

城郭石垣の安定性に影響する各種要因の検討*1

Examination of Factors which affects the Stability of Castle Masonry Wall

森本浩行*2, 西田一彦*3, 西形達明*4, 玉野富雄*5

By Hiroyuki MORIMOTO, Kazuhiko NISHIDA, Tatuaki NISHIGATA and Tomio TAMANO

要旨：日本に現存する城郭石垣の多くは構築から400年前後経過しており、石垣の変状により崩壊の危機にさらされている箇所が数多く存在している。貴重な文化遺産である城郭石垣の保存のために、現状の実態を計測し、その形状と「後藤家文書」の設計手法による形状との比較により、構築当時からの変形状況を把握するとともに、安定性に影響を及ぼす要因についての検討を行った。さらにはFEM解析を用いて、安定性に影響を及ぼす要因の検討も行った。

1. はじめに

日本に現存する城郭石垣には、老朽化が進行し崩壊の危険性のある箇所が数多く存在している¹⁾。建設文化の歴史的遺産であるこれらの遺構を修復保存するために、石垣の安定性を評価判定する工学的手法の確立が必要である²⁾。石垣の安定性を決定づける要因の一つとして地盤の強度特性が挙げられる。そこで本研究においては、 N 値と石垣の形状を決定づける要素との関係、および構築当時からの変形状況と N 値との関係を把握することで安定性に及ぼす要因の検討を行った。検討に用いたデータは現在までに計測を行うことができた甲府城³⁾、名古屋城⁴⁾、安土城、伊賀上野城⁵⁾、大坂城^{6,7)}、岸和田城⁸⁾、姫路城⁹⁾、和歌山城¹⁰⁾、丸亀城¹¹⁾の9ヶ所の城郭石垣である。さらには安定性に及ぼす要因の影響について仮想モデルによるFEM解析を用いて検討を行った。

2. 基礎地盤強度と石垣形状

石垣形状を決定づける要素に図1に示した初期勾配 G および凹み量 d がある。両者とも高さ h あるいは石垣石の加工の程度や地盤の状況によって変化されるものと考えられる。そこで、石垣の断面形状は「後藤家文書¹²⁾」に記述されている設計手法¹³⁾によって構築されたものと想定しても、多くの石垣の調査例から大きな誤差がないことから^{14),15)}、本研究では石垣構築当時の断面形状として「後藤家文書」による設計手法

を用いることとした。よって、「後藤家文書」の設計例より導き出された G_0 および d_0 の値¹⁶⁾を基準とし、測定データとの比較を行うことで高さの影響の除去を行い、初期勾配比 G/G_0 と凹み量比 d/d_0 を導いた。両者と構築年との関係を示したものが図2と図3である。図の中の各データには N 値の値を記入している。ここでの N 値は深度5m平均もしくは3m平均の値である。構築年と初期勾配 G/G_0 の関係を示した図2より、初期勾配比 G/G_0 は時代を経るごとに減少していく、

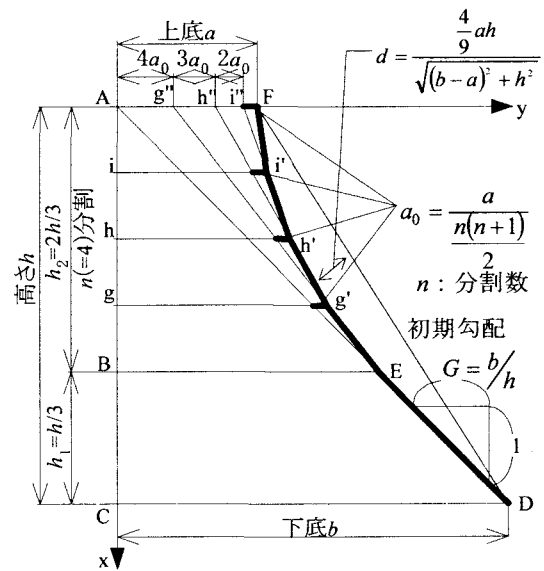


図1 「後藤家文書」による設計

*1 keywords : 石垣, 安定性, N 値

*2 正会員 工修 京都市立伏見工業高等学校建設工学科 (〒612-0011 京都市伏見区深草鈴塚町13)

