

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

A Study on Structural Response Analysis of Miyajike-juutaku Based on 3D Frame Model
Considering Traditional Base Structure

吉富信太¹・河村拓実²・村田 晶³・向坊恭介⁴

Shinta Yoshitomi, Takumi Kawamura, Akira Murata and Kyosuke Mukaibou

¹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

²財務省中国財務局 (〒730-0013 広島県広島市中区上八丁堀6-30)

Staff, Local Finance Bureaus

³金沢大学助教 理工研究域環境デザイン学系 (〒920-1192 金沢市角間町)

Assistant Professor, School of Environmental Design, Kanazawa University

⁴鳥取大学助教 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒680-8550 鳥取市湖山町4-101)

Assistant Professor, Graduate School of Engineering, Tottori University

There still remain many old traditional wooden structures after sever earthquakes in Japan in spite of their low seismic performance. It has been pointed out that the slide and rift phenomena which happen at the base of traditional wooden structure decrease a damage of the upper structure. In this paper, the effect of the characteristics of traditional wooden structure base is examined through timehistory analysis of 3D detailed analysis models which are given different coefficient of friction at the base. It is demonstrated that slide and rift deformation have inverse proportional relationship.

Keywords : traditional wooden structure, base, slide and rift of the base, 3D structural model

1. はじめに

伝統木造建造物は、柱脚と土台が固定された現代の在来工法と比べて耐震性能が低いにも関わらず、多くの建物が現存している。こうした現象の解明のため、実験あるいは数値解析に基づいて伝統木造建造物の特性把握を試みる研究が多くなされている。木造建物の特徴である大きな変形性能を考慮できる手法として、応答スペクトル法に基づく限界耐力計算法による汎用的な応答評価法¹⁾が提案されており、それを発展させた応答評価法を用いた伝統木造建造物の耐震補強効果の評価もなされている²⁾。

一方、柱脚を地面に固定しない石場建てが地震時にすべることにより、上部構造の応答が低減するによる免震効果についても指摘されている。こうした柱脚のすべりや浮き上がり等の非線形挙動は、現状では時刻歴応答解析によることが一般的である。文献2)の対象建物と同じ岐阜県高山市に現存する重要文化財の宮地家住宅(図1,2)について立体解析モデルによりすべり現象の影響について検討した例もみられる³⁾。しかしながら柱脚の摩擦係数の違いがどの程度応答に影響するのか等の定量的な検討は十分検討されていない。そこで本研究では、文献2,3)と同じ対象建物に対し、伝統木造建造物の柱脚で生じる「すべり」や「浮き上がり」を考慮可能な立体架構モデルを構築し、時刻歴応答解析により、柱脚特性の変化がすべり量や浮き上がり量

また上部建物の応答に及ぼす影響についてパラメトリックに検討する。

2. 柱脚特性を考慮した全体架構モデルの構築

(1) 対象建物

各種非線形復元力特性を扱える汎用構造解析ソフトSNAPを用いて柱脚特性を考慮した立体架構モデル(図3)を構築し、地震波を入力したときの柱脚の挙動を確認することを本研究の目的とする。軸組の柱梁材は弾性要素とする。梁材はヒメコマツ、柱はアカマツを想定し、梁、柱、床のヤング係数はそれぞれ7kN/mm²、11kN/mm²とする。柱梁間の仕口接合部は回転方向のみに自由度を有する回転ばねでモデル化する。仕口や壁の荷重変形関係は文献2)に準ずるものとする。仕口は全て差鴨居を想定するため、本来強軸曲げ、弱軸曲げ、ねじれの各方向で特性は異なるが、ここではいずれも同じ特性を与えるものとする。土壁・板壁等の鉛直構面の耐力要素も、水平方向のせん断変形にのみ作用するせん断ばねとして柱位置に設置する。履歴特性はいずれもバイリニアスリップモデルとする。床・屋根等の水平構面は柔床とし、水平方向のせん断変形にのみ作用するせん断ばねとして梁位置に設置する。履歴特性は板壁の実験に基づき設定する。なお、上記の構面あるいは接合部のモデル化の考え方は、木造建物の立体架構のモデル化では一般的に採用されており⁴⁾⁶⁾、著者らは既往の研究で同等の手順で作成した伝統的木造建築の立体架構モデルの地震時応答および静的荷重時の状態が実際の建物とよく対応することを確認している⁷⁾。建物構造特性の設定値によっては応答の絶対量は影響を受けると考えられるが、本研究の主たる目的は柱脚特性の変化が地震時応答変動に及ぼす影響の分析であるため、本研究では上部建物諸元の影響については直接扱わない。荷重は面荷重として、壁、屋根、床にそれぞれ表1の値を設定する。自重及び積載荷重を、各節点の集中質量に置換して、地震時応答解析に用いる。

