

Ⅲ－9 粒状体モデルによる液状化の発生メカニズムに関する考察

東北大学工学部 学生員 野田 正利
 東北大学工学部 正員 岸野 佑次

1. まえがき

離散的な粒子の集合体である砂の液状化は繰返しせん断を受ける地盤の内部構造の変化によるものである。本文においては、まず粒状要素法¹⁾を用いて、液状化のシミュレーション解析を行った。次に、粒子接触剛性に基づく剛性行列の固有変形解析²⁾を行い、変形特性の定量化を試み考察を行った。

2. 解析方法

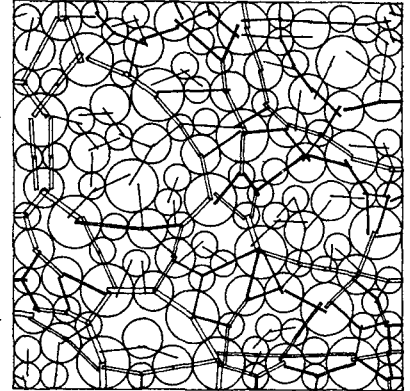
用いたモデルは図－1および表－1に示すような二次元モデルである。図にはバーにより初期の接触力ベクトル分布が示される。境界は、上下・左右が対となって対称的に移動する。また、制御方法は両振り繰返し載荷（振幅は表－1ケースA, B, Cの3通り）の非排水応力制御とした。

また、固有変形解析に用いる剛性行列は粒子間、および粒子境界間の法線方向・接線方向のバネ（定数の値は表－1と同様）に基づき粒子の並行移動2成分および回転の3自由度に対応させて構成される。

3. 解析結果と考察

(1) 繰返し載荷試験 得られた液状化シミュレーションの結果をケースCについて示す。図－2は繰返し載荷試験により得られた応力比～ひずみの関係である。この場合、第6サイクル以降に顕著なせん断ひずみの変化が見られる。さらに図－3の平均有効応力～せん断応力関係から分かるように、最終的にはサイクリック・モビリティに至る。また、同じモデルを用いて応力振幅を10%、20%と増加させたケースA, B, の場合、それぞれ3、4サイクル目以降サイクリック・モビリティに至った。また、各ケースにおいて有効応力の7割、8割、9割が失われるまでのサイクル数を比較すると図－4のようになり、鋼材におけるSNカーブと同様の変化を示している。

(2) 固有変形解析結果 固有変形解析はケースCについて初期状態と図－2、図－3に示される○印の時点で行った。この点においては、せん断力が零であるが接触力が



図－1 初期接触力ベクトル図

表－1 解析に用いた定数
 注) 分布量は深さ方向1cm当り

| | | | |
|--|----------------------|------------------|-----------|
| 粒径 D | 0.6, 0.9, 1.2cm | | |
| 粒子単位重量 (水中重量) | 1.5g/cm ³ | | |
| バネ定数 | 粒子間 | 接線方向 k_t | 1000kg/cm |
| | | 法線方向 k_n | 700kg/cm |
| | 粒子境界間 | 接線方向 k'_t | 2000kg/cm |
| | | 法線方向 k'_n | 1400kg/cm |
| 摩擦角 | 粒子間 ϕ | 25° | |
| | 境界粒子間 ϕ' | 25° | |
| 等方拘束圧 p_0 | 0.5kg/cm | | |
| せん断応力増分 $\Delta q = \Delta(\sigma_y - \sigma_x) / 2$ | 0.002kg/cm | | |
| せん断応力振幅 | ケースA | ± 0.11 kg/cm | |
| | ケースB | ± 0.10 kg/cm | |
| | ケースC | ± 0.09 kg/cm | |
| 収束精度 | 境界辺応力 | $10^{-3}p$ | |
| | 粒子作用力 | $10^{-3}Dp$ | |

減少しており、剛性抵抗が小さいと考えられる。図-5に固有値の分布を示す。固有値は小さい範囲に分布し、一般に、载荷が進んだ状態では小さい固有値の数が多いのが特徴である。これらは構造全体の剛性低下のために生じると考えられ、0.01以下の固有値を零固有値とみなせばこれらの低次固有値の差は小さく、重根と見なせば対応する固有モードの任意の線形結合もこの重根に対応した固有モードであると考えることができよう。従って、零固有値の数だけ粒子移動の自由度が増し、より液体に近い挙動を示すことになる。この場合、零固有値が10数個あるとみなせば、この段階における粒状体がかなり液体としての性質を強めていると考えられる。以上より、液状化の発生メカニズムとして、必ずしも粒子が液体中に浮遊している状態である必要はないと結論づけることができよう。

