

懸造形式伝統木造建造物の強大地震に対する 耐震性能に関する研究

Performance of Japanese traditional wooden structure with stage during huge earthquake

有川翔伍¹・大岡優¹・鈴木隆志²・伊津野和行³・土岐憲三³

Shogo Arikawa, Yu Ooka, Takashi Suzuki, Kazuyuki Izuno, Kenzo Toki

¹立命館大学大学院 理工学研究科 創造理工学専攻 (〒525-8577 草津市野路東 1-1-1)

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

²鹿島建設株式会社 東北支店 建築設計部 (〒980-0802 仙台市青葉区二日町 1-27)

Chief Engineer, Kajima Corporation, Tohoku Branch, Dept. of Structural Engineering

³立命館大学教授 理工学部都市システム工学科 (〒525-8577 草津市野路東 1-1-1)

Professor, Ritsumeikan University, Dept. of Civil Engineering

This study evaluated seismic performance of Japanese traditional wooden structure with stage. The earthquake resistance capacity was estimated to protect the Japanese wooden structure from an earthquake disaster. In the previous study, Kiyomizu temple did not collapse for the assumed Hanaore earthquake wave. However, the Hanaore fault has a possibility to generate about twice as strong as the assumed earthquake wave. Therefore, this study conducted the inelastic earthquake response analyses for stronger input waves to see the limit state of this structure. The results showed that this structure was vulnerable to twice as strong as the assumed wave due to falling of the main columns.

Key Words: Hanaore earthquake wave, traditional wooden structure, earthquake response, negative stiffness

1. 研究の背景・目的

我が国は、世界有数の地震大国であり、地震に対する伝統木造建築物の耐震性能に関する研究が、近年盛んに行われている。伝統木造建築物は、わが国が世界に誇れる文化遺産であり、国民全員の貴重な財産である。伝統木造建築物を地震災害から守るためには、建物そのものの持つ耐震性能を正しく評価する必要がある。

これまで著者らは、京都の清水寺本堂を対象として、構造調査、常時微動測定、地震観測（継続中）、柱の放射線透過試験による内部劣化探査、地震応答解析等を行ってきた。清水寺本堂は、最大級の懸造形式を有する伝統木造建築物であり、その耐震性を正しく評価することは文化財防災に大きく寄与するものと考えられる。

清水寺本堂に与える影響が大きいと思われる断層は花折断層である。花折断層は京都盆地の北東から東側の山麓を通る約 17km にわたる活断層であり、南北方向の走行を持つ右横ずれ断層である。この断層が動いた場合に清水寺で予測される波形が求められており¹⁾、これを想定花折地震動と呼んでいる。図 1 に想定花折地震動の波形を示す。水平方向の最大値は約 1G、鉛直方向は約 0.3G であり、0.1G を越える水平加速度が 5 秒程度継続する。

これまでの研究では、花折断層で発生が想定されている地震波で解析しても、清水寺本堂が倒壊するほどの大きな被害はないという結果が得られている²⁾。しかし、実際の地震においては想定された地震波よりも強い地震が来る可能性もある。そこで、本研究では想定以上に強い地震波による清水寺本堂の終局限界状態の評価を目的とする。

