

時間的に不連続な系の運動の観点に基づく手水舎の跳躍現象の説明

Explanation of jumping behavior of Chozu-sha in view of dynamics of discontinuous system

杉本和俊[†], 谷口朋代*, 向坊恭介**, 小野祐輔***

Kazutoshi Sugimoto, Tomoyo Taniguchi, Kyosuke Mukaibo, Yusuke Ono

[†] 鳥取大学大学院, 工学研究科社会基盤工学専攻土木工学コース博士前期課程
(〒680-8550 鳥取県鳥取市湖山南 4-101)

* 博士(工学) 鳥取大学大学院教授, 工学研究科社会基盤工学専攻
(〒680-8550 鳥取県鳥取市湖山南 4-101)

** 博士(工学) 鳥取大学大学院助教, 工学研究科社会基盤工学専攻
(〒680-8550 鳥取県鳥取市湖山南 4-101)

*** 博士(工学) 鳥取大学大学院准教授, 工学研究科社会基盤工学専攻
(〒680-8550 鳥取県鳥取市湖山南 4-101)

At Kumamoto earthquake on April 16, 2016, at 1:25 AM, the jumping behavior of the unanchored wooden structure named Chozu-sha was reported. To explain it in view of dynamics of discontinuous systems, the Chozu-sha is modeled by two-story rigid rectangular block, and its equations of motion are derived. Employing a corresponding recorded accelerogram, its jumping motion is computed. Comparison of the jumping distance computed with that reported yields that the proposed procedure may explain a major mechanism of the jumping of the Chozu-sha. Its essence is that the jumping distance is elongated if the horizontal acceleration which is larger than the rocking commencement acceleration but is smaller than the maximum acceleration lasts longer.

Key Words: jumping behavior, discontinuous system, rocking, rocking-sliding interaction

キーワード: 跳躍現象, 時間的に不連続な系, ロッキング, ロッキング-滑動相互作用

1. はじめに

強い地震動の経験後, 地面上の石や基礎とアンカーされていない構造物に, 大きな水平移動が生じていることが国内外で多数報告されており^{1,2,3}, 地面上に擦った跡が無いことなどから, 飛石現象や跳躍現象などと呼ばれている. これら現象のメカニズムとして, 大きな鉛直加速度の存在を仮定するもの⁴, 石直下の地盤をバネ-ダッシュポットでモデル化して大きな水平加速度を仮定するもの⁵, 石が穴から飛び出す時の水平地動の周期や振幅に着目するもの⁶, 個別要素法を用いて鉛直加速度を受ける円形の石の挙動を解析したもの⁷などが国内外で議論されているが, 何れも当該メカニズムの合理的な説明に至っていないのが現状である.

そのような背景の下, 著者らは, 水平地動加速度を受

けて時間的に不連続な応答を示す摩擦を有する水平基盤上に設置された剛直方体の5つのモード(静止, 滑動, ロッキング, ロッキング-滑動相互作用⁸, 跳躍⁹)のうち, 水平地動加速度を受けてロッキングし始め, ロッキング終了時の基盤との衝突時に跳躍し, 着地後にロッキング-滑動相互作用を経て静止に至る運動(図-1 参照)に着目して, 地上に置かれた石が飛石に至るメカニズムの説明を試みた¹⁰. 本稿は, それを熊本地震の後に熊本県阿蘇郡西原村内で報告された基礎とアンカーされていない木製構造物である手水舎の跳躍現象¹¹のメカニズムの説明に発展させるものである. ただし, 手水舎を密度の異なる上下層を有する剛直方体(以下, 二層の剛直方体)で近似し, 手水舎を構成する部材の質量分布を反映させた.

まず, 水平加速度を受ける二層の剛直方体のロッキング, 飛上り, ロッキング-滑動相互作用の運動方程式と, それぞれの運動から運動へ移行する条件を導出する. そして, 気象庁が公開している熊本地震の波形データを用い

[†] 連絡著者 / Corresponding author

E-mail: M16T6012Z@edu.tottori-u.ac.jp

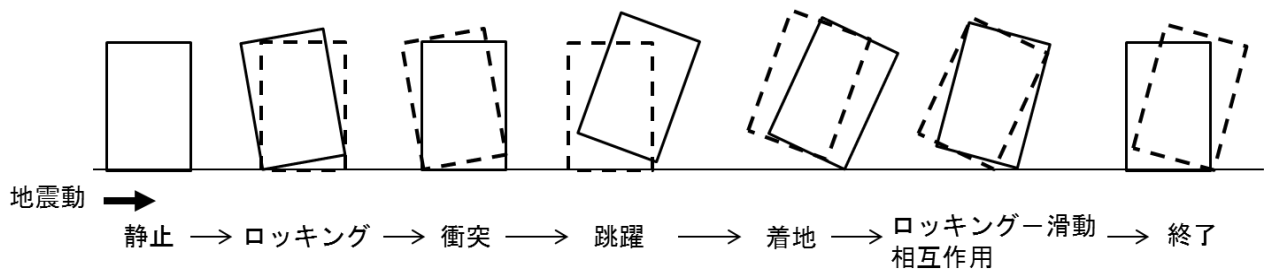


図-1 水平地動加速度によって剛直方体が跳躍する様子の模式図



写真-1 手水舎の跳躍後の全景
(北から南向きに撮影)



写真-2 柱基部の東石からの水平移動量
(北東方向に約 50cm)

