

氏名	たじよういち 田地陽一		
授与学位	博士(工学)		
学位授与年月日	平成12年3月23日		
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第1項		
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科(博士課程) 土木工学専攻		
学位論文題目	杭打設による地盤の液状化対策効果の評価法に関する研究		
指導教官	東北大学教授 柳澤 栄司		
論文審査委員	主査 東北大学教授 柳澤 栄司	東北大学教授 杉村 義広	
	東北大学教授 鈴木 基行	東北大学助教授 風間 基樹	

## 論文内容要旨

設計体系が仕様設計から性能設計へ移行することに伴い、基礎構造の挙動を土質力学に基づいて正しく評価し、基礎構造の要求性能を満足する設計を自主的な判断で自由に行うことが可能になると考えられる。与えられた性能を満足する設計であれば、工費が安い基礎工法が採用され、経済性がこれまで以上に問われることとなる。

わが国における臨海地帯に地盤は、沖積層の発達した軟弱地盤や埋立地盤から構成されていることが多い。このような地盤は支持層が深い位置にあるため、構造物を建設する場合の基礎としては、従来から杭基礎が主として用いられてきた。

杭の施工方法には、埋込み杭や場所打ち杭のように掘削することによって地盤を緩めるものと、打込み杭のように周辺地盤を押しつけることによって締固めるものの2種類に分けることができる。後者の杭打設に伴う締固め効果については、特に砂質土地盤において杭を打設するにしたがい杭を打ち込み難くなるなど、経験的には良く知られている。杭打設に伴う締固め効果は、杭体体積分の土が押しつけられることにより周辺地盤の密度増加に寄与するという観点から、液状化対策として期待できるという概念があり、群杭工法と呼ばれる液状化対策工法の一つとして位置付けられている。しかしながら、杭打設による地盤改良効果については、ケーススタディとして杭の打設前後のN値を比較した研究が幾つか見られるのみで、改良効果の定量的な評価には至っておらず、地盤の改良効果を設計に反映できていない。そこで、本研究は杭打設に伴う地盤改良効果の評価手法の提案を行うことにより、地盤の耐震性向上のための対策の一つとして実用化を目指すことを目的としている。

本論文は、第1章の序論から第8章の結論までの8章からなる。

第1章は序論であり研究の目的と論文の構成について述べた。

第2章では、本論文に関する既往の研究成果について述べ、現在まで明らかにされている知見を整理した。ケーススタディとして杭打設前後の $N$ 値を比較した研究が幾つか見られ、いずれの調査結果においても砂地盤では杭打設後に地盤の $N$ 値が5～20増加していること、閉端杭を打設した場合、締固めの影響範囲は杭から概ね杭径の2～6倍程度であることを示した。さらに、新潟地震（1964年）、兵庫県南部地震（1995）における打ち込み杭による液状化対策効果の事例について述べた。

第3章では、先端に十字リブをつけた鋼管杭は打設により閉塞効果が上昇するという現象に着目し、細粒分の多く含んだ典型的な東京湾の埋立地盤において、実際に杭打設実験を行い、その地盤改良効果を明らかにした。また、杭間地盤の物性を評価するために、杭打設前後において凍結サンプリングにより不攪乱試料を採取し、試料の液状化試験を行うことにより、杭打設前後の地盤の液状化抵抗を明らかにした。原位置試験と室内要素試験から以下の結論が得られた。

- (1) 十字リブを取り付けた鋼管杭を打設した場合、打撃回数の深度方向分布と $N$ 値の分布は必ずしも対応せず、 $N$ 値が最大を示す地層から約2m程度（杭径の2～3倍程度）深くなった位置で打撃回数が最大となった。これは、地盤がある程度以上固くなると杭端部にコアが形成され貫入抵抗が大きくなるが、コア形成のために固い地層に達してからある程度の長さが必要になることを示唆している。
- (2) 十字リブを先端に取り付けた鋼管杭を打設した場合、地盤の $N$ 値が9～12以上の砂層において杭の閉塞が生じ、その層において地盤改良効果が期待できる。
- (3) 杭を打設した地盤は、密度増加では表せない微子骨格構造の安定化に起因した液状化抵抗の増加が生じた。先端に十字リブを取り付けた鋼管杭を打設することにより、繰返し回数15回で両振幅軸ひずみ $DA=5\%$ に至る応力比は、0.35から0.40へと増加した。また、杭を打設することにより、入力の大い地震動に対して抵抗力が高い、いわゆる液状化に対してねばり強い地盤へと変化した。