(2) すべりに関する柱脚特性のモデル化

柱脚が水平方向に固定されておらず、水平方向の大きな加速度による慣性力によって柱脚部分ですべりが発生する。SNAP上では水平方向の非線形ばねに置き換えるが、摩擦に直接対応する履歴モデルがないため、摩擦力を降伏荷重に読み替えたバイリニア特性で代用する(図4,5)。本来の摩擦であればすべり荷重まで変位は生じないが、本モデルでは初期剛性に対してわずかな変形が生じる。初期剛性の設定によっては上部構造の応答が影響を受ける可能性があるため、初期剛性を変えたケースについて応答を比較する。

(3) 浮き上がりに関する柱脚特性のモデル化

柱脚は重力で長期圧縮力が生じているが、地震時の転倒モーメントにより柱に生じる引張力が長期圧縮力を上回ると、柱脚と基礎が離間し浮き上がる。SNAP上では圧縮のみに有効な鉛直方向の非線形ばねで表現する(図5)。さらに、重力による初期圧縮力を考慮するため、鉛直下向きの一定の時刻歴荷重を外力として作用させる。

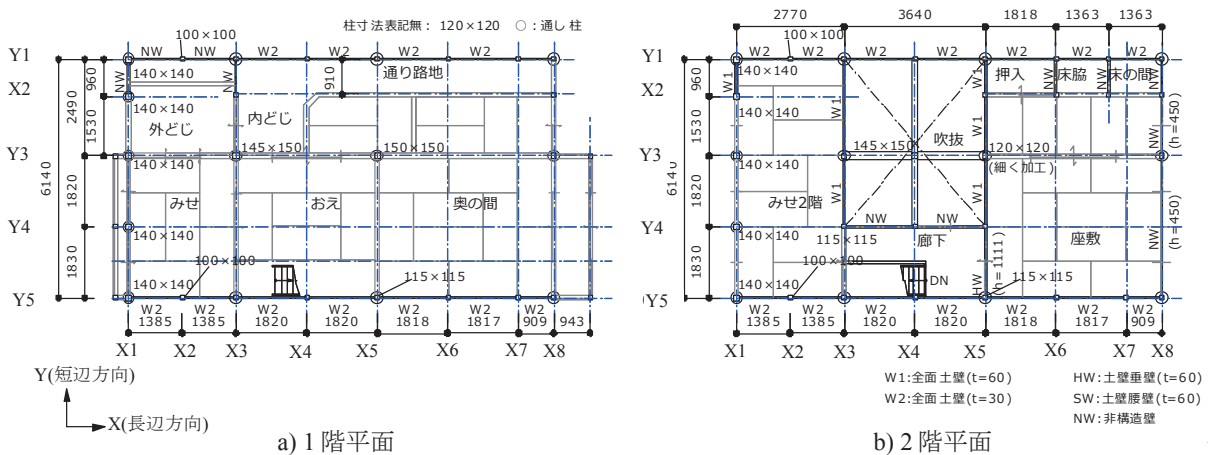


図1 宮地家平面図¹⁾



図2 内観・外観写真¹⁾

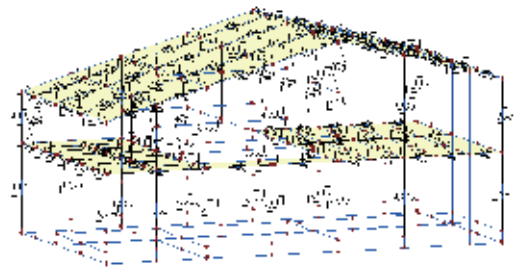


図3 解析モデル

表1 荷重

	壁		屋根	床
	内部壁 60mm	外部壁 30mm	トタン葺き コールタール塗布 野地板	畳 床板 15mm
重量[kN/m ²]	1.262	0.243	0.34	0.25

