 正会員 嶋田昌義

1.はじめに

ケーソン式護岸の模型振動実験をシミュレーションする場合、ケーソンを改良個別要素法による連結要素、背後地盤および消波工を回転拘束した円形要素の集合でモデル化することにより、水で満たされない模型の大変形についてはかなり再現性良い結果が得られる。しかしながら、実際には背後地盤の間隙水による過剰間隙水圧の影響が無視できない程度に大きいことが分かっている¹⁾。そこで本研究では、土粒子やケーソンの運動に伴う間隙の変化による間隙水圧の発生を考慮する解析手法を提案し、ケーソン式護岸の模型振動実験に対するシミュレーションに適用した。

2.間隙水の影響を考慮する解析手法の提案

背後地盤に発生する間隙水圧を考慮するため、要素の運動による間隙の増減を間隙水圧の変化に変換し、発生した間隙水圧の勾配に比例する荷重が間隙水から再び要素に加わるとともに、間隙水圧が一定の時間間隔を経て四方へ消散する機能を従来の個別要素法に付加した。図-1にそのアルゴリズムを示す。

二点鎖線の枠内の流れが従来の個別要素法のアルゴリズムであり、点線が新たに付加した機能である。新

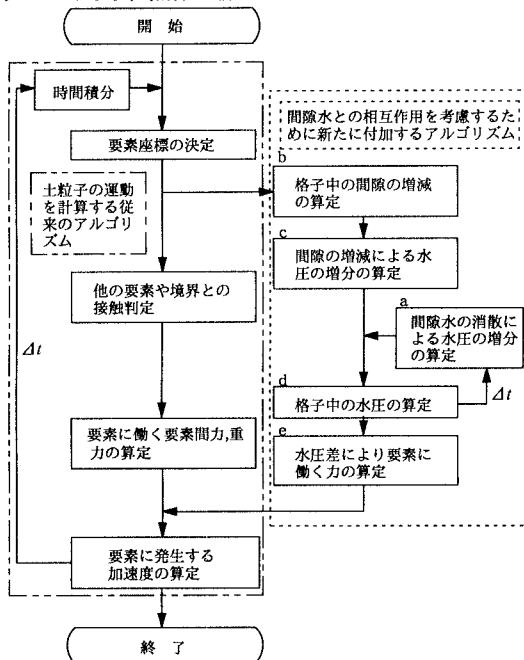


図-1 要素の運動と間隙水との相互作用を考慮するためのアルゴリズム

たに付加したアルゴリズムの中で中心となるルーチンが「a: 間隙水圧の消散による水圧の増分の算定」である。このルーチンは、多孔質体の浸透流解析で一般的に用いられているアルゴリズムをそのまま移植したものである。多孔質体の浸透流解析は、対象領域を $n_x \times n_y$ の格子に分割し、時間 t における各格子の水圧を初期条件に Δt 秒後における各格子の水圧を陰解法差分法により求める手法である。格子には、図-2に示すように隣接する4つの格子との間だけに流れが発生すると仮定する。時間間隔 Δt 秒間に発生する浸透流について次のように連続式とダルシーの法則を適用し、全格子についての接点方程式を連立する。

まず、格子 ij について連続式より

$$\Delta t (Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4) = (h_{ij}^{t+\Delta t} - h_{ij}^t) S_{ij} dx dy \quad (1)$$

格子 ij に関するダルシーの法則より

$$Q_1 = dx T_1 (h_{i,j+1}^t - h_{ij}^t) / dy \quad Q_2 = dx T_2 (h_{i+1,j}^t - h_{ij}^t) / dy \\ Q_3 = dx T_3 (h_{i,j-1}^t - h_{ij}^t) / dy \quad Q_4 = dx T_4 (h_{i-1,j}^t - h_{ij}^t) / dy \quad (2)$$

$$\text{ただし、} h^{t+1} \equiv \frac{h^{t+\Delta t} + h^t}{2}$$

Q_1, Q_2, Q_3, Q_4 : 格子 $i, j+1, i+1, j, i, j-1$ および $i-1, j$ から格子 ij への間隙水の流入量, $h_{ij}^{t+\Delta t}, h_{ij}^t$: 時間 $t + \Delta t$ および t における格子 ij のピエゾ水頭, S_{ij} : 格子 ij の貯留係数, 格子 ij に水頭が単位量だけ増加した場合、圧縮性によって新たに貯えられる水量, dx, dy : 格子の幅および高さ, T_1, T_2, T_3, T_4 : 格子 $i, j+1, i+1, j, i, j-1$ および $i-1, j$ と格子 ij との間の平均的な透水係数

次に、対象とするモデルの境界条件を与えると、連立方程式の解である、時間 $t + \Delta t$ における任意の格子のピエゾ水頭が計算できる。

最後に、ピエゾ水頭 h と水圧 p の関係 $h = p / \rho g$ (ρ : 水の密度, g : 重力加速度) を用いて、間隙水の消散による水圧の増分 Δp_{ij}^D を得る。

$$\Delta p_{ij}^D = \rho g (h_{ij}^{t+\Delta t} - h_{ij}^t) \quad (3)$$

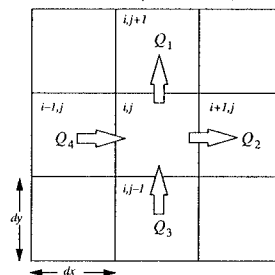


図-2 差分格子

提案する解析手法においては、背後地盤に差分格子を重ね合わせるように設定して浸透流解析の対象領域とし、格子内の個別要素法によって計算された土粒子やケーソンの運動による間隙の増減による水圧の増分と、式(3)の間隙水の消散による水圧の増分とを、時間 t における水圧に足し合わせ Δt 秒後におけるその格子の水圧とする。要素が間隙水圧から受ける力は格子間の水圧の差分から計算される。なお、提案する解析手法においては、間隙水の影響としてはその水圧のみを考慮し水の慣性力は考慮されていない。

