

**粒子層内部流動化に伴う粒子運動と流体物理量に関する
粒子スケール流体・固体連成数値計算（シンポジウム講演概要）**
Numerical Prediction Considering Particle-Scale Fluid-Solid Interaction
for Particle Movements and Fluid Variables
in Fluidization of Particle Layer
(Proceedings of Symposium on Applied Mechanics)

牛島 省（京大・学術情報メディアセンター）
牧 志峰（京大・大学院工学研究科修士課程）
鳥生 大祐（京大・学術情報メディアセンター）

Satoru USHIJIMA, ACCMS, Kyoto University
Shiho MAKI, CERE, Kyoto University
Daisuke TORIU, ACCMS, Kyoto University
E-mail: ushijima.satoru.3c@kyoto-u.jp

The computation method, which allows us to deal with the particle-scale fluid-solid and solid-solid interactions, was applied to the internal fluidization in a saturated particle layer to understand the characteristics of particle motions and physical variables of the pore fluids. With the experimentally measured results, the mechanical progress of the internal fluidization was discussed.

1. はじめに

飽和した礫粒子群が互いに接触して骨格構造を形成しているとき、粒子間隙に満たされた静水が流れ始めると、間隙水圧が変化するとともに粒子表面に粘性力が作用し、力学条件によっては礫粒子が骨格構造を維持できなくなり動き出すという、いわゆる内部流動化が起こる¹⁾。

一方、地震時等に生ずる地盤の液状化は、土粒子が振動を受けて配置が変化し、間隙水圧が上昇することが原因とされている。これらを考慮すると、地盤液状化は「粒子駆動型」、上記の内部流動化は粒子間隙の流れが原因となることから「流体駆動型」の流体・固体連成現象と見ることができるだろう。

「粒子駆動型」および「流体駆動型」のいずれの連成現象に対しても、それらの素過程は、礫粒子スケールの比較的単純な力学条件、すなわち粒子間の接触力と粒子に作用する流体力を考えることにより理解できると考えられる。このうち、粒子に作用する流体力を評価するには、粒子周辺の流れを把握する必要がある。本報では、実験結果に加えて、接触する固体群と流体との連成問題に対してある程度の適用性が確認されている連成解法を利用して、内部流動化について考察を加える。

2. 内部流動化実験と計算の概要

飽和した粒子層内に発生する内部流動化を把握する実験を行った。Fig.1に装置の概要を示す。粒子の挙動を観察しやすいように、既報²⁾よりも粒子層厚 h_g を増加させ、120 mm とする一方、 $l_1 = 150$ [mm] と短くして、流動化領域が縦長になるよう設定した。他の主な寸法は、 l_2 , l_3 および h_w をそれぞれ 40 mm, 200 mm および 300 mm とし、底面にある内径 $D = 31$ [mm] の円管から平均流速約 0.53 m/s で鉛直上方に向かう水流を供給した。実験では、粒子を入れた水槽の背面中央 ($x_1 = l_1/2$, $x_2 = l_2$) で、高さ $x_3 = 20, 40, 60, 80$ [mm] の4点で超小型間隙水圧計（東京測器 KPG-50KPA）により水圧を計測した。供試体の粒子にはガラスビーズも用いたが、本報では平均粒径約 4 mm の礫粒子を利用した結果を示す。

一方、数値計算では、既報²⁾と同様に 26 種類の代表的な粒子形状を選んで、それらを四面体要素で表現する粒子

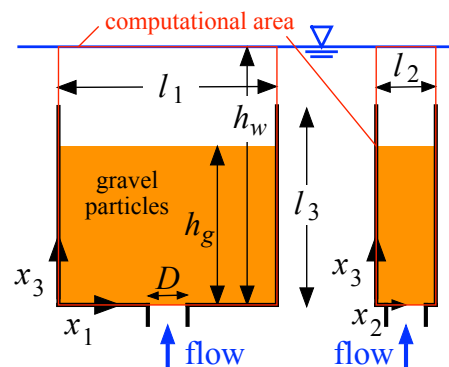


Fig. 1 Experimental equipment

モデルを利用した。使用した粒子モデル数は 14,341 とし、流体計算セル数は、 $480 \times 120 \times 935 = 53,856,000$ とした。その結果、流体計算セル幅は、平均粒子径の 1/10 以下となり、粒子周辺の流れを扱える解像度としている。

