

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 3 日現在

機関番号：32665

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420510

研究課題名(和文) 液状化後の間隙の再配分を考慮した地盤変状評価手法の開発

研究課題名(英文) The development of ground deformation evaluation method considering void re-distribution due to liquefaction

研究代表者

仙頭 紀明 (SENTO, Noriaki)

日本大学・工学部・准教授

研究者番号：40333835

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：地震による液状化が土中水(間隙水)の上向きの移動を引き起こし、その結果、表層の非液状化層直下では、水を多く含む緩い部分が形成され、これが弱点となり様々な被害を引き起こす。本研究では、この間隙水が流入して緩くなる部分、逆に間隙水が流出して密になる部分の液状化強度を室内要素実験により求めた。その結果、間隙水の流入・流出のない非排水条件の液状化強度を基準とした時の、強度減少・強度増加の割合を定量的に評価することができた。

研究成果の概要(英文)：Liquefaction due to earthquake induces the upward movement of water in the ground. As a result, a looser part is formed underneath the non-liquefiable surface layer. This part becomes weak part in the ground and causes the severe damages for infrastructures. In this research, liquefaction resistance not at the looser part due to inflow, but at the denser part due to outflow of pore water were studied by the laboratory element tests. The decreasing and increasing ratio against undrained liquefaction resistance were suggested and evaluated quantitatively.

研究分野：地盤工学

キーワード：液状化 間隙 再配分 地盤変状 液状化強度 地盤調査

1. 研究開始当初の背景

東日本大震災では3分を越える継続時間の長い地震動が緩い砂質地盤に作用した。また本震の長さに加え、余震が頻発したことで砂地盤が液状化して大量の噴砂が生じた。その結果、関東平野の埋立地や旧河道を埋めた地域を中心に住宅に傾斜や沈下が生じた。また、道路舗装の段差、マンホールの浮上や水平方向のずれが報告されている。これらの現象を理解し、その対策を考えるためには、本震で液状化した地盤の液状化後の挙動を時系列で理解することが必要である。すなわち、液状化した地盤内の過剰間隙水圧消散過程における間隙の再配分を理解する必要がある。具体的には、透水性が低い表層付近の舗装、不飽和土層および粘性土層がある場合、液状化した層の下部では、過剰間隙水圧消散に伴う体積収縮(間隙比の減少)が生じ、その逆に、透水性が低い層の直下では、間隙水が捕捉されて体積膨張(間隙比の増加)が生じることになる(図1)。

この間隙の再配分は、いうまでもなく、地盤の透水係数の深度方向分布の影響を強く受け、時間遅れを伴う進行性破壊を引き起こす。先に述べた東日本大震災で生じた特徴的な地盤変状被害を合理的に説明するためには、間隙の再配分の観点から被害メカニズムを解明し、有効な対策を提案する必要がある。しかしながら間隙の再配分に関する実験データが限られていること、さらに地中での間隙再配分の痕跡が調査されておらず、現場のエビデンスが不足していることにより、メカニズムに関する研究が進展していないことが現状である。

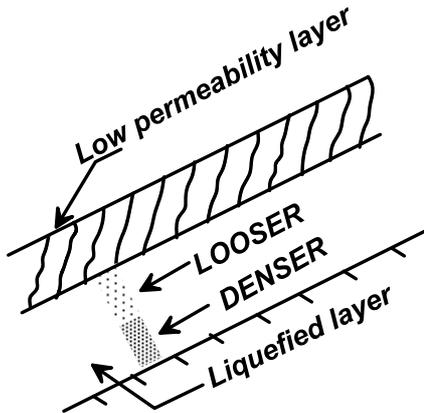


図1 間隙の再配分の模式図

2. 研究の目的

本研究では、上記の課題を解決するために、砂質土を対象として、間隙の再配分に着目した要素実験を行い、メカニズム解明と解析手法検証のための基礎データを蓄積する。さらに被害が生じた現場の地盤を対象に、透水係数の深度分布や地盤の硬軟を高分解能に調査し、間隙の再配分を検討するための現場調査データを蓄積する。さらに得られた結果から間隙の再配分を設計に反映する際の評価方法についても提案する。

3. 研究の方法

(1)室内要素実験 本試験では中空ねじりせん断試験装置と体積ひずみ制御装置を用いた。試験装置の概略図を図2示す。前者は地中の応力条件を精密に再現し、地震で発生する繰返しせん断力を载荷する装置であり、後者は間隙の再配分を再現するために供試体への間隙水の流入・流出を高精度に制御する装置である。この体積ひずみ制御装置は、モーターの回転運動をボールねじとナットにより直動運動に変換することで直径2cmのピストンを前後に動かす構造である。モーターはパルスモーターであり、1ステップあたりのピストンの移動量が0.00002mmとなるように設定した。すなわち原理的には1ステップあたり 6.28×10^{-6} ccの間隙水の流入量を制御することができる。

