

波浪による砂質地盤の液状化と流動変形過程

宮本 順司*・佐々 真志**・関口 秀雄***

1. はじめに

波浪の来襲に起因した海岸侵食, 海岸構造物の被災, 海底地すべり等の事例は, 国内外を通じて, これまでに数多く報告されている。中でも海岸保全の問題は, 国土保全の面はもとより海岸環境保全の見地からも, 近年特にその重要性を増している。実際, 海岸構造物として, 養浜, 潜堤, 離岸堤, 人工リーフ等の複合による面的防護方式が着目されてきている。特に留意すべきことは, 上述のような海岸構造物が暴波来襲の度に支持地盤に沈込む問題が, 顕在化していることである (図-1)。その支配機構として, マウンド直下地盤の液状化の可能性や粗粒層中の振動流による基礎地盤からの細砂の吸出し等が推定されている。しかしながら, 実証的な研究が少なく, 未だ決定的なメカニズムの提示には至っていない。

しかるに, 実海域における暴波浪時の海底地盤応答を系統的に計測することは, 現在のテクノロジーをもってしても容易ではない。一方, 海岸工学分野で普及している通常重力場における波浪実験法 (Froude 則に基づいている) では, 堆積物中の繰返しせん断による過剰間隙圧の発生や消散に代表される圧密現象に関する時間相似則をも合わせて満足させることは原理的に困難である。

筆者らは, 上述の問題を打開するために, 力学的相似性ととも波浪伝播 (Froude 則) と地盤圧密に関する時間相似則を同時に満足しうる遠心力場波浪実験法を開発し, 水平細砂地盤への適用により, 波浪による地盤液状化の基本特性の一端を明らかにしている (Sassa・Sekiguchi, 1999)。すなわち, 厳しい波浪負荷の下で, 緩詰め細砂地盤は残留間隙圧の上昇により完全液状化に至ること, しかもそのプロセスは, 液状化フロントが地盤浅部から地盤深部へと進展していく“進行性液状化”によって特徴づけられることを見出している。しかし, このような波浪負荷による液状化現象と, 地盤の流動変形挙動とのリンクに関しては, 未解明の部分が多く残されている。

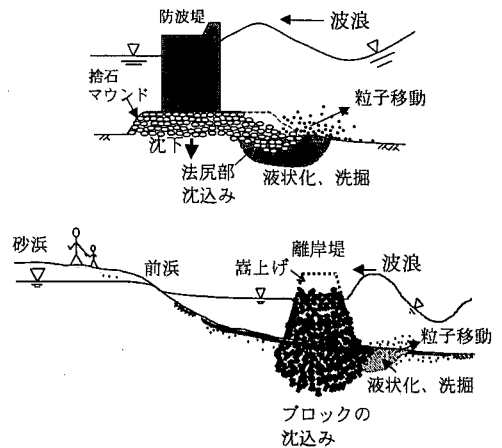


図-1 防波堤捨石マウンドや離岸堤の沈込み現象

る。

本研究では, 波浪による砂質地盤の液状化と, それにともなう地盤の流動変形過程を詳細に調べることを目的としている。具体的には, 離岸堤や防波堤捨石マウンド法尻部分の不安定化問題に着目し, 高速 CCD カメラ (250 コマ/秒) を導入した遠心力場波浪実験法の活用により, 波浪による地盤液状化の発生, ならびに, その後の液状化領域の伝播と地盤の流動変形の発達に至る全過程を詳しく観察している。

本論文の構成は以下の通りである。まず細砂地盤の流動特性を把握し, 観測事実を提案理論モデル (拡張二層流体モデル) と比較・検討している。その成果をふまえたうえで, レキ斜面/細砂地盤系の波浪応答実験を実施し, レキ斜面法尻部の沈込み機構を詳しく調べている。

2. 進行性液状化と液状化地盤の振動変形特性

2.1 高速 CCD カメラを活用した遠心力場波浪実験法

従来の遠心力場波浪実験 (Sassa・Sekiguchi, 1999) では, 過剰間隙圧の計測に基づく地盤液状化特性の解明に焦点をあてており, 液状化にともなう地盤の流動変形過程については不明の点が多かった。本研究では, 遠心力場波浪実験に新たに高速 CCD カメラ撮影法を導入することにより, 液状化にともなう地盤変動の追従観測を