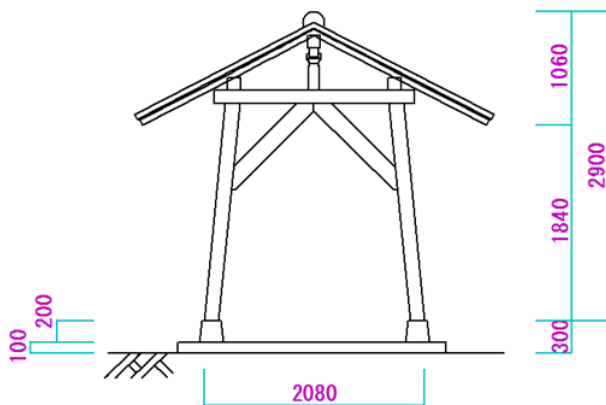


図-2 手水舎 短手側の立面図

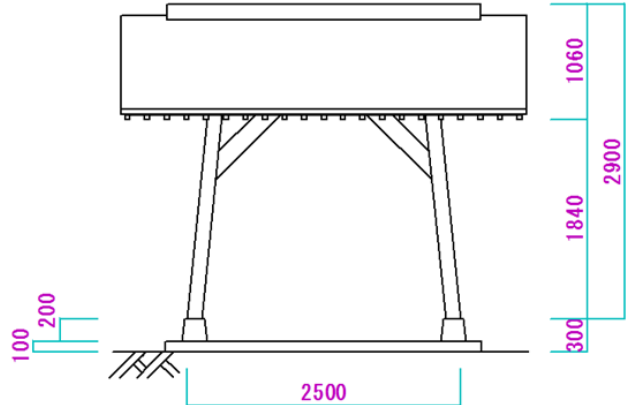


図-3 手水舎 長手側の立面図

て、二層の剛直方体の地震中の運動とそれによる水平移動量を時刻歴応答解析で求め、文献 11)に示された手水舎の跳躍現象による水平移動量と比較して考察を行う。

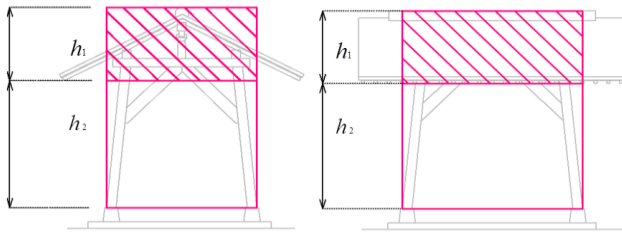
本稿に示した時間的に不連続な系に基づく力学モデルで跳躍現象の合理的な説明が可能となれば、地震後に発見される様々な物体の跳躍量から、対象物が経験した地震動の加速度や周期が推定できるようになると考えられる。このことについては地震後に発見されたラックの滑動量から、ラックが経験した地震動の主要動の最大加速度や周期を推定した研究^{12, 13)}が示唆的である。

2. 手水舎の跳躍の詳細とモデル化

写真-1は、向坊が平成28年5月21日から平成28年

5月23日にかけて現地調査¹¹⁾を行った際に撮影した手水舎の跳躍後の全景である。手水舎は長手方向が南北に位置しており¹⁴⁾、写真-1の東石の位置から見て、柱基部が北東に移動していることが見て取れる。写真-2は、柱基部の東石からの水平移動量を計測している様子であり、北東方向におよそ50cm移動していることが分かる。また、東石と柱基部の間のモルタル基礎上面や地面上に、擦った跡がないことから、手水舎は跳躍現象により移動したとも考えられた。

図-2及び図-3は、それぞれ現地での計測を基に作成した手水舎の短手側の立面図と長手側の立面図である(単位はmm)。手水舎の全高は、2.90m、幅2.50m、奥行き2.08mであり、地面上に敷設された厚さ10cmのモルタル基礎上に設置された高さ20cmの東石の上に設置



a)短手側で運動する場合 b)長手側で運動する場合
図-4 モデル化した二層の剛直方体

されている. 写真-2より, 束石中心部には深さ2cm程の臍(ほぞ)穴が切られていることが確認できるため, 少なくとも建築当初は柱臍もしくはダボで水平移動は拘束されていたと考えられる. また, 実測図面にに基づき, 屋根部の質量は1303.7kg, 柱部の質量は160.0kgで, 全質量を1463.7kgと推定した.

本稿では, 文献10)に示された飛石現象のメカニズムが剛直方体の運動の類推で説明されることを発展させて手水舎の跳躍現象の説明を試みるために, 図-4に示すように, 手水舎の屋根下端部を境として, 手水舎を密度の異なる上下層を有する剛直方体(以下, 二層の剛直方体)でモデル化する. 上層部の剛直方体は, 屋根瓦, 根太や梁などの質量が密に分布している部分をモデル化しており, 下層部の剛直方体は, 柱と梁の一部の質量が空間に疎らに分布している様子をモデル化している.

図-4は, 本稿の解析で用いる二層の剛直方体を, 手水舎の短手側と長手側の立面図に重ねたものであり, 上下層の剛直方体の高さ h_1 , h_2 は, それぞれ1.06m, 1.84mである. 手水舎の短手側の運動を考える場合(図-4a参照), 二層の剛直方体の幅 B は2.08m, 奥行き W は2.50mである. 一方, 同長手側の運動を考える場合(図-4b参照), 幅 B は2.50m, 奥行き W は2.08mとなる. 上層の剛直方体の密度 ρ_1 は, 屋根部の質量 $m_1 = 1303.7\text{kg}$ が均等に分布していると仮定して $\rho_1 = 236.5\text{kg/m}^3$ とした. 同様に下層の剛直方体の密度 ρ_2 は, 柱部の質量 $m_2 = 160.0\text{kg}$ が均等に分布していると仮定して $\rho_2 = 16.7\text{kg/m}^3$ とした.

3. 二層の剛直方体の運動方程式

二層の剛直方体が, 水平地動加速度を受けてロッキングし始め, ロッキング終了時の基盤との衝突時に跳躍し, 着地後にロッキング-滑動相互作用を経て静止に至る運動を記述する運動方程式, 及び運動が切り替わる条件式を導出する. 尚, 簡単のため, 二層の剛直方体は, 水平一方向のみの地動加速度を受けるものとした.

3.1 二層の剛直方体の諸量

図-5より, 二層の剛直方体の諸量は以下となる. ただし, 直交座標系 $x-y$ の原点 O は束石と柱基部の連結点にとっている. また, x_G :二層の剛直方体の全体の水平方向の重心位置, y_G :二層の剛直方体の全体の鉛直

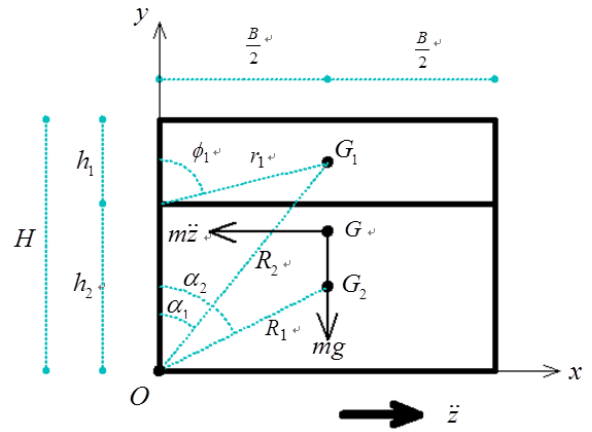


図-5 二層の剛直方体と座標系の定義

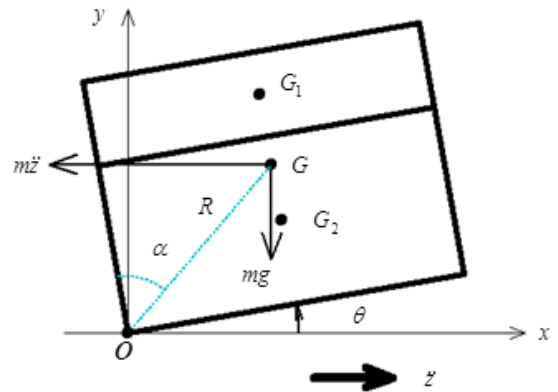


図-6 ロッキング中の運動

方向の重心位置である.

