

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年6月8日現在

機関番号：33302

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2009～2011

課題番号：21656137

研究課題名（和文） 水平動下で柱の回転運動を伴う伝統木造建物の動揺現象発生メカニズムの解明

研究課題名（英文） An elucidation on the mechanism of the oscillation for traditional wooden structures with a rotational motion of columns under horizontal excitation

研究代表者

西村 督 (NISHIMURA TOKU)

金沢工業大学・環境・建築学部・准教授

研究者番号：30367445

研究成果の概要（和文）：地震動を受ける石場建て伝統的木造建築物の円柱を想定した加振実験で観察された加振方向のロッキングから鉛直軸回りの回転挙動への運動遷移が、これまで報告されていない臨界挙動であることを理論的に明らかにした。着目した回転挙動の発生は、加振直交方向の斉次方程式の非自明解の存在条件で表すことができ、異なる運動への遷移過程を説明する理論展開の妥当性を数値解析的に検証し得た。これらの成果は、重要文化財を含む伝統的木造建築物の耐震設計に資する。

研究成果の概要（英文）：

It was theoretically verified that the transition from rocking to rotational motion about vertical axis, concerning cylindrical columns on the base of traditional wooden structures subjected to horizontal earthquake, was an unknown critical behavior. The motion has been observed in a previous experiment. The occurrence of the attracted rotational behavior can be described by the condition for the existence of non-trivial solution to a homogenous equation in the direction perpendicular to an exciting force. Consequently theoretical development to explain the transition to the movements of cylindrical columns was valid. These results contribute to earthquake resistant design for traditional wooden structures including important cultural properties.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	500,000	0	500,000
2010年度	1,000,000	0	1,000,000
2011年度	1,400,000	420,000	1,820,000
年度			
年度			
総計	2,900,000	420,000	3,320,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：建築学、建築構造・材料

キーワード：伝統的木造建築物、動揺現象、臨界挙動、分岐問題

## 1. 研究開始当初の背景

(1)伝統構法の柱は高さに対する断面の幅の比が相対的に大きいため、傾いたときに横架材から伝達される鉛直力および自重により元の位置に戻ろうとする復元力（以下傾斜復元力と呼ぶ）を有し、耐震安全性に大きく寄

与していると考えられている。鈴木、前野らは高さ約 5m、柱スパン長辺 3.75m、短辺 2.25m の 1 層 1 スパンの伝統的木造軸組建物に対する振動実験、静的載荷実験を実施し、傾斜復元力がどれだけ耐震性能を有しているかを検討している。この実大実験より、こ

れまで着目されていなかった柱の動的挙動が報告されている。地震波の水平二方向加振時に供試体柱脚部で、柱下端はほぼ斜め方向へ移動し、柱下端 100mm 上では下端の軌跡を中心とした回転運動を表す軌跡を示した。この時、柱全体の挙動は、鉛直軸回りの回転、つまり傾いて自転している独楽の歳差運動に似ている。柱は単に滑って振動台上を移動するのではなく、回転を伴いながらロッキング運動して移動していると述べられている。水平加振された模型が鉛直軸回りに回転運動しうことは、述べられているが、その発生原因や安定性について物理的な説明がなされていない。実大実験で観察された回転を伴う柱の運動は、1) 二方向加振を受けた時にのみ現れる特有の動揺現象であるのか、2) なぜ独楽のような回転運動が生じるのか、また、3) この動揺現象が建物の倒壊の予兆を示す不安定挙動であるか、を論じた研究は筆者の知る限り存在しない。