* 学生会員 工修 京都大学大学院工学研究科土木工学専攻
** 正会員 工博 日本学術振興会特別研究員
*** 正会員 工博 京都大学教授 防災研究所

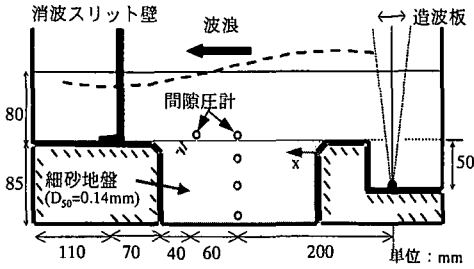


図-2 遠心力場波浪実験で用いた造波水槽

可能としている。

用いた造波水槽を図-2に示す。負荷した遠心加速度は $30g$ である。流体としては、粘性スケーリングを導入し、シリコンオイル (30 cSt) を用いている。地盤材料には、細砂であるケイ砂 7 号 (平均粒径 $D_{50}=0.14 \text{ mm}$) を使用し、緩詰め地盤 (相対密度 $D_r=34\%$) を作成した。入力波浪の周波数は、 8 Hz である。

地盤表面における測定波圧の時刻歴を図-3(a)に示す。地盤表面に動員された波圧振幅 u_0 は、 3.0 kPa である。これを繰返し応力比 $x_0 (=u_0 \cdot \kappa / \gamma')$; κ : 波数, γ' : 地盤の有効単位体積重量) に換算すると、 0.15 であり、厳しい波浪負荷に対応する。地盤内の過剰間隙圧応答を図-3(b)~(d)に示す。波浪負荷にともない、地盤内には残留間隙圧が蓄積し、地盤浅部 ($z=-13 \text{ mm}$) では、3 サイクル目に過剰間隙圧は同地点の初期鉛直土被り圧 σ'_{v0} レベルまで達している (図-3(b))。その後、波浪負荷の継続にともない、液状化フロントは地盤浅部から地盤深部へと鉛直下方に進展し、地盤全層が完全液状化に至っている (図-3(c) (d) 参照)。

このような液状化フロントの進展にともない、地盤表面は大きく変動することがわかった。地表面の鉛直変位変動の実測結果を図-4に示す。地盤に液状化が誘起されるまでは、地盤変動は無視しうほど小さい。しかし、地盤浅部が液状化に至ると、直ちに地盤変位が生じ始める。その変動振幅は液状化フロントの進展とともに著しく増大する。そして、地盤全層が液状化した後は、一定振幅に落ち着く。

2.2 拡張二層流体モデルによる液状化フロントの進展解析

本研究では、上述のような液状化フロントの進展と地盤の鉛直変動過程を整合的に再現しうる理論モデルを開発している。具体的には、同問題を移動境界問題として定式化している (図-5 参照)。Lamb (1932) による二層流体 ($z_L < z < h$) の下方に弾塑性土を導入しているのが提案モデルの特徴である。厳しい波浪負荷のもとで残留間隙圧の上昇により完全液状化に至った地層 ($z_L < z < 0$) については、それを高密度 $\rho_2 (> \rho_1)$ の完全流体として

