

城郭石垣の盛土構造と動的安定性^{*1}

Dynamic stability of embankment structure in castle masonry stone wall

西形達明^{*2}, 笠博義^{*3}, 西田一彦^{*4}, 森本浩行^{*5}, 阿波谷宜徳^{*6}, 山本浩之^{*7}, 引場啓太^{*8}

By Tatsuaki NISHIGATA, Hiroyoshi KASA, Kazuhiko NISHIDA, Hiroyuki MORIMOTO,
Yoshinori AWATANI, Hiroyuki YAMAMOTO and Keita HIKIBA

概要

城郭石垣の修復においては復元が基本となるが、石垣が土木構造物である限り、同時に安全かつ十分な耐久性をもつ修復方法を考えなければならない。このためには、裏込め盛土を含めた石垣構造全体を考慮に入れた安定性の評価を行う必要がある。そこで、本研究では、個別要素法を用いて石垣構造をモデル化することで、その地震時挙動について考察を行った。この結果、石垣の変形には石垣石の形状のモデル化が重要であり、城郭石垣の地震時安定性を検討する場合には石垣構造はもとより、裏込めの盛土構造とその物理特性が大きく影響を及ぼすことが明らかとなった。

1. はじめに

我が国の城郭石垣は空積み構造であると同時に、曲線形状を有していることなど、世界に類を見ない独自の構造形態を有している。一方で、多くの城郭石垣は16世紀後半から17世紀前半に構築され、すでに400年にもおよぶ年月の経過によって、石垣石の劣化や構造の老朽化による変形が著しいものも見られ、それらの修復作業もいくつかの城郭で実施されているようである。そこで、このような石垣の構造とその力学的安定性について検討を加えることは、今後の城郭石垣の保存と維持管理手法を考える上で不可欠であり、数多くの文化遺産を保存する上でも重要な知見を与えることになる。とくに、石垣は分離構造であるため、地震時の安定性については十分検討しておく必要がある。さらには、城郭石垣を擁壁構造物の一種と考えれば、現在のコンクリート構造では建設が困難なほどの高い石垣が顕著な破壊現象を生じることなく長年にわたって存続してきた事実は驚異ともいえることであり、土木工学的観点から見ても非常に興味深いものがある。このことは、今後の土木工学における土構造物の安定性に関する研究の進展と、将来の新技術の発展にもつながる可能性を秘めている。

そこで、本研究では、現在進められている名古屋城本丸馬出搦手石垣補修工事に関連して解体された御春屋門跡

の石垣を例題として、個別要素法を用いて解析的な検討を行い、その石垣背面の構造を含めた地震時の挙動を考察するとともに、個別要素法の城郭石垣へ適用することの妥当性と有効性について検討を加えることにする。

2. 名古屋城御春屋門跡石垣の盛土調査

名古屋城では平成14年度より本丸馬出搦手石垣の修復工事ならびに発掘調査が開始されている。平成17年度には今回検討の対象とした御春屋門跡周辺の石垣解体作業が進められ、とくに石垣背部の盛土部について詳細な調査がなされたり、その概要を図-1に示す。この図に示すように、盛土内部のほぼ中央部にシルトと砂層が互層状に堆積して版築状をなした層が出土し、これは石垣構築時の芯土であろうと考えられている。(写真-1)。

そこで、この芯土部分近傍から写真-2に示すような状況でネイルサンプリング²⁾による不攪乱試料の採取を行い、これによる物理試験と強度試験を実施した。その結果が表-1と表-2に示されている。物理試験の結果から、採取された土は粘性土質砂に分類されるが、礫分がかなり多く含まれており、乾燥密度が1.381 g/cm³とそれほど大

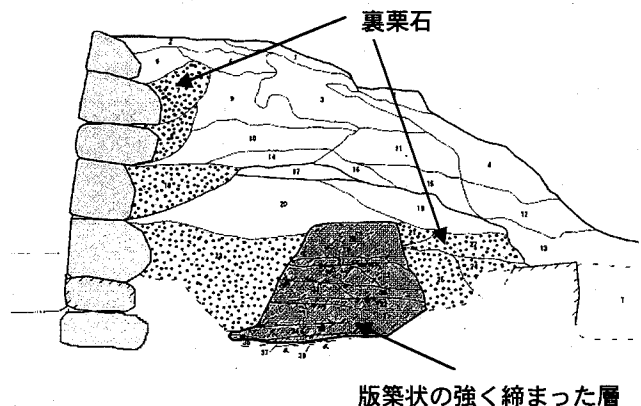


図-1 御春屋門跡周辺の地盤調査結果¹⁾

*1 keyword : 城郭石垣, 地震時安定性, 個別要素法

*2 正会員 工博 関西大学環境都市工学部
(〒564-8680 吹田市山手町 3-3-35)

