

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 2 日現在

機関番号：13901

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2013

課題番号：24760377

研究課題名(和文) 細粒分を多く含む表層土の液状化挙動に及ぼす深部地層構成の影響

研究課題名(英文) The effect of stratum organization on the occurrence of liquefaction in subsurface silty sand

研究代表者

中井 健太郎(Nakai, Kentaro)

名古屋大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：60402484

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円、(間接経費) 1,020,000円

研究成果の概要(和文)：浦安市内で実施されたボーリング調査および室内試験結果をもとに浦安市地盤の弾塑性モデル化を行い、東日本大震災で見られた甚大かつ非一様な液状化被害の発生要因を地層構成に着目して考察した。その結果、1) 液状化層以深に堆積する軟弱粘土層の存在が地震波をやや長周期の範囲で増幅させて液状化しにくい中間土を液状化させた、2) 地盤の傾斜によって不整形な境界から表面波が生成されることによって主要動終了後も比較的強い揺れが継続して液状化が拡大する、3) 表面波と下部からの実体波が複雑に干渉することで、均質な地盤材料・状態を仮定しても地表面の変状がばらつく、ことなどを示した。

研究成果の概要(英文)：Firstly, elasto-plastic modelling of Urayasu soils based on the boring survey and laboratory testing was conducted. After then, its seismic response analysis was conducted for the purpose of understanding why extensive and non-uniform liquefaction damage was occurred at Urayasu city during 2011 Great East Japan Earthquake. The main conclusions are as follows, 1) existence of the clay layer caused amplification of the seismic wave in the somewhat long-period ranges, leading to large plastic strains sufficient to cause liquefaction even in intermediate soils, 2) existence of the sloped irregularly-shaped boundary generates surface waves which causes localized amplification of the acceleration, continuous oscillation at the ground surface and expansion of the liquefaction, 3) complicated interposition of the surface waves and body waves result in non-uniform ground deformation even for homogeneous ground conditions.

研究分野：土木工学

科研費の分科・細目：地盤工学

キーワード：液状化 東日本大震災 浦安市 地層構成 地震応答解析 表面波 後揺れ現象

## 1. 研究開始当初の背景

東日本大震災において、浦安市で広範囲に発生した液状化被害の特徴としては、震源から 400km 程度離れており、震度 5 程度(周辺の K-net などの地表面観測記録で最大 100 ~ 200gal 程度)の揺れにもかかわらず、甚大な液状化被害が発生したこと、液状化地域周辺から採取した噴砂試料の粒度特性が、従来は液状化しにくいと考えられてきた細粒分を多く含む土であったこと、液状化地点と非液状化地点が面的に不均一・非一様に分布しており、被害は中心部から南東にかけての比較的新しい埋立地に集中して北西の古い地盤では液状化被害がほとんど発生していないこと、本震からわずか 29 分後に発生した余震によって液状化被害が拡大したことが挙げられる。やの要因としては、地震動の特徴である継続時間の長さが、に 関しては、地盤の材料や内部状態の不均一性、つまり、埋立年代に伴う密度の違いや地盤改良の有無がよく指摘されてきた。

浦安市での液状化被害を見てみると、北部の内陸側では軽微である一方、南東部の海側では甚大であり、確かに埋立履歴と液状化被害の程度には関連性が見られる。しかし、液状化被害の程度と地層構成を比較してみると、液状化層の下部に堆積する軟弱な沖積粘土の層厚が、液状化被害が軽微であった陸側では 10m 程度と薄いのに対し、液状化被害が甚大であった海側へ向かうほど次第に厚くなり、最大で 50m にも達することがわかった。本研究では、この液状化層以深に堆積する軟弱粘土層の存在および地層傾斜に着目し、これら深部地層構成が表層地盤の液状化挙動に与える影響について、弾塑性地震応答解析によって予備的に検討した。

## 2. 研究の目的

### (1) 浦安市埋立地盤直下の土の力学特性を把握し、弾塑性ソイルプロファイルを作成する。

名古屋大学で保有する標準圧密試験機、三軸試験機および中空ねじり試験機を用いて、浦安市で採取した「埋立土、沖積砂、沖積粘土」の力学特性を実験的に把握するとともに、弾塑性構成モデルによる再現を試みる。不攪乱試料の採取は限られた点での情報となるが、国交省や浦安市役所、各研究機関の研究成果も参考にしながら、浦安市の空間的な地層構成を把握し、詳細な弾塑性ソイルプロファイルを作成する。

### (2) 深部地層構成が表層土の液状化挙動に与える影響を数値解析的に説明する。

上記 1) の成果をもとに浦安市の地層構成を忠実にモデル化した弾塑性地震応答解析を実施し、現地観測された液状化被害を再現する。地層構成(土の種類や層厚、層の傾

斜など)が表層土の液状化/変形挙動に及ぼす影響を定性的に調べ、液状化層以深に堆積する軟弱粘土層の存在が表層地盤の液状化を助長したことを示す。中越沖地震(2007)では、地震動によって軟弱な粘土層が乱され、地震後に顕著な長期沈下が生じ、現在も継続中であることが報告されている。浦安市においても、粘土層の乱れに起因する長期沈下の可能性が否定できない。地震中だけでなく、地震発生から数十年後までの連続した数値解析を行うことによって、将来の地盤変状予測も行う。