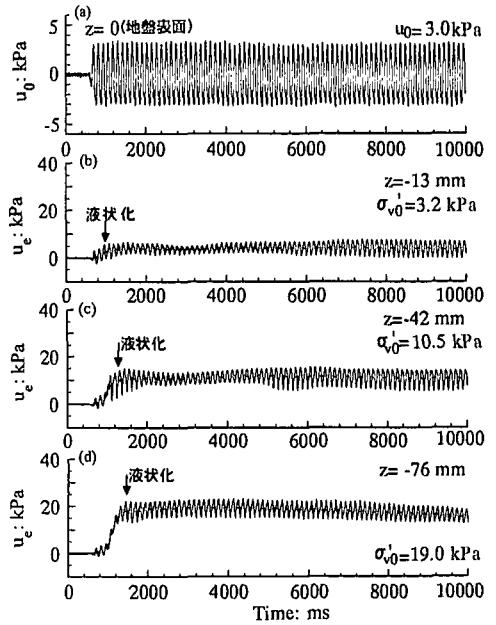


図-3 厳しい波浪負荷 ($x_0=0.15$) による地盤液状化過程

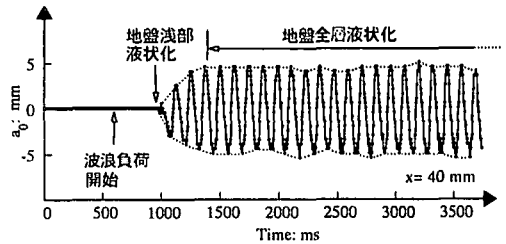


図-4 地表面における鉛直変位変動の実測結果

モデル化している。すなわち、液状化フロント上部領域に二層流体域の波浪伝播理論 (Lamb, 1932) を適用することにより、液状化地盤表面の鉛直変位 a_0 と同地点における波圧振幅 u_0 の関係は、液状化フロント深さ z_L の関数として次式のかたちとなる。

$$a_0 = - \frac{\kappa \cdot \tanh(\kappa z_L)}{\rho_2 \omega^2 + (\rho_2 - \rho_1) N g \kappa \cdot \tanh(\kappa z_L)} u_0 \dots \dots (1)$$

ここに、 κ : 波数, ω : 波浪角周波数, ρ_1 : 外部流体の密度, ρ_2 : 液状化土の密度, $N g$: 遠心加速度である。

ただし、本問題では、液状化フロント深さ $z_L(t)$ は未知量である。従って、上式 (1) は、液状化フロント直下の弾塑性地盤の挙動を支配する基礎式と連成させて解く必要がある。波浪载荷中の液状化フロント直下の弾塑性領域 ($z_L < z < -D$) における部分排水過程は、次式によって記述することができる (Sassa・Sekiguchi, 1999)。

$$\frac{\partial u_e^{(2)}}{\partial(\omega t)} = \frac{k}{m_v \cdot \gamma_r \cdot \omega} \cdot \kappa^2 \frac{\partial^2 u_e^{(2)}}{\partial(\kappa z)^2} + \frac{1}{m_v} \cdot \frac{\partial \varepsilon_{v0}^{(2)}}{\partial(\omega t)} \quad (\text{for } z_L < z < -D) \dots \dots (2)$$

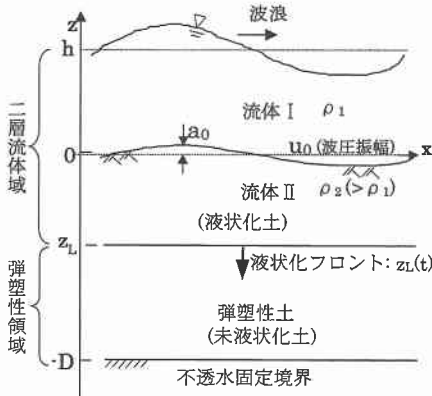


図-5 準一次元移動境界モデルの概念図

ここに、 k : 透水係数、 m_v : 土の体積圧縮係数、 γ_f : 間隙流体の単位体積重量である。上式の右辺第一項は圧密による過剰間隙圧の消散項を表わし、第二項は、繰返しせん断による塑性体積ひずみ ε_{vs}^p の蓄積 (負のダイレイタンス) に基づく過剰間隙圧の発生項を表す。本研究では、式 (2) を移動境界条件 ($z_L = z_L(t)$) の下で後退差分法で解くことにより、未液状化領域における波浪負荷中の残留間隙圧 $u_e^{(2)}$ の上昇過程を計算し、任意の時点における液状化フロント深さを同定している。

結局、式 (1) と式 (2) を連成させて解くことにより、液状化にともなう地盤挙動の追従予測を可能としている。本理論モデルの適用による地盤表面の鉛直変位変動の予測結果を図-6 に示す。地盤浅部に液状化が発生すると、これに応じて地表面鉛直変位が生じ始め、その変動振幅は液状化フロントの進展とともに増大していく。そして、地盤が全層液状化した後は一定振幅で変動し続ける。

