

既設戸建住宅を対象とした丸太を用いた 液状化対策工法に関する基礎的研究

芹川 由布子¹・吉田 雅穂²・宮島 昌克³

¹学生会員 金沢大学大学院自然科学研究科 博士前期課程 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)

E-mail:bunka.h22@gmail.com

²正会員 福井工業高等専門学校教授 環境都市工学科 (〒916-8507 福井県鯖江市下司町)

E-mail:masaho@fukui-nct.ac.jp

³正会員 金沢大学教授 理工研究域環境デザイン学系 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)

E-mail:miyajima@se.kanazawa-u.ac.jp

2011年東日本大震災では埋立地等の戸建住宅に液状化被害が多発し、その数は計2万7千棟を数える。これらの被害を受け、地震による液状化被害は深刻な問題となり、今後の安全な宅地供給を期待するとともに、液状化対策コストの低廉化を進めることが求められている。著者らは、間伐丸太を液状化対策に利用することを提案しており、より実用的な工法の考案に繋げるため、戸建住宅を対象とした液状化対策工法の需要と費用対効果を明らかにするための一般市民を対象としたアンケート調査を行った。また、既設構造物の液状化対策工法として構造物周辺地盤に丸太を打設する工法に着目した。浦安市で提案された格子状改良工法を比較対象として、構造物周辺地盤に丸太を打設する方法の有効性について模型振動実験による検討を行った。

Keywords : earthquake, liquefaction, countermeasure, log, shaking table test, residential house

1. はじめに

2011年東日本大震災では、東京湾沿岸部や利根川流域において甚大な液状化被害が発生した。戸建住宅の沈下や傾斜の被害は甚大であり、その数は計2万7千棟を数える。これを受けて国土交通省は、平成25年3月に「宅地の液状化被害可能性判定に係る技術指針(案)」を公表し、今後の安全な宅地供給を期待するとともに、液状化対策コストの低廉化を進めることを求めている。現在は、多くの企業および研究機関が新設ならびに既設の戸建住宅に対する液状化対策工法の開発に取り組んでいる^{例えば1) 2) 3)}。

著者らは丸太を液状化対策に利用することを提案しており、構造物の基礎直下に丸太を打設することで液状化による沈下を抑制できること⁴⁾、既設構造物に対しては構造物周辺地盤に打設することで、沈下抑制効果が得られることを確認している⁵⁾。ここで、木材を建設資材として使用する場合、腐朽や虫害による材質劣化が懸念されるが、液状化が問題となる地盤は地下水位以深が対象となるためその心配がない。また、木材利用は地球温暖化緩和や森林事業活性化に貢献する付加価値を有してお

り、さらに、林野庁が平成25年4月より開始した木材利用ポイント事業では、丸太を用いた地盤補強材の使用も対象となり、本工法の技術向上と低廉化を早急に推し進めることが求められている。戸建住宅のような小規模建築物の液状化対策工法としては、杭状地盤補強や杭基礎、矢板壁、浅層混合処理などが提案されている。丸太を打設する方法は、実地盤で施工方法の検証を行い、対策後の地盤調査により液状化対策としての有効性の検討はされているが⁶⁾、既設構造物に対する対策は非常に困難であり、新設であっても経済的な理由で対策が行われない場合が多い。

そこで本研究では、一般市民を対象としたアンケート調査を行い、液状化対策の需要や工費に関する意識調査を行った。つぎに、既設構造物の液状化対策工法の一つとして提案されている格子状改良工法を比較対象とし、構造物周辺地盤に丸太を打設する方法の有効性を模型振動実験により検討した。さらに、丸太の打設方法として、地盤に斜めに打設する方法と丸太の頭部を固定する方法を提案し、模型振動実験によりその有効性を検討した。

2. アンケート調査

(1) 調査概要

戸建住宅に住む人々の地震防災や液状化対策に関する意識を調査し、今後の液状化対策の需要や工費の妥当性を明らかにすることを目的としてアンケート調査を行った。調査対象は、福井工業高等専門学校に在籍する学生 973 人の保護者である。回収数は 467 件であり回収率 48%となった。

(2) 調査結果

図-1 に液状化の特徴に関する認識度の調査結果を示す。液状化の発生条件として、軟弱な砂地盤で発生すること、また、液状化すると地表に泥水が噴き出てくる、構造物が沈下するなどの被害が発生するという認識度は高いことがうかがえる。一方で、地下水位より深い地盤で発生することは約 8 割が知らなかったと答えた。この結果より、液状化という現象はほぼ全員が知っているが、地下水が液状化を引き起こす重要な因子であることの認識は低いといえる。なお、別項目の質問「地震時に発生する液状化現象という言葉聞いたことがありますか」という問では、全員がはいと回答していた。

