

# 掘立形式の木造鳥居の耐震性に関する実験的研究

Experimental Study On Earthquake Resistance of Wooden Torii

中嶋裕典<sup>1</sup>・野村直樹<sup>1</sup>・田口仙市郎<sup>2</sup>・高橋佑花<sup>3</sup>

Yusuke Nakajima, Naoki Nomura, Senichirou Taguchi and Yuka Takahashi

<sup>1</sup>関西大学大学院博士課程後期課程 理工学研究科総合理工学専攻 (〒564-8680 大阪府吹田市山手町3-3-35)

Doctoral Program, Graduate School of Kansai University, Science and Engineering, Integrated Science and Engineering Major

<sup>2</sup>関西大学大学院博士課程前期課程 理工学研究科環境都市工学専攻 (〒564-8680 大阪府吹田市山手町3-3-35)

Master's Program, Graduate School of Kansai University, Science and Engineering, Environmental and Urban Engineering Major

<sup>3</sup>株式会社 文化財構造計画 (〒532-0011 大阪府大阪市淀川区西中島五丁目13番地12号谷ビル9F)

Heritage Structure Engineering Design, INK

In shrines, torii has a role as a barrier between the gods and the world. And from the entrance, one torii, two torii and three torii are built. The basic structure is only that Shimagi and Kasagi rides on two columns. In this study, we examined the wooden torii of the structure of the landfill pillar with the difference of the ground. We used two types of ground, Tataki and Hanchiku, which are traditional civil engineering works in Japan. As a result, it turned out that Hanchiku is stronger than Tataki. And it turned out that the landfill pillar is strong.

**Keywords:** torii, tataki, hanchiku, seismic, static test

## 1. はじめに

鳥居は神社の神域と俗界との結界を象徴として 神域の入り口から参道に沿って一の鳥居、二の鳥居、三の鳥居と称して複数建てられることが多い。

一般的によく目にする鳥居の構成部材の名称を図1に示す。構造的には2本の柱の頂部に「笠木」と「島木」、柱頭から柱径程度下がった位置に「貫」の合計3本の横架材を設置して、両柱をつなぎ門型の単純明快な木組が基本となっているが。形式によっては楔・扁額・額束・台輪などの小部材を付属することがある。また図1では柱脚に亀腹、台石、藁座など石製の基礎を設置しているが、古代の鳥居は木造の掘立柱であったものが、後に石造鳥居が建立されるようになって亀腹や藁座が設置されるに至ったと考えられる。本研究では 最も古い時代からの掘立柱形式の木造鳥居を対象とし、外力に対してどのように力を受けているのかを地盤の違いによる比較実験を行った。

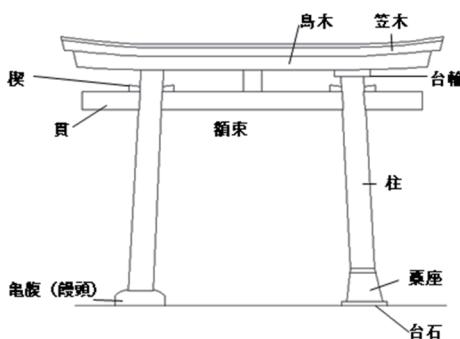
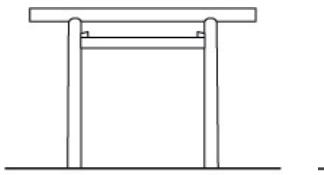
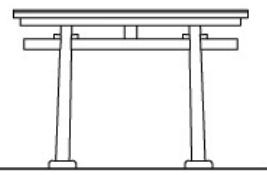


図1 構成部材の名称

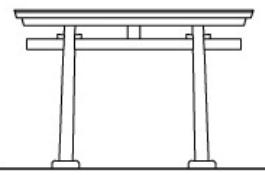
鳥居は意匠的にみると笠木に反りを持たない「神明（しんめい）鳥居」（図2a）と反りを有する「明神（みょうじん）鳥居」（図2b）の2系統に大別されるが、黒木鳥居は笠木と島木は丸太の一材を用い、貫も柱を貫通していない、最も古い様式を留めた格式ある形式とされる。



