

Health problems caused by liquefaction-induced inclination of houses and its mitigation

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2020-01-09 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/2297/00056511

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 3.0 International License.



学位論文要旨

液状化に伴う住宅傾斜による 健康障害とその軽減対策

*Health problems caused by liquefaction-induced inclination
of houses and its mitigation*

金沢大学大学院 自然科学研究科 環境デザイン学専攻

芹川 由布子

Abstract

Many serious damages such as liquefaction and collapse of houses occurred by the 2018 Hokkaido Iburi-tobu Earthquake and 2016 Kumamoto Earthquake in Japan. Field investigation and inspection were conducted to study an effect of inclination of the house due to liquefaction on health problems of the residents. The outerwall inclination angle of houses in liquefied sites of Kumamoto City and Sapporo City were measured. Based on the measurements, the degree of inclination is seem to be related to subsidence in the surrounding area. In addition, a questionnaire survey was conducted about one month after the earthquake. The results of this survey revealed the actual condition of inhabitant's health problems due to inclined houses induced by liquefaction.

In this research, small-scale shaking table tests were carried out to propose how to apply the technique of log piling around existing residential house. It was revealed that liquefaction was suppressed by piling logs, and the settlement and inclination of the structural model were reduced.

1. はじめに

地震時に発生する液状化現状による被害は、都市化が進むとともに拡大している。2011年東北地方太平洋沖地震が発生した際には、このような液状化現象が数多く報告された。この地震による液状化現象は主に関東地方、特に千葉県のパ安市や幕張などの埋立地で発生し、東京湾岸部の戸建て住宅の液状化被害は約18,000棟にものぼった。そのため、戸建住宅に対する液状化対策工法の開発が急速に推し進められるようになった。

しかしながら、その多くは新設の戸建住宅に対する工法であり、既設の戸建住宅に対する対策工法は確立されたものが多いとはいえない現状である。液状化による住宅被害を軽減させるためには住宅一軒一軒に対する液状化対策工法が望ましいと考えられる。そのため、本研究では既設戸建住宅一軒を対象とする液状化対策工法の開発に着目する。

2. 液状化による住宅の傾斜被害

2016年熊本地震および2018年北海道胆振東部地震での液状化発生地である、熊本県熊本市の東区・南区，北海道札幌市清田区を調査対象地とし，家屋の傾斜方向と傾斜角度を測定した．微地形区分や過去の液状化履歴，地形復元図から読み取った旧地形と被害地点を比較し，液状化の発生要因について考察した．2章では，これらの調査結果を地図上に示し，家屋の傾斜被害の傾向を明らかにしている．

2.1 2016年熊本地震による住宅の液状化被害

熊本市の南区白川の南方に位置する近見・刈草地区では，液状化被害が南北方向へ帯状に分布していた．この液状化の帯は日吉小学校周辺で，長さ 5km，幅 50～100m と広範囲に渡っており，地盤沈下や噴砂などの被害が発生した．そのため本研究では，大量の噴砂が確認された旧鹿児島街道に沿って調査を行った．

図-1 に近見地区における家屋の外壁傾斜量計測結果を示す．ここでは，傾斜の大きな家屋が隣接しているという傾向がみられた．傾斜方向については，図の右下方向（南東）への傾斜が目立っていた．A～D 棟については周辺の戸建住宅に比べ，建物の高さが高く，傾斜や破損が目立っていた．B 棟と C 棟については互いに引き寄せあうように北東方向，南東方向に傾斜していた．この 2 棟について，質量のバランスは外観からは明らかでないが，建物の形状が直方体であったため不均一ではないと推測される．どちらも家屋の後方にあたる東方向への傾斜が大きく噴砂も確認されたため，後方部の沈下によりこのような傾斜被害が生じたと考えられる．D 棟については北側の壁部材が破壊しており，そのため傾斜量が大きく現れたと考えられる．

図-2 に刈草地区における家屋の外壁傾斜量計測結果を示す．近見地区と同様，東側への傾斜が多くみられた．最も大きく傾斜していた建物は B 棟であり，これは 1 階建てであった．目立った壁面や部材の損傷はなかったが，建物の周りに大量の噴砂の跡が残っていた．A，C，D 棟についてはいずれも東側に傾斜している．刈草地区には木造住宅が多く存在していたが，傾斜や損壊といった被害が発生していない家屋も多く見うけられた．これより，微地形区分だけでなく，地盤の硬軟や地中の液状化層の分布にも着目し液状化による建物の傾斜被害について考察していくべきだといえる．