$$x_G = \frac{B}{2} \quad (1a)$$

$$y_G = \frac{m_1(2H - h_1) + m_2 h_2}{2(m_1 + m_2)} \quad (1b)$$

$$R_1 = \frac{2H - h_1}{2\cos\alpha_1} \quad (1c)$$

$$\alpha_1 = \tan^{-1}\left(\frac{B}{2h_2 + h_1}\right) \quad (1d)$$

$$R_2 = \frac{h_2}{2\cos\alpha_2} \quad (1e)$$

$$\alpha_2 = \tan^{-1}\left(\frac{B}{h_2}\right) \quad (1f)$$

$$r_1 = \frac{B}{2\sin\phi_1} \quad (1g)$$

$$\phi_1 = \frac{\pi}{2} - \tan^{-1}\left(\frac{h_1}{B}\right) \quad (1h)$$

3.2 ロッキングの開始条件

水平地動加速度により二層の剛直方体に作用する転倒モーメントと, 二層の剛直方体の自重による抵抗モーメントのつり合いより, 二層の剛直方体がロッキングし始

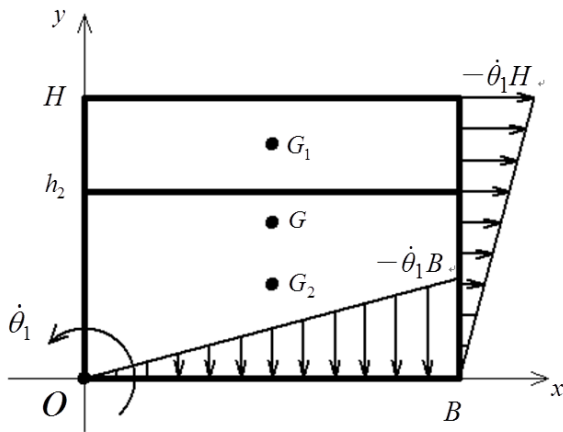


図-7 衝突着前の角速度と速度分布

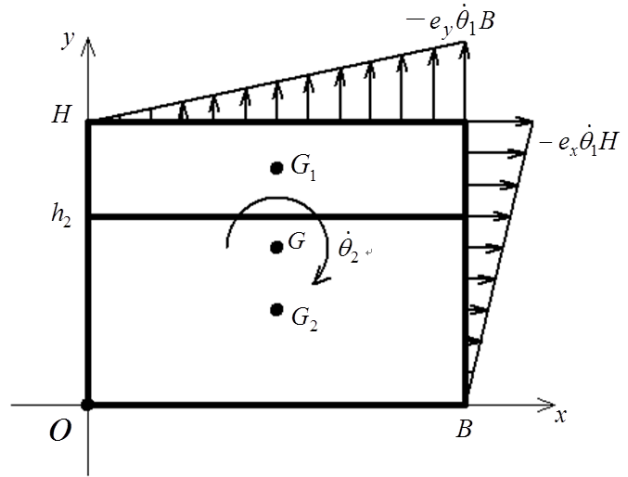


図-8 衝突直後の角速度と速度分布

める条件は、次式となる。

$$\ddot{z} > \frac{x_G}{y_G} g \quad (2)$$

ここで、 \ddot{z} : 水平地動加速度、 g : 重力加速度である。

3.3 ロッキング中の運動方程式

図-6 は、二層の剛直方体が、水平地動加速度 \ddot{z} を受けて、二層の剛直方体の左下端を中心に東石上の原点 O まわりでロッキングしている様子を示している。水平地動加速度作用時に、手水舎が東石上を滑動せずにロッキングできる理由は、手水舎の柱基部と東石とが臍で止まっていることを根拠としている。二層の剛直方体の左下端まわりのロッキングの運動方程式は次式となる。

$$I_o \ddot{\theta} = m \ddot{z} R \cos(\alpha - \theta) - mg R \sin(\alpha - \theta) \quad (3a)$$

ここで、二層の剛直方体の全質量 m 、動径 R と剛直方体の左側面と動径 R がなす角 α は式(3b)、(3c)、(3d)で与えられ、原点 O まわりの二層の剛直方体の全体の慣性モーメント I_o は式(3e)で与えられる。

$$m = m_1 + m_2 \quad (3b)$$

$$R = \sqrt{x_G^2 + y_G^2} \quad (3c)$$

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{x_G}{y_G} \right) \quad (3d)$$

$$I_o = \frac{m_1}{3} r_1^2 + m_1 R_1^2 + \frac{4}{3} m_2 R_2^2 \quad (3e)$$

3.4 転倒の条件

ロッキングによる O 点まわりの角度 θ に着目し、次式で転倒の判定を行う。

$$\theta = \frac{\pi}{2} \quad (4)$$

3.5 衝突の判定

転倒の条件と同様に、次式で衝突の判定を行う。

$$\theta = 0 \quad (5)$$

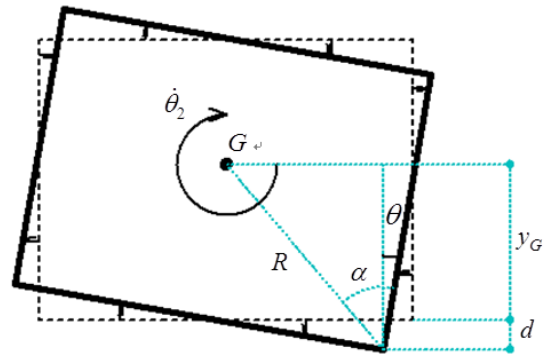


図-9 跳躍時の右下端の沈込量

3.6 跳躍時における二層の剛直方体の重心まわりの角速度の算出

文献9)では、剛直方体が基盤に衝突する直前の原点 O まわりの時計回りの角速度から求めた剛直方体の底面に分布する鉛直下向き velocity 分布と同側面に分布する x 軸正方向に平行な速度分布が、衝突によってそれぞれの方向の反発係数倍されると仮定している。そして、反発係数倍された衝突後の速度分布を用いれば、衝突後の運動が求められることを実験的、解析的に示している。図-7、図-8は衝突直前、衝突直後の二層の剛直方体で考慮する角速度や速度分布をそれぞれ示している。式(6a)、(6b)は衝突直前の原点 O まわりの角速度 $\dot{\theta}_1$ を用いて表した二層の剛直方体の側面と底面に分布する水平、鉛直方向の速度である。一方、式(6c)、(6d)は、水平、鉛直方向の反発係数 e_x 、 e_y を用いて表した衝突後の二層の剛直方体の側面と底面に分布する水平、鉛直方向の速度である。