また、液状化に伴う現象として、「e：地上にある重い構造物では沈下や傾斜の被害が発生する」や「f：地下にある軽い構造物では浮上の被害が発生する」という被害形態の認識度も高かった。これらの結果は、「g：平成 23 年東日本大震災では千葉県浦安市等で液状化による住宅の沈下等の被害が多数発生した」という問についての認識度と調和的であり、東日本大震災において甚大な液状化被害が発生し、そのことが各メディアで頻繁に取り上げられた影響と考えられる。一方で、「h：昭和 23 年福井震災では福井平野の広い地域で液状化が発生した」という問では、知っているという回答が約 1 割と非常に少ない結果となった。現在は福井地震から 60 年以上経過しており、回答者の 9 割が 30～50 歳代ということとを考慮すると妥当な結果かもしれない。なお、別項目の質問「昭和 23 年に福井平野を震源とする福井地震が発生したことを知っていますか」という問に対しては 9 割が知っていると回答した。地元の被害地震ではあるが、被害状況に関する認識度は非常に低いと推測できる。一方、「東日本大震災を経て住宅の地震対策への関心が高まったか」という問では、約 8 割が高まったと回答し、人々の地震対策への関心は震災以降非常に高まっているといえる。

図-2 に液状化対策に関する調査結果を示す。「a：現在の住まいを建設した時、住宅の基礎地盤に地盤補強をしたか」という質問では、行っていないという回答が約半数であった。地盤補強を行っていた約 2 割の回答者

