応用力学論文集Vol.2,PP.543-550（1999年8月） 土木学会

個別要素法を用いた上下動が砂地盤の液状化に及ぼす影響に関する研究

Effect of Vertical Seismic Motion on Soil Liquefaction by Using Distinct Element Method

中川　浩明*・翟　恩地**・宮島　昌克***・北浦　勝****
Hiroaki NAKAGAWA、Endi ZHAI、Masakatsu MIYAJIMA and Masaru KITAURA

*学生会員　修（工）　金沢大学大学院　自然科学研究科　（〒920-8667　金沢市小立野 2-40-20）
**　博（工）　Powertech Labs Inc.　研究員　（ 12388-88th street, Surrey, B.C., Canada V3W 7R7 ）
***正会員　工博　金沢大学助教授　工学部土木建設工学科　（〒920-8667　金沢市小立野 2-40-20）
****フェロー　工博　金沢大学教授　工学部土木建設工学科　（〒920-8667　金沢市小立野 2-40-20）

The present paper deals with an effect of vertical seismic motion on soil liquefaction. A new DEM program was proposed for this study by considering an effect of vertical motions in the equation of motion. Detailed approaches of calculating the volume change of pores and excessive pore water pressure were given. The results of simulation indicated that the excess pore water pressure could rise in case of only vertical shaking. The numerical simulation made it possible to explain microscopically an effect of vertical motion on soil liquefaction. The results in this study agreed to those of the shaking table tests done by the authors.

Key Words：distinct element method, vertical seismic motion, soil liquefaction

1. はじめに

1995 年兵庫県南部地震では神戸市を中心に構造物に大きな被害が生じた。また、ポートアイランドなどの埋め立て地では液状化の発生が数多く確認された。この地震は直下型地震であったため、上下地震動が過去の地震と比べて非常に大きかった。この地震では、液状化しにくいとされていたまさ土が液状化したことが知られている。これまで、今回の地震ほど大きな上下動を経験していなかったので、上下動が地盤の液状化に及ぼす影響については十分に検討されてこなかった。そして、上下地震動は液状化にさほど影響を及ぼさないと言われていた。しかし、この地震でまさ土が液状化した原因の 1 つとしてこの大きな上下動が地盤の液状化に何らかの影響を及ぼしたのではないかと我々は考えた。すなわち、水平動に大きな上下動が加わることによって、液状化が促進されるのではないかと考えた。そこで、砂地盤の模型振動実験を行い上下動が地盤の液状化に及ぼす影響を検討した結果、これまでの我々の実験では、水平動に上下動が加わることにより液状化の発生が促進されることが確認されている [1)]。しかし一方では、連続体理論を用いて液状化現象を説明している森らの研究においては、上下動が地盤の液状化に影響を及ぼさないと結論づけられている [2)]。

過去に広く行われた砂の液状化解析では、砂を連続体として理想化したモデルを用いて解析を行っており、粒状体の集まったモデルを用いて解析したものとは異なる。上下動は砂粒子の動きに影響を及ぼし、砂粒子の沈下や回転を引き起こす。その結果、間隙が減少しようとし、液状化に至るまで過剰間隙水圧が上昇することになる。連続体理論では、このような現象を取り入れることができない。そこで本研究では、砂粒子の動きを検証できる個別要素法（DEM）を用いて上下動が砂の液状化に及ぼす影響を明らかにすることにした。

DEM は Cundall によって提案された [3)]。DEM はそれぞれの要素が作用、反作用の法則に従い、要素間で力の伝達を行うことを基本にしている。各要素ごとに独立な運動方程式をたて、個々の要素の運動を追跡していくものである。Hakuno and Tarumi は初めて DEM に間隙水の流れモデルを導入した [4)]。

しかし、Hakuno and Tarumi のプログラムにおいては、上下動は運動方程式に導入されていない。そこで、Cundall と Hakuno and Tarumi の研究を基に上下動の効果を取り入れた計算手法を提案し、これを用いて上下動が砂の液状化に及ぼす影響を検討する。

2. 上下動も考慮した液状化 DEM プログラム

2.1 砂粒子の運動方程式

図−1 に示すように、ある円要素 i（半径 r_i）において、Δu_i と Δv_i はそれぞれ X 成分、Y 成分の変位増加量とする。$\Delta\varphi_i$ は回転増分で Δt は微小な時間増分である。図−2 は要素 i が要素 j に接触する場合を示している。接触状態では

$$r_i + r_j + \varepsilon_m \geqq R_{ij} \tag{1}$$

が成立している。ここで、R_{ij} は

$$R_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \tag{2}$$

である。また、ε_m は実際の砂粒子は丸くなく、不規則な角があるという影響を考慮するためのものである。そして、(x_i, y_i) は要素 i の中心の座標である。

α_{ij} は反時計回りに正値であるとすると、接触点の座標は次の式で表される。

$$\sin\alpha_{ij} = -(y_i - y_j)/R_{ij} \tag{3}$$

$$\cos\alpha_{ij} = -(x_i - x_j)/R_{ij} \tag{4}$$

Δt 時間に接触する 2 つの要素 i、j 間の法線方向における相対変位の増加量を Δu_n（近づく方向を正とする)、接線方向における相対変位の増加量を Δu_s（反時計回りを正とする）とすると、それらは次式で計算できる。

$$\Delta u_n = -(\Delta u_i - \Delta u_j)\cos\alpha_{ij} - (\Delta v_i - \Delta v_j)\sin\alpha_{ij} \tag{5}$$