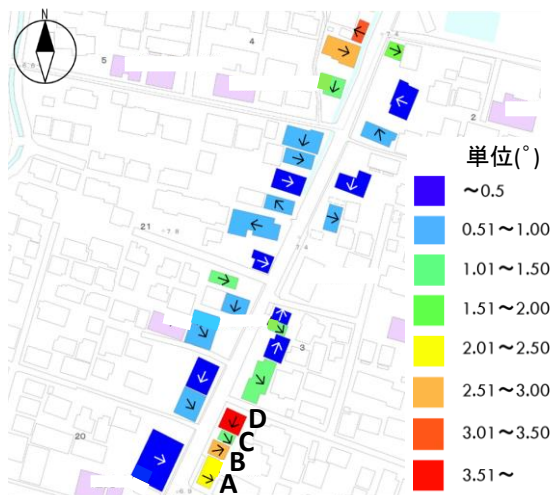


図-1 近見の外壁傾斜量計測結果

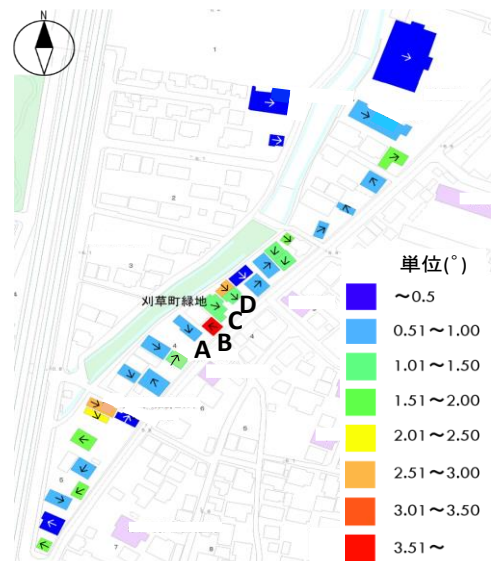


図-2 刈草の外壁傾斜量計測結果

2.2 2018 年北海道胆振東部地震による住宅の液状化被害

札幌市清田区美しが丘一条，三条で計 57 棟の傾斜量を測定した．図-3 に家屋の外壁傾斜量の測定結果を示す．図より，大きく傾斜している家屋は隣接しており，そのような家屋は同じ方向に傾斜している傾向がある．道路が大きく沈下していた箇所では，その沈下部方向に家屋が傾斜していることが明らかとなった．家屋 A，B の間にある公園（美しが丘すみれ公園）は噴砂が大量に発生しており，立ち入り禁止となっていた．家屋 A～C および道路を挟んだ向かいの家屋のほとんどが，陥没した道路の方向に大きく傾斜していた．大通り沿いの傾斜の大きい家屋 D～G はほぼ同じ構造形式であり，築年数も約 29 年と同じであった．D，E は北，F，G は西の方向に傾斜しており，家屋前面と歩道の境界部で噴砂が生じていた．また，9 月 11 日時点で，これらの家屋は大規模半壊という被害認定を受けていた．美しが丘三条の家屋 J の外壁傾斜量は 2.58° (45/1000) で，調査対象家屋の中では最も大きい傾斜量であった．2 番目に大きい傾斜量の家屋は H で東方向に 2.40° (42/1000) 傾斜していた．J は南東方向，I は南西方向にどちらも前面の道路に向かって傾斜していた．

今回の調査対象地は山地や台地（段丘面）を侵食する谷部の地形を宅地造成した地域であり，家屋の傾斜被害はこのような旧谷部付近で，谷埋め盛土した箇所が液状化したと考えられる．これらの結果から，液状化による家屋の傾斜被害は旧地形と大きく関わっていることが明らかとなった．

