

伝統木造建物における柱脚の滑りを考慮した解析モデルの検討

Examination of Analysis Model Considering the Characteristics of Slipping Column Bases in Traditional Wooden Buildings

中本蒼馬¹・向坊恭介²・吉富信太³

Soma Nakamoto, Kyosuke Mukaibou and Shinta Yoshitomi

¹立命館大学大学院 理工学研究科環境都市専攻 博士課程前期課程 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

Graduate Student, Graduate School of Science and Engineering, Ritsumeikan University

²鳥取大学助教 工学部社会システム土木系学科 (〒680-8550 鳥取市湖山町4-101)

Assistant Professor, Depart. of Management of Social Systems and Civil Engineering, Tottori University

³立命館大学教授 理工学部建築都市デザイン学科 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

Professor, Dept. of Architecture and Urban Design, Ritsumeikan University

It is an urgent problem to estimate the seismic performance of traditional wooden buildings in order to give them enough performance especially to avoid severe damage of traditional wooden buildings due to expected large earthquakes. The purpose of this study is to examine the validity of the seismic analysis method by comparing responses of experimental shaking table test and numerical analysis. For this purpose, detailed three-dimensional analysis models are conducted that consider the sliding and uplifting characteristics at the base of column of shaking table test specimen with eccentricity and soft floor. Based on the constructed analysis models, the effects of model parameters, i.e. wall stiffness, floor stiffness, base stiffness and base friction ratio, are examined.

Keywords: *traditional wooden buildings, slipping column bases, three-dimensional analysis model, the earthquake response*

1. はじめに

近年、発生が予想される地震に対して、伝統木造建物の構造性能の把握と耐震化は重要な課題となっている。伝統木造建物は柱脚と土台が固定されておらず、滑りや浮き上がりが生じることが知られている。柱脚と礎石の摩擦係数については、静的載荷試験による推定¹⁾や、伝統木造建物の振動台実験に基づく検討がなされている²⁾。文献2)においては、伝統木造建物の地震時の柱脚滑りにより、上部建物の加速度や変形が低減する効果について振動台実験によって検討されている。こうした効果は解析的にも確認されており³⁾、伝統木造建物の振動台実験における柱脚の滑りを解析モデルを用いて推定する検討もなされている⁴⁾⁶⁾。これらの研究においては、実験に基づく復元力の設定である程度実現象を推定できることが確認されている。

一方、木造建物の限界耐力計算では剛床を仮定した等価1質点系モデルが用いられ、柱脚特性を考慮した方法も提案されているが⁷⁾、実建物で生じる偏心等の現象との整合性に関する検討は十分ではない。本研究では、伝統木造建物の既存の設計法や耐震診断法の妥当性を検討するために、振動台実験を参考に汎用的な復元力特性に基づく立体解析モデルを構築し、実験の再現性に加えて、壁や床、柱脚の特性を系統的に変動させることで、これらのパラメタが柱脚の挙動や建物全体の地震時応答に及ぼす影響について検討する。

2. 振動台実験試験体に基づく柱脚特性を考慮した伝統木造建物の立体解析モデル

これまでに、伝統構造木造建物の地震時挙動に対する柱脚仕様や床の仕様、壁の配置の影響を明らかにす

るために実大振動台実験が実施されている²⁾。本研究ではこの実験で用いられたX方向6間、Y方向2間の1層建物の試験体（図1）を参考にし、汎用構造解析ソフトSNAPを用いて立体解析モデルを構築する。本稿では、土台形式（柱脚固定）と足固め形式（柱脚自由）を対象とし、それぞれ剛床仕様・偏心が最も大きい壁配置の試験体（図2）とする。実験においてホワイトノイズ及びJMA神戸波入力時に振動台において計測された加速度波形を図3から図6に示す。本稿の解析モデルの時刻歴応答解析において、地動入力としてこれらの加速度波形を用いる。JMAKOB地震波は3方向同時に入力を行い、応答の大きな40秒間を用いる。

解析モデル作成において、接合部・土壁・床・柱脚部分をばねモデルとして表現する（図7・図8）。木材の比重は0.5、ヤング係数は8000N/mm²、寸法は、柱および足固めは120×120mm、大引は90×90mm、胴差は120×270mmとする。床の復元力特性は文献2)に基づいて設定し、床荷重は0.20kN/m²とする。壁は厚さ26mmの乾式土壁パネルとし、復元力特性は文献8)に基づいて設定し（図9）、壁荷重は0.17kN/m²とする。モデルでは初期剛性比例型の減衰を用い、0.02と設定する。