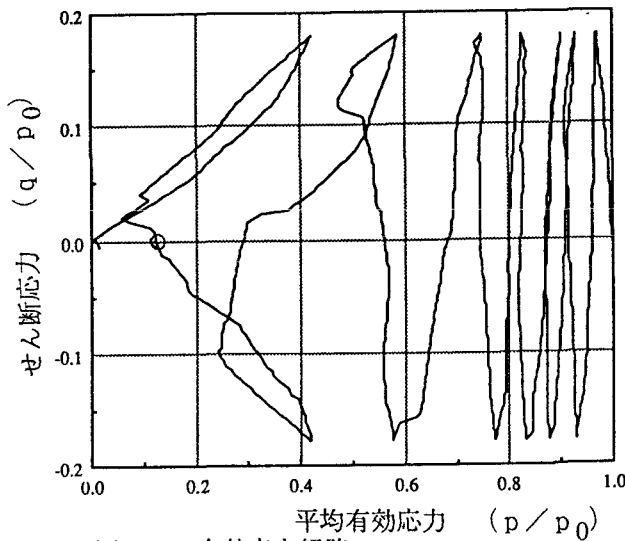


図-3 有効応力経路

$$\begin{aligned} \text{せん断応力} : q &= (\sigma_y - \sigma_x) / 2 \\ \text{せん断ひずみ} : \epsilon &= \epsilon_y - \epsilon_x \end{aligned}$$

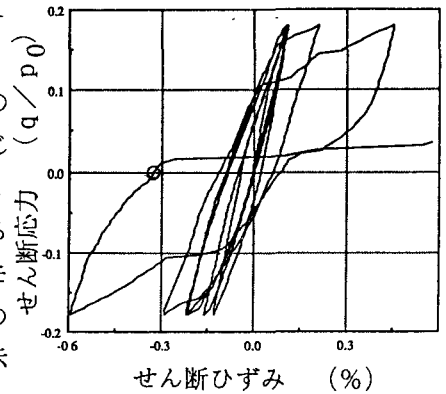


図-2 応力比～せん断応力関係

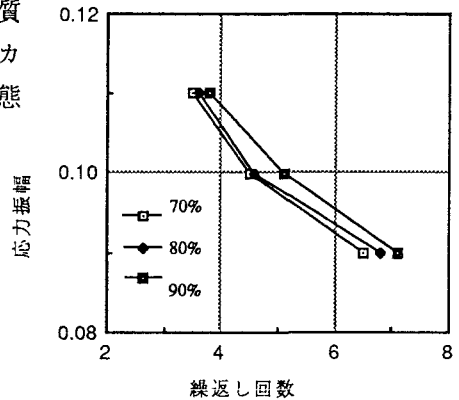


図-4 応力振幅～繰返し回数関係

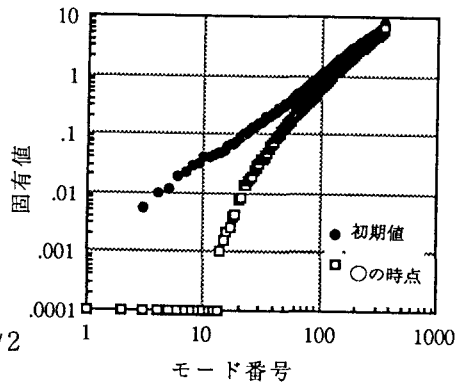


図-5 固有値の分布

4. あとがき

本文においては、粒状要素法による繰返し载荷のシミュレーションを通して、液状化の発生メカニズムについて考察したが、剛性行列の固有モードにおける零固有値がその発生に大きく影響を及ぼしていることが分った。今後さらに内部の微視的な構造変化との関連について調べたいと考えている。

<参考文献>

- 1) 岸野佑次：新しいシミュレーションを用いた粒状体の準静的挙動の解析、土木学会論文集Vol.406/III-11, pp97～106(1989)
- 2) 岸野佑次：粒状体の固有変形解析、土木学会論文集投稿中