(2)研究代表者は、この回転を伴う柱の動揺現象が、貯槽内流体が水平加振されたときに現れる動揺現象と類似していることに気がついた。大森、松井らは貯槽内流体を一方に水平加振させ、加振振幅や加振振動数を変化させると、液面が加振方向軸に関して対称形となるスロッシングから、鉛直軸回りに液面が回転するスワーリングと呼ばれる動揺現象へと遷移することを実験的に示した。また図3に示した液面の動揺現象の遷移が定常応答解の分岐点で生じる臨界現象であることも理論的に明らかにしている。研究代表者は、柱の動きに着目し、円柱単体に水平一方の調和地動を与える加振実験を実施した。その結果、柱はまず加振方向に対してロッキング振動を示し、その後、加振振幅を増加させると写真1に示す加振方向へ転倒する場合と鉛直軸回りに回転し定常振動する二種類の動揺現象が観察された。また柱を剛体と仮定した動的応答解析を行い、加振振動数と加振加速度振幅の特定の組み合わせで、ロッキングが生じた後、実験で観察された転倒、鉛直軸回りの回転運動が現れることも確認されている。

(3)以上の既往の研究結果から、申請者は着目した回転を伴う柱の動揺現象は、貯槽内流体のスワーリングと類似の現象であり、その発生には分岐現象が関係しているという仮説に至った。この仮説を検証する上で、柱の断面形状が四角形の場合、円柱と同じ動揺現象が現れるかという点が実験的・理論的に明らかにされていない。更に実際の伝統木造建物は多数の柱と横架材で構成されており、水平加振時に柱群が臨界挙動を呈した場合、全体構造として柱単体には現れない異質の動揺

現象が発生する可能性があるかと推察される。

## 2. 研究の目的

伝統木造構法建物が激震時に大きく傾斜したとしても倒壊を間逃れる限界状態を力学的にどう定義するかは耐震設計上重要である。現在、倒壊に至る不安定現象が動的安定問題の見地から系統的に分類され、耐震設計や耐震診断・補強に反映されていると言いがたい。

本研究では、水平動を受ける伝統木造建物の限界状態を検討する上で、これまで着目されていなかった柱の鉛直軸周りの回転運動がなぜ生じるのか、またその回転運動の発生が建物全体の倒壊へと波及するかを理論的に明らかにすることを目的としている。

## 3. 研究の方法

本研究は、水平動を受ける伝統木造構法建物の動揺現象がいかなる条件下で発生するかを、臨界現象の観点から理論的に解明することを目的としている。研究全体として三期にわたって実施した。

(1)平成21年度は、円柱の動揺現象発生に関する数理構造を明らかにすることを目標とし、水平調和地動を受ける剛体円柱の定常応答に対する臨界点解析を行う。柱が常に地面に接して滑動しなければ、図1に示す剛体柱は中心位置に質量を有し、加振方向とそれに直交する方向の成分を持つ2自由度の動力学モデルとして表すことができる。柱の復元力モデルは、調和バランス法を用いて、応答振幅を未知量とする支配方程式を定式化する。ロッキングから鉛直軸回りの回転運動への変化は、加振方向と直交する定常応答解の変位成分(図1中の $D_Y$ )が非自明解を持つことを意味し、支配方程式の係数行列の行列式が零となる条件となる。この条件から、動揺現象が遷移する加振加速度振幅を導出する。

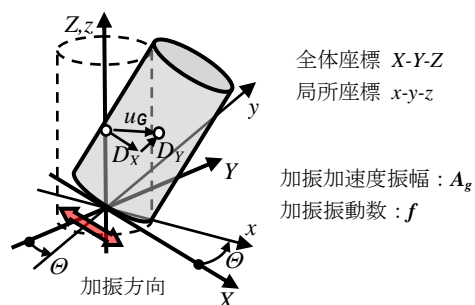


図1 円柱の動力学モデル

(2)平成22年度は、柱単体に対する動揺現象発生メカニズムの数理モデルの妥当性を検証する。まず円柱が鉛直軸回りに回転した後、更に加振振幅を増加させて別の動揺現象が現れるかを理論的に明らかにする。定常応答の解

曲線を追跡し、定常解の唯一性が満たされない条件を解析的に導出し、物理的にその条件が存在するかを考察する。次に角柱の加振実験（図2）を行い、円柱の動的挙動と比較し、角柱の動揺現象発生に関する数理構造を明らかにする。最後に円柱、角柱の結果をまとめて、柱単体モデルの妥当性を検証する。

