

熊本地震による熊本県内の石橋の被害調査と被害の特徴

山尾敏孝¹・金子和明²・堀田昂良³

¹フェロー会員 工博 熊本大学大学院教授 先端科学研究部(工学系) (〒860-8555 熊本市中央区黒髪2-39-1)

²学生会員 熊本大学大学院 自然科学研究科 (〒860-8555 熊本市中央区黒髪2-39-1)

³学生会員 熊本大学工学部 (〒860-8555 熊本市中央区黒髪2-39-1)

1. 序 論

2016年4月14日21時26分、熊本県の日奈久断層帯に起因するM6.5の直下型地震が益城町を震源地として発生した。そして、2日後の4月16日の未明に14日を上回るM7.3の直下型大地震が発生し、西原村と益城町で震度7を再び観測したのである。二つの断層帯が存在する益城町では震度7が2度起こり、その周辺域では震度6強、6弱など大きな揺れが発生した。しかもその後、頻繁に大きな余震が繰り返し、2か月で1700回を超える回数を記録した。この大きな余震の影響により県内の橋梁が多くの被害を受けたが、熊本県内の石橋にも大きな被害が出た。また、この熊本地震により県内の国や県、市町村指定、登録の文化財が九州で364件に上り、熊本県内では237件（5月11日現在）で、このうち国の文化財が85件であった。

一方、石橋に関しては、国重要文化財の通潤橋（1854年築造）を始めとし、熊本県指定文化財である菊池市の永山橋（1878年）と立門橋、御船町の八勢目鑑橋（1885年）と門前川目鑑橋（1808年）など壁石垣の崩壊やアーチ輪石の損傷が発生していることが判明した。しかし、今回の大きな地震では石橋のアーチ輪石が破損し、石橋全体の崩落した報告はなく、壁石垣の崩落や壁石垣の孕みなどの損傷発生と高欄の落下などの損傷が発生した点に特徴がある。「石橋は地震に強い」ことは、今までの模型実験や実石橋の振動特性を調査した結果から確認してきた^{1)~5)}が、実際に大きな地震動を受けた記録はあまり確認できてなかった。

本研究では、現在までに石橋 17 橋の被害が判明し、報告されており、これら被害状況の分析と被害の特徴の分析を試みた。被害が発生した石橋はやは

り地震の震源地の周りに存在する石橋に多いようであるが、震源地から遠い天草の石橋にも被害が出ており、本震のみならず余震発生地が広がっていることからこの余震の影響を受けたものと考えられる。特に、アーチ輪石も含めて崩壊した石橋はなく、壁石垣の崩落が発生した石橋が数橋で、その他の被害のほとんどが高欄部の崩壊である。中でも下鶴橋（宇城市）は石垣部の崩壊に加えて、アーチ輪石に大きなすき間が発生し、さらに壁石崩壊が発生したアーチ基部の輪石は、多くの石材が割れており、地震の影響が大きいことが判明した。

2. 熊本地震の特徴

今回、熊本地震波 2 度の震度7が発生したことも特徴であるが、本震後にも頻繁に大きな余震が繰り返し発生（震度6が5回、震度5は12回、震度4以

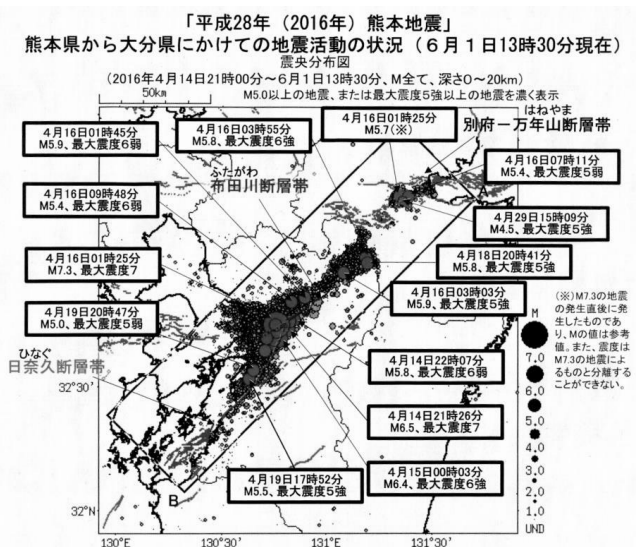


図-1 2016年熊本地震の活動状況
(気象庁のHP「地震情報」より)