本理論モデルは、その前提からして、完全液状化に至った地盤変動の上限値を与えるものと考えてよい。全層液状化後の地盤鉛直変位振幅 a_0 の予測値は 6.4 mm であり、実測値の 4.5 mm と近接しているのは興味深い。

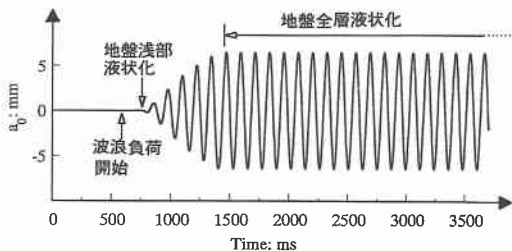


図-6 地表面における鉛直変位変動の予測結果

3. 波浪負荷によるレキ斜面法尻部の沈込み機構

本節では、マウンド法尻部分の沈込み現象の解明に焦点をあてたレキ斜面/細砂地盤系の遠心力場波浪実験の結果について述べる。

実験は、遠心力場 30g のもとで実施した。レキ斜面材料には、粒状大理石 ($D_{50}=3$ mm、土粒子比重 $G_s=2.7$) を使用した。レキ斜面勾配は 1:2.7 である。使用した流体、地盤材料、地盤密度、入力波浪周波数に関しては、上述の水平細砂地盤に対する波浪応答実験と同一である。

レキ斜面存在下における波圧場を把握する目的で、予め固定床の場合の波浪実験を行なった。代表 2 位相における固定床表面の波圧分布を図-7 に示す。計測は 5 点で行なった。その中の 3 点は、レキ斜面内である。図中の点線は、レキ斜面の影響を考慮せずに微小振幅波理論から求めた波圧分布の理論曲線である。トレンチ部分に当たる $x=0\sim 200$ mm においては、実測値と理論値は概ね一致している。また、レキ斜面による波浪反射率を実測値に基づいて推定したところ 0.26 であり、ほぼ進行波が形成されている。従って、以下に述べるレキ斜面/水平地盤系の波浪応答実験においても、地盤表面には概ね進行波的な負荷が作用すると考えてよい。

レキ斜面/地盤系の波浪実験における自由地盤部分の入力波圧振幅は、 $u_0=4.0$ kPa であった。対応する繰返し応力比 $\chi_0 (=u_0 \cdot \kappa / \gamma')$ の値は 0.19 であり、厳しい波浪負荷となっている。