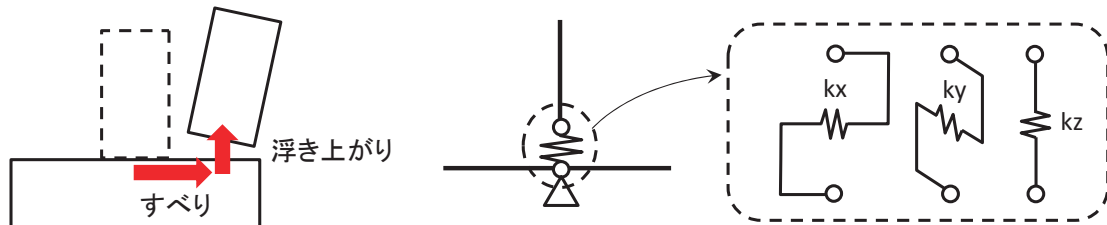
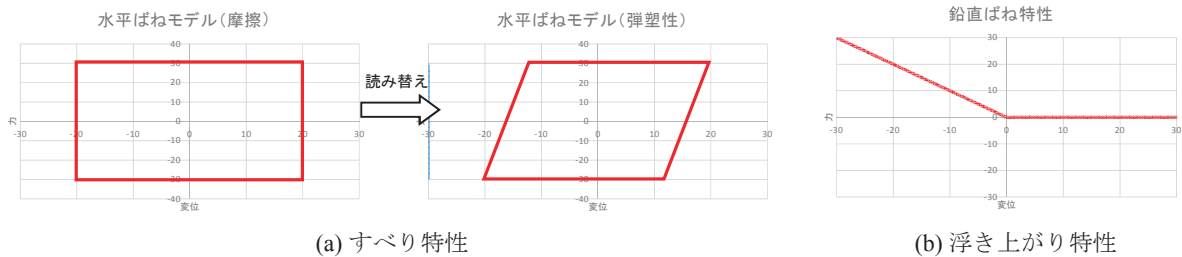


図4 柱脚のモデル化



(a) すべり特性

(b) 浮き上がり特性

図5 非線形ばね特性の概念図

(4) 解析方法と検討項目

入力地震波をJMAKOBE波(継続時間40秒)とした時刻歴応答解析を用い、柱脚固定モデルとの比較により、柱脚特性の違いが柱脚及び上部建物の応答へ及ぼす影響について検討する。パラメタとして摩擦を表すばねの摩擦係数 μ (降伏荷重) および初期剛性を変動させる。着目応答量は地震時最大水平変位及び層間変位とする。(図7)。

3. 数値例題

(1) 柱脚特性モデルの有無の比較

柱脚固定のモデルおよび、 $\mu=0.4$, $k_x=100\text{kN/mm}^2$, $k_y=100\text{kN/mm}^2$, $k_z=80\text{kN/mm}^2$ の柱脚を考慮したモデルの結果を比較する。両モデル全体の変形状況を図6に、最大変位および最大層間変形角を長辺方向について図7に、短辺方向について図8に示す。X3Y3位置での最大層間変形角は、柱脚固定モデル約1/36、柱脚考慮モデルで約1/121であり、柱脚部がすべることにより、上部構造の層間変形角が小さくなること分かる。柱脚を考慮したモデルの長辺方向載荷時の各柱脚位置における最大滑り量を図9に、最大浮き上がり量を図10に示す。すべり量は321.3mm、浮き上がり量は0.1mm以下である。建物の幅の狭い短辺方向の方が浮き上がりが滑り量が少なく浮き上がりが大きいことが分かる。なお、柱脚が礎石から脱落すると柱に甚大な損傷が生じる恐れがあるため、すべりのモデル化及び許容すべり量については更なる検討が必要である。