通し柱と梁の接合に用いられた雇ほぞしちち栓打ちと管柱と足固めの接合に用いられた長ほぞでは、接合部の並進方向にずれが生じないように大きな剛性を与え、回転ばねの復元力特性は文献7)に基づき設定する。

柱脚については、水平方向に固定されておらず、摩擦力を超えた力が作用すると滑りが生じる。摩擦力を模擬するために初期剛性の大きい標準バイリニアの単軸ばね（図10）をXおよびY方向に用い、長期荷重時の柱脚の鉛直反力に摩擦係数 μ を乗じて柱脚ごとに求めた摩擦力を降伏荷重として与える。

また柱脚は鉛直方向にも固定されておらず、地震時に浮き上がりが生じる。浮き上がりを模擬するために引張側の剛性が0で、圧縮側のみ弾性剛性を持つ単軸ばねモデルを使用する（図11）。なお、80kN/mmとする。柱脚特性を考慮した足固め形式モデルの解析では、長期荷重による浮き上がりの抑止効果を表現するために、各柱位置に支点反力に相当する鉛直下向き一定の時刻歴荷重を与える。

土台形式モデル（柱脚固定）においては、床剛性や壁剛性の大小が地震時挙動に及ぼす影響について検討し、足固め形式モデル（柱脚自由）においては、柱脚の摩擦係数 μ および初期剛性 k （基準パラメータ³⁾は $\mu=0.36$ 、初期剛性 $k=10\text{kN/mm}$ ）の大小が地震時挙動に及ぼす影響について検討を行う。



図1 振動台実験における試験体

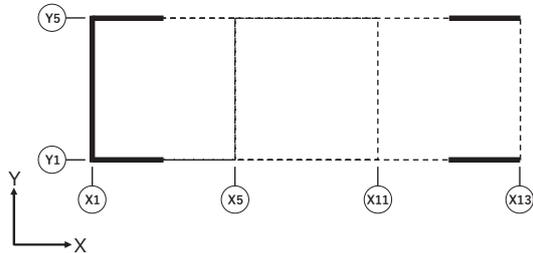


図2 壁配置概略図

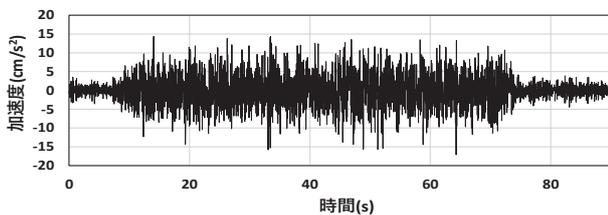


図3 ホワイトノイズ波入力時の振動台加速度

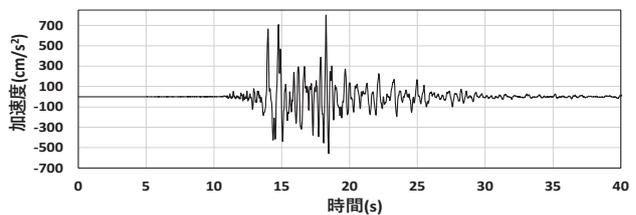


図4 JMAKOB地震入力時の振動台加速度 (X方向)

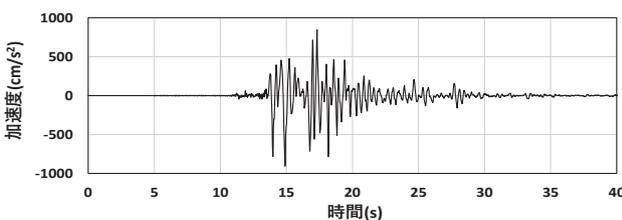


図5 JMAKOB地震波入力時の振動台加速度 (Y方向)

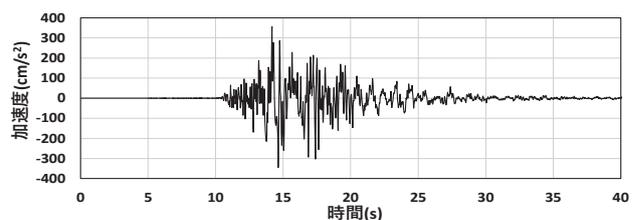


図6 JMAKOB地震波入力時の振動台加速度 (Z方向)

