

SPH法によるせん断土柱モデルの有効応力解析

秋吉 将史¹・小野 祐輔²・酒井 久和³ 西田 真悟⁴

¹京都大学大学院修士課程 工学研究科都市社会工学専攻 (〒615-8530 京都市西京区京都大学桂)

E-mail:akiyoshi@quake2.kuciv.kyoto-u.ac.jp

²京都大学大学院助手 工学研究科都市社会工学専攻 (〒615-8530 京都市西京区京都大学桂)

E-mail:ysk@mbox.kudpc.kyoto-u.ac.jp

³立命館大学助教授 COE推進機構 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

E-mail:h_sakai@fc.ritsumei.ac.jp

⁴京都大学大学院修士課程 工学研究科都市社会工学専攻 (〒615-8530 京都市西京区京都大学桂)

E-mail:shingo@quake2.kuciv.kyoto-u.ac.jp

今日まで地震時の液状化被害が数多く報告されており、被害の再現や液状化対策を狙ったシミュレーションが行われている。このとき、解析手法として有限要素法や有限差分法などが広く用いられているが、これらのメッシュに依存した解析手法は、地盤が破壊するという結果は得られても、破壊の仕方や破壊後の挙動といった大変形問題を扱うのには適しているとは必ずしもいえない。そこで、大変形問題を容易に扱うことのできるSPH法を取り入れ、SPH法を用いて有効応力解析を行い、せん断試験の再現シミュレーションを行った。

Key Words : SPH Method, Liquefaction, Effective Stress Analysis, Soil, Earthquake

1. はじめに

SPH(Smoothed Particle Hydrodynamics)法は、連続体の大変形を含む解析に適した数値解析手法である。SPH法では連続体を多数の粒子の集合体として考え、その粒子の挙動を運動方程式によって求めるという手法である。SPH法ではメッシュ作成が不要であり、また破壊を含む大変形問題を容易に扱うことができる。SPH法は、宇宙物理学における星間物質の挙動や惑星衝突問題の数値シミュレーション技法として Lucy¹⁾ や Gingold and Monaghan²⁾ によって開発された。SPH法は特別な工夫もなく大変形解析にそのまま適用可能である。宋ら³⁾、酒井ら⁴⁾、Belytschko et al.⁵⁾ はSPH法を構造解析におけるメッシュレス解析の一手法として位置付け、その特性を詳細に検討している。

地盤工学問題に対するSPH法の適用例について見ると、小野ら⁶⁾ は弾塑性体構成則を用いた地盤要素のSPHシミュレーションを行い、有限要素法による結果との比較を行っている。竿本ら⁷⁾ は、多孔質体内の間隙流体に対

してSPH法を適用することにより、三次元多孔質体の透水シミュレーションに成功している。

大変形問題の適用性に優れているという特性から、SPH法は地震時の地盤挙動のシミュレーションに対して強力なツールとなると考えられる。特に液状化に伴って生じる地盤の大変形は、地震工学上極めて重要な問題である。SPH法を液状化地盤に対して適用した事例としては、Naïli et al.¹⁾ が挙げられる。彼らの解析は、地盤が液状化を起こした時点から、地盤をビンガム流体として扱っている。したがって、液状化に至る過剰間隙水圧の上昇過程は考慮されておらず、有効応力解析を行ったものではない。

著者らは、これまでに有限要素法によって行われてきた地盤の有効応力に対して、SPH法を適用する研究に取り組んでいる。本論文では、SPH法による有効応力解析の初歩的な適用事例として、せん断土柱モデルを用いた解析例を紹介する。この解析例は、SPH法の特徴を活かした実用的なものではないが、SPH法を有効応力解析に適用した際の基礎的な特徴を把握するという目的で行っ