表-1 熊本地震で被災した石橋の名称と被害状況

番号	市町村名	文化財名称	区分	発生日	要因	被害状況
1	天草市	祇園橋	国	H28.4.16	地震	橋路面石材の割れ
2		山口の施無畏橋 附架橋礎	県	H28.4.14	地震	アーチ輪石にずれとすき間
3	山都町	通潤橋	国	H28.4.14	地震	通水管の漏水と通水管埋土の亀裂 手摺石(橋上の縁石)の孕み 余震や雨等による手摺石の落下危険
4		立野橋	町	H28.4.14	地震	壁石垣の一部崩落
5	菊池市	永山橋	県	H28.4.16	地震	路面の隆起、欄干の欠落、損壊
6		立門橋	県	H28.4.16	地震	路面の亀裂、欄干の欠落・損壊、詰め石の崩落、 側面のふくらみ、石材の亀裂
7	美里町	霊台橋	国	H28.4.16	地震	路面山砂のひび割れ、基部付近の壁石垣の孕み
8		二俣福良渡	町	H28.4.16	本震	右岸側の壁石垣崩落
9		馬門橋	町	H28.4.16	本震	欄干の転落・破損
10		大窪橋	町	H28.4.16	本震	欄干の転落・破損
11	宇城市	下鶴橋		H28.4.16	本震	左岸側の壁石垣崩落とアーチ輪石の損傷と大きな すき間
12		須の前橋		H28.4.16	本震	復元下アーチ部分の輪石が崩落
13	御船町	門前川目鑑橋	県	H28.4.16	本震	抑え板と壁石の一部孕み、アーチ輪石のすき間
14		八勢眼鏡橋	県	H28.4.14	地震	壁石垣の一部崩落 過去に崩落・修復した場所とほぼ同一箇所
15		下鶴眼鏡橋	町	H28.4.14	地震	欄干の転落・破損
16	南阿蘇村	銭瓶橋(床瀬橋)		H28.4.16	地震	壁石がほぼ全域崩落
17	熊本市	明八橋		H28.4.16	地震	欄干の転落・破損

(2016年5月末現在)

上が 89 回)したことも過去に例を見ない地震である。これは、図-1 に示すように、発生した震源地が益城町周辺域から熊本県南西部や北側の阿蘇地方、大分県側まで広がり、活動が日奈久断層帯から布田川断層帯に波及・連鎖して広がったためと考えられている。このように大きな余震と揺れの発生が継続し、2 か月で震度 1 以上は 1700 回を超えており、未だに収束が見えない状況である。また、さらに直下型地震であったためか水平方向の加速度は最大で 1300gal で、上下方向(UD)の加速度も大きかった。図-2 は、K-NET 熊本観測所で測定された上下方向の加速度で、その最大値は 534gal であり、南北方向の加速度は 827gal であった。

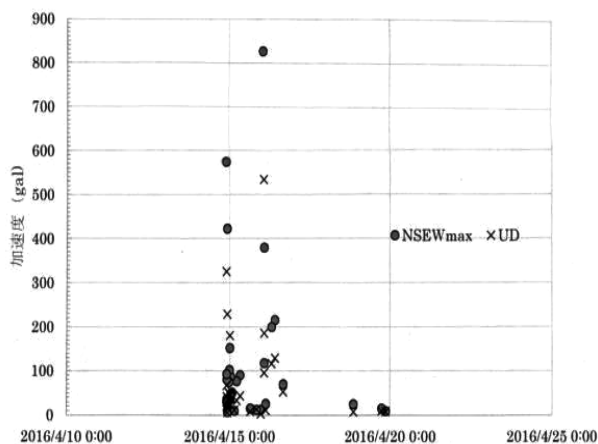


図-2 K-NET 熊本観測所のダウンロードした波形 (福田光治氏作成)

3. 被災した石橋と主な石橋の被害状況

(1) 被災した石橋と架設位置

石橋は県下各地に存在するが、今回、熊本地震により被災した石橋の名称と被害状況を表-1にまとめて示した。また、図-3は被災した石橋の位置を地図中に赤丸で示したもので、本震の震源地も併せて示した。なお、前震の震源地も本震の位置より遠くない位置であるので示していない。石橋が存在する山都町、美里町、宇城市あるいは南阿蘇村などは、今回の地震により、本震での被害もさることながら、余震発生の震源地になった場所もあり、石橋に大きな被害をもたらしたと考えられる。



図-3 被災石橋の位置と震源地 ((C)Yahoo Japan, (C)OPeNBook より)

(2) 主な石橋の被害状況

地震による被害は、前震での被害に加え、より大きな本震発生は、石橋の損傷に大きく影響空いたと思われる。以下に、主な石橋の被災状況とその特徴について述べる。

a) 通潤橋(山都町)

