

城郭石垣の耐震安全性に関する基礎的研究

Fundamental Study on Seismic Safety of Masonry Structure in Japanese Castle

池本敏和¹・宮島昌克²・村田 晶¹・北浦 勝³

Toshikazu Ikemoto, Masakatsu Miyajima, Akira Murata, Masaru Kitaura

清野純史⁴・古川愛子⁵・鈴木祥之⁶

Junji Kiyono, Aiko Furukawa and Yoshiyuki Suzuki

¹金沢大学大学院助教 理工学研究域 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)

Assistant Professor, Kanazawa University, Graduate School of Natural Science and Technology

²金沢大学大学院教授 理工学研究域 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)

Professor, Kanazawa University, Graduate School of Natural Science and Technology

³金沢大学大学院名誉教授 理工学研究域 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)

Emeritus Professor, Kanazawa University, Graduate School of Natural Science and Technology

⁴京都大学大学院工学研究科教授 都市社会工学専攻 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)

Professor, Kyoto University, Graduate School of engineering

⁵九州大学大学院工学研究院助教 建設デザイン部門 (〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡 744)

Assistant Professor, Kyushu University, Department of Civil Engineering

⁶立命館大学教授 グローバル・イノベーション研究機構 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1-1)

Professor, Ritsumeikan University, R-GIRO

Kanazawa castle is classified as a historical and cultural heritage of Japan; it was constructed in the end of the 16th century and retrofitted in the Edo era (1603-1867) after having suffered from several fires and earthquakes; the current buildings of the castle have been designed based on how they looked in the 1850s. Basically the castle stands on stone foundations traditionally executed by natural stones. The first one deals with the experimental evaluation of the static and the dynamic parameters, such as, the displacement and the natural frequency of the damaged and the undamaged stone foundation models. In the second part, a numerical method is developed for this type of structural system of the stone foundation and its different parts.

Key Words: castle stone foundation, stone masonry structure, 3DEM

1. はじめに

石積み¹⁾の歴史は、滋賀県の比叡山の麓にある古墳群にある穴太積みが起源と言われている。しかしそれは朝鮮半島や中国大陸、さらに遡るとシルクロードを経て、エジプトが起源となっているとも言われている。石積みは橋や家屋、城郭石垣などに活用されているが、本研究で対象とする城郭石垣は、1600年の関が原の合戦を境に穴太衆が全国に散らばり、広まっていった。西日本を中心に、今残存する石垣の約80%は穴太衆が手掛けた石積みと言われている。

我が国には城郭石垣が多数存在し²⁾⁻⁴⁾、石垣形状の曲線、曲面の美しさは世界のそれと比較しても極めて優れたものである。特に、石垣は石と石、又は間詰石が相互にかみ合うことで、全体のバランスが保たれている。コンクリート擁壁とは異なり、石垣の空隙、空洞部にはセメントやモルタルなどが充填されていないため、石同士は互いに独立であることが特徴である。

その互いに独立した石によって造られる石垣は、高度な解析技術を用いて造られたのではなく、試行錯誤に基づく経験と実績により構築されたものであり、近世まで世襲的に伝承されていただけで、科学的に解明されていない部分が多く存在する。写真 1, 2 は打ち込みハギ積み、切り込みハギ積みといわれる石垣の積み方である。時代が新しくなるにつれ、源石へ加工が施されているものが一般的であるが、時代によっては修復時に意匠に配慮して施工された箇所などが見られる。

また、現代の土木技術の視点では石垣の地震時の安定性には大きな問題があるとされてきており、過去の大地震で崩壊した石垣も少なくない。その一方で、大きな地震を経ても築造後 400 年間安定性を保っている石垣もある。

したがって、どのくらい丈夫でどのくらいの地震に耐えられるのかなど不明な部分が多くあるため、伝統的な技術で築造された城郭石垣を現代の科学で評価する必要があると考えられる。

