

# 地震時に発生する飛び石に関する一研究

石丸和宏\* 成枝秀介\*\* 神澤拓\*\*\* 森山準基\*\*\*\*

## A Study of Upthrow of Boulders by Earthquake

Kazuhiro ISHIMARU, Shusuke NARIEDA, Taku KANZAWA, Junki MORIYAMA

### ABSTRACT

The Phenomenon of upthrow of boulders often occurs by the big earthquakes. The top of the grave stones of Atsumoriduka, or a tomb of Taira no Atsumori, which are piled up stones, were thrown by the 1995 Hyogo-ken Nanbu earthquake. In this study, the model experiments of the upthrow of boulders by vertical impulses were conducted. As the results, the impact time of the vertical impulses is shorter than 0.0005 seconds so that the top of the model stones are thrown out.

**KEYWORDS** : boulder, upthrown, earthquake, impact, impulse

### 1. はじめに

兵庫県南部地震により倒壊・大破した土木・建築構造物の多くは、現耐震基準制定以前（1981）の古い構造物であり、その破壊形式は従来の地震に見られた水平地震動による曲げあるいはせん断破壊であったが、水平地震動では説明のできない破壊形式も見られた。例えば、鉄筋コンクリート造橋脚に発生した輪切り状の水平ひび割れや鋼製橋脚の提灯座屈、岩石・門柱の門傘・墓石等の跳躍現象、飛び石現象などである(写真1)。以前より、地震時の飛び石現象は報告されているが、近年では2007年に発生した新潟県中越沖地震においても、飛び石現象が確認されている<sup>1)</sup>。これらの現象は横揺れではなく、衝撃的な縦方向の力により生じたと考えられるが、地震計には縦方向の大きな加速度の記録はない。これは地震計測時間間隔が0.01secであるため、瞬間的に作用する衝撃力をとらえることができなかったと考えられる。本研究は、敦盛塚をモデルとした積載物下面に鉛直上方の衝撃を与える実験を行い、それらの飛び方とそれに作用するひずみや衝撃力の作用時間の関連性を調べる。



写真1 敦盛塚破壊後

### 2. 衝撃実験

ひずみを計測するために用いた実験装置を以下の実験装置概略図(参照図1)に示す。積載物は敦盛塚を想定し、サイコウッドを積み重ねたものであり、積載物の下面に衝突体を下から当てることで、積載物に鉛直上向きの衝撃力が作用するようにした。また、衝撃力と作用時間を計測するため、図2に示す積載物の下に円柱を置き、その柱部には対面するようにひずみゲージを貼り付けることで、曲げの影響を無くし、軸力を計測できるようにした(参照図2)。

\*都市システム工学科,\*\*電気情報工学科,\*\*\*広島大学,\*\*\*\*(株)広築

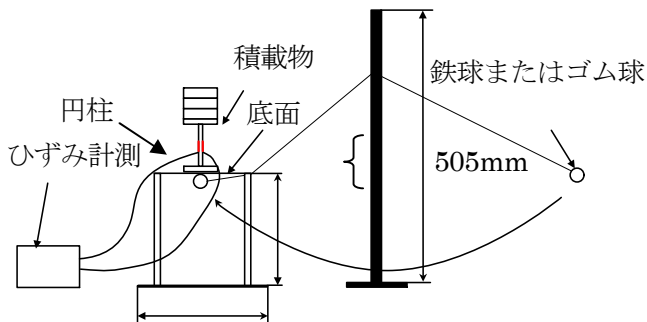


図 1 実験装置概略図

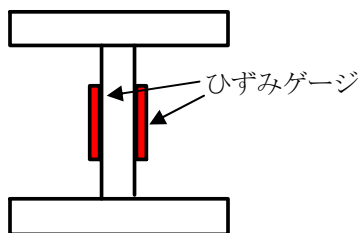


図 2 ひずみゲージ貼り付け位置

### 2・1 衝突物の材質を変えた場合

衝突物の材質の変化による積載物の飛び方の違いを調べるため、衝突物の材質をゴム球、鉄球、サイコウッドとし作用時間・最大ひずみ・飛び方の違いを計測した。図 3 は得られたひずみ波形図である。横軸は時間、縦軸は鉛直方向の軸ひずみである。衝撃の作用時間に着目すると衝撃を与える材質の違いで作用時間に大きな違いがあることがわかる。作用時間はゴム球が平均 0.00366(s)、鉄球が 0.00048(s)、サイコウッドが

