

# 中詰め材の大きさに着目した石橋の耐震性に関する基礎的研究

東 祐輔<sup>1</sup>・古川 愛子<sup>1</sup>・清野 純史<sup>1</sup>

## Fundamental Study on Relation between Filling Material Size and Seismic Resistance of Stone Bridges

Yusuke HIGASHI<sup>1</sup>, Aiko FURUKAWA<sup>1</sup> and Junji KIYONO<sup>1</sup>

### Abstract

Several stone bridges were damaged during the 2016 Kumamoto earthquake. The most severe damage was the collapse of the stone walls. It is reported that the condition of filling materials has a strong influence on the stone wall collapse of the Futamata Fukura Bridge. With this evidence, this study focuses on the size effect of filling stones on the seismic strength of stone bridges. We carried out shaking table tests using two simplified stone bridge models with different crushed stone sizes. It was observed that the model filled with larger crushed stones could resist higher acceleration than the model filled with smaller crushed stones. The numerical simulations using the refined DEM were conducted, and the same tendency that larger crushed stones improve seismic resistance was obtained.

キーワード：石橋，耐震性，中詰め材，振動台実験，改良版個別要素法

Key words: stone bridge, seismic resistance, filling material, shaking table test, Refined DEM

### 1. はじめに

石橋（石造りアーチ橋）は江戸時代に海外よりその技術が伝わり、九州地方を中心に日本中で多く架設されてきた。最も架設数が多かったとされる大正末期には全国で7万橋もの石橋が存在しており、今日においても現存する多くの石橋が人々の生活を支えている<sup>1)</sup>。これらの石橋は他の社会インフラと同様に地震時に被害を受けている

が、その耐震性や内部構造、被災メカニズムについて未解明の部分が多い。表1に熊本地震の際の石橋の被害状況を示す。アーチ部分を形成する輪石の被害はほとんど見られず、写真1に示すような壁面の崩壊や孕みだしの被害が多い。写真1からわかるように壁石や中詰め材は橋軸直交方向に崩壊していることから橋軸直交方向の振動で崩壊に至ったと考えられる。また、これらの壁面での

<sup>1)</sup> 京都大学大学院工学研究科 都市社会工学専攻  
Department of Urban Management, Kyoto University

表1 熊本地震における石橋の被害状況<sup>2)</sup>

No	橋名	主な被害	No	橋名	主な被害
1	濁川橋 (南阿蘇村)	下流右岸側, 左岸側壁石孕みだし	11	二俣福良渡 (美里町)	右岸側壁石崩壊
2	銭瓶橋 (南阿蘇村)	上下流右左岸壁石崩壊	12	大窪橋 (美里町)	一部高欄落下
3	尾道橋 (南阿蘇村)	上流左岸側壁石崩壊	13	馬門橋 (美里町)	高欄落下
4	明八橋 (熊本市)	下流左岸側高欄落下	14	安見下鶴橋 (宇城市)	左岸側壁石崩壊
5	船場橋 (熊本市)	高欄落下, 壁石の飛び出し	15	誉ヶ丘橋 (宇城市)	右岸下流側, 左岸壁石崩壊
6	門前川眼鏡橋 (御船町)	高欄のずれ	16	鴨籠橋 (宇城市)	下流側輪石の隙間拡大
7	八勢橋 (御船町)	上流左岸側壁石崩壊	17	立門橋 (菊池市)	下流側右岸, 左岸側壁石崩壊
8	御船下鶴橋 (御船町)	上流右岸側高欄落下	18	永山橋 (菊池市)	高欄, 親柱の落下
9	梅木橋 (御船町)	左岸側壁石崩壊	19	施無畏橋 (天草市)	輪石隙間
10	御手洗橋 (甲佐町)	上流側壁石崩壊			

写真1 2016年熊本地震による二俣福良渡の壁面崩壊<sup>2)</sup>

被害は、石橋内部を充填する中詰め材に原因がある可能性も指摘されている<sup>2)</sup>。実際の石橋における中詰め材の実情に関しては、熊本地震の際に被災した石橋の詳細な調査が実施されており、中詰め材の様子が記録されている。礫材と土が混ざっている事例が多いが、写真2に示すような壁面と同程度の大きな碎石のみで充填されている例も確認された<sup>3)</sup>。このように実際の石橋における中詰め材は壁面部分を構成する壁石に対する大きさが様々であるにも関わらず、中詰め材の大きさと耐震性の関係に関する研究はなされていないのが現状である。

石橋の耐震性に関する既往研究として、藤田ら<sup>4)</sup>は実際の石橋と同様の石材を用いたアーチ模型を作成し、輪石の割れメカニズムを解明した。浅井ら<sup>5)</sup>は有限要素法 (FEM) を用いて石材アー

写真2 通潤橋の壁石と中詰め材<sup>3)</sup>

チ橋の静的・動的挙動を2次的に評価し、さらに同様の方法で瀬戸山ら<sup>6)</sup>が3次元の静的・動的強度解析を行っている。しかし、これらはアーチ構造や石橋全体系の振動特性に着目したものであり、個々の中詰め材を精緻にモデル化したものではない。

石橋の中詰め材に着目した研究は例がないが、石垣構造物に関しては中詰め材をモデル化した数値解析的研究もなされている。Fukumoto et al.<sup>7)</sup>は築石形状の違いによる石垣の地震時変形挙動に関する遠心模型実験を行い、実験での変形挙動の違いを3次元個別要素法 (DEM) を用いて再現可能なことを示した。同様の研究として村上ら<sup>8)</sup>は拡張個別要素法 (EDEM) を用いて石垣の地震応答解析を行い、アンカー補強の有効性を示した。また、中島ら<sup>9)</sup>は崩壊防止ネットと地山補強材の併用による石積み擁壁の耐震補強を行い、補強効果を栗石のかみ合わせ抵抗を考慮した非線形梁ば

ね解析で評価した。これらの研究は球体要素により中詰め材をモデル化した研究だが、森田ら<sup>10)</sup>は多面体要素で中詰め材をモデル化し、傾斜実験による石垣崩壊の様子が再現できることを示した。これらの研究においても石橋壁面と同様に石垣壁面の孕みだしという特徴的な現象が確認されている一方で、壁面が傾斜している点や壁面が片側にしか存在しない点において、上流側下流側の両側に垂直な壁面を有し、その間を碎石で充填している石橋の構造とは異なる。

