

(61) 粒状体シミュレーションによる液状化解析の試み

○東京大学地震研究所 正会員 伯野元彦， 日本道路公団 垂水祐二

1. はじめに

Cundall の個別要素法 (DEM) ¹⁾ を修正した手法を用いて、土、岩の破壊解析を行って来たが ²⁾、粒子の間隙が水で飽和している場合の動的外力を受けた時の挙動を二次元的にはあるが、解析したので報告する。

2. 粒子の運動方程式

粒子はFig.1 に示すように円形二次元とし、その運動方程式は、x, z 方向と回転の次のような3個の方程式とした。

$$m_i \frac{d^2 V}{dt^2} + C_i \frac{dV}{dt} + F_i = 0$$

$$I_i \frac{d^2 \phi}{dt^2} + D_i \frac{d\phi}{dt} + M_i = 0$$

ここに、V:変位ベクトル、 ϕ :回転角、 m_i :質量、 I_i :回転慣性、 C_i, D_i :減衰係数、 F_i, M_i :i 粒子に加わる外力の合計、間隙水は水圧として導入する。水圧は、時々刻々の間隙面積を求めその面積の変化より、水圧変化を求めた。

水圧は、Fig.1 に示すように粒子に加えた。隣り合った間隙の水圧が異っている場合、ダルシーの法則で水が移動するものとした。二次元では粒子と粒子が接触している場合、間隙間の水の移動は無い筈であるが、実際には、三次元であるため、水の移動は行われる。その事も考慮して、たとえ、粒子と粒子が接触している場合でも、水の移動が起こるようにダルシーの係数を与えた。

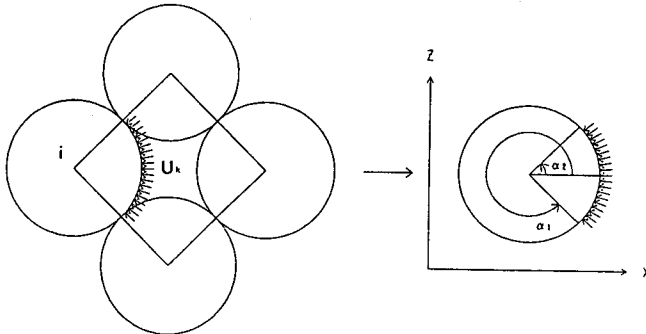


Fig. 1 円形粒子と間隙水圧

こうして、粒体と粒体の間隙に番号を付けた例が、Fig.2 であり、Fig.3 は実際の数値計算を行ったモデルである。モデル中の数字は数個の粒子をブロック化し、間隙水圧を平均化したのであるが、そのブロック・ナンバーを示している。この平均化は、各間隙水圧そのものは、水の弾性率が大きいため、変化が非常に激しいことがあるからである。

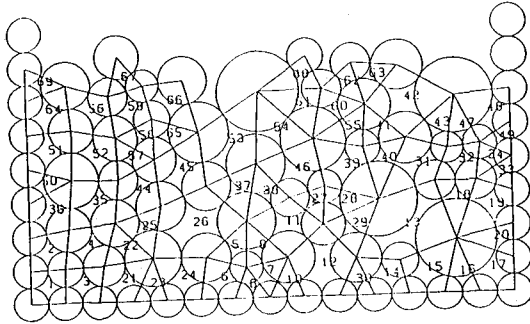


Fig. 2 間隙図形の例

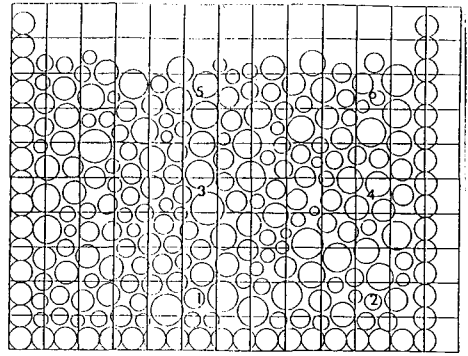


Fig. 3 計算モデルとブロック図

3. 液状化解析

実際の数値計算を行うに当たって、バネ常数は、ハーツの理論値より多少小さめの値、水の体積弾性係数も小さめの値を採用した。これは、弾性係数を大きくすると、計算の不安定を避けるため、時間刻みを極端に、細かくとらねばならず、実行不可能となるからである。