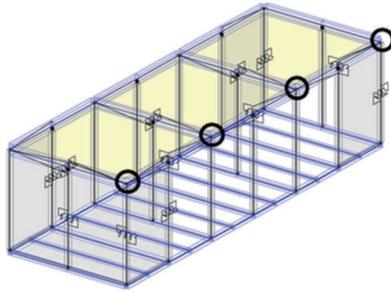


図7 土台形式モデル

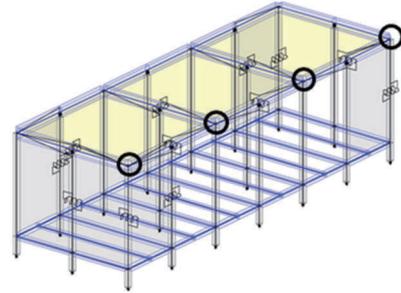


図8 足固め形式モデル

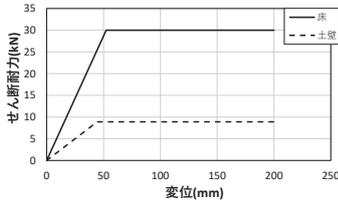


図9 土壁と床の復元力特性

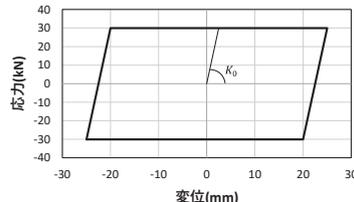


図10 柱脚モデル (滑り)

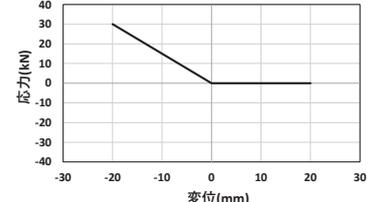


図11 柱脚モデル (浮き上がり)

3. 振動台実験と解析モデルの地震時挙動の比較

(1) ホワイトノイズ波入力時の伝達特性の検討 (土台形式モデル)

本節では、ホワイトノイズ波 (図3) 入力時の土台形式モデルの柱頭での応答加速度のフーリエ変換を、入力加速度のフーリエ変換で除したスペクトル比を用いて伝達特性の比較を行う。図12に、実験および解析のスペクトル比を示す。図より、1次固有振動数は概ね一致しているがピーク値は実験に比べて解析の方が大きく、2次固有振動数は大きくずれている。文献2)では、初期剛性比例型の減衰よりレイリー減衰の方が適合することが指摘されており、適切な減衰のモデル化については引き続き検討が必要である。大きくずれている2次固有振動数において、壁が多く使用され剛性の大きいX1構面のピークが最も大きいため、壁の初期剛性が実験時の試験体に比べて小さいと考えられる。また、ほかの構面では、床の復元力についてX、Y両方向に文献2)から得られた初期剛性を用いているため、過大な剛性となっている可能性がある。

(2) JMAKOBÉ地震入力時の応答に及ぼす床剛性と壁剛性の影響 (土台形式モデル)

前節より壁剛性および床剛性の高低による解析結果への影響が考えられるため、本節では、JMAKOBÉ地震 (図4～図6) 入力時の各構面の最大応答に対して、解析モデルの壁および床の初期剛性が及ぼす影響を検討する。JMAKOBÉ地震入力時の最大加速度および最大変形角の関係を図13に示す。加速度ではX1構面とY構面での応答が実験に比べて小さく、他の構面では大きくなる。各構面ごとの関係はX5～X13構面間での関係は等しくなっているが、X1～X5構面間では実験と異なる。変形角ではX構面は実験に比べて解析のほうが大きくなり、Y構面はおおむね一致している。

図14に、基準モデルの壁剛性のみを2倍にした時の各主要構面における最大応答を示す。最大応答加速度では基準モデルに比べてX構面間での関係は一致しているが、応答値は実験試験体よりかなり大きくなる。一方、Y構面では基準モデルよりも応答値が大きくなり、試験体の応答値に近づき、特にY5構面は一致する。応答変形角においてX1およびY構面では基準モデルよりも応答値が小さくなり、他の構面ではほとんど変化がなかった。実験試験体と比べてX構面間での関係は一致しなかった。また、解析モデルではY1およびY5構面の剛性が等しいため、実験とは異なりY構面間での関係は一定となった。