*3 正会員 工博 関西大学工学部都市環境工学科

*4 正会員 工博 関西大学工学部都市環境工学科

*5 正会員 工博 大阪産業大学工学部都市創造工学科

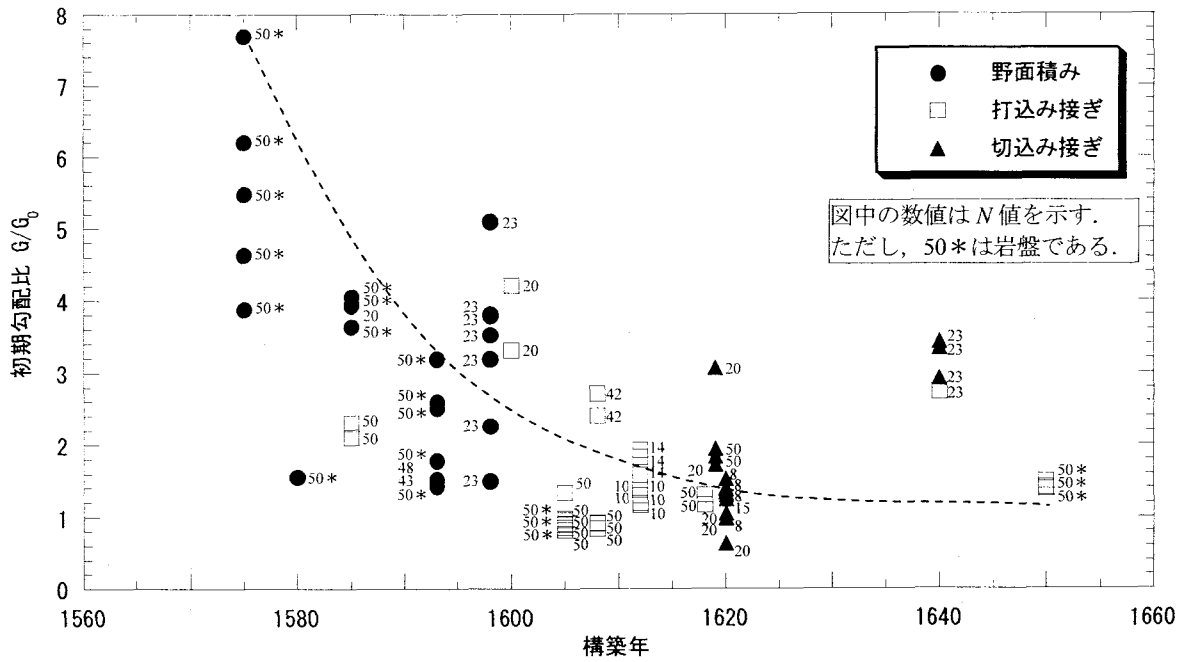


図2 構築年と G/G_0 の関係

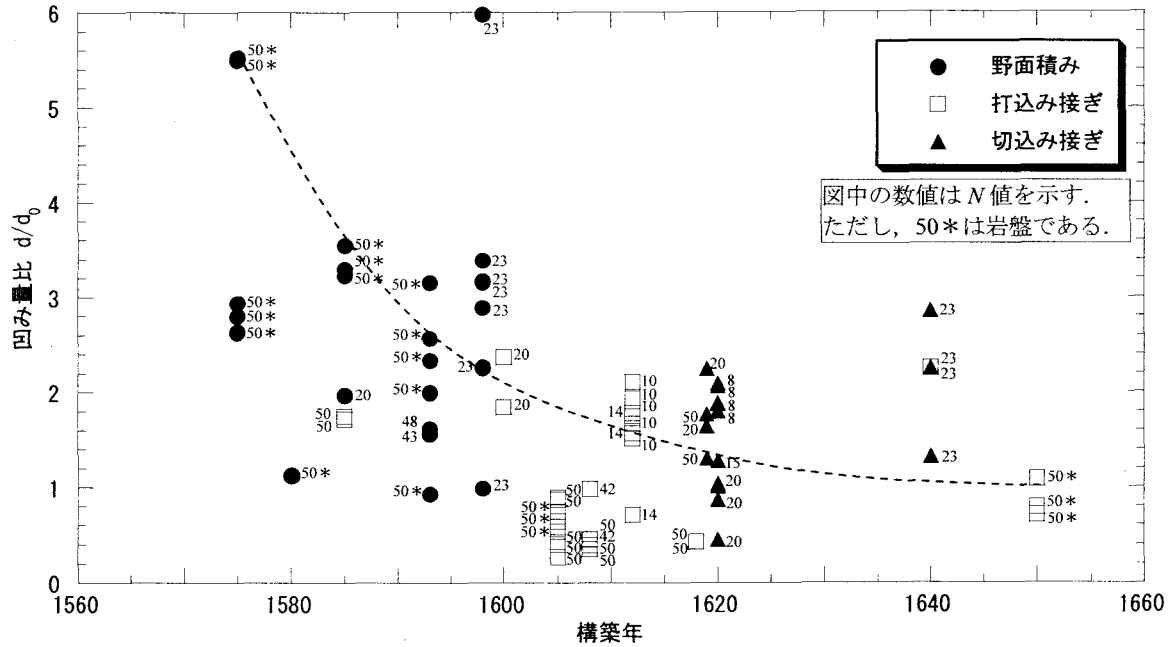


図3 構築年と d/d_0 の関係

すなわち石垣の勾配が急になっていくことが分かる。さらに N 値が小さいほど G/G_0 は増加しており、勾配が緩くなることが分かる。図中に示した曲線は、 N 値が 50 の場合に得られる初期勾配比の最大値と考えられる領域を結んだものである。構築年と凹み量比 d/d_0 の関係を示した図 3 からは、凹み量比 d/d_0 が時代を経るごとに減少していく、すなわち凹み量が少なくなっていくことが分かる。さらに N 値が小さいほど d/d_0 は増加する、すなわち凹み量が増加することが分かる。図中に示した曲線は、 N 値が 50 の場合に得られる凹み量比の最大値と考えられる領域を結んだものである。

次に、初期勾配比 G/G_0 および凹み量比 d/d_0 を N 値について整理すると、図 4 と図 5 を得ることができる。図 4 から N 値が増加するほど初期勾配比 G/G_0 は減少する傾向にあることが分かる。図中に示した曲線は、野面積みにおける各 N 値に対する初期勾配比の最小値と考えられる領域を結んだものである。図 5 からは N 値が増加すれば凹み量比 d/d_0 は減少する傾向にあることが分かる。図中に示した曲線は、野面積みにおける各 N 値に対する凹み量比の最小値と考えられる領域を結んだものである。

