

柱貫接合部における貫の抜け出し挙動を考慮した 伝統木造建造物の地震応答解析

Earthquake response analysis of Japanese traditional wooden structure using coupled springs

鈴木隆志¹・伊津野和行²・土岐憲三²

Takashi Suzuki, Kazuyuki Izuno, Kenzo Toki

¹鹿島建設株式会社 東北支店 建築設計部 構造設計グループ (〒980-0802 宮城県仙台市青葉区二日町1-27)

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

²立命館大学教授 理工学部都市システム工学科 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

Professor, Ritsumeikan University, Dept. of Civil Engineering

We developed a nonlinear earthquake response analysis program, which can handle a joint spring whose capacity is coupled with its moment. We studied the effect of the coupled springs, and evaluated the damage conditions, residual deformations and the stresses. The results showed the necessity of using the coupled springs for the joint part to evaluate the precise earthquake response of the wooden structure with stage on the slope.

Key Words : *Japanese traditional wooden structure, nonlinear earthquake response analysis, coupled springs*

1. はじめに

崖地に建設される懸造形式伝統木造建築物の場合、建物の水平変形時に、柱脚支点反力が横架材（貫）の軸力に与える影響から、柱から貫が抜け出す状況が予測される。貫が柱から抜け出すことを妨ぐ抵抗要素として、接合部の回転モーメントによって柱外縁部に生じる柱軸方向の偶力がもたらす貫と柱間の摩擦力が考えられる。貫が柱から抜け出すか否かは、節点におけるモーメント $M(t)$ に応じた摩擦力 $Q_y(t)$ と節点水平力 $P(t)$ との関係で判定する必要がある。

本論文では柱貫接合部における回転バネと水平バネを連成させた接合部力学モデルと、それを反映した平面架構非線形地震応答解析結果について説明する。

2. 数値解析モデルの概要

図1に解析モデルを示す。当該モデルは、清水寺本堂の南北方向を簡易なモデルにしたものである。清水寺本堂南北方向の全構面の柱、貫、接合部バネを重ね合わせによって集約することで簡易平面架構を作成した。柱・貫・桁の線材部材に関しては、部材自体の塑性化よりも、接合部の非線形化が先行すると考えられるため、弾性部材とした。参考文献¹⁾より、ケヤキのヤング係数を $E=8800\text{N/mm}^2$ 、及びせん断弾性係数を $G=590\text{N/mm}^2$ と仮定した。

各柱貫接合部節点には、バイリニア型履歴特性の水平バネ²⁾ およびスリップバイリニア型履歴特性の回転バネを設定した。各柱脚には、バイリニア型履歴特性の水平バネ²⁾ および、傾斜復元力によるトリリニア型非線形弾性の回転バネを設定した。

