

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 7 日現在

機関番号：10101

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2015

課題番号：26820190

研究課題名(和文)地震後も続く粘性土地盤の長期圧密沈下挙動の解明と構造物基礎への影響評価

研究課題名(英文)Elucidation of the long-term consolidation settlement behavior of soft clay after the earthquake and impact assessment on the structure foundation

研究代表者

磯部 公一(Isobe, Koichi)

北海道大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：70452084

交付決定額(研究期間全体):(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文):2007年の東日本大震災後に観測された柏崎市の地盤沈下は、地下水位の低下による沈下とは異なり、地下水位の変動とは相関のないことが明らかになっており、既往の研究の成果から、地震時に発生した過剰間隙水圧の長期消散挙動が主要因と結論付けていた。しかし、現地観測結果との整合性が十分でないことから、追加の現地調査により過剰間隙水圧の残留状況および粘性土の土質定数の連続的把握を行い、数値解析の精度向上および種々の条件に対する沈下挙動への影響を調査した。また、圧密沈下挙動の機構として、構造の低位化による圧縮軟化現象に着目し、繰返し三軸試験と遠心模型事件の成果を通じて、圧縮軟化現象発生の可能性を精査した。

研究成果の概要(英文):Subsidence in Kashiwazaki has been observed after the earthquake of 2007. Unlike subsidence due to drawdown of groundwater level, it has become clear that there is no correlation between the subsidence and the groundwater level. The previous research has been concluded that long-term dissipation behavior of excess pore water pressure (EPWP) occurred during the earthquake is the main factor. However, because it does not match with the observations, the addition field survey was conducted to explain the remaining conditions of EPWP and understand the continuous clay soil constants. It were used to improve the accuracy of the simulation and investigate the effect on settlement behavior under various conditions. As the mechanism, focusing on the compression softening phenomenon caused by loss of the structure, through the results of the cyclic triaxial test and centrifugal model tests, it was reviewing the possibility that compression softening phenomenon occurs.

研究分野：地盤工学

 キーワード：粘土の構造 不かく乱試料 残留間隙水圧 地震後圧密 繰返し三軸試験 遠心模型実験 土水連成FE
解析

1. 研究開始当初の背景

2007年に発生した新潟県中越沖地震では、柏崎平野において沖積粘性土地盤の長期圧密沈下が発生し、地震から7年が経過した現在もなお沈下が続いている。同様の事例は、古くは1978年の宮城県沖地震、1985年のメキシコ地震、1995年の兵庫県南部地震、そして2011年の東北地方太平洋沖地震においても観測例が報告されているが、実測データの蓄積は乏しく、定量的な評価に結び付く詳細な整理・分析には至っていない。地盤沈下は、盛土や直接基礎構造物では不同沈下を、杭基礎では負の摩擦力(ネガティブフリクション)を引き起こすため、構造物の設計あるいは地盤防災の観点からも、粘土地盤の地震時、地震後の変形挙動の評価は重要な課題である。

研究代表者は、これまでに長期沈下が観測された柏崎市内の地質構造を調査し、地盤材料の物理特性・力学特性の把握を行ってきた。それによると、N値が2以下の非常に軟弱な沖積粘性土層が40m以上も堆積し、自沈層も厚く分布するなど、未圧密あるいは比較的高位な構造を有する粘性土地盤で構成されていることを明らかにしている。これらの調査結果を基に、土の構成則に過圧密・構造・異方性の概念を導入した弾塑性構成式を用いる土水連成三次元弾塑性有限要素解析により、地震後の長期沈下挙動のメカニズムを表現するとともに、沈下量の予測を試みている。その結果、たとえ粘性土地盤であっても過剰間隙水圧が発生し、低い透水係数によりその消散に長時間を要すること、また構造の劣化がさらに圧密挙動を長期化させる可能性があることを示すに至っている。しかし、これまでの本研究では、(i)地盤の採取深さや、場所が特定の範囲でしか実施できていないため、数値解析では未採取深度の地盤を、採取した地盤が一樣に分布するものと仮定している。(ii)静的三軸試験で同定したパラメータでは動的三軸試験結果を定量的に再現できていない。(iii)粘性土地盤の間隙水圧の上昇が長期沈下を誘発したとの結論を導いているが、現地において間隙水圧の観測を実施できていない等の理由から確かな証拠に欠けるのが現状である。

一方、柏崎市では地盤沈下による構造物への影響は、地震後から現在に至るまで顕在化していない。しかし、粘性土の圧密沈下挙動は、盛土や直接基礎の不同沈下、大規模構造物を支える杭基礎へのネガティブフリクションの発生を誘発し、地震から数年経過後に人知れず構造物に損傷を与える可能性も考えられる。特に、地震時に変形、軽微な損傷を受けた杭基礎にとっては、健全時におけるネガティブフリクション作用の影響よりも厳しい負荷が発生する可能性が懸念される。また、昨今、その水平抵抗性の高さから軟弱地盤上での施工例も増えつつある斜杭基礎には、地震後の地盤の圧密沈下現象はより深