本研究では、石垣の特徴や経験的技術を解析するために実際に石垣に使用されている石を用いて、1 : 20 スケールの模型による水平垂直同時 2 軸振動試験機による実験を行う。さらに、3 次元個別要素法による崩壊挙動のシミュレーションを実施した。



写真 1 打ち込みハギ積みの施工法



写真 2 切り込みハギ積みの施工法

2. 静的載荷実験

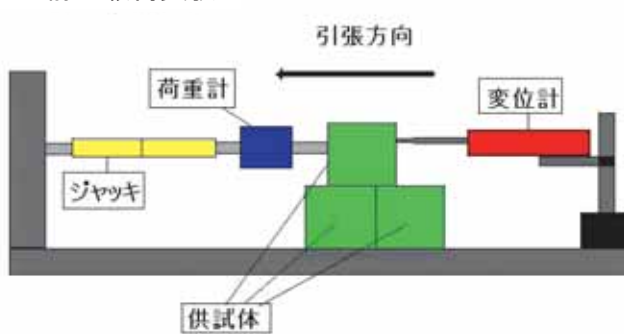


図 1 せん断試験装置

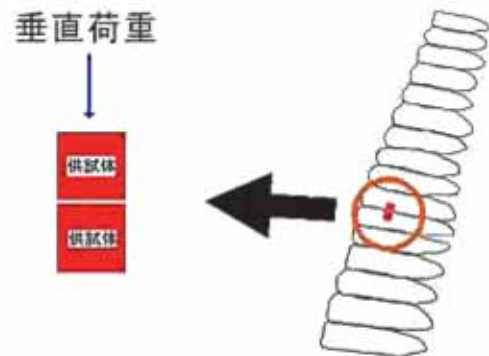


図 2 実験と実物の対応

静的載荷実験では、圧縮試験、レーザーによる石表面の凹凸測定試験およびせん断試験を行った。実際に戸室山から産出された金沢城築城に使われた戸室石を用いた。戸室石には青戸室、赤戸室、赤と青の混ざった岩石の成分比や石の熱の冷えた方法によって変わったらしい。圧縮試験に万能試験機（島津株域会社製）を用いた。試験結果を表 1 に示す。試験には石の表面が平滑なものと粗面なものを用いた。表面の測定には、3 次元レーザー測定器（Nikon 社製 NEXIV VMH-300N）を用い、平滑面では±1mm 以下、粗面では±3mm の供試体の測定結果であった。これらの詳細な試験結果は割愛するが、全国の城郭石垣の強度より劣り、戸室石のほぼ平均的な供試体を実験、解析対象としたことを確認した。ここでは自家製にせん断試験を作成し、供試体として実物の石垣から切り出した石を使用した。実験の様子を図 1、図 2 に示す。本試験では、変位量間隔で繰り返しせん断を行い、また、引張方向から実験を行った。引張方向 5mm、圧縮方向 10mm、再び引張方向 5mm で繰り返しせん断を行い、対象とする荷重は 50N から始めた。

荷重が小さい範囲（100N 以下）では変位 - 力曲線はともに規則的な四角形で表せる曲線になっていたが、

平滑面では 200N、粗面では 150N から変動幅が大きくなったり、不規則な凹凸が発生したりするようになった。荷重が大きくなると共に装置のモーター部分に負担がかかって、荷重を石垣石にかける際に、石垣石に不規則な力がかかるようになったためと考えられる。

表 2 には使用した計測機器の一覧を、図 3 に変位とせん断力の関係を、他図には石の種類別の垂直応力とせん断力応力の分布を示す。与える変位量や载荷速度（1%前後）には関係なく、摩擦係数に大きな違いは生じなかったため、変位量や载荷速度には関係なく同様なせん断応力が生じることがわかる。また、与える垂直荷重が大きくなるとせん断に伴う変位量は小さくなり、速度も小さくなることがわかった。

動摩擦係数の値は、平滑面 0.48~0.73、粗面 0.63~0.79 になった。通常の岩石同士の動摩擦係数が 0.6 程度であることから、実際の石垣の動摩擦係数の測定値が得られていると考えられる。