山都町では、震度6弱と5強が1回、5弱が2回発生した。前震後(5強)では、国指定の重要文化財である通潤橋では、多数の漏水と橋上の被覆土に数箇所の亀裂が発生した。また、亀裂の大きさについては、幅1cm以下であったことを4月15日に確認している。本震後(6弱)では、被害が悪化し、漏水がさらに甚だしくなり、漆喰が上に浮き上がっているのを確認し、通水管の多くの部分で漆喰の破損がある可能性が高まった。被覆土の亀裂の大きさが大きくなり、箇所数も増加しており、大きいところで幅1~2cm程度で、亀裂の深さは深いところで約30cmであった。(亀裂の箇所として図-4(a))、図-4(b)には通水管からの橋面上に出た漏水状況であり、図-4(c)にはアーチ輪石からの漏水状況を示す。いずれもこのまま通水管としての利用は困難であり、かつ観光放水も無理な状況となった。また、図-4(d)には余震等により手摺石落下の危険性が生じており、亀裂部位に防水シートを覆う処置をしている状況を示したものである。なお、図中の赤丸部分は、壁石垣の孕みが生じた部分であり、橋面上の亀裂の影響が考えられる。

b) 二俣橋(福良渡)(美里町)

美里町は、震度6弱と5強が2回、5弱が2回発生しており、いずれも前震発生から2-3日のうちに発生していた。二俣橋は、津留川と釈迦院川の合流地点に1829年と1830年に架設された橋で、図-5(a)に示すように、L字型で並ぶ町指定文化財の石橋である。本震では震度6弱が発生し、図-5(b)~5(d)に示すように、左側の津留川に架かる福良渡の壁石が崩壊し、釈迦院川に架かる石橋は問題なかった。この理由としては、図-5(c)に示す上流側の壁石には、橋面からの水の浸入により壁石に大きな孕み、つまり初期変形が生じており、これが崩壊の引き金になったと考えられる。今回の地震では、アーチ基部付近の輪石上の壁石突出の変形事例が地震後に見られていることから推察される。図-5(d)はアーチ輪石のすき間の状況を示しているが、以前より開いているように思える。なお、町内には他にも石橋があり、国指定の霊台橋は橋面上の亀裂発生や壁石の孕みが見られ、高欄部の欄干が崩落する例として大窪橋や馬門橋に見られた。



(a) 橋面上の亀裂の発生状況



(b) 通水管からの漏水状況

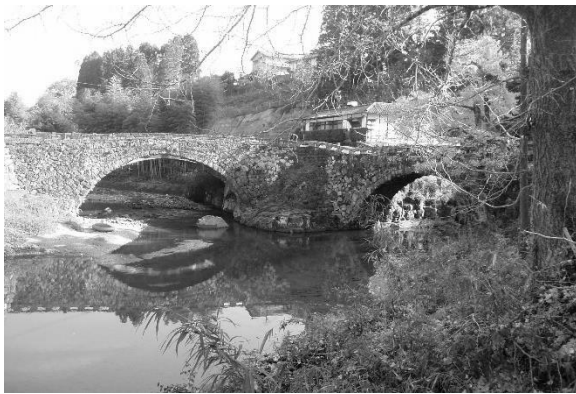


(c) アーチ輪石からの漏水状況



(d) 通潤橋の被災状況の全

体
図-4 通潤橋の被災状況



(a) 被災前の二俣橋



(b) 右岸下流側のアーチ輪石の崩壊状況

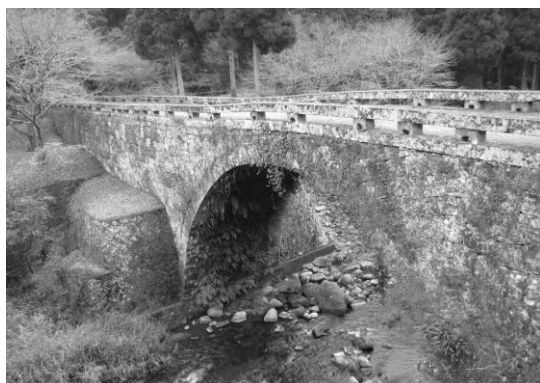


(c) 上流側のアーチ壁石の崩落状況



(d) アーチ輪石のすき間の状況

図-5 二俣橋(福良渡)の被災前後の状況



(a) 被災前の八勢橋



(b) 昭和 63 年の壁石の崩壊状況



(c) 上流側の前震後の壁石の崩落状況



(d) 上流側の本震後の壁石の崩落状況

図-6 八勢目鑑橋の被災前後の状況

c) 八勢目鑑橋(御船町)