図15に、基準モデルの床剛性のみを0.5倍にした時の各主要構面における最大応答を示す。最大応答加速度では基準モデルに比べてX構面間での関係は近づき、X1構面での応答値は一致した。しかしX1構面から遠いほど応答値の誤差が大きくなる。また、Y構面の応答値は基準モデルより大きくなるが、実験と一致はしない。最大変形角においてX1構面では応答値が小さくなり、X13構面は大きくなったが、ほかの構面では大きな変化は見られない。X5～X13構面間での関係は実験と一致しており、Y構面間では実験試験体とおおむね一致しているが、X1～X5構面間では大きく異なるという結果が得られた。以上より解析モデルの壁の初期剛性を大きくするか、床の初期剛性を小さくすることで、偏心の影響は実験の試験体と類似した。

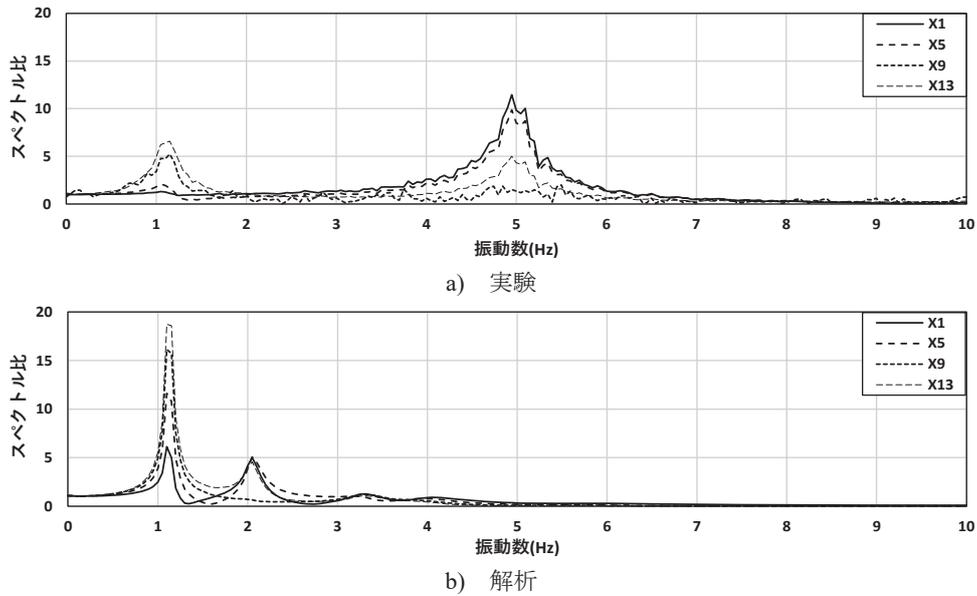


図 12 フーリエスペクトル比 (ホワイトノイズ入力時)