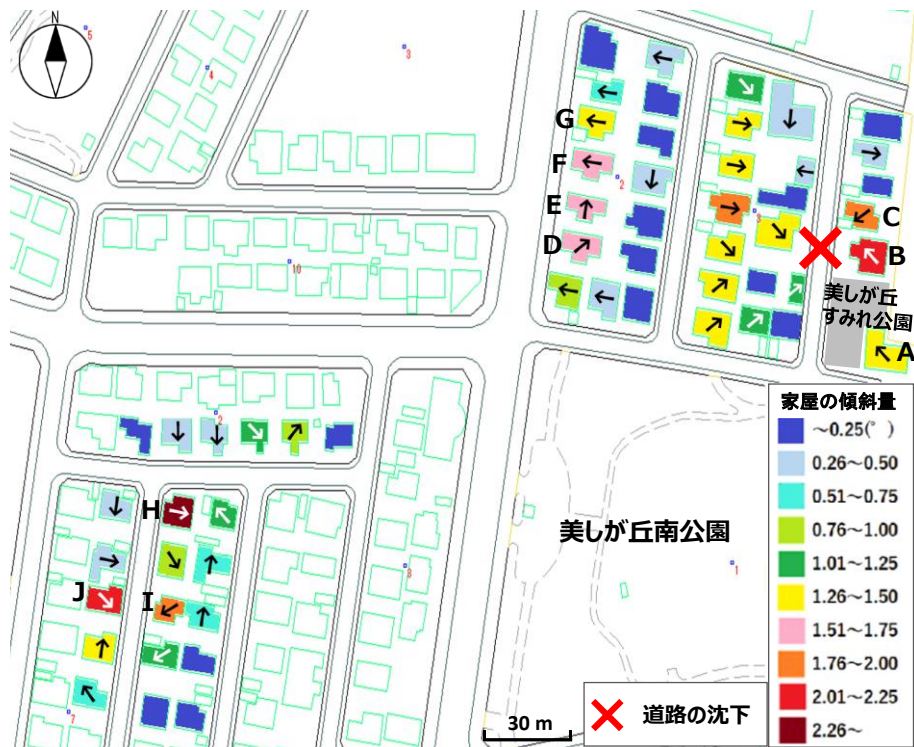


図-3 美しが丘の外壁傾斜量計測結果

3. 住宅傾斜による地震後の健康障害

液状化により傾斜した家屋に住み続けていることで、住人に健康障害が発生している事例が数多く報告されている。本研究では、前項と同様に、2016年熊本地震と2018年北海道胆振東部地震の液状化発生地域を対象とし、健康障害に関するアンケート調査を実施した。

図-4 に北海道胆振東部地震・熊本地震における症状ごとの健康障害発生人数を示す。両者とも最も多かった症状はふらふら感であり、次いで疲労感が多かった。牽引感・頭痛・めまいといった症状が多い点などの傾向も同じであり、これらの症状は液状化による傾斜が原因で発症していると考えられる。また、外壁傾斜量が 0.30° (5/1000) を超える家屋に住んでいる場合の健康障害発症率は、熊本地震で約 79%，北海道胆振東部地震で約 73%であった。また、北海道の被害は、熊本に比べ床傾斜量が大きく、家屋内部と外部の傾斜量の相関が高いことが特徴として挙げられる。一体的に家屋が傾斜しているため、室内のどこにいても常に傾斜を感じ、健康障害発症の要因となったと考えられる。