採用した主な解析パラメータの値は表-1 のようである。外力は、モデルの外枠の粒子を振動させることにより与えた。

表-1 数値計算に用いた値

法線方向バネ係数	1.4×10^5 (N/m)
法線方向減衰係数	2.6 (Nsec/m)
接線方向バネ係数	3.5×10^4 (N/m)
接線方向減衰係数	6.0×10^{-1} (Nsec/m)
Δt	10^{-6} (sec)
水の弾性係数	2.4×10^3 (N/m)
ダルシーの透水係数	$0.0 \sim 1.0 \times 10^5$ (sec ⁻¹)

4. 液状化計算結果

Fig.4 は、間隙水圧がやや上昇した時の速度分布を示している。モデルの外枠が正弦波で水平に振動しているにも拘らず、粒は、一様な速度分布ではない。これは間隙水圧が上昇したため粒が比較的自由に動いていることを示しているのであろう。

Fig.5 は、入力が正弦波の場合の各ブロックにおける間隙水圧の上昇をFig.6 は入力エルセントロ地地震波の場合を示している。

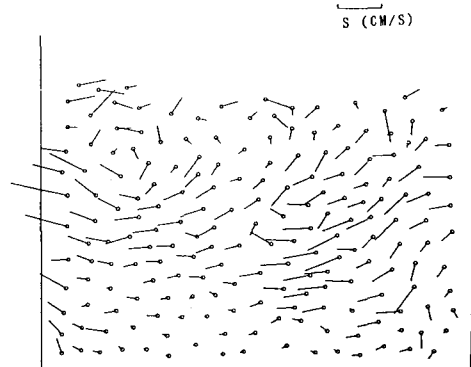


Fig. 4 粒の速度分布 (t = 0.18秒)

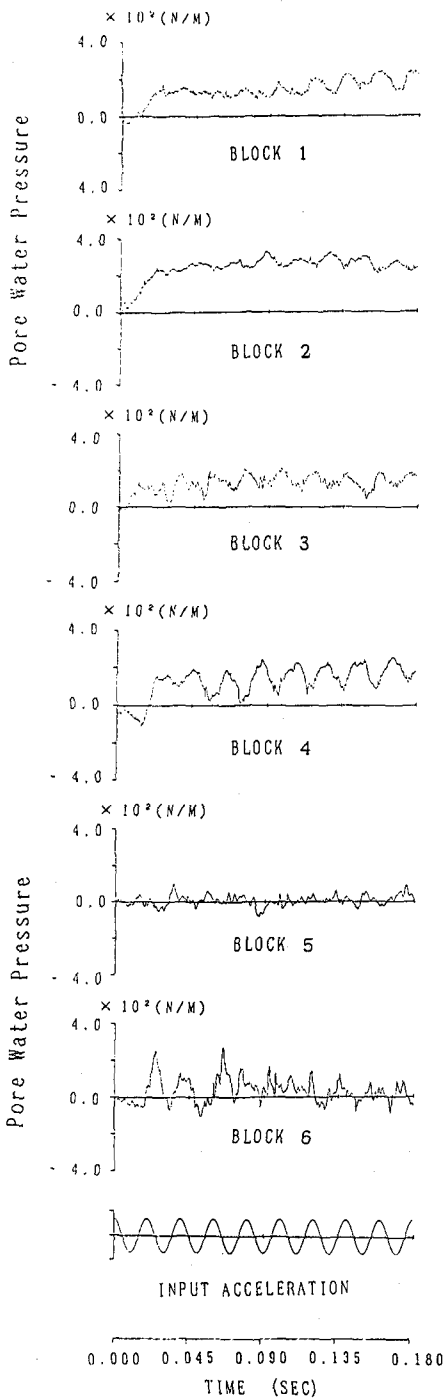


Fig. 5 過剰間隙水圧の変化
(正弦波入力, 非排水)

