

II-87

変動水圧場におけるゆるい堆積砂層の  
動的挙動に関する研究

パシフィックコンサルタンツ 正会員 石原 正義  
岡山大学環境理工学部 正会員 名合 宏之  
岡山大学環境理工学部 正会員 前野 詩朗  
岡山大学大学院 学生員 伊野 同

1. はじめに

著者らが弓ヶ浜（鳥取県）、久美浜（京都府）で大規模な侵食被害が生じたときに行った現地調査により、間隙率約 0.48 という非常にゆるい砂地盤の存在が確認されている。このようなゆるい堆積砂層に変動水圧を作用させると、実験開始直後に地震時に見られる間隙流体と砂粒子があたかも混合流体であるような液状化（「第1段階の液状化」と呼ぶ）と変動間隙水圧が位相の遅れ、振幅の減衰を伴いながら砂地盤内に伝播し、周期的に砂層表面付近の有効応力が0となるような液状化<sup>1)</sup>（「第2段階の液状化」と呼ぶ）が発生することを明らかにしている<sup>2)</sup>。このうち「第1段階の液状化」は、短時間で砂地盤が高密度化し砂層の変形量が大きいことから、大きな災害を引き起こす要因となり得るが、この液状化の内部機構はこれまでのところ明らかにされておらず、また、毎年のように波浪の影響を受けている現地に何故ゆるい砂地盤が残されているのかも明らかでない。そこで、本研究では「第1段階の液状化」の内部機構を明らかにすることに焦点を当て、各種条件下で模型実験を行うとともに、間隙流体を考慮した個別要素法（以下 DEM と略す）を用いて、液状化のシミュレーションを行う。

2. 実験方法および実験結果

本実験では、図1に示すような鉛直1次元モデル（砂層高 400cmの場合）を用いる。砂層高は、40cmの筒1から筒4と210cmの筒5を組み合わせることにより、240cm～400cmの間で5段階に可変させ、それぞれの砂層高について変動水圧振幅を40, 60, 80cmとした実験を行った。水を張った試料容器に乾燥させた豊浦標準砂を自由落下により堆積させ、均質なゆるい砂層（間隙率 約 0.48）を形成する。試料容器の上に水タンクを取り付け、その上端に空気タンクのホースをつなぎ、モーター、ピストンを通じて発生させた変動空気圧が変動水圧として、モデル砂層に作用する。変動水圧（周波数  $f=1.0\text{Hz}$ ）を作用開始後10分間、8つのポイントで圧力変換器により、変動間隙水圧を計測した。

図2は各ポイントにおいて変動間隙水圧の振幅の減衰が始まる点、つまり「第1段階の液状化」の終了する時間を各実験ケースごとにプロットしたものである（Case1, 2, 3 はそれぞれ変動水圧の振幅  $a_0=60, 80, 120\text{cm}$  を示す）。この分布を直線近似すると、直線の傾きが液状化した砂粒子の再配列速度を、縦軸切片である液状化領域  $y_{*1}^{t=0}$  が発生液状化領域を示す。このようにして求めた各実験ケースの発生液状化領域  $y_{*1}$  を変動水圧振幅  $a_0$  で除すことにより無次元化し、砂層高  $D$  との関係を示したも

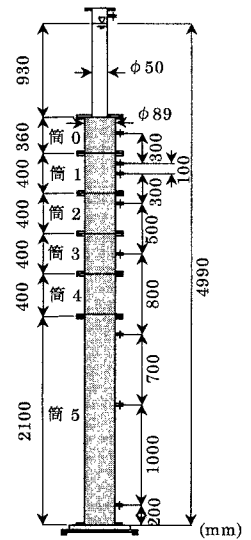


図1 実験モデル

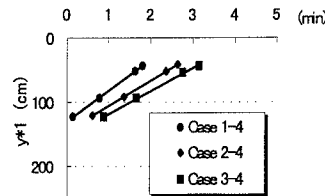


図2  $y_{*1}$  の時間的变化  
(砂層高  $D=280\text{cm}$ )

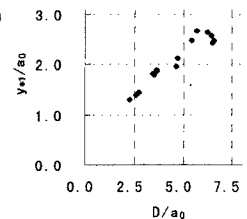


図3  $D$  と  $y_{*1}$  の関係

キーワード：海底地盤，液状化，変動間隙水圧，個別要素法

連絡先：〒7008530 岡山市津島中 2-1-1 Tel 086-251-8151 Fax : 086-251-8257

のが、図3である。この図より、砂層高  $D/a_0$  と発生液状化領域  $y_{*1}/a_0$  に比例的な関係があり、また、その領域には最大限界領域が存在し、ある領域以上では一定値 ( $y_{*1}/a_0 \approx 2.7$ ) となることが分かった。