$$\dot{x}_1 = -\dot{\theta}_1 y \quad (6a)$$

$$\dot{y}_1 = \dot{\theta}_1 x \quad (6b)$$

$$\dot{x}_2 = -e_x \dot{\theta}_1 y \quad (6c)$$

$$\dot{y}_2 = -e_y \dot{\theta}_1 x \quad (6d)$$

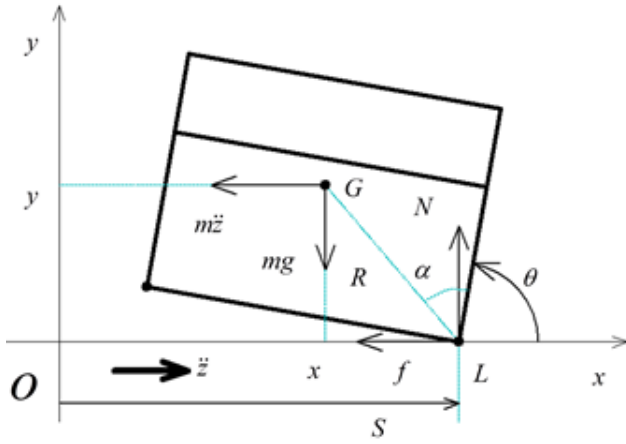


図-10 着地後のロッキング運動

衝突直後の二層の剛直方体の全体の重心 G 点まわりの角運動量のつり合いより、跳躍時の同重心 G 点まわりの角速度 $\dot{\theta}_2$ を得る。

$$\dot{\theta}_2 = \frac{B}{6I_G} \left[B e_y \left\{ (H - y_G) \rho_1 + y_g \rho_2 \right\} (2B - 3x_G) - e_x \left\{ \rho_1 (2H^3 - 2h_2^3 - 3H^2 y_G + 3h_2^2 y_G) + \rho_2 h_2^2 (2h_2 - 3y_G) \right\} \right] \dot{\theta}_1 \quad (7a)$$

ここで、 G 点まわりの二層の剛直方体の全体の慣性モーメント I_G は次式で与えられる。

$$I_G = I_0 - mR^2 \quad (7b)$$

3.7 跳躍の条件

図-9は、跳躍中の剛直方体の全体の重心 G 点まわりの角速度 $\dot{\theta}_2$ によって生じる右下端の鉛直下向きの変位 d を示している。 θ は二層の剛直方体の右側面と右下端を通る鉛直線とのなす角である。

$$d = R \cos(\alpha - \theta) - y_G \quad (8a)$$

そのため、衝突した時刻 t_i からの経過時間 Δt による右下端の鉛直下向きの変位の増分 $d(\Delta t)$ が、同重心 G 点の鉛直上向きの変位の増分 $y(\Delta t)$ よりも小さければ、剛体は跳躍していると見なせるので、跳躍の条件は次式となる。

$$y(\Delta t) > d(\Delta t) \quad (8b)$$

3.8 跳躍中の運動方程式

跳躍中の二層の剛直方体の全体の重心 G 点の水平、鉛直と回転方向の運動方程式は次式となる。

$$\ddot{x}_G = -\ddot{z} \quad (9a)$$

$$\ddot{y}_G = -g \quad (9b)$$

$$\ddot{\theta} = 0 \quad (9c)$$

ここで、式(6c)、(6d)と(7a)より、跳躍運動の水平、鉛直方向の初速度と回転方向の初期角速度は次式となる。

$$\dot{x} = -e_x \dot{\theta}_1 y_G \quad (10a)$$

$$\dot{y} = -e_y \dot{\theta}_1 x_G \quad (10b)$$

$$\dot{\theta} = \dot{\theta}_2 \quad (10c)$$

3.9 着地の条件

二層の剛直方体の着地の判定は、右下端の y 座標値 y_D で判断する。本稿では、手水舎の柱基部が束石上面と同じ高さの水平面上に着地した場合と、地面に着地した場合について検討する。束石上面と同じ高さの水平面への着地を想定する場合は式(11a)で判断し、地面への着地を想定する場合は式(11b)で判断する。

$$y_D = 0 \quad (11a)$$

$$y_D = -0.3 \quad (11b)$$

3.10 着地後の運動

図-10は、二層の剛直方体の右下端が水平基盤面に着地した時の様子を示す。着地点を L とし、着地した瞬間の時刻を t_L とする。二層の剛直方体の運動方程式は、着地点 L での滑動の有無により、二通りに分類される。

(1) 着地点で滑動が生じずロッキング運動のみ生じる場合

二層の剛直方体が、着地点 L で滑動しない場合には、二層の剛直方体は右下端を中心に L 点まわりのロッキング運動を行う。二層の剛直方体の右下端まわりのロッキングの運動方程式は次式となる。

$$I_o \ddot{\theta} + mgR \cos(\alpha + \theta) = m\ddot{z}R \sin(\alpha + \theta) \quad (12a)$$

ここで、二層の剛直方体が着地点 L で滑動せず、右下端まわりのロッキング運動を継続するために必要な L 点に作用する垂直抗力 N と静止摩擦力 f は、それぞれ次式で与えられる。

$$N = m\ddot{\theta}R \cos(\alpha + \theta) - m\dot{\theta}^2 R \sin(\alpha + \theta) + mg \quad (12b)$$

$$f = m\ddot{\theta}R \sin(\alpha + \theta) + m\dot{\theta}^2 R \cos(\alpha + \theta) - m\ddot{z} \quad (12c)$$

(2) 着地点でロッキングしながら滑動する場合

二層の剛直方体が、着地点 L でロッキングしながら滑動する場合（ロッキング-滑動相互作用運動）には、コリオリ力を考慮するためラグランジュの方程式を用いて、水平、回転方向の運動方程式を得る。

$$-m\ddot{\theta}R \sin(\alpha + \theta) - m\dot{\theta}^2 R \cos(\alpha + \theta) = -m\ddot{z} - \mu'N \quad (13a)$$

$$-m\ddot{S}R \sin(\alpha + \theta) + I_o \ddot{\theta} + mgR \cos(\alpha + \theta) = m\ddot{z}R \sin(\alpha + \theta) \quad (13b)$$

ここで、 S は水平方向 x と同じ向きであり、原点 O から滑動-ロッキング相互作用運動の回転の中心である右下端までの変位を意味している。 μ' は動摩擦係数であり、垂直抗力 N は次式で与えられる。

$$N = m\ddot{\theta}R \cos(\alpha + \theta) - m\dot{\theta}^2 R \sin(\alpha + \theta) + mg \quad (13c)$$

(3) 着地点での滑動の有無の判定

着地した時に、二層の剛直方体が着地点 L で滑動しないと仮定すれば、二層の剛直方体の右下端に作用している垂直抗力 N と静止摩擦力 f は、式(12b)、(12c)で与えられる。そこで、静止摩擦係数 μ と垂直抗力 N の積で与えられる最大静止摩擦力 f_{\max} と静止摩擦力 f を比較し、次式を満たす場合に滑動が生じ、ロッキング-滑動相互