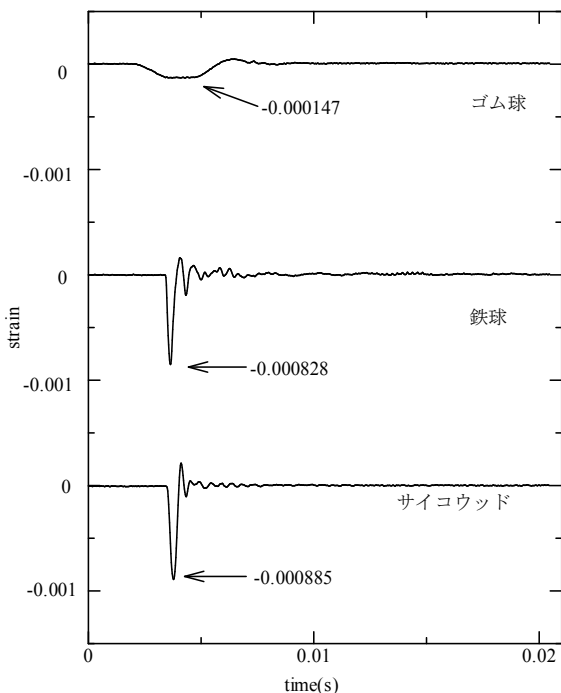


図 3 衝突物の材質を変えた場合のひずみ波形

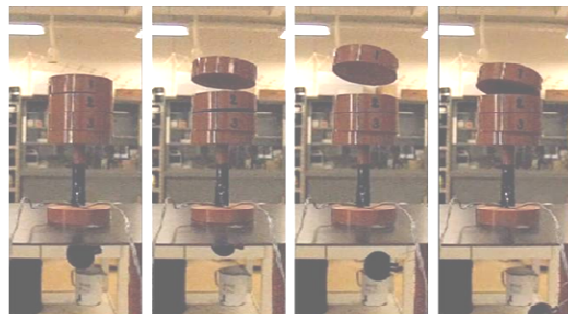


写真 2 鉄球で衝撃を加えた場合

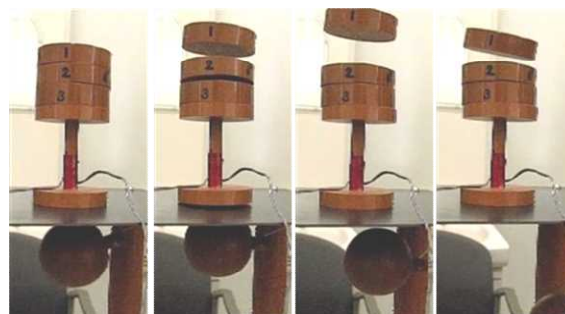


写真 3 サイコウッドで衝撃を加えた場合

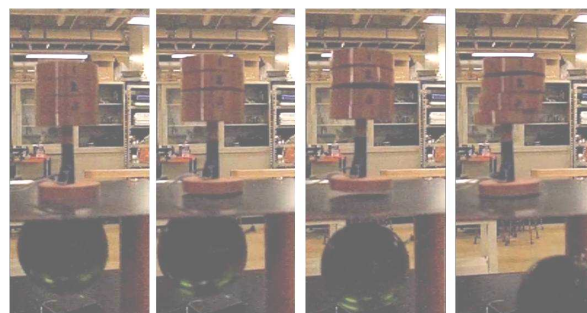


写真 4 ゴム球で衝撃を加えた場合

0.00051(s)となった。鉄球やサイコウッドに比べゴム球の作用時間は長く約 7 倍であった。飛び方を観察すると鉄球・サイコウッドでは写真 3、4 に示すように積載物の一番上が大きく飛び、2 段目 3 段目の積載物はほとんど飛んでいない。なお、以下に示す写真はハイスピード動画 432×192(600 fps)で撮影した動画を切り取ったものである。

このように積載物の 1 番上だけが大きく飛び、という様な飛び方をすれば、写真 1 で示した敦盛塚破壊後のような 1 番上の石だけが落ちる状態になることも考えられる。一方、写真 4 のゴム球では一番上の積載物が大きく飛ぶことはなく 3 枚重ねた積載物全てが飛ぶような感じである。このような飛び方で

は敦盛塚破壊後のような 1 番上の石だけが落ちる状態になるとは考えられず、全ての石が落ちると予想できる。この実験では、衝撃の作用時間が短いと積載物の 1 番上だけが大きく飛ぶという結果となった。このことから衝撃の作用時間と積載物の飛び方には関連性があり、作用時間は飛び方に変化を与える 1 つの要因となることが考えられる。しかし鉄球とゴム球で得られた結果では最大ひずみが大きく異なることから、この最大ひずみが積載物の飛び方に影響していると考えられる。そこでさらに質量の大きいゴム球で実験を行ったが、鉄球のような大きなひずみは得られなかった。