

| | |
|-----------|--|
| 氏名 | せんとう のりあき 仙頭紀明 |
| 授与学位 | 博士(工学) |
| 学位授与年月日 | 平成16年12月8日 |
| 学位授与の根拠法規 | 学位規則第4条第2項 |
| 最終学歴 | 平成4年3月 東北大学大学院工学研究科土木工学専攻博士課程前期課程修了 |
| 学位論文題目 | 液状化による地震後の地盤の浸透流動変形予測 (Prediction on seepage-induced flow ground deformation due to liquefaction after earthquake) |
| 論文審査委員 | 主査 東北大学教授 風間基樹 東北大学教授 岸野佑次 東北大学教授 岩熊哲夫 東北大学教授 鈴木基行 東北大学助教授 渦岡良介 |

論文内容要旨

1964年新潟地震, 1983年日本海中部地震, 1995年兵庫県南部地震では, 液状化に起因した地盤の水平永久変位が観測されている. この現象は, 側方流動や永久変形と呼ばれ, ライフライン, 道路橋, 建築物ならびに護岸等の港湾構造物に甚大な被害を与えてきた. これらの被害の特徴は, 数 mにも及ぶ水平地盤変位が発生したこと, および, 地震動が終息してからも変形が継続したことである. 例えば, 新潟地震の際, 信濃川近くのアパートでは地震後に数分かけて建物が傾斜したこと, 信濃川河口に位置する昭和大橋が地震後1~2分して落橋したことが報告されている. これらの被害は緩く堆積した砂地盤が液状化して流動的な破壊を起こしたことが原因である考えられてきた.

この液状化に起因した側方流動の発生メカニズムに関する研究が多くの研究者によりなされてきた. 液状化に関する研究では, 対象としている砂質土の透水性と地震動の継続時間(数10秒程度)の対比から, 震動中の過剰間隙水圧消散は無視しうるものとして, 非排水条件が暗に仮定されてきた経緯があった. したがって流動に関しても主に非排水条件に立脚したメカニズムが多く提案されてきた. しかしながら, これまで観測された大変位を非排水条件下で生じさせるためには, 非常に緩い砂に, 長い時間, 大きな繰返しせん断振幅を作用させる必要があり, 現実的な自然地盤の堆積条件や地震規模等とは乖離が生じることが指摘されてきた. さらに, 進行性の破壊現象について説明がなされてこなかった.

時間遅れを伴う流動現象を説明するために, 地震により蓄積した過剰間隙水圧の消散過程に着目した研究が近年になって行われるようになってきた. 本研究論文で対象とする流動のメカニズムは, 表層に低透水層がある緩傾斜砂地盤において地震後の過剰間隙水圧消散過程において間隙水の再配分が生じ, その際の上向き浸透流で低透水層直下の砂層に間隙水が捕捉されることで浸透破壊が生じ, 地盤が斜面下方に向かって流動変形するというものである(図1).

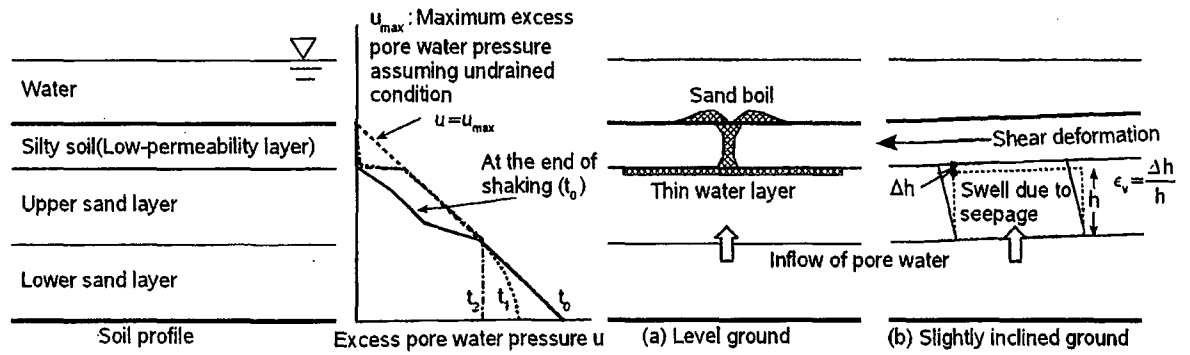


図1 浸透流動現象の模式図

本研究ではこのメカニズムに基づいて境界値問題として流動変形予測を行うことを目的とする。そのために土要素として解明されなければならない地盤の特性の中で特に重要な特性は以下に示す2点である。1点目は非排水繰返しせん断履歴を受けた砂の過剰間隙水圧消散過程における体積収縮特性である。この間隙水流出層の特性は第2章に示した。2点目は浸透により体積膨張する砂のせん断変形挙動である。この間隙水流入層の特性は第3章に示した。これらの特性を統合して、境界値問題に適用し、地震被害事例を解析したケーススタディーは第4章に示した。