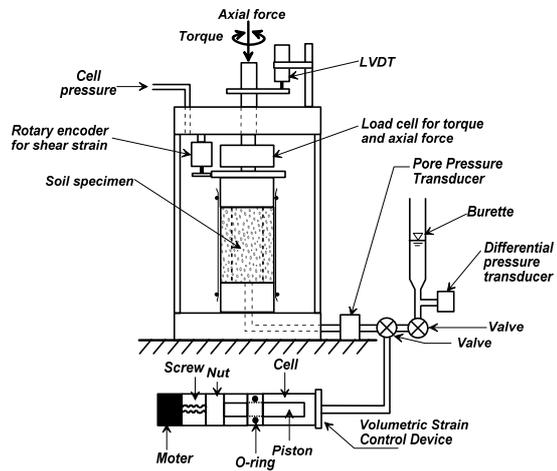


図2 装置の概要

試料には豊浦砂を用いた。試料の物理特性は $s=2.634\text{g/cm}^3$ 、 $e_{\max}=0.979$ 、 $e_{\min}=0.624$ である。供試体は外径7cm、内径3cm、高さ10cmである。供試体は空中落下法により作製した。なお、目標相対密度 D_r は40%(緩詰)、70%(密詰)とした。供試体は10kPaで自立させた後、飽和させるため、間隙の空気を二酸化炭素と置換し、脱気水を通水した後、背圧を100kPa载荷した。なお、供試体のB値は95%以上をとした。その後、有効拘束圧100kPaで供試体を等方圧密した。圧密終了後、初期せん断応力($\sigma_{in} = 5\text{kPa}$)を排水条件で载荷した後、所定の応力振幅で繰返しせん断を载荷した。その際せん断ひずみ速度は1%/minとした。

間隙の再配分が生じない条件の試験は非排水試験、間隙の再配分が生じる条件の試験を部分排水試験と呼んだ。部分排水試験では体積ひずみ増分とせん断ひずみ増分の比($d_v/|d_s|$)を変化させて与えた。ここで符号のマイナスは体積膨張(間隙水の流入)、プラスは体積収縮(間隙水の流出)を意味する。また試験ケースを表-1に示す。ケース1は非排水試験、ケース2~5は部分排水試験(体積膨張)、ケース6~9は部分排水試験(体積収縮)である。繰返し载荷試験において、非排水試験、部分排水試験(体積膨張)では、せん

断ひずみが片振幅(SA)20%、部分排水試験(体積収縮)では、せん断ひずみが片振幅(SA)5%に達したら試験を終了した。

表 1 試験条件

| | 排水条件 | 相対密度 Dr(%) | 応力比 τ/σ_v' | d_{e_v}/d_r |
|-----|----------------|---------------|-------------------------|---------------|
| 1-1 | 非排水 | 70.0 | 0.15 - 0.40 | |
| 1-2 | | 40.0 | 0.10 - 0.20 | |
| 2-1 | 部分排水 (体積膨張) | 70.0 | 0.10 - 0.40 | -0.01 |
| 3-1 | | 70.0 | 0.10 - 0.40 | -0.04 |
| 3-2 | | 40.0 | 0.05 - 0.10 | |
| 4-1 | | 70.0 | 0.10 - 0.40 | -0.06 |
| 4-2 | | 40.0 | 0.05 - 0.15 | |
| 5-1 | | 70.0 | 0.10 - 0.40 | -0.10 |
| 5-2 | 40.0 | 0.05 - 0.12 | | |
| 6-1 | 部分排水 (体積収縮) | 70.0 | 0.40 - 0.60 | 0.01 |
| 6-2 | | 40.0 | 0.30 - 0.60 | 0.04 |
| 7-1 | | 70.0 | 0.60 - 1.80 | |
| 7-2 | | 40.0 | 0.30 - 0.60 | 0.06 |
| 8-1 | | 70.0 | 0.80 - 1.60 | |
| 8-2 | | 40.0 | 0.50 - 0.70 | 0.10 |
| 9-1 | | 70.0 | 0.80 - 1.40 | |
| 9-2 | | 40.0 | 0.20 - 1.00 | |

