

歴史的石積み橋脚の耐震安定性に関する一考察

Study on a Seismic Stability of Historical Stone Piers

依田 照彦** 志賀 弘明*** 小玉乃理子*** 小宮一仁****

By Teruhiko YODA**, Hiroaki SHIGA***, Noriko KODAMA*** and Kazuhito KOMIYA****

わが国における石積み構造は、その文化財的価値だけでなく、伝統的な工法の優秀さがこれまで数多く指摘されてきた。しかしながら、石積み橋脚に関する技術的あるいは力学的面からの検討は比較的少ない。本論文では、石積み橋脚の耐震安定性を力学的な面から検討し、歴史的に価値があるとされている空石積み橋脚の耐震安定性を考察することを主な目的としている。汎用有限要素法を用いた2次元動的応答解析により、周辺地盤を含む空石積み橋脚の耐震安定性について検討した結果、空石積み橋脚は、基礎地盤の影響を受け、せん断破壊しやすいことが分かった。

1. まえがき

1995年1月17日、神戸の街が大きな地震災害に見舞われたことは今も記憶に新しい。この地震では、地震動により多くの構造物が破壊もしくは損傷し、それに伴い多くの人的および経済的被害が報告された。日本に数多く存在する文化財も、未来に残すべき構造物であり、地震などによる不可避の災害に対して被害を最小限に食い止める必要があることは言うまでもない。

本論文では、文化財としての価値が高い土木構造物のうち、主に河川構造物として水理学的観点から考察がなされてきた、歴史的な空石積み橋脚を、その耐震安定性に着目して、検討を行うことを目的とする。耐震安定性の観点からすれば、石積み構造を採用する場合、空積みよりも練積みの方が好ましいことは明らかである。江戸城の石垣でさえ、修築を施された石垣には、耐震対策として石垣の表面から15cmの間をモルタルあるいはトロが出ないようにした練積みとし、裏込め下方から3分の1はコンクリートとし上方3分の2は在来の割栗石を使用していたとのことである¹⁾。

ここでは、空石積み橋脚の耐震安定性を検討する手始めとして、空石積み橋脚と城郭の石垣との構造的な相違を明確にした上で、従来の石垣構造の研究成果がそのまま適用できないことを示し、空石積み橋脚と地盤を2次元的にモデル化して、土質や地盤に関するデータを用いて、空石積み橋脚の耐震安定性を検討する。

今回の検討結果が石材加工の形状・積み方・石積みの補強方法などを検討する際の参考資料となることを願っている。

2. 対象とする空石積み橋脚

石積みの一般的な形式は、文献2)によれば、用いる石を中心に分類すると、自然石を用いた野石積と一定の大きさに加工した石を用いた切石積に分けられ、積み方に注目すると、いろいろな形の石を不規則に積み重ねた乱積み・乱層積みと、石をほぼ規則的に積み重ねた整層積みに分けられる。

一方、城郭の石垣では、野面積み、打込みはぎ、切込みはぎ、算木積などの積み方があり、石積み構造の安定性に対して多くの研究が見られる^{3)~6)}。

ここでは、耐震安定性について石垣との差異を明確にする目的から、図-1に示すような架空の石積み橋脚を検討の対象とした^{7), 8)}。

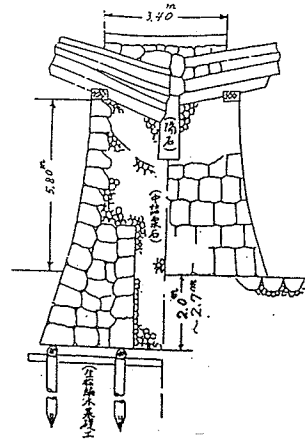


図-1 空石積み橋脚 (実在しない橋脚)