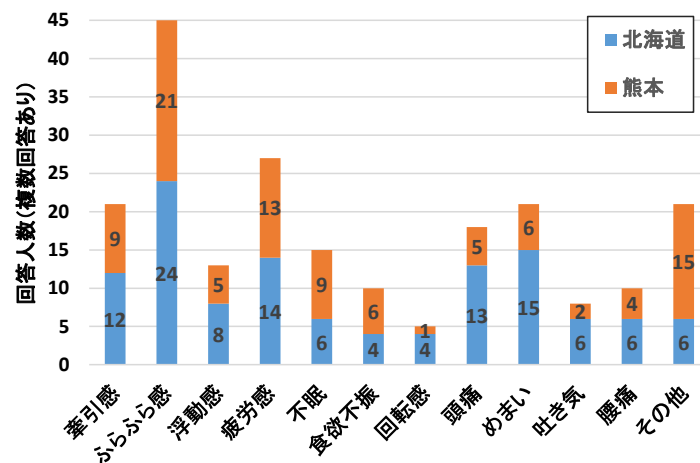


図-4 北海道胆振東部地震・熊本地震における症状ごとの健康障害発生人数

4. 住宅を対象とした液状化対策工法に関する実験

住宅に適応可能な液状化対策工法開発のために、理論値算出による効果の評価および実験的検討を行う。本研究では、特殊な不連続オーガースクリューを用いた削孔による地盤の改良効果に加え、丸太打設による密度増大効果が見込まれる工法を提案している。不連続オーガースクリューは掘削時の排出土砂を孔壁に押しつけながら削孔することが可能であり、地盤密度の増加が見込まれる。オーガースクリュー模型を用いた実験では、掘削後の地盤の改良度をコーン貫入試験より算出し改良効果を評価する。

丸太打設の効果については模型振動実験により、無対策地盤と構造物の周囲に丸太を打設した対策地盤での比較検討を行い、構造物の沈下量や傾斜量、過剰間隙水圧を計測することで液状化対策効果を評価する。オーガースクリューによる先行掘削を行った後に丸太を打設することで、地盤の密度増大効果に加え過剰間隙水圧の抑制効果が見込まれる。

4.1 不連続オーガースクリューを用いた提案工法

本研究で検討する工法は、図-5 に示す圧縮翼付きの特殊な不連続オーガースクリューを用いて、本来なら地上に排出される土砂をわずかに抑え、孔壁を強固な状態に改良しながら削孔を行う工法である。

新潟県新潟市北区において、不連続オーガースクリューを用いて削孔を行い、オーガースクリュー貫入による周辺地盤の改良効果についての検討を行う。本

工法で用いる施工機を示す。オーガースクリューの全長は 5.0m であり、直径が 55cm (中心直径は 26.7cm) である。スウェーデン式サウンディング試験 (以下、SWS 試験とする) を施工前後で行い、得られた結果より換算 N 値を求める。測定は、掘削後の孔壁から 50cm, 75cm, 100cm の地点で行った。

SWS 試験の結果より算出した換算 N 値を図-6 に示す。この図に示す掘削前の換算 N 値は、掘削地点で SWS 試験を行い得られた値である。掘削前後の換算 N 値を比較すると、深さ約 3m 程度の地盤では減少していることがわかる。削孔位置に近い孔壁から 50cm 地点での換算 N 値が最も減少していることから、表層地盤の孔壁付近ではオーガースクリュー貫入時の攪拌により地盤が乱され、換算 N 値が減少したと考えられる。深さ約 4m では、50cm と 75cm 地点での換算 N 値が増加していることがわかる。深さ約 5m では 50cm 地点での換算 N 値が大きく増加しており、空洞拡張による地盤の密度増加効果が得られたと考えられる。