*3 正会員 博士(工学) ㈱間組本店技術・環境本部

*4 正会員 工博 関西地盤環境研究センター

*5 正会員 博士(工学) 京都市立伏見工業高等学校

*6 非会員 ㈱間組名古屋支店

*7 正会員 ㈱間組本店土木事業本部技術第二部

*8 学生会員 関西大学大学院工学研究科

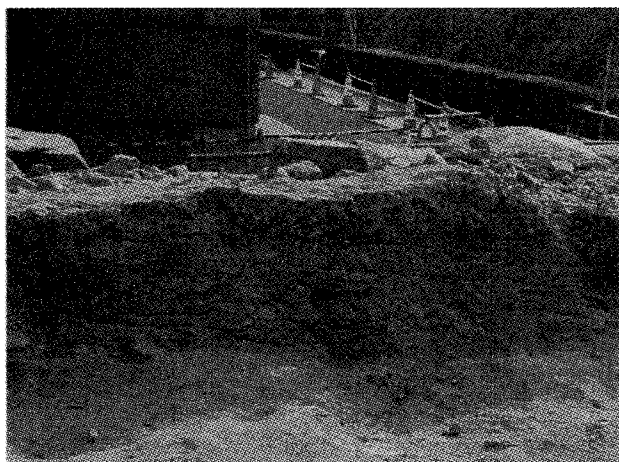


写真-1 出土した版築状の土層

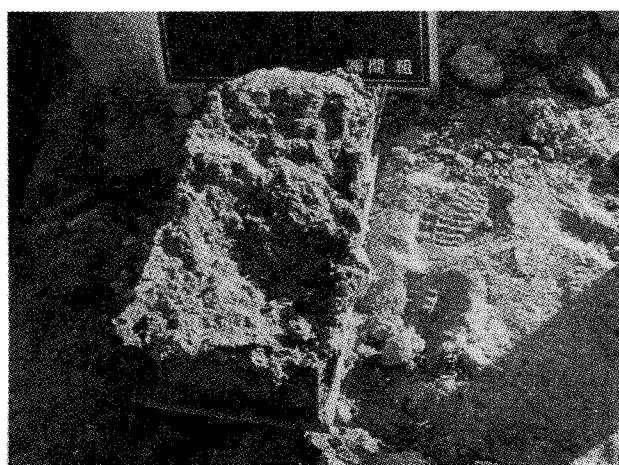


写真-2 ネイルサンプリングによる不攪乱試料

表-1 採取試料土の物理的性質

試験項目		試験値
土粒子密度 (g/cm^3)		2.648
湿潤密度 (g/cm^3)		1.650
乾燥密度 (g/cm^3)		1.381
自然含水比 (%)		19.5
粒 度 組 成	最大粒径 (%)	19
	礫分 (%)	1.0
	砂分 (%)	65.7
	シルト分 (%)	21.3
	粘土分 (%)	12.0
土質分類		粘性土質砂

表-2 採取試料土の一面せん断試験結

	不攪乱試料	攪乱再構成試料
c_{cu} (kN/m^2)	230.2	176.3
ϕ_{cu} ($^{\circ}$)	61.9	65.5
c' (kN/m^2)	123.3	90.1
ϕ' ($^{\circ}$)	46.2	39.9

きい値ではないが、調査時の報告ではかなりよく締まった強い層であるとされている。版築状であることから、築造後も雨水の浸透を受けにくい状態にあったものと考えられる。また、文献1)の報告によると、石垣の下2石と3石の間に段が生じて、上側の石が前に張り出したようになっており、これは地震等の影響によって生じた可能性があるとしている。

次に、表-2に強度試験として、定体積一面せん断試験の結果が示されている。不攪乱状態の試料と採取試料を乱した後、不攪乱試料と同じ湿潤密度に再度締固めた再構成試料の2つの結果が示されている。両者を比較すると、内部摩擦角 ϕ には顕著な差は見られないが、粘着力 c において、不攪乱試料が攪乱試料の約1.3倍程度大きくなっており、築造からの時間の経過に伴って盛土の強度が予想以上に大きくなっていることが明らかとなった。このように、築造から時間が経過した盛土の不攪乱試料による強度試験を行うことで、土層強度の経時的な変化を考察することができる。これは粘土材料において見られるシキソトロピーによる強度回復に関係しているものと考えられ、地盤工学においても非常に興味深いものがある。長い年月を経過した土構造物は、地盤の材料学的な研究を行う上でも、非常に有効な情報源であり、今後このような活用方法を十分検討する必要がある。