*keyword: 石積み、橋脚、耐震安定性

**フェロー 工博 早稲田大学教授理工学部土木工学科
(〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1)

***学生会員 工修 早稲田大学大学院理工学研究科
(〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1)

****正会員 工博 千葉工業大学助教授 土木工学科
(〒275-0016 千葉県習志野市津田沼 2-17-1)

3. 空石積み橋脚の耐震安定性の検討

(1) 検討の概要

震度法や保有水平耐力法では空石積み橋脚の耐震安定性を把握することは困難であるので、ここでは動的解析による耐震安定性の確認に主眼を置くこととする。すなわち、空石積み橋脚が受けるかも知れない地震としては最も厳しい大規模な直下型地震が発生することを想定して、兵庫県南部地震の地震波形を用いて動的解析を実施し、地震時における空石積み橋脚の耐震安定性を検討する。具体的には、山口県岩国市を流れる錦川の1998年時点での土質および地盤条件のデータ⁹⁾をもとに、汎用有限要素法(ABAQUS)を用いて、空石積み形式の橋脚の耐震安定性評価を行う。

(2) 検討の方針

モデル化としては、空石積み橋脚の3次元的效果を考慮することができない2次元解析モデルを採用した。これは、動的挙動のシミュレーションとしての不完全性よりも、動的解析法としての信頼性に重点を置き、汎用有限要素法プログラム(ABAQUS)を用いて、地盤の塑性化を考慮した非線形時刻歴応答解析を実施することを意図したためである。したがって、解析モデルには、後に述べる制約条件が付与されることになる。

計算の簡略化のため、橋脚上の上部構造の影響は無視している。通常、石積み構造には、基礎工が存在するが、今回の解析では、松杭程度の基礎工を想定して、直接基礎として解析を行った。さらに、石積み橋脚を持つ実際の橋梁では、橋脚が隣接してあるはずであるが、ここでは隣接橋脚同士の相互作用を無視するため、単独の石積み橋脚を扱っている。

(3) 地質条件

錦川の地質は、全体的に砂や礫などの粗粒な未固結堆積物からなっており、現地調査によって得られた地層の土質状況は表-1の通りである⁹⁾。表-1中の記号については、図-3と対応させてある。

表-1 地層一覧

土質名	記号	土質状況
敷石、捨石	B	φ20~80mmの礫、玉石主体。最大礫径φ400mm。所々砂が卓越する。
沖積玉石混り砂礫	Ag	φ10~20cmの玉石混入。φ2~70mmの亜円礫混入。マトリクスは粗砂主体。
沖積礫混り砂	As2	砂は粗砂主体。φ10~30mmの亜円礫を混入する。
洪積砂礫	Dg	φ2~50mmの円~亜角礫混入。マトリクスは細~粗砂主体。

(4) 2次元有限要素法による空石積み橋脚の安定照査

a) 解析プログラム

解析プログラムとしては、汎用コードのABAQUSを利用した¹⁰⁾。これは、前提条件が正しければ、解析結果の信頼性にばらつきがないことを保証したいがためである。

b) 入力地震動

基本的には道路橋示方書¹¹⁾に準じるものとし、内陸型直下地震(兵庫県南部地震クラス)を用いた。地震波としては、実際に神戸海洋気象台で観測された地震波と同じ波が空石積み橋脚の直下に入力することはないと思われるが、地震基盤は耐震設計上I種地盤を想定しているため、同種地盤の神戸海洋気象台の記録波形(南北方向)を使用した。なお、地震波の上下成分については影響が少ないものと考え、無視した。神戸海洋気象台で記録された具体的な時刻歴加速度を図-2に示す。この地震波を、直接解析モデルの基盤に入力しているため、石積み橋脚が受ける地震力としては最大級のものを想定していることになる。

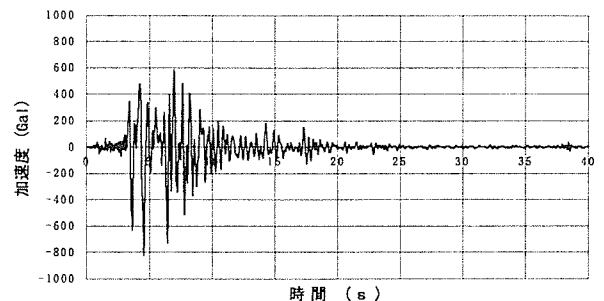


図-2 神戸海洋気象台・時刻歴加速度記録(南北方向)