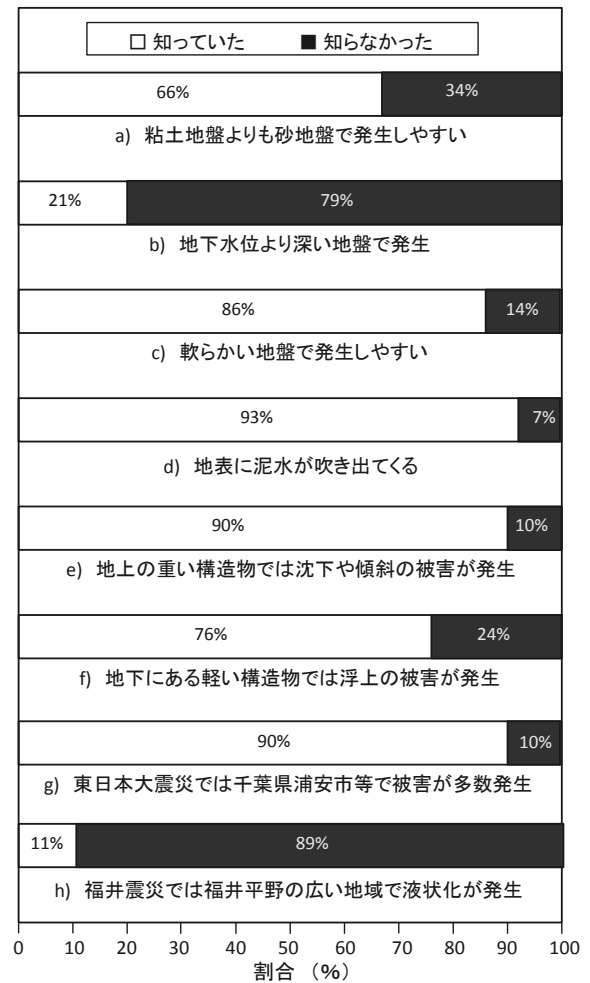


図-1 液状化の特徴に関する認識度

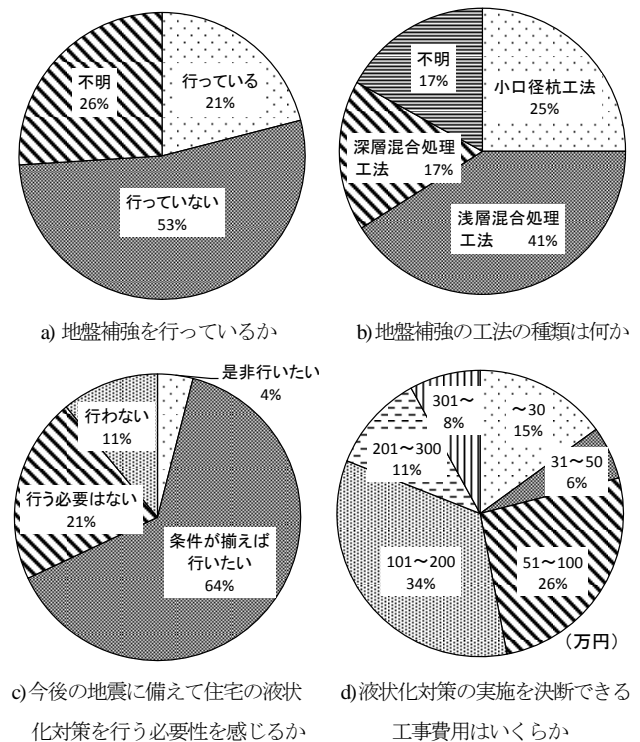


図-2 液状化対策に関する調査

に工法の種類を質問したところ、浅層混合処理工法が約4割と最も多く、次いで小口径杭工法、深層混合処理工法の順であり、木杭も含まれる小口径杭工法の採用率は低かった。「c: 今後の地震に備えて住宅の液状化対策を行う必要性を感じるか」という質問では、条件が揃えば行いたいという回答が約6割であり、条件として最も多かったのは経済的余裕であった。また、行う必要はないという回答の理由としては、既に対策済みであるから、住んでいる地域は液状化の心配はないからという2つの意見であった。「d: 液状化対策の実施を決断できる工事費用はいくらか」という質問では、「一般的な新築の戸建住宅に軟弱地盤対策を行う場合、地盤の善し悪しや面積の大きさで変わるが、その費用は数10万円～数100万円程度」との注釈を入れたため、その額に応じた回答が多かったと思われる。平均額は115万円であるが、200万円未満が8割を占めるため、200万円を超えないことが戸建住宅の液状化対策を促進させる工費目標の1つの目安になると考えられる。また、実際に投資可能とする工費の金額には大きなばらつきがあった。そこで、対策を行うと決断できる工事費用の大小は何に起因しているのかを調べるため、築年数、床面積についての回答と工費金額におけるクロス集計をそれぞれ行った。床面積については、50mm²ごとにデータを分けて集計を行ったが、どのような広さにおいても工費の平均金額は85万円程度となり、目立った相関が得られなかった。築年数においても10年刻みでデータを分け、それぞれについての工費の平均金額を算出した。それらの結果を図-3に示す。新築の家には対策に金額をかけない、また、築年数が61年をこえる場合も工費の金額が低い傾向にあると考えられる。しかし、比較的高い金額をかけられるとしている築年数41～60年の平均金額でも100万円を超えない現状である。

なお、別項目の質問「液状化対策工法の工費が実施を決断できる金額であった場合、丸太を用いた液状化対策工法を採用する可能性はあるか」に対しては、約7割が丸太を用いた液状化対策工法を採用すると回答した。理由としては、効果があり金額が妥当であれば工法を選ばないという回答が多数を占めた。また、採用しない理由としては、木材の強度に対する不安の声が最も多かった。

図-4に木材の特徴に関する認識度の調査結果を示す。

「b: 木材は水中または地下水位より深い地盤中にあれば腐りにくい」という質問では、知らなかったという回答が約7割と非常に多かった。木材利用における最も大きな懸念材料は腐朽であるが、適材適所での利用により腐朽による劣化を防止できる事実を広く周知する必要がある。また、建設事業におけるスギの利用や木材の木杭としての利用に関する認識度も決して高くはなく、建設事業における木材利用に関する普及啓蒙活動を積極的