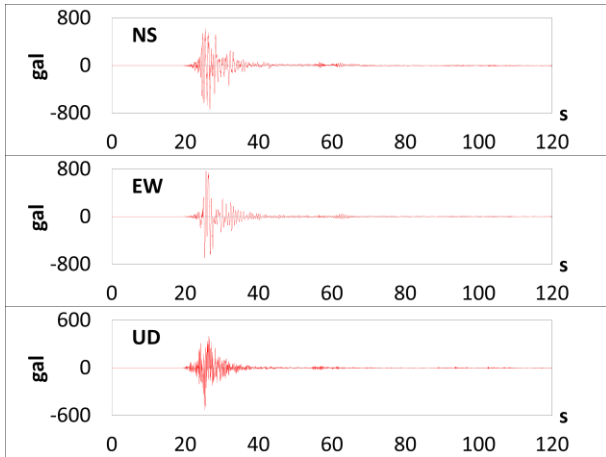


図-11 西原村小森での地震波記録

作用運動に移行すると考える.

$$f_{\max} < f \quad (14)$$

3.11 運動終了の判定

二層の剛直方体の左下端の y 座標値 y_A に着目し、運動終了を判断する. 東石上面と同じ高さの水平面での運動を想定する場合は、式(15a)で判断し、東石から地面への落下を想定する場合は、式(15b)を条件式とする.

$$y_A = 0 \quad (15a)$$

$$y_A = -0.3 \quad (15b)$$

4. 跳躍現象の地震応答解析と考察

4.1 解析に用いた波形データと諸量の決定

入力地震波は剛体の移動量を算定する上で重要な条件であり、手水舎で観測された地震時の波形データを用いることが理想であるが、本稿では入手可能で手水舎から最も近距離(直線距離 1.8km)に設置されていた地震計で記録された波形データを用いた. ここで、対象地点と地震波の記録位置が異なる場合は断層からの距離や位置関係、地盤条件などを考慮すべきであるが、本稿では地震波の選定に関してそこまで議論していない. 本稿で用いた加速度記録は、気象庁が公開している 2016 年 4 月 16 日 1 時 25 分 北緯 $32^{\circ} 45.3'$ 東経 $130^{\circ} 45.8'$ 深さ 12km M7.3 熊本県熊本地方の地震を記録した地方公共団体震度計の波形データで、熊本県阿蘇郡西原村小森で記録された加速度記録¹⁵⁾である. 図-11 は、同加速度記録の時刻歴であり、NS, EW, UD 方向の最大加速度は、それぞれ 742.1gal, 770.0gal, 531.3gal であった. ここで、気象庁の波形データは 1/100 秒でのサンプリングであったが、本解析での運動の切り替わりを精度良く判断するために、1/10,000 秒でのサンプリングデータとなるようにデータを線形補間した.

また、柱基部と東石との反発係数や柱基部と地面との摩擦係数が不明であるが、本稿ではこれらの値を文献⁹⁾

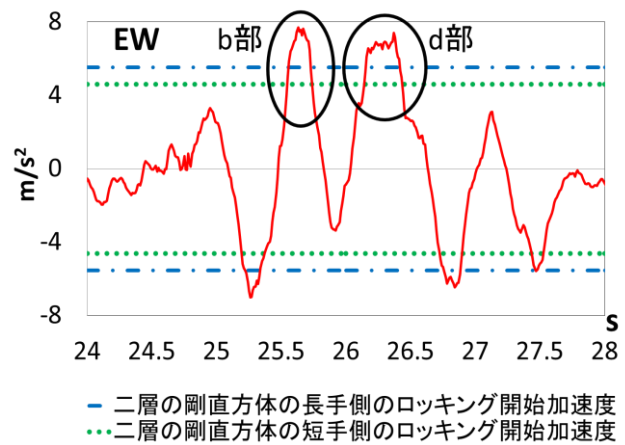


図-12 EW 成分 ロッキング開始時刻付近の加速度

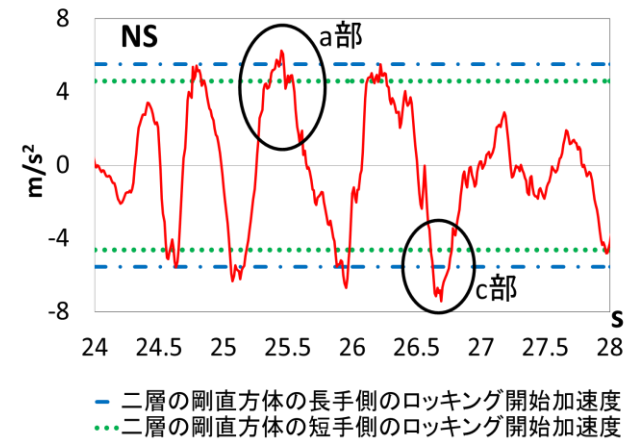


図-13 NS 成分 ロッキング開始時刻付近の加速度

に示された ABS 樹脂と鋼板の実験から求めた値を基に検討を進めることとし、静止摩擦係数 $\mu = 0.18$ 、動摩擦係数 $\mu' = 0.17$ 、水平方向の反発係数 $e_x = 0.95$ 、鉛直方向の反発係数 $e_y = 0.85$ とした.

本解析では、水平一方向の地動加速度しか考慮できないことから、最大加速度の大きい EW 成分の地震波を入力して時刻歴応答解析を行い、手水舎の跳躍現象の特徴を把握することとした. また、実際の手水舎の柱基部は東石から外れて地面上に落下しているが、跳躍後も柱基部が東石上面の高さの水平面上に留まった場合の水平移動量と、実際と同様の東石上面から 30cm 低い地面上に落下した場合の水平移動量について検討し、柱基部の落差が水平移動量に及ぼす影響について考察を行った. その後、NS 成分の地震波を用いた同様の検討を行い、観察された手水舎の跳躍現象にとって支配的な地震波の入力方向などについて考察を行った.