c) 解析モデル

解析に用いた空石積み橋脚のモデルを図-3に示す。解析に用いた要素は4節点平面ひずみ要素CPE4R(線形・低減積分・アワーグラス制御)である。また、破壊基準はMohr-Coulomb(モール・クーロン)の弾塑性破壊基準を考慮している。材料パラメータは表-2に示す通りである。この材料パラメータは山口県岩国市を流れる錦川における値⁹⁾をもとに設定しているが、解析対象地盤はN値が概ね10~20以上の締まった密な砂礫地盤であることから、本解析モデルでは液状化は生じないものと仮定した。また、地盤の透水性が良好であることから、過剰間隙水圧の消散は瞬時に完了するものとして、排水解析を行った。このため、有効内部摩擦角40度、粘着力C=0、ポアソン比(約0.38)を土質条件の基本とすることとした。

しかしながら、汎用コードを用いたため、自重解析を実施するにあたって、地盤の粘着力をゼロとすることができず、解析の円滑化を図るため地盤の粘着力として比

較的小きな値 2tf/m^2 を利用することとした。さらに、ポアソン比については、有効内部摩擦角から算定する方法も提案されているが^{1,2)}、解析結果に及ぼす影響は小さいものとして地盤のポアソン比を 0.4 に統一した。なお、解析は静的自重解析とそれをふまえた動的応答解析の 2 つのステップに分けた。加速度は図-3 に示すように、地盤モデルの両端および下端の全節点に同時に入力した。また、神戸海洋気象台記録波の加速度は 0.01 秒ごとに 10 秒まで入力した。

d) 動的応答解析結果

動的応答解析結果を図-4~8 に示す。まず、図-4 を見ると、地震波の入力点の水平変位に比べて、石積み橋脚天端の最大応答変位が 3 倍強となっており、図-6 の変形図から判断しても地盤の変形が大きいことが分かる。また、図-5 の加速度応答の時刻歴を見ても、加速度入力点の 3 倍強の加速度が橋脚の天端で生じている。

本解析では石積みの石同士のずれや、地盤と石積みとの間の滑り・剥離を考慮していないので、図-5 や図-6 の加速度応答、変形図のみならず、自重解析にもその

影響が出ている。すなわち、図-7 に見られるように、空石積み橋脚の下端近傍に大きなせん断応力が発生している。図中では、カラーの図を複写したため、明るい方のせん断応力分布が見えないが、せん断応力分布はほぼ対称になっている。

動的応答解析の結果によれば、まず地盤がせん断破壊し、その後空石積み橋脚が大きく変位している。前述したように、本解析では石同士のずれや石の落下などは考慮していないので、図からだけでは実際の動的破壊現象を想像することは難しい。しかしながら、空石積み橋脚が崩壊することを示唆する計算結果としては、図-8 に見られるように橋脚内部の中詰土がせん断破壊していることが挙げられる。橋脚内部の中詰土が破壊すれば、空石積みはその形状を保持できないので崩壊する可能性が高い。

以上の解析結果を総合すると、空石積み橋脚の耐震安定性については、兵庫県南部地震規模の内陸直下型大地震が発生したときには、中詰土にせん断破壊による損傷が生じ、空石積みが変形し、場合によっては使用できない状態で橋脚が傾くことが推定される(図-6)。