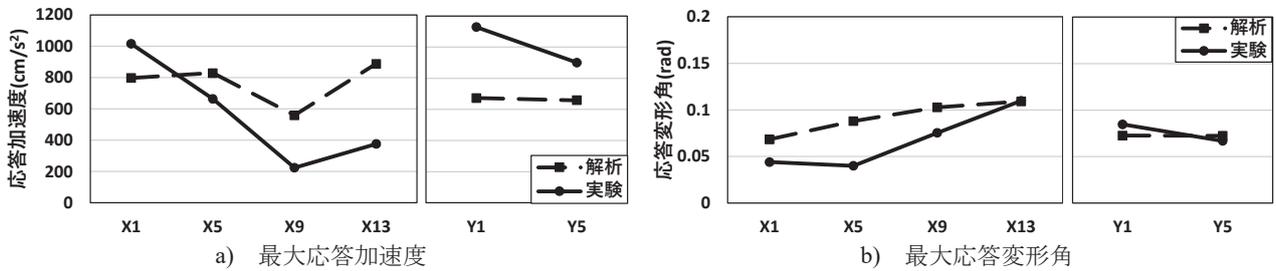


図 13 土台形式モデルでの各主要構面最大応答

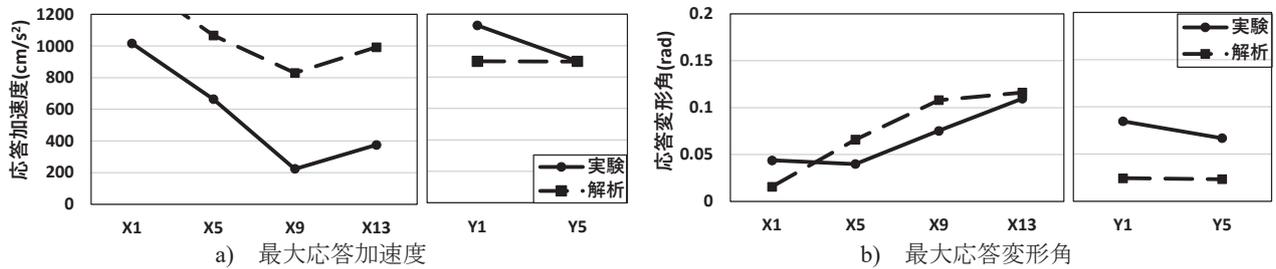


図 14 各主要構面最大応答 (壁の初期剛性を2倍にした場合)

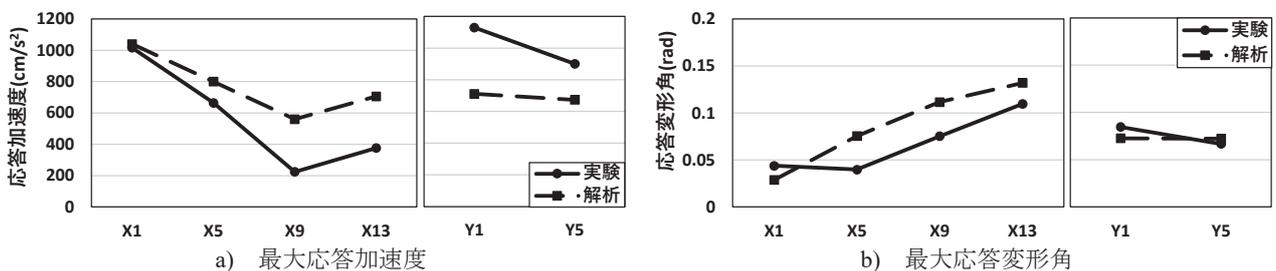


図 15 各主要構面最大応答 (床の初期剛性を0.5倍にした場合)

(3) JMAKOBE地震入力時の応答 (足固め形式モデル)

足固め形式にJMAKOBE地震を入力した際のX1Y1における柱脚滑りとX1構面の応答変形角を図16・図17に示す。実験に比べて基準モデルでは滑り量が小さくなるため、より滑り量が大きくなるように、柱脚ばねの初期剛性を小さくした例 ($k=1\text{kN/mm}$) と、摩擦係数を小さくした例 ($\mu=0.2$) の結果も示す。図より滑り出す時刻やピークの位置はおおむね一致しているが、12秒以降は実験と解析での応答の差が大きいことがわかる。実験の応答波形では低振動数成分が早く減衰して高振動成分が比較的長く継続する。逆に解析の応答

波形では高振動成分が早く減衰して低振動数成分が長く継続する。この傾向は図 12と対応しており、2次固有振動数が実験に比べて低振動となっているためである。図 18の応答加速度では、同様な傾向がより顕著にみられる。20秒以降の減衰では $\mu=0.2$ の時は実験と良好な対応を示すが、 $k=1\text{kN/mm}$ では大きく異なる。

(4) 柱脚剛性と摩擦係数が建物応答に及ぼす影響（足固め形式モデル）

前節の例で、柱脚ばねの剛性と摩擦係数の設定が滑り応答量に及ぼす影響の違いがみられたため、本節でより詳細に検討を行う。解析において柱脚の摩擦係数と初期剛性を基準パラメータから変化させた（ $\mu=0.1\sim 1.0$ 、 $k=1.0\sim 10\text{kN/mm}$ ）際のX1Y1柱脚部でのY方向最大滑り量と、X1構面での最大応答変形角および柱頭部最大応答加速度の関係について図 19に示す。柱脚での滑り量が大きいほど、最大変形角と加速度がいずれも低減することが確認できる。最大加速度では滑り量が小さい時にばらつきが大きくなる傾向が現れた。また、図 19より、初期剛性と摩擦係数が減少するといずれも最大の滑り量は大きくなるが、滑り量に対する初期剛性の変化の影響は大きく、摩擦係数の変化の影響は小さい。