たものである。

2. SPH法の理論

2. 1 カーネル近似⁶⁾⁹⁾

SPH法では関数 $f(x)$ をカーネル近似と呼ばれる近似手法によって評価する。まず、関数 $f(x)$ はディラックのデルタ関数 $\delta(x)$ を用いて次式のように表す。

$$f(x) = \int f(x') \delta(x - x') dx' \quad (1)$$

ここで、 x, x' はそれぞれ評価中心、任意粒子の座標値である。

次に、関数 $f(x)$ の近似 $\langle f(x) \rangle$ が次式によって表されるものとする。

$$\langle f(x) \rangle = \int f(x') W(x - x', h) dx' \quad (2)$$

ここで $W(x - x', h)$ はカーネル関数と呼ばれ、

$$\lim_{h \rightarrow 0} W(x - x', h) = \delta(x - x') \quad (3)$$

および

$$\int W(x, h) dx = 1 \quad (4)$$

を満足する。 h は影響半径と呼ばれるものであり、後に詳しく説明する。

今、関数 $f(x)$ は密度 $\rho(x)$ を持つ媒質上で定義されているとすると、(2)式は、

$$\langle f(x) \rangle = \int \frac{f(x')}{\rho(x')} W(x - x', h) \rho(x') dx' \quad (5)$$

と書き改めることができ、これをカーネル近似と呼ぶ。

対象とする媒質を N 個の微小な要素に分割し、各要素の質量を $m_1, m_2, \dots, m_N$ 、重心の位置を $x_1, x_2, \dots, x_N$ とすると、要素 k が(5)式の右辺の積分に与える貢献は、

$$\frac{f(x_k)}{\rho(x_k)} W(x - x_k, h) m_k \quad (6)$$

となる。したがって、関数 $f(x)$ の離散化したカーネル近似が次式のように得られる。

$$\langle f(x) \rangle = \sum_{k=1}^N f(x_k) W(x - x_k, h) \frac{m_k}{\rho(x_k)} \quad (7)$$

(7)式によるカーネル近似では、座標 x_k において密度 $\rho(x_k)$ 、質量 m_k および関数 $f(x_k)$ が定義されていれば、要素の大きさや形状は必要とされない。そこで、SPHでは座標 x_k に大きさを持たない粒子を与え、種々の物理量は粒子の移動によって運ばれるとする。

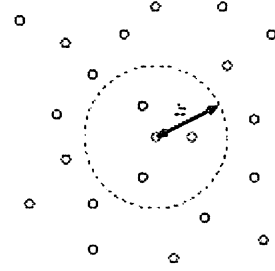


図-1 影響半径にある粒子

また(7)式はすべての要素についての足し合わせを意味しているが、一般的なSPHではカーネル関数 $W(x, h)$ として、図-1のように微小要素の中心から距離 h 内でのみ値を持ち、それ以外ではゼロとなる関数を用いるため、実際には対象とする粒子から距離 h 内にある粒子のみの影響を考慮すればよい。この意味で h は影響半径と呼ばれる。

2. 2 微分形のカーネル近似

通常、連続体の解析においては関数 $f(x)$ だけでなく、その微分形 $\nabla \cdot f(x)$ の評価が必要となる。(2)式より、

$$\nabla \cdot f(x) = \int \nabla \cdot f(x') W(x - x', h) dx' \quad (8)$$

ここで、

$$\nabla \cdot f(x') W(x - x', h) = \nabla \cdot \{f(x') W(x - x', h)\} - f(x') \cdot \nabla W(x - x', h) \quad (9)$$

であるから、(8)式は

$$\begin{aligned} \nabla \cdot f(x) &= \int \nabla \cdot \{f(x') W(x - x', h)\} dx' \\ &\quad - \int f(x') \cdot \nabla W(x - x', h) dx' \end{aligned} \quad (10)$$

と書き換えられる。ここで、ダイバージェンスの定理より、

$$\begin{aligned} \int \nabla \cdot \{f(x') W(x - x', h)\} dx' \\ = \int_S f(x') W(x - x', h) \cdot \hat{n} dS = 0 \end{aligned} \quad (11)$$

である。よって、関数 $f(x)$ の微分形 $\nabla \cdot f(x)$ のカーネル近似は、

$$\langle \nabla \cdot f(x) \rangle = - \int f(x') \cdot \nabla W(x - x', h) dx' \quad (12)$$

となる。式(12)を粒子によって離散化することによって、

$$\langle \nabla \cdot f(x) \rangle = - \sum_{k=1}^N \frac{f(x_k)}{\rho(x_k)} \cdot \nabla W(x - x_k, h) m_k \quad (13)$$