## 3. 研究の方法

### (1) 浦安市地盤の力学特性の把握

液状化被害の見られなかった浦安市北部および噴砂被害の見られた浦安市南部の 2 地点でボーリング調査および不攪乱試料の採取を行う。室内試験結果をもとに浦安地盤の「埋立土、沖積砂、沖積粘土」の物理・力学特性の把握を試みる。力学試験実施の際は、原位置からできるだけ乱さないように採取した「不攪乱試料」だけでなく、不攪乱試料を一度乱して作成した「練返し試料」「再構成試料」「攪乱試料」も用いた。それぞれの土試料に対して、拘束圧を変えた単調載荷非排水/排水せん断試験、非排水繰返しせん断試験、変形特性を求めめるための繰返し載荷試験、圧密試験を実施し、各層の力学特性を包括的に把握する。

### (2) 浦安市地盤の弾塑性プロファイルの作成

申請者もその開発に携わった SYS カムクレイモデルは、土の骨格構造(構造・過圧密・異方性)とその働きを内包した弾塑性構成式であり、鋭敏な自然堆積粘土から砂、そして両者の混在した中間土まで、様々な土の力学挙動を統一的に記述することが可能である。本研究では、上記(1)の室内試験結果を骨格構造概念に基づいて記述することで、浦安市地盤の弾塑性性状の把握とモデル化を行う。

### (3) 弾塑性地震応答解析

本研究では、自然堆積粘土や密度の異なる砂、そして細粒分を多く含む中間土までを一貫して記述する弾塑性構成式を基礎に、変形から破壊までを、動的・静的を問わずあらゆる外力条件のもとで統合的に解析する有限変形・水~土骨格連成有限要素プログラム(All Soils All States All Round Geo-Analysis Integration, GEOASIA)を用いた地震応答解析を実施する。この計算プログラムの数学/力学的な特徴は、水と土骨格の 2 層混合対理論に基づいた連続式(質量保存則)を導入していること、「加速度項」がダルシー則に(自ずと)導入されていること、直接の計算対象は土骨格の運動であること、運動方程式の増分形に対して弱形式を取っており、

したがって基礎方程式に直接弾塑性構成式が載ること、である。

#### 4. 研究成果

##### (1) 浦安市埋立地盤直下の土の力学特性を把握し、弾塑性ソイルプロファイルを作成する。

浦安市地盤の工学的基盤面は陸側から海側に向かって緩やかに傾斜する埋没平坦面を形成していること、その上部には大別して、洪積土 D 層、沖積粘土 Ac 層、沖積砂 As 層、埋立土（浚渫土）B 層が堆積していること、沖積粘土 Ac 層はその状態から更に 3 層に分割できることを把握した。各土質の状態は、埋立土 B 層の単調荷重挙動は体積収縮（負のダイレイタンス）傾向にあり、さほど締まった状態ではないこと、沖積砂 As の単調荷重挙動は体積膨張（正のダイレイタンス）傾向にあり、やや密に締まった状態にあること、沖積粘土中央部 Ac2 層の非排水せん断挙動は塑性圧縮を伴う軟化挙動（ $p'$  減少を伴う  $q$  の減少）を示し、一次元圧縮挙動は初期比体積が大きく、練返し圧縮線の外側に「高張っている状態」にあり、構造高位で鋭敏な粘性土であること、沖積粘土上部 Ac1 層は Ac2 層と同じ土質と考えられるものの、Ac2 に比して初期比体積が小さく構造低位な状態にあること、沖積粘土 Ac3 層は、Ac1, 2 層と比して圧縮指数が小さく、異なる土質に分類されること、を得た。

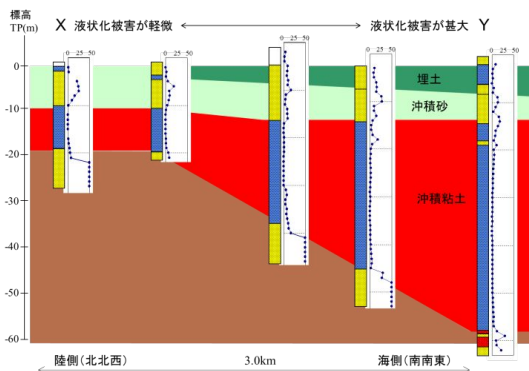


図-1 北部から南部に向かって基盤が深く沈み込む浦安市地盤の地層構成

##### (2) 深部地層構成が表層土の液状化挙動に与える影響を数値解析的に説明する。

東日本大震災で見られた浦安市の甚大かつ非一様な液状化被害の発生要因を特に深部地層構成（軟弱粘土層厚、不整形境界）に着目して考察した。その結果、

液状化層以深に堆積する軟弱粘土層の存在が、地震波をやや長周期の範囲で増幅させ、これに伴って生じる大きな塑性変形によって、液状化しにくい中間土を液状化させた。

表層地盤の液状化発生に及ぼす不整形地盤の影響を数値解析的に検討した結果、傾

斜基端部から表面波が生成されることによって傾斜部直上では加速度が局所的に大きくなると同時に、主要動終了後も比較的強い揺れが継続する「後揺れ現象」が発生して、液状化が拡大する。