神明・黒木鳥居



春日鳥居



八幡鳥居

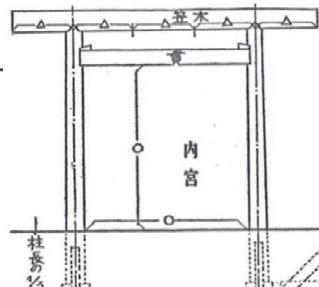
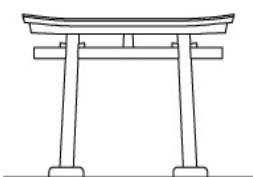
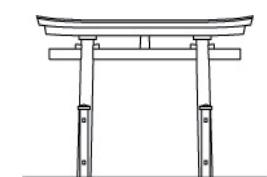


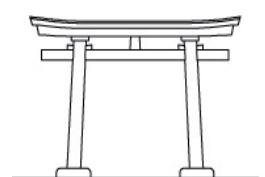
図3 神明鳥居（内宮）<sup>1)</sup>



明神鳥居



両部鳥居



稻荷鳥居

図2b 明神（みょうじん）系鳥居

なお、「神明鳥居」には内宮と下宮の2種類があり、内宮は丸太造り、下宮は八角造りで、柱径は柱芯間距離の1/10を元口とし、末口はその1割細めに仕上げる。建て方は柱内面を垂直に建て、地盤面下は柱径の半分ほどの木材を使用し土台と頬杖による根絡みを設置するが、根絡みを設けないのが正式とされる。樹種は腐朽に強い檜、楨、榧が用いられた。内宮の神明鳥居の基本寸法を図3に示す。埋め込み深さは柱長の1/3を基本とし、土中に石製基礎（磐根）が設置される。

## 2. 模型実験

### (1) 試験体概要

本研究では図4<sup>1)</sup>に示すような神明系の春日鳥居を採用した。この鳥居は藤原鎌足が鹿島神宮から奈良に勧請して創設したと伝えられ、外観は纖細優美である。柱の根元には直径が柱径の2倍、高さは柱径の6分くらいの亀腹をつけることがあるが、試験体は埋め込み深さを柱径の約3倍、柱長さの約1/3.5とした掘立柱形式とした。部材はヒバ材を使用した。試験体の詳細寸法は図5に示す通りであり、重さは約41.2Nである。