第4章では、細粒分を含んだ砂地盤の原位置液状化強度の評価法の重要性が増加している背景から、原位置凍結サンプリング法を細粒分を含む砂地盤に適用した場合の問題点を検討し、凍結・融解が試料の液状化強度に与える影響に着目した採取試料の品質評価手法を提案した。原位置において地盤が経験した凍結膨張ひずみを推定し、既に提案されている凍結融解による試料の健全度と凍結時の膨張ひずみの関係とを対比させることにより凍結試料の信頼性を評価できることを示した。さらに、第3章で述べた東京湾の典型的な埋立地盤である細粒分を含む砂地盤での凍結サンプリング事例に適用し、試料の健全性評価法の妥当性を検証した。

第5章では、地盤に柱状材料を打設し改良するという共通の観点から、サンドコンパクションパイルによる地盤改良効果の評価法の概念を導入し、杭打設による締固め効果の評価手法を提案した。締固め効果に与える

影響として、1) 粒径分布 (最大間隙比  $e_{max}$ 、最小間隙比  $e_{min}$ 、平均粒径  $D_{50}$ 、均等係数  $U_c$ )、間隙比  $e_0$ 、相対密度  $D_r$ 、細粒分含有率  $F_c$  の地盤条件、2) 有効上載圧  $\sigma_{v0}'$ 、3) 改良率、4) 密度の水平方向の不均一性、6) 杭種 を挙げた。第3章で示した原位置における試験結果や既往の調査事例に対し評価手法の妥当性の検証を行った結果、提案した評価手法は、鋼管杭では実測値を評価できており、既製コンクリート杭では改良効果の下限值を与えることが明らかとなった。

第6章および第7章では、杭基礎について液状化時の耐震安全性を模型実験により実証的に検討した。検討手段として、最近注目されている実地盤の拘束応力状態を再現できる、遠心力場の模型振動実験を用いた。ただし、実構造物を対象とし、その液状化時の耐震性を検討するために、応力・ひずみに関する相似則が満足されている遠心模型実験を行っても、境界条件および地盤の作成方法などにより、必ずしも原地盤と同一にできない部分が存在する。また、土粒子の粒径効果の問題、ひずみ速度の影響など、遠心模型実験特有の問題も存在する。したがって、遠心模型実験が実構造物の挙動を再現できるかは相似則のチェックを行い、遠心模型実験により実物の再現実験を行う場合の問題点を検討する必要がある。第6章では、第7章のプレスタディーとして、科学技術庁防災科学技術研究所にある大型せん断土槽 (内寸法：長さ 11.6m × 高さ 6.0m × 幅 3.1m) の振動台実験と相似則を満足する杭基礎の遠心模型実験を行い、両者を比較することによって、遠心模型実験により実物の再現実験を行う場合の問題点を明らかにした。

その結果、遠心模型実験により乾燥砂地盤中における杭基礎 (鋼管杭) の挙動の再現を行う場合、弾性時における地盤の固有振動数を大型振動実験と一致させることにより、地盤の応答加速度および杭の曲げひずみの応答および分布形状がほぼ再現できることが明らかとなった。また、飽和砂地盤における杭基礎の挙動について比較した結果、過剰間隙水圧の上昇過程や深度分布に関して、遠心模型実験は大型せん断土槽実験の液状化挙動を概ね再現でき、杭の曲げモーメント分布においても、液状化初期段階で定性的に一致することが明らかとなった。

第7章では、第6章の結論を踏まえ、実構造物に対し杭打設による締固め効果を考慮した場合と考慮しない場合について液状化時の耐震安全性を遠心模型実験により検討した。実際の重量構造物を地盤-杭-建屋系に厳密にモデル化し、実地震記録を再現することのできる遠心力場の振動実験装置を用い、地盤の拘束応力および透水性の相似則を合わせ、さらに杭の剛性や構造物の固有周期を実物に対応させた状態で液状化実験を行った。