以上のことより地盤の強度が低い場合は、初期勾配を緩くし、凹み量を増加させることによって石垣の安

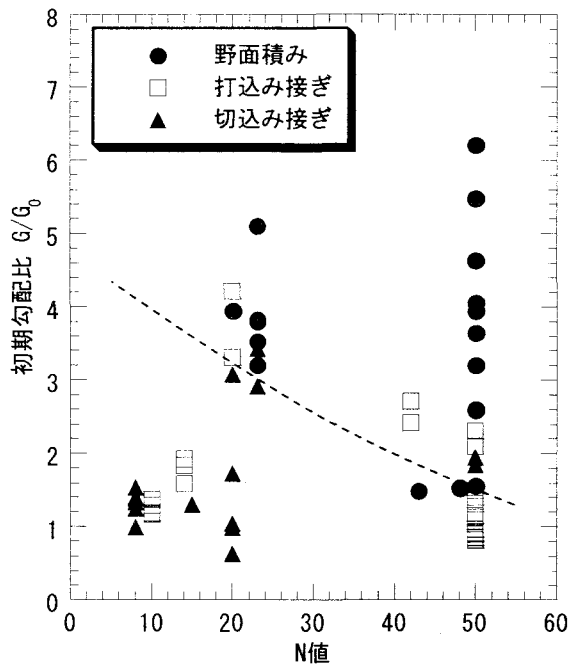


図4 N値と G/G_0 の関係

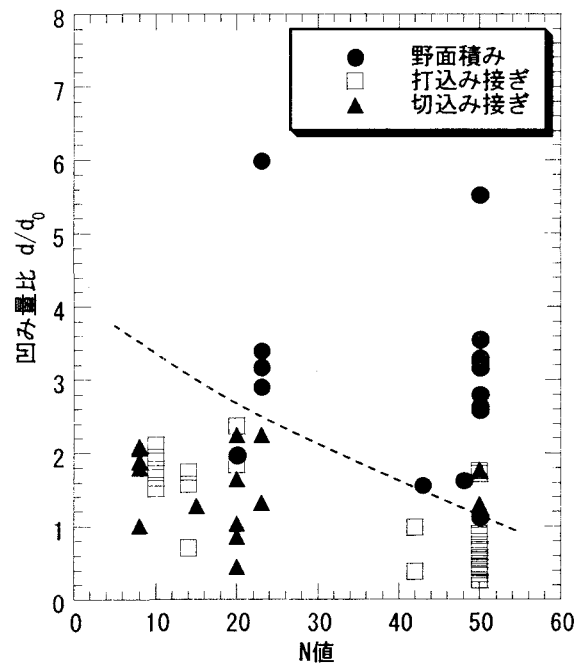


図5 N値と d/d_0 の関係

定を図ったのではないかと考えられる。

3. 基礎地盤強度と石垣変形状況

石垣の変形状況を把握するために石垣構築当時の断面形状として「後藤家文書」による設計手法を用いることとし、図6に示すように孕み出し量¹⁷⁾ δ を求めた。ここで式(1)に示しているように、高さの影響を除去するために、孕み出し量 δ を高さ h で除して百分率で表した孕み出し度 D を算出した。

$$D = \frac{\delta}{h} \times 100 \quad [\%] \quad (1)$$

この孕み出し度 D を N 値について整理したものが図7である。この図より N 値が小さくなるほど孕み出し度 D は大きくなっていることが分かる。これは、地盤が軟弱であるほど石垣の変状が大きいことをあらわしている。さらに N 値が50の場合においても、加工度の低い野面積みの場合は、打込み接ぎや切込み接ぎに比べ石垣形状の変状が大きいことが分かる。

4. FEM 解析による安定性に及ぼす N 値の影響

仮想モデルによる FEM 解析を用いて、初期勾配と凹み量が安定性に与える影響を把握するために、図8に示した2つの形状モデルを対象に検討を行った。高さは今回計測したデータの平均的な値である15mとした。また初期勾配は高さが15m程度の場合の最小値付近である0.4と最大値付近である0.7とし、凹み量も高さが15m程度の場合の最小値付近である0.30mと最大値付近である1.05mとした。図9は解析の基本モデル図を示したものである。解析に用いる物性値は表1のとおりとした。 N 値の違いによる安定性への影響を検討するために、基礎地盤の N 値を10、

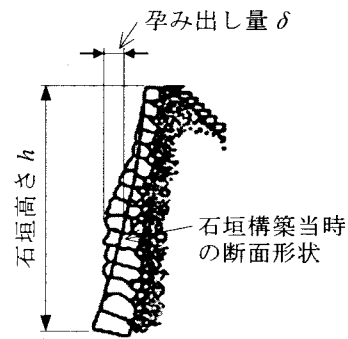


図6 石垣の孕み出し量

30、50 と3通りに変化させて解析を行った。これにより FEM 解析は表2のように6通りとなる。

解析の結果、各解析 No.における最大孕み出し量は表2に示す値となった。ここで、解析が途中で終了したものは破壊したと考える。表2の結果より同じ石垣形状であれば基礎地盤の N 値が小さいものほど孕み出し量が大きく、不安定であることが分かる。また、初期勾配が急で凹み量が小さいものほど、孕み出し量が大きく不安定であることが分かる。

5. 石垣変状の修復事例と基礎地盤

城郭石垣の変状を修復した事例として、姫路城がある。姫路城地盤は、主に砂岩質の堆積岩からなり、風化岩盤が所々地表面に露出している。こうした地盤状況から、大天守を含む城郭構造物および石垣の大部分は、十分な強度を有する風化岩盤の上に巧みに設けられている。しかしながら、天守閣東南部に位置する帯櫓・帯郭櫓部石垣に関しては、盛土地盤上の20mを超える石垣となっているため、大きな石垣変状を生じ、