高速 CCD カメラを用いて観察したレキ斜面/地盤系の流動変形過程を図-8 に示す。図-8(a) 中の黒印は、

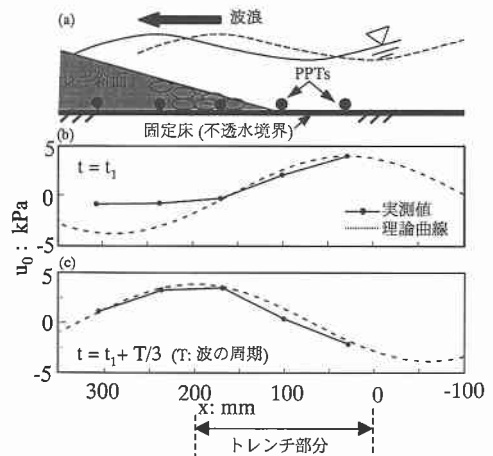


図-7 固定床表面における波圧分布の実測値図と理論結果との比較

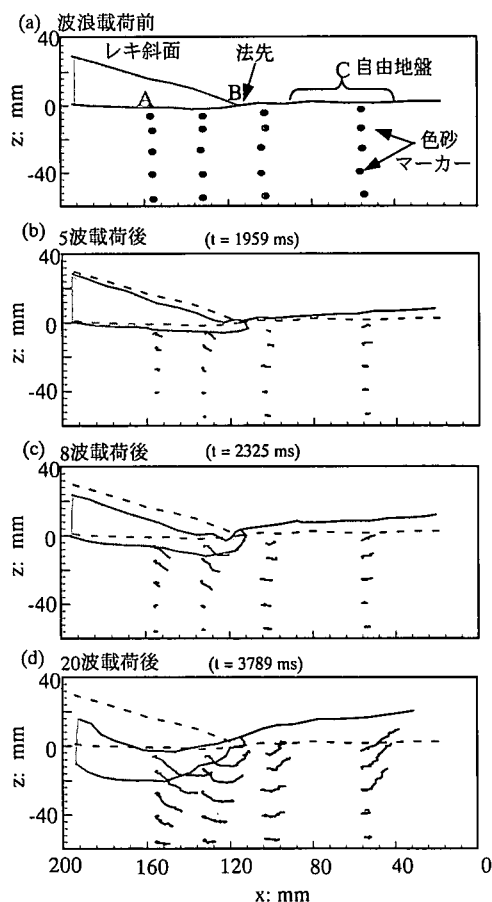


図-8 レキ斜面の沈込みと地盤の流動変形過程

色砂マーカーを示している。波浪負荷開始後、まずレキ斜面法尻部分が沈込み始める(図-8(b))。波浪負荷サイクルの増加とともに、レキ斜面の沈込みはさらに発達していく(図-8(c))。20サイクルの波浪負荷段階においては、レキ斜面全体が大きく沈込み、地盤内には顕著な流動変形が生じている(図-8(d))。このとき、レキ斜面法尻部分は、地盤の著しい流動変形にともない、隆起している。

地盤表面における代表3地点(図-8(a)中に記載のA, B, C地点)の鉛直変位の時刻歴を図-9に示す。同図より、レキ斜面の沈込みは4つのステージからなることがわかる。

ステージ0：液状化するまでの段階；

レキ斜面の沈下は実質的に生じない

ステージI：法先の自由地盤が液状化；

法尻部の顕著な沈込みが生じる

ステージII：レキ斜面直下の地盤中部が液状化；

レキ斜面全体が大きく沈込む

ステージIII：レキ斜面の沈込み速度が減少する

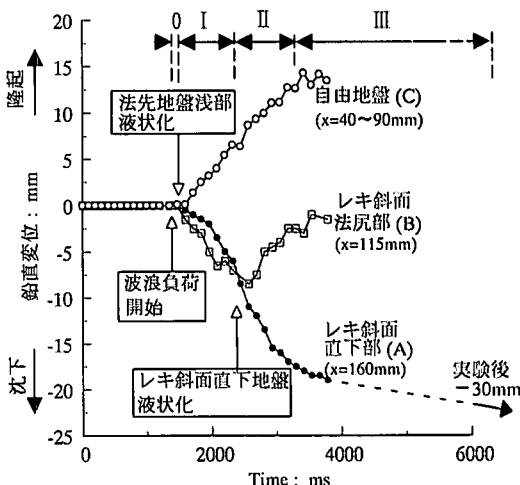


図-9 地盤表面における代表3地点の鉛直変位の時刻歴

上述の変形プロセスに対応する地盤内の液状化領域の伝播状況を図-10に示す。本図は、同一条件のもとで行なった3ケースの実験から得られた地盤内11地点の過剰間隙圧データを統合して作成した、代表4時点における地盤内の過剰間隙圧比 $u^{(2)}/\sigma_{v0}'$ の分布図である。同図では、過剰間隙水圧比の大きさを gray level によって表わしており、黒色領域は完全液状化に至った領域を示す。同図から次のことが分かる。