以上のように2面の壁石と中詰め材で構成される石橋の耐震性について、中詰め材の大きさに着目した検討は行われていない。本研究では中詰め材として用いる碎石のサイズに着目し、中詰め材の大きさが石橋壁面の耐震性に及ぼす影響に関する基礎的な研究を行う。壁面崩壊のメカニズムの解明を目的としているため、石橋を橋軸直交方向の2面で切り出した断面を想定したモデルを作成し、さらに壁面の被害に最も大きな影響を及ぼすと考えられる橋軸直交方向に対する耐震性について振動台実験を行う。また、改良版個別要素法 (Refined DEM) を用いた再現解析を行い、実験の様子が再現できることを確認する。このような石垣構造物の解析には今回使用する DEM ベースの手法の他に不連続変形法 (DDA)<sup>11)</sup> や剛体ばねモデル (RBSM)<sup>12)</sup> を用いた研究も存在する。3次元の DDA は要素数が多くなると解析が不安定になってしまうことや RBSM は設定した要素以外との再接触を考慮していないため大規模な崩壊現象の再現には適さないという特徴が挙げられる。今回の実験を解析において再現するには、多数の要素による大規模な破壊現象を扱う必要があるため、そのような解析に適した改良版個別要素法を使用した。改良版個別要素法に関しては3章において概説する。

2章でサイズの違う2種類の中詰め材を使用した石橋断面モデルに対する振動台実験について述べ、3章で改良版個別要素法を用いた振動台実験の再現解析について述べる。4章では本研究の結論に加え今後の課題を述べる。

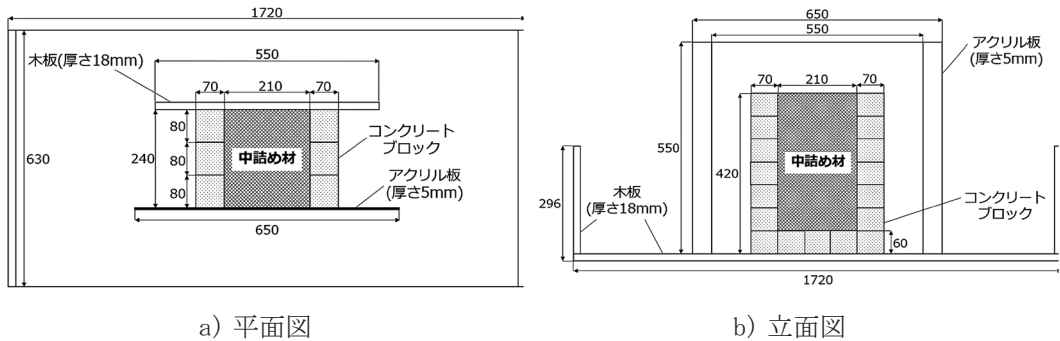
## 2. 石橋橋軸直交断面モデルによる振動台実験

### 2.1 実験概要

本章では、振動台実験について述べる。1章において述べたように石橋の壁石に対する中詰め材の大きさに着目した耐震性に関する検討は例がなく、今回はその基礎的研究である。基礎的研究として、今回は石橋を橋軸直交方向の2面で切り出した状態を想定した橋軸直交方向断面モデル (以下、断面モデル) を作成し、耐震性について研究した。石橋壁面崩壊時の様子から被害に最も大きな影響を及ぼすと考えられる橋軸直交方向に加振する。耐震性については断面モデル崩壊時の加速度で評価した。本来は多様な観点から評価すべきであるが、本研究においては限定的な耐震性について評価している。内部に充填する中詰め材は大小の2種類を用意した。碎石大は実際の石橋で確認されている中詰め材の中で最大の大きさである壁石と同程度のものであり、これに対する比較として碎石小はその半分程度のものである。実験では断面モデルの振動特性を調べるためのスイープ加振と断面モデルの崩壊挙動を確認する正弦波加振を行う。

### 2.2 実験装置

作成した実験装置と断面モデルを写真3に示し、装置の詳細な寸法を図1に示す。実験装置は木材とL字金具、アクリル板を使用して自作した。中詰め材がこぼれ落ちるのを防ぐため断面モデル前後にはアクリル板と木材の壁を設置しているが、中詰め材の影響でアクリル板が手前にたむむのを防ぐため、背面の木材と前面のアクリル板の上部を紐で結ぶことによりアクリル板の手前方向への変位を拘束している。これにより面外方向への変位が制限されるため平面ひずみの仮定となっている。また、木材とアクリル板という異なる材質により変位を拘束しているため、断面モデルとの間の摩擦係数が異なるが、実験時の崩壊挙動より木材側とアクリル板側で挙動に差異が見られないこと、すなわち摩擦係数の差異による影響が見られないことを確認している。



a) 平面図

b) 立面図

図1 実験装置寸法 (mm)

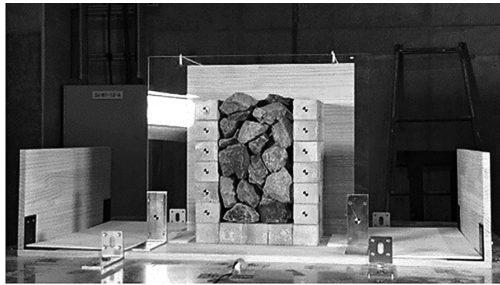


写真3 振動台上に設置された石橋断面モデル (正面図, 左右が加振方向)

断面モデルの壁面部分は幅7cm×奥行き8cm×高さ6cmのコンクリートブロックを用いて組み上げる。奇数段と偶数段が互い違いになるように、偶数段の手前側と奥側のコンクリートブロックは奥行き4cmとし、7段で組み上げる(写真4)。コンクリートブロックのサイズや段数に関しては使用した振動台のサイズを元に決定した。最下段のブロックは両側からL型アンクルで挟み込み木材に固定する。内部の中詰め材は、外接する直方体の最大辺が概ね40~100mm、20~30mmの青砕石(輝緑岩)をそれぞれ砕石大・小として使用する。本研究は、中詰め材の大きさが石橋の耐震性に及ぼす影響に関して初めて検討を行ったものであるため、特定の石橋を対象とせず、入手しやすい材料を用いて壁石と中詰め材から構成される単純な構造を採用した。砕石は自由落下させながら充填し、少量充填する毎に手で押し固めながら充填している。使用する砕石は実験毎に