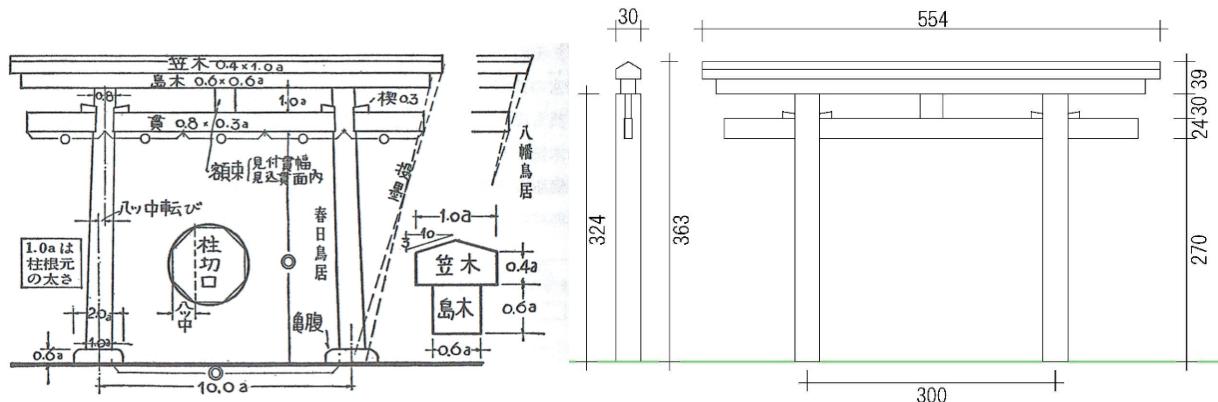


図4 春日鳥居の寸法<sup>1)</sup>

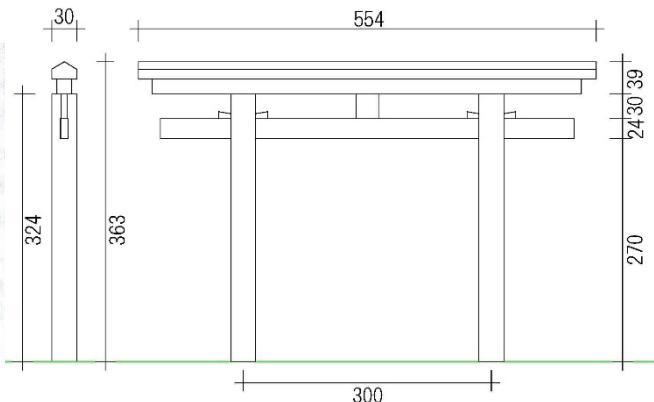


図5 試験体の形状寸法

## (2) 試験地盤の作製

### a) 土の配合

掘立柱を支持する地盤としては、家屋などの土間に施工される「三和土（たたき）」と社寺建築の地盤を固めるために用いられる「版築（はんちく）」の2種類とした。使用した材料は同一で配合は表1の通りである。土は京都市伏見区に産する「深草土」でこれを4mmの篩にかけたものを砂利に用いた。水量は土の乾燥具合などにより適宜調整した。土の混練工程までは両者とも同じである。混練手順は次の通りである。

- ① 土、砂利、消石灰を加えてよく混ぜ合わせる。（写真1a）
- ② ①で混ぜ合わせたものに、水と塩化マグネシウムを少しづつ加え混ぜる。
- ③ ②に骨材を入れる。（写真1b）

試験体地盤は各面に透明アクリル窓をつけたH250mm・B650mm・D300mmの鋼製枠（写真2）を用い混練した土を突き固めた。

表1 三和土と版築の調合割合

材料	重量(N)
土	196
砂利(4mmふるい)	157
骨材	196
塩化マグネシウム	0.78
消石灰	15.7
水	34.3



写真1a 混練状況①



写真1b 混練状況③

写真1 地盤材料の製作



写真2 地盤製作用鋼製枠

### b) 三和土地盤の作製

- ① 混練土を2cm程度づつ敷き込んで3.5寸の角材で突き固める。この作業を鳥居の足元まで繰り返す。
- ② 柱の位置に礎石を据え付ける。
- ③ 磂石の上に鳥居を置き、土を周辺に敷き詰め突き固める。
- ④ 枠の天端まで突き固める。

### c) 版築地盤の作製

混練土を10cm程度土を入れ、直径1寸以下の棒で突き固める。この作業を鳥居の足元まで繰り返す。他の工程は三和土と同様である。鳥居の設置状況を写真3a～cに示す。



写真3a 三和土の捣き込み



写真3b 版築地盤の捣き込み



写真3c 完成状態

写真3 各地盤の作製

### (3) 実験方法

実験のセットアップを図6に示す。笠木の先端をピン接合で①ロードセルを介して②デジタルアクチュエーターにつないで水平方向のループ載荷を行い、その後に終局状態まで単調載荷をした。実験は変位制御を行い、アクチュエーターのピッチは0.1mmである。