4.2 各ケースの運動の様子

図-12, 図-13 は、図-11 に示した NS 方向, EW 方向の地震波の時刻歴のうち、二層の剛直方体の長手側および短手側それぞれのロッキング開始加速度以上になる加速度波形の部分の拡大図である. また両図には、二層

表-1 各解析ケースの運動の様子

case No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
入力加速度データ	NS a部				EW b部				NS c部				EW d部			
剛直方体の幅	長手側		短手側		長手側		短手側		長手側		短手側		長手側		短手側	
着地、運動終了の基準面	東石	地面	東石	地面	東石	地面	東石	地面	東石	地面	東石	地面	東石	地面	東石	地面
ロッキング開始時刻 (s)	25.405	25.405	25.362	25.362	25.556	25.556	25.546	25.546	26.624	26.624	26.609	26.609	26.153	26.153	26.141	26.141
衝突時刻 (s)	25.518	25.518	25.686	25.686	25.921	25.921	26.014	26.014	26.914	26.914	27.038	27.038	26.716	26.716	26.871	26.871
着地時刻 (s)	25.518	25.766	25.704	25.942	25.955	26.186	26.060	26.286	26.931	27.170	27.066	27.300	26.757	26.985	26.960	27.167
運動終了時刻 (s)	25.518	25.790	25.735	26.025	26.037	26.343	26.143	26.436	26.973	27.273	27.117	27.411	26.858	27.164	27.118	27.401
ロッキングの継続時間 (s)	0.113	0.113	0.324	0.324	0.365	0.365	0.468	0.468	0.291	0.291	0.429	0.429	0.562	0.562	0.731	0.731
跳躍の継続時間 (s)		0.248	0.018	0.256	0.034	0.265	0.046	0.272	0.017	0.256	0.029	0.262	0.042	0.269	0.088	0.296
跳躍時の最大上昇量 (m)		0.000	0.001	0.001	0.003	0.003	0.004	0.004	0.001	0.001	0.002	0.002	0.005	0.005	0.016	0.016
ロッキング-滑動相互作用継続時間 (s)		0.024	0.031	0.083	0.082	0.157	0.083	0.150	0.041	0.103	0.051	0.111	0.101	0.179	0.158	0.234
跳躍による水平移動量 (m)		-0.098	0.005	0.127	0.019	0.195	0.033	0.143	0.004	0.062	0.013	0.143	0.029	0.337	0.137	0.561
ロッキング-滑動相互作用による水平移動量 (m)		0.000	0.002	0.011	0.013	-0.023	0.005	-0.022	0.002	0.010	0.004	0.005	0.031	0.019	0.036	0.055
水平総移動量 (m)		-0.098	0.007	0.138	0.031	0.172	0.038	0.121	0.007	0.071	0.017	0.148	0.060	0.357	0.174	0.616

の剛直方体の長手側がロッキングを開始するために必要な水平地動加速度 (5.538m/s^2) が一点鎖線で、同短手側に必要な水平地動加速度 (4.608m/s^2) が点線で示してある。図-12のb部は、EW成分の最大加速度 770.0gal が表れる部分であり、d部は、最大加速度はそれより小さいが、二層の剛直方体のロッキング開始加速度以上の加速度の継続時間が長い部分である。表-1のcase 5からcase 8は、図-12のb部の波形データを対象に、二層の剛直方体の長手側と短手側、運動が東石上面と同じ高さの水平面で終了することを想定する場合と東石上面から30cm低い地面への落下を考える場合の運動について、各運動が生じる時刻と継続時間、水平と鉛直の移動量などをまとめたものである。

同表のcase 13からcase 16は、それらを図-12のd部についてまとめたものである。case 5からcase 8のロッキング継続時間と、case 13からcase 16のそれらと比較すると、case 5からcase 8の方が小さいことが分かる。このことは、水平地動加速度のピークは大きいものの、ロッキングを開始する加速度以上の加速度の継続時間が短い場合には、ロッキングの継続時間が短くなるため、ロッキングによる回転角度は然程大きくならず、ロッキング終了後に基盤に衝突する際のO点まわりの角速度 $\dot{\theta}_1$ も大きくならないため、その後の跳躍による二層の剛直方体の上昇量や水平移動量は小さいものに留まると考えられる。一方、case 13からcase 16では、地震加速度の最大値は然程大きくないが、ロッキングを開始する加速度以上の加速度の継続時間が長い場合には、二層の剛直方体のロッキングの継続時間が長くなるため、ロッキ

ングによる回転角度が大きくなり、ロッキング終了後に基盤に衝突する際の角速度 $\dot{\theta}_1$ も大きくなるため、その後の跳躍による剛直方体の上昇量や水平移動量が大きくなると考えられる。ここで、ロッキングを開始する加速度以上の加速度の継続時間が長いほど、剛直方体のロッキング応答が成長することは、文献8)でも指摘されている。加えて、地震動が剛体をロッキングさせ得る加速度以上の値を持ち、その加速度の継続時間が長い場合、即ち基盤の速度が大きくなる場合に、大きな剛体の移動量を生じさせやすいと推測される。

表-1におけるcase 5からcase 8とcase 13からcase 16の長手側と短手側の運動を比べると、case 6とcase 8を除き、ロッキングを開始するために必要な水平加速度の小さい短手側の方が、大きな移動量を示していることが分かる。長手側のcase 6における移動量が短手側のcase 8における移動量よりも例外的に大きくなっているのは、跳躍時の水平移動量の差に起因すると考えられる。

ここで、二層の剛直方体の応答の時刻歴に基づき、運動の様子を詳細に考察する。図-14 a)は、図-12のb部の水平加速度による、二層の剛直方体の左下端まわりのロッキングによる回転角と、重心Gの上昇量、水平移動量の時刻歴であり、図-14 b)は同d部のそれらである。図-14 a)は、二層の剛直方体の運動が、東石上面と同じ高さの水平面で終了することを想定した場合(表-1のcase 7に相当)の時刻歴であり、図-14 b)は同運動が東石上面より30cm低い地面への落下を与える場合(表-1のcase 16に相当)の時刻歴である。ここで、図-14 b)の鉛直変位の時刻歴の詳細について以下に説明する。26.8秒あたりに東石上面で衝突した後に跳躍し、27.2秒あたりで右下端が地面に着地している。27.2秒あたりで