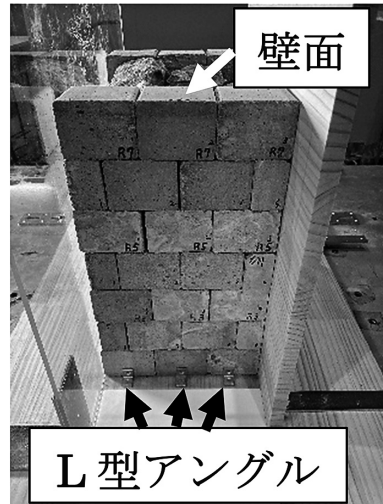


写真4 コンクリートブロックを積み上げた壁面

同じものを使用している。充填している砕石の重さを測り、砕石の密度を元に体積を推定し、全砕石の体積を断面モデル内部の体積で割ることにより充填率を求めたところ、砕石大は54.1%、砕石小は55.1%という充填率であった。

加振方向は写真3の左右方向、つまり橋軸直交方向のみとしている。測定には高速度カメラ、加速度計、デジタルカメラを用いる。実験の様子を高速度カメラ(250fps, シャッタースピード1/500秒)で撮影し、振動台や断面モデルの加速度を加速度計(計測間隔1/1000秒)で計測する。実験装置などの写真はデジタルカメラで撮影した。

### 2.3 物性値

後述する振動台実験の再現解析を行うため、実験に使用する材料の物性値を測定する。

まず、コンクリートブロックと碎石の密度を測定する。コンクリートブロックに関しては体積が既知であるため重さを計測し密度を求めたところ  $2.2 \text{ t/m}^3$ であった。碎石に関しては水を張った容器に石を沈め、溢れた水より体積を計測し密度を求めたところ  $3.2 \text{ t/m}^3$ であった。

次にそれぞれの材料間の摩擦係数を計測する。今回はばねばかりを用いて垂直応力とせん断応力の関係より摩擦係数を求める。コンクリートブロック同士の摩擦係数の測定を例に測定方法を説明する。図2に示すようにコンクリートブロックを2段に重ね、下のブロックを手で固定した状態で、ばねばかりを用いて上のブロックを引っ張り、動き出す瞬間の値を読み取る。コンクリートブロックの重さとばねばかりの値より垂直応力  $\sigma$  とせん断応力  $\tau$  が求まる。同様にして上のコンクリートブロックを2段、3段にして垂直応力  $\sigma$  を変えた場合の  $\sigma$  と  $\tau$  を求める。今回は計18点の  $\sigma$  と  $\tau$  を求め、これらの点を一次関数で近似し摩擦係数を求めた(図3)。同様にして様々な材料間の摩擦係数を測定した。その結果を表2に示す。なお、碎石の測定においては接触面積を求めることが困難であったため、垂直抗力と摩擦力の関係より摩擦係数を求めた。

最後に碎石間の摩擦係数に関して述べる。上記と同様の方法で計測することが困難なため安息角を測定し、解析では安息角が同程度になるように碎石間の摩擦係数を設定する。碎石大(40~100 mm)の安息角を人力で測定するのが困難であったため、碎石小(20~30 mm)における安息角のみを測定する。同じ種類の碎石を使用しているため碎石の大小で摩擦係数の差異はほとんどないと思われる。安息角の測定は既往の研究を参考に排出法により測定を行う<sup>13)</sup>。碎石小を幅13.5 cm × 奥行き13.5 cm × 高さ15 cmの容器に密に充填し、幅27 cm × 奥行き27 cmの木材の上で勢よく容器を上方に引き抜き、木材の上に残った碎石を4方向からデジタルカメラで撮影し安息角を測定す

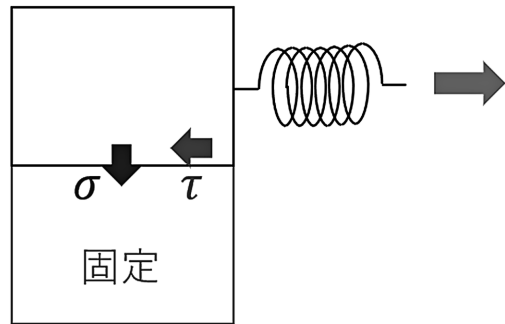


図2 摩擦係数の測定

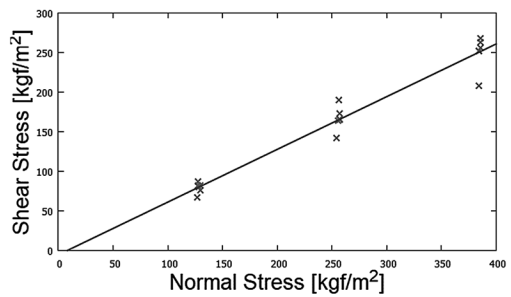


図3 コンクリートブロック間の垂直応力  $\sigma$  - せん断応力  $\tau$  関係

表2 計測した摩擦係数

材料	摩擦係数
コンクリート-コンクリート	0.666
コンクリート-木材	0.516
コンクリート-アクリル板	0.279
コンクリート-碎石	0.772
碎石-アクリル	0.152
碎石-木材	0.707

(写真5)。計測は5回実施し、安息角の平均値は19.45度、標準偏差は3度であった。

### 2.4 実験結果・考察

#### (1) スイープ加振

スイープ加振では碎石大と碎石小それぞれについて、加速度計を左側の壁に設置したときと右側の壁に設置したときの計4ケースの実験を行う。断面モデルが崩壊ないように振動台を2、3

mm 程度のわずかな変位で振動させ、その後 5 秒間の振動数固定期間と 5 秒間の振動数移行期間を交互に繰り返しながら 1～10Hz まで振動数を段階的に変化させる。得られた加速度データをフーリエ変換し、試験体に設置した加速度計のフーリエスペクトルを振動台に設置した加速度計のフーリエスペクトルで割ることで共振曲線を求める。さらにこの共振曲線をバンド幅 0.6Hz の Parzen ウィンドウを用いて平滑化する。求めた共振曲線の一部を図 4 に示す。今回示したのは右壁最上段のブロックに加速度計を設置したケースであるが、左壁最上段に設置したケースでも同様の結果を示した。なお、制御装置の性質上、入力波は厳密な正弦波ではなく高調波成分を含んだものにな