### 3. DEMによる液状化シミュレーション

DEMにより、砂粒子を円形の粒状体として取り扱い、変動水圧による液状化現象をモデル化する。その際に、粒子が浮いた状態、粒子が孤立した状態での粒子周囲の間隙水圧を考慮できるように、粒子を含む計算領域全体を格子状のメッシュに分割し、隣接するメッシュ間の流体の流入出量、また、粒子の移動によるメッシュ内の間隙の変化量を算出し、間隙水圧を求めた。砂粒子は、自由粒子（#1～#50の計50個）と底面固定粒子（#51～#56の計6個）から形成される。これらを非接触の状態から重力場の自由落下により、予備計算を行い、初期配置（図4 0.0sec 参照）とした。計算領域は、X-Zの鉛直2次元場（ $5.1 \times 15.3\text{cm}$ ）とし、 $15 \times 45$ のメッシュに分割した。境界条件として、側壁および底面での流体の流入出はないものとし、底面に固定粒子を配置した。なお、メッシュ間の流体の流入出量は、ダルシー則に従うものとした。図4に、粒子の移動状況を示す。重力のみの影響で堆積した粒子（0.0sec）が、変動水圧（周波数  $f=1.0\text{Hz}$ ）の作用により、液状化し、高密度化していく様子が分かる。DEMによる変動間隙水圧の時間的変化を図5に示す。正弦波で与えた変動水圧が粒子間を伝播する際に位相の遅れ、振幅の減衰を伴っている。また、モデル底周辺部で間隙水圧の平均値が上昇している。

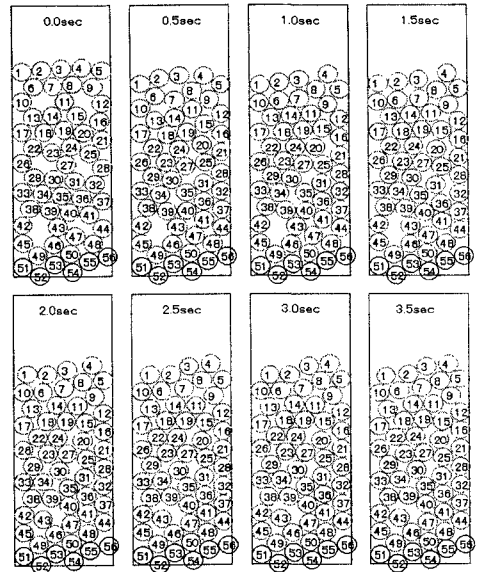


図4 粒子の移動状況

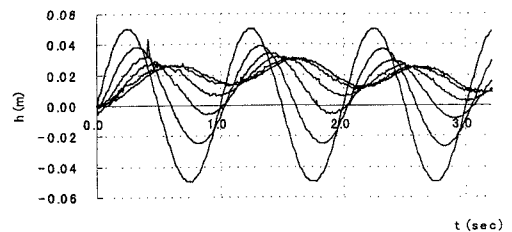


図5 変動間隙水圧 (DEM)

### 4. 結論

本実験により、砂層高  $D$ 、変動水圧振幅  $a_0$  と「第1段階の液状化」の発生領域  $y_{*1}$  との関係が明らかになった。また、DEMを用いた液状化シミュレーションにより、間隙流体を考慮した粒子の動的挙動を求めることが可能となった。主な結論を以下に示す。

- (1) 砂層高、変動水圧振幅を大きくすると、発生液状化領域も一定値まで大きくなる。しかし、一定値を超えると、発生液状化領域は大きくなりにくくなる傾向があり、限界の液状化領域が存在する。
- (2) 間隙流体の計算領域を格子状のメッシュに分割し、メッシュ間を出入りする間隙水がダルシーの法則に従うとした DEMモデルで解析した結果、変動間隙水圧の影響を受けてゆるく堆積した粒子が、沈降、高密度化することが明らかになった。また、砂層内部における平均間隙水圧の上昇もある程度再現できることが分かった。

以上、本研究では、波浪による液状化のメカニズムについて実験的究明、DEMを用いた液状化シミュレーションを行った。今後の課題として、変動水圧の周波数、砂の比重、透水係数など諸条件との関係を考慮した液状化領域の検討、また、DEMで用いたパラメータの検討、実験値との比較が挙げられる。

【参考文献】1) 名合宏之: 砂層内水圧変動と液状化, 水工学シリーズ82-A-9, 1982. 2) Liquefaction and densification of loosely deposited sand bed under water pressure variation, Proc. 3<sup>rd</sup> ISOP. conf., 1993.