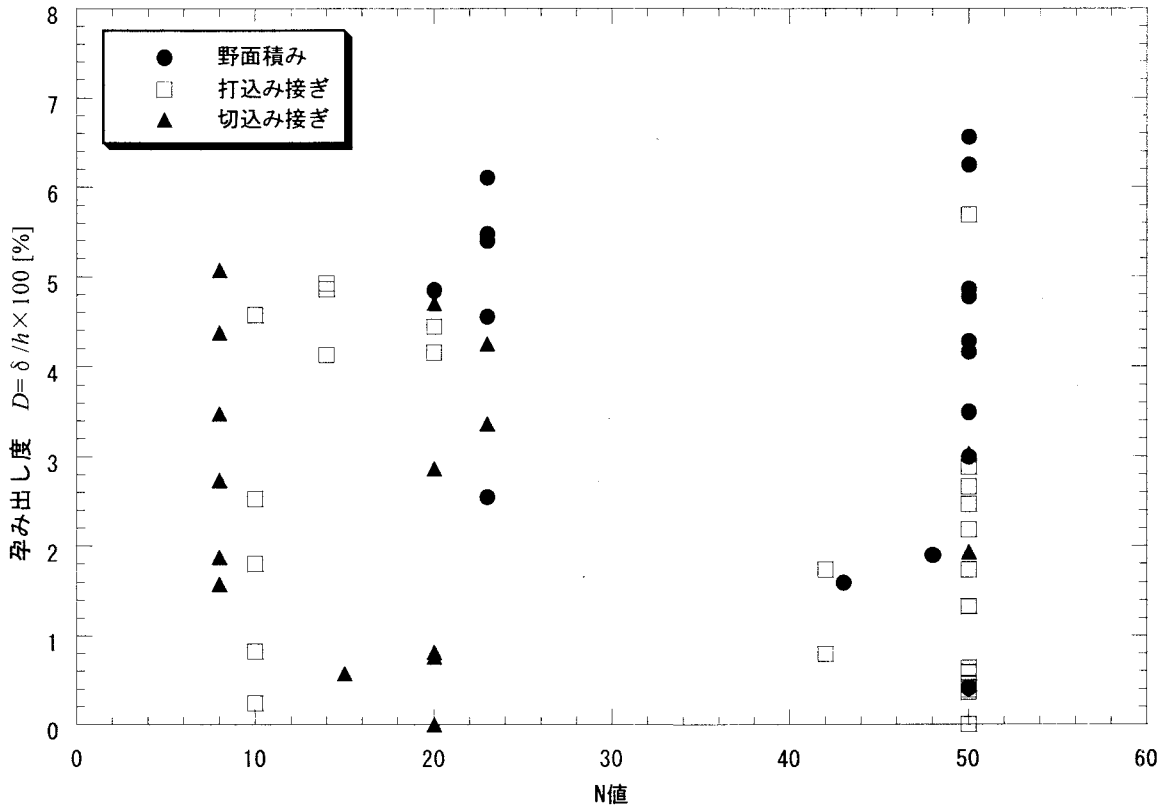


図7 N値と孕み出し度Dの関係

表1 仮想モデル解析の基本物性値

要素	要素の諸定数					
	石垣	栗石	背面土	基礎地盤1	基礎地盤2	基礎地盤3
N値	—	—	12	10	30	50
E (kPa)	4.0×10^5	5.0×10^5	33600	28000	84000	140000
ポアソン比	0.15	0.20	0.35	0.35	0.30	0.30
γ_t (kN/m ³)	26	21	18	18	18	18
ϕ (°)	50	45	28.4	27.2	36.2	42.4

