

強震応答実験装置の利用による実験報告書

伝統木造軸組の耐震補強検証実験

立命館大学グローバル・イノベーション研究機構

1. はじめに

伝統木造建築物における柱の傾斜復元力特性は、重要な耐震要素の一つであり、その力学的メカニズムは、既往の研究によって徐々に解明されつつある。本実験では柱の傾斜復元力特性に着目して、柱脚部の耐震補強による復元力と変形性能の向上について実験的に検証する。

2. 実験方法

2.1 試験体

試験体は 4 本柱 ($\phi 294$ mm) の立体軸組であり、横架材は足固め (128×220 mm)、通肘木 (88×100 mm) と桁に相当する牛引き梁 (280×320 mm) あるいは土居桁 (280×528 mm) があり、短手方向には虹梁 (100×200 mm) が架かる。柱は礎石立てとし、柱頂部の土居盤で桁を受ける。礎石の高さは 200 mm とし、礎石上面から各部材までの高さは、足固めが 360 mm、通肘木が 3110 mm、柱頭が 3580 mm、桁が 4202 mm である。柱の材種はヒノキ、横架材はベイヒバとした。屋根重量に相当するコンクリート製のおもりはボルトで桁に固定した。図 1 に試験体軸組図、写真 1 に試験体全景を示す。

補強方法は、図 2 に示す補強部材を図 3 のように取り付けることで、柱脚部の断面を $\phi 300$ mm から $\phi 500$ mm に補強した。取り付け方法は、補強部材と柱が接触する面に深さ 10 mm \times 幅 30 mm の溝に鋼製の金輪をはめ込み、さらに補強材の外周部に鋼製のバンドを巻いて柱と一体となるようにした。補強部材の寸法は、高さ 140 mm とし、幅は 100 mm、柱 1 箇所あたり 4 部材の構成とした。

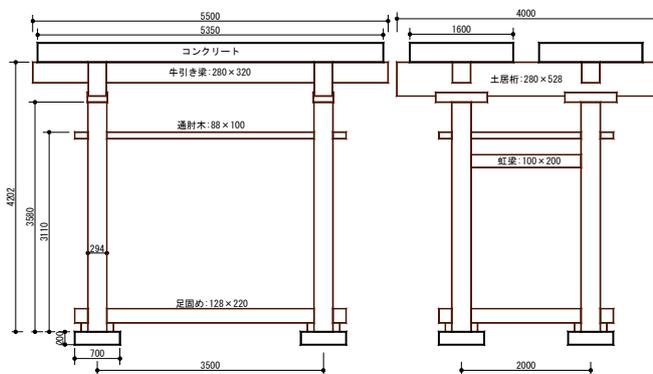


図 1 試験体軸組図



写真 1 試験体全景

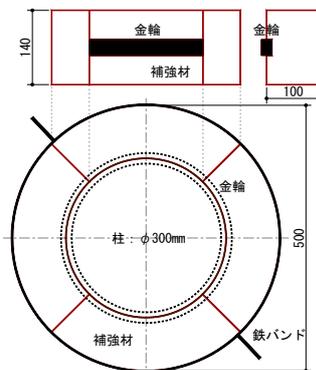


図 2 補強部材詳細図



写真 2 補強部材



写真 3 補強の取り付け状況

2.3 計測方法

計測は、各部変位として試験体の頂部水平変位、柱脚部の移動変位、柱頭柱脚の浮き上がり変位、柱-横架材の回転変位、各層加速度として、桁レベル、柱頭レベル、足固めレベル、振動台レベル、各部応力として、柱頭部、柱脚部、柱梁接合部近傍のひずみ等、計 112 点について計測を行った。計測のサンプリングは、振動実験については 100Hz、水平加力実験については 2Hz とした。