水平変位は島木と柱に設置したダイヤルゲージで0.01mm刻みで計測した。各試験体のダイヤルゲージと歪ゲージの設置位置を図7aと図7bに示す。歪ゲージは構成部材の曲げモーメント分布の測定を目的として、①柱・島木・貫の中間と端部の上下面②笠木・柱・額束間、貫、柱・額束間にそれぞれ歪ゲージを貼り付けた。また載荷に伴う地盤表面の亀裂分布を観測するために写真4のように地盤表面に消石灰を薄く塗布した。土の乾燥収縮によるひび割れの状況を示す。

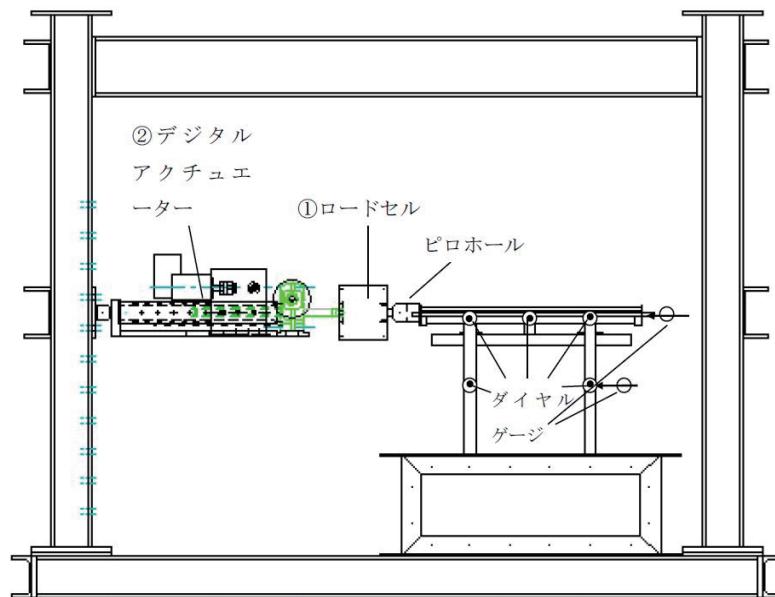


図6 セットアップ図

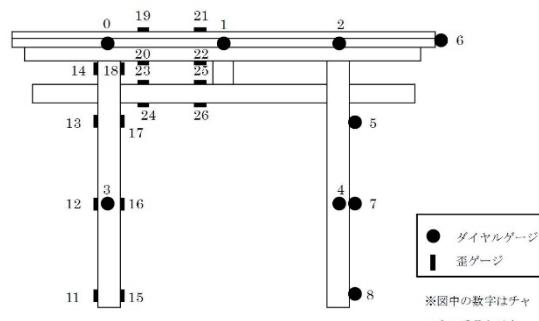


図7a 三和土鳥居の計測位置

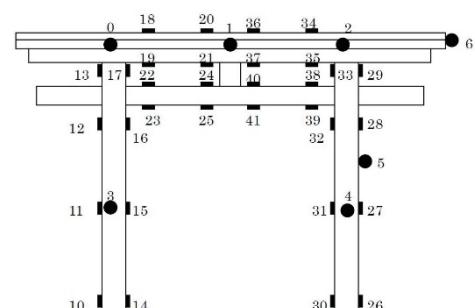


図7b 版築鳥居の計測位置



写真4 乾燥収縮によるひび割れ

### 3. 載荷実験結果

#### (1) 荷重-変位関係

原点から押し引き1サイクル時の変形状態を写真5a～cに示す。三和土においては圧縮側：8.2mm(変形角R=2.3%)と引張側：で10.9mm(R=3%)の時に笠木の浮き上がりが確認された。また、版築では圧縮・引張写真4に示すように実験では地盤面に載荷による大きなひび割れは確認されなかった。