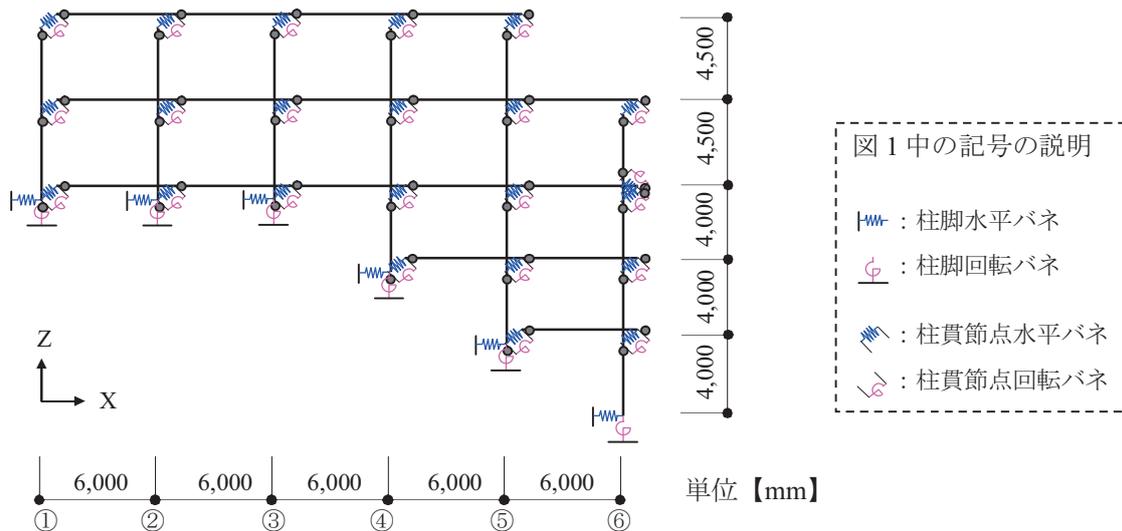


図1 簡易平面架構

3. 柱貫接合部水平バネの概要

柱貫接合部節点回転バネは稲山のめり込み理論³⁾、同水平バネは、摩擦による非線形性を基本とする。

柱貫接合部は、柱脚高さレベルの違いから生じる貫軸力によって、貫が柱からの抜け出す状況を、摩擦によるバイリニア型の剛塑性節点水平バネとしてモデル化した。

図2に、柱から貫が抜け出す状況をシミュレートする目的で設定した柱貫接合部水平バネのモデル化に対する考え方を図示する。時刻歴応答計算で得られた節点水平力 $P(t)$ が、同じく時刻歴応答計算によって得られる節点モーメント $M(t)$ から算出した柱外縁部に生じる圧縮力 $R(t)$ による摩擦力 $\sum \mu R(t)$ を上回ったとき、塑性化する水平バネを設定した。このバネの復元力特性はバイリニア型とし、柱貫水平バネの耐力は式(1)～(3)によって計算した。式(3)に用いた木材間の静止摩擦係数は参考文献⁴⁾より、0.5と仮定した。履歴特性はバイリニアとし、第2勾配は理論上ゼロであるが、数値解析上、安定した解を得る目的で、初期剛性の1/1000と仮定した。

$$e = \frac{2}{3}B \tag{1}$$

$$R(t) = \frac{M(t)}{e} \tag{2}$$

$$Q_y(t) = \sum \mu R(t) \tag{3}$$

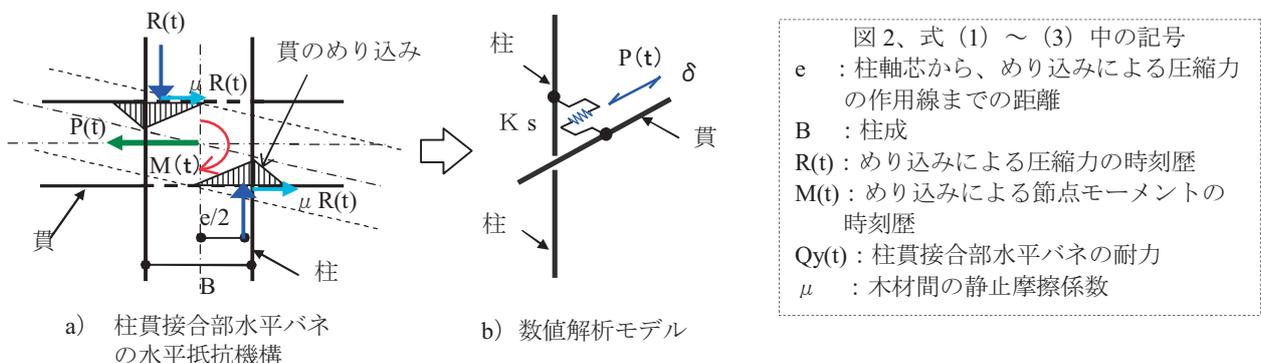


図2 柱－貫接合部の節点水平バネへのモデル化

4. 解析条件

地震応答解析における入力地震波は、応答の大きいJMA神戸NS成分を用い、最大値を1000cm/sec²に標準化して入力した。時刻歴地震応答解析は、Newmarkのβ法 (β=1/4) による直接積分法によった。積分時間刻みは0.0001secとし、減衰定数は1次モードに対してh=0.05の剛性比例型内部粘性減衰²⁾とした。

