

(127) 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個別要素法の適用

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

発電所の新立地方式として人工島を想定した場合、取水路などの関連する施設の耐震安全性を評価するためには、強い地震に対する護岸の応答を正確に予測しておく必要が有る。筆者等は数年来ケーソン式護岸の1/40模型振動実験¹⁾を対象に個別要素法の実用化に取り組んできた。その結果、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²⁾、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ようになった。しかしながら、実際にはケーソンの運動に伴って背後地盤に発生する間隙水圧によるケーソンの運動を制止しようとする方向に働く力が無視できない程度に大きいことが分かっている³⁾。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ためのアルゴリズム

背後地盤に発生する間隙水圧を考慮するため、要素やケーソン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。

間隙水を考慮することにより、個別要素法を液状化解析に適用しようとする試みはすでに垂水ら⁴⁾によってなされている。垂水らの方法の要点は、1)主として互いに接する要素の中心を結ぶ線分により、要素間の間隙を区分けして登録する、2)要素の移動によるそれぞれの間隙における体積の増減を厳密に計算し、これに水の体積圧縮率を乗じることにより間隙に発生する水圧を計算する、3)発生した水圧は、隣り合う間隙間においてダルシーの法則にしたがって水のやり取りを行なうことにより消散する、4)要素に加わる力は、要素が間隙に接する面積に水圧を乗じることにより計算する、5)以上の計算を時間軸上で陽に繰り返す、ことであろう。しかしながら、結局、水の体積圧縮率が大きいので、計算の安定のため時間間隔を非常に小さくする必要が有り計算時間がかかるため、解析に用いる要素数は制限されると述べられている。

ここでは計算を簡単にするため、適当な格子で区分けされた領域にある要素を一まとめとして、これら要素の平均的な移動量により格子内の間隙の変化をおおまかに算定し、水圧の消散は、格子間の水のやり取りによって簡単に行なうことにより計算時間の短縮を試みた。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間隙の変化によって生じた間隙水圧を消散させる機能を持つ。

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差分法により求める手法である。このとき陰解法を用いることにより大幅に計算時間を短縮できる。

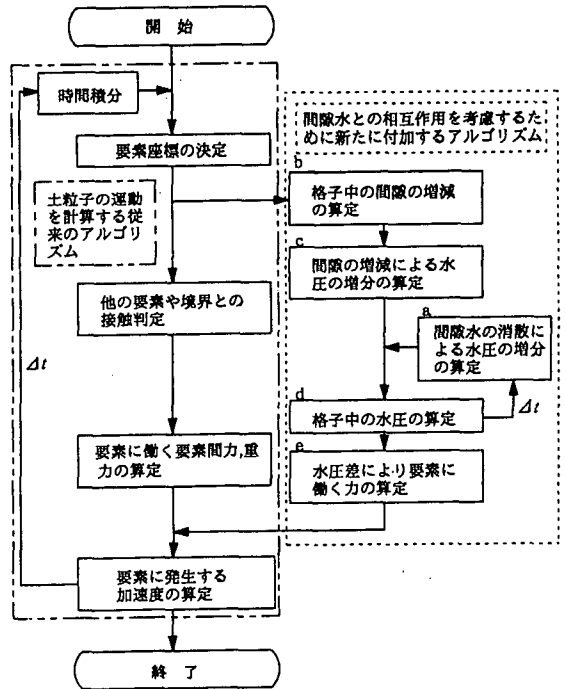


図-1 要素の運動と間隙水との相互作用を考慮するためのアルゴリズム

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 i,j 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 i,j に関するダルシーの法則より

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

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

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

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 i,j への間隙水の流入量

$h_{ij}^{t+\Delta t}, h_{ij}^t$: 時間 $t + \Delta t, t$ における格子 i,j のピエゾ水頭

S_{ij} : 格子 i,j の貯留係数: 格子 i,j 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 i,j 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。