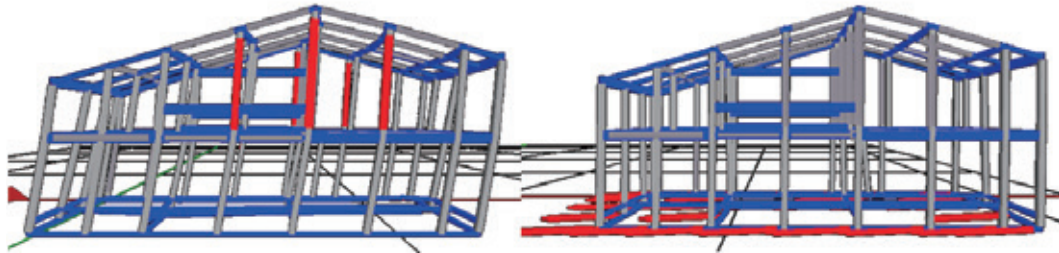


図6 変形概要 (左: 柱脚固定, 右: 柱脚考慮)

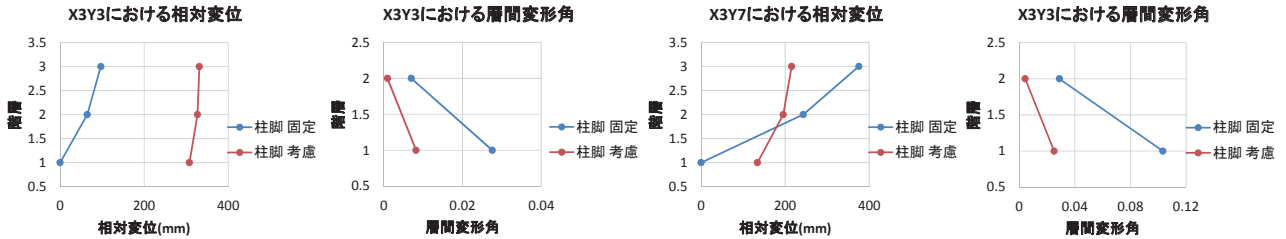


図7 最大水平変位及び層間変位 (長辺方向載荷時)

図8 最大層間変形角及び層間変位 (短辺方向載荷時)

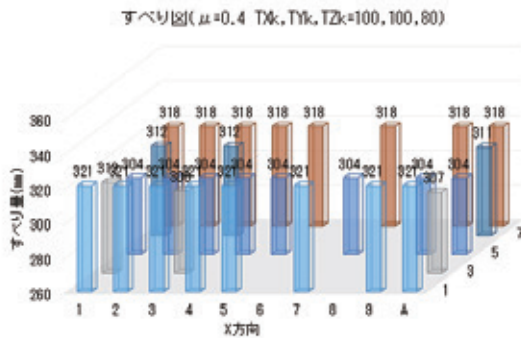


図9 各柱脚位置の滑り量 (長辺方向載荷時)

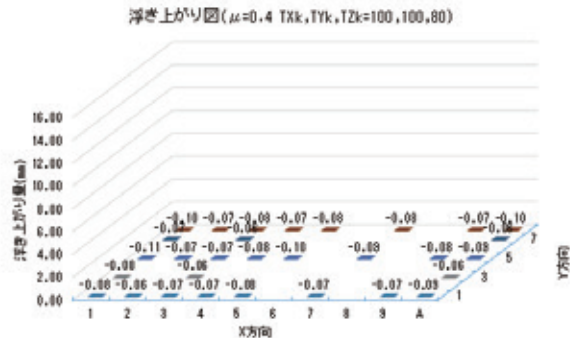


図10 各柱脚位置の浮き上がり量 (長辺方向載荷時)