比較のため図 19中に土台形式と足固め形式の実験結果の関係も示す。なお滑り量0mmが土台形式、滑り量が117mmが足固め形式の結果である。応答低減効果（傾き）は実験と解析でおおむね対応している。

以上の結果では実験と解析では各種応答に定性的には対応が見られたが、変形角や滑り量が小さいときの加速度については定量的な違いがみられる。原因として、図 12に示すように解析における減衰が文献2)と対応していない点や、X1構面が大きく揺れる2次固有振動数のずれによる可能性がある。柱脚滑りに加えて偏心や床変形も考慮するためには、柔床の効果を適切に考慮できる自由度を有したモデルが必要となる。

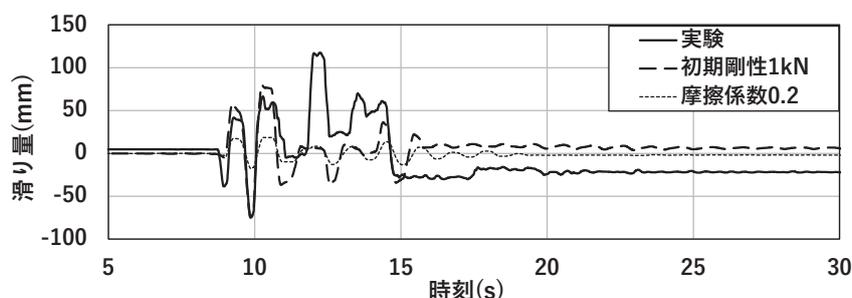


図 16 X1Y1 柱脚部の滑り応答 (JMAKOB E 地震入力時)

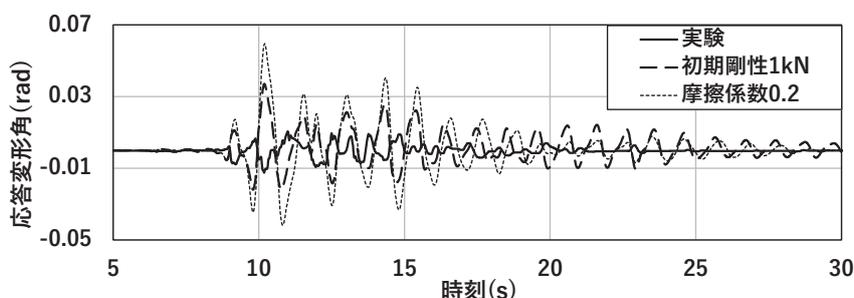


図 17 X1 構面における応答変形角 (JMAKOB E 地震入力時)

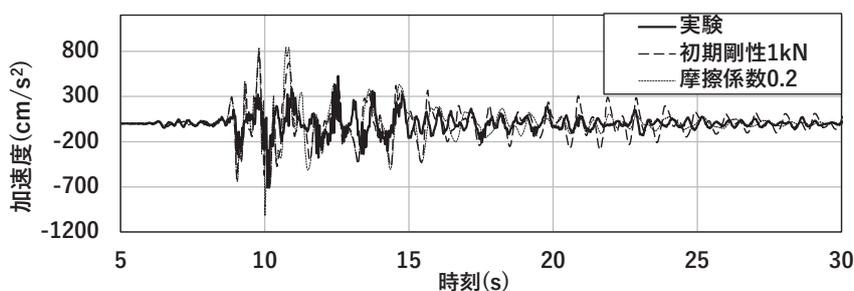


図 18 X1 構面における応答加速度 (JMAKOB E 地震入力時)