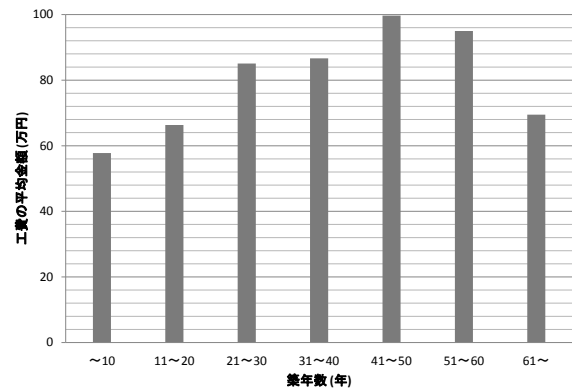


図-3 築年数ごとの工費の平均金額

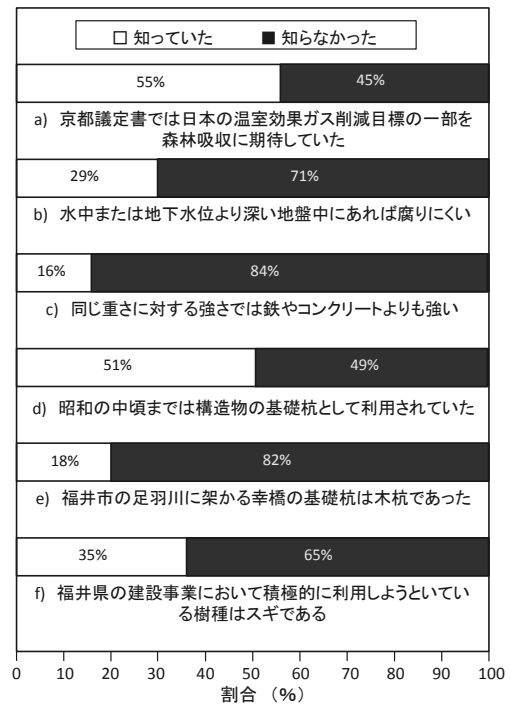


図-4 木材の特徴に関する認識度

に行う必要がある。「c: 木材は同じ重さ (例えば1kg) に対する強さで比較すると鉄やコンクリートよりも強い」という質問では、知らなかったという回答が8割以上であった。強度は丸太を採用しない最も大きな理由となっていたため、このような十分な強度が期待できるという事実も周知させる必要がある。

(3) 考察

以上の結果より、東日本大震災以降、地震対策への関心が高まり、液状化に対する認識度も高く、人々の液状化対策に対する関心が高いことが明らかとなった。しかし、液状化対策は工事費用が高いため経済的余裕がないと実施を決断することができず、また、その対策効果が一般の人々に分かりやすいものである必要があることも明らかとなった。これらの点を踏まえ、今後は丸太を用いた液状化対策工法の技術開発を行っていく必要がある。

3. 格子状改良工法との比較検討に関する模型振動実験

(1) 実験概要

既設構造物の液状化対策工法の1つである格子状改良工法を比較対象として、構造物周辺地盤に丸太を打設する方法の有効性について、模型振動実験による検討を行った。

図-5に作製した模型地盤の概要を示す。振動台上にアクリル製の土槽(幅800mm×奥行き400mm×高さ500mm)を設置し、その中に対策地盤を作製した。模型地盤は珪砂7号(密度 2.63 g/cm^3 、平均粒径 0.17 mm)を用いて水中落下法で作製した相対密度約40%の緩詰めの飽和砂層であり、地下水位は地表面とした。

丸太模型は、直径12mmで長さ300mmの円柱状である。また、格子壁模型は外寸222mm四方、内寸198mm四方であり、高さは300mmである。いずれも、福井県産のスギ間伐材より作製した。丸太模型は、地盤作製後に構造物模型の周囲に30mm間隔で28本を静的に貫入し、土槽底面には固定していない状態である。

一方、格子壁模型は、地盤作製前に予め土槽内に固定しており、周辺地盤を乱す影響はない。また、いずれも長期間水中保管したものを使用し、木材の密度は約 1.1 g/cm^3 であった。地表面に設置した構造物模型は底面が150mm四方で、高さ112mmの防水処理を施した木箱で、質量は3.45kg、接地圧は 1.5 kN/m^2 (べた基礎の2階建て木造住宅の接地圧 15 kN/m^2 の10分の1を想定)である。入力波は振動数5Hzの正弦波で最大加速度120galであり、加振時間は20秒とした。なお、実験中は入力加速度(A1)、構造物模型の応答加速度(A2)、地盤の応答加速度(A3)、地盤内の過剰間隙水圧(P1~P4)、構造物模型の鉛直方向変位量(D1)を計測した。地盤内の過剰間隙水圧の測定では、写真-1のような銅製の水圧計設置板を土槽底面に設置し、水圧計を測定位置に固定した。

(2) 実験結果および考察

図-6に丸太打設地盤と格子壁設置地盤のG.L.-100mmにおける過剰間隙水圧比の時刻歴波形を示す。ここで、自由地盤とは同模型地盤中の対策を行っておらず構造物模型も設置されていない地盤を指し、図-5で示したP1、P3における位置での測定結果を図-6に示す。自由地盤の過剰間隙水圧比は、地盤の自重による有効鉛直応力と過剰間隙水圧の比であり、対策地盤は、地盤の自重による有効鉛直応力に構造物の接地圧を加えた値と過剰間隙水圧の比である。この時刻歴波形より、丸太打設と格子壁設置のいずれの地盤においても自由地盤では過剰間隙水圧比が1.0に達しており、地盤が完全に液状化して