(2) PDC による地盤調査

仙台塩釜港の東南部に位置する向洋埠頭で調査を行った。図3には地盤断面図を示す。棧橋背後の34m区間の埋立地には液状化対策が施工されている。棧橋端部から約7.7mの区間には過剰間隙水圧消散工法の一つであるスパイラルドレーン工法(SPD)が施工されていた。残りの区間は締固め工法であるサンドコンパクション工法(SCP)が施工されていた。

調査位置は棧橋から6.4m(図中D-1~3)と39m(図中N-1~2)離れた位置で実施した。前者は改良地盤であり、後者は無対策地盤である。

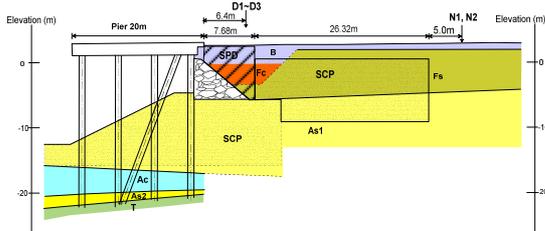


図3 調査地点の断面図

ピエゾドライブコーン(以降PDCと呼ぶ)による調査の概要を示す。PDCは動的コーン貫入試験に分類される試験法である。PDCの概要を図4に示す。PDCではまず地盤の動的貫入抵抗を測定し、地盤の硬軟を評価するためのN値を求める。打撃貫入時に先端コーン周辺地盤に発生する過剰間隙水圧を同時に測定して、地下水位と土質区分(細粒分含有率Fc)を推定する。N値とFcから地盤の液状化安全率(FL値)を評価することができる。原位置試験である。さらにこの方法の特徴は、連続してコーン貫入するため標準貫入試験と比べて深さ方向に高分解能な計測ができることである。したがって薄層や互層等の不均質な地盤の堆積状況を調査できる。今回の実験は先端コーン直径43.7mm、ロッド直径

32mm、ドライブハンマー質量50kg、落下高さ50cmの条件で行った。

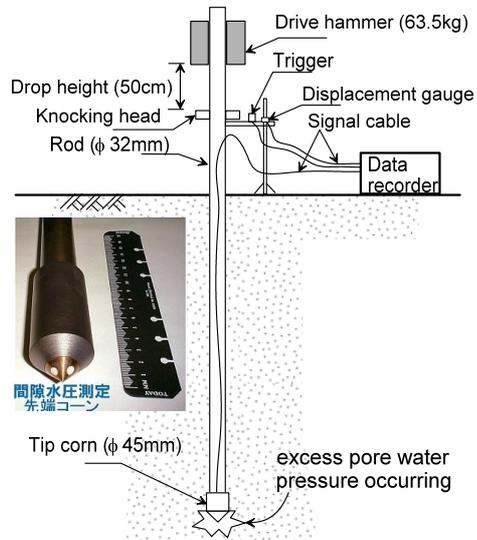


図4 PDCの概要

4. 研究成果

(1)室内要素実験 図5に試験結果の一例として相対密度Dr=40%における応力-ひずみ関係と有効応力経路を示す。ここで上段((a)、(b))は非排水条件、中段((c)、(d))は部分排水水条件(体積膨張)、下段((e)、(f))は部分排水水条件(体積収縮)である。土が体積膨張を伴って繰返しせん断されると、非排水条件と比較して急激に強度低下を起し脆性的な挙動を示す。一方、体積収縮を伴って繰返しせん断されると、非排水条件と比べてかなり大きいせん断応力を入力しても有効応力はゼロにはならず、緩詰にも関わらず、あたかも密な砂のようなねばり強い傾向を示す。

図6に相対密度Dr=40%における非排水条件および部分排水条件(体積膨張)の液状化強度曲線を示す。ここで液状化は片振幅せん断ひずみSAが5%に達した時と定義した。非排水条件と比べて部分排水条件の液状化強度曲線は体積ひずみ増分・せん断ひずみ増分比の絶対値が大きくなるにしたがって、左下方にシフトしていることがわかる。その結果、繰返し回数15回の液状化強度を比較すると、部分排水条件では非排水条件の液状化強度の約60%になっている。

図7に部分排水補正係数 K_{PD} と d_{e_v}/d_r の関係を示す。ここで K_{PD} は部分排水条件の液状化強度(CRR_{PD})を非排水条件の液状化強度(CRR_{UD})で除した値である。なお液状化強度は繰返し回数N=15回の時の繰返しせん断応力比である。体積膨張では d_{e_v}/d_r の絶対値が大きくなると K_{PD} は約0.6に収束する。また相対密度が大きくなると K_{PD} は若干大きくなる傾向がある。一方、体積収縮条件では、 d_{e_v}/d_r が大きくなると相対密度が40%の緩詰めでは K_{PD} が5に、相対密度70%の密詰めでは9程度に近づくことがわかる。