3. 個別要素法とその石垣構造への適用法

城郭石垣の地震時の安定性と変形挙動については、数値解析による研究が以前より数多くなされている。なかでも有限要素法^{3),4)}はその代表的な解析手法であるが、本来の有限要素法は連続体の解析手法であるため、個々に分離した石垣構造を解くためには、やはり制限があると言わざるを得ない。とくに、地震時のように、個々の石垣石に大きな剛体変形によって不安定化を招く可能性のある場合には、その使用には限界がある。

一方で、分離した不連続要素の大変位量の解析を主眼とした個別要素法⁵⁾や不連続変形法⁶⁾などの適用が試みられており、これによって任意形状の石垣石の剛体的な変位挙動をある程度表現することが可能になっている。これらの手法では、構造物のモデル化と計算に用いる定数値の決定方法などに問題点が残されはいるものの、城郭石垣の定性的な挙動を知るためには、有効な手段となりうるものと考えられる。

そこで、本研究では個別要素法を用い、できるだけ忠実かつ適正な城郭石垣モデルを作成する手法について検討を行い、これを用いて地震時の挙動を考察することにする。

図-1に示した現地の石垣石および背面盛土の実測データを基にして、個々の石垣石については図-2に示すような個別要素法によるモデル化を行った。

まず、石垣石のモデル化について考える。2次元有限要素法などの数値解析においては、石垣石として長方形形状

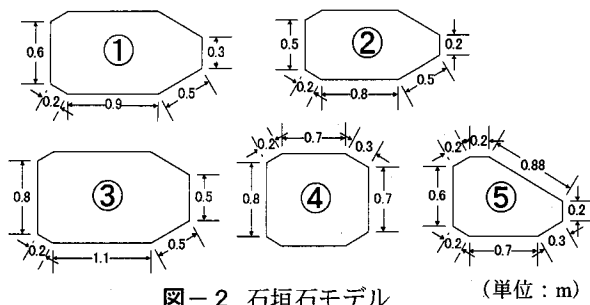


図-2 石垣石モデル

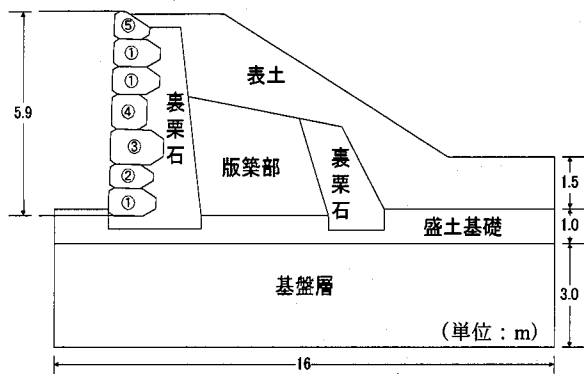


図-3 石垣および裏込め盛土のモデル化

表-3 個別要素の粒径と定数値

	個別要素 粒 径 (mm)	個別要素法に用いた定数値	
		粒子間 摩擦係数	粒子間粘着 力 (kN)
表土	30~75	1	1
版築部	30~75	2	100
盛土基礎	30~75	3	0
基盤部	30~75	3	0
石垣石	—	5	0
裏栗石	100~200	5	0

が用いられることが多い^{3),4)}。しかし、石垣石を長方形形状にモデル化すると、石垣相互間のせん断滑りは表現できるものの、石の回転によって生じる石垣の目開きや、間詰め石、飼石などの機能を表現することが非常に難しくなる。とくに、石の回転は石垣のはらみ出し変形の主要原因となるものと考えられることから、これを表現しうる形状にモデル化することが望ましい。そこで、図-1にある7個の石垣石を5種類の石垣形状に分類した(図-3の①~⑤)。すなわち、石のモデル化とその作成を容易にするために、ここでは下より1,5,6番目の石は同形状(番号①)としている。①~⑤の石形状の詳細を図-2に示す。これらは個別要素を剛結することで作成されており、石の形状は角を面取りしたホームベース型にモデル化している。こうすることで、間詰め石や飼石を設置することが可能となる。また、各石の上下面は直線としているが、この直線の長さを