表 1 圧縮試験結果

供試体	単位体積重量 (kN/m ³)	圧縮力 (kN)	圧縮応力 (MPa)
青戸室石平均	22.7	169.4	67.1
赤戸室石平均	20.7	113.3	46.3
赤青戸室石平均	23.3	191.7	79.0

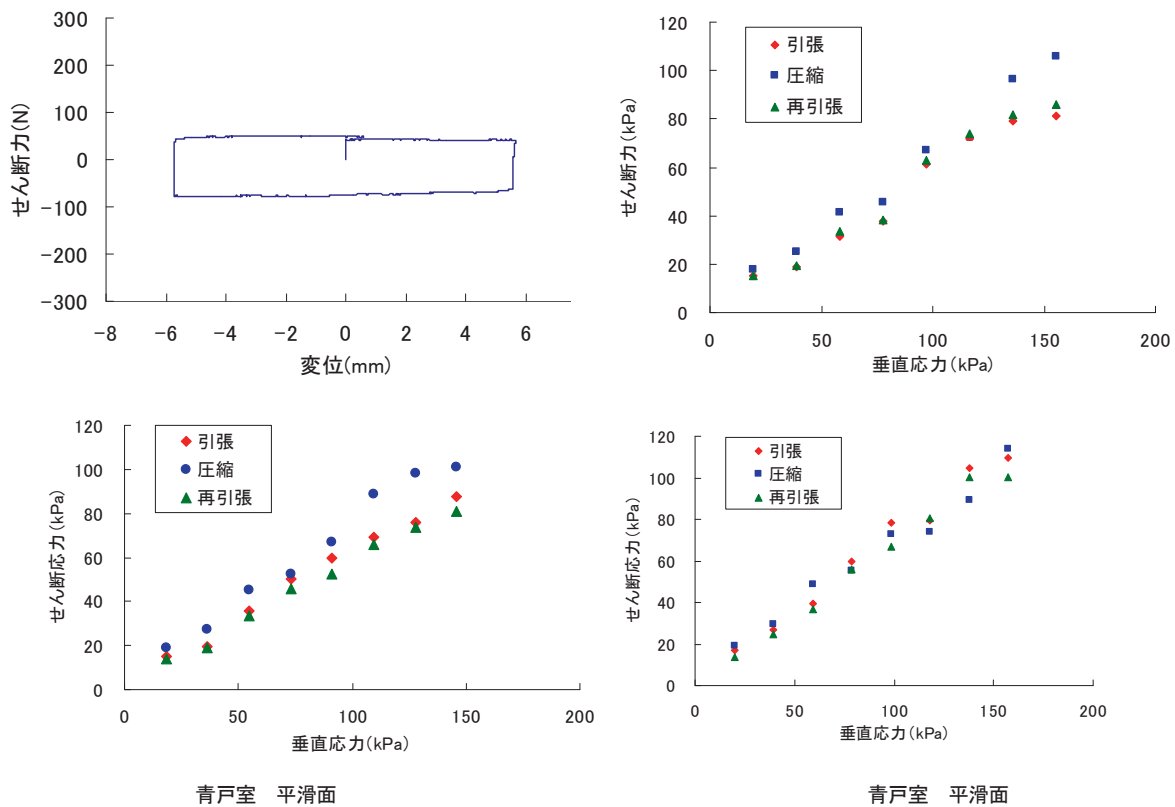


図 3 静的実験の結果

表 2 計測機器の一覧

名称	諸元・仕様
荷重計	東京測器研究所(株) TCLP-500KA
変位計	東京測器研究所(株) SDP-50BS
記録計	KEYENCE(株) NR-500
計算機	TOSHIBA dynabook PACX1214CMHW