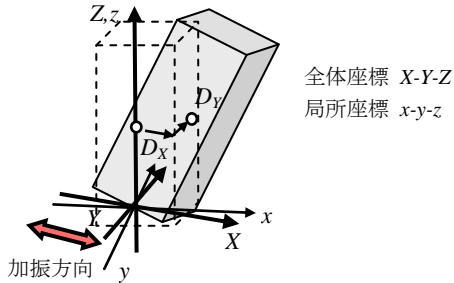


図2 角柱の動力学モデル

(3)平成 23 年度は、柱と横架材で構成される 1 層 1 スパン立体架構の縮小模型に対して、水平加振実験を行い、立体架構の動的挙動の分類と動特性の分析を行う。柱の（高さ  $H$  / 直径  $D$ ）の比、おもりの重量、加振振動数をパラメータとして水平加振実験を行い、模型全体、個々の柱の加速度、歪を測定し、周波数分析を行う。比  $(H/D)$ 、おもりの重量、加振振動数によって動的挙動がどのように異なるか、加振加速度振幅を増加させると全体の振動モードがどのように遷移するかを観察し、全体架構の動揺現象として着目すべき様相を把握する。また振動モードの遷移によって周波数特性がどのように変化するかを考察する。

#### 4. 研究成果

##### (1)水平調和地動を受ける剛体円柱の定常応答に対する臨界点解析（雑誌論文①）

一方向の水平調和地動を受ける円柱単体に対して、鉛直軸回りの回転挙動が発生する数理構造を明らかにするための解析的研究を実施した。図 1 に示す二自由度系の運動方程式に調和バランス法を適用し、次式に示す加振方向と加振直交方向に対して、周波数ごと  $(n=1,2,\dots)$  の定常応答解の方程式を導出した。

$$A^{(n)}C^{(n)} = b^{(n)} \quad [1]$$

着目している鉛直軸回りの回転運動がなぜ生じるかという問いは、加振直交方向の変位成分がいかんして現れるかという問題に置き換えることができる。このとき加振直交方向の方程式は、[1]式を変形して次の斉次方程式となる。

$$A_y^{(n)}C_y^{(n)} = 0 \quad [2]$$

[2]式の非自明解の存在条件

$$|A_y^{(n)}| = 0 \quad [3]$$

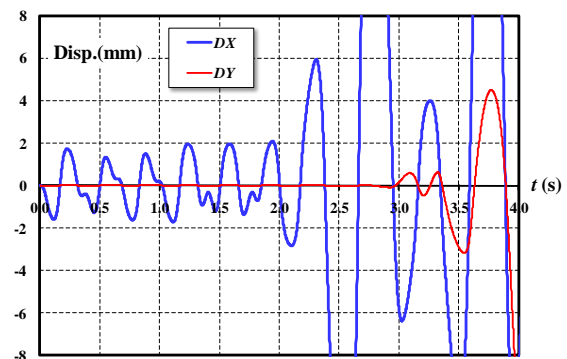
から、鉛直軸回りの回転が発生する条件式

が導かれる。その条件式は、

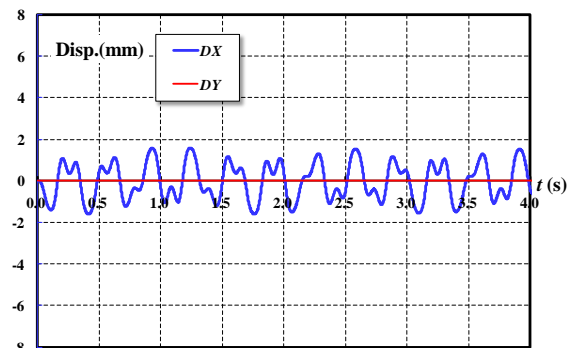
$$\frac{P_G}{u_G} = m(2n\pi f)^2 \quad [4]$$