刻な問題となり得る。

さらに、柏崎市を含む中越地方は日本有数の豪雪地帯であり、地下水を有効利用した消雪パイプが道路上に張り巡らされ、降雪時の地下水の利用は地震後も盛んに行われている。このような冬季の地下水位の変動は、粘性土地盤の長期圧密沈下挙動を加速化あるいは長期化させる可能性も懸念される。以上のような現象は、東北地方太平洋沖地震の被災地においても十分に起こり得るため、早急な解明と対応が求められる。

2. 研究の目的

本研究では、粘土地盤の地震時、地震後の変形挙動を正しく評価し、地震後の粘性土地盤の長期沈下挙動メカニズムの明確化とともに、構造物基礎への影響度合いを定量的に評価することを目的とした。

- (1) 地震後長期沈下挙動の発生箇所における現地調査
- (2) 地震後長期沈下挙動を呈した粘性土地盤およびその周辺地盤の物理特性・力学特性の把握
- (3) 地震外力・地下水位低下による粘性土地盤の圧密沈下挙動の加速化・長期化現象の解明ならびに構造物基礎へ悪影響を与える条件の明確化
- (4) 土水連成弾塑性有限要素解析による地震後長期沈下挙動の予測精度の向上

3. 研究の方法

- (1) 地震後長期沈下挙動の発生箇所における現地調査
 - ・事前解析で示された粘性土地盤の間隙水圧の上昇現象を現地調査で追跡確認した。
 - ・粘性土地盤の間隙水圧の上昇が確認された粘性土地盤層の不攪乱試料の採取を行った。
- (2) 地震後長期沈下挙動を呈した粘性土地盤およびその周辺地盤の物理特性・力学特性の把握
 - ・(1)で採取した不攪乱試料の物理特性、不攪乱・再構成試料の圧密特性、静/動的せん断特性の把握を行った。
 - ・(3)の遠心模型実験で使用しやすい地盤材料の選定、ならびにその物理・力学特性の把握を行った。
- (3) 地震外力・地下水位低下による粘性土地盤の圧密沈下挙動の加速化・長期化現象の解明ならびに構造物基礎へ悪影響を与える条件の明確化
 - ・地震外力による粘性土地盤の間隙水圧の上昇現象を遠心模型実験において再現を試みた。
 - ・地震による変形を受けた直接基礎に対する周辺地盤の長期沈下挙動が及ぼす影響把握を行った。
- (4) 土水連成弾塑性有限要素解析による地震後長期沈下挙動の予測精度の向上
 - ・地震動の影響、中間排水層の有無、軟弱粘

性土地盤の層厚と深さの影響など種々の解析条件を変化させ、対象地域の長期沈下挙動を精度よく予測するとともに、粘性土地盤の地震後の長期沈下に対する新たな危険性を明確にした。

4. 研究成果

追加の現地調査とそれに基づく数値解析の高精度化および各種パラメトリックスタディーによる主要な成果は以下の通りである。

- 1) 深度 4, 15 m に設置した間隙水圧計の観測結果によると、間隙水圧の残留は認められず、既に消散していることが明らかになった。
- 2) 深度 4 m 地点は冬季に水圧比が 0.3 程度となっており、冬季の地下水利用による地下水位の変動が原因と考えられるが、地震が発生した夏季には消散していたものと推察される。
- 3) 季節による間隙水圧の変動を確認できることから、同様の条件を有する地域では地震時挙動に対し季節性があると考えられる。
- 4) 追加現地調査に基づき土質パラメータを充足し数値解析の高精度化に努めたが、数値解析では過剰間隙水圧の残留が現れ、現地調査結果との乖離が見られた。
- 5) 上記 4) の結果を受け、中間排水層（砂層）の存在を考慮した結果、残留過剰間隙水圧は見られず、現地調査結果と整合する結果となった。また、地盤収縮量も現地調査結果と整合する結果を得られた。
- 6) 中間排水層（砂層）の存在を考慮すると、浅い層（23 m 以浅）では比較的早い時期（1 年程度）で地盤の収縮が終了したが、深い層（23 m 以深）では過剰間隙水圧の消散に長時間を要することが分かった。
- 7) 6) および 7) の結果より、過剰間隙水圧、23 m までの地層の地盤収縮量、地表面沈下量の 3 つの観点から合理的な解を得られるに至った。
- 8) 地震動により粘性土地盤の構造の低位化が発生し、上載圧に耐えられなくなった深層部の粘性土が圧密した事により沈下するメカニズムを明らかにした。