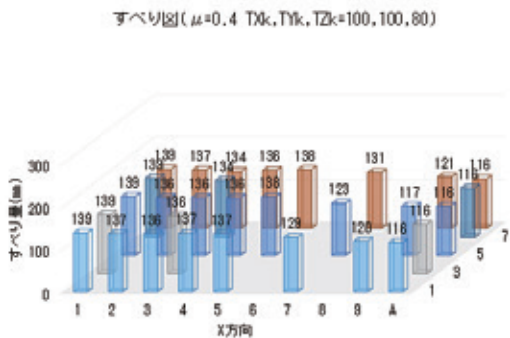


図11 各柱脚位置の滑り量 (短辺方向載荷時)

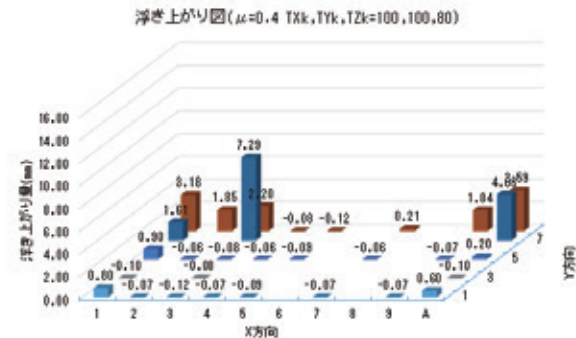


図12 各柱脚位置の浮き上がり量 (短辺方向載荷時)

(2) すべり摩擦係数の影響について

a) $\mu=1.0$ の場合

前節の例題よりも摩擦係数の大きいケースについて検討する。本節では長辺方向の応答のみを比較する。柱脚考慮モデルでは、 $k_z=3 \text{ kN/mm}^2$ とし、すべり特性を弾塑性モデルに置き換えた影響を見るために $k_x=k_y=100 \text{ kN/mm}^2$, 10 kN/mm^2 , 1 kN/mm^2 の3ケースとする。各モデルの相対変位を図13に、層間変形角を図14に示す。最大層間変形角は柱脚固定モデルのX3Y3で1/49、すべりを考慮したモデルのX3Y3で約1/49～1/44となった。等価な弾塑性モデルに置き換えた際の初期剛性は、 $k_x=k_y=1 \text{ kN/mm}^2$ とした場合に水平変位にやや影響はあるものの、層間変位への影響は比較的小さいと言える。 $k_x=k_y=1 \text{ kN/mm}^2$ とした場合の柱脚の最大すべり量と浮き上がり量を図15、図16に示す。最大すべり量は47.8mm、浮き上がりは生じなかった。

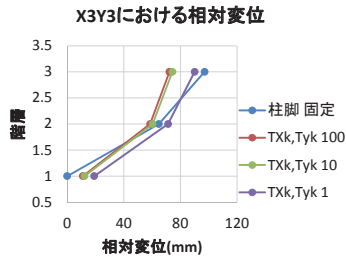


図 13 最大水平変位

すべり図($\mu=1.0$ TXk, Tyk, TZk=100, 100, 3)

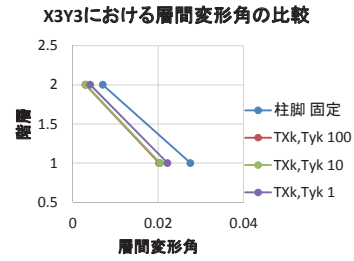


図 14 最大層間変形角

浮き上がり図($\mu=1.0$ TXk, Tyk, TZk=100, 100, 3)