5. 解析結果

表1に固有値解析結果の固有周期を、図3～5に固有振動モードを示す。

表1 固有周期

1次	0.608sec
2次	0.120 sec
3次	0.106 sec

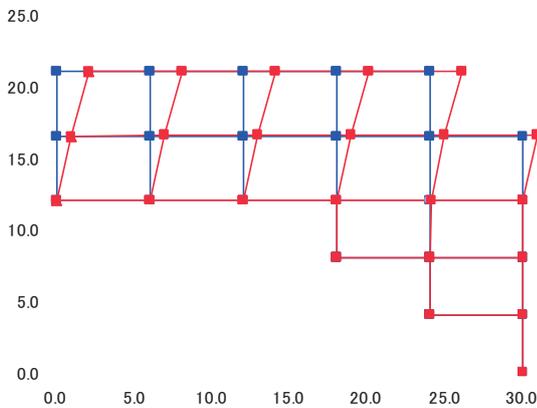


図3 簡易平面架構の1次振動モード

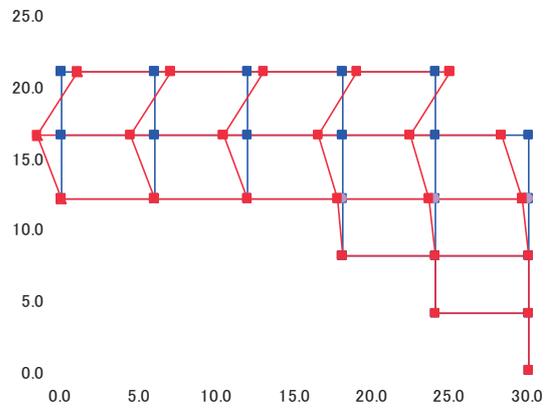


図4 簡易平面架構の2次振動モード

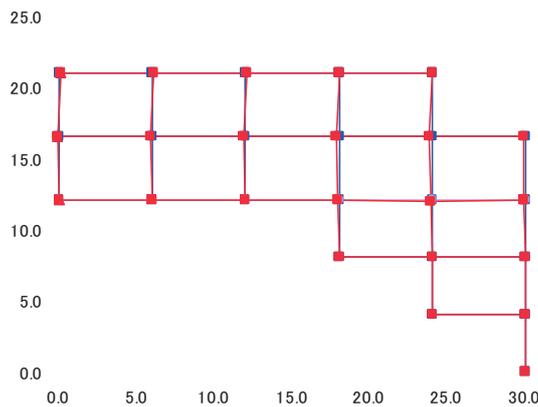


図5 簡易平面架構の3次振動モード

柱貫接合部水平バネ耐力 $Q_y(t)$ に、同接合部節点モーメント $M(t)$ の連成を考慮する場合(連成考慮)と、非連成の場合との架構最高高さ位置における応答変位の比較を図6に示す。入力後約2.6sec以降で波形図に相違が見られる。これは柱貫接合部水平バネの耐力設定の違いによる影響と考えられ、柱貫接合部水平バネが、低い応力レベルにおいても非線形化することによって、建物全体の瞬間的な剛性が低下することによるものと考えられる。柱貫接合部水平バネの非線形化に伴う履歴減衰の効果は、バネの履歴におけるエネルギー吸収が非常に小さい(履歴による面積がほとんどない)ため、応答変位は柱貫接合部水平バネの瞬間的な剛性低下が建物の水平剛性を瞬間的に低下させる影響が支配的と考えられる。

最大応答変位は、連成考慮の場合で 28.9cm、非連成の場合で 26cm であり、連成考慮の方が 1.12 倍大きな値となったが、その差は僅かである。

残留変形は、連成考慮の場合で 15.2cm、非連成の場合で 1.8cm となり、連成考慮の方が約 9 倍大きくなる。

図8に簡易平面架構の残留変形図を示す。なお、同図は変位量を実際の変位量の10倍にして表現した。連成考慮の場合の残留変位は、地震後も残り、変形角としては、①～③通りで最も大きくなる。このときの変形角は地貫一内法貫間で1/45となり、木造耐震性能評価上の技術的慣行で定める安全限界変形角1/30以下であるので、残留変位が原因で倒壊する危険性はないが、建築基準法施行令の緩和規定で定める損傷限界変形角1/120は超えるため、地震後の架構の修復が必要となると考えられる。一方、連成を考慮しない場合の残留変位は、変形角に換算して1/500程度と、非常に小さい値であるため、連成を考慮しないモデル化は残留変位を危険側に評価する結果となった。