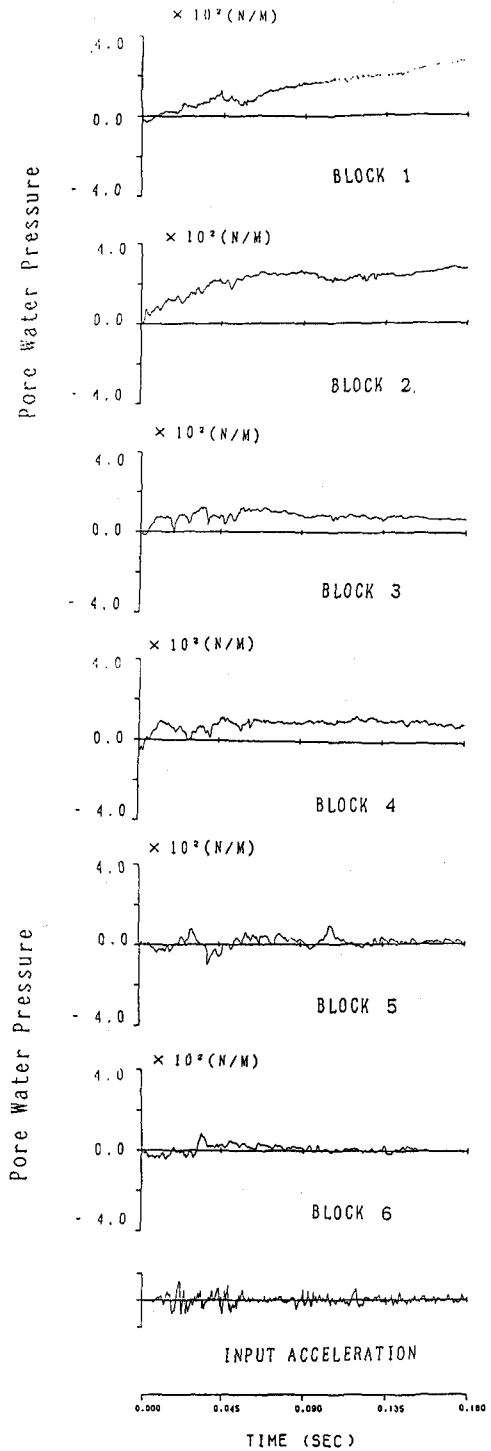


Fig. 6 過剰間隙水圧の変化
(地震入力, 非排水)

5. 考察と結論

非排水の場合、間隙水圧の上昇などを認めることはできた。しかし、砂粒子が完全に水中に浮いて、互いの接触が無くなる状態にまでは至らなかった。これは、水の体積弾性率が大きいため、計算の安定性を確保するため、 Δt を 10^{-6} 秒と異常に小さくせざるを得ず、そのため、実時間が短かいためと、二次元という制約のためであると思った。

今後は、三次元解析に進むべきであるが、その実行のためには、あと100倍位の計算機の高速化すなわち、5年位を待たねばなるまい。

6. 参考文献

- 1) P.A.Cundall: A computer model for simulating progressive large scale movement in blocky rock-system, Symp. ISRM, Nancy, France, Proc. Vol.2, PP 129~136, 1971.
- 2) D.Uemura and M.Hakuno: Granular assembly simulation with Cundall's model for the dynamic collapse of the structural foundation, Structural Eng./ Earthquake Eng. vol,4.No.1 155 s~ 164 s ,Proc. of JSCE, April, 1987.