次に、長期圧密沈下挙動のメカニズムを詳細に検証するために、「土の構造の低位下」による圧縮軟化現象に着目し、構造を有する飽和粘性土（オリン粘土に微量のセメントを混合し養生した人工粘土）の繰返しせん断挙動を非排水繰返し三軸試験および遠心模型実験により把握した。以下に主要な成果をまとめる。

- 9) 構造を有する粘性土は、初期剛性が高く液状化強度も大きくなるが、ある閾値以上の大きなせん断応力履歴が加わると、せん断ひずみが急激に進展する脆性的な挙動を示す。特に、その傾向は過剰間隙

水圧の発生挙動において顕著であり、繰返しせん断による構造の低位化が主たる原因と考えられる。

- 10) 粘性土地盤は砂質地盤と比較して透水係数が小さいため、繰返しせん断後の再圧密過程において圧密排水が収束するまでに長時間を要するが、構造を有する粘性土は、「土の構造の低位下」による圧縮軟化現象により、さらに長期化することが確認された。
- 11) 圧密係数 c_v に関しても構造が高位な粘性土地盤は低い圧密係数を示すことが確認された。
- 12) 構造を有する粘性土は、構造のない粘性土と比べて動的圧縮指数が大きい。また、動的圧縮指数は、構造の程度（せん断前の初期間隙比の大きさ）や累積せん断ひずみ量と相関が高い。
- 13) 上記 9)～12) の結果より、構造を有する粘性土地盤は構造の低位な粘性土地盤に比べて、地震後の沈下被害が深刻化するとともに、長期化する可能性が示された。また、構造の程度と動的圧縮指数および圧密係数との相関性から、簡便に地震後の長期圧密沈下量、沈下時間を予測できる可能性を示した。

5. 主な発表論文等

（研究代表者連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計 1 件）

- 1) Isobe, K., Ohtsuka, S. and Nunokawa, H.: Field investigation and model tests on differential settlement of houses due to liquefaction in the Niigata-ken Chuetsu-Okai Earthquake of 2007, *Soils and Foundations*, 54(4): 675-686, 2014. (査読有)

〔学会発表〕（計 9 件）

- 1) 金田陽樹, 北田宗一郎, 磯部公一, 大塚悟: 柏崎平野の中越沖地震後の地盤沈下発生メカニズムに関する基礎的研究, 第 51 回地盤工学研究発表会, 岡山大学 (岡山市), 2016 年 9 月 13 日.
- 2) 畑中佑太, 西間友洸, 磯部公一: 繰返しせん断履歴を受けた構造を有する粘土の体積圧縮挙動の評価, 第 51 回地盤工学研究発表会, 岡山大学 (岡山市), 2016 年 9 月 13 日.
- 3) 畑中佑太, 西間友洸, 磯部公一: 構造を有する粘土の繰返しせん断履歴による体積圧縮挙動, 第 51 回土木学会年次学術講演会, 東北大学 (仙台市), 2016 年 9 月 7 日.
- 4) 西間友洸, 畑中佑太, 磯部公一: 遠心模型実験を用いた高位構造粘土地盤の地震後圧密沈下挙動の解明, 第 51 回土木学会年次学術講演会, 東北大学 (仙台市), 2016 年 9 月 7 日.
- 5) 西間友洸, 畑中佑太, 磯部公一: 高位構

造粘土地盤の地震後圧密沈下に関する遠心模型実験，地盤工学会北海道支部技術報告集，第 56 号，pp.219-226，寒地土木研究所（札幌市），2016 年 1 月 29 日。

- 6) 畑中佑太，西間友洸，磯部公一：繰返しせん断履歴を受けた構造を有する粘土の体積圧縮挙動の評価，地盤工学会北海道支部技術報告集，第 56 号，pp.213-218，寒地土木研究所（札幌市），2016 年 1 月 29 日。
- 7) 西間友洸，菊地侑希，磯部公一：地震後長期圧密沈下予測のための構造を有する粘性土地盤の繰返しせん断挙動の把握，第 50 回地盤工学研究発表会，pp.411-412，北海道科学大学（札幌市），2015 年 9 月 3 日。（第 50 回地盤工学研究発表会優秀論文発表者賞）
- 8) 北田宗一郎，大塚悟，磯部公一：柏崎市における地震後長期沈下の検討，第 32 回土木学会関東支部新潟会研究調査発表会，ハイブ長岡（長岡市），2014 年 11 月 5 日。（査読無）
- 9) 磯部公一，大塚悟，高原利幸：地震後も続く粘性土地盤の長期圧密沈下挙動の解明，地盤工学会特別シンポジウム，東京電機大学（東京都），2014 年 5 月 14 日。（査読無）

6. 研究組織

(1) 研究代表者

磯部 公一 (ISOBE KOICHI)

北海道大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号：70452084

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：