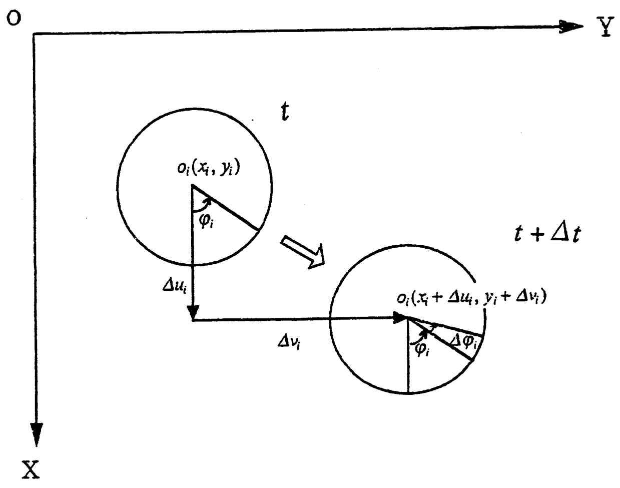
$$\Delta u_s = (\Delta u_i - \Delta u_j)\sin\alpha_{ij} - (\Delta v_i - \Delta v_j)\cos\alpha_{ij} + (r_i\Delta\varphi_i + r_j\Delta\varphi_i) \tag{6}$$

図−3 は要素 i と j の接触面で作用する力を 2 つの成分（法線方向、接線方向）に分けて計算を行うことを表している。例えば、法線方向で圧縮力 f_n が、接線方向でせん断力 f_s が作用することになる。

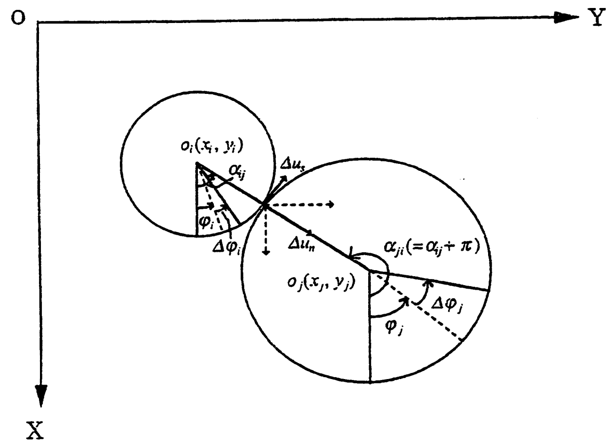
Cundall は弾性バネ（k_n）と粘性ダッシュポット（η_n）を並列に配置した [3]。この弾性バネは図−1 に示すような Δt 時間の相対変位の増加量 Δu_n に比例する力 Δe_n を生ずるものである。また、粘性ダッシュポットは相対速度 $\Delta u_n/\Delta t$ に比例して、粘性抵抗力 Δd_n を生じる。

$$\Delta e_n = k_n \Delta u_n \tag{7}$$

$$\Delta d_n = \eta_n \Delta u_n / \Delta t \tag{8}$$



図−1　要素 i の変位増加量



図−2　要素 j が要素 i と接触したときの相対変位

ここでは圧縮を正とする。

時刻 $t+\Delta t$ において、法線方向に作用する弾性反力 $[e_n]_{t+\Delta t}$ と粘性抵抗力 $[d_n]_{t+\Delta t}$ は、次のように表される。

$$[e_n]_{t+\Delta t} = [e_n]_t + \Delta e_n \tag{9}$$

$$[d_n]_{t+\Delta t} = \Delta d_n \tag{10}$$

ここで、$[\ ]_t$ は時刻 t における物理量を表している。

粒子間の引張反力を考慮していないので上式(9)、(10）には次のような条件が付けられる。

$[e_n]_t < 0$ のとき、

$$[e_n]_t = [d_n]_t = 0 \tag{11}$$

ダイレタンシーの特性やゆる詰め砂の圧縮性をシミュレートするために、Hakuno and Tarumi は非弾性バネを用いることを提案した [4]。その中でも、飽和砂地盤の特性、特に砂の非線形性をシミュレートするためには非線形非弾性バネモデルを用いなけれ

ばならないとされている。したがって、この解析では図－4 に示すような非線形非弾性バネモデルを用いることにした[5]。そして、弾性反力を制限するために1つの条件を加え、

$[e_n]_t > f_{max}$ のとき、

$$[e_n]_t = f_{max} \tag{12}$$

とした。この条件において、2 つの要素間の法線方向に作用する圧縮力は次のように計算される。

$$[f_n]_t = [e_n]_t + [d_n]_t \tag{13}$$

同様に、接線方向に作用する力を計算することができる。接線方向における弾性反力や粘性抵抗力の増加量は次のように表される。

$$\Delta e_s = k_s \Delta u_s \tag{14}$$

$$\Delta d_s = \eta_s \Delta u_s / \Delta t \tag{15}$$

時刻 $t+\Delta t$ における弾性反力 $[e_s]_{t+\Delta t}$ と粘性抵抗力 $[d_s]_{t+\Delta t}$ は次のように表すことができる。