表面波と下部からの実体波が複雑に干渉することで、均質な地盤材料・状態を仮定しても地表面の変状が大きくばらつく（これは阪神淡路路震災で見られた「震災の帯」と同じメカニズムだと考えられる）。盆地地形では左右両方向から生成・伝播してきた表面波が谷部直上で衝突することにより、谷部直上で揺れや液状化の危険性がより高くなる。

事を示した。

従来行われている微地形区分による概略法や FL 法による液状化判定では、表層土の「土性」だけが問題とされ、継続時間や深部地層構成、不整形境界の影響は直接的には問題とされない。しかしながら、傾斜地形や盆地地形といった不整形な境界は浦安市に特別な地形ではなく、どこにでも存在するものであり、注意が必要である。本研究で示した計算結果は、弾塑性力学に基づく最新の計算地盤力学の必要性を示唆している。

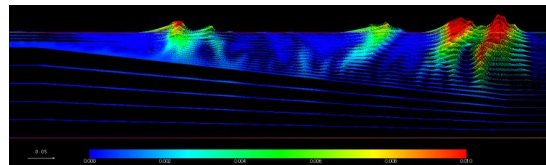


図-2 傾斜基盤部から生成された表面波（地震発生から 60 秒後の速度ベクトル分布図）

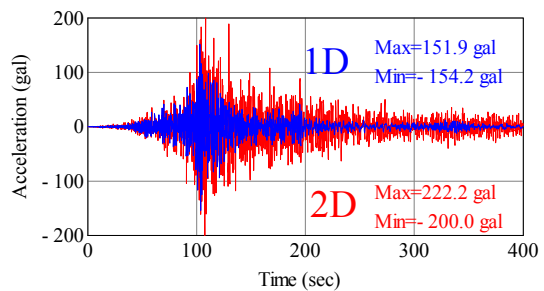


図-3 表面波生成に伴う後揺れ現象（一次元解析と二次元解析の比較）

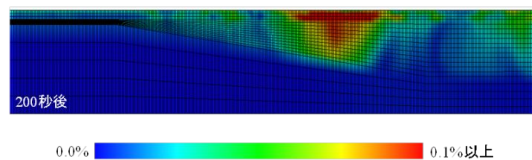


図-4 傾斜部直上で局所的に大きくなる不均一なせん断ひずみ分布（地震発生から 200 秒後のせん断ひずみ分布図）

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計1件)

Nakai, K., Noda, T. and Asaoka, A. (2012):  
The effect of stratigraphic composition and dip of deeper layer on the occurrence of subsurface liquefaction, Proc. of 6th International Workshop on New Frontiers in Computational Geomechanics,, pp.173-176.  
査読なし

[学会発表](計8件)

中井健太郎, 不整形境界から発生した表面波が液状化被害に与える影響, 第69回土木学会年次学術講演会, 2014年9月10日~12日, 大阪大学豊中キャンパス.

中井健太郎, 浦安市地盤の弾塑性性状のモデル化とその一次元地震応答解析, 第49回地盤工学研究発表会, 2014年7月15日~17日, 北九州国際会議場.

浅岡顕, 不整形な境界から発生した表面波によって拡大した埋立地盤の液状化被害, 第49回地盤工学研究発表会, 2014年7月15日~17日, 北九州国際会議場.

中井健太郎, 浦安市地盤の地層構成・物理特性・力学特性の把握, 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 -, 2014年5月14日~15日, 東京電機大学.

浅岡顕, 不整形な境界から発生した表面波によって拡大した浦安市の液状化被害, 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 -, 2014年5月14日~15日, 東京電機大学(東京都足立区)

中井健太郎, 傾斜基盤の基端部から発生する表面波による液状化被害の拡大, 地球惑星科学連合大会2014年大会, 2014年4月28日~5月2日, パシフィコ横浜.

村上孝弥, 厚く堆積した浦安市沖積粘性土層における深度方向の物理・力学特性の違い, 第48回地盤工学研究発表会, 2013年7月23日~25日, 富山国際会議場.

中井健太郎, 浦安市の地盤から採取された沖積粘性土の力学特性の把握, 第47回地盤工学研究発表会, 2012年7月14日~16日, 八戸工業大学.

野田 利弘 (NODA, Toshihiro)

名古屋大学・減災連携研究センター・教授  
研究者番号: 80262872

村上 孝弥 (MURAKAMI, Takaya)

名古屋大学・大学院工学研究科・大学院生

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

中井 健太郎 (NAKAI, Kentaro)

名古屋大学・大学院工学研究科・准教授  
研究者番号: 60402484

(3) 連携研究者

浅岡 顕 (ASAOKA, Akira)

公益財団法人 地震予知総合研究振興会・  
副主席主任研究員

研究者番号: 50093175