写真 5 安息角測定の一例

る。設定した振動数 (1～10Hz) の奇数倍 (3 倍, 5 倍, 7 倍, …) の振動数も振幅は小さいものの励起されていたことから、約 100Hz までの共振曲線を求めた。共振曲線よりこの試験体では 30Hz 付近まで共振の影響がほとんどないことが確認された。

## (2) 正弦波加振

正弦波加振では砕石大・砕石小の 2 モデルに対して 2, 4, 6, 8 Hz の 4 種類の正弦波を作用させる計 8 ケースの実験を 2 回行う。使用した振動台で安全に入力可能な範囲が 1～10Hz であるため、その範囲内を全体的に調べるため上記の振動数を選択し、崩壊現象の再現性の確認のため同様の実験を 2 回行っている。実験では断面モデルの様子を観察しながら徐々に振動台の入力加速度を上げ、断面モデルに大きな変形が生じた時点で加速度振幅を一定に固定する。各ケースにおける実験条件と崩壊時の振動台の加速度をまとめたものを表 3 に示す。2 回の実験で同様の傾向を示したため、基本的に 1 回目の実験時の記録を例に結

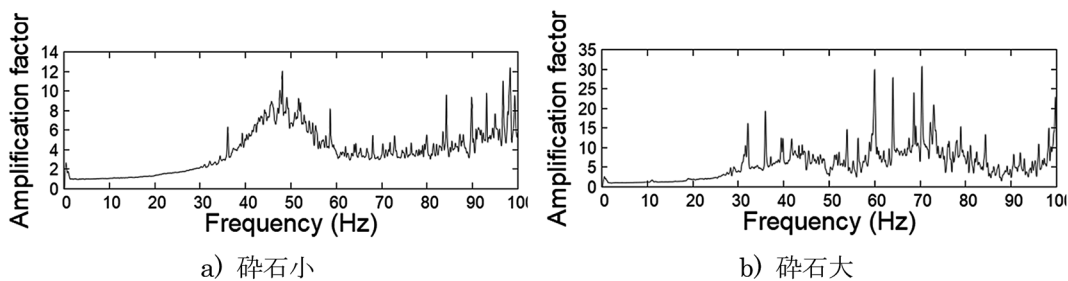


図 4 共振曲線

表 3 正弦波加振実験の実験ケースと崩壊時入力加速度

実験ケース	周波数 (Hz)	中詰め	崩壊時入力加速度 (gal)	
			1 回目	2 回目
ケース 1	2	小	110	120
ケース 2	2	大	140	170
ケース 3	4	小	150	140
ケース 4	4	大	150	140
ケース 5	6	小	130	160
ケース 6	6	大	190	210
ケース 7	8	小	160	170
ケース 8	8	大	170	190

果について説明する。

まず、崩壊時の加速度をプロットしたものを図 5, 6 に示す。砕石大を Large, 砕石小を Small の凡例で示している。実験結果より全体的な傾向として大きいサイズの砕石を充填したモデルの方が崩壊時の入力加速度が大きく、耐震性が高いという結果が得られた。4 Hz では崩壊時加速度の違いが現れなかったが、それ以外の 2, 6, 8 Hz では加速度に差が見られ、6 Hz 加振時に最も大きな差が確認された。4 Hz 加振時に崩壊時加速度の違いが現れなかったことや 6 Hz 加振時に崩壊時加速度の差が最も大きくなったことに関しては原因が不明であった。

次に実験時の中詰め材の状態に着目すると砕石のサイズにより大きな違いが見られた。顕著に違いが見られた 2 Hz, 8 Hz 加振時の様子を写真 6 に示す。左から順に加振前、崩壊の瞬間、崩壊後の写真となっており、崩壊の瞬間における加振開始からの経過時間を記載している。崩壊後の写真

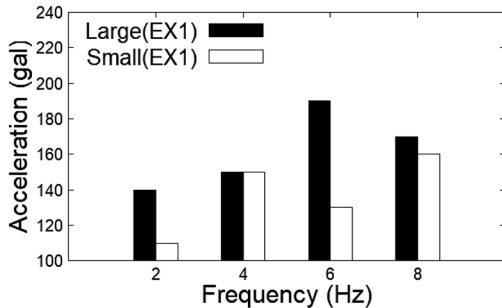


図 5 壁面崩壊時の入力加速度 (1 回目)

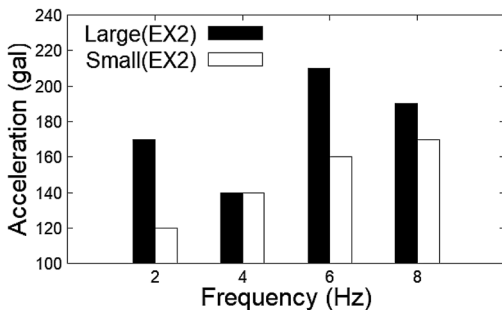
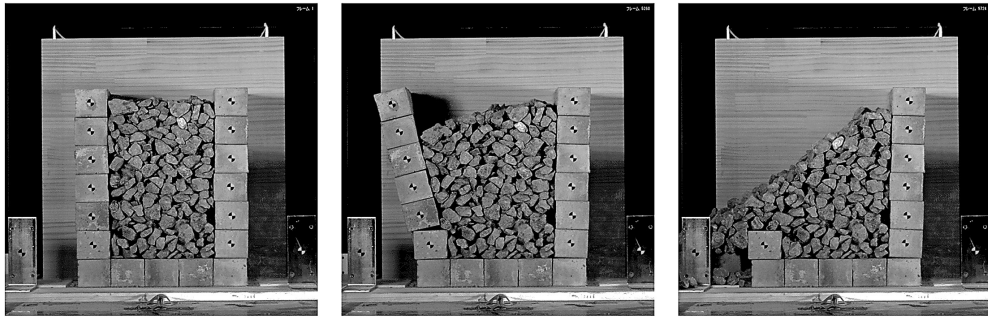


図 6 壁面崩壊時の入力加速度 (2 回目)