$$[e_s]_{t+\Delta t} = [e_s]_t + \Delta e_s \tag{16}$$

$$[d_s]_{t+\Delta t} = \Delta d_s \tag{17}$$

このとき、引張反力は考慮していないので、次の条件が加えられる。

$[e_s]_t \leqq 0$ ならば、

$$[e_s]_t = [d_s]_t = 0 \tag{18}$$

また、接線方向ではクーロンの摩擦則に従うと仮定して、

$|[e_s]_t| > \mu [e_n]_t$ ならば、

$$[e_s]_t = \mu \, \mathrm{sign}([e_n]_t, [e_s]_t) \tag{19}$$

$$[d_s]_t = 0 \tag{20}$$

である。ここで μ は粒子間の摩擦係数である。

接線方向で、時刻 t における 2 つの要素のせん断力 $[f_s]_t$（時計回りを正とする）が次式により計算できる。

$$[f_s]_t = [e_s]_t + [d_s]_t \tag{21}$$

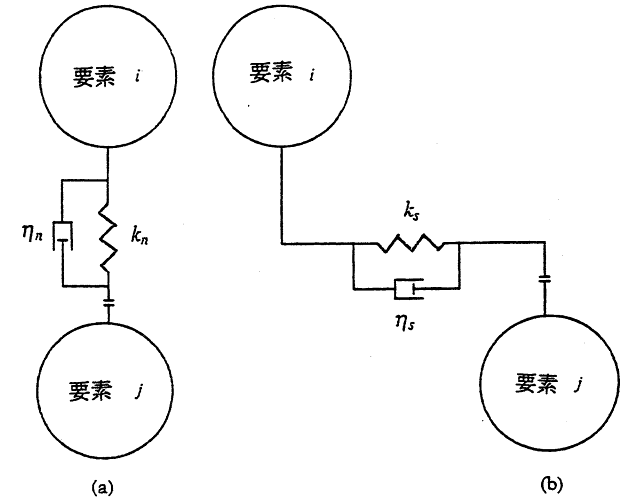
要素 i に接触するすべての要素について力 $[f_n]_t$ と $[f_s]_t$ が求められた後、X 方向と Y 方向における力 FX_i、FY_i や要素 i の中心でのモーメント M_i（反時計回りを正とする）は次式で計算できる。

$$[FX_i]_t = \sum_j (-[f_n]_t \cos\alpha_{ij} - [f_s]_t \sin\alpha_{ij} + m_i(g + a_v)) \tag{22}$$

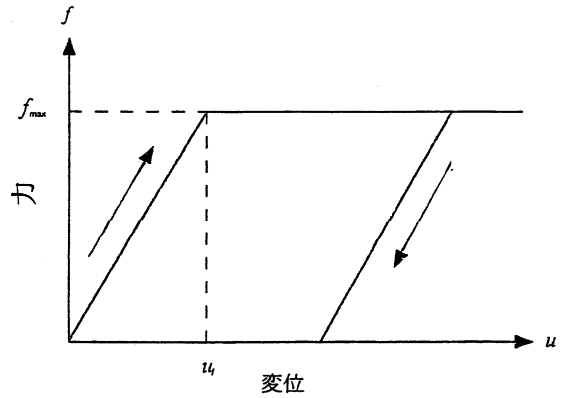
$$[FY_i]_t = \sum_j (-[f_n]_t \sin\alpha_{ij} - [f_s]_t \cos\alpha_{ij} + m_i a_h \tag{23}$$

$$[M_i]_t = -r_i \sum_j ([f_n]_t) \tag{24}$$

Σ は要素 i に接触しているすべての要素 j について



図－3　接触点における粘性－弾性バネモデル



図－4　接触粒子間における非線形非弾性バネモデル

の合計を表しており、m_i は要素 i の質量、g は重力加速度、a_h と a_v は水平、上下入力加速度である。

要素に作用する力を数式で表現することができたので、時刻 t での入力加速度をニュートンの第 2 法則を用いて計算し、次のように表すことができる。

$$[\ddot{u}_i]_t = [FX_i]_t / m_i \tag{25}$$

$$[\ddot{v}_i]_t = [FY_i]_t / m_i \tag{26}$$

$$[\ddot{\varphi}_i]_t = [M_i]_t / I_i \tag{27}$$

ここで I_i は要素 i の慣性モーメントである。

時刻 $t+\Delta t$ における速度は上式を用いることによって、次式から求めることができる。

$$[\dot{u}_i]_{t+\Delta t} = [\dot{u}_i]_t + [\ddot{u}_i]_{t+\Delta t} \cdot \Delta t \tag{28}$$

$$[\dot{v}_i]_{t+\Delta t} = [\dot{v}_i]_t + [\ddot{v}_i]_{t+\Delta t} \cdot \Delta t \tag{29}$$

$$[\dot{\varphi}_i]_{t+\Delta t} = [\dot{\varphi}_i]_t + [\ddot{\varphi}_i]_{t+\Delta t} \cdot \Delta t \tag{30}$$