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

さて、背後地盤に差分格子を重ね合わせた領域の格子内における土粒子やケーソンの運動による間隙の増減 Δv_{ij} はルーチンbにおいて式(4)により計算される。

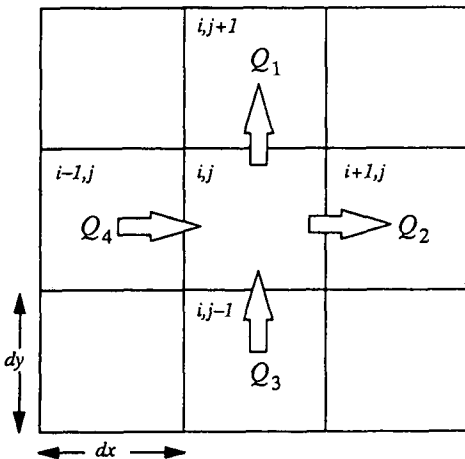


図-2 差分格子

$$\Delta v_{ij} = \frac{(\bar{u}_{i+1,j} - \bar{u}_{i,j}) dy + (\bar{w}_{i,j+1} - \bar{w}_{i,j-1}) dx}{2} \quad (4)$$

ここに

$\bar{u}_{k,l}$: 格子 k,l における要素の重み付平均的水平変位増分

(重みは要素の面積を用いる)

$\bar{w}_{k,l}$: 格子 k,l における要素の重み付平均鉛直変位増分

(重みは要素の面積を用いる)

この間隙の変化に伴って発生する水圧の増分 Δp_{ij}^P はルーチンcにおいて式(5)により計算される。

$$\Delta p_{ij}^P = \rho g \Delta v_{ij} \frac{1}{S} \quad (5)$$

次に、ルーチンdにおいて、ルーチンcで計算された土粒子やケーソンの運動による水圧の増分とルーチンaで計算された間隙水の消散による水圧の増分とを時間 $t - \Delta t$ 秒の時の水圧に足し合わせ時間 t における各格子の水圧 p_{ij}^t を計算する。

$$p_{ij}^t = p_{ij}^{t-\Delta t} + \Delta p_{ij}^P + \Delta p_{ij}^D \quad (6)$$

こうして、時間 t における各要素が間隙水から受ける力は、ルーチンeにおいて、鉛直方向については各要素が含まれる格子の上下の格子間の水圧、水平方向については左右の格子間の水圧をそれぞれ要素の面積に乘じるにより計算できる。

各要素が間隙水から受ける力のデータは、個別要素法の従来のアルゴリズム側に渡されて、要素に働く他の力と足し合わされて、加速度を求められ、次のステップである時間 Δt 秒後の要素位置が計算される。

一方、ルーチンdにおいて求められた時間 t における各格子の水圧のデータは、ルーチンaに渡されて、時間 Δt 秒後の間隙水の消散による水圧の増分が、個別要素法側の計算と同期をとる形で計算される。

以上が、個別要素法で計算された要素位置の変化を入力として、間隙水から各要素が受ける力を出力するアルゴリズムの概要である。間隙水の影響としては水圧のみを考慮し水の慣性力は考慮していない。

ここでは、このような間隙水圧の影響を考慮するための領域を設定することを多孔質体によるモデル化を行なうと呼ぶ。

3.提案する手法の適用

(1)シミュレーション1

まず、図-3に示すような解析モデルを用いてアルゴリズムの機能を確かめる。中央の四角い箱がケーソンモデルである。背後地盤において浸水している領域を多孔質体としてモデル化し、ケーソンを強制的に変位させることにより背後地盤に発生する間隙の変化に伴う水圧の発生と消散をシミュレーションする。ここでは、背後地盤の要素は考慮せず、ケーソンの運動に伴

う水圧の発生と消散にのみ着目する。

図-4に、ケーソンの運動による間隙の変化量の計算の仕方と、間隙の変化による水圧の増分の与え方を示す。ここでは、背後地盤の要素の運動を考慮に入れないので、多孔質体に発生する間隙の変化は、ケーソンの運動によってのみ発生する。この間隙の変化量は多孔質体モデルを表す格子のa列に占めるケーソンの面積の変化量として計算する。格子に発生した間隙の変化は、b列で生じたものとして計算する。