を得る。

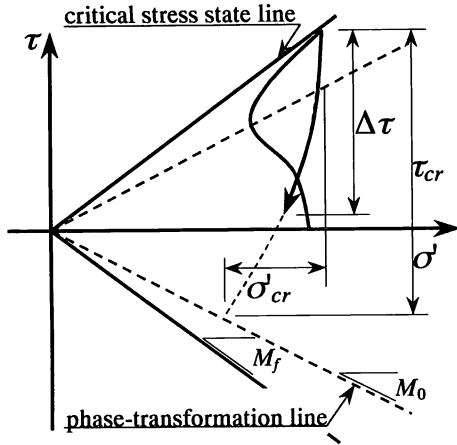


図-2 有効応力経路の概念図

2. 3 カーネル関数

カーネル近似に用いるカーネル関数 $W(x, h)$ には様々なものが提案されている。これまでに提案されたもののうち、代表的なものとして3次スプライン関数、Gauss分布関数、三角関数によるものが挙げられる。本論文ではSPH法において最も一般的であり、酒井ら⁹⁾によって収束性を持つことが確認されている3次スプライン関数を用いる。

2次元の3次スプライン関数は、粒子間の距離を r 、影響半径を h と表すと、 $q=r/h$ ($q>0$) に対し、 $q \leq 1$ のとき

$$W(r, h) = \frac{10}{7\pi h^2} \left(1 - \frac{3}{2}q^2 + \frac{3}{4}q^3 \right) \quad (14)$$

$1 < q \leq 2$ のとき、

$$W(r, h) = \frac{10}{28\pi h^2} (2 - q)^3 \quad (15)$$

$q > 2$ のとき

$$W(r, h) = 0 \quad (16)$$

と与えられる。

3. 有効応力モデル

繰返しせん断による試験を行った際、緩い砂の場合には、せん断の増加に伴って過剰間隙水圧は単調に増加する。これに対して密な砂の場合には、あるせん断比までは緩い砂と同様に繰返しせん断に伴って過剰間隙水圧は単調に増加するが、この応力比をこえるとせん断による正のダイレイタンシーによって過剰間隙水圧は減少する。この応力比は一般に変相角と呼ばれ、繰返しせん断過程において一定値を取ることが知られている。密な砂の場合、変相角に達した後はせん断応力比の増加に伴って水

圧の減少度も増加するが、ある値をこえることはなく、せん断応力比がある程度以上大きくなると一定値を取る。

以上のように、密な砂の非排水せん断時の繰返しせん断による間隙水圧の変化は、変相角に達する以前の部分と、せん断による正のダイレイタンシーのために水圧が減少する部分とにわけて考える必要がある。本研究では有効応力に基づく構成モデルとして、社本モデル¹⁴⁾を採用する。ただし、排水条件は非排水とする。

(1) 応力 - ひずみ関係

解析に用いる有効応力モデルの応力 - ひずみ関係は、履歴曲線がMasing則にしたがうRamberg-Osgoodモデル¹⁵⁾を採用する。液状化の過程では、繰返しせん断の進行に伴って有効応力が変化するため、定常的なせん断過程を考えることはできない。そのため、応力 - ひずみ関係を次式のような増分表示で表す。

$$d\gamma = \frac{d\tau}{G_0} \left(1 + \alpha\beta \left| \frac{\Delta\tau}{G'_0} \right|^{\beta-1} \right) \quad (17)$$

ここに、 γ はせん断ひずみ、 t はせん断応力を表し、 Δt はせん断応力反転からのせん断応力増分を意味する(図-2参照)。 α 、 β はそれぞれ式(18)、(19)で与えられ、 G_0 は初期せん断弾性係数で式(20)により算定される。また、 G_{0i} は骨格曲線では G_0 、履歴曲線では $2G_0$ の値をとるものとする。

$$\alpha = \left(\frac{2}{\gamma_{rf}} \right)^{\beta-1} \quad (18)$$

$$\beta = \frac{2 + \pi h_{\max}}{2 - \pi h_{\max}} \quad (19)$$

$$G_0 = G_{0i} \left(\frac{\sigma'_m}{\sigma'_{m_i}} \right)^m \quad (20)$$

$$\gamma_{rf} = \gamma_{rfi} \left(\frac{\sigma'_m}{\sigma'_{m_i}} \right)^{m_r} \quad (21)$$