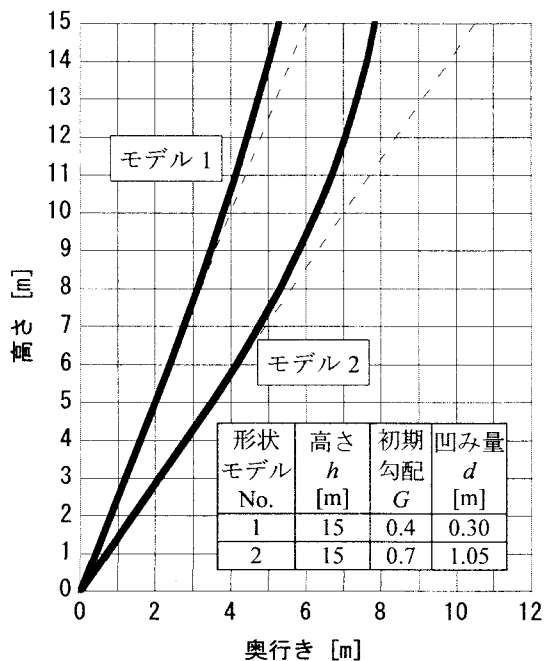


図8 仮想石垣形状モデル

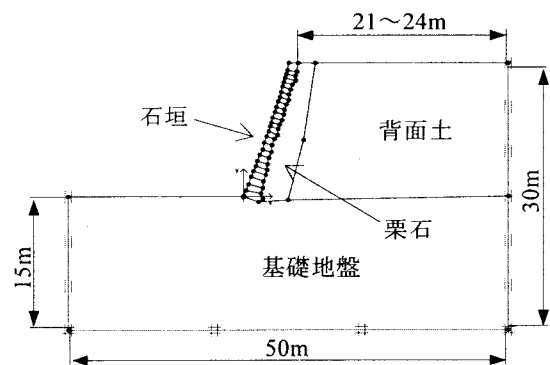


図9 仮想モデル解析の基本モデル図

昭和31年(1956)から39年(1964)にかけて行われた昭和大修理において再築が行われている。この際に行われた調査結果などは、「姫路城保存修理工事報告書¹⁸⁾」にまとめられており、そこに示されている再築前の実測断面形状を図10に示している。この図より石垣の底部付近で孕み出しが大きく生じていることが

表2 仮想モデル解析の種類と結果

仮想モデル解析の種類			結果
解析 No.	形状モデル No.	基礎地盤の N 値	最大孕み出し量 [cm]
1	1	10	17.4 で破壊
2	1	30	10.2
3	1	50	7.6
4	2	10	30.1 で破壊
5	2	30	6.4
6	2	50	5.5

分かる。その量は「後藤家文書」による断面形状を基準とすると 150cm である¹⁹⁾。図中には現在の実測断面形状も示しており、その形状は「後藤家文書」にほぼ合致するものとなっている。

6. まとめ

石垣の安定性に影響を及ぼす要因を把握するために、9ヶ所の城郭石垣についての初期勾配 G 、凹み量 d および N 値のデータを収集し、それらの関係を検討した。さらには仮想モデルに対する FEM 解析を行い、これらが安定性に及ぼす影響の把握を行った。この結果、基礎地盤の強度が低いほど、初期勾配を緩くし、凹み量を大きくする傾向にあることが判明した。またこのことは、石垣の安定化を図るのに必要なことが FEM 解析により明らかとなった。しかしながら、現在において基礎地盤の軟弱な場所に構築されている石垣や野面積みで構築されている石垣は、構築当時に比べ変状が進んでいることが明らかとなったため、地盤の補強や筆者らが提案している石垣石の間に補強材を挿入する工法²⁰⁾などが必要ではないかと考えられる。

謝辞：本研究は、平成 12・13・14 年度科学研究費補助金（基盤研究（B）（1）課題番号 12450208、研究代表者：天野光三）における研究の延長上の成果である。現地測量および測量データの提供においてご協力いただいた山梨県埋蔵文化センター、名古屋城管理事務所、上野市文化課、大阪城天守閣、岸和田市都市整備部公園緑地化課、姫路城管理事務所、和歌山城管理事務所、丸亀市教育委員会文化課および関係各位に謝意を表す次第である。また、北垣聰一郎氏、和歌山市立博物館の高橋克伸氏、姫路市教育委員会文化課の山本博利氏、岸和田市教育委員会生涯学習部郷土文化室長の近藤利由氏には資料の提示ならびに懇切なご教示を賜った。ここに記して感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 田中邦熙，新谷洋二：日本城郭石垣の変遷と現状，土木学会論文集，No.576/IV-37，pp.101-110，1997.
- 2) 田中邦熙，山田清臣：石積み擁壁の安定性評価法，土木学会論文集，No.541/III-35，pp.9-20，1996.