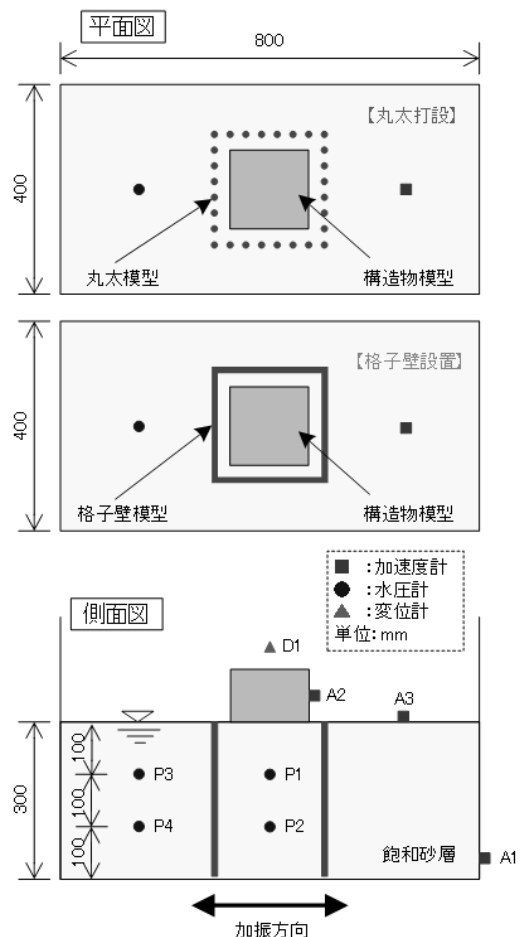


図-5 模型地盤の概要



写真-1 水圧計設置板

いる。これに対して、対策地盤ではいずれも水圧の最大値が低減されている。格子壁設置の場合、格子壁を予め土槽内に固定した状態で水中落下法により地盤を作製したため、対策前後での密度の変化はないと考えられる。丸太打設の場合、丸太打設時の周辺地盤の密度増大と、丸太と砂の複合地盤としてのせん断剛性の向上⁷⁾が影響を与えたため、格子壁設置地盤より水圧の最大値が低減されたと考えられる。

図-7に構造物模型の沈下量の時刻歴変化を示す。これは、構造物模型上面の中心をレーザー変位計で計測した結果である。なお、同図には別途に行った無対策地盤

の結果も示してある。同図より、無対策地盤では加振開始から約 18 秒で沈下量は 73mm に達し、その後漸増しながら最終沈下量は 78mm となった。本実験では構造物模型直下の水圧を測定する必要があるため、土槽底面から垂直に、銅製の水圧計設置板を設置している。その設置板が構造物直下約 87mm の位置にあるため、約 85mm の沈下が本実験で発生しうる沈下量の最大値と判断した。一方、丸太打設の最終沈下量は 61mm、格子壁設置地盤の最終沈下量は 57mm となっており、無対策地盤に比べて沈下を低減していることが確認できた。しかし、構造物模型の設置による有効拘束圧の増加が考えられ、対策による抑制効果だけでなく、これも効果の一つとして考えられる。

過剰間隙水圧抑制効果は丸太打設地盤の方が大きかったが、両ケースの最終沈下量の差は大きくない。これは、格子壁は土槽底面に固定されているのに対して、丸太は固定されておらず、構造物の沈下とともに丸太が側方に移動したため、沈下抑制効果が低減したと考えられる。格子壁と土槽底面には隙間を設け、粒子間の移動が可能となるよう工夫を施しているが、せん断変形の抑制効果および沈下量を過小評価している可能性がないとはいえない。

4. 斜め打設と頭部固定の有効性に関する模型振動実験

(1) 実験概要

3 章では、既設構造物の液状化対策工法として、構造物周辺地盤において鉛直方向に丸太を打設する方法の結果を示した。本章では丸太を斜めに打設し、さらに、写真-2 のような板を用いて、丸太の頭部を固定する方法を提案し、鉛直打設および鉛直打設で頭部を固定した場合と比較し、その有効性についての検討を行った。

図-8 に模型地盤の概要を示す。丸太模型は直径 12mm で長さ 300 mm の円柱状であり、丸太の打設間隔は 30 mm で 2 列、計 64 本を打設し、同図左右の網掛範囲の丸太 24 本のみを 15 度傾斜させた。丸太は土槽底部とは固定されておらず、数 cm だけ離れた状態となっている。頭部固定の方法は、地表面から突出している丸太頭部に、丸太の数だけ穴の空いたアクリル製の頭部固定板を設置して、頭部の水平移動を拘束した。その他の実験条件は 3 章と同様である。