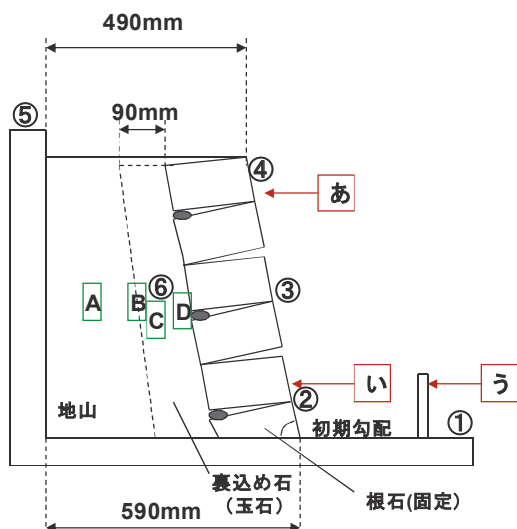


図4 石垣モデル (立面)

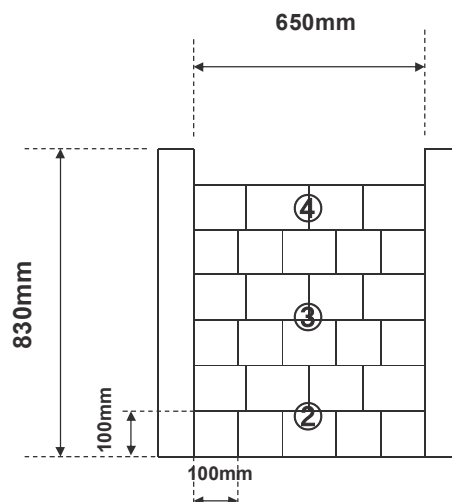


図5 石垣モデル (正面)

3. 振動実験の概要

3.1 実験装置

整形されている戸室石を多数個も入手することが難しいことから、ここで御影石⁵⁾を使用する。御影石は花崗岩で兵庫県の御影で多く算出されたことからこのように呼ばれる。この石は有名な江戸城や大阪城の石垣の一部にも用いられている。

振動実験では、奥行き0.95m、幅0.65m、高さ0.63mのせん断土槽を用いて、その中に石垣模型を作成し、振動台で揺らす。せん断土槽は、厚さ50mmのアルミ製の水平枠を10段に重ねられたものを使用し、せん断方向の抵抗を小さくし、できるだけ振動をそのままに伝えられるように工夫した。このとき、模型の相似則が重要となるが、実際より小さい模型を実験に使用するため、相似則から時間軸を短くすると石垣模型の動的な挙動を把握しづらいので、ここでは2軸振動試験機の正弦波による基礎的・定性的な水平方向加振、水平+上下方向加振を行う。入力加速度を50、100、200galとし、加振時間は水平方向、水平+上下方向に30sとする。

3.2 石垣模型

石垣模型⁴⁾は本来の石垣の約1/20スケールの石垣模型を図4、5に示す。このとき、初期勾配⁵⁾は石垣の中で一番勾配パターンとして多くあった80度とした^{6),7)}。

3.3 実験パターン

今回行う石垣模型の振動実験パターンとして、表3の6通りを行う。初期勾配はいずれも80度とし、反り勾配、逆反り勾配は下3段目から反りをつけていく。また、石垣模型上に荷重を載せる場合を想定し、上載荷重として約1MNの鉄板を用いた。これは1/20のスケールの模型の相似則を考慮した荷重とした。

表3 実験パターン

状態	勾配	直線	反り	逆反り
荷重有無	○	○	○	○
荷重有無	○	○	○	○

○: 有り

4. 実験結果及び考察

今回は、荷重の有無や反り勾配の有無に注目し、石垣模型の挙動がどのように違うのかを比べる。

4.1 スイープ試験

スイープ試験を行うことによって、実験で用いる石垣模型の固有振動数を調べた。スイープ試験とは、振動台の揺る振動数を1Hzから50Hzまで変化させ、そのときの模型の応答から各振動数における応答倍率を求める方法である。その結果、荷重を載せた場合は9Hz、荷重を載せない場合は15Hzとなった。したがって、石垣模型に与える振動は正弦波で石垣模型の固有振動数と、それ以外に振動数(2.25Hz、4.5Hz、18Hz)を用いることとする。