ここで、 s_m は有効拘束圧、 s_{mi} は初期有効拘束圧であり、 γ_{rf} は s_m における規準ひずみ、 G_0 と γ_{rf} の右下の添え字 i は、有効拘束圧が s_{mi} における値であることを意味する。また、 $h_{\max}$ は最大減衰定数である。 m 、 m_r は初期せん断剛性および規準せん断ひずみの拘束圧依存性を表す定数で、既往の研究¹⁰⁾¹⁷⁾ よりいずれも0.5とする。

(2) 過剰間隙水圧

過剰間隙水圧は以下の3つの有効応力経路の状態に応じて、それぞれ算定式に基づいて求める。

(a) 有効応力経路が変相線にはじめてあたるまで
この間の過剰間隙水圧は次式によって与えられる。

$$\frac{u}{\sigma'_{mi}} = \frac{2}{\pi} \arcsin \left(R_n^{1/2af} \right) \quad (22)$$

ここに、 a_f は過剰間隙水圧の上昇度を決定するパラメータ、 R_n は液状化に関する累積損傷度を表すパラメータで次式で与えられる。

$$R_n = \sum \left(\frac{1}{n_i} - \frac{1}{n_{i-1}} \right) \quad (23)$$

$$n_i = 2 \left(\frac{\Delta \tau}{2\sigma'_{mi} C_1} \right)^{1/c} \quad (24)$$

$$C_1 = \left(\frac{1}{20} \right)^c R_{20} \quad (25)$$

ここに、 R_{20} は繰返し回数 20 回で過剰間隙水圧比 100% に至るせん断応力比、 n_i は Δt によって生じた R_{20} に対する等価な繰返し回数を、 C は液状化に至るせん断応力比と繰返し回数を両対数軸表示した場合の勾配を表す¹⁹⁾。

(b) 有効応力経路が変相線をこえてせん断応力がさらに
載荷される場合

この過程において、過剰間隙水圧 u は次式で与えられる。

$$\Delta u = - \frac{1}{M_f} \frac{|\tau/\sigma'_m| - M_0}{M_f - M_0} |d\tau| \quad (26)$$

ここに、 Δu は過剰間隙水圧の増分であり、 M_f 、 M_0 はそれぞれ有効応力経路の包絡線と変相線の傾きを示す (図-2 参照)。

(c) 有効応力経路が変相線をこえて除荷される場合

$$\frac{\Delta u}{\sigma'_{cr}} = f \left(\sum a \frac{\Delta \tau_c'}{\sigma'_m} \right) \frac{2}{\pi} \arcsin \left(R_n C^{1/2af} \right) \quad (27)$$

$$R_{nc} = \left(\frac{\Delta \tau}{\tau_{cr}} \right)^3 \quad (28)$$

ここに、 s'_{cr} 、 t_{cr} は図-2 に示すように、それぞれせん断応力反転後にそれ以降の応力反転がないと仮定した場合に、変相線に至るまでの平均有効拘束圧およびせん断応力の増分を意味する。また、式(27)中の関数 f は繰返しせん断の進行にしたがって間隙水圧の上昇が大きくなる

ことを反映するための関数で、次式で与える。

$$f(\xi) = \left(1 + \frac{2}{3 + \xi^2} \right)^{-1} \quad (29)$$

ただし、社本モデルでは、中空ねじり試験のサイクリックモビリティ現象が現れはじめる段階で、過剰間隙水圧上昇量の変化およびせん断ひずみの進行が、試験結果例¹⁹⁾と比べてともに小さいことから、本論文では上式を採用する。ちなみに社本モデルでは、式(27)の有効拘束圧 s'_m の代わりに初期有効拘束圧 s'_{mi} を、式(29)の ξ のべき乗として 2 のかわりに 4 を採用している。