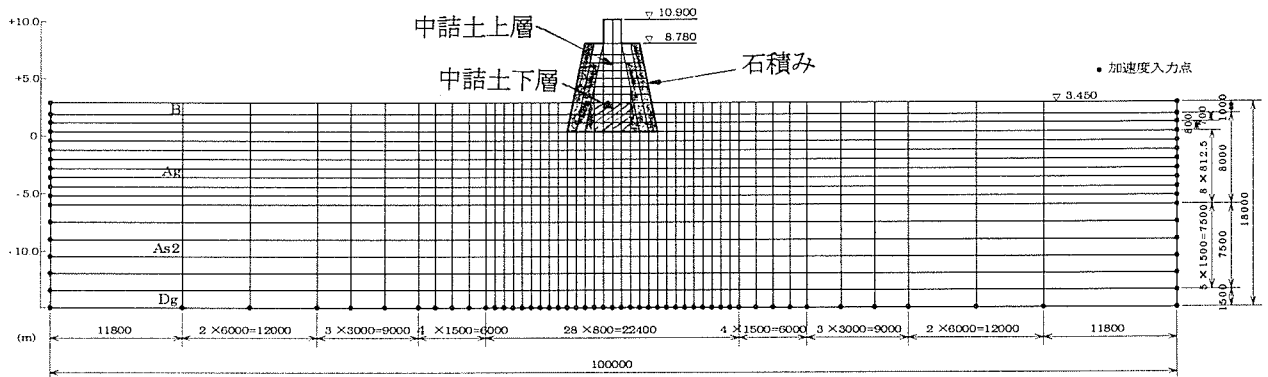
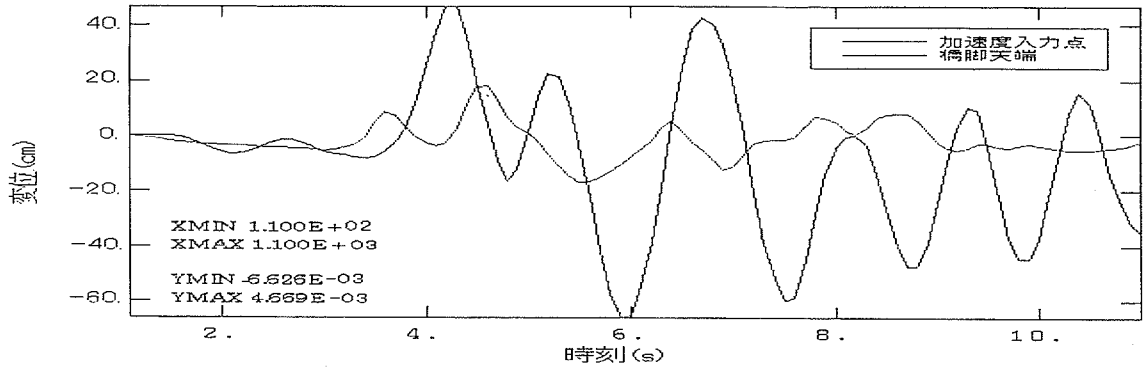