4.2 応答加速度・応答倍率

入力加速度を100galとした場合の一例の振動実験結果を図6～9に示す。実験には種々の個所に計測機器を取り付け、石垣模型上端の加速度を振動台に取り付けたそれで除した値を応答倍率とした。当然のことではあるが、どの場合も固有振動数で応答が最も大きくなるという結果が得られた。特に、図中から荷重がある場合、反りがある場合の応答倍率が小さくなっているため、この方法が石垣模型の安定に寄与していると考えられる。

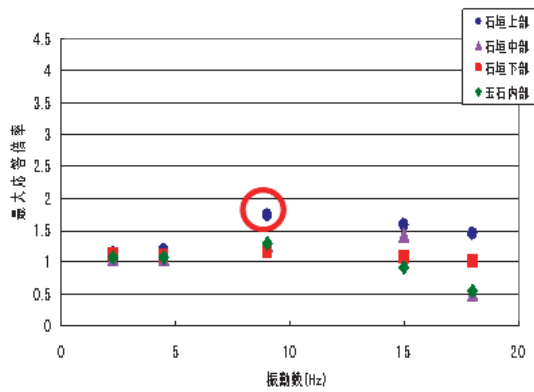


図6 荷重あり 反り 100gal

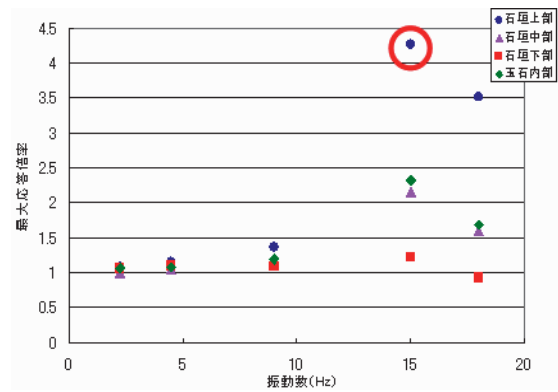


図7 荷重なし 反り 100gal

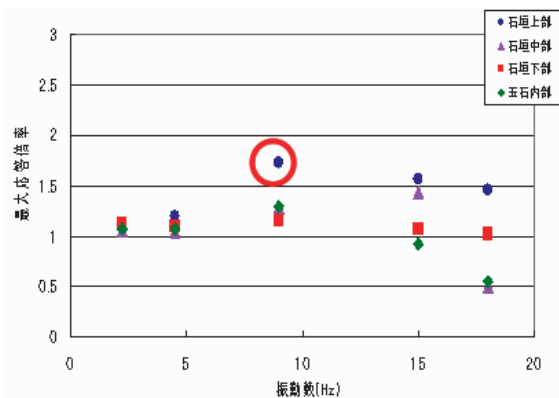


図8 荷重あり 反り 100ga

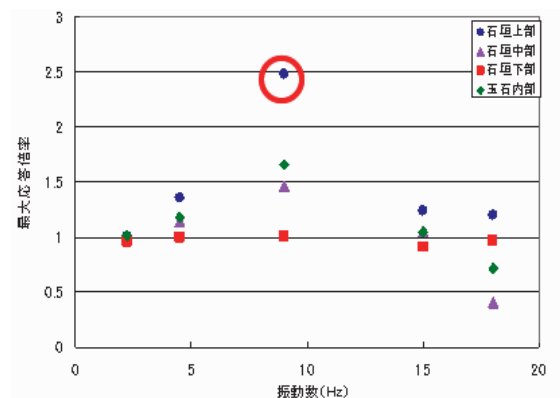


図9 荷重あり 直線 100gal

4.4 水平方向加振(1方向)と水平+上下方向加振(2方向)との違い

応答加速度・応答倍率ともに、2方向加振の方が大きくなった。応力では、一番応力作用の大きいDの部分(石裏面背後、図4参照)において2方向加振の方が大きくなった。振動が上下方向に作用することで、石垣模型は振動しやすくなり、石垣の裏面まで振動が伝わりやすくなったためと考えられる。変位については、2方向加振の方が変位は小さくなった。これは2方向加振することで、振動方向が水平方向に伝わりにくくなる現象が生じ、水平方向のみ変位を計測していたので、水平方向加振の変位より小さくなる部分が生じたと考えられる。