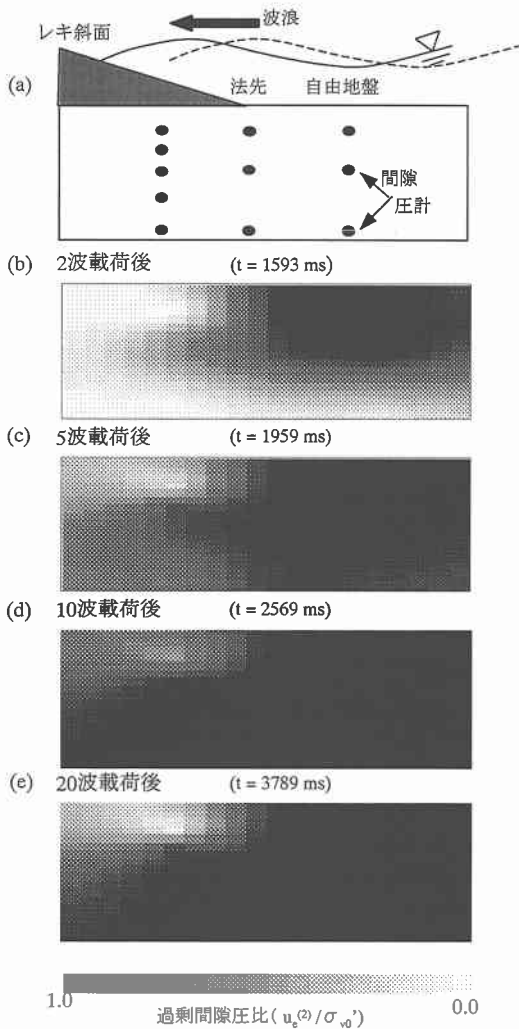
(1) 波浪負荷開始後、最初に液状化する領域は、法先地盤浅部から自由地盤浅部に至る領域である(図-10(b))。このとき、レキ斜面法尻部分の沈込みが顕著に生じ始める。

(2) 液状化領域は、鉛直下方に伝播していき、次いでレキ斜面直下地盤へ向かって側方に広がっていく(図-10(c))。これにより、法尻部分の沈込みが発達していく。

(3) 自由地盤側からレキ斜面直下地盤側への液状化域の側方伝播が進み、ついにはレキ斜面直下の地盤浅部を除く、ほぼ全域が液状化にいたる(図-10(d))。このとき、レキ斜面全体の沈込みが起り、地盤の流動変形も顕著になる。

(4) その後、レキ斜面直下の地盤深部における過剰間隙圧が消散し始める(図-10(e))。これにともない、レキ斜面の沈込み傾向は緩やかになっていく。

本実験において興味深いことは、レキ斜面を構成するレキ粒子の粒径 ($D_{50}=3\text{ mm}$) が細砂の粒径 ($D_{50}=0.14\text{ mm}$) の20倍にも達しているにもかかわらず、レキ斜面と細砂地盤の境界において、細砂の吸出し現象が生じなかったことである。ここで注目されるのは、レキ斜面直下の地盤浅部では、レキ斜面の存在による有効上載圧増



図—10 液状化領域の伝播および収束過程

加の影響によって液状化が発生しなかったことである (図—10 参照)。換言すると、マウンド直下地盤が完全液

状化に至らなければ、基礎地盤からの細砂の吸出しは起こらないと推察される。

結局、本実験におけるレキ斜面の顕著な沈込みは、液状化にともなう基礎地盤の流動変形によって引き起こされたといえる。

4. ま と め

(1) 水平細砂地盤に対する遠心力場波浪実験の結果を要約すると次のようである。厳しい波浪負荷の下で、地盤表面は、地盤浅部における液状化の発生と同時に著しく振動し始める。その変動振幅は、波浪負荷中の液状化フロントの鉛直下方への進展とともに増大していく。

(2) 完全液状化に至った地層を高密度の完全流体と仮定し、その下位には弾塑性土が分布すると仮定した拡張二層流体モデルを提案した。本モデルによる解析結果によると、上述の遠心力場波浪実験において観測された液状化フロントの進展過程と地表面の振動変形状を整合的によく再現し得る。

(3) レキ斜面／地盤系に対する遠心力場波浪実験の結果によると、レキ斜面法尻部の沈込みと基礎地盤内の液状化の伝播性状が密接に関わっている。すなわち、レキ斜面は地盤内の液状化の発生と同時に沈込みを開始し、液状化領域の鉛直下方ならびにレキ斜面直下地盤域への伝播とともに、沈込み量は増大していく。

(4) 本実験シリーズによると、レキ斜面直下地盤が完全液状化に至らなければ、基礎地盤からの細砂の吸出しは起こらない。この結論の成立する諸条件を検討していくことは、今後の課題である。

参 考 文 献

- Lamb, H. (1932): Hydrodynamics. Cambridge University Press. 738 p.
 Sassa, S. and Sekiguchi, H. (1999): *Geotechnique* 49, No. 5, pp. 621-638.