第2章では、非排水繰返しせん断履歴を受けて一端、有効応力がゼロとなる、すなわち、液状化を経験した砂質土の水平および傾斜地盤における体積収縮特性を明らかにするために、体積ひずみ速度を一定に制御した再圧密試験を行った。砂供試体を液状化させるための不規則非排水繰返しせん断履歴にハイブリッドオンライン実験手法を用いることで、緩い砂に対しても継続時間が長い地震動を入力することが可能となった。

その結果、水平地盤においては、液状化を経験した砂の体積収縮量は、従来相関が高いとされてきた非排水繰返しせん断中に生じた最大せん断ひずみよりもむしろ累加せん断ひずみと相関が高いことが確認できた(図2)。有効応力-体積ひずみ関係に着目すると体積ひずみは有効応力がゼロに近い領域で著しく増加するような非線形な関係を示した。この増加量は繰返しせん断履歴の増加とともに増加し、相対密度の増加と共に減少する。この関係を簡潔に表現するために、有効応力ゼロ付近で体積ひずみが無限大にならないためのパラメーター p_i' と両対数の比体積-有効応力関係を導入した。さらに、従来、数値解析上のパラメーターとして扱われていた p_i' を密度、繰返しせん断履歴と対応させ、実験結果を表現できるように意味付けを行った。このモデル化は、本研究の浸透流動解析のみ

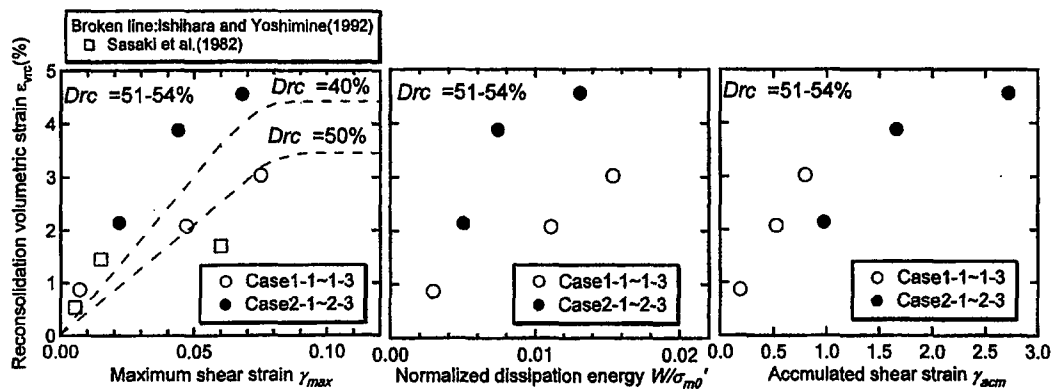


図2 緩い砂の再圧密体積ひずみと繰返しせん断履歴指標の関係

ならず既往の有効応力解析の体積収縮特性のモデル化のためにも役立つ知見を与えている。

初期せん断が作用した状態の体積収縮量は、初期せん断応力が作用することで、再圧密開始時の有効応力がゼロとはならないため、初期せん断が作用しない水平地盤の体積収縮量よりも小さくなる。また、初期せん断作用時の体積収縮量は、平均有効応力の回復による圧密に起因する体積収縮と、せん断応力比の除荷に伴う負のダイレイタンスーに起因する体積収縮に分けることができる。この負のダイレイタンスーに起因する体積収縮は初期せん断応力比が小さいほどおよび繰返しせん断履歴が大きいほど大きくなることがわかった。これらの結果は、せん断を受けた状態の体積収縮特性を初めて実験的に明らかにしたものである。

さらに、液状化を経験した砂は、本論文で設定した条件の範囲では、再圧密過程で約1%~7%の幅を持った体積ひずみが生じ、上部砂層への十分な間隙水の供給能力を有していることがわかった。