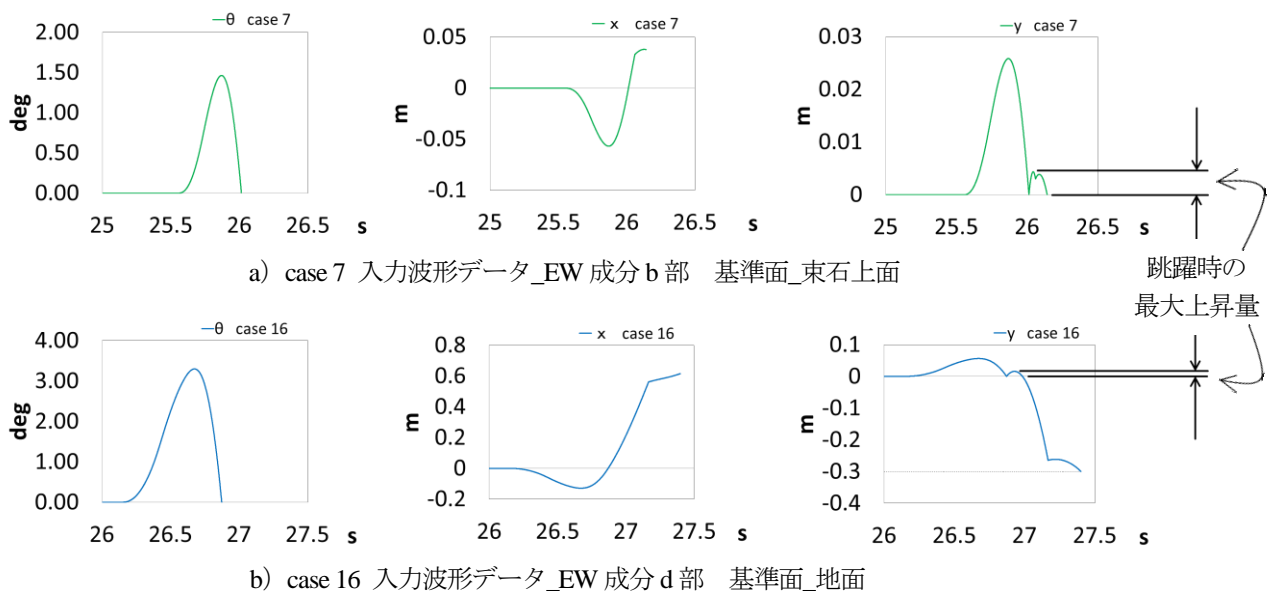


図-14 二層の剛直方体の幅_短手側 ロッキング時の回転角度, 重心の水平, 鉛直変位



写真-3 水盤への柱部の引っかかり

跳躍しているように見えるのは、右下端が地面に着地してはいるものの、重心は地面である -0.3m に到達していないためである。そして、ロッキング-滑動相互作用運動を経て、 27.4 秒に剛体の左下端が地面に到達し全体の運動が終了する。図-14 a)の左端のロッキングによる回転角度の時刻歴より、b 部の水平加速度により二層の剛直方体の左下端に生じるロッキングによる最大角度は 1.46° であり、これにより二層の剛直方体の右下端は東石上面より 53mm 浮き上がることになる。また、図-14 a)右端の重心 G の上昇量の時刻歴より、b 部の水平加速度による二層の剛直方体の跳躍時の最大上昇量は 4mm であり、柱基部の脛が東石上面の脛穴から抜け出せない状態であったことが推測される。一方、図-14 b)左端の

ロッキングによる回転角度の時刻歴より、d 部の水平加速度が作用する二層の剛直方体の左下端に生じるロッキングによる最大角度は 3.30° であり、これにより二層の剛直方体に右下端は東石上面より 120mm 浮き上がることになる。また、図-14 b)右端の重心 G の上昇量の時刻歴より、d 部の水平加速度による二層の剛直方体の跳躍時の最大上昇量は 16mm であり、柱が東石の脛穴に起因する拘束から抜け出すために必要な上昇量のオーダーは適合している。これらのことから、手水舎は、図-12の 25.3 秒付近及び 25.6 秒付近 (b 部)の水平加速度を受けた時、東石上でロッキングや小さな跳躍はするものの、柱基部の脛が、東石上面の脛穴から抜け出せないため、東石上に留まったと推測される。一方、図-12の 26.3 秒付近 (d 部)の水平加速度を受けると、ロッキングによる回転角が十分成長し、結果として衝突後の上昇量が大きくなることで、東石の脛穴から柱基部の脛が抜け出し、水平移動を伴う跳躍現象に移行したと推測される。

更に、表-1の case 15 と case 16 の跳躍による水平移動量を比較すると、case 15 のそれは 137mm (東石上面で運動が終了することに相当)、case 16 のそれは 561mm (地面上で運動が終了することに相当)であることから、東石とモルタル基礎による高さの差 (30cm) が 3.5 倍の水平移動量の差を生み出すことから、実際の手水舎の水平移動量と比較するためには、柱基部の落差を考慮する必要があると考えられる。このことは、case 16 の水平総移動量 (616mm) が、文献 11)で報告された水平移動量 (約 50cm)を精度良く近似できていることから裏付けられる。また、手水舎の柱部が写真-3 に示されるモルタル基礎の中央付近にある水盤に引っかかり、水平方向の移動量が制限されていることが確認できる。これは実際の手水舎の水平移動量が case 16 の水平総移動量に達していない根拠の一つと考えられる。

ここで、二層の剛直方体の跳躍現象の解析に大きな影響を及ぼすと考えられる鉛直方向の反発係数 e_y を 0.85

表-2 パラメータを調整した解析ケース

case No.	10'	16'
入力加速度データ	NS c部	EW d部
剛直方体の幅	長手	短手
着地、運動終了の基準面	地面	
ロッキング開始時刻(s)	26.624	26.141
衝突時刻(s)	26.914	26.871
着地時刻(s)	27.169	27.159
運動終了時刻(s)	27.268	27.294
ロッキングの継続時間(s)	0.291	0.731
跳躍の継続時間(s)	0.255	0.288
跳躍時の最大上昇量(m)	0.001	0.011
ロッキングー滑動相互作用継続時間(s)	0.099	0.135
跳躍による水平移動量(m)	0.061	0.543
ロッキングー滑動相互作用による水平移動量(m)	0.006	-0.068
水平総移動量(m)	0.067	0.475

から0.70に減じて解析を行った結果、二層の剛直方体の全体の重心G点の上昇量は11mm、水平総移動量が543mmと、case 16の場合と比べて約12%程度小さくなる結果となった。しかし、前述の跳躍現象に移行する推論が、棄却されるには至らないと考えられる。加えて、柱基部と東石の間の反発係数、静止摩擦係数や動摩擦係数は、本来、手水舎の材料を用いて計測したものをを用いるべきであるが、反発係数 e_y を文献16)のコンクリートと木材の衝突実験より $e_y = 0.70$ とし、静止摩擦係数 μ 、動摩擦係数 μ' を文献17)の木材と花崗岩、木材とコンクリートの実験より $\mu = 0.40$ 、 $\mu' = 0.30$ とした。また、文献14)より手水舎の建築方向を特定し、それに応じた方向の地震波を入力した。長手側に図-13のc部のNS方向成分、短手側に図-12のd部のEW成分を入力し、再度解析した結果を表-2に示す。表-2は表-1のcase 10とcase 16の反発係数などを調整したものに相当するので、case 10'とcase 16'と表記する。case 10'とcase 16'は反発係数がcase 10とcase 16より小さくなったことや、摩擦係数が大きくなったことから、鉛直方向の変位や跳躍による水平移動量はいずれも小さくなり、水平総移動量は観測値に近づいた。