また、残留変形の要因は柱脚回転バネの残留回転角が支配的であった。図7に柱脚回転バネの時刻歴応答回転角波形図を示す。

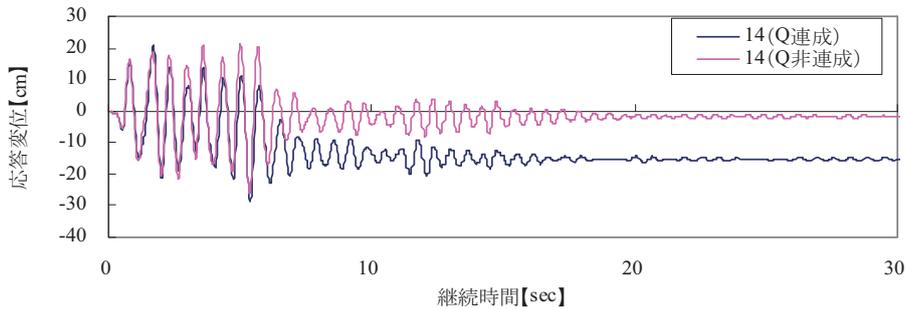


図6 ⑤通り頭貫レベルの応答変位波形の比較

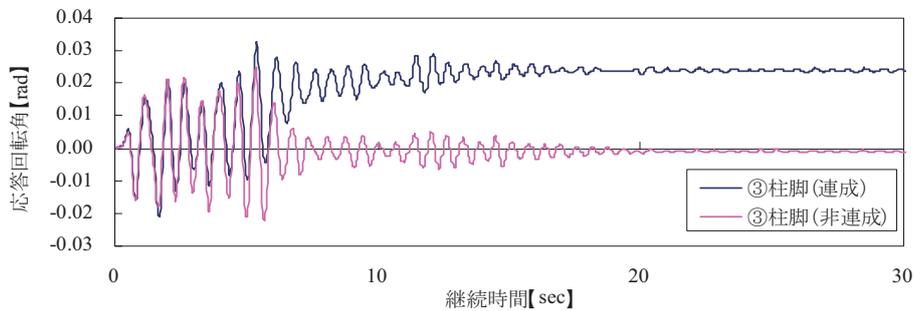


図7 ③通り柱脚回転バネの応答回転角波形の比較

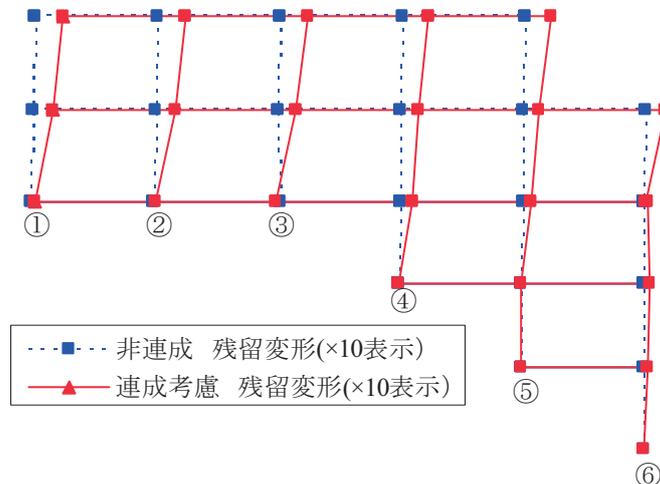


図8 残留変位の比較

図9に⑤通り本堂柱（下部）の応答せん断応力度波形図を、連成考慮と非連成の比較として示す。最大応答せん断応力度は、連成考慮の場合で 0.50N/mm^2 、非連成の場合で 0.38N/mm^2 となり、連成考慮の場合のほうが1.34倍大きくなった。残留応力度は、連成考慮の場合で 0.43N/mm^2 、非連成の場合で 0.08N/mm^2 と応力度は低い非連成考慮の場合のほうが5.13倍大きくなった。しかし、連成を考慮する場合の残留応力でも、木材の長期許容応力度 10N/mm^2 と比較すれば十分低い応力度レベルにある。