3.提案する手法の模型振動実験に対する適用

図-3に示すような解析モデルを用いて模型振動実験のシミュレーションを行なう。ただし、ここではケーソンの運動により背後地盤との間に発生する間隙の変化のみを考慮し、土粒子の間隙の変化による間隙水圧の発生は考慮しない。また、土粒子、ケーソンおよび消波工に働く浮力は考慮するが、これらに対する間隙水圧の作用は考慮しない。

多孔質体の貯留係数($4.41 \times 10^{-5} \text{m/Pa}$)は、水の体積圧縮係数から定めた。透水係数は、ケーソンの応答を最も良く再現できる $0.2 \times 10^{-4} \text{m/秒}$ とした。他の材料定数は文献(1)による。

図-4(a)に間隙水圧について実験とシミュレーションの比較を示す。シミュレーションは間隙水圧によるサクシジョンの発生を良く再現しているが、正の領域の振幅が極めて小さい。これは、実験に比べて背後地盤の抵抗が大きく、ケーソンの陸側への変位が小さいことによるものであると考えられる。

図-4(b)にケーソンの相対変位について実験とシミュレーションの比較を示す。背後地盤に発生する負の間隙水圧を考慮することにより、図-5の浮力のみを考慮したシミュレーション結果に比べて大幅に再現性が改善された。

図-6に消波工から受ける圧力(消波工圧)について、実験とシミュレーションの比較を示す。初期の振動を受けたのち、0値からスタートした波形が、 -750Pa 付近でほぼ一定となった後、規則正しい間隔で反発する様子が両者で対応している。反発を示すタイミングは、図-4(b)との比較より、ケーソンが陸側に運動している時であることが分かる。

この結果は、1) ケーソンが海側に運動する際には、背後地盤で発生するサクシジョンにより陸側に引かれる作用を受け、消波工がケーソンと分離して海側へ滑ります。これにより加振前には、 750Pa 程度働いていた消波工圧が0になる。2) ケーソンが陸側に運動する際には、背後地盤からの土圧と正の間隙水圧を受け急速に

速度が減少し、これらの抵抗を受けない消波工は、後ろからケーソンに衝突していることを示している。

4.おわりに

個別要素法にケーソンや土粒子の運動に伴う間隙の変化による過剰間隙水圧を考慮するための解析手法を提案し、ケーソン式護岸の模型振動実験に対するシミュレーションに適用した。実験結果と比較した結果、この解析手法が非常に有効であることが示された。今後は、土粒子の間隙の変化による間隙水圧の発生を合わせて検討することが、危急の課題であると考えている。本研究では、京都大学の澤田純男氏の開発した「DEMS」を改良して用いた。

参考文献 1) 中瀬・安中・栗田・嶋田・藤谷：ケーソン式護岸の模型振動実験に対する個別要素法の適用，土木学会第49回年次学術講演会講演概要集，第1部，pp.904～905，1994年

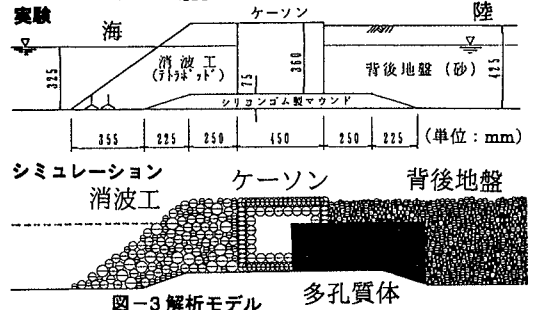
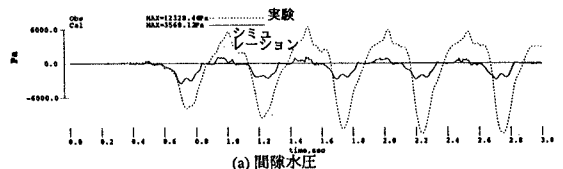
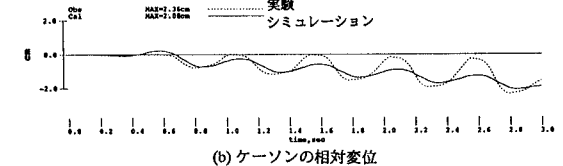


図-3 解析モデル



(a) 間隙水圧



(b) ケーソンの相対変位

図-4 実験とシミュレーションの比較

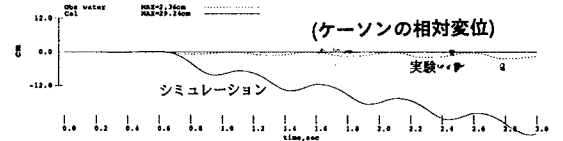


図-5 浮力のみを考慮したシミュレーション結果

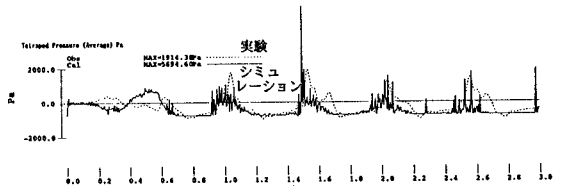


図-6 ケーソンに作用する消波工圧