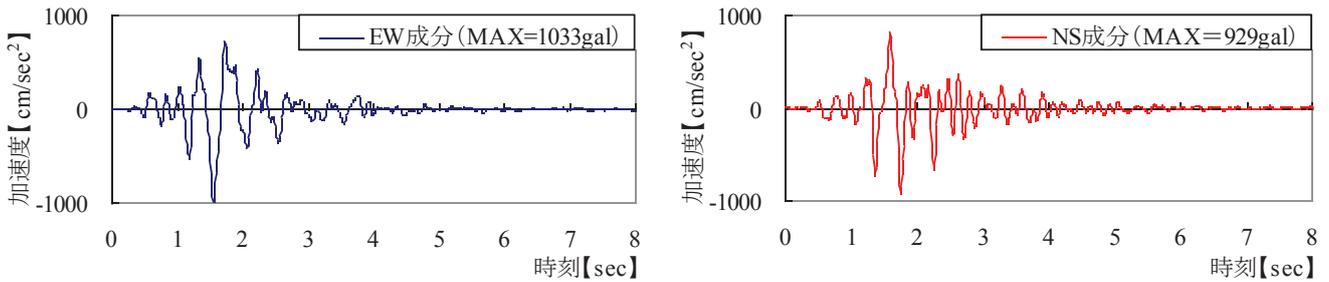


図1 想定花折地震波

2. 対象建築物・軸組の定義

研究対象建築物は京都の清水寺本堂である。清水寺は778年に開創され、現在の清水寺本堂は1629年の消失から4年後の1633年に再建されたものである。清水寺本堂は南面した懸崖に立ち、その正面は崖縁に長太い柱を立て並べ、貫を縦横に差し通して張り出す床を支える雄大な舞台造りの架構になり、舞台を含めて国宝に指定されている。国宝清水寺本堂と清水寺本堂を構成する軸組について図2と図3に示す。東西(X)方向の平面はX1~X13通り、南北(Y)方向の平面はY1~Y14通りから成る。表1には各部材の寸法を示し、表2に常時微動測定から求めた固有周期の結果を示す。

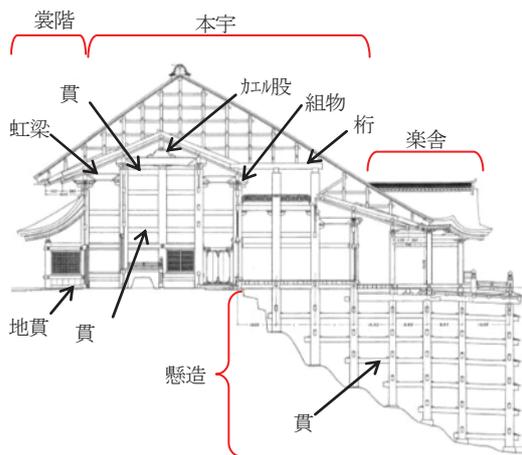


図2 清水寺本堂³⁾

表1 各部における柱、貫、桁、土小壁の断面寸法

部材	断面寸法【mm】
懸造柱	550~700 φ
本宇柱	550 φ
楽舎柱、礼堂廊下柱	400×400
裳階、車寄柱	450 φ
舞台床桁	B×D=300×550
本宇 X 方向 X10 通り桁	B×D=300×500
本宇 X 方向 X8,9,11,12 通り桁	B×D=300×450
礼堂上部 X 方向 X6,7 通り桁	B×D=400×350
本宇 Y 方向山形部桁	B×D=400×400
本宇 Y 方向礼堂上部 X6~8 間桁	B×D=300×450
Y 方向 X9~11 間 須弥壇上部虹梁	B×D=400×550
その他 Y 方向桁	B×D=300×400
懸造貫	B×D=200×400
本宇貫	B×D=200×450
裳階、楽舎、車寄貫	B×D=200×350
土小壁	t=100

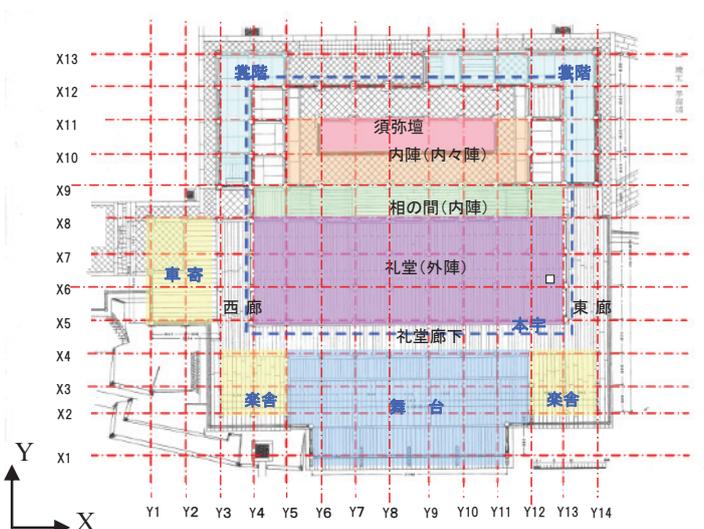


図3 軸組の構成(文献3に加筆)

表2 固有周期

	常時微動計測結果 (平均) (sec)
1次 (南北並進)	0.56
2次 (東西並進)	0.53
3次 (ねじれ)	0.43

3. 解析方法

時刻歴地震応答解析は、市販の地震応答解析ソフトウェア DYNA2E (CTC ソリューションズ製) を用いて行い、数値計算方法は Newmark の β 法 ($\beta=1/4$) による数値積分法により、積分時間刻みは 0.002 秒とした。これは 2004 年 6 月 26 日と 11 月 10 日に行った清水寺本堂常時微動測定結果では減衰は 4.8%~6.8% であり、減衰定数は $h=0.05$ で剛性比例型減衰と仮定した。