他方、NS成分の地震波を用いて同様の検討を行った結果が表-1のcase 1からcase 4と同case 9からcase 12である。図-13に示された地震波形の形状から、a部、c部とも、図-12のb部に対応すると考えられ、表-1に示された解析結果も同様の傾向を示している。ここで、表-1のcase 1の斜線は、ロッキング終了後の衝突から運動終了までの各運動の切り替わりが、時間刻み

1/10,000秒では区別できなかったことを意味する。これは、図-13のa部の加速度波形において、長手側の剛直方体がロッキングを開始するための加速度を超える継続時間が短いために、ロッキング時の回転角度が発達せず、衝突後の跳躍と滑動ーロッキング相互作用双方の変位を発生させるために必要な角速度 $\dot{\theta}_1$ が得られなかったためと判断できる。

更に、表-1中の移動量の内、負の値はx軸負方向に移動したことを示している。跳躍による水平移動量が負の値をとっているのはcase 2のみである。これは剛直方体の水平速度より、基盤の水平速度の方が大きいことを示しており、その結果として剛直方体がx軸負方向に移動したと考えられる。また、表-1のcase 1からcase 16に示したほとんどのケースで、跳躍による水平移動量がロッキングー滑動相互作用による水平移動量を上回っていた。これは、二層の剛直方体の高さがその幅よりも大きい縦長であったことに起因すると予想される。

以上のことより、本稿で示した解析手法が、手水舎の跳躍現象の主たるメカニズムを説明していると考えられる。

5. 結論

本稿では、水平一方向の地動加速度を受ける二層の剛直方体がロッキング後に跳躍し、着地後にロッキングー滑動相互作用運動を経て静止に至る過程を考え、一連の運動による水平移動量に着目することで、熊本地震時に報告された手水舎の跳躍現象の支配的なメカニズムの説明を試みた。その結果、以下のこと明らかになった。

二層の剛直方体のロッキング開始に必要な加速度を超える特徴の中で、加速度は大きい継続時間は短い場合(図-12のb部、図-13のa部、c部に相当)よりも、加速度の大きさは然程でもないが継続時間の長い場合(図-12のd部に相当)の方が剛直方体の水平移動量などに与える影響が大きいことが分かった。

ロッキング開始から運動終了まで柱基部が東石上面の高さの水平面上に留まった場合と、跳躍から着地に移行する際に東石上面の高さから30cm低い地面への着地を想定する場合とでは水平移動量に大きな差が生じた。図-12のd部に示すEW成分の波形データを用い、二層の剛直方体の幅Bを短手側としたとき、約4倍もの差が生じた。よって、東石上面と地面との高さの差30cmを考慮することが、地震動による手水舎の水平移動量を推定する上で重要であることが分かった。

二層の剛直方体の幅Bが長手側と短手側であることの違いが水平移動量に与える影響についてまとめる。ロッキング時の最大回転角度に着目すると、短手側の方が長手側よりも大きな回転角度となり、それに応じて衝突時の原点Oまわりの角加速度 $\dot{\theta}_1$ も大きくなり、短手側の方が長手側よりも大きな水平移動量が発生することがほとんどのケースにおいて明らかとなった。唯一異なったのはロッキングー滑動相互作用運動による変位がx軸負方向になったcase 6(長手側)とcase 8(短手側)である。

最後に、本稿で提案した解析法によって計算される剛

直方体の水平移動量は、手水舎の長手側、或いは短手側に生じるものに限られており、実際の手水舎に生じた建築方角斜め方向の水平移動量を説明するには至っていない。その説明のためには、水平二方向及び鉛直方向の地震加速度を受けて三次元的に運動すること、構造物の応答や柱のたわみによるバネの効果などを取り入れた解析を行う必要があるが、その検討は次の機会に譲りたい。

謝辞

本稿における本文の入力、図表の作成、プログラム作成の補助など、鳥取大学工学部土木工学科構造工学研究室の皆様の大なる協力に深く感謝の意を記します。

参考文献

- 1) 宇田進一：地震時の飛び石と活断層，活断層研究，22，33-34，2002.
- 2) 翠川三郎：地震時に物体の跳躍現象が生じた事例の調査，地震，2，47，333-340，1994.
- 3) 伯野元彦：被害から学ぶ地震工学 現象を素直に見つめて，鹿島出版，41，1992.
- 4) 松尾成光，伊藤勝祥，梅田康弘：石の投げ飛ばし実験，京都大学防災研究所年報，36，B-1，373-379，1993.
- 5) I. N. Psycharis, P. C. Jennings: Upthrow of objects due to horizontal impulse excitation, Bulletin of Seismological Society of America, 75, 2, 543-561, 1985.
- 6) 大町達夫，荒井靖博，竹田尚史：地震による半埋没物体の跳躍について，構造工学論文集，33A，595-606，1987.
- 7) 林康裕，金子美香，渡辺孝英：飛石現象に基づく地震動強さの簡略的評価，日本建築学会構造系論文集，539，43-50，2001.
- 8) T. Taniguchi: Nonlinear response analyses of rectangular rigid bodies subjected to horizontal and vertical ground motion, Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Volume 31, Issue 8, pp. 1481-1500, 2002.
- 9) 西公平：ロッキングする剛体の衝突中の力学的エネルギーの収支に基づく衝突後挙動の実験的検証，鳥取大学大学院工学研究科修士論文，2014.
- 10) 杉本 和俊，小野 祐輔，谷口 朋代：滑動を伴うロッキングを考慮した地震時の飛び石の移動量の推定，第 68 回土木学会中国支部研究発表会，I -15，2016.
- 11) 瀧野敦夫：社寺建築物の詳細調査，平成 28 年（2016 年）熊本地震による木造建築物の被害調査報告会資料集，日本建築学会，近畿支部木造部会，59-62，2016.
- 12) Susan E. Hough, Tomoyo Taniguchi, and Jean-Robert Altidor: Estimation of Peak Ground Acceleration from Horizontal Rigid Body Displacement: A Case Study in Port-au-Prince, Haiti, Bulletin of Seismology Society of America, Vol. 102, Issue 6, pp. 2704- 2713, 2012.
- 13) T. Taniguchi, T. Miwa: A simple procedure to approximate slip displacement of freestanding rigid body subjected to earthquake motions, Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Volume 36, Issue 4, pp. 481-501, 2007.
- 14) <http://www.zenrin.co.jp/product/service/j-map.html>
- 15) http://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/kyoshin/jishin/1604160125_kumamoto/index2.html
- 16) 曾我部 隆久，布施谷 寛，福家 敬泰，四宮 征一，麻植 政行：海岸構造物への木材衝撃力について，海岸工学研究発表会論文集，28，584-588，1981
- 17) 平成 27 年度 国土交通省 建築基準整備促進事業，全面に土が塗られていない土塗壁等で構成された木造建築物の設計基準に関する検討 事業報告書
(2016 年 9 月 26 日受付)
(2017 年 2 月 1 日受理)