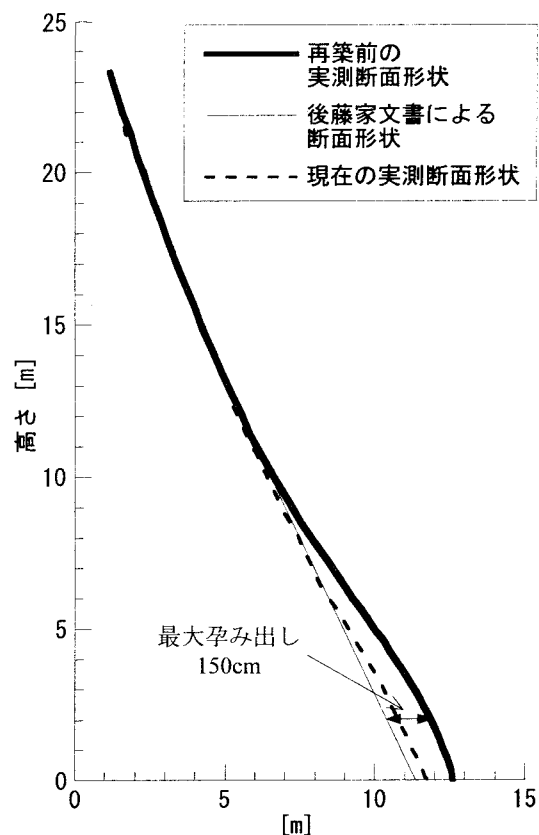


図10 帯櫓・帯郭櫓部石垣の形状

- 3) 未公開資料：甲府市教育委員会
- 4) 未公開資料：名古屋城管理事務所
- 5) 上野市教育委員会：『史跡上野城石垣保存修理工事報告書』，1990.
- 6) 建設文化としての大坂城石垣築造に関する総合的研究会：『建設文化としての大坂城石垣築造における土木施工技術の土木史的調査研究』，平成 7・8 年度文部省科学研究（基礎研究（B））研究成果報告書，1997.
- 7) 村山朔郎：大坂城の地盤調査と地下石垣の発見，大坂城天守閣紀要，第 12 号，pp.1-34，1984.
- 8) 未公開資料，岸和田城管理事務所
- 9) 山本博利：姫路城石垣研究の前提的作業（1），城郭研究室年報，第 5 号，姫路市立城郭研究室，pp.1-22，1995.
- 10) 北垣聰一郎：遺構保存状況と問題点，『史跡和歌山城保存管理計画書』，和歌山市経済労働部和歌山城管理事務所，pp.53-101，1993.
- 11) 未公開資料，丸亀市教育委員会
- 12) 喜内敏 監修・解説：『金沢城郭史料—加賀藩穴生方後藤家文書』，日本海文学叢書，第 3 巻，石川県図書館協会，1976.
- 13) 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，pp.159-168，2000.
- 14) 森本浩行，西田一彦，西形達明，玉野富雄：城郭

- 石垣形状の計測と変状の評価に関する考察，土木史研究，第22号，土木学会，pp.103-110，2002.
- 15) 西田一彦，西形達明，玉野富雄，森本浩行：城郭石垣断面形状の設計法とその数式表示に関する考察，土木学会論文集，No.750/III-65，pp.89-98，2003.
- 16) 森本浩行，西田一彦，西形達明，玉野富雄：城郭石垣の断面形状と石垣構築技術の変遷，土木史研究，第23号，土木学会，pp.409-416，2003.
- 17) 天野光三，西田一彦，渡辺武，玉野富雄，中村博司：徳川期大坂城城郭石垣構造の土木史的研究，土木学会論文集，No.660/IV-49，pp.101-110，2000.
- 18) 文化財保護委員会：『国宝・重要文化財姫路城保存修理工事報告書』，1965.
- 19) 西田一彦，八尾眞太郎，西形達明，玉野富雄，森本浩行：姫路城の石垣と基礎，基礎工，Vol.32，No.1，総合土木研究所，pp.91-94，2004.
- 20) 森本浩行，西田一彦，西形達明：磁力式底面摩擦モデルによる城郭石垣の補修補強に関する検討，土木学会関西支部年次学術講演会講演概要集 2000年，土木学会関西支部，pp.III-67-1～III-67-2，2000.