(2) 実験結果および考察

図-9 に GL-100mm における過剰間隙水圧比の時刻歴波形を示す。なお、同図には鉛直打設、鉛直打設で頭部固定、斜め打設の結果も示してある。同図より、斜め打

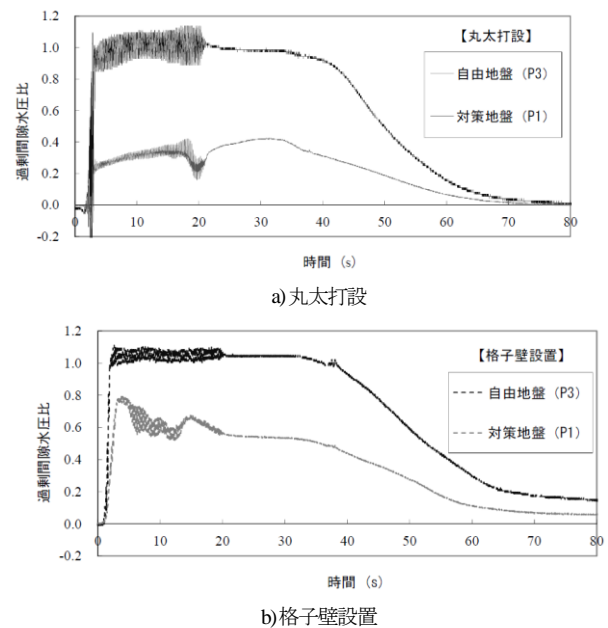


図-6 過剰間隙水圧比の時刻歴波形

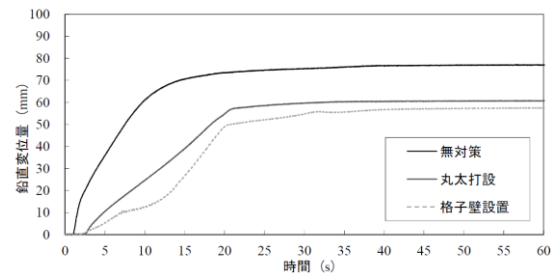


図-7 構造物模型の沈下量の時刻歴変化

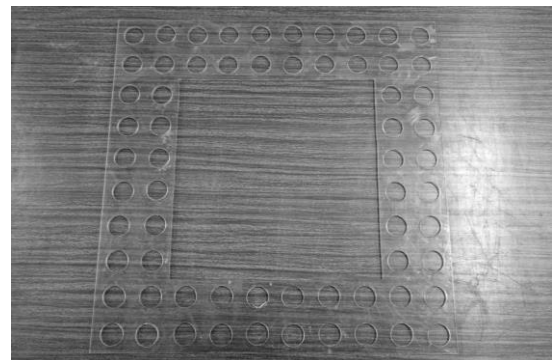


写真-2 頭部固定板

設に頭部固定を施したケースでも他の対策方法と同様に水圧の急激な上昇が抑制され、加振終了後には速やかに水圧が消散している様子が確認できる。鉛直打設と鉛直打設で頭部固定、および、斜め打設と斜め打設で頭部固定の各ケースの水圧波形を比較すると、ほぼ同じ挙動を示しており、頭部の固定が過剰間隙水圧の上昇および消散過程に影響を及ぼすことはないことが明らかとなった。このことは、構造物直下地盤の液状化強度の増加は、丸太打設による周辺地盤の締め固め効果と丸太による構造物直下地盤の拘束効果が支配的であったためと考えられる。

鉛直打設と斜め打設を比較すると、斜め打設を施した 2 ケースでは水圧の最大値が低減されている。これは、丸太を斜めに打設したことにより、構造物直下のせん断変形が生じる地盤の領域が減少したためと考えられる。

図-10 に構造物模型の沈下量の時刻歴変化を示す。同図には 図-9 と同様に鉛直打設、鉛直打設で頭部固定、斜め打設の結果も示してある。同図より、斜め打設に頭部固定を施した場合は、他のケースと同様に沈下の大部分は加振中に発生し、加振が終了する 20 秒以降では振動停止と同時に沈下が終了している。最終沈下量は鉛直打設が 45mm、鉛直打設で頭部固定が 40mm、斜め打設が 27mm、斜め打設で頭部固定が 20mm となっており、斜め打設に頭部固定を施したケースが最も沈下抑制効果が大きかった。斜め打設の場合は、水圧の上昇を抑制した要因と同様に、構造物直下地盤の変形領域が狭くなっているため、さらに、沈下が軽減されたと考えられる。また、丸太頭部を固定することにより鉛直の場合は 11%、斜めの場合は 26%、最終沈下量を軽減する効果が得られた。これは、構造物が沈下すると構造物下部地盤は圧縮されて丸太と共に側方に変形するが、頭部固定の場合では、丸太の側方移動が拘束されているため沈下が軽減されたと考えられる。

