

氏名 佐々真志  
 学位(専攻分野) 博士(工学)  
 学位記番号 工博第1880号  
 学位授与の日付 平成12年3月23日  
 学位授与の要件 学位規則第4条第1項該当  
 研究科・専攻 工学研究科土木工学専攻  
 学位論文題目 Fundamental studies of wave-induced liquefaction of sand beds  
 (波浪による砂質地盤の液状化に関する研究)

論文調査委員 (主査) 教授 関口秀雄 教授 岡 二三生 教授 酒井哲郎

### 論文内容の要旨

本論文の目的は、波浪による砂質地盤の液状化現象の基本特性を明らかにし、地盤の波浪応答を適切に評価しうる非線形応力・変形/浸透連成解析コード(有限要素法による)を提示することである。本研究の最大の特徴は、力学的相似性ととも、波浪伝播と地盤圧密に関する時間相似則を同時に満足し得る遠心力場波浪実験法を開発し、これを適用していることにある。加えて、粒状体の現実的な繰返し塑性を記述し得る弾塑性構成則の開発、及び地盤液状化特性に与える部分排水条件の影響を有限要素解析により適切に評価していることが挙げられる。

本論文は、7章より構成されている。以下にその主要な内容を記す。

第1章は序論であり、本研究の背景を記述している。すなわち、実海域における荒波浪時の地盤応答を系統的に計測することは、現在の technology をもってしても容易ではないことを指摘している。そして、海岸工学分野で普及している通常重力場の波浪実験法では、堆積物中の過剰間隙圧の発生/消散を支配する時間相似則と波浪伝播に関する時間相似則を同時に満足することが原理的に困難であることを踏まえ、遠心力場波浪実験法の有用性を強調している。

第2章では、遠心力場において供用し得る造波水槽において、重複波のみならず実質的に進行波の生成を実現するシステムについて記述している。開発した造波システムは、準フラップ型の造波板、模型地盤用トレンチと鉛直消波スリット壁の採用に特徴づけられる。本造波システムの消波性能を調べるために、水および粘性流体を使用した一連の消波実験を行い、スリット比が0.3の場合で遊水室長が波長のほぼ4分の1である際に、スリット壁の反射率が0.13と実質的に進行波が生成されることを示している。

第3章では、粘性スケールリングを導入した遠心力場波浪実験法の活用による、水平細砂地盤に対する一連の進行波及び重複波負荷実験の結果を記述している。得られた主要な知見をまとめると、次のようになる。(a) 厳しい波浪負荷の下で、緩詰め砂地盤は、残留間隙圧の上昇により完全液状化に至る。(b) 液状化発生の有無を決定する限界繰返し応力比が存在する。(c) 進行波の方が重複波よりも“負荷が厳しい”。すなわち、進行波負荷の場合、液状化限界応力比の値は0.14と、重複波の場合の0.20に比べて、かなり小さいことを見出している。(d) 地盤液状化のプロセスは、液状化フロントが地盤残部より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。(e) 液状化後の圧密過程ならびに波浪再負荷過程を経て、地盤は著しく高密度化する。(f) それに伴ない、液状化フロントの最終到達深さが浅くなることを明らかにしている。

第4章では、繰返し負荷にともなう粒状体の塑性変形の発達と主応力軸回転の影響を整合的に表現し得る弾塑性構成則を提案している。

第5章では、第4章にて提案した構成則を組み込んだ2次元平面ひずみ有限要素解析コードを提示している。そして、本解析コードの適用により、波浪負荷を受ける地盤応答の一連の非線形応力・変形/浸透連成解析を実施し、遠心力場進行波及び重複波負荷実験における観測事実の特徴を定量的に再現している。すなわち、厳しい波浪条件のもとで、地盤浅部において残留間隙圧の蓄積にもとづく液状化が発生すること、進行波負荷の下では重複波負荷に比べて液状化限界応力比が著し

く小さくなることを示している。そして、両波浪様式の下で発現した多様な地盤内応力経路の予測結果より、地盤液状化過程に及ぼす主応力軸回転の影響を明らかにしている。さらに、重複波負荷に対する解析結果と実験結果の精査にもとづき、厳しい重複波負荷の下では、液状化は節直下で発生し、それから腹直下の地盤領域に伝播していくとの推断に至っている。

第6章では、波浪負荷により完全液状化に至った地盤の高密度流体としての挙動に着目し、上述の有限要素解析結果を内包したかたちで、波浪による地盤液状化の伝播現象を予測、再現し得る理論モデルを提示している。

第7章は結論であり、本論文で得られた成果について要約している。

## 論文審査の結果の要旨

本論文は、波浪作用による海底地盤の不安定化機構の解明を目標にして、波浪伝播と地盤圧密に関する時間相似則を共に満足し得る遠心力場波浪実験法の開発、細砂地盤の波浪応答実験への適用、粒状土の繰返し塑性構成則の開発、及び部分排水条件下の地盤液状化過程の有限要素解析を行った成果についてまとめたものである。得られた主な成果は次のとおりである。

1. 高遠心力場の下で実質的に進行波を生成し得る造波システムを開発した。水および高粘性流体を使用した一連の波浪実験結果に基づいて、採用した鉛直消波壁のスリット比が0.3の場合で遊水室長が入力波長のほぼ4分の1である際に、同消波壁の反射率が0.13と実質的に進行波が生成されることを示した。

2. 粘性スケーリングを導入した一連の遠心力場波浪実験を水平細砂地盤に対して行い、繰返し応力比0.14以上の厳しい進行波負荷の下で緩詰め砂地盤が残留間隙圧の上昇により完全液状化に至ることを見出した。また、そのプロセスは、液状化フロントが地盤残部より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明らかにした。

3. 粒状土の繰返し塑性及び主応力軸方向の回転の影響を統合的に表現し得る弾塑性構成則を開発した。これを平面ひずみ有限要素解析コードに組込むことにより、部分排水条件下における地盤の波浪応答解析を可能とし、遠心力場波浪実験における地盤液状化過程の観測事実の特徴をよく再現できることを示した。

4. 波浪負荷により完全液状化に至った地層の流体的挙動に着目し、上述の有限要素解析結果を内包したかたちで、液状化フロントの伝播過程と地盤表面の顕著な振動変形状をよよく再現し得る理論モデルを提案した。

以上要するに、本論文は海岸保全ならびに水際空間の防災技術の向上に必要な波浪による砂質地盤の液状化過程の予測手法を開発し、その適用性を遠心力場波浪実験に基づいて検証したものであり、その成果は学術上、実際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。また、平成12年1月20日、論文内容とそれに関連した試問を行った結果、合格と認めた。