短くすることで、野面積みなどの加工度の低い石形状を表現できるものと考えられる。

次に、石垣背後の盛土部のモデル化について説明する。現地の調査結果から、図-3に示すような地盤状態にモデル化し、さらに各層の個別要素の粒径ならびに物理定数を表-3に示す。表土、版築部、基礎盛土部、基盤部のいわゆる土層部については、すべて粒径はすべて30~75mmとしている。これは現実の土粒径から考えると大きいようであるが、あまり小さくすると要素数が増加して膨大な計算時間が必要となるので、定性的な挙動を知るために、ほぼ十分であろうと思われる範囲で設定したものである。裏栗石層については粒径100~200mmとしている。個別要素解析に用いた定数値の決定法については、笠らの論文⁷⁾に詳細が示されているので、ここでは省略する。ただし、反築部については強度が大きい芯土であることを考慮して粒子間粘着力を大きくした。

上述のようにして作成した個別要素モデルを図-4に示す。石垣をモデル化する上で最も難しいと思われる点は、対象とする石垣の現状をどのように定めるかということにある。本研究では、石垣石の水平方向の変形を拘束したままモデルを作成し、モデルの完成後に拘束条件を取り除くことで、若干の変形が生じた状態が現状の石垣を表すものとした。これを初期状態として、水平方向の地震動を与えることでその動的挙動を考察することにした。

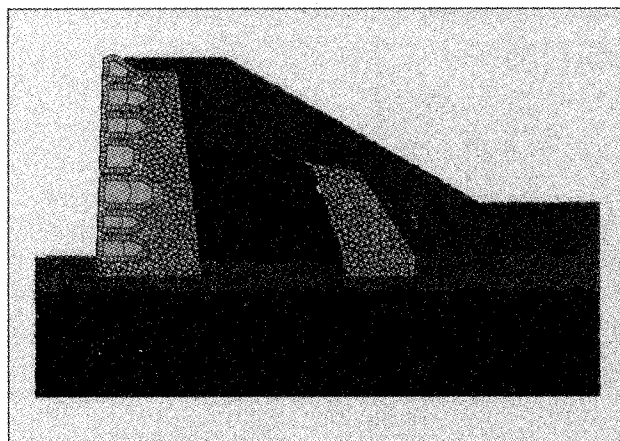
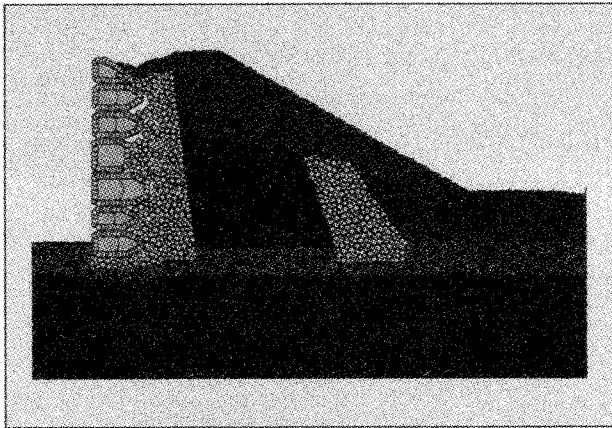


図-4 石垣構造の個別要素モデル

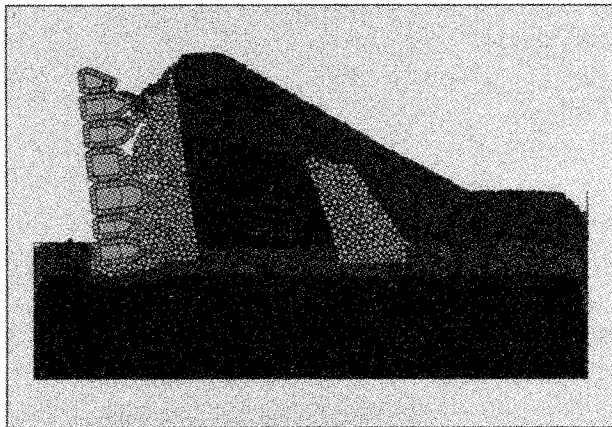
4. 解析条件と結果

解析に用いる水平地震加速度は200galとし、地震波の周期の影響を考察するために、その周波数を5Hz, 2Hz, 0.5Hzの3種類とした。このとき入力波数はいずれも10波としている。また、盛土部中央にある版築部および版築部後部の栗石部の定数値を表土層と同じ値(粒子間摩擦係数=1, 粒子間粘着力=1kN)にすることで、これを版築部が存在しない場合とみなし、両者を比較することで版築部が存在することの影響を調べることにした。