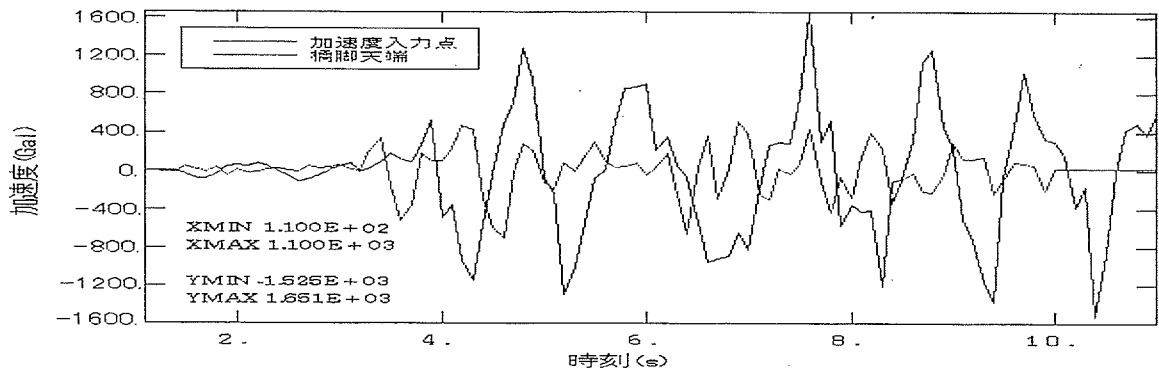
図-3 解析モデル

表-2 材料パラメータ

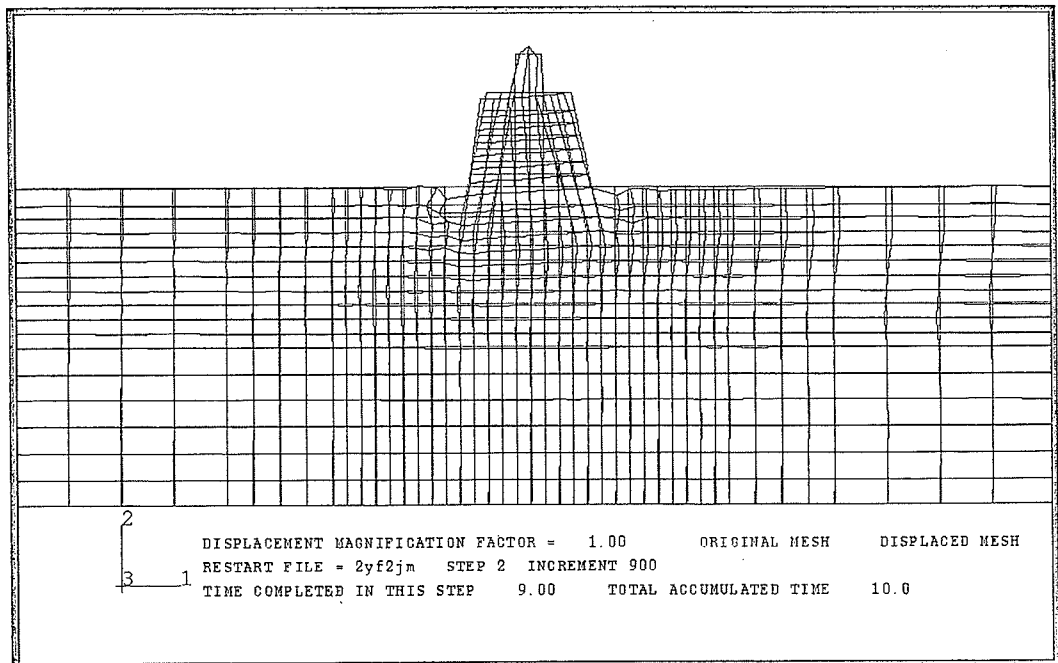
土質		粘着力 tf/m^2	摩擦角 deg	単位体積重量 tf/m^3	ヤング率 tf/m^2	ポアソン比
地盤	Dg	2	40	2.1	3.5×10^3	0.40
	As2	2	35	1.9	1.8×10^3	0.40
	Ag	2	30	2.0	8.0×10^2	0.40
	B	2	40	2.0	3.5×10^3	0.40
中詰土上層		6	40	2.2	3.5×10^3	0.40
中詰土下層		9	40	2.2	3.5×10^3	0.40
石積み		100	40	2.5	5.0×10^5	0.20