と書くことができる。[4]式は、図 1 の局所座標  $x$ - $z$  面内でのロッキング量  $u_G$  が振動数  $f$  と質量  $m$  から定まる定数に達する加振振幅  $A_G$  のとき、回転が発生することを意味している。

以上の理論的枠組みの妥当性を検証するために、[4]式の条件を満たす加振振幅  $A_G=2.0m/s^2$  と満足しない  $A_G=1.9m/s^2$  の円柱重心変位の時刻歴応答を調べた（図 3）。加振方向変位は  $DX$ 、加振直交方向変位は  $DY$  である。図 3(a)より 3 秒以降から加振直交方向変位が急激に増加しており、明らかに[4]



(a)  $A_g=2.0m/s^2$



(b)  $A_g=1.9m/s^2$

図3 重心変位の時刻歴応答

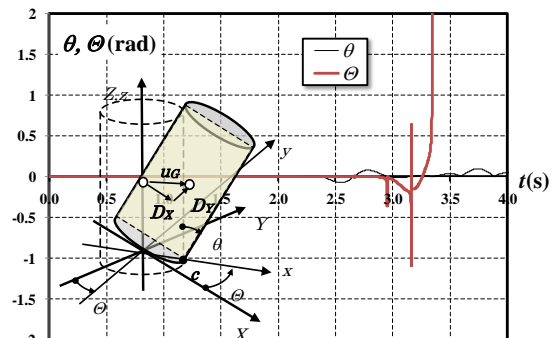


図4 回転角の時刻歴応答( $A_g=2.0m/s^2$ )

式を満たすときのみ、加振直交方向変位が発現する。図4は  $A_G=2.0\text{m/s}^2$  のときの傾斜方向の回転角  $\theta$  と鉛直軸回りの回転角  $\Theta$  の時刻歴応答である。図3(a)同様、3秒以降から鉛直軸回りの回転が生じていることが確認できる。

以上の結果から、実験で観察された鉛直軸回りの回転挙動が臨界現象であることを理論的に明らかにし、回転挙動の発生条件の妥当性を数値解析的に検証した。

(2) 角柱の水平加振実験と動揺現象の調査・分類 (雑誌論文②、学会発表③,④)

角柱の水平加振実験を行い、円柱と同じ動揺現象が生じるのか、円柱に見られない特異な運動が生じるのかを調査した。その結果、円柱と同様、ロックンク後に転倒する場合(写真1、写真2)と鉛直軸回りに回転する動揺現象(写真3)が確認された。しかし角柱の場合、写真2に示す加振方向とずれた方向に転倒する場合があります、また写真3の鉛直軸回りの回転は、円柱とは異なる不連続な動きを呈する。写真2,3に示した新たに観察された角柱の運動を解析的に検討するには、回転中心が点であり、回転中心を通る鉛直軸回りの回転自由度を持つ力学モデル(図5中の(f))が必要となることを指摘した。

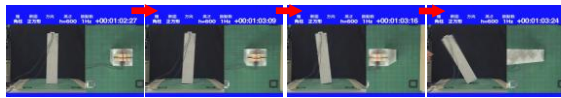


写真1 転倒



写真2 斜め方向への転倒



写真3 回転

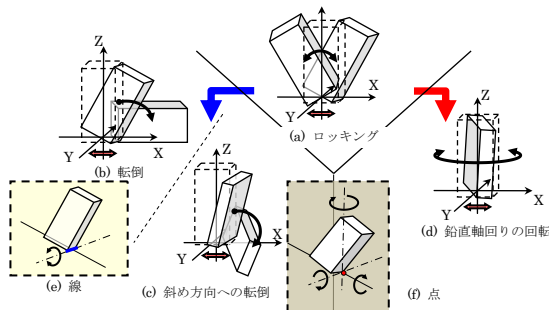


図5 角柱の動揺現象

指摘した自由度を持つ解析モデルとして、個別要素法による解析モデルを提案した。角

柱を直方体の剛体とし、柱と振動台との接触点にばねとダッシュポッドを設けた。実験結果と提示した解析モデルによる解析結果とを比較し、ロックンク開始時刻、柱と振動台との加速度応答の位相とがよく対応することを確認し、モデルの有効性を検証した。また、ばねとダッシュポッドのパラメトリックスタディを実施し、ロックンク開始時刻への影響を述べている。