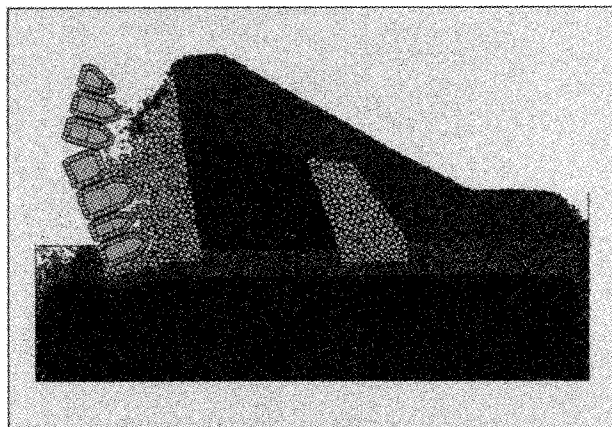
図-5と図-6に盛土内部の版築部がある場合とない場合について、それぞれ3種類の周期をもつ地震動を入力



(a) 入力波の周期 5Hz



(b) 入力波の周期 2Hz

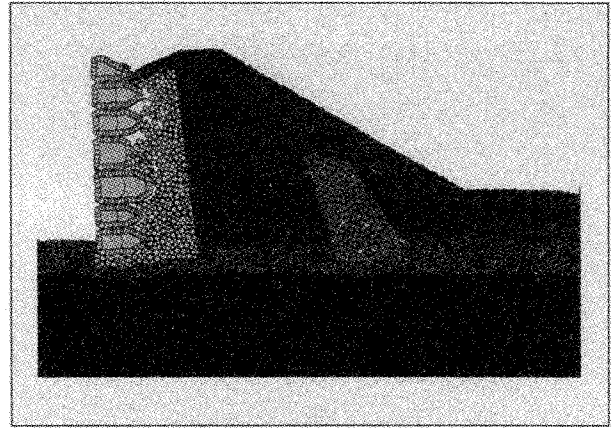


(c) 入力波の周期 0.5Hz

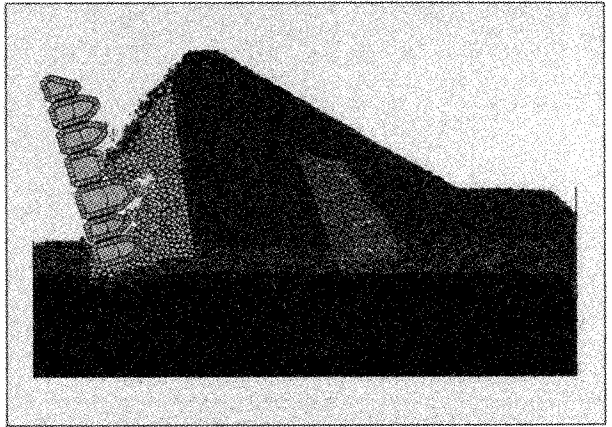
図-5 版築部がある場合の解析結果 (10 波入力時)

したときの変形概要図を示す。図より、石垣構造の地震時の変形挙動は、明らかに入力周波数の影響を受け、周波数が低くなるほど変形量が大きくなっていることがわかる。すなわち、石垣構造の固有振動数はかなり小さいものと推察される。よって、石垣が分離構造であることを考え合わせると、石垣構造は比較的柔な構造物であると考えられる。

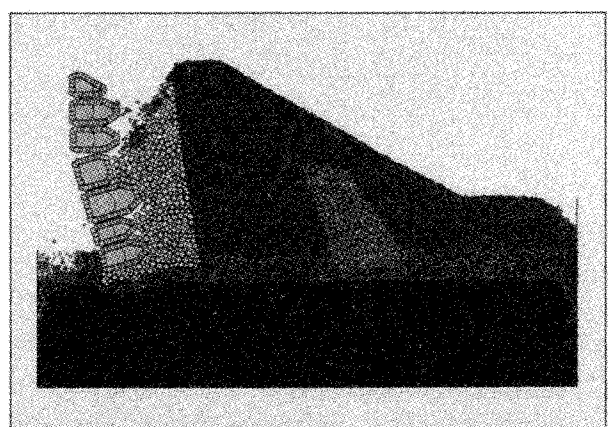
次に、内部の版築部の影響を見てみると、周波数が 5Hz および 2Hz の場合では、版築部がある場合の方が変形量は小さくなっている。これは、内部の比較的強度の高い版