4. SPH法によるせん断土柱モデルの解析

図-3 に示すせん断土柱モデルの運動方程式は、次式で表すことができる。

$$\ddot{u}(z) = \frac{1}{\rho(z)} \frac{d\tau(z)}{dz} \quad (30)$$

ここで、 $\ddot{u}(z)$ は深さ z における水平方向の加速度、また $\tau(z)$ はせん断応力、 $\rho(z)$ は密度である。

弾性体の場合、せん断応力 $\tau(z)$ はせん断剛性 $G(z)$ とせん断ひずみ $\gamma(z)$ を用いて、

$$\tau(z) = G\gamma(z) \quad (31)$$

と表すことができる。あるいは増分表示を用いれば、

$$d\tau(z) = G \cdot d\gamma(z) \quad (32)$$

となる。また、せん断ひずみ $\gamma(z)$ は

$$\gamma(z) = \frac{du(z)}{dz} \quad (33)$$

と表される。

本論文では、SPH法によって近似的に式(30)を解くこ

とを考える。まず、カーネル近似によって $\frac{du(z)}{dz}$ を求

める。このとき、通常の計算の安定性の問題から直接 $u(z)$ を式(13)に代入するのではなく、恒等式

$$\nabla \cdot f(x) = \frac{1}{\rho} [\nabla \cdot \{\rho f(x)\} - f(x) \cdot \nabla \rho] \quad (34)$$

によって式(13)の左辺を書き改めたものに対してカーネル近似を適用する⁹⁾。その結果、粒子 a についてせん断

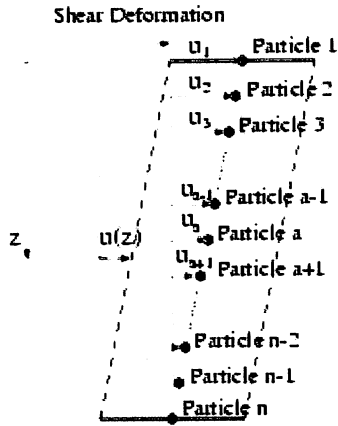


図-3 せん断土柱モデルと SPH 粒子による離散化

ひずみ γ_a は次式によって求めることになる。

$$\gamma_a = \frac{du_a}{dz} = \sum_b \frac{m_b}{\rho_a} (u_a - u_b) \frac{dW_{ab}}{dz} \quad (35)$$

ここで、式中の添字 a, b はそれぞれ物理量を求める粒子とその影響半径内に含まれる粒子を意味する。また、

$$W_{ab} = W(x_a - x_b, h) \quad (36)$$

である。式(35)によって得られたせん断ひずみ γ_a から

式(31)にしたがってせん断応力 τ_a を求める。

次に、式(30)に対して恒等式

$$\nabla \cdot f(x) = \rho \left(\nabla \cdot \frac{f(x)}{\rho} + \frac{f(x)}{\rho^2} \cdot \nabla \rho \right) \quad (37)$$

を適用して得られる、

$$\ddot{u}(z) = \sum_b m_b \left(\frac{\tau_a}{\rho_a^2} + \frac{\tau_b}{\rho_b^2} \right) \frac{dW_{ab}}{dz} \quad (38)$$

を用いて粒子 a の加速度を求める。その後、得られた

$\ddot{u}_a$ から粒子 a の移動量を求め、密度 ρ_a を次式によって更新する。

$$\rho_a = \sum_b m_b W_{ab} \quad (39)$$

有効応力解析のように、土要素の応力-ひずみ関係が非線形モデルとして与えられる場合には、式(31)あるいは式(32)を適切なモデルに置き換えることで、SPH法を用いたせん断土柱モデルの解析を行うことができる。

5. 数値解析例

SPH法による有効応力解析の妥当性の検証を行う目的

表-1 要素のパラメータ

C	α_f	$h_{\max}$	M_0	M_f	$e_{\max}$	$e_{\min}$
-0.11	0.80	0.28	0.64	0.86	0.977	0.605

表-2 材料定数

ヤング係数	$2.8 \times 10^8 \text{ N/m}^2$
ポアソン比	0.30
密度	2000 kg/m^3
内部摩擦角	30°
粘着力	19600 N/m^2

