

木造建築物の解体角材を利用した 液状化対策技術に関する模型振動実験

吉田 雅穂¹・山口 謙太郎²

¹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

²九州大学准教授 大学院人間環境学研究院都市・建築学部門 (〒812-8581 福岡市東区箱崎6-10-1)

E-mail: yamaguchi@arch.kyushu-u.ac.jp

丸太を用いた液状化対策は、飽和した緩い砂質土地盤に間伐丸太を打設することで、地盤を密実化させる工法である。本研究は、この丸太の代替材として木造建築物の解体時に発生する角材を利用し、廃棄物の再資源化を図るカスケード利用を目指すものである。木造住宅に使用されている構造材を調査した結果、丸太の寸法と同等の角材が多数得られることが確認できた。また、戸建住宅等の小規模構造物の液状化対策を対象として、丸太と角材の形状の違いが対策効果に与える影響、ならびに、液状化時の側方流動に対する抵抗力の違いについて模型振動実験による検討を行った結果、角材は丸太と同等の沈下抑制効果を有し、構造物周辺地盤で側方流動が発生した場合は、丸太よりも角材の方が水平および鉛直変位の抑制効果が大きいことを明らかにした。

Key Words : *liquefaction, countermeasure, demolished wooden house, timber, shaking table test*

1. はじめに

著者らは、地球温暖化緩和対策や林業活性化に貢献することを目的として、建設事業における木材利用を促進させるため、昭和30年頃までは土木・建築構造物の基礎杭に利用されていた丸太を、地盤に打設して改良材として利用する技術を提案している¹⁾。ここで対象とする地盤は、構造物基礎として支持力不足や不同沈下が問題となる軟弱粘性土や、地震時の液状化が問題となる飽和砂質土である。木材を構造材として利用する時に懸念されるのは、腐朽による劣化や強度低下であるが、前述の地盤は地下水位の高い場合が対象となるため、木材が腐朽しにくい条件での利用となる。これは、橋梁や鉄筋コンクリート建築物の基礎杭として利用されていた木杭の掘り出し調査を行った結果、地下水位変動域以深に打設されていた場合、腐朽による劣化や強度低下が認められず健全な状態であった事例²⁾を多数確認していることに基づいている。したがって、この様な条件下で積極的に木材を利用することにより、建設事業における木材利用が促進されることが期待される。

2007年度³⁾より開始した一連の研究で、丸太を用いた液状化対策工法の有効性は模型実験や現場実験等で明らかにされており、現在では丸太打設液状化対策&カーボ

ンストック工法⁴⁾として実用化段階に至っている。

本研究は丸太に代わる材料として、木造建築物の解体時に発生する角材を地盤に打設し、液状化対策のための改良材としてカスケード利用することの可能性を検討するものである。丸太を用いた液状化対策は打設により地盤を密実化させる締固め工法に分類される。したがって、構造材のような高品質の木材を使う必要はなく、間伐材でも十分使用できる。解体角材も建設当初と比較すると材質は劣化しているが、地下水位以下で改良材として利用する場合には問題ないと考えられる。

角材を用いた場合の液状化対策原理は丸太と同じであるが、角と丸の異なる形状が対策効果に影響を与えると考えられる。一例として、城の石垣基礎の基底部には沈下防止のための丸太を横に並べる梯子胴木が用いられるが、最下部では石が外側にせり出すのを留めるために石垣前面を角形木杭で抑える場合がある。これは、丸形杭では水平移動によって背面の土との接触面が50%分離するが、角形杭の場合は3面、すなわち全体の75%が土と接触することになり、水平方向の摩擦抵抗が大きくなることを意図して利用されていると考えられている⁵⁾。

本研究では、まず、木造住宅から採取可能な角材の量について調査した。つぎに、戸建住宅等の小規模構造物の液状化対策を対象として、丸太と角材の形状の違いが

対策効果に与える影響、ならびに、液状化時の側方流動に対する丸太と角材の抵抗力の違いについて模型振動実験による検討を行った。

2. 木造住宅の解体で得られる角材

2002年5月に施行された「建設工事に係る資材の再資源化等に関する法律（建設リサイクル法）」は、一定規模以上の対象建設工事において、特定建設資材廃棄物（コンクリート塊、アスファルト・コンクリート塊、建設発生木材）の分別解体等と再資源化等を義務付けるものであり、木造建築物の解体の場合は床面積が80m²以上の場合に適用される。ここで、解体木材発生量（t）は延床面積（m²）の約8.5%が目安となっており、一般的な木造住宅（延床面積100～130m²（30～40坪））を解体すると約10tの木材が発生することになる⁹⁾。