御船町は、震度6弱と5強が2回発生しており、いずれも前震発生から2-3日の発生である。八勢橋は旧日向街道にある熊本県指定の文化財であり、八勢川に1855年に架設された石橋である。被災前の八勢橋の様子を図-6(a)に示すが、今回の地震ではこの上流側のアーチ基部の手前側の壁石が崩壊した。図-6(c)は前震後の崩壊状況であるが、まだ小規模であるが、図-6(d)に示す本震後には、さらに壁石の崩壊が広がっていることがわかる。また、この橋では欄干の崩落している箇所もあった。この崩壊の原因として考えられるのが、実はこの箇所が28年前に一度崩壊して補修された箇所である。その時の崩壊

状況が図-6(b)に示すもので、今回の崩壊箇所とほとんど同じであることがわかる。御船町には県指定の石橋である門前川橋があり、この石橋もアーチ輪石のすき間や壁石の孕みなどが生じており、損傷が発生していた。また、下鶴橋では高欄部の欄干の崩落が発生していた。

d) 下鶴橋(宇城市)

宇城市では、前震の時は6弱であったが、15日と本震時には6強と2回発生しており、その後の余震も震度4以上のものが多かった。下鶴橋は市指定の文化財であり、浜戸川に1848年に架設された単一アーチの石橋である。図-7(a)に示すような被災前の様子であり、アーチ輪石もきちんと組まれていること



(a) 被災前の下鶴橋



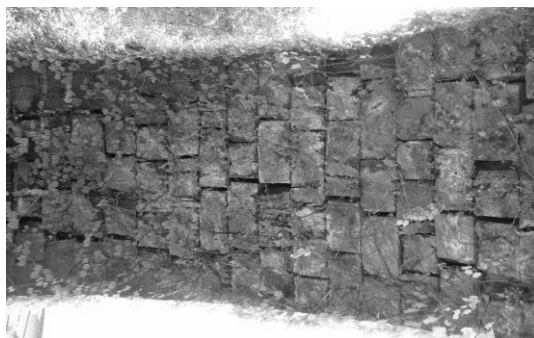
(b) 下鶴橋の壁石の崩壊状況



(c) 本震後の壁石の崩壊状況



(d) 橋面上の高欄部の崩落状況



(e) アーチ輪石の下面のすき間状況



(f) アーチ基部下面の輪石の損傷とすき間状況

図-7 下鶴橋の被災前後の状況

がわかる．今回の地震では右岸側のアーチ基部付近の壁石が大きく崩壊していることが，図-7(b)や図-7(c)の様子からわかる．また，図-7(d)には，石橋の橋面上の様子を示しているが，高欄部の欄干がすべて崩壊・崩落していることがわかり，壁石崩壊部と反対側のアーチのL/4部分が多少低下していた．最後に，図-7(e)と(f)には，アーチ輪石の中央部と基部付近を下から見た様子を示している．これからわかることは，地震により橋軸直角方向に大きなすき間が発生していることである．被災前の図-7(a)と比較してわかるように，橋軸方向に渡って大きなすき間が発生していることが読み取れる．さらに，アーチ基部付近の輪石の損傷が激しく，地震動により大きく揺さぶられた結果と推定される．

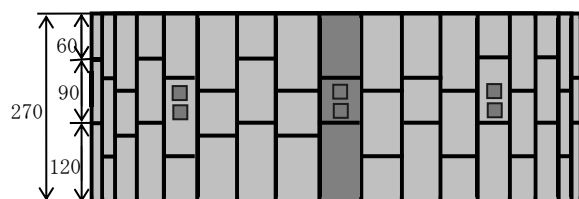
4. 石橋の地震時挙動について

著者らは，これまでに石橋の崩壊メカニズムについてアーチ輪石の模型を製作してその挙動を検討してきた^{5)~9)}．しかしながら，地震動を含めて実石橋に関しては，壁石の構成及び中詰め土の状況など不明な部分もあり，正確に地震時挙動は把握できていない．ここでは，アーチ輪石の模型実験を通した結果から得られた挙動と崩壊の要因について推定を試みた．