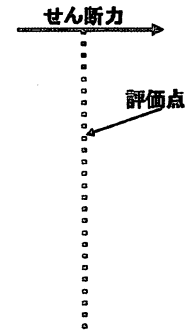


図-4 せん断土柱モデル

で、豊浦砂に対する中空ねじりせん断試験¹⁹⁾の数値シミュレーションを行う。実験の詳細は文献19)を参照されたい。本研究で用いた解析モデルを図-4に示す。モデルは粒子数26個、粒子間隔0.005 m であり、せん断力として周期 0.5(s)の正弦波を加振し、時間刻み $dt=2.5 \times 10^{-6}$ として16秒間の試験を行った。このときのせん断試験におけるせん断応力-ひずみ関係、有効応力経路を図-5、図-6に示す。

数値解析において、微小ひずみ時の初期せん断弾性係数 G_{0i} は式(40)に示す岩崎-龍岡の式で求め、有効応力解析モデルの有効応力経路、および応力-ひずみ関係を規定する各種パラメータは、実験結果と整合するように設定した。解析に使用したパラメータの値を表-1に、材料定数を表-2に示す。

$$G_{0i} = 900 \frac{(2.17 - e)}{1 + e} (\sigma'_{mi})^{0.4} \quad (40)$$

ここに、e は間隙比を表す。また式(40)で得られる G_{0i} の単位は kgf/cm^2 である。

図-6を見ると、初期状態から過剰間隙水圧が上昇し有効応力が減少していく過程がうまく再現できている。また有効応力がゼロになった後せん断ひずみが急増するサイクリックモビリティ現象を概ね再現できているのがわかる。このサイクリックモビリティ現象は、図-5における逆 S 字の履歴や図-6の各図の左半分の V 字を

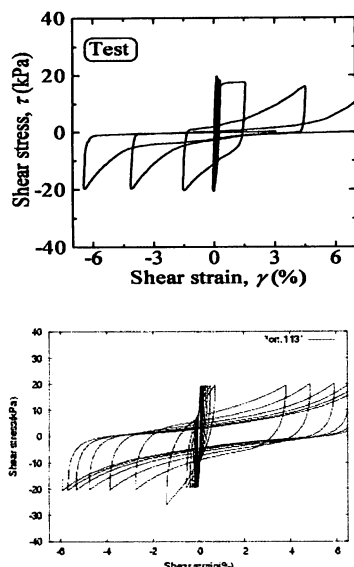


図-5 せん断応力-ひずみ関係 (上:実験, 下:解析)

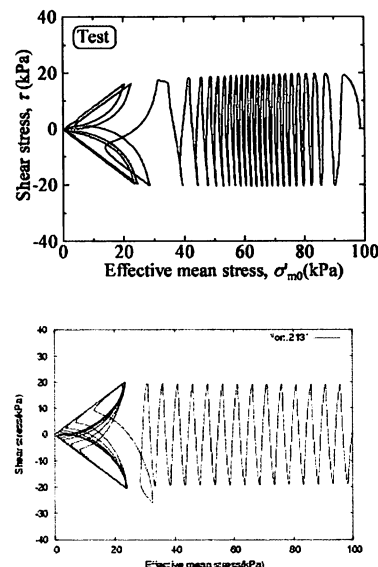


図-6 有効応力経路(上:実験, 下:解析)

横向きにしたような履歴が表している。これら2つの特徴から、本研究で用いた有効応力モデルは実験結果を再現できたといえる。これによって、SPH法を用いた有効応力解析が可能であることが示された。

6. まとめ

SPH法は連続体の大変形問題の取り扱いに優れた数値解析手法であり、著者らは地震工学における重要な問題である地盤の有効応力解析にSPH法を適用する研究に取り組んでいる。本論文では、地盤の有効応力を考えるにあたって最も基本的な問題であるせん断土柱モデルに対してSPH法を適用し数値シミュレーションを行った。SPH法によって得られた解析結果を、文献に示されたせん断試験結果と比較したところ、かなり一致した結果が得られた。しかしながら本論文で示した解析例は、SPH法の持つ大変形問題の適用性に優れているという利点が活かされておらず、単にSPH法の有効応力解析への適用性に関する基礎的な検討を行ったにすぎない。また、他の手法に比べると時間刻みを細かく取らなければ解が安定しないという問題も抱えている。今後、この時間刻みの問題に対応しつつ解析例を広げていき、SPH法による有効応力解析が構造物の性能評価に活用できるよう研究を進める予定である。