ゴム球では質量が鉄球の約 4 倍のゴム球を使用し実験を行ったが、ゴム球では質量の大きいものを使用しても、約 1/6 程度の最大ひずみしか得られなかった。衝撃を加える材質の変化で最大ひずみも大きく異なっている。鉄球とゴム球を比較すると鉄球の質量はゴム球の約 1/3.5 にも関わらず、最大ひずみは約 5.6 倍大きくなっている。実験では鉄球、ゴム球ともに同じ高さから振り子の要領で衝撃を加えている。つまり質量の大きいゴム球のほうが鉄球よりも与えるエネルギーが大きくなり最大ひずみも大きく出るとは思っていたが実際はそうになっていない。これは載荷速度(衝撃が加わる速度)が関係していると考えた。載荷速度は材料のひずみ速度や応力場や破壊条件に影響を及ぼす<sup>1)</sup>。今回の実験では衝撃を与える物質であるゴム球自体が衝撃の際に大きくひずんでしまうことでエネルギーが無くなり、載荷速度に影響を与えたと考えられる。この実験では材質の異なる衝突物で同じ最大ひずみを与えることができなかったため、飛び方に影響を与えたかどうかは判断できなかった。作用時間だけでなく最大ひずみが積載物の飛び方に影響していると考えられる。

## 2・2 緩衝材(ゴム)を用い、衝撃を作用させた場合

前節で述べた衝突物の違いにより積載物の飛び方が異なることが確認できた。しかし鉄球の場合とゴム球の場合では作用時間に大きな違いが見られた他にも最大ひずみが大きく違っていた。ゴム球では質量が鉄球の約 4 倍のものを使用しても、約 1/6 程度の最大ひずみしか得られなかったため、ゴム球では鉄球と同じような最大ひずみを得ることは困難であったため、大きなひずみを得てかつ作用時間が長いデータを得るため図 4 に示すようにゴムの緩衝材を用い、その下から 4 種類の異なる重さの鉄球で衝撃を与えた場合の作用時間・最大ひずみ・飛び方の違いを調べた。緩衝材あり