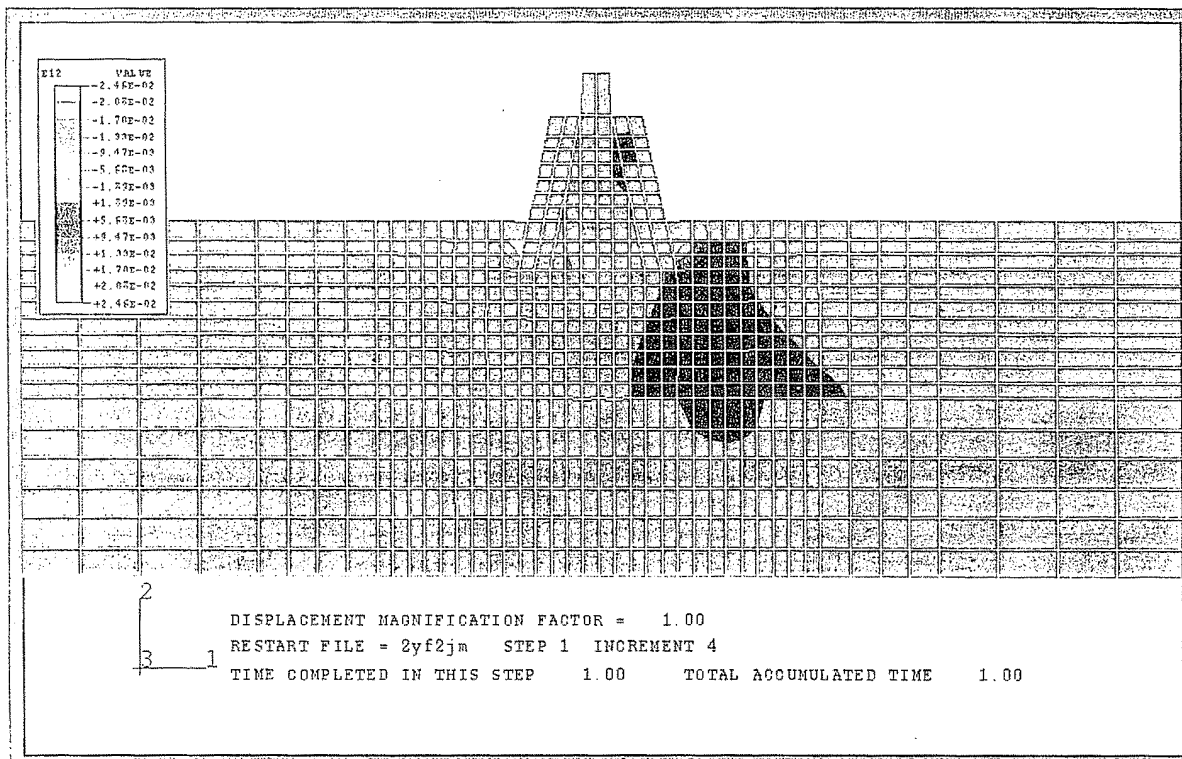
图一4 時刻歴変位応答[水平方向]



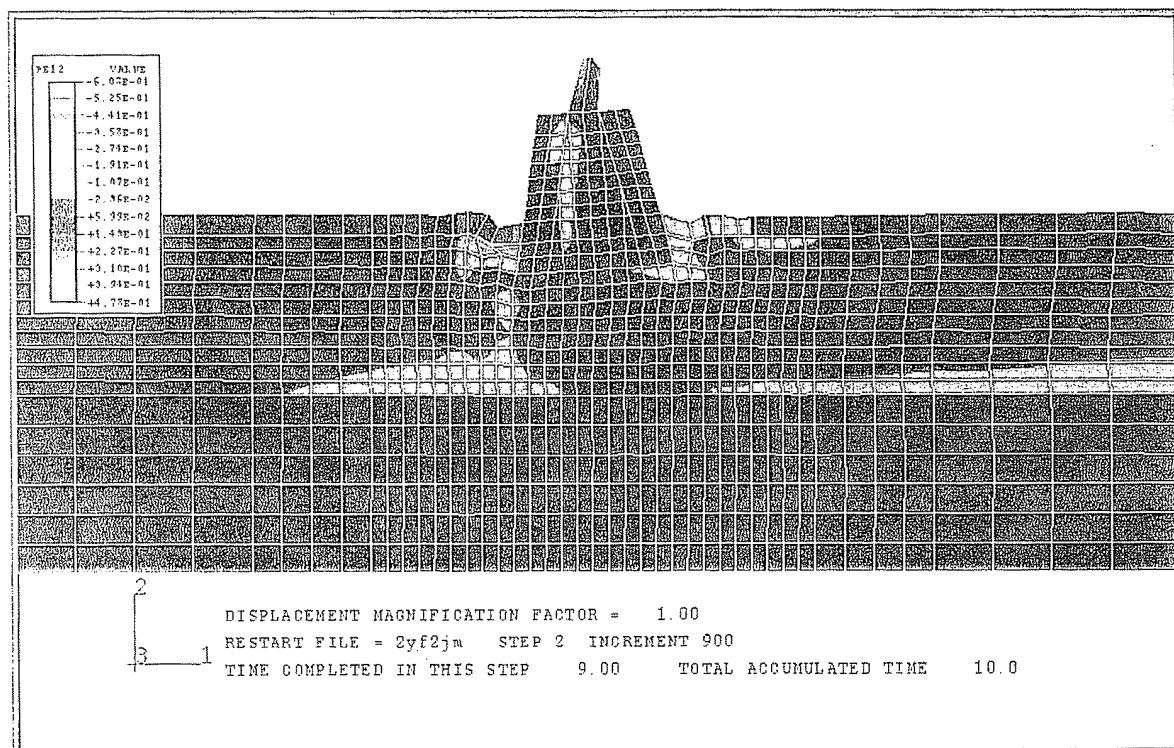
图一5 時刻歴加速度応答[水平方向]