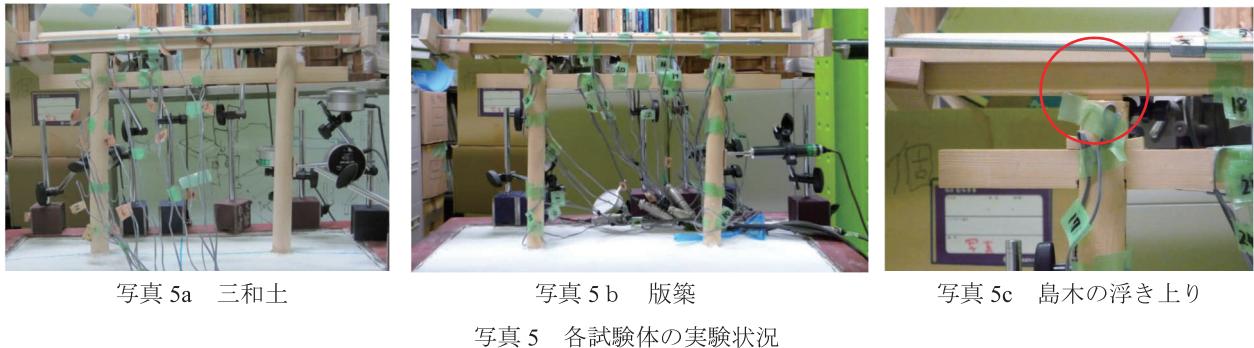


図8に三和土および版築の荷重-変位関係を示す。最大変位での三和土と版築での復元力を比較すると三和土では圧縮(R=3%)で360N、版築が544Nであった。一方引張については(R=2.8%)で三和土342N、版築289Nとなった。圧縮と引張の振幅が異なるので、両振幅での最大荷重は三和土約702N、版築約833Nで版築の方が三和土に比して約20%耐力が大きかった。

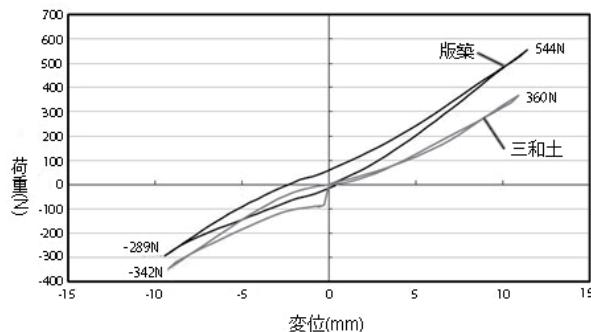


図8 三和土と版築地盤での荷重-変位関係

#### (2) 曲げモーメント分布

実験は圧縮・引張で行ったが、ここでは圧縮側の初載荷時の結果を示す。

##### a) 三和土試験体

曲げモーメント分布を図9a～dに示す。当該試験では引張側の柱にしか歪ゲージを添付しなかったので、引張側柱の曲げモーメントのデータしか得られなかつたが、実験より次の結果を得た。

- ①柱の曲げモーメントは柱脚を最大とする片持ち梁のような曲げモーメント分布を示す。
- ②貫の曲げモーメント分布は柱付近が大きい逆対象の曲げモーメントを受ける梁に類似する。
- ③島木には曲げモーメントは伝達されていない。

##### b) 版築試験体

曲げモーメント分布を図10a～dに示す。版築試験体では部材全体にひずみゲージを添付したので、左右両柱の曲げモーメントを解析することができた。得られた結果は次の通りである。

- ①柱の曲げモーメントは埋め込み部を固定端とする片持ち梁と同様の分布を示した。すなわち柱脚部が最大で、柱頭部の島木との接合部付近が最小となるほぼ直線分布となった。

- ②両柱の曲げモーメントはほぼ同等であるが、引張力を受ける柱よりも、圧縮側の柱のモーメントの方が数%大きい。
- ③島木と柱との長ほぞ接合部は曲げモーメントはほとんど伝達されておらず、ほぼピン接合とみなすことが可能である。
- ④島木や貫のモーメント分布は額束の付近で乱れを生じた。特にこの傾向は断面の大きい島木において顕著であった。額束がロッキングで変位する結果、貫と島木を押し広げるためと推定され、その影響は剛性の大きい島木のモーメント分布の乱れとして顕在化しやすい。