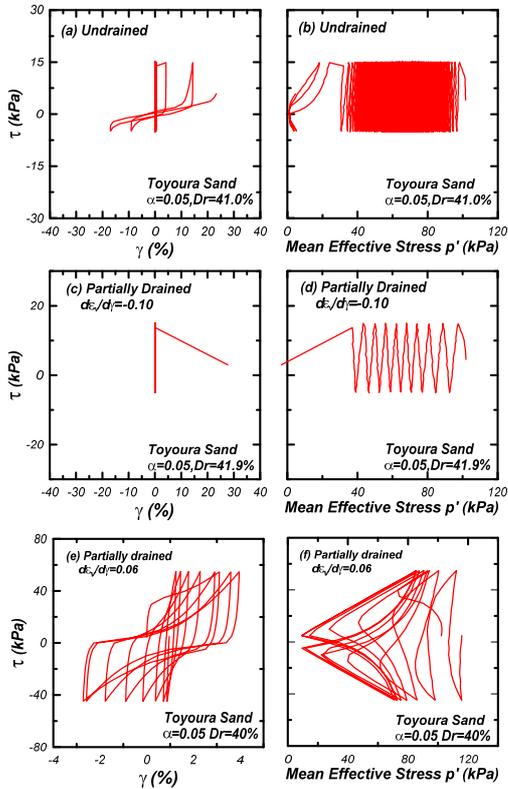


図5 応力ひずみ関係と有効応力経路の例

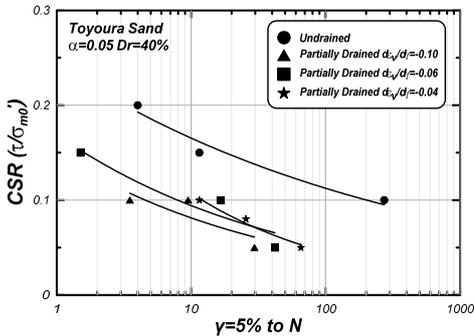


図6 液状化強度曲線

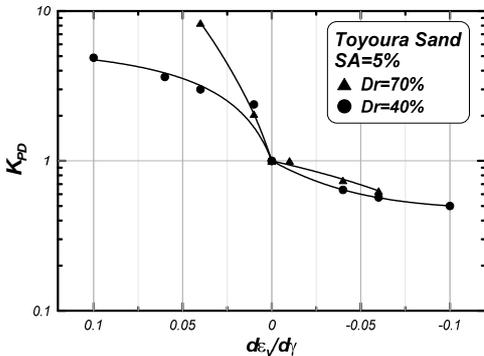


図7 KPDと d_v/d の関係

図7の工学的な意義について説明する。継続時間の長い地震や地震後の余震時における液状化強度は、非排水条件の液状化強度を把握していれば、図7を活用することで推定できる。具体的には図1の液状化層上部では d_v/d が負の時の K_{PD} を、液状化層下部や排

水系の地盤改良が施工された地盤では、 d_v/d が正の時の K_{PD} を用いて液状化強度が推定できる。ただし、この時の d_v/d については現場の境界条件、地震動、透水係数および体積圧縮特性により変化する。したがって今後は圧密解析やせん断ひずみの発達特性をもとにこの値を検討する必要がある。(2)PDCによる地盤調査 無対策地盤の N_d 値、 F_c および F_L 値の分布を図8に示す。 F_L 値は建築基礎構造設計指針を用いて、中地震として地表面最大加速度 200Gal、大地震として 350Gal を考慮して求めた。土層構成は上から、盛土(砂質土)(Bs)、埋立土(砂質土)(Fs)、旧海底地盤の砂質土(As)である。地下水位は約 2m である。埋立砂の N_d 値はほとんどが 5 以下であり、緩い状態である。細粒含有率は埋立砂の下部は 10%程度と比較的低いものの、上部では F_c が大きく、深度ごとの変動幅も大きい。液状化に対する安全率(F_L)は埋立砂のほとんどで 1 より小さく、液状化が発生する可能性が高い。このことから、東日本大震災において、激しい液状化が生じたものと推定される。再び中地震が発生すると再液状化する可能性が高いと考えられる。