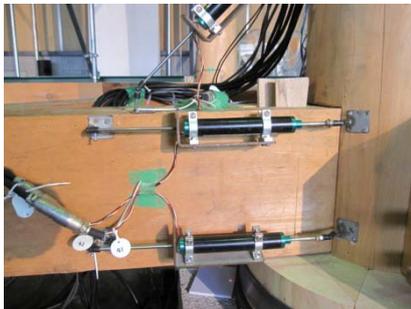
(a) 頂部水平変位



(b) 柱脚移動変位



(c) 柱脚浮き上がり変位



(d) 柱-横架材回転変位



(e) 柱頭レベル加速度



(f) 接合部ひずみ

写真 4 計測状況

2.5 実験工程

実験は試験体上部のおもりをアクチュエータで水平に加力し、変位制御により行った。目標変位は、90 mm、180 mm、210 mmとし、正負交番繰り返し加力とした。試験体上部に設置したおもりは、傾斜復元力特性に対する鉛直荷重の影響を把握するために、段階的に増設しながら実験を行っている。試験体の名称、おもり重量、補強の有無の関係を表 1 に示す。なお、実験は同表に示す順に試験体 A から実施している。水平加力実験に先立って、試験体の動特性を把握するために、スイープ波加振 0.3-20Hz、ホワイトノイズ波加振 0.01-30Hz も、補強材を取り外した NC 試験体を除く試験体で行っており同表に併せて示し、入力したホワイトノイズ波を図 3、加力サイクルを図 4 に示す。

表 1 試験体名称と状態

| 呼称 | おもり(kN) | 補強有無 | 実験 | |
|----|---------|------|------------------------------------|----------------------------|
| A | 109.6 | ○ | スイープ波0.3-20Hz ホワイトノイズ波0.01-30Hz | 水平加力実験 90mm、180mm、210mm |
| B | 148.9 | ○ | | |
| C | 188.1 | ○ | | |
| NC | 188.1 | × | | |

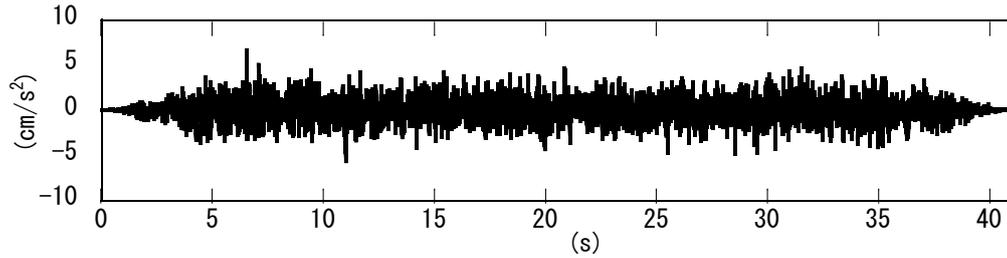


図3 ホワイトノイズ入力波

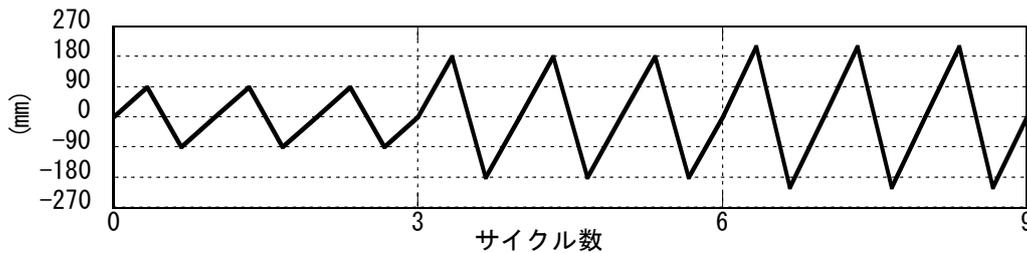
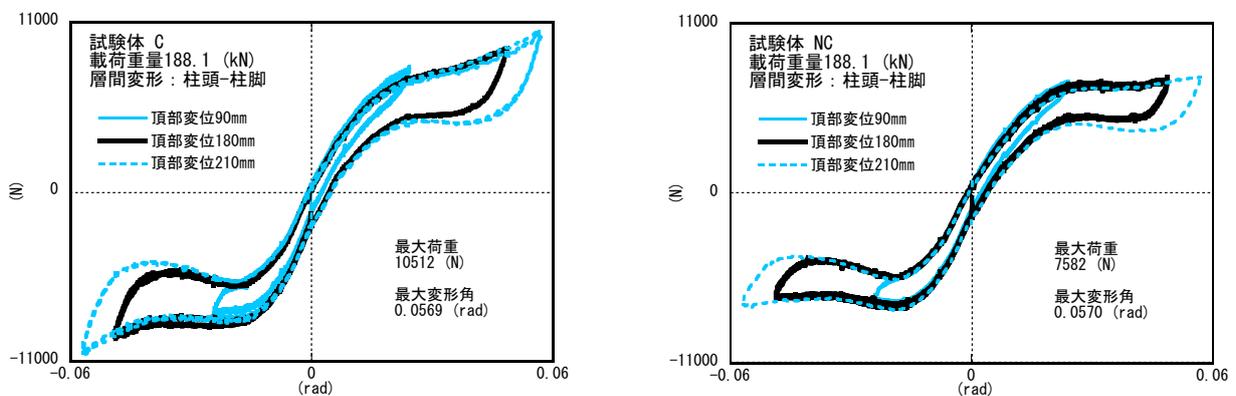