第3章では、間隙水の流入に伴い体積膨張が生じる砂層のせん断ひずみの発達特性を明らかにするために、間隙水流入が生じる傾斜地盤の応力状態を模擬した強制膨張せん断試験を行った。

その結果、同じ膨張体積ひずみを与えた場合には、緩い砂ほどより大きなせん断ひずみが発達する。さらに、中空ねじりせん断試験を用いた大ひずみ領域を対象とした試験では、間隙比の増加とともに、せん断ひずみ-体積ひずみ関係は非線形な関係を示し、その挙動は破壊応力が比較的近いCD試験のそれとほぼ等しいことがわかった。そしてこのダイレイタンスー特性は供試体の作成方法による初期構造の違いの影響を強く受けることがわかった。せん断応力比-せん断ひずみ関係に着目すると、体積膨張とともに、硬化挙動を示した後、更なる膨張により軟化挙動を示す。その際の破壊モードはせん断帯等の局所化は発生せず、ほぼ理想的なせん断変形モードを示した。言い換えれば、強制膨張せん断試験は土要素のダイレイタンスー特性を把握するのに適した試験法であると考えられる。さらに、流動に達するまでも砂は数10%オーダーのせん断変形が発生し、このせん断変形を定量的に評価することが浸透流動変形量の予測のために重要であることがわかった。これらの成果の中で大ひずみ領域を対象にした強制膨張せん断試験は本研究で初めて行われた実験であり、流動変形解析のせん断ひずみの発達特性のモデル化のために重要な知見を与えている。さらに、強制膨張せん断試験において大ひずみ領域でも局所化が起きにくいという実験事実は新たに明らかになった点であり、砂質土の力学特性解明のための新たな要素試験法のためのヒントを与えるものである。

さらに既往実験と本研究の実験を限界状態に主眼において比較(図3)ならびに、間隙比の変化に応じてダイレイタンスー特性が非線形に変化する実験結果から、浸透による流動を表現するためには、

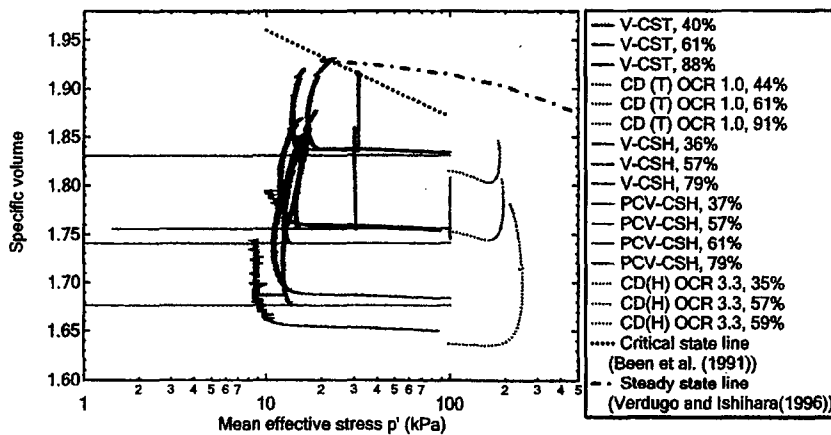


図3 強制膨張せん断試験結果と既往実験の限界状態の関係

間隙比の変化に応じてダイレイタンシー特性が変化する定式化が必要であり、この条件を満足するためには、限界状態概念を適用することが有効であることがわかった。

第4章では、第2章の定式化を含む圧密支配方程式と第3章の膨張時のダイレイタンシーモデルを組み合わせた浸透流動変形解析の定式化の流れを示した。さらに、仮想傾斜砂地盤モデルの解析では流動変形解析から得られる結果が示す基本的性質を明らかにした。また、その応用例として1964年新潟地震で被災した昭和大橋P4橋脚杭周辺の河床地盤に流動変形解析を適用し、杭基礎の被災メカニズムを浸透流動現象の視点から考察した。