(3) 円柱の静的釣合経路の解析解と臨界点の分類 (学会発表①,②)

本研究で着目した回転運動の発生は、ロックンクという周期運動から別の安定な周期運動への移行である。この現象移行過程は、既往の分岐理論でいう周期解が分岐する超臨界 Hopf 分岐、もしくは Mathieu 方程式の解の可能性がある。研究結果(1)で示した理論展開が、既往の分岐理論に対応しているかを確認するためには厳密な解析的定式化を経た検討が必要である。研究の方法(3)の立体架構の水平加振実験、動的挙動の分類と動特性の分析を変更して、円柱に対し一方向の強制水平変位を与えたときに生じる分岐挙動について検討した。

釣合経路解析の結果として釣合経路を図6に、柱の変位を図7に示す。変位振幅が剛体の転倒限界に達した時、不安定対称分岐点(図6中のb点)が現れる。分岐点での固有値  $\lambda$ 、固有ベクトル  $\phi$  はそれぞれ

$$\lambda_1 = k, \lambda_2 = \frac{p_G}{u_G} \quad [5a,b]$$

$$\phi_1 = \begin{Bmatrix} \cos\theta \\ \sin\theta \end{Bmatrix}, \phi_2 = \begin{Bmatrix} -\sin\theta \\ \cos\theta \end{Bmatrix} \quad [6a,b]$$

と書ける。ここに  $k (<0)$  は傾斜時(図6のa-b間)の剛性である。

分岐経路に対する速度解[6b]式を積分すると

$$D = \{D_x, D_y\}^T = \left\{ -\frac{B}{2} \sin\theta, \frac{B}{2} \cos\theta \right\}^T \quad [7]$$

が得られる。[7]式は、柱重心の軌跡(解析解)が円軌道を描く鉛直軸回りの回転運動であることを意味している。

分岐後の釣合経路は、常に接線剛性行列の行列式が零となるため、臨界点の軌跡を表す。接線剛性行列の固有値零の固有ベクトルは

$$\phi_2 = \begin{Bmatrix} -\sin\theta \\ \cos\theta \end{Bmatrix} \quad [8]$$

荷重分布ベクトルと固有値零の固有ベクトルとの内積

$$f^T \phi_2 = \begin{Bmatrix} 1 \\ 0 \end{Bmatrix}^T \begin{Bmatrix} -\sin\theta \\ \cos\theta \end{Bmatrix} = -\sin\theta \quad [9]$$

より、臨界点の種類は鉛直軸回りの回転角が

$$\Theta = n\pi, n=0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad [10]$$

のとき、つまり最初に現れる転倒限界位置  $b$  点のみが分岐点である。その他の釣合状態では極限点となる。

以上より、剛体円柱に関する釣合経路の定式化を示し、鉛直軸回りの回転と分岐とが明確に対応することを解析的に明らかにした。また、分岐経路上の臨界点の種類を明確に示した。