そして、式（28）、（29）、（30）から時刻 t における変位増分を求めることができる。

$$[\Delta u_i]_t = [\dot{u}_i]_t \cdot \Delta t \tag{31}$$

$$[\Delta v_i]_t = [\dot{v}_i]_t \cdot \Delta t \tag{32}$$

$$[\Delta \varphi_i]_t = [\dot{\varphi}_i]_t \cdot \Delta t \tag{33}$$

Δt 時間ごとに上の計算を繰り返すことによって、力と変位の関係の時刻歴が求められる。

2.2 間隙の変化量

間隙の変化量を計算するためには、間隙の面積を求めなければならない。そこで、図－5 に示すような粒子 i が他の粒子 j_1〜j_4 によって囲まれ、4 つの間隙が形成されている場合を例に挙げて説明する。間隙量の計算においては、要素 i の周りの要素が要素 i に接触しているかどうかを調べることによって間隙量を求めることができる。例えば、間隙 1 のような間隙量は三角形の面積から扇形の面積を引いたものと等しい。同様にして、その他の間隙量（2〜4）も多角形の面積から各扇形の面積を引くことにより求めることができる。実際の砂粒子には不規則な角があるので、粒子間に小さな隙間 ε_m があり、その隙間を挟んで接していると考え、多角形の面積を求める。

2.3 過剰間隙水圧モデル

Hakuno and Tarumi は DEM に初めて過剰間隙水圧モデルを導入した [4]。間隙水はせん断抵抗しない弾性体と仮定される。図－6 に示すように、A_k、W_k、U_k をそれぞれ間隙 k の面積、水量、過剰間隙水圧とする。このとき、間隙 k の水のひずみ量 δW、過剰間隙水圧 U_k は次式で表される。

$$\delta W = (W_k - A_k) / W_k \tag{34}$$

$$U_k = E_w \cdot \delta W \tag{35}$$

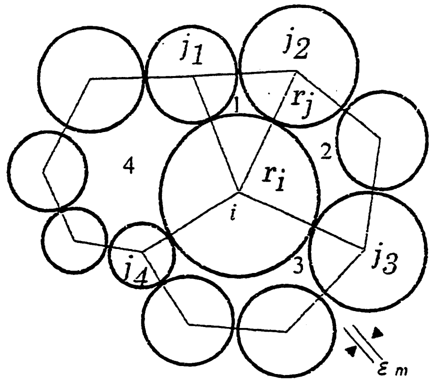
ここで、E_w は水の弾性定数である。

初期の安定状態において W_k は A_k と等しく、U_k は 0 である。A_k の量は粒子に作用する力とともに、粒子の動きによって変化する。また、ある要素の間隙水が隣の要素の間隙に移動したとき、その間隙水は過剰間隙水圧となる。任意の要素の間隙 k と任意の隣の間隙 l において、W' を k から l に流れる水の量とすると、水圧 U_k と U_l が次の時間には等しくなるという仮定において、次の式が成り立つ。

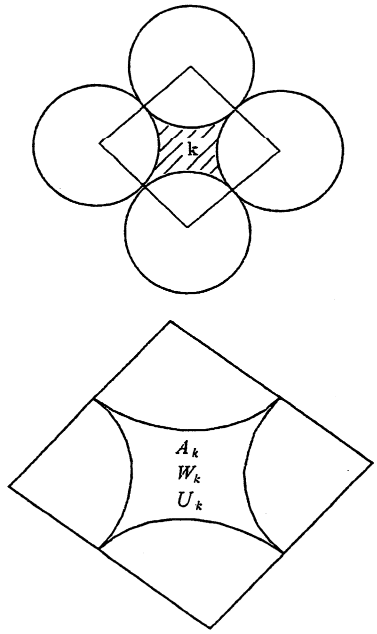
$$\frac{U_k}{E_w} = \frac{W_k - W' - A_k}{W_k - W'} = \frac{U_l}{E_w} = \frac{W_l + W' - A_l}{W_l + W'} \tag{36}$$

上式から W' が次のように求まる。

$$W' = \frac{A_l \cdot W_k - A_k \cdot W_l}{A_k + A_l} \tag{37}$$



図－5 要素 i の周りの間隙



図－6 間隙量と間隙水圧

無次元量の水圧勾配を I_{kl} と定義すると、

$$I_{kl} = \frac{U_k - U_l}{E_w} = \frac{A_l \cdot W_k - A_k \cdot W_l}{W_k \cdot W_l} \tag{38}$$

である。

$A_{kl} = \dfrac{W_k \cdot W_l}{(A_k + A_l)}$ とすると $W' = A_{kl} \cdot I_{kl}$ となる。

それゆえ、$Q_{kl} = K \cdot A_{kl} \cdot I_{kl}$ (39)

ここで K は透水係数、Q_{kl} は水量である。

式（39）は位置水頭がないとみなしたときの 2 次元のダルシー則である。時刻 t における間隙 k の水量は次のようになる。

$$[W_k]_t = [W_k]_{t-\Delta t} + \Sigma K \cdot A_{kl} \cdot \Delta t \tag{40}$$

ここで Σ は隣接するすべての間隙の合計である。

U_kを数式で表すことができたので、図－7 に示すように U_k によって生じる力が要素 i に作用するので、X 方向、Y 方向の力 $F\ U_kX_i$、$F\ U_kY_i$が次の式で計算できる。

$$F\ U_kX_i = \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} - U_k r_i \cos\alpha d\alpha = -U_k r_i (\sin\alpha_2 - \sin\alpha_1) \tag{41}$$

$$F\ U_kY_i = \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} - U_k r_i \sin\alpha d\alpha = U_k r_i (\cos\alpha_2 - \cos\alpha_1) \tag{42}$$