5. 3次元個別要素法を用いた石垣の崩壊解析

5.1 モデル地盤

使用したモデルを図10に示す。解析の対象とするモデルは高さ5m、幅2.5mであり、地盤の控え長さは上底0.156m、下底0.625mに設定して、石垣の勾配は0.125に設定した。上部石垣に用いる石垣石は、幅50cm、高さ50cm、控え長さ80cmである。また、要素数の縮小や計算時間の短縮のために簡易なモデルを作成したため、本来石垣を構築する場合には考慮しなければならない根石や木杭、胴木、間詰め石は考慮しないと共に、裏込め土のモデルも幅、高さは石垣石とほぼ同等で、控え長さは石垣の傾斜にあわせて、0.5mから約1.5mまでの値を設定した。そして、裏込め以外の地盤基礎部分は固定要素として扱った。解析では、これまでの成果から、地下水位はほとんど生じていないというデータをもとに、地中の水圧が考慮されていない。また複雑な土構造については一体化させ簡略化した。土要素に接する横方向の安定を考慮して、横面を鉄壁と仮定した。

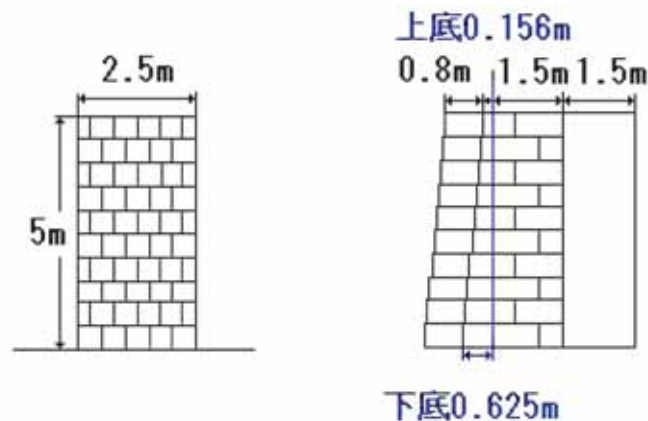


図10 解析モデル

解析に用いたパラメータは、なるべく実験値や測定値を用い、モデル化に当たっては図11の四角で囲んだ部分を対象とするとともに、地山部分、地盤部分は別の要素とした。本解析では赤戸室石を対象に選定してモデルを構築する。そのため、石垣石の単位体積重量に、赤戸室石の単位体積重量である 20.7kN/m^3 を用いた。

解析を進めるにあたり、無振動状態の波形を10秒間与えた場合に石垣の安定が確保できたことを確認して解析を進めた。また、ここでは平滑面のみを解析対象とする。

5.2 入力波形の作成

入力波形としては、無振動状態の波形のほかに周期2Hzで上下方向の100、200、300galの波形、周期2Hzで水平方向の100、200、300galの波形を与え、入力時間を10秒間とした。

表4 金沢城二の丸の地盤調査によるパラメータ

番号	地盤分類	単位体積重量 (kN/m ³)	ヤング率 (kN/m ²)	ポアソン比
1	石垣	20.7	1.96E+06	0.3
2	盛土1	19.6	1.48E+05	0.45
3	盛土2	19.6	2.37E+05	0.49
4	石垣裏込め材	19.6	9.39E+05	0.47
5	粘性土層	17.6	1.22E+05	0.48
6	上部礫層	20.6	4.19E+05	0.48
7	砂質土層	19.6	4.19E+05	0.48
8	下部礫層	20.6	9.01E+05	0.48