その結果、浸透流動変位は、低透水層直下の砂層に集中して発生し、その際の変位量は、低透水層の下部の液状化砂層の体積収縮特性の影響を強く受ける。すなわち、液状化層が緩く堆積しているほど、液状化層が厚いほど、および、繰返しせん断履歴が大きいほど大きくなる。浸透流動変位の経過時間は、過剰間隙水圧が限界間隙水圧を保持している間は変形が継続し、過剰間隙水圧が消散してこの値よりも小さくなれば、変形が停止する。また、均質な透水係数の分布を有する地盤では、間隙水が捕捉されて膨張する層が存在しないことから、浸透に起因する流動破壊は発生しないことがわかった。さらに密度に依存した非線形ダイレイタンシーモデルが組み込まれた解析では、層分割厚さが流動変形予測結果に敏感に影響を及ぼすことが問題点として確認された。層分割厚さが解析結果に及ぼす影響に関する問題提起はこれまでにない。しかしながら、非線形ダイレイタンシーモデルを導入することにより、層分割に関する問題が顕在化したため議論を追加したものである。

1964年新潟地震で被災した昭和大橋P4橋脚杭のシミュレーションでは間隙水の移動の間に発生した地盤変位は、杭に損傷を与えるのには十分な大きさであった。また、落橋桁のストラット効果を考慮することで、被害杭の残留変形を良く説明できることがわかった。さらに、シミュレーションされた進行性破壊現象は地震後1~2分で落橋が生じたという目撃証言と良く一致した。この知見は、地震後の間隙の再配分により発生する地盤の流動変形によっても、橋梁基礎の破壊過程を説明可能であることを示したものである。すなわち、地震後の間隙の再配分が橋梁被災原因の中の1つである可能性が示されたといえる。

以上の研究成果より、本論文では地震による浸透流動変形予測に関して概ねその目的を達成したものと考える。しかしながら、地盤の非均質性、非線形な物性等に起因して今後研究しなければならない点も明らかになった。さらに本論文で扱った問題は主に半無限傾斜地盤に限定していたが、例えば、盛土や護岸構造物等の土木構造物の地震時安定性評価や液状化対策の効果の確認を行うために二ないし三次元に拡張した解析が不可欠となる。ただし、本論文で示した流動変形予測は多次元問題への拡張が理論的に可能であるため、多次元境界値問題への適用は今後の課題としたい。

論文審査結果の要旨

液状化に起因した地盤の側方流動現象はライフライン、道路橋、建築物ならびに護岸等の港湾構造物に甚大な被害を与えてきた。本論文は、側方流動の進行性の破壊メカニズムを、液状化によって生じた過剰間隙水圧の伝播に伴うせん断破壊から説明したものであり、全5章よりなる。

第1章は、研究の背景と目的、既往の研究について述べている。

第2章では、非排水繰返しせん断履歴を受けた砂の過剰間隙水圧消散過程における体積収縮特性(体積ひずみ-有効応力関係)を明らかにし、モデル化している。実験から、初期の有効応力回復時に大きな体積収縮があること、せん断履歴指標のうち累加せん断ひずみと最終的な体積収縮量に強い相関があること、初期せん断作用下の体積収縮特性を示したことなど、新たな実験事実を明らかにしている。

第3章では、初期せん断を一定に保ったまま間隙水を注入する強制膨張せん断試験から、間隙水流入に伴う体積膨張量とせん断ひずみの発達量の関係を明らかにしている。同じ膨張体積ひずみを与えた場合には、緩い砂ほどより大きなせん断ひずみが発達すること、さらに大ひずみ領域を対象とした試験では、間隙比の増加とともにその関係は非線形になること、その挙動は破壊応力が比較的近いCD試験のそれとほぼ等しいことを明らかにした。これらの成果は、体積膨張時の砂の変形特性に対して重要な知見を与えている。

第4章では、2章3章で明らかにした体積収縮特性と膨張時のダイレイタンス特性を組合せた浸透流動変形解析の定式化を行っている。その結果、流動変位は低透水層直下の砂層に集中して発生し、変位量は液状化層が緩くしかも厚く堆積しているほど、および繰返しせん断履歴が大きいほど、大きくなることを示した。また、1964年新潟地震で被災した昭和大橋P4橋脚杭周辺の河床地盤に生じた流動変形過程を事例解析し、間隙水の移動の間に発生した地盤変位が、杭に変形を与えるのに十分な大きさであったこと、落橋桁のストラット効果を考慮することで被害杭の残留変形を経時的に説明できることを示した。

第5章では、結論および研究成果の活用について述べている。

以上、本論文は、地震後の間隙水の再配分によって大きな流動変形が発生することを要素試験・境界値問題の解析から明らかにしたもので、成果は流動変形予測や基礎の耐震設計・施工にも有用な知見を与えており、地盤耐震工学の発展に寄与するところが大きい。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。