その結果、間隙水圧や浮力を考慮すると、式（22）、（23）、（24）は次のように修正される。

$$[FX_i]_t = \sum_j (-[f_n]_t \cos\alpha_{ij} + [f_s]_t \sin\alpha_{ij}) + m_i(g + a_v) + \sum([FU_kX_i]_t) - \rho_w \pi r_i^2 g \tag{43}$$

$$[FY_i]_t = \sum_j (-[f_n]_t \sin\alpha_{ij} - [f_s]_t \cos\alpha_{ij} + m_i a_h + \sum([FU_kY_i]_t) \tag{44}$$

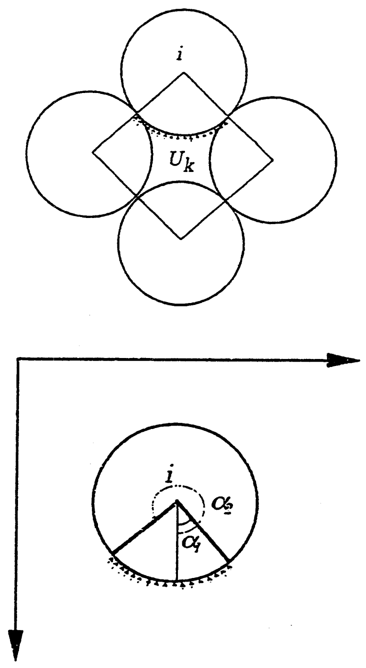
$$[M_i]_t = -r_i \sum_j ([f_s]_t) \tag{45}$$

ここで、Σは要素 i において、要素まわりすべての間隙の合計を表し、ρ_wは水の密度である。

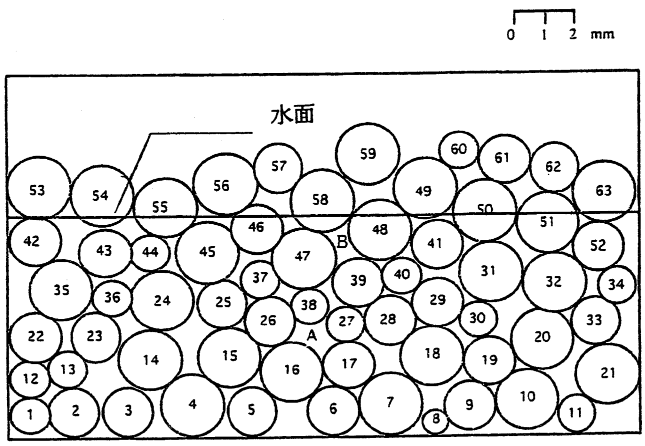
3. 上下動の影響を考慮した砂地盤の振動シミュレーション

本研究では 2 章で示したような Cundall の DEM プログラムに Hakuno and Tarumi の間隙水モデルを導入したものに、上下動の影響を運動方程式に取り入れて解析を行った。我々が行った実験では、飽和砂地盤に水平動だけを入力した場合、水平動だけでは液状化しない水平動の大きさにおいて、上下動を加えることにより砂地盤が液状化するという結果が得られている [1)]。解析を行うにあたって、このような実験結果をシミュレートすることを目的とした。図－8 に本研究の解析で用いた砂粒子の初期配置を示す。ここでは、実験の結果をシミュレートすることを目的としているので、砂地盤モデルを砂箱の中に作成された地盤であるとした。解析に要する時間を考慮し、砂地盤モデルの要素の数を設定した。

限られた解析時間で、砂地盤の液状化に上下動が及ぼす影響を顕著に検出するため、砂粒子が動きやすく過剰間隙水圧が上昇しやすいように、解析に用いるそれぞれのパラメータを決定した。解析に用いたパラメータを表－1 に示す。砂粒子が動きやすい



図－7　要素 i に作用する過剰間隙水圧



図－8　解析に用いた砂粒子の初期配置

ようにバネ定数を実際より小さな値に設定し、過剰間隙水圧が上がりやすいようにした。また、時間刻みを 1.0×10^{-6}sec に設定した。時間刻みは短ければ短いほど計算の精度は上がるが、一方では計算時間が膨大となる。時間刻みを長くした場合には、計算が発散し解が得られない場合が生じる。そこで、計算時間ができるだけ短く、しかも計算が発散しないように試行錯誤した結果、この時間刻みの値を用いることにした。水平入力加速度は振幅 200gal の正弦波であり、振動数は 100Hz である。この解析での過剰間隙水圧の発生モデルとして Martin らの提案した式 [6)] を用いた。この計算方法では入力波形

の1周期ごとに体積ひずみの増加量を求め、体積ひずみの増加量から過剰間隙水圧を計算している。そのため、振動数が大きいと過剰間隙水圧の計算回数が大きく、過剰間隙水圧の上昇に及ぼす影響を詳細に検討できるので、本解析では振動数を大きな値とした。なお、後述するようにこのような振動数の影響を調べるために入力加速度の振動数が 100Hz と 50Hz の場合で解析を行い、振動数の違いによる過剰間隙水圧の上昇量について比較を行っている。