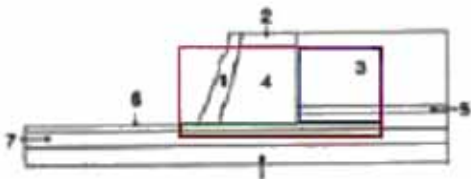


図11 実際の地盤調査の箇所

5.3 上下方向正弦波を用いた解析

上下方向に 300gal、2Hz の正弦波入力時の挙動を図 12 に示す。この図から石垣の崩壊していく挙動を見ることができる。また、全体をまとめたものを図 13 に示す。100 gal、2Hz の正弦波を入力した時に、波形入力 9 秒後に石垣の上から 8 段目の石垣に傾きが生じた。同様に 200 gal、2Hz の正弦波入力時には、波形入力 7 秒後に石垣の上から 9 段目の石垣に傾きが生じた。300gal、2Hz の正弦波入力時には、波形入力 6 秒後に石垣の上から 5 段目の石垣に傾きが生じ、波形入力 8 秒後にはモデルの石垣部分において破壊挙動が見られた。

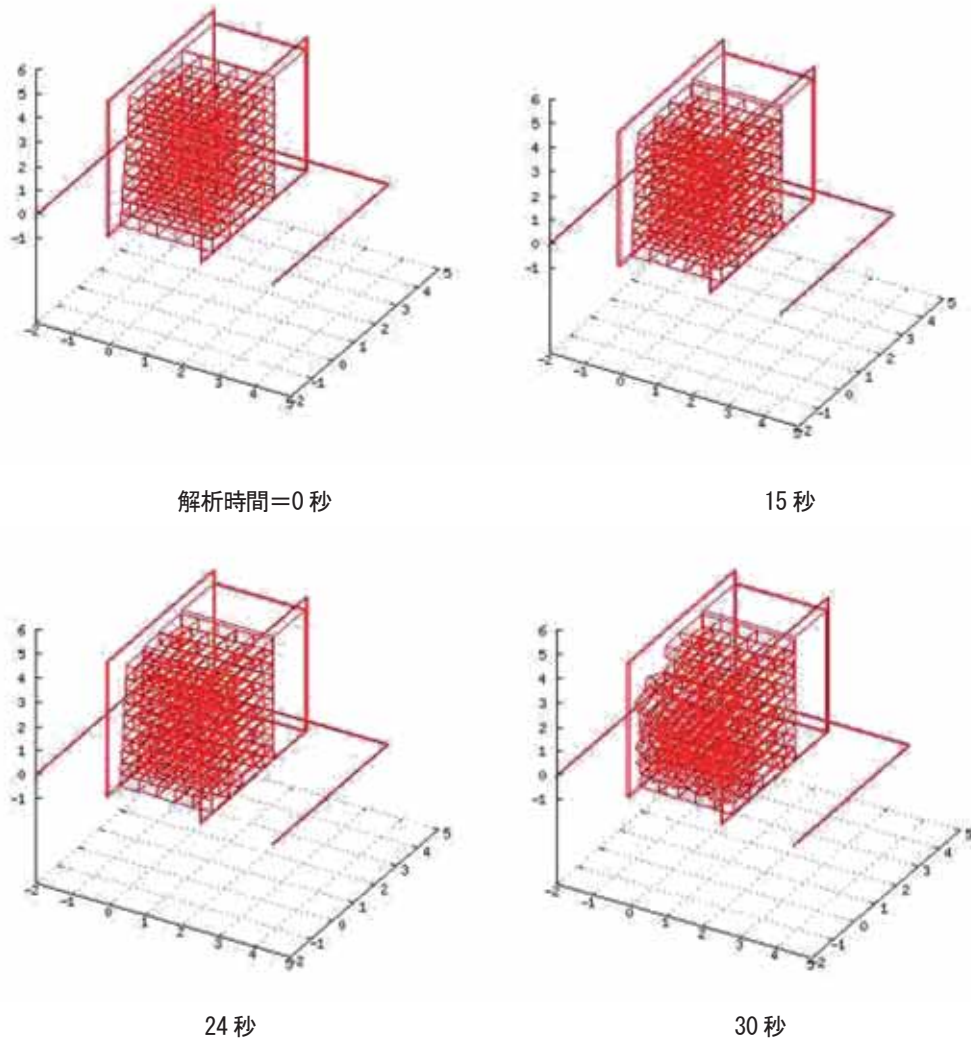


図12 3DEMによる崩壊挙動

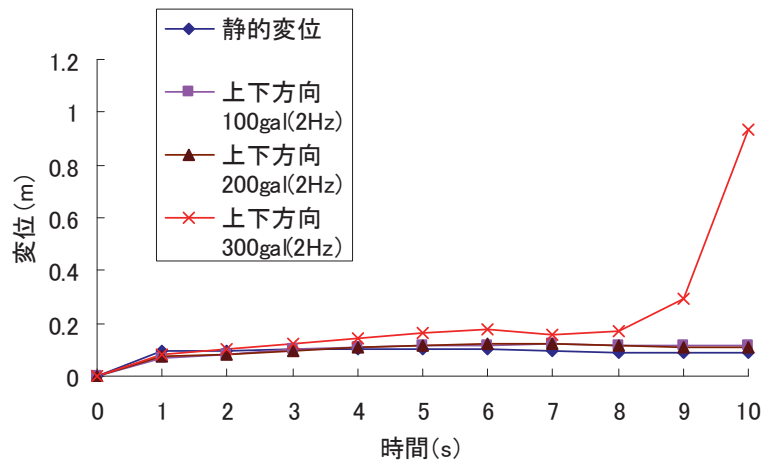


図 13 3DEM による解析結果

静的状態、100gal 入力時、200gal 入力時には水平方向、上下方向ともに大きな変位は見られない結果が得られた。300gal 入力時には破壊挙動を示す 8 秒後を境に、大きな変位が見られた。石垣の上部ほど変位も大きくなった。また 300 gal 入力時には、波形入力 10 秒後に石垣の上半分の上下方向の変位は 1m を超えた。この破壊挙動は、石垣の孕みだしではなく、擁壁自体が上から落下する挙動であったと考えられる。ただし、石垣の形状や規模によっては、この崩壊挙動が卓越するのではなく、それぞれの石垣に応じた挙動を見せるものと考えられる。

6. 結論

石垣模型は、固有振動数で最も振動し、そこでの最大応答加速度、最大応答倍率は大きくなる。入力加速度に対し、最大応力、最大変位は大きくなる傾向にある。また、上載荷重または反り勾配の有無に関して、石垣模型の安定度は変化した。1 方向加振より 2 方向加振の方が、石垣模型に振動を与えやすい。