本研究で対象とする角材は、木造軸組構法の上部構造部分（土台、柱、梁等）より採取できる。手作業による分別解体工法の場合は、上から順に接合金物を取り外して部材ごとに分別して搬出する。一方、フォークリフト等を利用して機械作業を行う場合は、解体後に接合金物を取り外すため、解体時に角材が損傷する可能性が高い。また、土台等には建築年代によって有害なCCA系木材保存剤を処理した材料が使用されている場合があり、その材料は廃棄物処理法に基づき処分する必要がある⁹⁾。

現在、福井県の森林組合において間伐材として多く搬出されるのは末口直径14cm～16cm、長さ4mの寸法であり、これが丸太杭として現場に供給されている。一方、より細径の末口直径9cm～13cmの間伐材は供給量として十分ではないのが現状である。木造軸組工法の角材の断面は3寸半角（105×105mm）または4寸角（120×120mm）が一般的であるため、本研究では上記断面寸法以上かつ長さ4m以上の角材をカスケード利用することを提案する。

表-1はある木造2階建ての木造軸組構法の住宅（延床面積67.5坪）に使用された構造材のデータである。同図のハッチングした部分が105×105×4000mm以上の寸法の材料であり、その量は全材積の61%、本数にして176本が該当し、相当量の角材が採取できることがわかる。

3. 木材形状が構造物の鉛直・水平変位に与える影響

(1) 概説

丸太を用いた液状化対策の原理は締固め工法に分類されるため、設計では対象地盤に占める丸太の断面積の割合（置換率）がパラメータとなる。一方、丸太の鉛直および水平方向の抵抗力は地盤と接する周面積の影響を受

表-1 構造材のデータ

No.	区分	樹種	W×H×L(mm)				本数	材積 (m³)	
1	土台	ヒノキ	105	×	105	×	4000	29	1.28
2	"	"	105	×	105	×	3000	4	0.13
3	大引	スギ	90	×	90	×	4000	48	1.56
4	"	"	90	×	90	×	3000	1	0.02
5	1F桁・梁	ベイマツ	105	×	360	×	4000	1	0.15
6	"	"	105	×	300	×	6000	1	0.19
7	"	"	105	×	300	×	4000	14	1.76
8	"	"	105	×	270	×	6000	1	0.17
9	"	"	105	×	270	×	5000	1	0.14
10	"	"	105	×	270	×	4000	1	0.11
11	"	"	105	×	240	×	4000	1	0.10
12	"	"	105	×	210	×	4000	1	0.09
13	"	"	105	×	210	×	3000	1	0.07
14	"	"	105	×	180	×	4000	13	0.98
15	"	"	105	×	180	×	3000	1	0.06
16	"	"	105	×	150	×	4000	16	1.01
17	"	"	105	×	150	×	3000	1	0.05
18	"	"	105	×	105	×	4000	21	0.93
19	"	"	105	×	105	×	3000	1	0.03
20	"	(集成材)	105	×	450	×	5000	1	0.24
21	"	"	105	×	420	×	6000	4	1.06
22	"	"	105	×	420	×	5000	1	0.22
23	"	"	105	×	420	×	4000	1	0.18
24	2F桁・梁	ベイマツ	105	×	360	×	5000	1	0.19
25	"	"	105	×	330	×	5000	1	0.17
26	"	"	105	×	300	×	4000	5	0.63
27	"	"	105	×	240	×	4000	6	0.60
28	"	"	105	×	240	×	3000	5	0.38
29	"	"	105	×	150	×	4000	23	1.45
30	"	"	105	×	150	×	3000	1	0.05
31	"	"	105	×	105	×	4000	3	0.13
32	"	"	105	×	105	×	3000	1	0.03
33	母屋	スギ	90	×	90	×	4000	25	0.81
34	"	"	90	×	90	×	3000	11	0.27
35	隅木	スギ	105	×	105	×	4000	8	0.35
36	"	"	105	×	105	×	3000	1	0.03
37	谷木	スギ	105	×	105	×	4000	2	0.09
38	"	"	105	×	105	×	3000	1	0.03
39	棟木	スギ	105	×	105	×	4000	7	0.31
40	"	"	105	×	105	×	3000	1	0.03
41	火打梁	スギ	90	×	90	×	4000	12	0.39
42	通し柱	スギ	120	×	120	×	6000	4	0.35
43	管柱	スギ	105	×	105	×	3000	97	3.21
44	"	(集成材)	103	×	103	×	2950	3	0.09
45	"	"	103	×	103	×	2950	3	0.09
46	"	"	103	×	103	×	2950	6	0.19
47	"	"	103	×	103	×	2950	5	0.16
48	地束	スギ	105	×	105	×	3000	8	0.26
49	小屋束	スギ	105	×	105	×	4000	9	0.40
50	"	"	90	×	90	×	4000	16	0.52
			合 計				429	21.74	
			105X105X4000mm以上				176	13.28	