以上より、丸太を構造物の周囲に打設する場合、構造物直下の地盤変形が生じる体積を少なくするために丸太を斜めに打設し、さらに、地盤の側方移動に伴う横方向への変形を抑制するために丸太の頭部を固定することが構造物の沈下抑制に最も効果的であることが明らかとなった。しかし、より大きな地震動を与えた場合、杭頭固定部の損傷が考えられるため、杭頭の補強の必要性も考えられる。

5. おわりに

本研究では、戸建住宅を対象とした液状化対策の需要や工費を検討するため、一般市民を対象としたアンケート調査を行った。

また、既設構造物の液状化対策工法として、丸太を構造物周辺地盤に打設する方法を提案し、格子状改良工法を比較対象とした模型振動実験を行い効果の違いを検討した。さらに、丸太の打設方法として、地盤に斜めに打設する方法と丸太の頭部を固定する方法を提案し、模型振動実験によりその有効性を検討した。以下に明らかとなった結果をまとめる。

- ① 東日本大震災以降、地震対策への関心が高まり、液状化に対する認識度も高くなっている。一方、液状化対策を行う意欲は高いが経済的理由により対策を行っていないのが現状であり、工費は 200

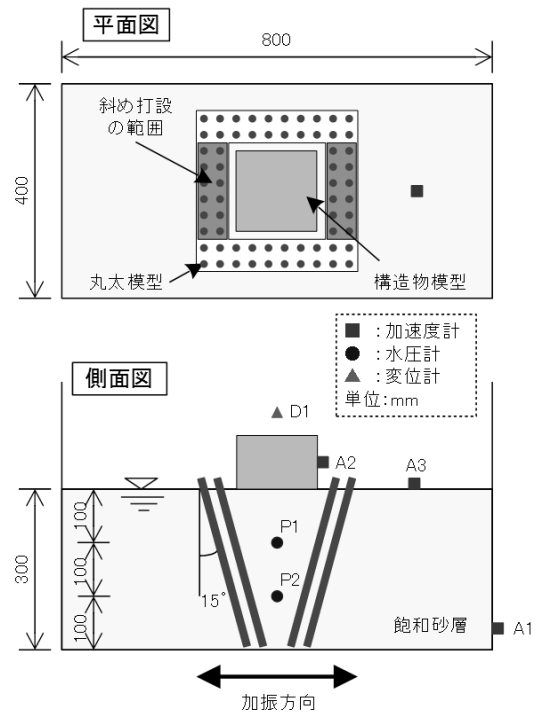


図-8 模型地盤の概要

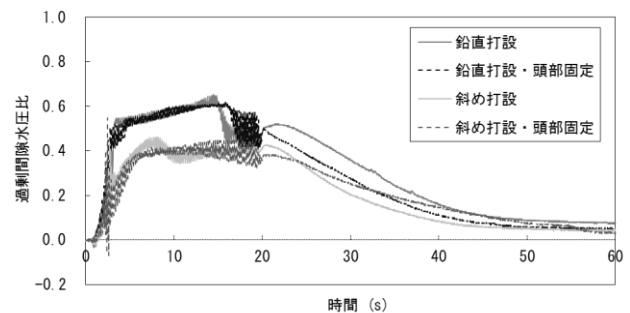


図-9 過剰間隙水圧比の時刻歴波形

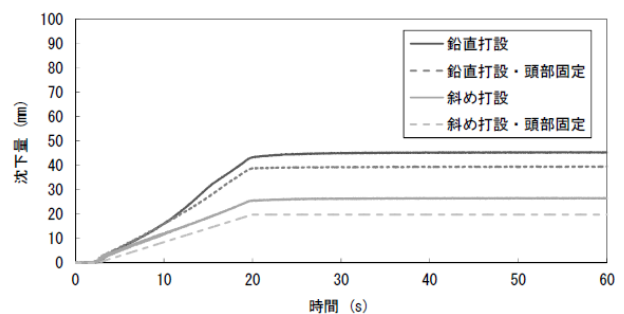


図-10 構造物模型の沈下量の時刻歴変化

万円未満を目標とする必要がある。丸太を用いた液状化対策を普及させるためには人々の木材の特徴に関する認識度を高めることも重要である。

- ② 既設構造物の周囲に丸太を打設することにより、周辺地盤の密度が増大し、丸太と砂の複合地盤としてせん断剛性が向上する。そのため、格子壁を設置する場合と同等の構造物沈下抑制効果が得られる。