以上のように定性的ではあるが、城郭石垣の動的挙動について知ることができた。実際には、もっと実験や解析データが蓄積されているが、処理が追いつかないため、その概略を説明した。次の機会を待って、十分に考察をまとめたいと考えている。

最後に、立命館大学 G-COE の研究活動ならびに本研究に助力を賜った学生各位に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 日本石材産業協会：石積み，<http://www.japan-stone.org/news/> アクセス日 2008/11/27
- 2) 熊本城の石垣：http://www.kobai.jp/mushagaeshi/200_/210_/ アクセス日 2008/11/26
- 3) 森本浩行，西田一彦，西形達明，玉野富雄：城郭石垣の隅角部形状とその数値評価法，土木学会論文集，No. 666/III-53，159-168，2000. 12
- 4) 梶田啓介：城郭石垣模型の地震時挙動に関する実験的研究，金沢大学卒業論文，2007
- 5) 御影石：<http://www.d1.dion.ne.jp/~mthouse/page1440.htm> アクセス日 2008/11/26
- 6) Live door ニュース：石垣模型実験，<http://news.livedoor.com/article/detail/3907249/> アクセス日 2008/11/23
- 7) 大林組：石積壁の地震時安定性評価に関する研究，http://www.obayashi.co.jp/technology/shoho/68/pdf/2004_068_24.pdf#search= 相似則%20 石垣 ア
クセス日 2008/11/27