実際の砂粒子は3次元であり、モデルのように円ではなく、不規則な角があるため、砂粒子間の隙間 ε_m を 1.3×10^{-4}m とした[4)]。透水係数 k は 0.02 cm/s、2.0cm/s の 2 つの値を用いて解析を行った。要素間の接触距離が近いときに小さい方の透水係数を用い、要素間の接触距離が遠いときに大きい方の透水係数を用いる。浮力は水位面より下にある要素に上向きに作用すると考え、水位面で過剰間隙水圧は 0 とした。

3.1 乾燥砂の間隙率に上下動が及ぼす影響

まず、上下動が砂地盤にどのような影響を及ぼすかを簡単に調べるために、モデル地盤を乾燥砂として解析を行った。この解析の結果を図－9 に示す。この図は入力波が 100Hz の正弦波で解析を行った場合における乾燥砂の間隙率の変化を表したものである。このケースでは表－1 に示すパラメータを用いているが、乾燥砂であるため間隙水や浮力は存在しない。この図で、水平動単独入力の場合では間隙率が 0.01 秒後でもそれほど変化していないことがわかる。しかし、水平動に上下動が加わった水平 200gal＋上下 30gal、水平 200gal＋上下 60gal、水平 200gal＋上下 90gal のケースを見ると、どのケースにおいても水平動単独入力のケースと比べて間隙率が大きく減少していることがわかる。間隙率の変化は飽和砂の液状化の程度と大きく関係していることが知られている[6),7)]。したがって、上下動を加えることによって、乾燥砂の間隙率が大きく減少することから、飽和砂においては上下動を加えることによって液状化の程度が大きくなると考えられる。

3.2 過剰間隙水圧の上昇に上下動が及ぼす影響

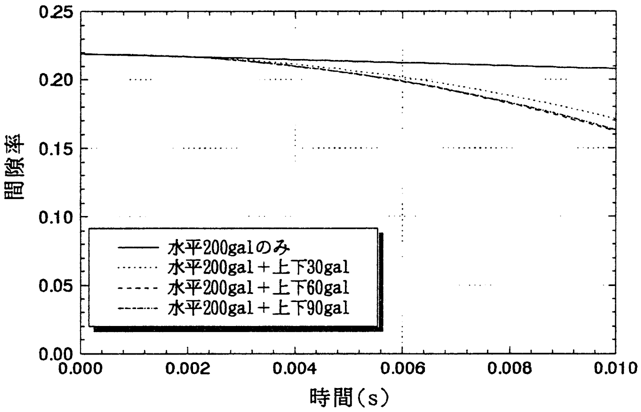
前節では乾燥砂を対象に解析を行ったが、この節ではモデル地盤が飽和砂の場合を対象に解析を行う。飽和砂地盤であるので、液状化の要因である過剰間隙水圧に注目する。表－1 に示すパラメータを用いて、水平単独入力、上下単独入力および水平・上下同時入力における解析を行った。ここでの水平入力加速度は 200gal、振動数 100Hz の正弦波であり、上下入力加速度は 90gal、振動数 100Hz の正弦波である。

まず、図－10 に水平・上下同時入力における深さの異なる2点での過剰間隙水圧の時刻歴を示す。ここでの間隙 A と間隙 B は図－8 に示した位置である。また、隣接する間隙から流れ込む間隙水により、過剰間隙水圧が発生するので、過剰間隙水圧は隣接する間隙の過剰間隙水圧との平均値で表わしている。位置 B での過剰間隙水圧が位置 A に比べて小さくなるのは、位置 B が水面に近く間隙水は地表面に消散するためであることが原因であると考えられる。この結果は、これまでに行った液状化実験の結果[1)]とよく一致していることが確認できた。

つぎに、水平、上下入力加速度の振動数をどちらも 100Hz と 50Hz の場合について解析を行い、振動数による影響を調べた。このときの入力加速度はそれぞれ、水平 200gal、上下 90gal である。図－11 に

表－1 解析に用いたパラメータ

バネ定数（垂直）k_n	1.4×10^6 (N/m)
ダッシュポット（垂直）η_n	5.2 (N・sec/m)
バネ定数（せん断）k_s	3.5×10^5 (N/m)
ダッシュポット（せん断）η_s	1.3 (N・sec/m)
砂の密度 ρ	2.7×10^3 (kg/m^3)
水の密度 ρ_w	1.0×10^3 (kg/m^3)
摩擦係数 μ	1.0
水のヤング率 E_w	2.4×10^2 (N/m^2)
透水係数 k_1	2.0×10^{-2} (cm/sec)
透水係数 k_2	2.0 (cm/sec)
時間きざみ Δt	1.0×10^{-6} (sec)
バネに作用する最大の力 f_{max}	1.0 (N)
砂粒子間の隙間 ε_m	1.3×10^{-4} (m)