を見ると、砕石小では中詰め材が崩れ斜面状になっているのに対し、砕石大では中詰め材が崩れにくいことが確認された。さらに 8 Hz 加振時の写真 6 (c), (d) の崩壊の瞬間 (中央の写真) を比較すると (c) の砕石小では崩壊する右壁と中詰め材の間に隙間が確認されない一方で、(d) の砕石大では隙間が確認される。このようにコンクリートブロックが外側方向に変位することで生じた隙間に中詰め材が崩れこみ隙間を埋めていないことから砕石大の崩れにくさかわかる。

また、壁面崩壊時の挙動として段階的に壁面が傾く挙動が確認された。段階的に傾く挙動が特に顕著に見られたケース 1 (2 Hz, Small) の左壁の水平方向変位とその比較としてケース 2 (2 Hz, Large) の左壁の水平方向変位を図 7 に示す。変位は高速度カメラで撮影した実験時の映像を元に粒子画像流速測定法 PIV (Particle Image Velocimetry)<sup>14)</sup> を用いて求めたものである。左壁の 2, 4, 6 段目の振動台に対する相対変位と振動台の絶対変位 (凡例: Table) をプロットしており、外側方向を正としている (図 8)。なお振動台の外側方向への変位が最大となる時間に縦線を入れた。図 7 のケース 1 を見ると振動台の変位が最大になった直後に壁面が外側方向に変位する動きが繰り返されることで段階的に崩壊が生じることが分かる。ケース 2 においても同様の傾向が観察されるが、ケース 1 ほどに顕著ではない。また、ケース 2 においては一度外側に変位したブロックが若干内側に戻るように動いており (図中の黒丸部分)、ケース 1 には見られない現象である。この現象は中詰め材自体の崩れにくさに起因する現象だと考えられる。砕石小の場合は中詰め材自体が崩れやすいため、ブロックが外側方向に変位することで生じた隙間に中詰め材が崩れこみブロックが内側へ戻れなくなる一方で、砕石大の場合はブロックと中詰め材の間に隙間が生じて崩れにくい隙間が埋まらず、ブロックが内側に戻ることができるかと推測される。

これらの結果を踏まえると今回の石橋断面モデルにおける壁崩壊のメカニズムは、振動によってコンクリートブロックが外側方向に変位し、ブ



(a) ケース 1 (2Hz, Small) 加振後 21.0 秒, 110gal で崩壊



(b) ケース 2 (2Hz, Large) 加振後 32.4 秒, 140gal で崩壊



(c) ケース 7 (8Hz, Small) 加振後 24.2 秒, 160gal で崩壊



(d) ケース 8 (8Hz, Large) 加振後 32.1 秒, 170gal で崩壊

写真 6 断面モデルの崩壊挙動 (1 回目 左: 加振前, 中: 崩壊開始直後, 右: 崩壊後)



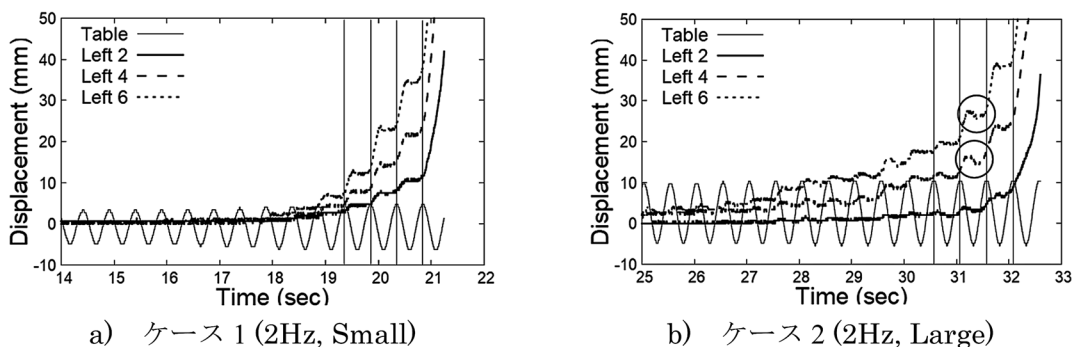


図7 振動台と壁石の変位波形 (1回目 2Hz)

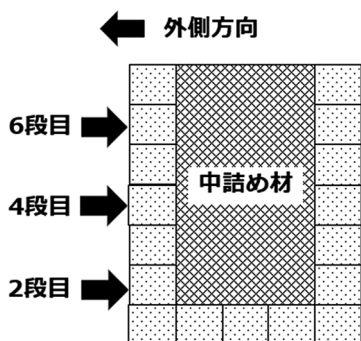


図8 変位出力点と外側方向

ロックと中詰め材の間にできた空間に中詰め材がなだれ込むという現象により壁面の崩壊が起これると考えられる。碎石小よりも碎石大の方が中詰め材自体が崩れにくいという特性により、碎石大と碎石小を充填した場合で崩壊時の加速度に差が生じたと思われる。

### 2.5 まとめ

本研究では断面モデルの共振特性を調べるためのスイープ加振と崩壊挙動を確認するための正弦波加振の2種類の実験を行った。

まず、スイープ加振より今回の実験で使った断面モデルの共振振動数は30Hz以上であり正弦波加振を行った2~8Hzからは大きく外れており、共振の影響が少ないことが確認された。

続いて正弦波加振より、全体的傾向として碎石大を使用したケースの方が、崩壊時の入力加速度

が大きくより高い耐震性を示すことが確認された。スイープ加振の結果を考慮すると今回使った断面モデルの崩壊現象においては共振の影響が少なく、中詰め材による影響が大きいと考えられる。

また、崩壊のメカニズムとして、外側方向に変位した壁面によって生じた内部の隙間に中詰め材が崩れこむという現象が繰り返されることによって崩壊が生じると推測される。崩壊後の中詰め材の状態の観察より、碎石小に比べ碎石大は中詰め材自体が崩れにくいことが確認されており、このために碎石大を使用したケースの方が高い耐震性を示すものと思われる。

実験時には実際の石橋の被害として報告されている孕みだしのような現象が起これなかったが、今回使ったモデルが実際の石橋をかなり単純化していることに原因があると考えている。実橋との大きな違いの一つとして、断面モデルでは石橋上部に存在する道路部分を省略していることが挙げられる。この道路部分の存在により、実橋では最上段の壁面の石の外側方向への変位が、ある程度拘束されていると考えられる。また、壁石同士の間にも自重で生じる以上の垂直応力が生じており、摩擦力も大きく変わってくると考えられる。実験においてもこれらの点を再現することができれば、実際の被害として見られる孕みだし現象が起これるのではないかと考えており、今後の課題としたい。