けると考えられる。そこで、本章では丸太と角材の置換率と周面積をパラメータとし、液状化による構造物の鉛直および水平変位に及ぼす影響を模型振動実験により検討した。

(2) 実験概要

図-1に実験装置の概要を示す。振動台上にアクリル製の土槽を設置し、その中に模型地盤を作製した。模型地盤は珪砂7号（密度2.66g/cm³、平均粒径0.17mm）を用いて水中落下法で作製した相対密度約50%の緩詰めの飽和砂層であり、層厚は300mm、地下水位は地表面とした。丸太および角材の模型は福井県産のスギ間伐材より作製したものであり、各条件を表-2に示す。ここで、同表の置換率とは地盤が木材で置き換えられた面積の比、周面積とは木材の底面を除く側面が地盤と接する面積のことであり、本実験では置換率12.6%、周面積約7.5x10³mm²と

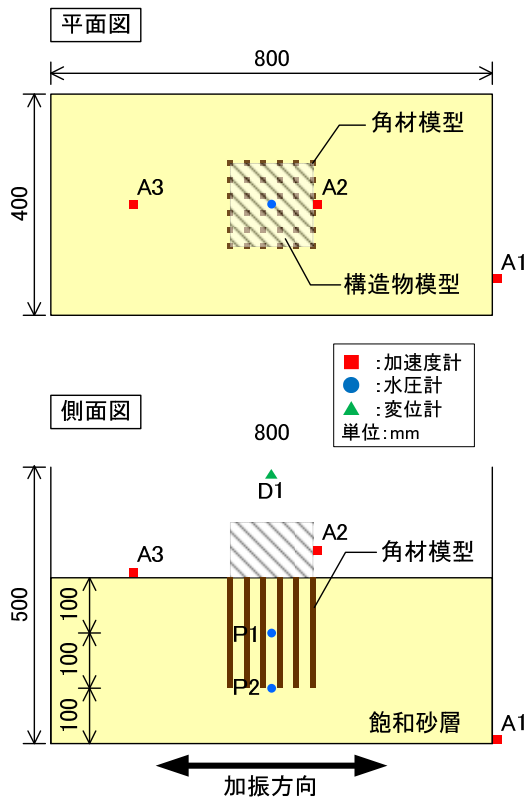


図-1 実験装置の概要 (ケース2)

表-2 実験ケース

ケース No.	条件	形状	長さ (mm)	太さ (mm)	打設間隔 (mm)	本数
0	無体策	—	—	—	—	—
1	基準	丸太	200	φ12	30	36本
2	置換率一定	角材		□10.6		
3	周面積一定	角材		□9.4		

した。丸太の打設方法は、飽和砂層作製後に周辺地盤をできるだけ乱さないように静的に貫入するものとし、地盤中央から外側に向かって時計回りに打設した。打設間隔は30mm、打設本数は36本である。また、丸太は長期間水中保管したものを使用し、その密度は約 1.1g/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、重さは3.45kg、設地圧は 1.5kN/m^2 (べた基礎の2階建て木造住宅の接地圧 15kN/m^2 の10分の1を想定) である。なお、構造物模型は木材頂部に静置してあるだけで連結されていない。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, P2)、構造物模型の鉛直および水平方向変位量 (D1) を計測した。