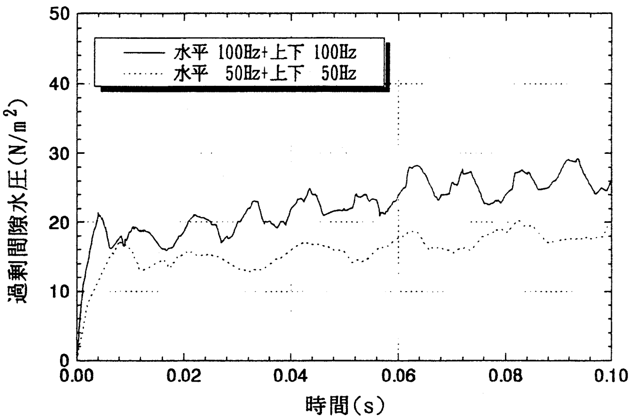


図－9 水平、上下入力時の間隙率の変化

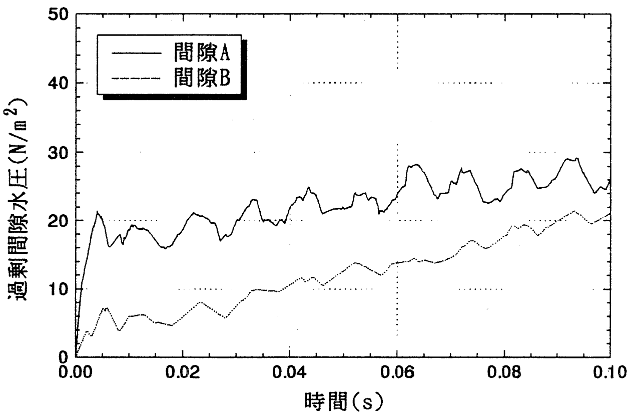
水平・上下同時入力時における振動数の違いによる過剰間隙水圧の時刻歴を示す。100Hz と 50Hz の過剰間隙水圧を見ると、50Hz の方が過剰間隙水圧の上昇が小さくなっていることがわかる。このことから、振動数が大きいと砂粒子に加わる力の振幅の回数も多くなり、過剰間隙水圧を上昇させやすくなるといえる。実際の地震では振動数が 5〜10Hz であり、この解析の 100Hz、50Hz という値は妥当ではない。しかし、上下動の振動数が大きい方が過剰間隙水圧の蓄積に大きな影響を及ぼすと考え、今回は大きな振動数を用いて解析を行った。今後、振動数が過剰間隙水圧に及ぼす影響をさらに詳細に検討する必要がある。

つぎに、振動数 100Hz で水平 200gal のみ、上下 90gal のみ、水平 200gal+上下 90gal の 3 ケースで解析を行った。それぞれのケースでの過剰間隙水圧の時刻歴を図－12 に示す。この図の過剰間隙水圧は図－8 に示す A の位置でのものである。図より、上下単独加振においては初期の時間において過剰間隙水圧の上昇が見られ、その後は一定の振幅で振動しているが、上下加速度のみによっても過剰間隙水圧が上昇することが確認できる。また、水平・上下同時加振において、0.1 秒時の過剰間隙水圧は水平単独加振の場合と比べて大きくなっているので、水平動に上下動を加えた方が過剰間隙水圧は上昇しやすいのではないかと考えられる。このことから、水平動だけでは砂地盤が液状化しない場合でも、水平動に上下動が加わることにより、液状化する場合が考えられる。上下加速度は過剰間隙水圧の上昇を促進させる働きがあるといえる。

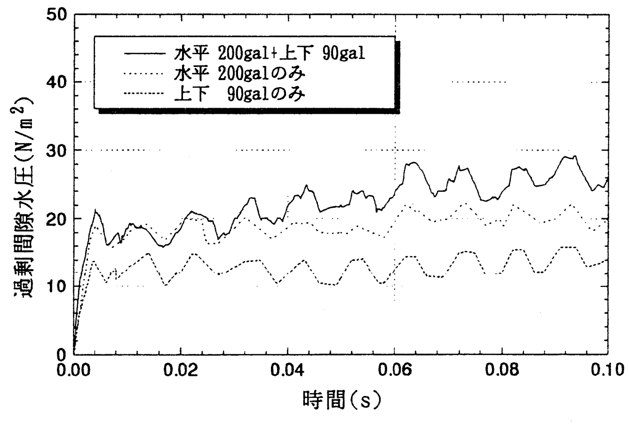
図－13 は水平単独加振時、水平・上下同時加振時の粒子の速度分布を表している。ここでは振動数 100Hz、水平 200gal、上下 90gal である。矢印の始点は粒子の位置であり、長さは速度の大きさを表している。水平単独加振と水平・上下同時加振の両者を比べると速度の分布に違いが見られる。粒子が動くことにより過剰間隙水圧が発生するので、水平動に上下動が加わった方が速度は大きくなっており、粒子の動きが大きく、過剰間隙水圧の上昇量も大きくなるといえる。図－12 において水平動のみの場合より、水平・上下同時加振の場合の方が過剰間隙水圧の上昇量が大きかったのは、上下動を加えた方が粒子の動きが大きくなり、過剰間隙水圧の上昇が促進されたからだといえる。図－13（a）の時刻 t=0.001 秒時において、砂はゆる詰めであり、密な状態になることができるためほとんどの粒子が沈下しており、速度も大きいことがわかる。この時間に