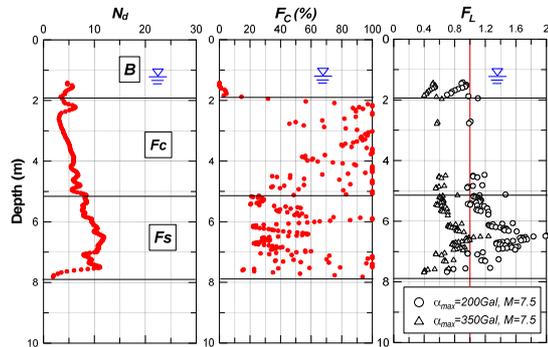


図8 無対策地盤の PDC 調査結果

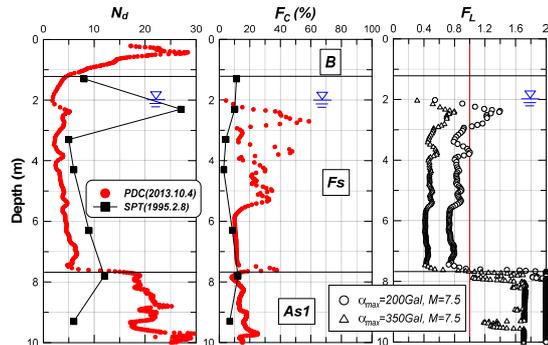


図9 対策地盤の PDC 調査結果

図9に対策地盤の結果を示す。土層構成は上から、盛土(礫質土)(Bg)、埋立土(粘性土)(Fc)、埋立土(砂質土)(Fs)となっている。この地点では埋立材料の粒度分布と比べてかなり高い細粒含有率を示した。さらに深度方向に大きな変動を持つ分布であった。この原因は、調査地点が埋立地の端部に相当し、埋立の際に細粒分が分級して集まり

やすかったためと考えられる。埋立土 (F_s) の N_0 値を見ると、無対策と比べて約 2 倍程度大きな値が得られている。加えて F_c が大きいために、中地震ではほとんどの深度で F_L 値が 1 を超えており、液状化発生の可能性は低いことがわかる。これはドレーンの効果により、地盤は排水を伴いながら繰返しせん断を受けたため、密度の増加とともに液状化に対する強度も増加したものと考えられる。

今回の調査からは、地盤の硬軟および細粒分含有率に関する高分解能なデータを取得することができた。この調査は間隙の再配分のエビデンスをとらえるための有効な調査手法となりえることがわかった。ただし、今回の調査のデータを詳しく見ると、細粒分含有率が大きき場所の直下で、 N_0 値が他よりも小さくなっている箇所が見られたものの、これが間隙の再配分のできた緩い領域なのか、埋立完了時から生じていたかの判断ができなかった。したがって、地震の前後で PDC 調査を行って比較することが必要である。その他にも、大型の模型振動実験の加振前後の調査結果を比較することも有効であると考えられる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 0 件)

〔学会発表〕(計 5 件)

N. Sento, W. Yatagai, A. Sanomine, D. Yoshizawa, Liquefaction potential and residual deformation of ground behind a wharf pier with minimal damage caused by the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake, International Conference on Geotechnical Engineering, ICGE-Colombo-2015, pp.145-148., 2015.8.11. (コロンボ スリランカ)

仙頭紀明, 谷田貝航, 長谷川峻, 繰返しせん断試験中に生じる排水が液状化強度の増加に及ぼす影響, 第 49 回地盤工学研究発表会, pp. 455-456. 2014.7.16. (北九州国際会議場)

仙頭紀明, 谷田貝航, 佐野峯麻聖, 2011 年東北地方太平洋沖地震で被災を免れた仙台塩釜港向洋埠頭棧橋背後地盤の液状化ポテンシャルと残留変形, 地盤工学会特別シンポジウム - 東日本大震災を乗り越えて -, pp. 175-180, 2014.5.14 (地盤工学会)

仙頭紀明, 嶋崎彰則, 飽和砂斜面のせん断ひずみ発達特性に及ぼす余震の影響, 土木学会第 68 回年次学術講演会, pp.651-652, 2013.9.5 (日本大学生産工学部)

谷田貝航, 仙頭紀明, 間隙の再配分を考慮した液状化強度評価のための部分排水繰返しせん断試験, 土木学会第 68 回年次学術講演会, pp.653-654, 2013.9.5 (日本大学生産工学部)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕
出願状況 (計 0 件)

名称 :
発明者 :
権利者 :
種類 :
番号 :
出願年月日 :
国内外の別 :

取得状況 (計 0 件)

名称 :
発明者 :
権利者 :
種類 :
番号 :
取得年月日 :
国内外の別 :

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

仙頭 紀明 (SENTO, Noriaki)
日本大学・工学部・准教授
研究者番号 : 4 0 3 3 3 8 3 5