入力地震波は想定花折地震波と、想定花折地震波の入力加速度を 2 倍とした地震波とする。入力方法は、建物 X (東西) 方向に各地震波の EW 成分、Y (南北) 方向に NS 成分の 2 方向同時入力とした。

4. 想定花折地震波 2 倍での影響

(1) 最大応答変形角

想定花折地震動と想定花折地震動 2 倍入力時における、X (東西) 方向架構、Y (南北) 方向架構の最大応答変形角を、通り別に示す。図 4 が東西方向、図 5 が南北方向の応答である。

損傷限界は建物が地震を受けた後も構造性能が確保されている限界の事を表し、安全限界は建築物の耐用年限中にきわめて稀に発生する地震に対して人命保護を確保できる限界の事を表している。損傷限界変形角と安全限界変形角は、建築基準法⁴⁾に準拠し、比較的頻度の高い大地震における伝統構法による木造軸組建物の損傷限界変形角は、1/120 とした。また、重要文化財 (建造物) 耐震診断指針⁵⁾に準拠し、きわめて稀な破壊の地震における伝統構法による木造軸組建物の安全限界変形角を 1/30 とした。

東西方向では 2 倍より想定花折地震動の方が多少小さくなっており、南北方向では 2 倍より想定花折地震動の方が大きくなっている。これは強い地震を起こった場合、最大応答変形角では東西方向では影響が小さくなり、南北方向では影響が大きくなるといえる。

東西方向の X9~X13 通りでは安全限界変形角を越えることがわかる。それ以外の通りでも損傷限界変形角を越えることがわかる。最悪の場合、本宇部分が東西方向に壊れることが推測されるが、清水の舞台が倒壊する可能性は低い。

また、この結果は入力波の強度が想定より 2 倍大きくなると安全限界変形角を越えないという事でもある。花折断層において発生することが予想されている規模の地震の推定誤差がそれほど大きくなければ破壊する可能性は低いということも言える。

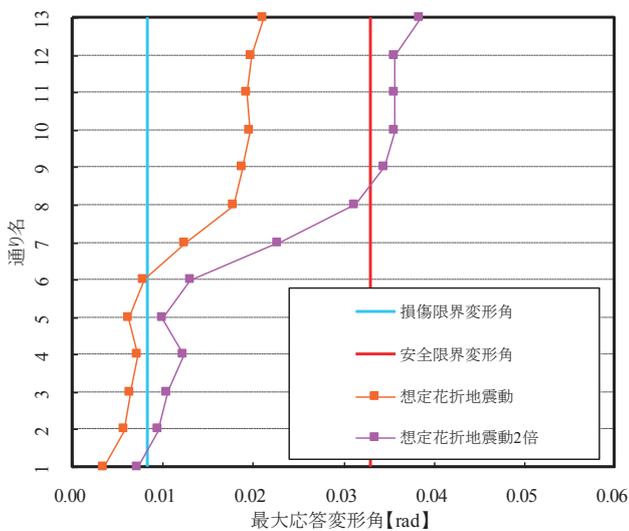


図 4 X (東西) 方向架構の最大応答変形角

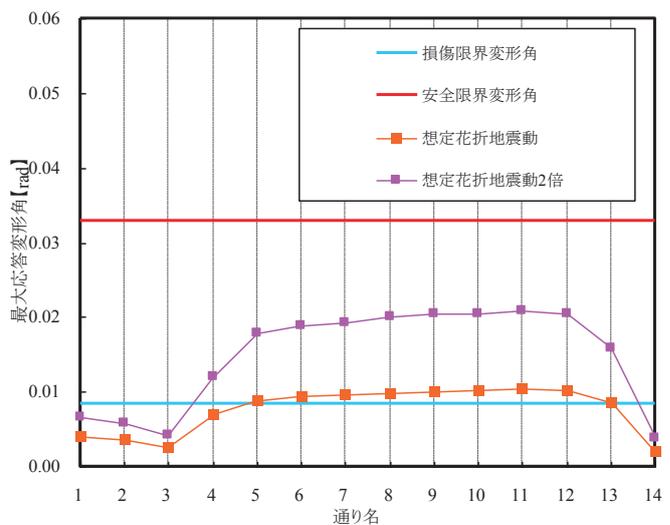


図 5 Y (南北) 方向架構の最大応答変形角

(2) 架構の非線形化の状況

想定花折地震動と想定花折地震動2倍入力時のX9通り架構における非線形化状況を図6に示す。第2勾配以降は非線形化したものとみなしている。第3勾配に入ると、変形増に対する復元力の増加が見込めない状態になる。