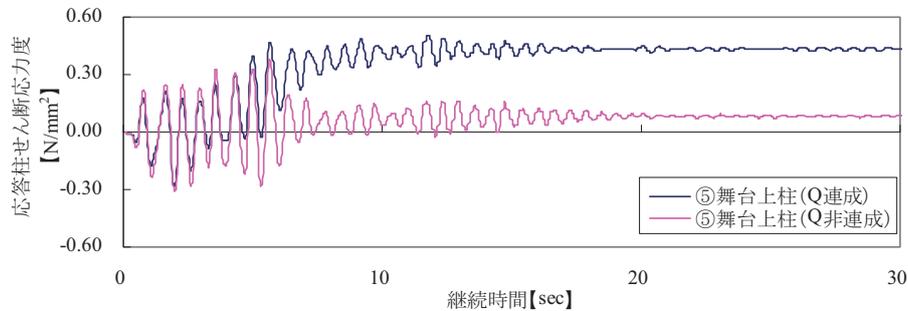


図9 ⑤通り本堂柱の応答せん断力波形の比較

図10、11に柱貫接合部の回転バネおよび水平バネの応答履歴を示す。回転バネの応答履歴に連成考慮の影響は少ないが、水平バネの応答履歴には、耐力設定の違いによる影響が大きく現れている。図11から、連成考慮の水平バネの応答履歴には、低い応力レベルでも、柱から貫が抜け出して一定方向に滑っていく様子が見られる。

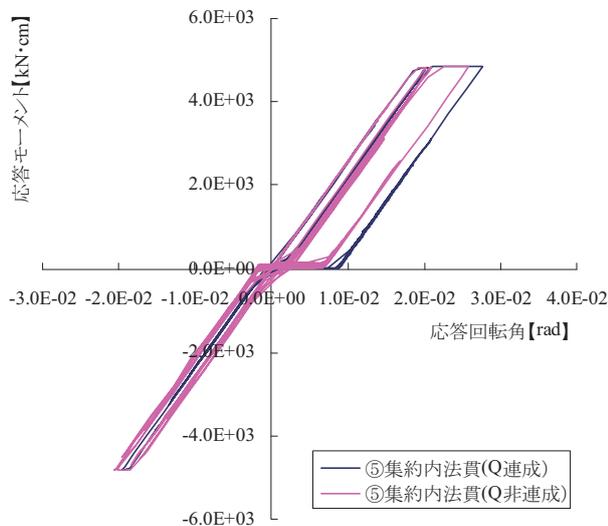


図10 ⑤通り内法貫位置の柱貫接合部回転バネの応答履歴

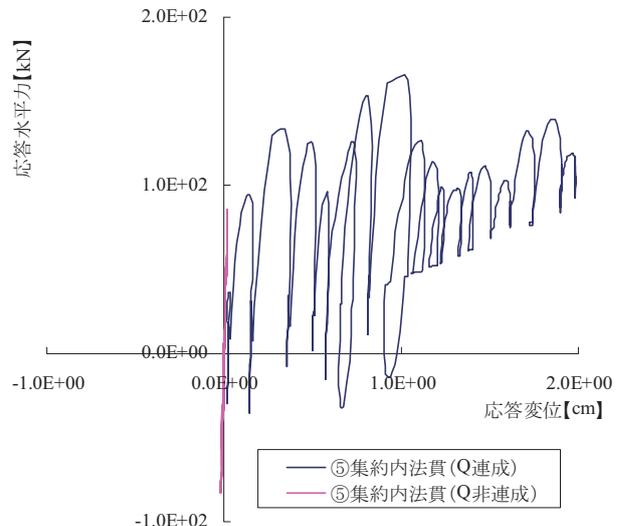


図11 ⑤通り内法貫位置の柱貫接合部水平バネの応答履歴

図12は、柱貫接合部水平バネ耐力 Q_y を柱貫接合部節点降伏モーメント M_y から一定値として求めた場合（非連成）の、JMA 神戸 NS 成分 1000cm/sec^2 入力時における損傷分布である。図13は、柱貫接合部水平バネ耐力 Q_y を、柱貫接合部節点モーメントに連成させた場合（連成考慮）の、JMA 神戸 1000cm/sec^2 入力時における損傷分布である。