图一6 変形图 (t=9s)



図一七 全せん断ひずみ図 (自重解析)



図一八 塑性せん断ひずみ図 (t=9s)

4. あとがき

ここでは、空石積み橋脚の耐震安定性に関する比較検討を行ったが、有限要素法を用いた動的解析の結果から判断すると、地震時の石積み橋脚の動的挙動は土質工学的な要因で決定され、石積みの形式の違いはそれ程大きくないと思われる。特に、城郭の石積みのような地盤の滑りは起こらず、石積み橋脚のせん断破壊が先行する点に特徴があり、この点が城の石垣と大きく違う点である。つまり、空石積み橋脚では、城郭の石垣のように石の奥行きを深くできず、耐震安定性を図る上での自由度はそれ程多くないと考えられる。たとえば、文献3)に見られるような石垣の「扇の勾配」などは石積み橋脚では難しく、全く新しい横断面形状を採用すると、水理学的な面のみならず、景観的な面からの再考が必要となり、場合によっては歴史的な価値を半減させることに繋がる可能性があると思われる。

今後は、文化財としての空石積み橋脚と、耐震安定性の面からの空石積み橋脚の接点を探る意味で、石積み技術の伝承とともに、経済性・景観性を含めた広い視野からの新たな石積み形式の検討が必要になるとと思われる。

謝辞：本研究をまとめるにあたり、このような研究の機会を与えていただいた岩国市錦帯橋修復検討委員会専門部会[部会長:大熊孝新潟大学教授]と岩国市経済部商工観光課の関係各位に深甚なる謝意を表します。また、錦川の地盤定数については、岩国市役所より貴重なデータをいただきました。記して感謝を申し上げます。

参考文献

- 1)新谷洋二：城の石垣修築に関する雑感、建設業界、pp.46-49、1998年12月
- 2)土木学会編：『土木用語大辞典』、技報堂出版、p.38、1999年2月
- 3)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、III-35、No.541、pp.9-20、1996年6月
- 4)西田一彦・山野寿雄・中村博司・久保勝保・玉野富雄・中川光雄：大坂城石垣の歴史的崩壊記録と安定に関する考察、土木史研究、No.16、pp.601-608、1996年6月
- 5)田中邦熙・新谷洋二・山田清臣：石垣断面解析にFEMを適用するための間詰部の考え方と解析事例、土木史研究、No.18、pp.491-501、1998年5月
- 6)田中邦熙・新谷洋二・山田清臣：石垣の安定性に関する各種の判定手法の比較検討、土木史研究、No.18、pp.139-152、1998年5月
- 7)土木学会：『大正12年関東大地震震害調査報告書(第三卷)』、pp.443-502、1925年12月
- 8)永田新之允：『錦帯橋史』、岩国観光協会、巻頭写真版目次 付図表、1953年12月
- 9)岩国市役所：岩国錦帯橋修復検討委員会専門部会資料、

錦帯橋下部工健全度調査結果、1998年11月

- 10) ABAQUS/Standard: 『User's Manual I,II』
日本語版 Version 5.4, Hibbit, Karlsson,
Sorensen, Inc., 1997
- 11) 日本道路協会：『道路橋示方書・同解説 V耐震設計編』、丸善、1996年12月
- 12) 飯塚敦・太田秀樹・良峰透：弾塑性有限要素法における入力パラメータの決定法、第20回土質工学研究発表会講演集、pp.973-974、1985年