想定花折地震動でも非線形化している所はあるが、2倍時ではほとんどのバネが非線形化していることがわかる。想定花折地震動と2倍の想定花折地震動入力時のX9通り架構（本宇）における非線形要素の損傷状況を比較してみると、土小壁は花折地震波時でも非線形化しているが、2倍時ではほとんどの土小壁において非線形化している。柱貫節点回転バネにおいても2倍時ではすべて非線形化していることがわかる。

他の最大変形角が安全限界角を超えている通り架構の損傷状況は、X9と同じように非線形化していた。

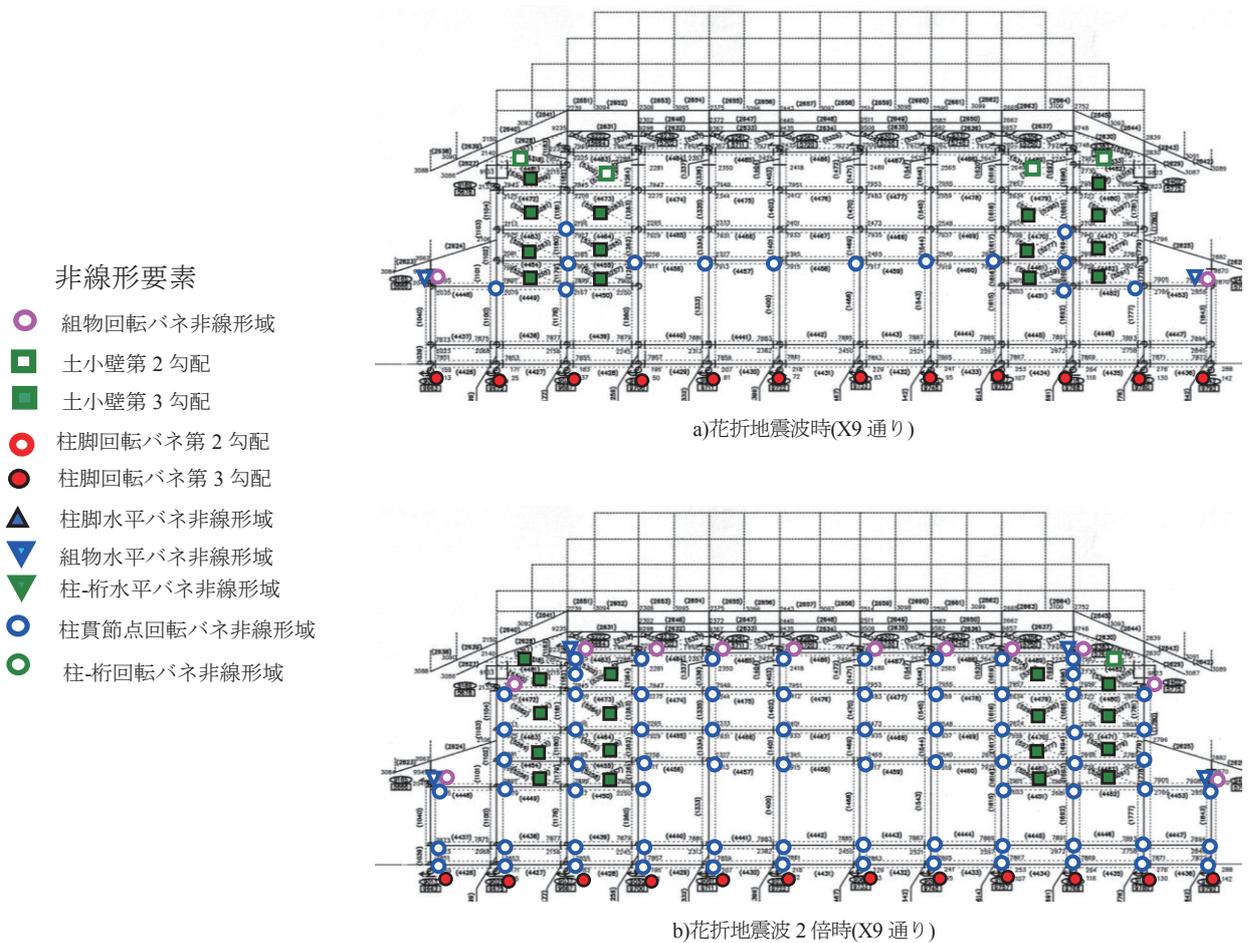


図6 架構の非線形化状況(X9)