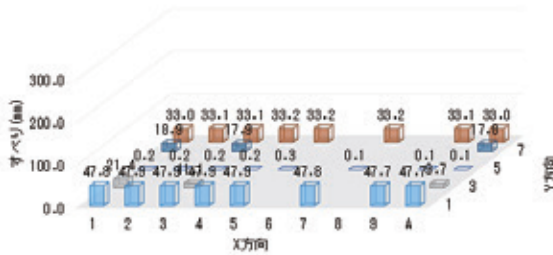


図 15 各柱脚位置の滑り量

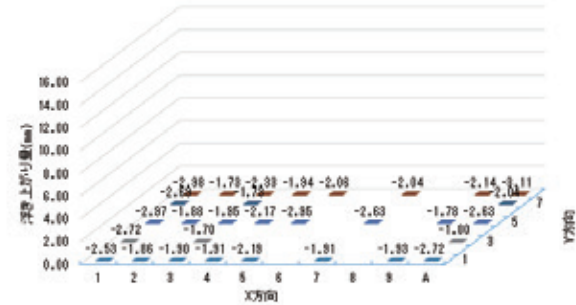


図 16 各柱脚位置の浮き上がり量

b) $\mu=2.0$ と仮定したときの比較

前節よりも摩擦係数を大きくしたケースについて検討する。前節同様に、柱脚考慮モデルでは、 $k_z = 3 \text{ kN/mm}^2$ とし、 $k_x = k_y = 100 \text{ kN/mm}^2$, 10 kN/mm^2 , 1 kN/mm^2 の3ケースとする。各ケースの最大水平変位を図17に、層間変形角を比較した図を図18に示す。最大層間変形角はモデルに寄らずX3Y3で約1/35.6となった。 $k_x = k_y = 1 \text{ kN/mm}^2$ とした場合の柱脚の最大すべり量と浮き上がり量を図19、図20に示す。最大すべり量は22.2mm、最大浮き上がり量は10.5mmである。 $\mu=1.0$ と仮定した場合に比べて、すべりが減少する代わりに浮き上がり量が増加しているといえる。以上より、柱脚すべりによる上部構造の応答低減が定性的に評価できたが、定量的な評価については実験や観測に基づいて更なる検討が必要である。また大きな柱脚すべりを許容するには礎石からの脱落等に配慮する必要があるため、応答低減機構として積極的に利用するためには柱脚仕様に関して更なる検討が必要である。

(3) すべり特性と浮き上がり特性の関係

前節までの検討により、柱脚ですべりが生じることにより、上部建物の層間変位が減少する傾向が明らかになった。この理由は、すべりが生じると層せん断力すなわち応答加速度の上限値を押さえることに繋がり、その結果転倒モーメントが小さくなるため浮き上がりが減少するためだと考えられる。本研究で扱ったすべてのパターンにおける各柱脚位置のすべり量と浮き上がり量の関係および対数近似による近似曲線を図21に示す。定性的にはいずれの荷重方向においても、すべり量が大きければ浮き上がり量が小さくなる関係がみられる。わずかに滑ることで浮き上がり量を大幅に低減できることが分かる。短辺方向荷重時の方が滑り量が小さいのは、短辺方向の方が壁量が少なく剛性が低いため周期が長く加速度が小さいためだと考えられる。また、短辺方向荷重時の方が浮き上がり量が大きいのは、柱間隔の短いスパンの影響だと考えられる。