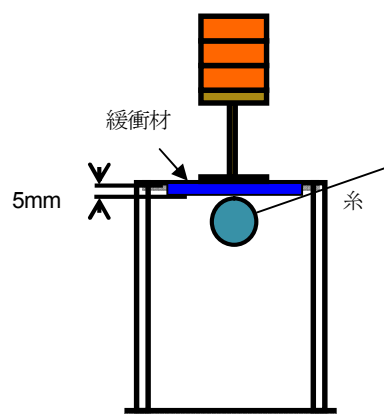


図 4 緩衝材を用いた実験装置

の場合、どの鉄球においても写真 6, 8 に示すとおり積載物の 1 番上だけが大きく飛ぶ飛び方はしていないことがわかる。2 段目の積載物に着目すると、1 番上の積載物と同じ様な飛距離で飛んでいることが分かる。鉄球の質量を大きくし、最大ひずみが大きく計測されたものほど積載物の飛距離も大きくなっている。

写真 5 は緩衝材あり、写真 6 は緩衝材なしとした場合の鉄球(質量 66.6g)を衝突させた場合の現象であり、写真 7, 写真 8 は鉄球(質量 367.7g)を用いた場合である。質量 367.7g の鉄球を用いた場合の最大ひずみは平均 $-0.000524$  であり、緩衝材なしで鉄球(質量 66.6g)を用いた場合の最大ひずみは平均 $-0.000552$  であった。この 2 つの結果の最大ひずみは非常に近いが、飛び方は明らかに異なっている。緩衝材あり(鉄球質量 367.7g)の場合では先ほども述べ、写真 7 に示すように積載物は全体的に飛び上がり、積載物を載せている台も大きく飛び上がっている。一方で緩衝材なし(鉄球質量 66.6g)の場合は 1 番上の積載物だけ大きく飛び上がり、2 段目 3 段目の積載物や積載物を載せている台はほとんど飛び上がっていない。作用時間に着目すると、緩衝材ありの場合は平均 0.00173 秒であり、緩衝材なしの場合は平均 0.00054 秒となっており、約 3.2 倍の違いがある。

これまで述べてきた様々な条件変化による実験でも、積載物の飛び方と作用時間には関連性があることが予想できた。しかしこれまでの実験結果では積載物の飛び方に違いが見られた 2 つの結果は、作用時間が異なっていたが最大ひずみ等の他の要素も異なっていたため、積載物の飛び方が作用時間と関連性があると予想することしか出来なかった。今回の緩衝材を用いた実験では今までに使用したゴム球と