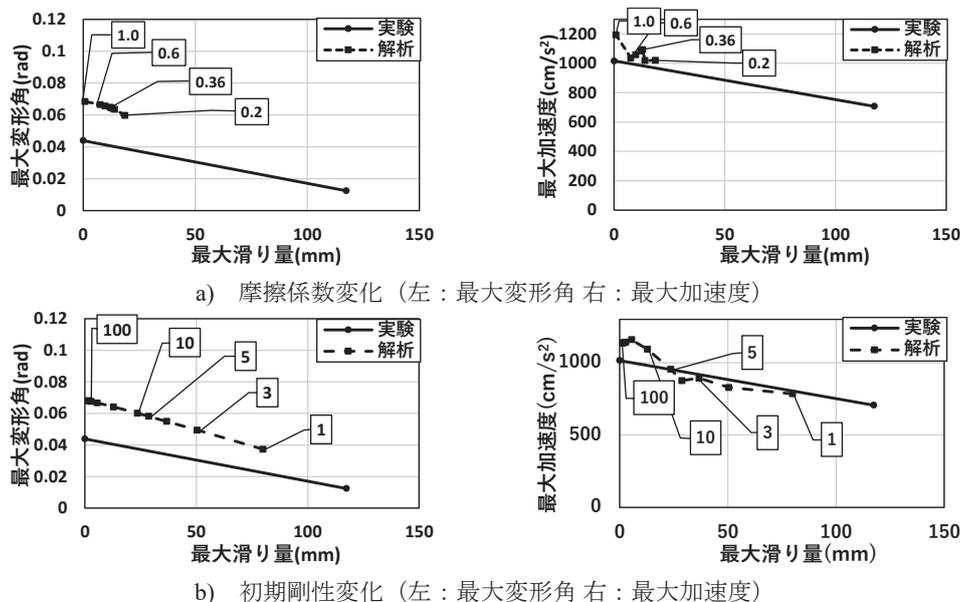


図 19 最大滑り量と応答の関係

4. まとめ

- (1) 柱脚で滑りの生じる伝統木造工法建物の実大動台実験に基づいて、柱脚特性を考慮した立体解析モデルを構築し、時刻歴応答解析と実験の比較を行った。その結果、時刻歴応答解析を実験と完全に一致させることはできなかったが、壁や床の剛性の変化が各応答に及ぼす影響が得られた。
- (2) 柱脚特性の違いが滑り量と建物応答に及ぼす影響を検討し、滑り量が大きいくほど上部構造の変形・加速度がともに低減する傾向が確認された。また、柱脚の水平ばねにおける条件について、摩擦係数に比べて初期剛性のほうが最大滑り量に対する影響が大きいという結果が得られた。
- (3) 本研究では柱脚の摩擦抵抗を長期荷重時の柱脚の鉛直反力、すなわち初期応力のみで決定しているが、地震時には柱脚への軸力は変化しているため摩擦抵抗も変化している。そのような現象の再現が課題となる。

参考文献

- 1) 李 東潤, 遠藤 俊貴, 吉田 亘利, 荒木 慶一, 上谷 宏二: 伝統木造柱脚-礎石間の静摩擦係数, 日本建築学会技術報告集, Vol.15, No.30, pp.405-409, 2009.6
- 2) 向坊恭介: 伝統構法建物の地震応答と耐震性能に関する研究, 京都大学博士論文, 2008.
- 3) 吉富信太・河村拓実・村田晶・向坊恭介: 高山市伝統木造軸組構法建物における柱脚特性を考慮した全体架構モデルの応答解析, 歴史都市防災論文集Vol.10, pp.9-14, 2016.
- 4) 鈴木三四郎, 川端佑輔, 山田明, 向坊恭介, 鈴木祥之: 伝統構法木造軸組みの実大振動実験の解析的再現性, 日本建築学会構造系論文集, Vol.76, No.663, pp.935-942, 2011.5
- 5) 石垣 創, 田守伸一郎, 五十田 博, 中川貴文, 河合直人: 個別要素法を用いた木質構造物の時刻歴応答解析, 日本建築学会技術報告集, Vol.20, No.44, pp.105-110, 2014.2
- 6) 田尻史郎, 稲山正弘, 青木謙治, 中川貴文: 石場建て柱脚滑り挙動を有する伝統構法木造建築物の地震応答推定手法, 日本建築学会技術報告集, Vol.25, No.61, pp.1097-1102, 2019.10
- 7) 伝統的構法木造建築物設計マニュアル編集委員会: 伝統的構法のための木造耐震設計法, 株式会社学芸出版社, 2019.
- 8) 木造軸組構法建物の耐震設計マニュアル編集委員会: 伝統構法を生かす木造耐震設計マニュアル, 株式会社学芸出版社, 2004.