5. 柱脚回転バネの負勾配による影響

(1) 柱脚回転バネのモデル化

柱脚回転バネは、柱の傾斜復元力を柱脚の転倒モーメントー回転角関係に履歴減衰をもたない非線形弾性回転バネとしてモデル化した。これまでの研究のモデルでは、負勾配を考慮しない傾斜復元力のモデル（従来モデル）であった。それでは大きな地震が来た場合に、解析結果に影響がでると考えられる。

そこで、本解析ではより参考文献⁹⁾に近い形の負勾配を考慮した負勾配モデルと、清水寺本堂の柱脚部分が壊れてしまう事も考慮し柱脚転倒モーメントが最大から0になり、以降はバネとしての役割を果たさないギャップモデルをモデル化した。傾斜復元力のモデル化を図7に示す。

負勾配モデルでは、最大耐力を超えたのち、回転角 0.06(rad)で耐力がゼロになるよう直線的に耐力を低下させた。ギャップモデルでは、最大耐力を超えたのちすぐに耐力をゼロとし、いったんゼロになった後は、耐力がゼロとなったままで推移するモデルである。これにより柱脚部分が清水寺本堂にどのような影響が出るかを調べる。

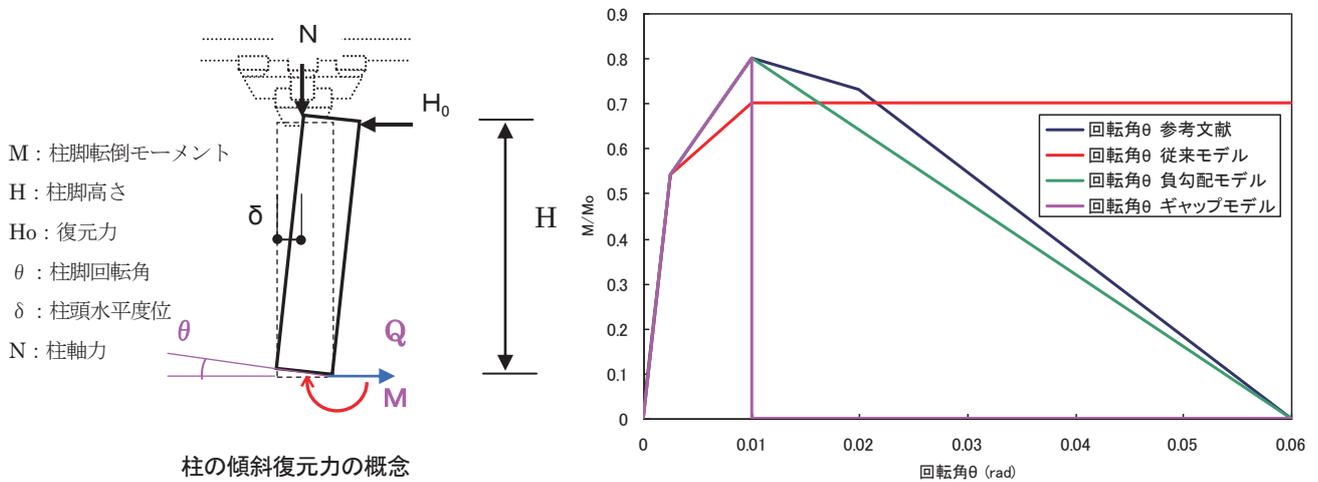


図7 傾斜復元力のモデル化

(2) 時刻歴応答解析

想定花折地震動入力時における負勾配を考慮していないモデル（従来モデル）と、負勾配を考慮したモデルとギャップ型のモデルにおける X9 通りの時刻歴応答加速度波形図と時刻歴応答変位波形図を図8と図9に示す。

結果、従来のモデルと負勾配を考慮したモデルとを比較すると、従来モデルにくらべて負勾配モデルでは最大応答加速度は 0.4%増加し、最大応答変位は 0.01%増加したが、ほぼ線が重なっている。また、従来のモデルとギャップモデルとを比較すると、従来モデルにくらべてギャップモデルでは最大応答加速度は 15.6%減少し、最大応答変位は 1.6%減少した。