- ③ 既設構造物の周囲に打設する丸太は、鉛直よりも斜めの方が構造物直下の地盤変形領域が狭くなるため構造物の沈下抑制効果が大きくなる。また、丸太の頭部を固定することにより、その効果はさらに向上する。

模型振動実験により、間伐丸太を有効利用した本工法は、飽和砂質土地盤において有効であることが実証された。しかし、本研究は限られた入力加速度での検討であるため、ここでの結論は限定的なものといえる。このような模型振動実験は、定性的なものであるため、解析などを行い定量的な結果を得る必要がある。

また、丸太打設による周辺地盤の変位はほとんどないことがわかっているが⁸⁾、既設の戸建住宅に適用した場合に考えられる住宅への影響や施工性に問題はないかなどの検討も必要となる。今後は、一般の方が投資可能とする工費金額の範囲内で施工が行えるように工法の改良を検討し、定量的な結果を用いて、より実用的な工法の考案に向けた研究を行っていく。

謝辞：模型実験では福井工業高等専門学校の元学生である村田拓海氏、小林俊晴氏、野坂直樹氏、故・臼井翔梧氏の協力を得た。また、本研究は科学研究費補助金（研究種目：基盤研究(C)、課題番号：26420489、研究代表者：吉田雅徳）の補助を受けて実施したものである。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 橋本隆雄，清水敏孝，森口剛：推進工法による液状化対策地下水位低下工法の実験検証，第35回地震工学研究発表会講演論文集，論文番号863，2015.
- 2) 眞野英之，社本康広，吉成勝美：構造物外周に設けた礫層と基礎拉幅による既存構造物の液状化対策（その3），第49回地盤工学研究発表会平成27年度発表講演集，pp.1119-1120，2014.
- 3) 尾上篤生，蔡飛，北村謙吉，広井恵二：格子状地中壁工法と個々の既設住宅直下地盤の液状化対策について，第50回地盤工学研究発表会，pp.1711-1712，2015.
- 4) 吉田雅徳，宮島昌克，沼田淳紀，木内貴之，渡邊雄大，内藤法子：スギ丸太を利用した液状化対策工法に関する模型振動実験，第44回地盤工学研究発表会平成21年度発表講演集，pp.1425-1426，2009.
- 5) 吉田雅徳，村田拓海，井上広平，宮島昌克，沼田淳紀：丸太を用いた戸建て住宅の液状化対策に関する模型振動実験，土木学会第67回年次学術講演会講演概要集，CS12-011，pp.21-22，2012.
- 6) 沼田淳紀，三輪滋，水谷羊介，三村佳織，原忠，坂部晃子，池田浩明，RIAZ Saima：丸太打設液状化対策実証実験の概要，土木学会第68回年次学術講演会講演概要集，V-032，pp.63-64，2013.
- 7) 吉田雅徳，鎮守佑介，吉田友美，宮島昌克，沼田淳紀，本山 寛：丸太を用いた液状化時の構造物の沈下対策に関する模型振動実験，土木学会第66回年次学術講演会講演概要集，CS13，pp.23-24，2011.
- 8) 三輪滋，沼田淳紀，筒井雅行，三村佳織，池田浩明：液状化対策としての丸太打設による地盤表面の変位，第49回地盤工学研究発表会平成26年度発表講演集，pp.1599-1600，2014.

(2015.11.6受付, 2016.1.29修正, 2016.2.20受理)

STUDY ON LIQUEFACTION COUNTERMEASURE TECHNIQUE BY LOG PILING FOR EXISTING RESIDENTIAL HOUSES

Yuko SERIKAWA, Masaho YOSHIDA and Masakatsu MIYAJIMA

During the 2011 Great East Japan Earthquake in Japan, extreme liquefaction caused extensive damage to residential houses in the Kanto Plain region and resulted settlements and tilts larger than that was observed during the past earthquakes. This paper deals with a proposal of ground improvement technique by installing logs into loose sand layer as a soil liquefaction countermeasure for existing residential houses. First, a demand for countermeasure of residential houses and reasonable cost of construction were shown by questionnaire surveys. Next, small-scale shaking table tests were carried out to propose how to apply the technique of log piling around existing residential house. As a result, the magnitude of settlements of the house which was improved by log piling with an inclination and the fixed top of logs became quite small.