(a) 入力波の周期 5Hz



(b) 入力波の周期 2Hz



(c) 入力波の周期 0.5Hz

図-6 版築部がない場合の解析結果 (10 波入力時)

築土が地震動に抵抗したためと思われる。しかしながら、周波数を 0.5Hz と極端に小さくすると、図-5, 6 の(c) に示すように、版築部がある場合の変形がわずかに大きくなっている。これは、内部の版築部の慣性力によって、石垣が前に押し出されたことが原因ではないかと考えられる。さらに、周波数 0.5Hz の場合には、石垣の変形モードが他の周波数とは異なっており、中程で折れるように破壊している。この石垣が折れ曲がっている場所が版築部上面の位置と一致していることも、版築部の慣性力の影響を想

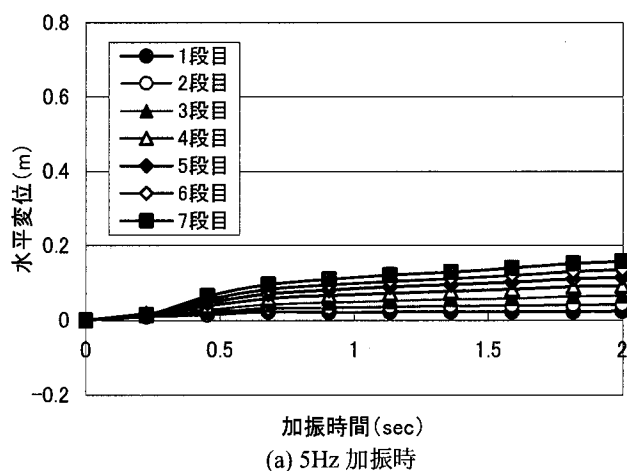
定させる要因となっている。ただし、この折れ曲がり位置にある石垣石（下から4番目）が他の石に比べると、わずかに小さい石であることも、ここで折れ曲がったことの原因であると考えられる。

以上のことから、石垣構造の地震時挙動には、周波数や石垣石の大きさと形状のみならず、盛土内部の構造も密接に関係しているものと考えられる。次に、加振中の石垣石の挙動について詳細に検討を行った結果を示して考察を進めることにする。図-7～8に版築部がある場合とない場合について、5Hzと2Hz加振時における個々の石垣の水平変位と加振時間の関係を示す。なお、与えた地震波がともに10波であることから、加振時間は5Hzでは2秒、2Hzでは5秒間となっている。図-7の版築部がある場合においては5Hz加振の場合には、その水平変位量は7段目（最上部）の石垣石で18cm程度となっているが、加振時間経過に対しては急激な変形が生じるには至っていない。それに比べて2Hzの場合には、加振時間が3秒（6波）あたりな状況に至る様子がよくわかる。一方、図-8の版築部がない場合には、とくに2Hz加振時では加振に伴って変形から、変形速度が急激に大きくなり、石垣は非常に不安定が非常に大きくなっており、3波あたりですでに変形速度

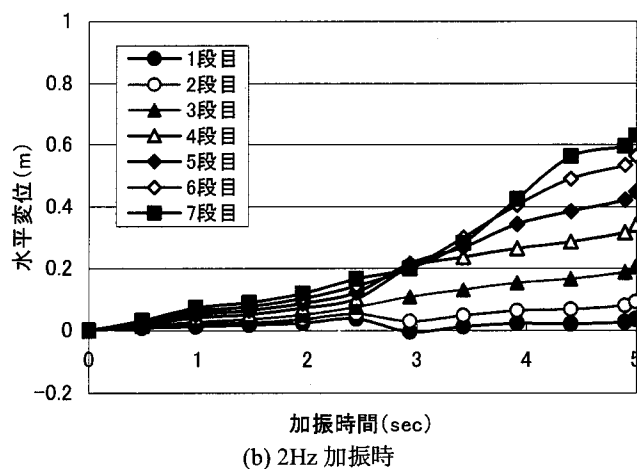
が非常に大きくなり、計算上は崩壊状態に至っている。

次に、図-9に5Hzと2Hzの地震波を入力したときの石垣部の水平変位分布を示す。図より、5Hz、2Hzともに版築部がある場合には、その水平変位量は半分程度になっていることがわかる。したがって、周波数が比較的大きい場合には版築部と内部の栗石が、石垣の変形を十分抑制しているものと考えられる。また、2Hzの結果に見られるように、変位分布の途中で不連続な段差が生じている部分がある。これは、石と石の間にズレが生じたことを示しているが、顕著なズレは石垣の上部と下部において生じている。上部の石垣石は垂直応力が小さいために、ズレ変形が生じやすくなったことが原因と考えられる。一方、下部のズレはこの部分の石垣石の大きさがわずかに小さいことも原因と考えられるが、前述したように、調査結果¹⁾でも石垣下部の2石と3石の間に大きなズレが見られたことが報告されていることから、地震時には、石垣の下部においてもズレ変形が生じる可能性があることを示している。