図-5に(a)透水係数と(b)貯留係数で表される、差分格子の境界条件と初期状態を示す。透水係数0の格子は不透水層を表し、 0.1×10^{-3} m/秒の格子は、多孔質体としての背後地盤を表す。この値は、一般的な砂が示す透水係数のレベルである。地下水面やケーソン側の境界にあたる格子は、水の自由な出入りを許すため、貯留係数に大きな値を与えている。多孔質体の貯留係数は、水の体積圧縮率から定めた。

図-6にシミュレーション結果を示す。ケーソンが海側に運動するとき、多孔質体に負の間隙水圧が発生し、ケーソンが陸側に運動するとき、多孔質体に正の間隙水圧が発生する。これは、ケーソンの動きを制止する方向に力が働いていることを示しており、実験で表れた現象を定性的に再現している。

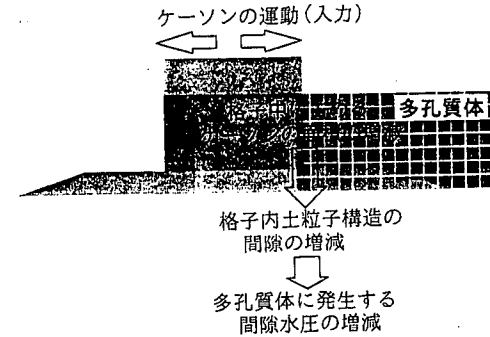


図-3 シミュレーションの方法

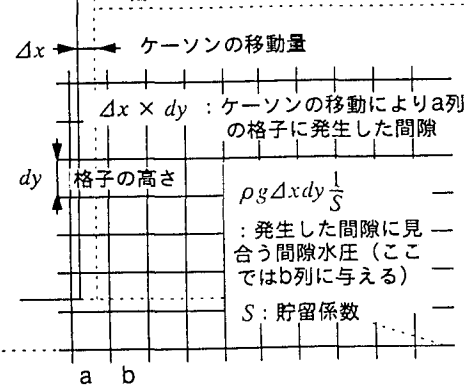


図-4 ケーソンの運動に伴う格子中の間隙の変化と間隙水圧の発生

(2)シミュレーション2

次に、図-7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

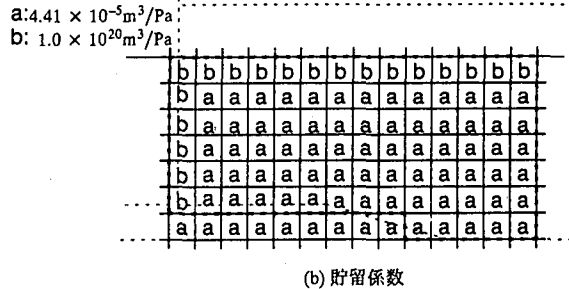
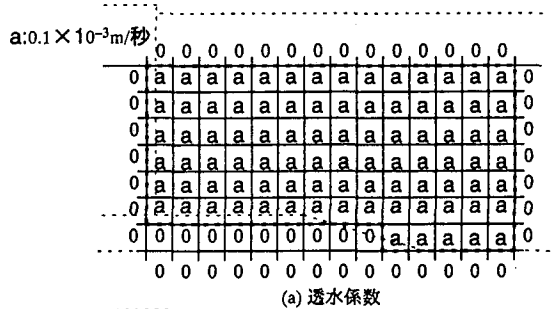