(3) 実験結果および考察

図-2にG.L.-100mmにおける過剰間隙水圧 (P1) の加振

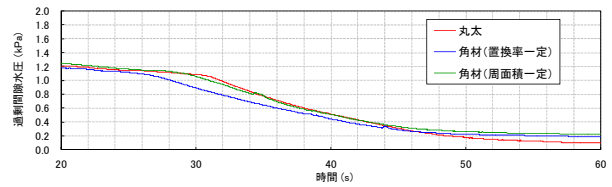


図-2 過剰間隙水圧の時刻歴波形 (P1)

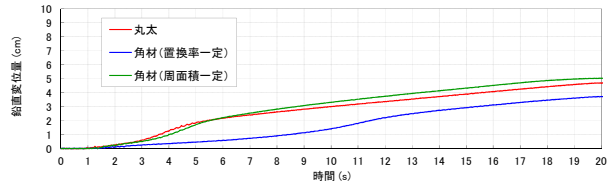


図-3 構造物模型の沈下の時刻歴波形 (D1)

終了後の消散過程を示す。同図より、置換率一定の角材と丸太では、角材の方が早く水圧が消散し始めていることが確認できる。ここで、置換率一定の角材と丸太の周面積を比較すると、角材の方が約12%大きい。既往の実験⁷⁾では、液状化時に発生した過剰間隙水圧が丸太周面に沿って地表に消散しやすくなるという結果が得られており、上記結果も同様の効果によるものと推測できる。以上より、過剰間隙水圧の消散は置換率よりも周面積の影響を受け、角材や丸太の形状の影響は受けないことを明らかにした。

図-3に構造物模型の沈下量の時刻歴を示す。同図より、置換率一定の角材と丸太では角材の方が沈下を抑制していることが確認できる。これは、図-2と同様な傾向を示すものであり、地盤支持力は木材の周面摩擦抵抗の大きさの影響を受け、その形状の影響は受けないことを明らかにした。

図-4に加振前後の構造物模型の平面位置を示す。加振前の位置と比較すると、無対策と丸太は変位方向が2次元であるのに対して、角材の場合は1次元となっていることが確認できる。図-5は木材の投影面積と構造物模型の中心位置の移動量との関係を示したものである。ここで、投影面積とは地盤側面を加振軸方向から見た時の木材が占める面積のことである。同図より、両者の相関が確認できる。これは、液状化初期に地盤が軟化して加振方向に大きく振動する現象が発生するが、この時、投影面積の大きい方がその影響を受けやすかったためと考えられる。ここで、最も投影面積の大きい丸太の場合、変位量が減少しているが、丸太の投影面が角材と比較して平面ではないことが要因と推測でき、この形状の影響については別途検討を要する。

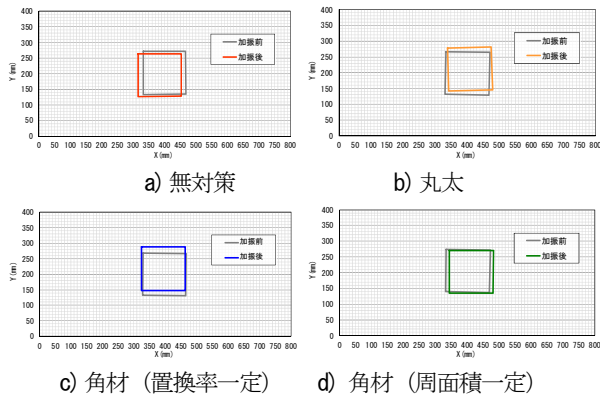


図-4 構造物模型の水平変位

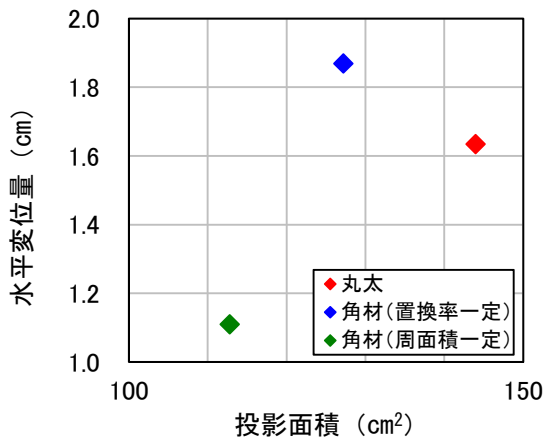


図-5 木材の投影面積と構造物模型の水平変位の関係

4. 傾斜地盤において木材形状が構造物の水平変位に与える影響

(1) 概説

前章の結果より、角材は丸太と同等の沈下抑制効果を有するが、構造物の水平変位の発生傾向に関しては両者で異なることが確認された。そこで本章では、傾斜地盤を用いて液状化に伴う地盤の側方流動の発生を模擬した模型振動実験を実施し、丸太と角材の水平変位抑制効果の違いについて検討した。