最後に、石垣背面の盛土内部の変形状態を見ることにする。図-10は盛土内部の版築部のほぼ中央部に位置する鉛直断面における水平変位の分布を示したものであり、図中に版築部のある場合の位置が示されている。これより版

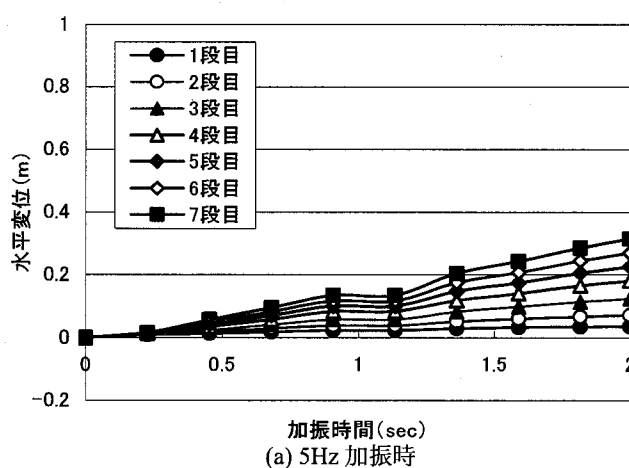


(a) 5Hz 加振時

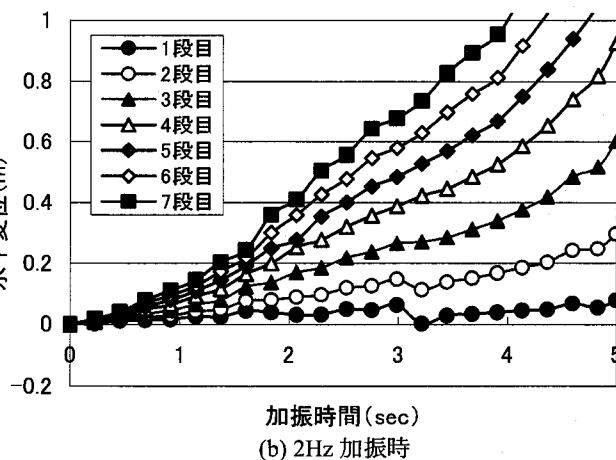


(b) 2Hz 加振時

図-7 版築部がある場合の加振時間と石垣石の水平変位の関係



(a) 5Hz 加振時



(b) 2Hz 加振時

図-8 版築部がない場合の加振時間と石垣石の水平変位の関係

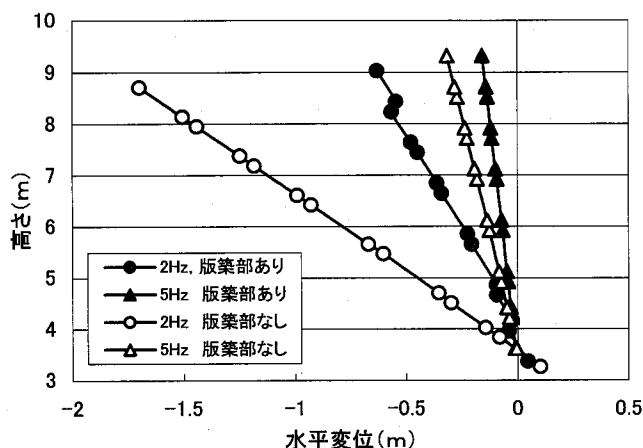


図-9 加振後の石垣部の水平変位分布

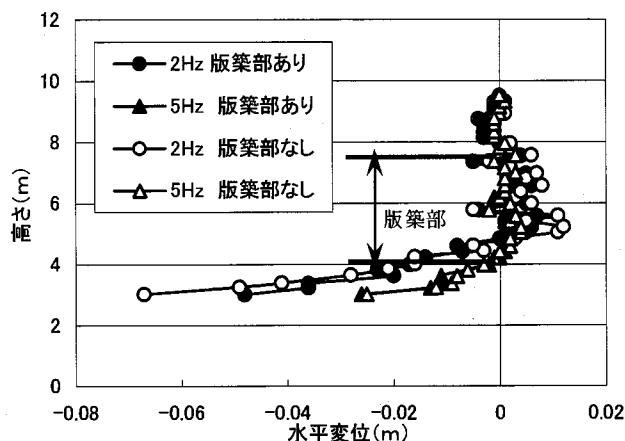


図-10 版築部中央部における水平変位分布

築部内部の水平変位は拘束されており、版築部自身は非常に安定した状態にある。また、版築部下部の地層の水平変位もない場合に比べてかなり抑制されているようである。図-11に示す版築中央部の水平断面における鉛直変位についても、ほぼ同様のことがいえる。盛土内部の版築部の有無による差は、石垣部の変形ほど顕著なものではない。したがって、地震時の石垣部の変形は背面盛土内の変形の影響ではなく、石垣部と内部盛土の強度変形特性との相互作用によって生じるものと考えられる。

5. まとめ

本研究では、名古屋城の御春屋門跡周辺の石垣を題材として、個別要素法の石垣の地震時挙動解析への適用性について検討した。現段階では、個別要素法の結果は定性的なものと言わざるを得ないが、このような検討を重ねることで、城郭石垣の危険部位の推定など、今後の石垣修復のための一資料となるものと思われる。