### 3. 改良版個別要素法を用いた再現解析

#### 3.1 再現解析の概要

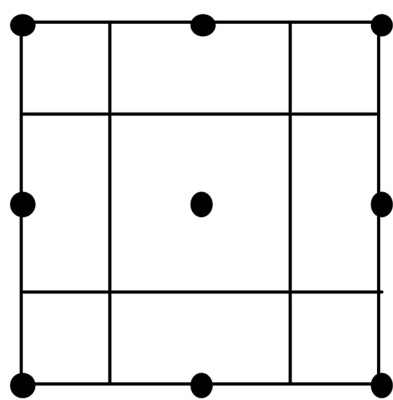
2章で行った正弦波加振の再現解析を行う。石橋断面モデルの破壊挙動について解析するため、大変形にも対応した改良版個別要素法(Refined DEM)を解析手法として用いた。改良版個別要素法は、Cundallによって提案されたDEM<sup>15)</sup>に古川らが改良を加えたもの<sup>16)</sup>である。改良版個別要素法は従来の個別要素法と同様に構造体を剛体要素の集合としてモデル化する。改良点としてばね定数が材料特性から論理的に決定できる点や要素表面をセグメントに分割し、各セグメントの代表点にバネやダッシュポットを設置している点あげられる(図9)。初期状態で設置されている復元ばねにより弾性挙動が再現され、このばねの切断により破壊現象がモデル化される。要素間が再接触する際は新たに接触ばねとダッシュポットが設置される。ダッシュポットは要素間の衝突時のエネルギー消散を表現するためのものである。これらの要素の全運動方程式をタイムステップ毎に解き、全要素の座標を追いかけることで構造物の破壊挙動を表現できる。改良版個別要素法を用いた既往研究では、六面体要素を用いて組積造の数値解析を実施してきた。しかし本研究が対象とする中詰め材を六面体要素でモデル化すると安定

した構造となり実挙動を再現できない。そこで新たに十面体要素を導入して、中詰め材のモデル化を試みた。本解析の目的は2つある。1つ目は十面体要素を用いて振動台実験結果を再現できるかどうかの検証である。2つ目は実験結果の再現性の確認である。非線形性の強い挙動を扱っているため、数値解析によって実験と同じ現象を再現できることの確認を目的としている。

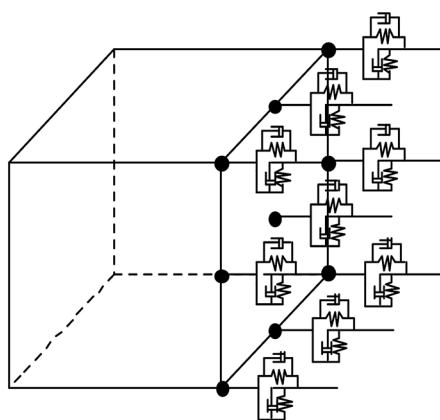
#### 3.2 解析モデル

解析モデルの作成に当たり、実験で使用した碎石をモデル化する必要があるため、本研究では十面体要素により碎石をモデル化する。作成した十面体モデルを図10に示す。各辺の長さの比率は図に示した通りであり、十面体の最長の辺を基準辺とする。この縮尺を保った状態で基準辺の長さにより十面体サイズを定義する。実験に用いた碎石の大きさがそれぞれ40~100 mm, 20~30 mmという大きさであるためこれらのサイズを参考に基準辺が6 cm, 2.5 cmのものをそれぞれ碎石大・小としている。

次に作成した断面モデルを図11に示す。実験では、中詰め材が落ちるのを防ぐため前後にアクリル板と木板の壁を設置しているが、解析でも同様に壁を設置した。崩壊時の様子を観察するためこ



a) 要素表面のセグメント分割



b) ばね・ダッシュポットの設置

図9 改良版個別要素法の概要

れらを透明要素としている。

十面体モデルは自由落下により充填している。試験体と同様に充填率を求めたところ、碎石大のモデルは53.2%、碎石小のモデルは58.6%となり、実験時と同程度の充填率となった。

解析に使用したパラメータは実験時に計測した表2のデータと表4に示す値を使用する。碎石同士間の摩擦係数は、数値解析による安息角が3章で述べた実験の安息角の平均値に一致するように決定し、0.2とした。実験時に測定していない物性値に関しては既往の研究を参考に設定した<sup>17-20)</sup>。

解析において入力する加速度は2回目の正弦波加振実験時に振動台上で計測した加速度データを使用する。計算時間間隔は、 $2.5 \times 10^{-6}$ 秒とする。

### 3.3 解析結果・考察

各ケースの解析条件と崩壊時の加速度、および比較として正弦波加振実験での崩壊時加速度についてまとめたものを表5に示し、崩壊時の加速度をプロットしたものを図12に示す。碎石大のモデルの結果を Large、碎石小のモデルの結果を Small としている。

表5より、再現解析8ケースの結果として、実験時に崩壊が起こった加速度と解析時に崩壊が起こった加速度に多少のずれはあるものの、碎石大を使用した場合に耐震性が向上するという傾向に関しては実験と同様の傾向を示している。実験・解析ともに碎石充填の際のランダム性があることも考慮すると、中詰め材サイズの違いによる耐震性への影響は再現できていると考えられる。解析においても、4 Hz 加振時は碎石大・小が同程度の加速度で崩壊した。この原因は解明できておら