(2) 実験概要

図-6に実験装置の概要を示す。振動台に設置した土槽（長さ1200mm×奥行き400mm×高さ500mm）はアクリル製で、土槽中央に鋼製の仕切板を設置し、土槽内に2つの模型地盤を作製して振動実験を実施した。模型地盤は、珪砂7号（密度 2.66g/cm^3 、平均粒径 0.17mm ）を用いて水中落下法で作製した相対密度約50%の緩詰めの飽和砂層であり、層厚は300mm、地下水位は地表面、土槽両端に高さ100mm、勾配1:2となる斜面を作製した。

丸太および角材の模型は福井県産のスギ間伐材より作製したものであり、構造物模型と斜面との間に4行×10

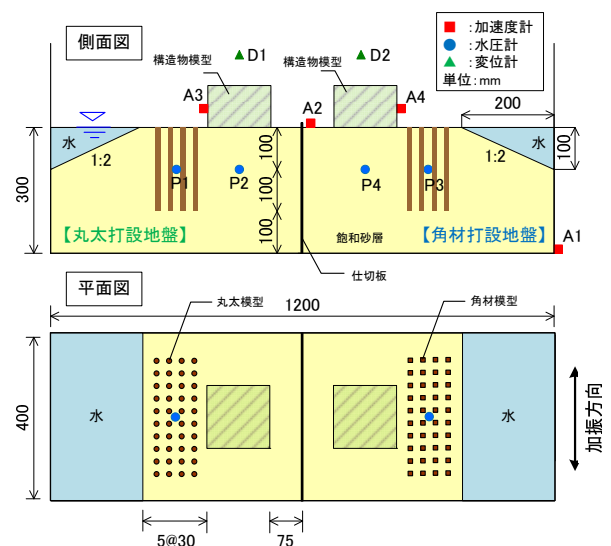


図-6 実験装置の概要

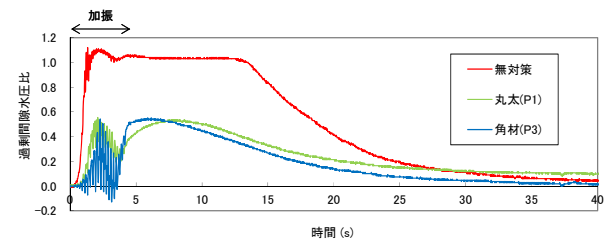


図-7 過剰間隙水圧比の時刻歴波形

列となるよう30mm間隔で計40本を飽和砂層作成後に静的に打設した。丸太模型は直径12mm、長さ200mm、角材模型は1辺10.6mm四方、長さ200mmである。ここで、両模型の断面積は同じであるため、打設条件である置換率は約12.6%と同じである。また、丸太は長期間水中保管したものを使用し、その密度は約 1.1g/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、重さは3.45kg、接地圧は 1.5kN/m^2 （べた基礎の2階建て木造住宅の接地圧 15kN/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、最大加速度120gal、加振時間4秒とした。加振方向は慣性力が側方流動に影響を与えないように斜面直行方向とした。なお、実験中は入力加速度（A1）、地盤の応答加速度（A2）、構造物模型の応答加速度（A3、A4）、地盤内の過剰間隙水圧（P1～P4）、構造物模型の鉛直変位量（D1、D2）を計測した。

(3) 実験結果および考察

図-7に丸太および角材を打設した対策地盤のG.L.-100mmにおける過剰間隙水圧比（P1、P3）の時刻歴波形を示す。なお、同図には別途実施した丸太と角材を打設していない無対策地盤の結果も示した。同図より、無対策地盤では加振後すぐに液状化状態となり、加振終了後もその状態が継続している。一方、丸太と角材を打設し