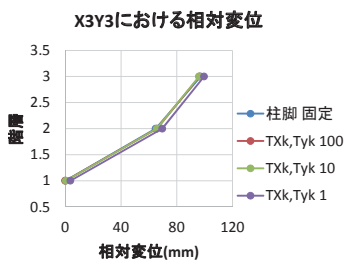


図 17 最大水平変位

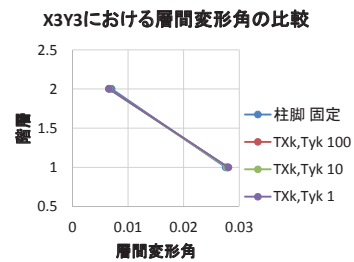


図 18 最大層間変形角

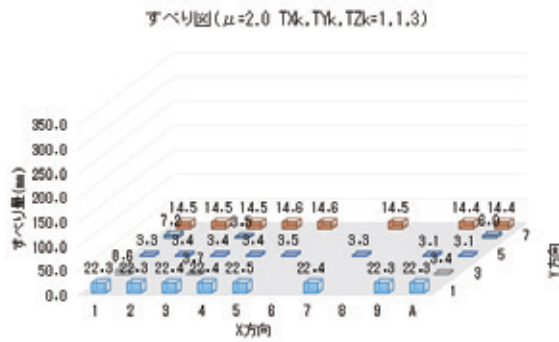


図 19 各柱脚位置の滑り量

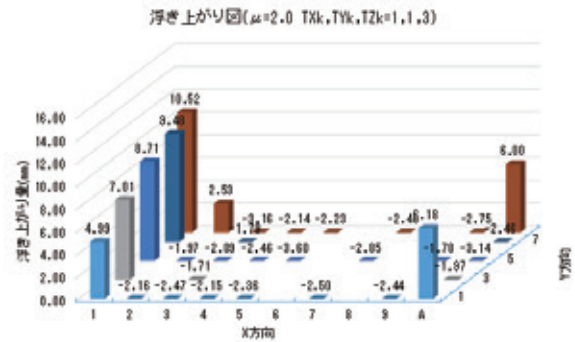
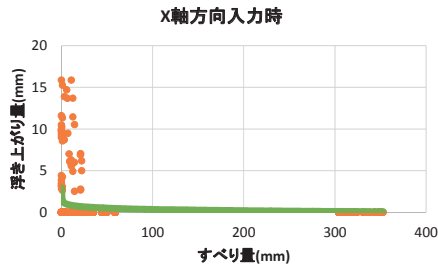
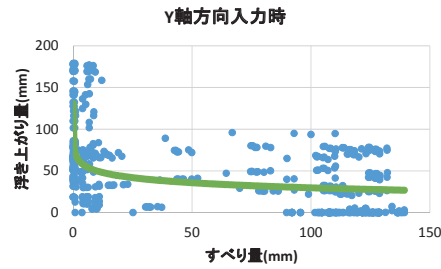


図 20 各柱脚位置の浮き上がり量



(a) 長辺方向載荷時



(b) 短辺方向載荷時

図 21 滑り量と浮き上がり量の関係

4. まとめ

伝統木造建造物に特有の石場建ての柱脚に生じるすべりや浮き上がりを考慮できる立体架構モデルを作成し、時刻歴応答解析に基づいて、柱脚特性がすべりや浮き上がりまた上部構造の応答に及ぼす影響について検討した。その結果、柱脚におけるすべり摩擦係数が小さければ大きなすべりが生じ、建物の応答加速度が低減することにより浮き上がり量は小さくなり、逆にすべり摩擦係数が大きくすべりが生じないと、建物の応答加速度が増加し転倒モーメントによる浮き上がりが大きくなることが示された。経験的あるいは実験的に定性的に知られている現象についてシミュレーションにより定量的に評価できたため、地震被害の状況のより正確な把握が期待されるが、許容なすべり量や実情に応じたモデル化等さらなる検討が必要である。

謝辞：本研究は、高山市をはじめ高山市木造建築物耐震化マニュアル作成検討委員会、飛騨高山伝統構法木造建築物研究会の支援のもとに実施した。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 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、2015.2.20
- 2) 佐藤英佑, 向坊恭介, 鈴木祥之：高山町家の構造的特徴を生かした耐震補強設計法の開発，歴史都市防災論文集，Vol.9, pp. 115-122, 2015.
- 3) 清水一史・村田晶・吉富信太・向坊恭介：石場立てを考慮した岐阜県高山市伝統構法建物の3次元地震応答解析，歴史都市防災論文集，Vol.9, pp.123-126, 2015.
- 4) 伝統的構法の設計法作成及び性能検証実験検討委員会：平成22-24年度事業報告書・設計法案, http://www.green-arch.or.jp/dentoh/report_2012.html (2015.8.14アクセス)
- 5) 木造軸組構法建築物の耐震設計マニュアル編集委員会:伝統木造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, pp.1-128, 2004.
- 6) 独立行政法人 建築研究所：木造住宅 倒壊解析ソフトウェア wallstat(ver.3.1.2)ユーザーズマニュアル，http://www.nilim.go.jp/lab/idg/nakagawa/dl/manual_j.pdf
- 7) 吉富 信太, 栗田 駿平, 向坊 恭介, 鈴木 祥之：東本願寺御影堂門の立体解析モデルによる地震応答解析，歴史都市防災論文集 8, pp.17-24, 2014.