図-5 差分格子に与えられた境界条件と解析の初期状態

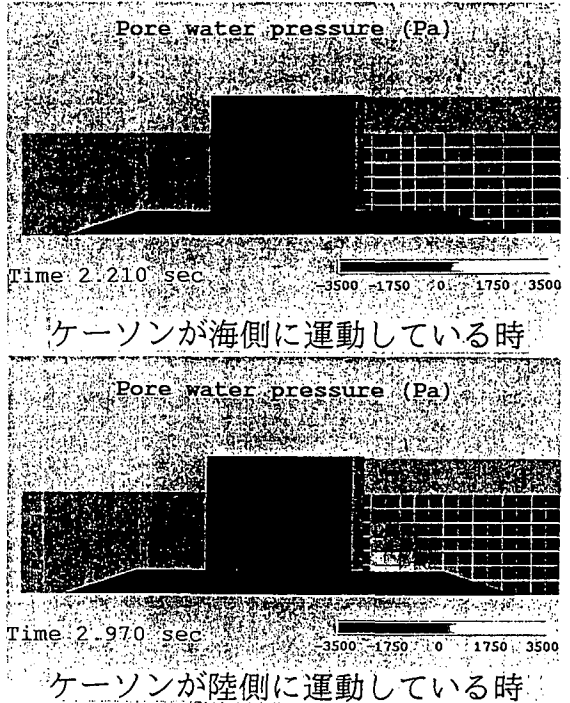


図-6 シミュレーション結果

隙水圧の発生は考慮しない。ただし、土粒子およびケーソンが受ける間隙水圧の作用は考慮する。また、土粒子、ケーソンおよび消波工に働く浮力は考慮している。

多孔質体の貯留係数(4.41×10^{-5} m/Pa)は、水の体積圧縮率から定めた。透水係数は、ケーソンの応答を最も良く再現できる 0.2×10^{-4} m/秒とした。差分格子の境界条件は、シミュレーション1と同じである。他の材料定数は文献(3)による。

図-8(a)に500gal程度の正弦波入力した実験結果とこれに対するシミュレーション結果の比較を間隙水圧について示す。シミュレーションは間隙の増大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-8(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-8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-9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-6(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。特に、間隙水圧の消散を計算するため陰解法差分法による浸透流解析を応用して大幅に計算時間を短縮することができた。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、緊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) 安田・福井・佐藤・豊田・黒瀬: 護岸構造物の地震時挙動に関する実験的研究(その1), 土木学会第47回年次学術講演会講演概要集, 第1部, pp.160~161, 1992年

2) Meguro, K. and Hakuno, M.: Fracture Analysis of Concrete Structures by the Modified Distinct Element Method, Proc. of JSCE, Structural Eng./Earthquake Eng., No.410/I-12, pp.113~124, October 1989.

3) 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

4) 垂水祐二・伯野元彦: Quick Sandと液状化に関する粒状体シミュレーション, 地震研究所報, Vol.62, pp535~577, 1987年

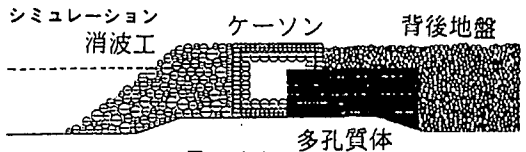
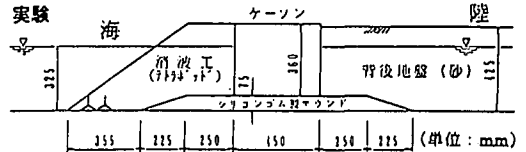
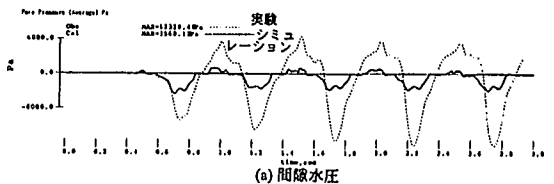
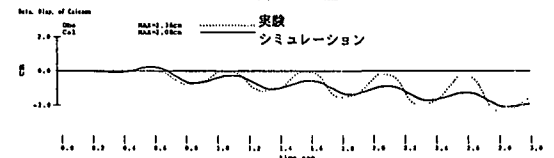


図-7 解析モデル



(a) 間隙水圧



(b) ケーソンの相対変位

図-8 実験とシミュレーションの比較

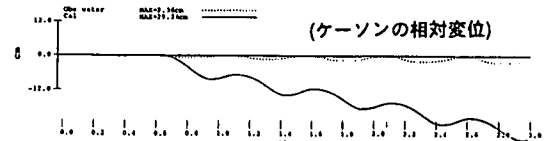


図-9 浮力のみを考慮したシミュレーション結果

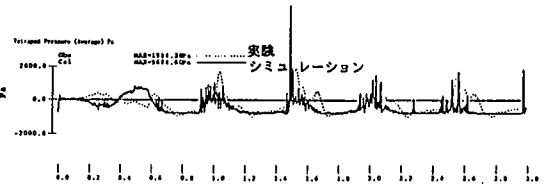


図-10 ケーソンに作用する消波工圧