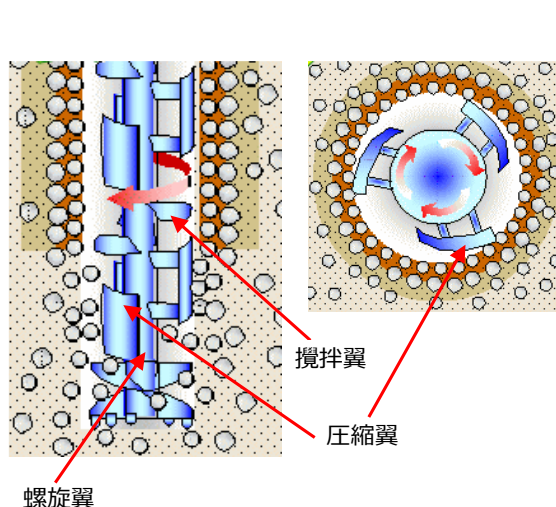


図-5 不連続オーガースクリューの概要図

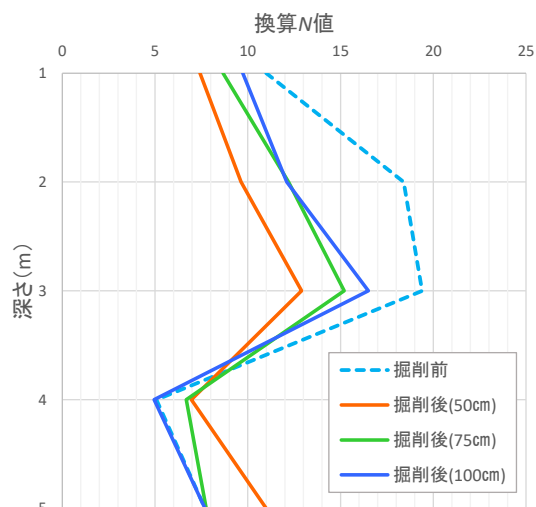


図-6 掘削前後の N 値の変化

4.2 丸太を用いた住宅に対する液状化対策工法

不連続オーガースクリューによる削孔後に、丸太の打設を行うことで地盤密度の増加が見込まれる。対策効果の評価のために室内模型振動実験を行う。図-7 に実験装置の概要を示す。

実験は、無対策、丸太 1 列配置、丸太 2 列配置、丸太 1 列配置 + 構造物連結の 4 ケースを想定し、過剰間隙水圧の変動、構造物模型の沈下量および傾斜量の測定結果をもとに、対策効果の評価を行った。図-8 に各ケースにおける構造

物の沈下量を示す．沈下量については大きい順に，無対策，丸太 1 列配置，丸太 2 列配置，丸太 1 列配置＋構造物連結となった．無対策と丸太 1 列配置は，過剰間隙水圧の値では差がほとんどなかったが沈下量は抑制されていることがわかる．相対密度の増加量は 9%と 18%であったことから，構造物周辺地盤の締固め効果により沈下量が抑制されたと考えられる．また，丸太 1 列配置と丸太 1 列配置＋構造物連結の相対密度の増加量が同じであったことから，丸太を構造物に固定することに関しては締固め効果はなく，連結させることで丸太の移動が生じず，より沈下量が抑制されたと考えられる．今回の実験ケースでは丸太 1 列配置＋構造物連結の沈下量が最も小さく，水圧上昇の抑制効果，締固めによる密度増大効果が最も大きいケースは丸太 2 列配置であることがわかった．

沈下に伴う傾斜については，加振方向に大きく傾斜する結果となった．無対策と丸太 1 列配置では約 10° の傾斜となり，丸太打設による不同沈下の抑制効果はみられなかった．丸太 2 列配置では 0.5° となり，1 列配置に比べると傾斜量が小さく，ほとんど傾斜していない結果となった．丸太 1 列＋構造物連結では加振前後で構造物模型の傾斜がほとんどなかった．これより，周囲打設の場合は丸太と構造物を一体とすることで不同沈下は抑制されることが明らかとなった．