図－10　水平・上下同時入力時の深さ位置の違いにおける過剰間隙水圧の時刻歴



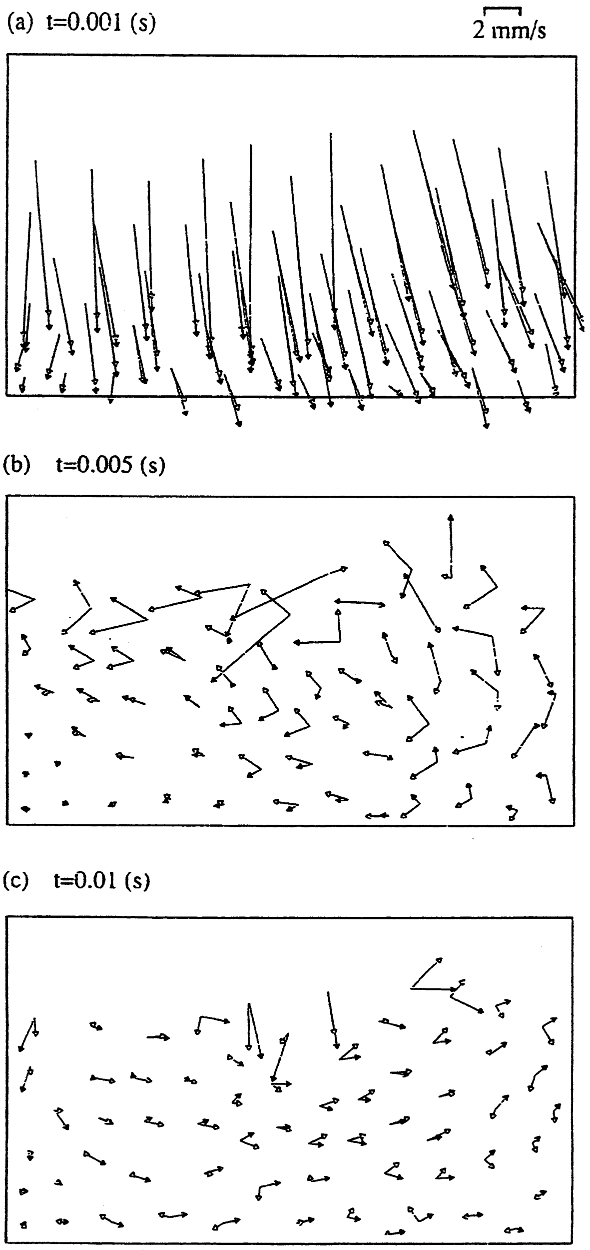
図－11　振動数の違いにおける過剰間隙水圧の時刻歴



図－12　水平単独入力、上下単独入力、水平・上下同時入力時における過剰間隙水圧の時刻歴

おいては過剰間隙水圧が上昇し、その後図－13（b）、（c）に示すように、粒子の動きが少なくなるまで過剰間隙水圧が上昇するといえる。粒子の運動エネルギーは水平単独加振の場合より、水平・上下同時加振の場合の方が大きく、大きな運動エネルギーが

(a) t=0.001 (s)



(b) t=0.005 (s)

(c) t=0.01 (s)

図－13　水平単独入力（白い矢印）、水平・上下同時入力時（黒い矢印）の粒子の速度

過剰間隙水圧の上昇を引き起こすものと思われる。すなわち、上下動が加わった方が過剰間隙水圧の上昇が大きくなるものといえる。

4. 結論

本論文では Cundall の DEM プログラムを基に、Hakuno and Tarumi の間隙水モデルを導入し、上下動が砂の液状化に及ぼす効果を検証するために上下動の運動方程式を取り入れた計算手法を提案した。間隙の変化量を詳細に計算することにより、連続体理論では取り扱うことができなかった上下動による過剰間隙水圧の変化をとらえることができた。すなわち、上下動によって砂粒子の回転や沈下運動を引き起こし、間隙の変化に伴って過剰間隙水圧が上昇する過程を表現することができた。その結果、これまで実験のみで確認されていた上下動が砂の液状化に及ぼす効果をシミュレーションにて確認することができた。したがって、液状化予測を行う際に上下動も考慮しなければならない場合のあることが本研究により示唆された。

液状化現象を定量的に捉えるという点では、要素の大きさをはじめ、各種パラメータの設定などに多くの問題を残しているが、上下動が砂の液状化に及ぼす影響を明らかにするためには、DEM は有効な手法であると考えられる。

参考文献

1）金本　昌也：上下地震動が飽和砂地盤の液状化に及ぼす影響に関する実験的研究, 金沢大学修士論文, pp.47-55, 1996.

2）森　伸一郎、三輪　滋、沼田　淳紀：1995 年兵庫県南部地震におけるまさ土埋立地盤の液状化挙動に関する振動台実験, 土木学会論文集, No.549/I-37, pp.231-248, 1996.

3）Cundall, P.A.: A Computer Model for Simulating Progressive, Large Scale Movements in Blocky Rock System, Symposium of ISRM, France, Proceedings, Vol.2, pp.129-136, 1971.

4）Hakuno, M., Tarumi, Y.: A Granular Assembly Simulation for the Seismic Liquefaction of Sand, Proceedings of Japan Society of Civil Engineers, No.398/I-10, pp.129-137, 1988.

5）Endi, Z.: Studies of Seismic Response of Vertical Ground Motion and Its Effects on Soil Liquefaction and Pipelines Buried in Saturated Sands, Doctoral Thesis Submitted to Kanazawa University, pp.82-101, 1997.

6）Martin, G.R., Finn, W.D.L. and Seed, H.B.: Fundamentals of Liquefaction under Cyclic Loading, Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol.101, No.GT5, pp.423-438, 1975.

7）Seed, H.B., Silver, M.L.: Settlement of Dry Sands during Earthquakes, Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, Vol.98, No.SM4, pp.381-397, 1972.

(1999 年 4 月 23 日　受付)