図4 加力サイクル

3. 実験結果

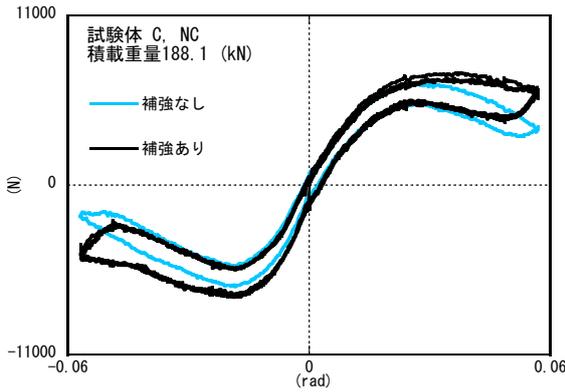
実験から得られたデータに基づいて鉛直荷重 188.1kN で、補強ありの試験体 C の荷重-変形角関係を図 5(a)、同様に、補強無しの試験体 NC を同図(b)に示す。荷重はアクチュエータ先端に取り付けたロードセルの計測値であり、変形角は柱脚と柱頭で計測された変位量から層間変位を算出し、計測間距離で除した値である。またそれぞれの最大値により原点補正を行っている。最大荷重は 105.12kN で、その時の変形角は 0.0569rad であった。各目標変位について 3 回繰り返して加力しているが、目標変位ごとの履歴においては、ほとんど差異は無いといえる。図 5 に示す軸組架構全体の復元力から、横架材による曲げモーメントを減じてものを柱の傾斜復元力として図 6 に示す。横架材の曲げモーメントは、横架材端部で計測したひずみゲージによる値から算出している。同図には、柱脚部の補強材を取り外した NC 試験体の実験結果を併せて示している。同図において、柱脚部の補強を行った試験体 C の最大復元力は変形角 0.0367rad で 72.8kN、最大変形時の復元力は 62.8kN であるのに対して、補強なしの試験体 NC は、それぞれ 66.0kN(0.0262rad)、36.7kN であり、変形が大きくなるに従って、復元力の差が大きくなる傾向である。



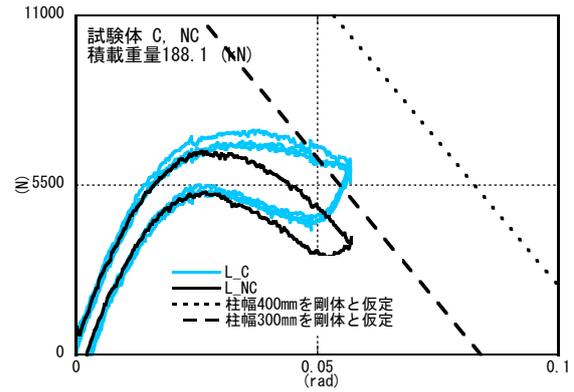
(1) 補強有り (試験体 C)

(2) 補強無し (試験体 NC)