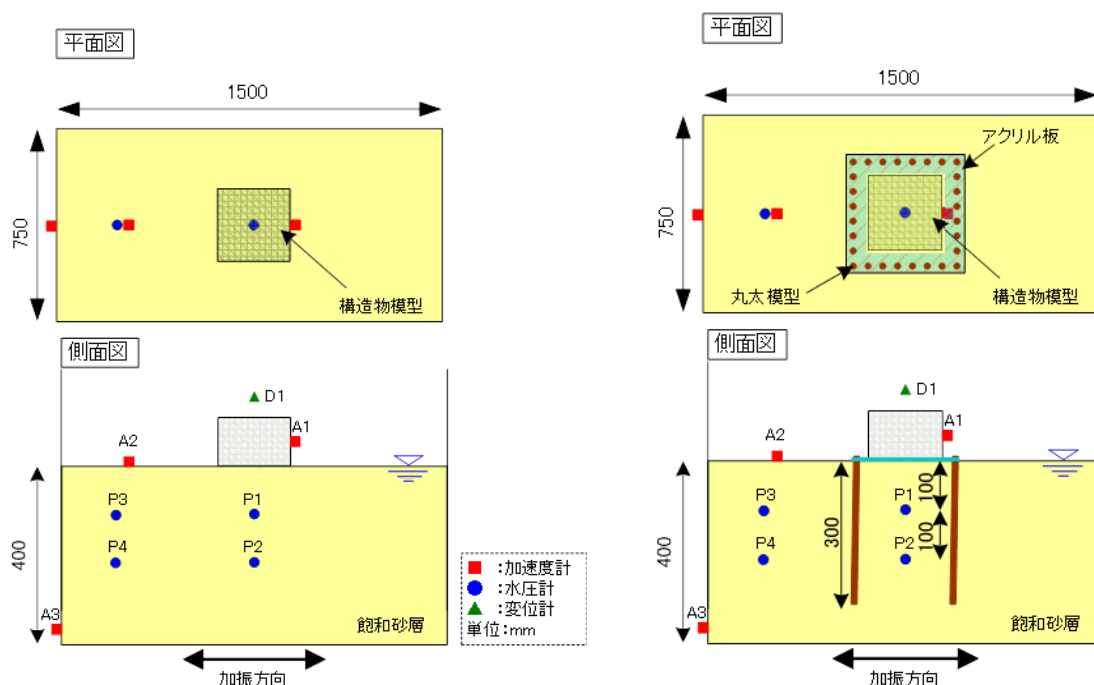


図-7 実験概要図（左：無対策，右：丸太 1 列＋構造物連結）

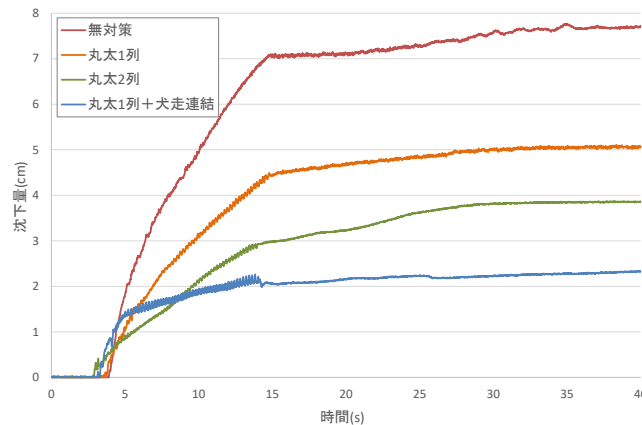


図-8 各ケースにおける構造物の沈下量

5. まとめ

本研究では液状化による家屋の傾斜被害把握のために、地震後に現地調査を行い、家屋の外壁傾斜量および家屋内部の傾斜量を計測した。この現地調査では、熊本市 68 棟、札幌市 57 棟の計 125 棟の家屋の傾斜を測定し、傾斜の最大値と傾斜方向を地図上に示した。東区近見・刈草では道路脇や家屋の周りに噴砂の跡が多く残っていた。水路の存在も確認されており、この地域の液状化の帯は北から南に向かう水脈により発生したと考えられる。これらの被害が発生していたことから、調査対象地における地盤のボーリングデータをもとに行った液状化危険度判定の「液状化の危険性が高い」という判定結果と被害状況はおおよそ一致していたといえる。札幌市では、地形復元図から読み取った旧谷部に位置する箇所で大規模な液状化被害が発生していることが明らかとなった。

熊本市および札幌市の同地域において、傾斜している家屋に住んでいる場合に発症する健康障害についてのアンケート調査を実施した。外壁傾斜量が 0.30° ($5/1000$) を超える家屋に住んでいる場合の健康障害発症率は、熊本地震で約 79%、北海道胆振東部地震で約 73% であり、両者とも 7 割を超える結果となった。最も多かった症状はふらふら感であり、次いで疲労感が多かった。牽引感・頭痛・めまいといった症状が多い点などの傾向も同じであり、これらの症状は液状化による傾斜が原因で発症していると考えられる。また、健康障害発症の指標となっている「外壁傾斜量 0.6° 以下」の傾斜量の場合でも健康障害は生じており、さらに、外壁傾斜量と家屋内部の傾斜量が一致していない家屋も多く存在した。本研究の調査では、床の傾斜が大きい場合に健康障害を発症している確率が高いことが明らかになった。これより、傾斜を視覚で感じるよりも身体でとらえる方が健康障害に繋がると考えられる。約 1.8° ($32/1000$) の傾斜では住人の居住は困難となり、引っ越しを行っているケースも多く存在した。これより、住宅と