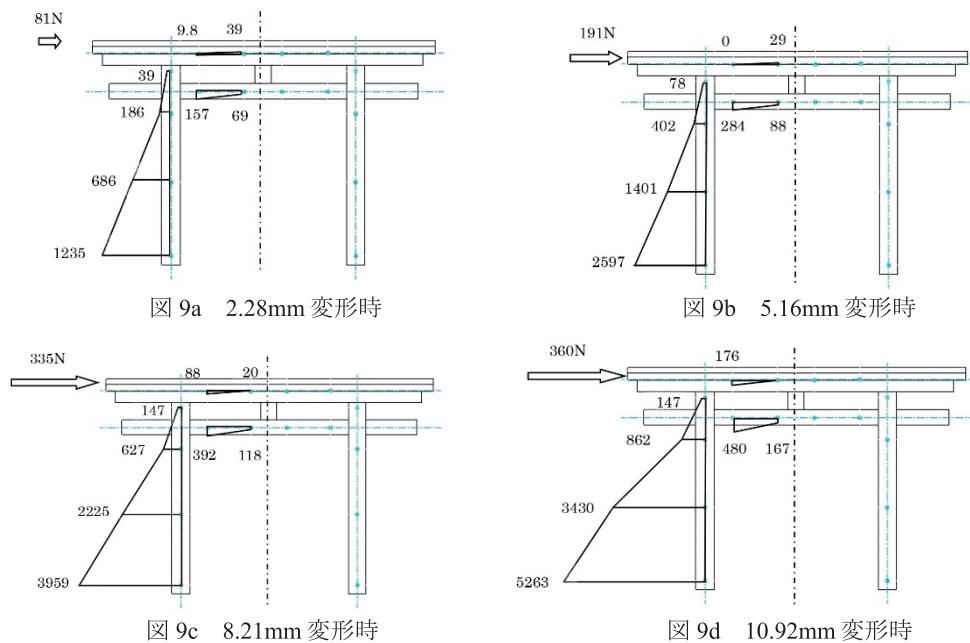


図 9 三和土試験体の各変形時のモーメント分布図(単位 : N·cm)