図5 水平加力実験による荷重-変形角関係

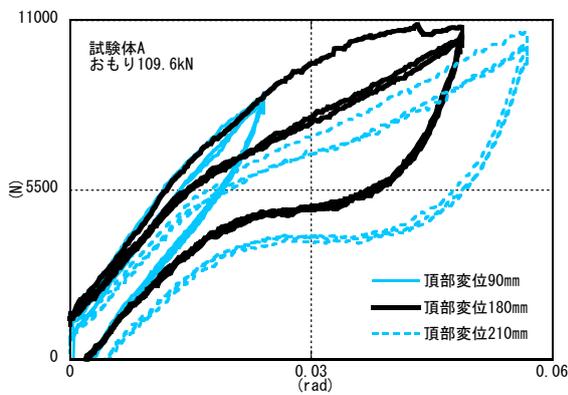


(a) 補強の有無による比較

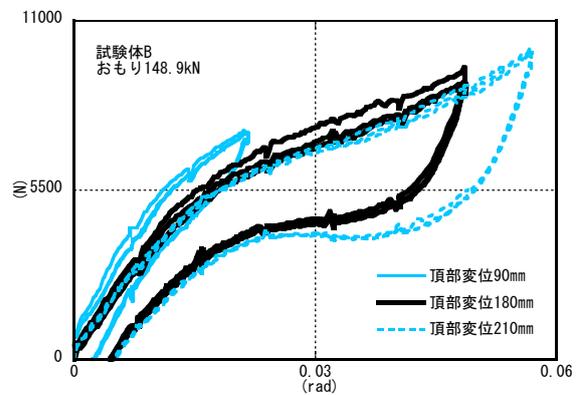


(b) 剛体仮定との比較

図6 水平加力実験による柱の傾斜復元力(試験体 C, NC)



(a) 試験体 A



(b) 試験体 B

図7 水平加力実験による履歴特性(試験体 A, B)

しかしながら図 6(b)に示すように、剛体変形とした場合の荷重-変形角関係と比較すると、柱脚断面の増加に相当する効果は得られず、小変形時にはほとんど効果が無い。ここで最初に実験を行った試験体 A と、その次の試験体 B の水平加力実験による履歴を図 7 に示す。同図(a)において、目標変位 180 mmの時の 1 回目のループに対して 2 回目以降は大きく下回ることが分かる。一方で同図(2)に示すように、それ以降の試験体では、3 回のループは安定して荷重、変形角ともに差異はない。写真 5 に実験後および実験中の試験体観察による損傷状況を示す。同図(a)は実験後に取り外した補強部材である。金輪をはめ込んだ溝の下部がせん断によって割裂していることがわかる。図 7(a)に示した履歴の状況から、補強材は最初の実験で割裂したと考えられる。ただし補強材を取り外した柱脚部の状況から、足固め-柱接合部の仕口や補強による金輪をはめ込んだ溝部分には、ほとんど損傷は確認されなかった。写真 5(b) は実験中の柱脚部の様子であり、補強材同士にずれが生じていることを確認した。他に、同写真(c)に示すように、足固め-柱接合部の雇いほぞを留める車知栓に割れを確認した。



(a) 補強部材のせん断割裂



(b) 補強部材のずれ



(c) 足固め接合部車知栓の割れ

写真5 水平加力実験による試験体各部の損傷

4. まとめ

社寺建築物を対象とした耐震補強方法の効果を検証するために、伝統木造軸組による実大試験体を用いた動的实验および水平加力実験を行った。耐震補強は柱の傾斜復元力特性に着目して、柱脚部の断面を大きくすることで、復元力と変形性能の向上を試みた。補強方法として、柱脚部に柱の形状に加工した木材を取り付ける方法を提案した。実験は試験体頂部の変位を制御しながら、段階的に変形させつつ、層間変形角が約 $1/20\text{rad}$ 至るまで行い、その際の各部の変位、加速度、ひずみを計測した。その結果、補強した試験体では、最大耐力が向上したこと、変形性能が向上し得ることを確認した。また各部の損傷を確認し、大変形時においても脆性的な破壊が生じないことが検証された。しかしながら初期の変形から補強部材に部分的な割裂が生じることで、十分な性能を発揮されていない可能性があり、補強部材の取り付け方法を検討する必要がある。今後の課題として、補強部材の加工方法や材料強度メカニズムを詳細に検討するとともに、取り付け方法の改良が必要である。また地震波加振による動的实验によって地震時挙動を把握することも必要である。