参考文献

- 1) L.B. Lucy : A numerical approach to the testing of the fission hypothesis, *Astronomical Journal*, 82, pp. 1013-1024, 1977.
- 2) R.A. Gingold, J.J. Monaghan : Smoothed particle hydrodynamics : theory and application to non-spherical stars, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 181, 1977.
- 3) J.J. Monaghan : An introduction to SPH, *Computer Physics Communications*, 48, pp.89-96, 1968
- 4) 宋武燮, 酒井謙, 山下彰彦 : SPH粒子法による構造解析 (3次元弾塑性解析手法の検討), *シミュレーション*, 20 (4), pp.288-295, 2001.
- 5) 宋武燮, 酒井謙, 山下彰彦 : SPH法による弾塑性解析手法の検討 (第1報, 2次元小変形問題), *日本機械学会論文集A編*, 68 (669), pp.772-778, 2002.
- 6) 酒井謙, 山下彰彦 : SPH理論に基づく粒子法による構造解析の基礎的検討, *日本機械学会論文集A編*, 67 (659), pp.1093-1102, 2001.
- 7) T. Belytschko, Y. Guo, W.K. Liu and S.P. Xiao : A unified stability analysis of meshless particle methods, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 48, pp.1359-1400, 2000.
- 8) T. Belytschko, Y. Krongauz, D. Organ, M. Fleming and P. Krysl : Meshless methods : An overview and recent development, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 139, pp.3-47, 1996.
- 9) 小野祐輔, 西田真悟, 清野純史 : SPH法による土構造物の弾塑性解析, *応用力学論文集*, Vol.9, pp.717-723, 2006.
- 10) 竿本英貴, 松島亘志, 山田恭央, 羽田野祐子 : 豊浦砂の高解像度X線CT画像を利用した三次元多孔質体モデルの構築およびSPHによる透水シミュレーション, *応用力学論文集*,

- Vol.9, pp.649-657, 2006.
- 11) M. Naili, T. Matsushima and Y. Yamada : A 2D Smoothed Particle Hydrodynamics method for liquefaction induced lateral spreading analysis, *Journal of Applied Mechanics*, 8, pp.591-599, 2005.
 - 12) M. B. Liu, G. R. Liu and K. Y. Lam : A one dimensional meshfree particle formulation for simulating shock waves, *Shock Waves*, 13, pp.201-211, 2003.
 - 13) 酒井久和：構造物の動的弾性応答解析における非反復時間積分法と地震工学への応用に関する研究，京都大学博士学位論文，1998．
 - 14) 社本康広，時松孝次，有泉浩蔵：一次元有効応力解析の実地盤に対する適用性，日本建築学会構造系論文報告集，No. 433, 1992.
 - 15) Jennings, P. C. : Periodic response of a general yielding structure, *Proc. of ASCE, EM2*, pp.131-163, 1964.
 - 16) 國生剛治：土の動的性質と地盤の非線形震動応答，電力中央研究所報告，No.301, pp.176-306, 1982.
 - 17) 佐々木康，岩崎敏男：土の動的性質，講座「地震応答解析のための土の動的性質」，土と基礎，pp.85-91, 1985.
 - 18) 社本康広：繰返しせん断時における密な砂の有効応力モデル，清水建設研究所報告，Vol.41, pp.1-10, 1985.
 - 19) 小林悟史：繰返し載荷を受ける砂のダイレイタンス特性と体積変化特性に関する研究，北海道大学大学院修士論文，2000.

(2007. 4. 6 受付)

Application of SPH to Effective Stress Analysis of Shear Soil Column Model

The SPH method is capable of dealing with extremely large deformation problem. Recently, the authors are trying to apply the SPH method to solving the large deformation of soils due to strong earthquake motions. In this paper, the SPH method is adopted to the effective stress analysis of shear soil column. The results of our numerical simulations show good agreement with those of the laboratory tests.