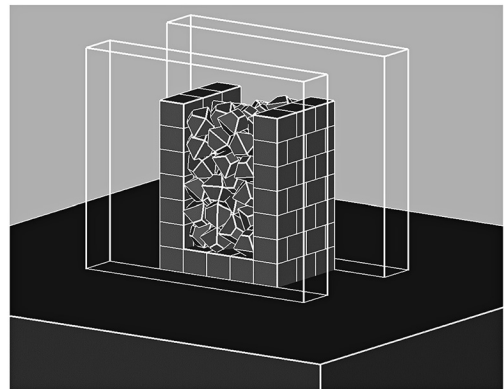


図11 作成した断面モデル

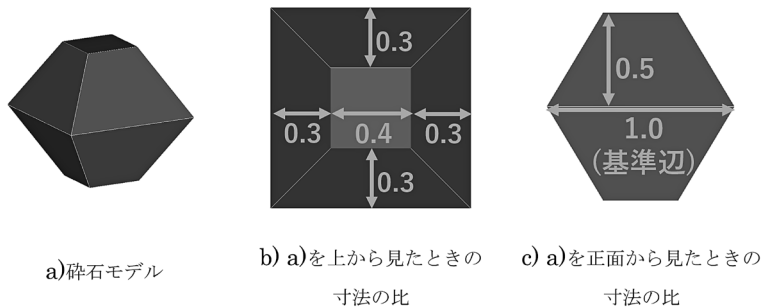


図10 十面体要素による碎石のモデル化

表4 解析に使用したパラメータ

材料	密度 [t/m <sup>3</sup> ]	ヤング率 [N/m <sup>2</sup> ]	ポアソン比
コンクリートブロック	2.20	$3.3 \times 10^{10}$	0.20
碎石	3.20	$5.3 \times 10^9$	0.18
木材	0.50	$1.7 \times 10^8$	0.40
アクリル板	1.19	$3.0 \times 10^9$	0.35

表5 解析ケースと崩壊時入力加速度

解析ケース	周波数 (Hz)	中詰め	解析での崩壊時入力加速度 (gal)	EX1での崩壊時入力加速度 (gal)	EX2での崩壊時入力加速度 (gal)
ケース 1	2	小	125	110	120
ケース 2	2	大	150	140	170
ケース 3	4	小	150	150	140
ケース 4	4	大	150	150	140
ケース 5	6	小	130	130	160
ケース 6	6	大	180	190	210
ケース 7	8	小	150	160	170
ケース 8	8	大	190	170	190

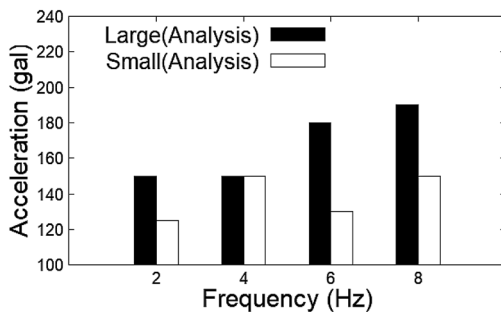


図12 壁面崩壊時の入力加速度 (解析)

ず今後の課題としたい。

また、断面モデル作成時のランダム性を考えると、実験時の挙動を完全に再現することは不可能であると思われるが、顕著にみられた中詰め材の崩れやすさの差異に関してはある程度再現できた。その例として、8 Hz 加振時の崩壊の様子を図13に示す。実験時の写真と同様に左から順に加振前、崩壊の瞬間、崩壊後の写真となっており、崩壊の瞬間における加速度入力開始からの経過時間を記載している。砕石大では壁面と中詰め材の間に隙間が見られるのに対し、砕石小では隙間が見られず、砕石の崩れにくさの違いが確認できる。しかしながら実験時に確認された、砕石大において崩壊後に中詰め材の大部分がそのまま崩れずに残っていた状態に関しては再現できていなかった。実際の砕石と今回使用した十面体モデルを比較すると、実際の砕石はいびつな形をしているものも多く、解析に使用した十面体モデルよりも砕石同士のかみ合わせが良いと思われる。そのため

砕石をモデル化するにはさらなる工夫が必要であり、砕石要素間に噛み合わせを表現するための引張力や摩擦力等を導入することで、より再現性が向上するのではないかと考えている。

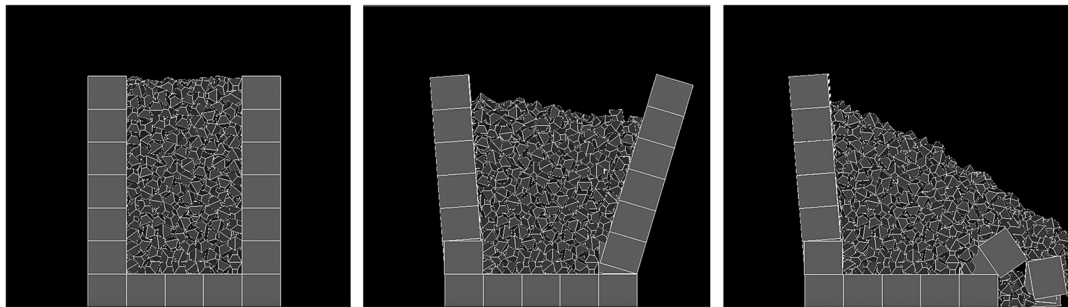
#### 4. おわりに

本研究では石橋内部を充填している砕石の大きさが石橋の耐震性に及ぼす影響を調べるため、石橋断面モデルを用いた振動台実験とその再現解析を行った。

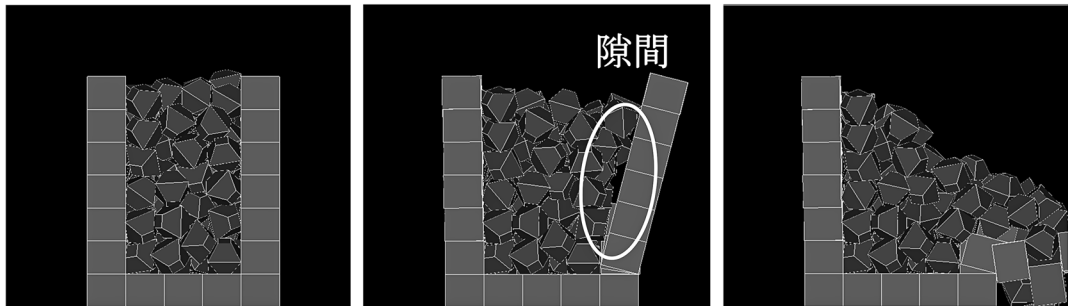
振動台実験においては、砕石大を充填したモデルは砕石小を充填したモデルよりもより高い入力加速度まで崩壊が起こらず、今回使用した断面モデルにおいては砕石大を使用することで耐震性が向上することが分かった。壁面崩壊のメカニズムとして、壁面のブロックが外側に動いた際に生じた隙間に内部の中詰め材がなだれ込むことで徐々に壁面の崩壊が生じるとということが推測される。また、崩壊後の中詰め材の状態を観察すると、砕石大は中詰め材自体が崩れにくいことが分かった。これらのことを考慮すると、中詰め材の崩れにくさが耐震性の向上につながっていると考えられる。