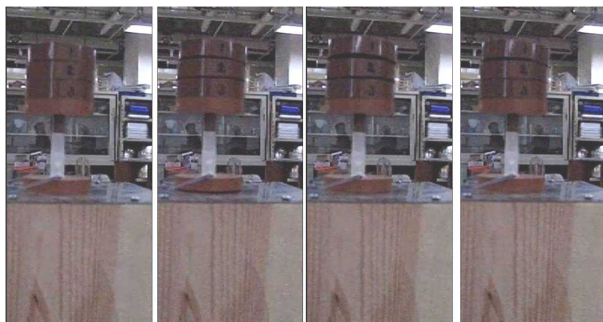


写真 5 緩衝材あり，鉄球(質量 66.6g)の場合

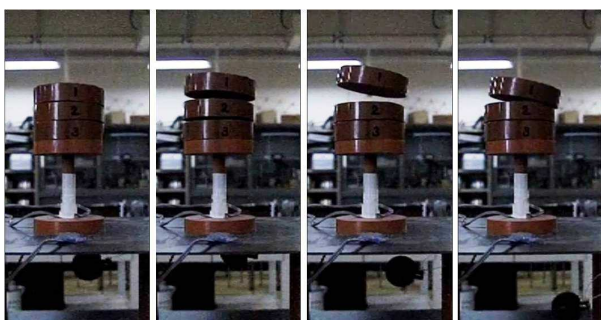


写真 6 緩衝材なし，鉄球(質量 66.6g)の場合

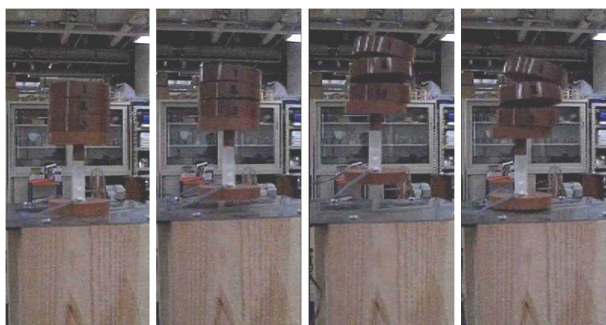


写真 7 緩衝材あり，鉄球(質量 367.7g)の場合

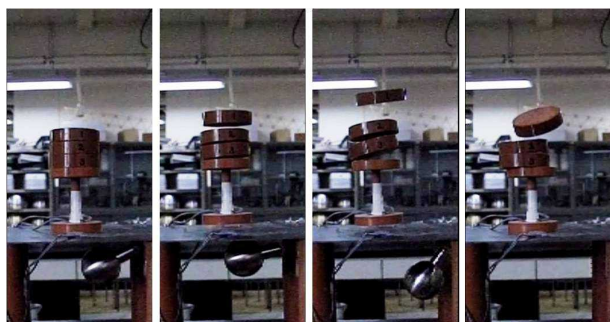


写真 8 緩衝材なし，鉄球(質量 367.7g)の場合

違い，衝撃による最大波形が明確に現れ，作用時間・最大ひずみの読み取りが正確に行えている．つまり緩衝材なしの場合との比較が非常に正確にできている．そして最大ひずみがほとんど同じで，作用時間が約 3.2

倍異なり，飛び方が明らかに異なる実験結果が得られた．この実験により，衝撃の作用時間が短い方が積載物の 1 番上だけが大きく飛び，敦盛塚で起こったと予想される飛び石現象に近い飛び方をすると言える．作用時間が長い衝撃が加わると，積載物は全体が飛び上がり，写真 1 に示した敦盛塚破壊後のような 1 番上の石だけが落ちるといった状態にはならないと考えられる．

### 3. 結論

本研究は地震時の飛び石現象の解明を目的に，縦揺れによる衝撃を与えるため振り子装置を用いて鉛直方向の衝撃を与え，ひずみの大きさや衝撃力の作用時間と飛び石現象との関連性を調べるため，衝撃実験を行った．この実験により得られた結論を以下に示す．

1. 最大ひずみの大きさは積載物の飛距離に関連性があり，最大ひずみが大きいほど積載物の飛距離も大きくなる．
2. 今回の実験条件の限りでは，積載物の飛び方と衝撃の作用時間には関連性があり，衝撃の作用時間が短い方が積載物の 1 番上が大きく飛び現象が起こった．

飛び石現象で飛んだ石の形状は，千差万別である．また，飛び石の地震挙動は強非線形性を有していることは想像に難くない．従って，理想的な条件においてさえも飛び石現象の厳密な数学的記述は困難なことが多い．つまり今回の研究で述べてきた条件においては，衝撃の作用時間と積載物の飛び方との関連性が見られたが，さらなる条件の変化でこの関係は成り立たなくなる可能性もある．

**謝辞** 本研究を実施するに当たり，明石工業高等専門学校平成 22 年度教育研究支援経費 A の補助を受けた．ここに記して感謝の意を表する．

### 参考文献

- 1)久保村圭助他：巨大地震と高速鉄道～新潟県中越地震を振り返って～，山海堂，2006
- 2)神澤拓，森山準基：地震時の飛び石現象に関する一研究，明石工業高等専門学校，H22 年度卒業研究論文，2011
- 3)平木亮，矢内利樹：兵庫県南部地震で見られた飛び石現象に関する研究，明石工業高等専門学校，H21 年度卒業研究論文，2010