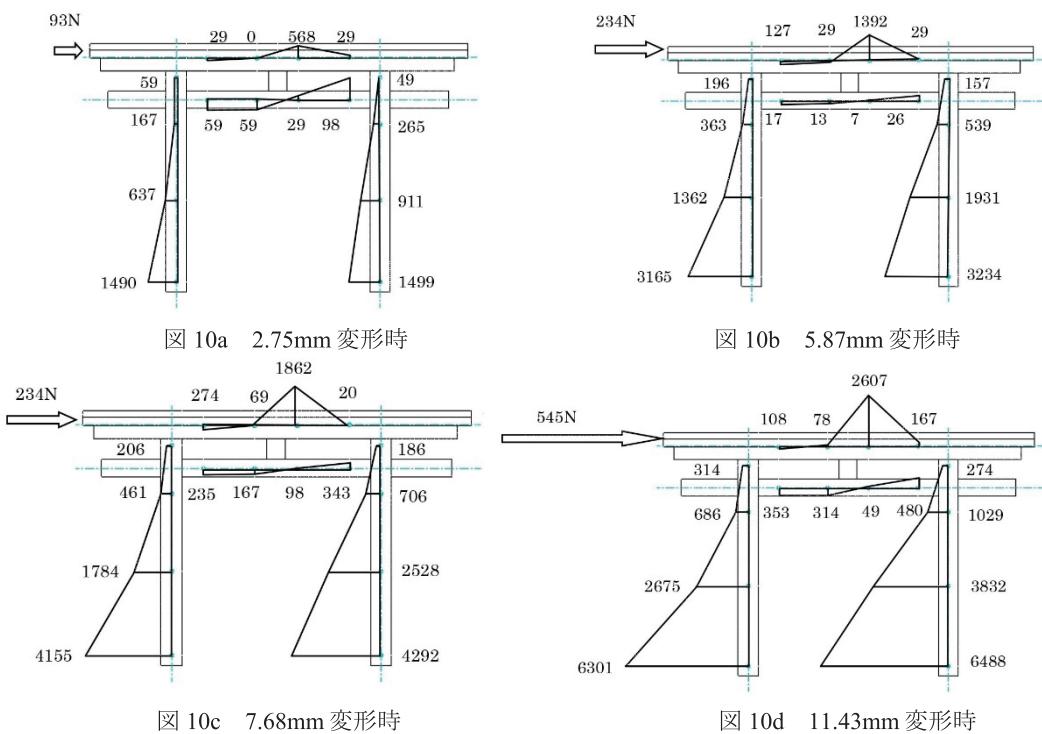


図 10 版築試験体の各変形時のモーメント分布図(単位 : N·cm)

#### 4. 単調載荷実験結果

ループ載荷実験後に鳥居を一方向に単調載荷した結果を図11に示す。最終的に三和土で変位41.6mm荷重の850N、版築で変位50.7mmの荷重1205Nとなり版築の方が三和土に比べて約40%も強い結果となった。

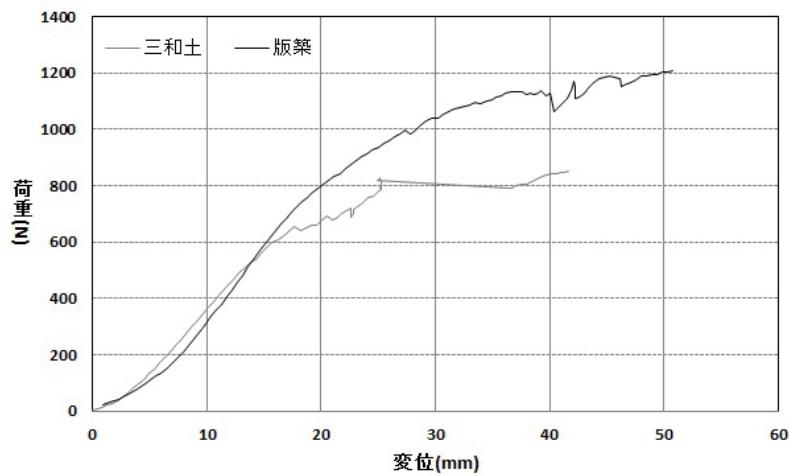


図 11 単調載荷試験結果

特に写真6a～cの三和土の場合、地盤面に多数のひびが入り枠の端まで到達しているものがみられたが、版築の場合は写真7aのように地盤面にひび割れが入ることがなかった。しかしながら、写真7bに示すように最大変形時には曲げモーメントが最大になる柱の根元で割れが生じていた。