再現解析では十面体要素で砕石をモデル化し、改良版個別要素法を用いて実験を再現した。大きな砕石を使用した場合に耐震性が向上する傾向に関しては再現できた。一方で、砕石自体の崩れにくさに関してはある程度再現できたものの課題を残す結果となった。

以下に本研究の課題を挙げる。



a) ケース 7 (8Hz, Small) 加振後 11.0 秒, 150gal で崩壊



b) ケース 8 (8Hz, Large) 加振後 26.7 秒, 190gal で崩壊

図13 断面モデルの崩壊挙動 (解析 左:加振前, 中:崩壊開始直後, 右:崩壊後)

1. 本研究においては実際の石橋を単純化した断面モデルを使用しており、断面モデル上部が開いている点において実橋と大きく異なる。また、加工のしやすさの都合で壁石としてコンクリートブロックを使用している点も実橋との大きな違いである。今回解明したメカニズムが実際の石橋で起こっているとは断定できないため、今後は実験モデルを改良し、実橋での壁面崩壊のメカニズムをより詳細に解明していく必要がある。
2. 本研究では再現解析において十面体で碎石をモデル化したが、より実際の碎石の挙動に近いモデルに改良していく必要がある。

### 謝辞

熊本大学名誉教授の山尾敏孝先生には、2016年熊本地震で被災した石橋の写真を提供して頂きました。また、京都大学の八木知己先生、塩谷智基先生、橋本勝文先生には、実験に際して機材をご

提供頂きました。ここに記して感謝の意を表します。本研究の一部は、JST aXisの支援を受けたものです。

### 参考文献

- 1) 逃目英正・吉原 進：石橋への誤解と環境適応性について，土木史研究，第21巻，pp.271-278，2001.
- 2) 土木学会：2016年熊本地震被害調査報告書，丸善，pp.382-389，2016.
- 3) 山尾敏孝：判明した熊本の石橋の中詰め（私信），2021.
- 4) 藤田千尋・山尾敏孝・古賀圭一郎・小倉 孟：石アーチ模型による静的挙動とアーチ輪石の割れのメカニズム，構造工学論文集，Vol.59A，pp.26-36，2013.
- 5) 浅井光輝・山下和也・山崎礼智・荒木和哉：離散型有限要素モデルによる石造アーチ橋の静的・動的強度評価，構造工学論文集，Vol.55A，pp.172-180，2009.
- 6) 瀬戸山雄・浅井光輝・原崎健輔・川崎 巧・福

- 田英二：3次元離散型有限要素モデルによる石造アーチ橋の静的・動的強度解析，構造工学論文集，Vol.63A，pp.36-48，2017.
- 7) Yutaka Fukumoto, Jun Yoshida, Hide Sakaguchi and Akira Murakami: The effects of block shape on the seismic behavior of dry-stone masonry retaining walls, A numerical investigation by discrete element modeling, *Journal of Soil and Foundation* Vol.54, No.6, pp.1117-1126, 2014.
- 8) 村上友基・沼田宗純・目黒公郎：2次元拡張個別要素法による石垣建造物の地震動応答解析，土木学会論文集A1，Vol. 70, No.4, pp. I\_506-I\_512, 2014.
- 9) 中島 進・渡辺健治・神田政幸・藤原寅士良・高崎秀明・池本宏文：崩壊防止ネットと地山補強材による既設石積み壁の補強方法の開発，土木学会論文集C（地圏工学），71巻，4号，pp.317-334，2015.
- 10) 森田大成・大塚 鎮・酒井久和・小野祐輔：3次元DEMによる石垣崩壊に対する適用性の研究，第40回土木学会地震工学研究発表会，2020.
- 11) 日本計算工学会：計算力学レクチャーシリーズ6不連続変形法（DDA），丸善，2005.
- 12) 日本計算工学会：計算力学レクチャーシリーズ7鉄筋コンクリート構造の離散化極限解析法，丸善，2005.
- 13) 青木隆一：粉体の安息角および内部摩擦角の測定法，粉体工学研究会誌，6巻，1号，pp.3-8，1969.
- 14) 大川原真一：粒子画像流速計測法（PIV）の工学的基礎～原理およびトレーサ粒子の選定～，日本バイオロジー学会誌，12巻，3号，pp.1-9，1998.
- 15) P. A. Cundall: Formulation of a Three-dimensional distinct element model-Part I.A scheme to detect and represent contacts in system composed of many polyhedral blocks, *Int. J. Rock Mech. Min. Sei. & Geomech.*, Vol.25, No.3, pp.107-116, 1988.
- 16) Aiko Furukawa, Junji Kiyono and Kenzo Toki: Proposal of a Numerical Simulation Method for Elastic, Failure and Collapse Behaviors of Structures and its Application to Seismic Response Analysis of Masonry Walls, *Journal of Disaster Research*, Vol.6, No.1, 2011.
- 17) Aiko Furukawa, Hiroki Yoshikawa and Junji Kiyono: Investigation of the Tsujun Bridge damage mechanism during the 2016 Kumamoto earthquake, *自然災害科学 J. JSNDS*, Vol.38, 特別号，pp.1-23，2019.
- 18) 星野 寔・根岸正充：岩石の力学的性質に関する一実験，*応用地質*，11巻，3号，pp.91-96，1970.
- 19) 沢田 稔：直交異方性材料としての木材の弾性および強度，*材料*，12巻，121号，pp.749-753，1936.
- 20) 川口直能：やさしい鉄筋コンクリート工学，東洋書店，p.107，2004.

(投稿受理：令和3年4月1日  
訂正稿受理：令和3年7月2日)

## 要 旨

2016年の熊本地震の際に多くの石橋に被害が生じた。被害として多く見られるのは壁面の崩壊であり，被害調査報告によると二俣福良渡の被害においては石橋内部を充填している中詰め材に原因がある可能性が指摘されている。この報告を元に，本研究では内部を充填している碎石の大きさに着目し，石橋の耐震性について検討した。異なる大きさの碎石で充填した石橋断面モデルに対する振動台実験を行い，大きいサイズの碎石を充填したモデルの方がより大きな加速度まで崩壊が生じないことが確認された。また，改良版個別要素法を用いた数値解析でも実験と同様の結果が得られた。