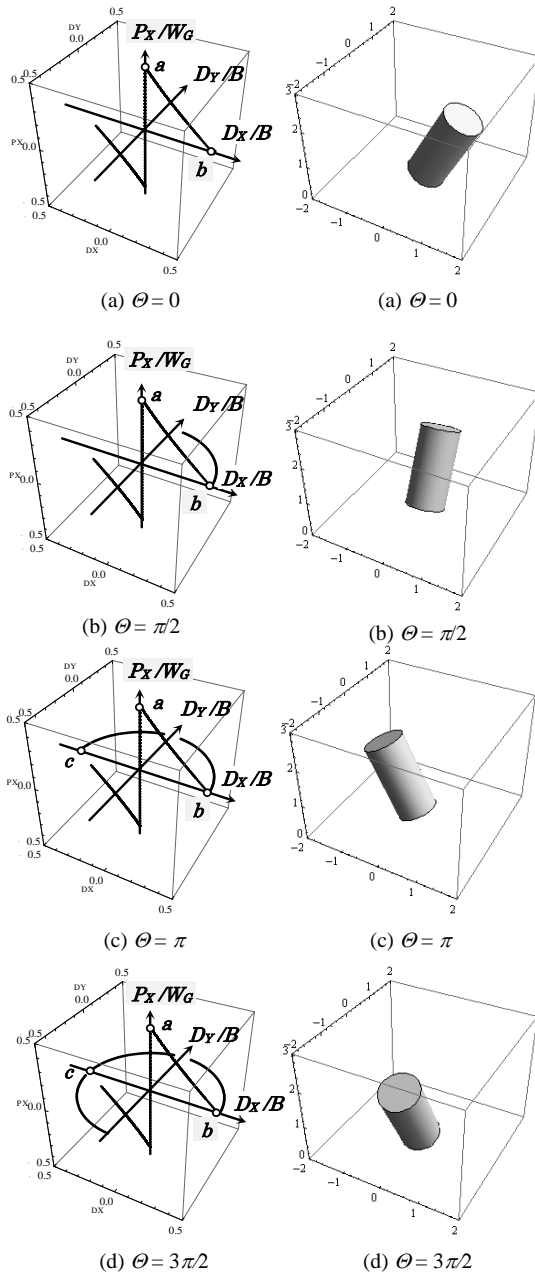


図6 水平荷重  $P_x$ —水平変位  $D_x, D_y$  関係

図7 柱の変位

#### (4) 今後の研究の推進方針

平成23年度までの“柱底面が初期位置から

ずれない”という理論展開の仮定を設けない場合、水平地動を受ける柱は鉛直軸回り以外に、図5(f)のように回転する可能性がある。その回転の発生メカニズムを解析的に解明することで本研究が完遂したことになる。また運動時に、柱底面と地面との衝突により減衰が生じる。この減衰効果も含めて、これらの特異な運動を評価しうる力学モデルから、石場建ての伝統木造建築物の限界状態に対する入力エネルギーの評価法を提示する計画にある。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計2件)

- ① T. Nishimura: A Bifurcation Phenomenon on the Oscillations of Columns Subjected to Horizontal Harmonic Ground Excitations, Proceedings of IASS Symposium Spatial Structures - Temporary and Permanent, International Association for Shell and Spatial Structures、査読有、CD-ROM、2010
- ② T. Nishimura: A Fundamental Study on the Nonlinear Behaviors of Rectangular Columns under Horizontal Harmonic Ground Excitations, Proceedings of the 9th Asian Pacific Conference on Shell and Spatial Structures, International Association for Shell and Spatial Structures、査読有、CD-ROM、2009

[学会発表] (計4件)

- ① 西村督、後藤正美、強制水平変位を受ける円柱の分岐後経路解と臨界点の種類、日本建築学会大会学術講演会、2011年8月23日、早稲田大学(東京都)
- ② 西村督、後藤正美、強制水平変位を受ける円柱の分岐挙動解析、日本建築学会北陸支部研究報告会、2011年7月10日、福井工業大学(福井県)
- ③ 西村督、後藤正美、水平調和地動を受ける角柱の動揺現象に関する加振実験、日本建築学会大会学術講演会、2009年8月29日、東北学院大学(宮城県)
- ④ 齋藤順、田守伸一郎、西村督、水平調和地動を受ける四角柱のロッキング現象に関する加振実験と数値解析、日本建築学会北陸支部研究報告会、2009年7月12日、富山大学五福キャンパス(富山県)

#### 6. 研究組織

(1) 研究代表者

西村 督 (NISHIMURA TOKU)

金沢工業大学・環境・建築学部・准教授

研究者番号：30367445

(2)研究分担者

後藤 正美 (GOTO MASAMI)

金沢工業大学・環境・建築学部・教授

研究者番号：40170469