Fig.2 に概要を示すように、演算処理を高速化するため、計算領域を $16 \times 4 \times 17 = 1,088$ の subdomain に分割してプロセス並列計算を行った。

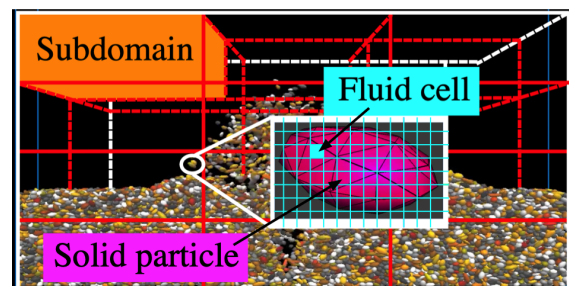


Fig. 2 Schematic view of parallel computation and resolution of fluid-cell against single particle

3. 実験および計算結果

Fig.3 に、流入開始から 0.5, 1.0, 1.5 および 3.0 秒における数値計算結果を示す。Fig.3 では、各時刻の粒子分布と流体の速度ベクトルの大きさ U 、また静水圧を引いた圧力 p' 、そして粒子間接触力ベクトルの大きさ f_c の分布を示している。Fig.3 の f_c は、基準値 $F_c = 0.1$ [N] に対して、接触力が比較的小さい $f_c < 0.1F_c$ を黒色、 $0.1F_c \leq f_c < F_c$ をグレー、それ以上の $F_c \leq f_c$ を薄いグレーで表している。