全体的に見ると傾斜復元力の負勾配を考慮したモデルと従来のモデルとの時刻歴の変化はあまり見られなかった。すべての架構を見ても大きな変化はなかった。

ギャップモデルは応答加速度、応答変位が最大値になる経過時間 2 秒以降に若干の波形の違いが見られた、これは柱脚部分バネが壊れた時に清水寺本堂の固有周期が伸びたためだと考えられる。しかし、全体的な傾向には大きな変化はなく、影響は少ない。

これらの結果があまり変化は見られなかったことから、バネの特性があまり柱頭部の時刻歴応答に影響してないと考えられる。

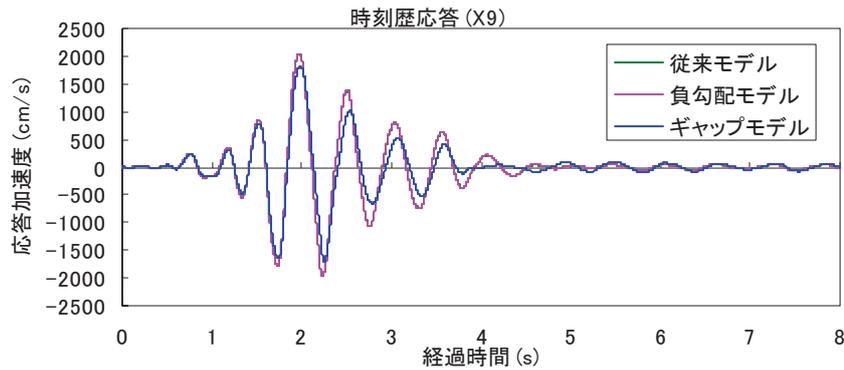


図8 X9通りの時刻歴応答加速度波形図

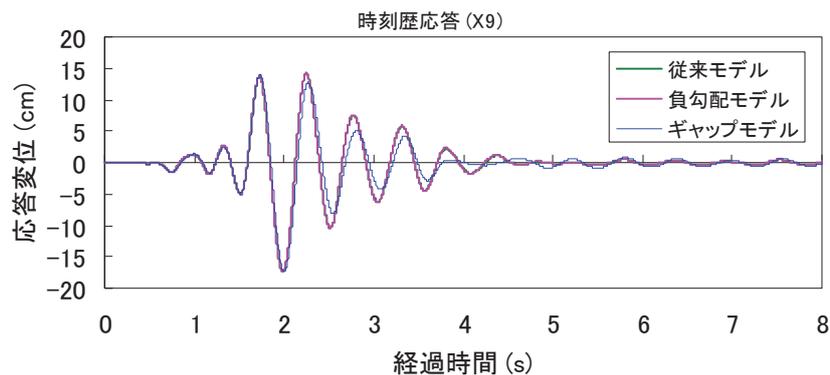


図9 X9通りの時刻歴応答変位波形図

6. 結論

本研究では、懸造形式伝統木造構造物である清水寺本堂の強大地震に対する耐震性について解析的に検討した。得られた主な結論は以下の通りである。

- 1) 清水寺本堂で想定されている地震より強い地震を起こった場合、比例して影響が大きくなり、東西方向架構では影響が小さくなり、南北方向架構では影響が大きくなる。
- 2) 花折断層で発生することが予想されている規模の地震に対して、その強度の推定誤差がそれほど大きくなければ倒壊する可能性は低い。
- 3) 柱脚部分のバネの特性(最大耐力後の負勾配)は、構造全体の時刻歴応答には影響しない。

謝辞：本研究を行うにあたり、多大な協力を頂いた清水寺に深く感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 土岐憲三、岸本英明、古川秀明：花折断層による京都盆地の3次元非線形有限要素法による地震予測、立命館大学21世紀COEプログラム「文化遺産を核とした歴史都市の防災研究拠点」、平成16年中間報告書、pp.113～120、2005。
- 2) 鈴木隆志、伊津野和行、土岐憲三：懸造形式を有する伝統木造建築物の保有水平耐力と地震応答、構造工学論文集、日本建築学会、Vol.52B、pp.477～490、2006/03。
- 3) 京都府教育委員会：国宝清水寺本堂修理工事報告書、1967。
- 4) 国土交通省：建築基準法施行令、第3章、第8節、第82条の6、2005。
- 5) 文化庁文化財部：重要文化財耐震指針、2001。