連成考慮の場合の柱貫接合部水平バネは全ての接合部で非線形化しており、柱貫接合部水平バネは節点モーメントが降伏モーメントに達する前に非線形域に入り、柱から貫が滑って抜け出す状況をシミュレートすることができていると考える。著者らのうち一人によるこれまでの研究⁵⁾では、平地に建てられた柱脚高さ位置が同一の伝統構法建築物においては、柱貫接合部水平バネ耐力に同接合部節点モーメントを連成させる

ことによる応答値への影響がなかった。柱脚高さ位置レベルの異なる懸造形式の伝統構法建築物においては、建物の水平変形時に、貫に軸力が生じるため、柱貫接合部に水平バネを設定する必要があり、地震挙動のうち、残留変位、残留応力、接合部損傷状況を評価するためには、柱貫接合部水平バネ耐力を節点モーメントに連成させることが必要であると考えられる。

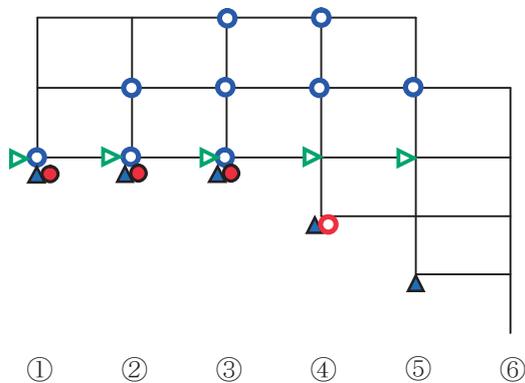


図12 簡易平面架構の損傷状況 (Qy非連成)

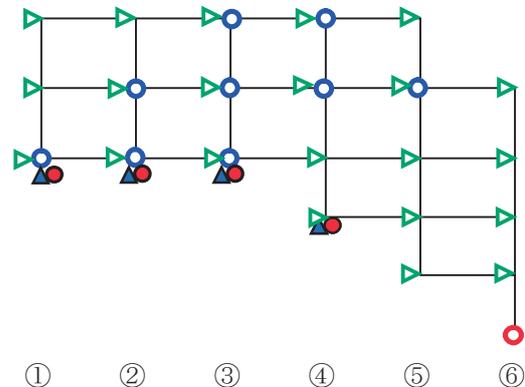


図13 簡易平面架構の損傷状況 (Qy連成)

図 12、13 の凡例

- 柱貫接合部節点回転バネ（めり込み）の塑性化
- 柱脚節点回転バネ（傾斜復元力特性）第2勾配域
- ▶ 柱貫接合部節点水平バネ（摩擦）の非線形化
- 柱脚節点回転バネ（傾斜復元力特性）第3勾配域
- ▲ 柱脚節点水平バネ（摩擦）の非線形化

6. まとめ

本解析で得た結論を以下に述べる。

柱貫接合部水平バネ耐力を、節点モーメントの時刻歴に連成させない場合の応答は、最大応答変位、最大応答柱せん断力を若干危険側に評価し、建物の残留変形、残留柱せん断力、各接合部残留変形および接合部の損傷状況を危険側に評価することとなる。これは、懸造形式の建物の場合、柱貫接合部において、その接合部のモーメント抵抗の状況に関わらず、柱貫接合部において、貫が柱から抜け出す挙動が認められることに起因する。しかし、本解析結果によると、懸造形式伝統木造建築物の耐震性能を最大変形角から判断する上では、柱貫接合部水平バネの耐力に同接合部節点モーメントに連成させないモデル化でも概ね耐震性能を評価できると考えられる。

謝辞：本研究を進めるにあたって清水寺の協力を得た。記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 森林総合研究所：改定4版 木材工業ハンドブック 2004.
- 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，日本建築学会構造工学論文集，Vol.52B，pp.477～490，2006.
- 3) 稲山正弘：木材のめり込み理論とその応用-靱性に期待した木質ラーメン接合部の耐震設計法に関する研究，東京大学学位論文，1991.
- 4) 森田仁彦・花里利一・柳澤孝次：伝統的木造建築の構造的な性能評価（その4 木材の摩擦試験と車知の圧縮試験），日本建築学会大会学術講演梗概集，C-1，pp.219～220，2002.
- 5) 鈴木隆志：懸造形式を有する伝統木造建築物の耐震性能に関する研究，立命館大学学位論文，2006.