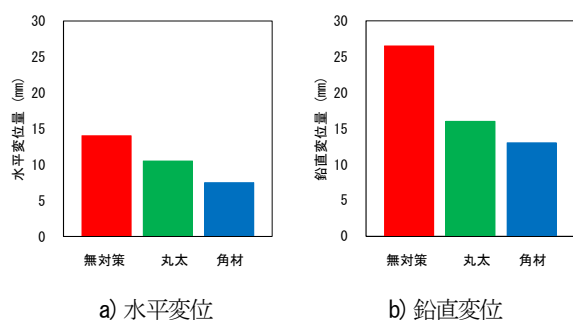


図-8 構造物模型の残留変位

た地盤では水圧の最大値が低減され、水圧消散も早期に生じている。これは、既往の実験結果^{7a)}と同様であり、木材打設に伴う周辺地盤の密度増大効果、木材と地盤の複合地盤による地盤のせん断変形抑制効果、木材周囲から地表面への間隙水圧消散効果等による影響と考えられる。

図-8に構造物模型の加振終了後の残留変位を示す。丸太と角材を打設した対策地盤では、無対策地盤と比べて構造物模型の水平変位の抑制効果が確認できる。また、角材の方が丸太よりも変位量が小さい。これは、丸太と角材の形状の違いによる影響と考えられ、地盤の側方流動を平面で受ける角材の方が丸太よりも抵抗力が大きいと考えられる。また、鉛直変位に関しても水平変位と同様の傾向が確認できる。構造物の沈下は周辺地盤の水平変位の影響を受けるため、水平変位抑制効果の高い角材の方が鉛直変位も抑制したと言える。

5. おわりに

本研究は、木造建築物の解体時に発生する角材を、地盤改良材としてカスケード利用することを目的として、液状化対策への適用の可能性について模型振動実験により検討を行った。その結果、以下の結論を得た。

- (1) 角材は既にその有効性が確認されている丸太と同等の沈下抑制効果を有する。
- (2) 構造物周辺地盤で側方流動が発生した場合、丸太よりも角材の方が水平および鉛直変位の抑制効果が大い。

謝辞： 模型実験では福井工業高等専門学校元学生の辻岡晃氏、野坂直樹氏の協力を得た。また、本研究は科学研究費補助金（課題番号：23360249）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) 飛島建設，福井工業高等専門学校，福井県：脱地球温暖化社会へ向けた建設工事への木材利用に関する調査・研究，福井県建設技術公社，109p., 2008.
- 2) 吉田雅徳，沼田淳紀，上杉章雄，久保 光，源済英樹，野村 崇：足羽川で掘り出された木杭の健全度調査，土木学会第 62 回年次学術講演会講演概要集，pp.183-184, 2007.
- 3) 吉田雅徳，平野文睦，宮島昌克，沼田淳紀，上杉章雄：丸太打設による液状化対策に関する基礎的模型振動実験，第 43 回地盤工学研究発表会平成 20 年度発表講演集，pp.1605-1606, 2008.
- 4) 飛島建設株式会社，兼松日産農林株式会社，昭和マテリアル株式会社：丸太打設液状化対策&カーボンストック工法，先端建設技術・技術審査証明報告書，先端建設技術センター，145p., 2014
- 5) 呉文経：粘土地盤における周面支持杭一底盤系の支持機構に関する研究，佐賀大学博士学位論文，pp.60-63, 1996.
- 6) 木造建築物の分別解体の手引き，建設副産物リサイクル広報推進会議，37p., 2008.
- 7) 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.
- 8) 吉田雅徳，渡邊雄大，宮島昌克，濱田政則，沼田淳紀，本山寛：スギ丸太打設による液状化地盤の側方流動対策に関する模型振動実験，第 46 回地盤工学研究発表会平成 23 年度発表講演集，pp.1755-1756, 2011.

SHAKING TABLE TESTS ON LIQUEFACTION COUNTERMEASURE TECHNIQUE BY USING TIMBERS GOTTEN FROM DEMOLISHED WOODEN STRUCTURE

Masaho YOSHIDA and Kentaro YAMAGUCHI

During 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 past earthquakes. This paper deals with a proposal of technique of ground improvement by installing a timber gotten from demolished wooden structures into a loose sand layer as a liquefaction countermeasure for a lightweight structure such as a residential house. Small-scale shaking table tests were carried out to clarify difference of effectiveness between timbers and logs. As a result, the effectiveness of timbers against settlement of structure was equal to logs. Furthermore, vertical and lateral displacements of structure in case of timbers were smaller than that of logs.