その結果、以下の結論が得られた。

- (1) 杭打設に伴う締固め効果を考慮しない場合、群杭の剛性だけで杭間地盤の液状化を防止するのは困難であり、地震時には遠方地盤と杭間地盤は、同程度の液状化が発生すると考えられる。しかしながら、杭打設に伴う締固め効果を考慮した場合、杭間地盤では遠方地盤より過剰間隙水圧の上昇が抑えられた。
- (2) 杭の打設に伴う締固め効果を考慮しない実験では、地表地盤のみが液状化した上に入力地震動のパワーが構

造物の固有振動数にほぼ一致し、杭の曲げモーメントの発生メカニズムが構造物慣性力に支配されたため、杭の曲げモーメントはChangの式において得られるモーメントの分布に似た分布となり、杭頭に大きな曲げモーメントが発生した。

- (3) 実際の重量構造物を対象とした遠心模型実験により地盤液状化時における杭基礎の耐震安全性を検討した結果、基盤入力175Gal程度の地震に対する杭基礎の安全性は概ね確保されていることがわかった。
- (4) 本研究において、実施した地盤-杭-建屋系の厳密なモデル化の手法とせん断土槽や地震波加振の実験方法は、動的数値解析法とならんで、実構造物の耐震性評価の検討方法として有力な手段となる。ただし、遠心振動実験により実構造物の耐震性を検討した研究は他に見られないことから、今後更なる実験データの蓄積により手法の信頼性を高める必要がある。

## 審査結果の要旨

埋立地盤などで用いられる杭基礎では、杭を打設する際に砂質地盤が締固まることはよく知られているが、締固めの影響や効果について十分な知見が得られていないため、液状化対策工法としての評価がなされていない状況にある。本論文は、現位置試験と模型振動実験により、杭打設にともなう砂地盤の影響範囲や締固めの程度に関する研究を行い、締固め効果を評価する実用的手法を新たに提案するとともに、液状化対策としての有効性を実証したもので、全編8章よりなる。

第1章は序論であり、本研究の背景と目的について述べている。

第2章は、杭打設に伴う締固め効果に関する既往の研究について述べたもので、周辺地盤の密度増加やN値増加に関する現位置計測のデータ、模型実験による検討事例などについて述べている。

第3章では、先端に十字リブをつけた鋼管杭は打設により閉塞効果が上昇することに着目し、細粒分の多く含んだ埋立地盤において実際に杭打設実験を行い、リブ付き鋼管杭による地盤改良効果を明らかにしている。また、杭打設前後に凍結試料を採取し液状化試験を行うことにより、杭間地盤の液状化抵抗の増加の程度を明らかにしている。これは新たな重要な知見である。

第4章では、原位置凍結サンプリング法を細粒分を含む砂地盤に適用したときの問題点を検討し、凍結・融解が試料の液状化強度に与える影響に着目した採取試料の品質評価手法を提案している。また、前述の埋立て砂地盤での凍結サンプリング試料に適用し、その健全性を明らかにしている。

第5章では、前述の原位置における杭打設に伴う地盤改良効果の施工実験結果に基づいて、サンドコンパクションパイルによる地盤改良効果の評価法の概念を用いて、杭打設に伴う締固め効果の評価手法を新たに提案している。これは有用な知見である。

第6章では、科学技術庁防災科学技術研究所にある大型せん断土槽による振動台実験と、相似則上これと等価な杭基礎の遠心模型実験を行い、両者を比較することによって、遠心模型実験により実物の再現実験を行う場合の問題点を明らかにしている。

第7章では、地盤・杭・建屋系の模型に対し、実地震記録を用いた遠心場の模型振動実験を行い、杭打設にともなう杭間地盤の締固め効果による液状化対策を確かめることにより、その評価手法ならびに杭基礎の耐震安全性の検討手法が妥当であることを示している。

第8章は結論である。

以上要するに本論文は、杭打設時における砂地盤の締固め効果についてその予測手法を提案し、現位置での打設試験と模型振動実験とにより液状化対策工法としての有効性と予測手法の妥当性を検証したもので、土木工学および地盤工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。