しての使用性や機能性の損失にも繋がる住宅の不同沈下は、深刻な問題であると考えられる。このような住宅の液状化被害を軽減させるためには住宅一軒一軒に対する液状化対策工法が必要であると考え、既設の戸建住宅一軒を対象とする液状化対策工法の開発に着目した。

既設戸建住宅に適応可能な液状化対策工法開発のために、理論値算出による対策効果の評価および実験的検討を行う。本研究では、特殊な不連続オーガースクリューを用いた削孔による地盤の改良効果に加え、丸太打設による密度増大効果が見込まれる工法を提案している。不連続オーガースクリューは掘削時の排出土砂を孔壁に押しつけながら削孔することが可能であり、地盤密度の増加が見込まれる。不連続オーガースクリュー模型を用いた実験では、掘削後の地盤の改良度をコーン貫入試験より算出し改良効果を評価した。掘削時の改良効果は、空洞拡張理論を用いて N 値の増加量をもとに算出する。理論値の算出結果から PL 値の増加が見込まれ、不連続オーガースクリューによる削孔により液状化危険度が低くなるということが理論的に示せた。

丸太打設の効果については、模型振動実験により無対策地盤と構造物の周囲に丸太を打設した対策地盤での比較検討を行い、構造物の沈下量や傾斜量、過剰間隙水圧を計測することで液状化対策効果を評価した。丸太打設を行った 3 ケースでは無対策に比べて沈下量を抑制する効果があることが明らかとなり、構造物直下の丸太に囲まれた領域では周辺の自由地盤に比べ水圧上昇の抑制効果が得られた。沈下に伴う傾斜については、加振方向に大きく傾斜する結果となった。無対策と丸太 1 列配置では約 10° ($180/1000$) の傾斜となり、丸太打設による不同沈下の抑制効果はみられなかった。丸太 2 列配置では 0.5° ($9/1000$) となり、1 列配置に比べると傾斜量が小さく、ほとんど傾斜していない結果となった。丸太 1 列+構造物連結では加振前後で構造物模型の傾斜がほとんどなかった。これより、周囲打設の場合は丸太と構造物を一体とすることで不同沈下は抑制されることが明らかとなった。

これらの結果より、不連続オーガースクリューによる掘削および丸太打設は、それぞれが地盤改良効果を有しており、液状化対策として有効であることが明らかとなった。

学位論文審査報告書（甲）

1. 学位論文題目（外国語の場合は和訳を付けること。）

液状化に伴う住宅傾斜による健康障害とその軽減対策

2. 論文提出者 (1) 所 属 環境デザイン学 専攻

(2) 氏 名 芹川 由布子

3. 審査結果の要旨（600～650字）

本学位申請論文に関し、第1回審査委員会を開催し審査方法を決定するとともに、論文の内容について検討した。さらに令和元年8月7日に行われた口頭発表後に第2回審査委員会を開き、協議の結果、以下のように判定した。

本研究は、液状化による住宅の傾斜が住民の健康障害に及ぼす影響を、2016年熊本地震、2018年北海道胆振東部地震後の現地調査を通して明らかにするとともに、液状化による住宅の傾斜を軽減するために、既存住宅一軒一軒を対象とした液状化対策工法に関する実験的研究を行ったものである。まず現地調査より、外壁傾斜量が 0.3° を超える家屋に住んでいる場合の健康障害発症率が7割を超えていることを明らかにした。この値は健康障害発症の指標となっている 0.6° よりもかなり小さい値である。さらに、既存住宅の液状化対策として、環境にもやさしい丸太打設工法に着目し、住宅を取り囲むように1列に打設する場合、2列に打設する場合、1列で住宅に連結する場合について模型実験を実施し、住宅に連結することで住宅の不等沈下が抑制されることを明らかにした。

以上の研究成果は、住民の健康障害を指標として液状化対策効果を検討することを提案しており、工学的価値が極めて高いと認められることから、本委員会は本論文が博士（工学）に値すると判定した。

4. 審査結果 (1) 判 定（いずれかに○印） 合 格 ・ 不合格

(2) 授与学位 博 士（工 学）

5. 学位論文及び参考論文に不適切な引用や剽窃が無いことの確認

■ 確認済み（確認方法：iThenticateによるチェックと、審査員による確認）

未 確 認（理 由：）