- 1) 石垣部の安定性は石垣石の形状に大きく影響を受ける。したがって、石垣のモデル化の際には、石の形状はできるだけ実物に近い形状にモデル化することが重要である。
- 2) 石垣構造の地震時挙動は、地震周期の影響を受ける。とくに、石垣は分離構造であることから、その固有振動数は比較的小さいものと考えられる。
- 3) 今回対象としたような、内部に芯土として版築部を有する場合には、この版築部が石垣構造の安定化に寄与するものと考えられる。ただし、周波数によっては、内部の剛性の高い芯土部が逆に石垣部の不安定化を促進する場合があるので注意が必要である。

謝辞

本研究を行うにあたり、名古屋城管理事務所の方々には多大のご協力をいただいたことを記して謝意を表する次第である。

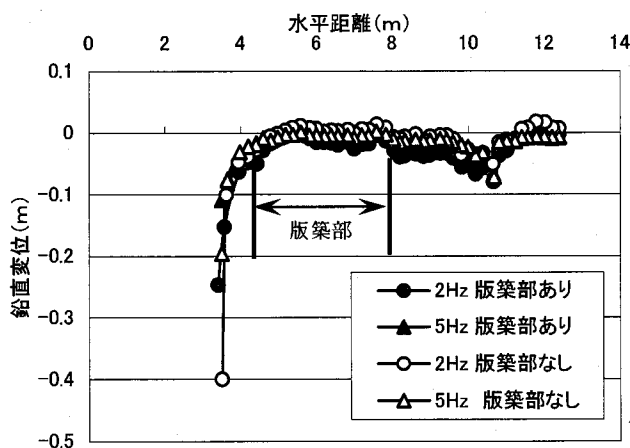


図-11 版築部中央部における鉛直変位分布

参考文献

- 1) 名古屋市教育委員会：特別史跡名古屋城本丸搦手馬出石垣修復工事発掘調査報告書，2006。
- 2) (社)地盤工学会：土質試験の方法と解説，p.764，2000。
- 3) 田中邦熙，新谷洋二，小林善勝，谷優作，木村真也：FEM-3D(L27)による石垣の動的挙動の数値解析実験，土木史研究，Vol.24，pp.261-268，2004。
- 4) 玉野富雄，金岡正信，西田一彦，西形達明，森本浩行，高岡光夫：大阪城石垣の地震時力学挙動，第7回地盤改良シンポジウム論文集，日本材料学会，pp.277-282，2006。
- 5) 森本浩行，西形達明，西田一彦，玉野富雄：個別要素法（DEM）による城郭石垣の変状に影響を及ぼす地盤条件に関する考察，土木史研究，Vol.27，pp.317-322，2005。
- 6) 西山哲，大西有三他：DDAによる空積み擁壁石垣の解析，第8回日本計算工学会講演会計算工学講演論文集，2003。
- 7) 笠義博，西田一彦，西形達明，森本浩行，阿波谷直徳，山本浩之：個別要素法による城郭石垣の安定性解析，第27回土木史研究会（投稿中），2008。