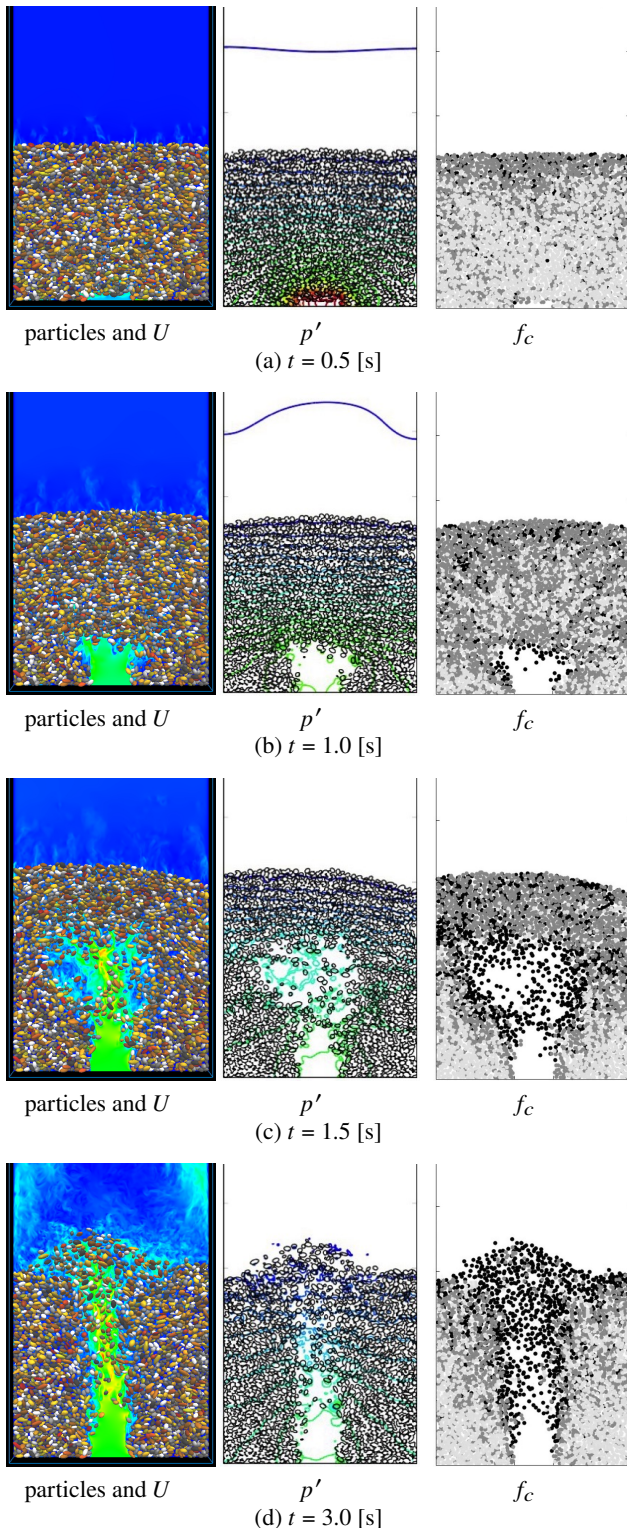


Fig. 3 Calculated particles with U , p' and f_c

Fig.3 (a) に示されるように、底面から流体が浸入し始めると底面付近で p' が上昇する。Fig.3 (a) の f_c では明瞭ではないが、 p' が上昇する底面付近の領域では、間隙水圧が増加する一方で、 p' の等値線の間隔が狭いため上部の粒子層に向かう流体力が作用していると考えられる。

次に、Fig.3 (b) の結果では、先行研究¹⁾ にも示されるように、流入口上部に明確な空隙 (cavity) が形成され始める。cavity の上部境界付近で p' が高くなり、同時に f_c が低下する傾向がある。一方、粒子層全体にわたり、粒子間力 f_c は低下する。cavity が成長した Fig.3 (c) でも同様に、cavity の上部周辺で p' が上昇、 f_c が低下し、粒子が動きやすい流動化状態になっている。Fig.3 (d) では、水流が貫通し、貫通領域とその周辺では f_c が低下し、粒子が流動化した状態となっている。

cavity の上部高さが超小型間隙水圧計を取り付けた高さに到達する時刻 $t'N$ (N は水圧計高さを mm 単位で表した数値で、20, 40, 60, 80) と、 $p'N$ の時系列を合わせて示した実験および計算結果をそれぞれ Fig.4 と Fig.5 に示す。Fig.3 に見られたように、cavity が発達してその上部が通過する直前に p' のピークが生ずる傾向が定量的に確認できる。

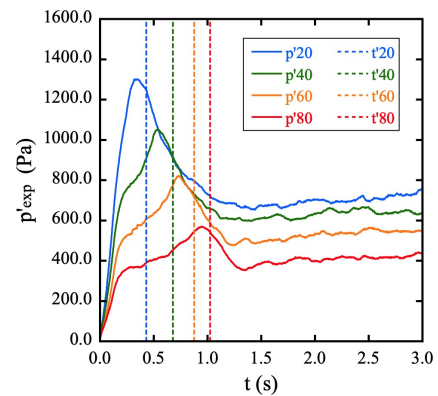


Fig. 4 $t'N$ and time history of $p'N$ (experiment)

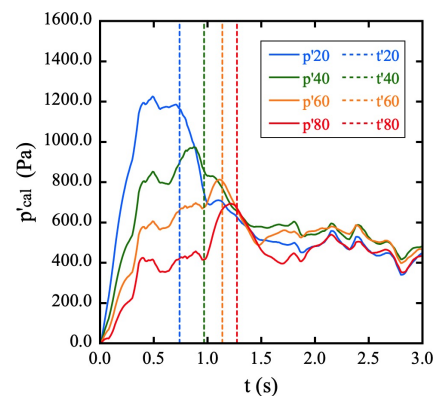


Fig. 5 $t'N$ and time history of $p'N$ (calculation)

参考文献

- 1) Alsaydalani, M. and Clayton, C.: Internal fluidization in granular soils, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 140, No. 3, p. 04013024, 2014.
- 2) 牛島省, 鳥生大祐, 牧志峰: 鉛直上昇流による飽和粒子層の内部流動化に対する流体・固体連成計算, 土木学会論文集, Vol. 79, No. 15, 22-15032, pp. 1-12, 2023.