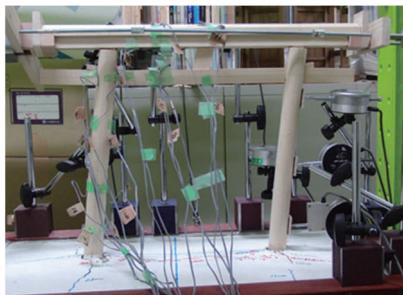


写真 6a 三和土 41.6mm 変形

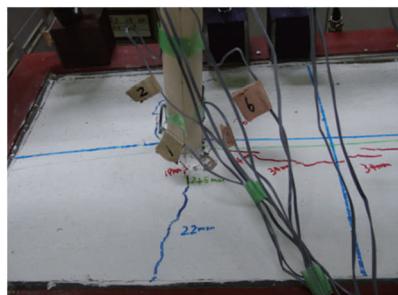


写真 6b 三和土左側ひび割れ状況

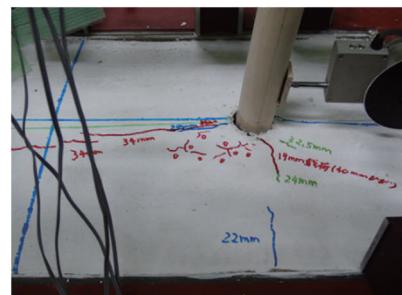


写真 6c 三和土右側ひび割れ状況

写真 6 三和土最大変形時の状況

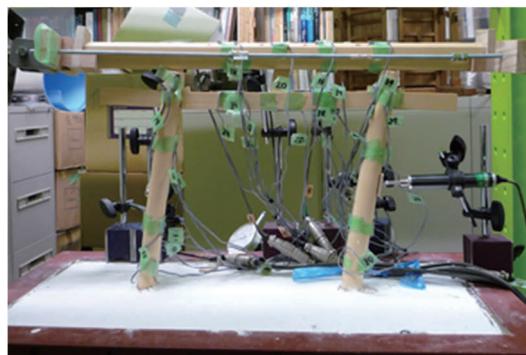


写真 7a 版築 50.7mm 変形



写真 7b 最大変形時の載荷側柱根元状況

写真 7 版築最大変形時の状況

## 5. まとめ

2種類の地盤条件で、掘立柱形式の春日型木造鳥居の水平載荷試験を行った結果、以下の知見を得た。

### (1) 荷重－変位に関して

深草土を用いて、伝統的な三和土と版築の2種類の試験地盤を作成して、埋め込み柱を施工した。実験では版築工法の方が耐力が大きかった。これは、三和土が2cmづつ断面の大きい角材で固く締上げていくのに比べ、版築が10cmづつ土を入れて細い丸棒で少しづつ固めていくことにより土全体が一体化しやすくより強固になったのではないかと考えられる。

### (2) 曲げモーメント分布に関して

掘立形式の木造鳥居は外観的には貫や島木・笠木が2本の柱を剛に結合しているように見えるが、実験の結果では、

- ①島木や笠木は曲げモーメントの伝達性能はほとんど有していない。
- ②柱頭の長ほぞは両柱間の距離一定にたもって、水平力を均等に配分する機能を有する。
- ③貫は初載荷ループや漸増載荷時で最大変形に向かう場合には若干の曲げモーメントを伝達するが、曲げモーメントの伝達は小さい。

### (3) 掘立柱の耐力に関して

今回行った実験では、以下のような知見を得た。

- ①埋め込み長さが柱の径の3倍以上の版築地業では、柱の破壊強度まで曲げモーメントを指示できる。
- ②三和土の場合は、柱の破壊よりも地業のせん断破壊が先行し、耐力はそれによって決まる。
- ③貫、島木は柱頭の曲げモーメントをほとんど伝達しないため、独立柱構造に近い。そのため、面内、面外とも曲げ強度の差異は生じない可能性がある。

### (4) 今後の課題

面内方向の水平力に対しては上記の結果が得られたが、上下の衝撃力によって柱頂部の接合部が外れた場合には島木や笠木が落下する可能性は否定できない。また、高温多湿の我が国の風土においては、木材の腐朽損傷とりわけ埋め込み部の腐食が掘立柱の急速な耐力低下の最大要因となり得る。そのため、木材の効果的な腐朽対策の技術開発を行えば、木造掘立柱には大きな可能性があると考えられる。

**謝辞：**本研究の地盤模型の製作にあたっては選定技術保持者（古式京壁）の佐藤治男氏の指導を受けました。

また、関西大学大学院理工学研究科高度化研究費の助成を得た。

## 参考文献

- 1)渋谷五郎、長尾勝馬：日本建築 下巻、学芸出版社、P264-269、1959年。