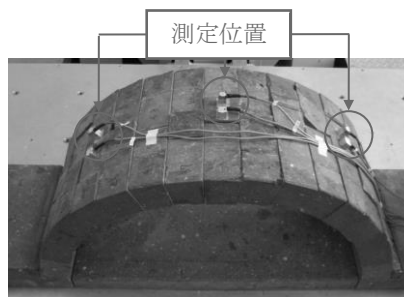
アーチ輪石模型を用いて石橋模型の動的挙動特性を調べた．図-8は，3列×17の石により組まれたアーチ輪石模型の平面図と模型の全体図である．また，図-9にはアーチ輪石の上に壁石を水平に積み，内部には中詰め土に相当する砂袋を入れており，併せて壁石の様子も図-9(b)のように製作した．なお，模型には加速度計を図-8(b)のように設置して，実験によりアーチ輪石模型の減衰定数および固有振動数を算出した．なお，正弦波加振実験と地震波入力による応答加速度の測定を実施した．スパンライズ比は一般的な石橋に最も多く存在する 0.4~0.5 を参

考にし， $f/L=0.45$ とした．石材は，熊本県下に広く分布しており実際の石橋にも活用されている阿蘇溶結凝灰岩である．その断面形状は上辺幅 60mm，下辺幅 50mm，高さ 60mm であり，奥行きについては 60mm，90mm および 120mm の 3 種類とした．なお，加速度計は，スパン L の L/4 点，L/2 点，3L/4 点の橋幅中央の 3 箇所と振動台上の合計 4 箇所とし，鉛直方向および橋軸直角方向の応答値を測定した．また，実際の石橋のように，壁石を設置し自重が増すことで，どの程度石アーチ構造が安定するのかについても応答加速度，実験後のアーチの変形状態に着目しての検討も行った．壁石の積み方は最も再現の容易な水平積みとし，幅 60mm，高さ 40mm，奥行き 60mm の石材を主に使用した．中詰め材は一袋が約 4kg で，壁石内部に可能な限り詰め込み，加速度計設置箇所に詰め込めない分は，壁石上部にベニヤ板を敷き上載荷重として設置し，自重を再現した．

実験後のアーチ輪石の形状変化について，図-10には鉛直方向に地震動を入力した場合の壁石の有無について挙動を比較して示した．実験終了後の石アーチの形状は，壁石無しの場合，アーチ輪石のみの模型では L/2 点のアーチクラウン部が大きく沈み込み，3L/4 点も石材が浮き上がった形となり，ねじれを含む楕円形状となった．一方，壁石を設置した場合には，アーチ輪石の 3L/4 点部分にずれが生じている以外は，アーチクラウンにもほぼ変形した様子は無く，目立った形状変化は発生しなかった．これは，壁石がなく，アーチ輪石の橋軸方向への作用により軸力変動があり，鉛直方向に移動しやすくなったと考えられる．また，アーチ輪石列の幅方向への開きも大きくなかった．しかしながら，橋軸直角方向に入力した場合，図-11 に示すようにアーチ輪石列の幅方向への開きが大きくなり，かつ壁石の有無により大きな差が出た．アーチ輪石のみでは，L/2 点の周辺を中心に 10mm 前後の開きが見られ，最大では 15mm の開きが見られた．一方で，壁石を有す



(a) 平面図



(b) アーチ輪石模型と加速度計の設置

図-8 アーチ輪石模型および加速度計の設置位置 (単位: mm)

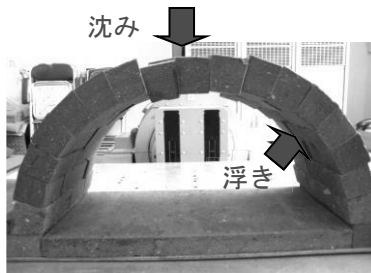


(a) 壁石を有する石アーチ模型の全体

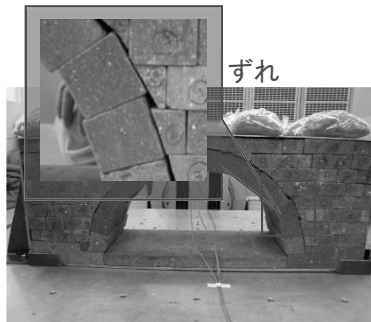
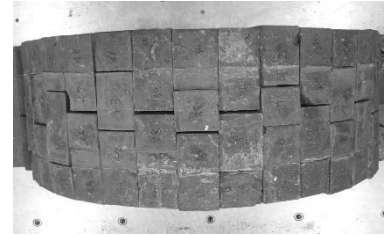
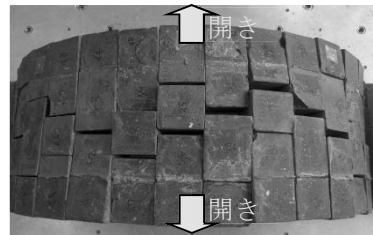


(b) 壁石内部の中詰材

図-9 壁石を有する石アーチ模型



(a) 壁石無し



(b) 壁石有り

図-10 実験後のアーチ形状

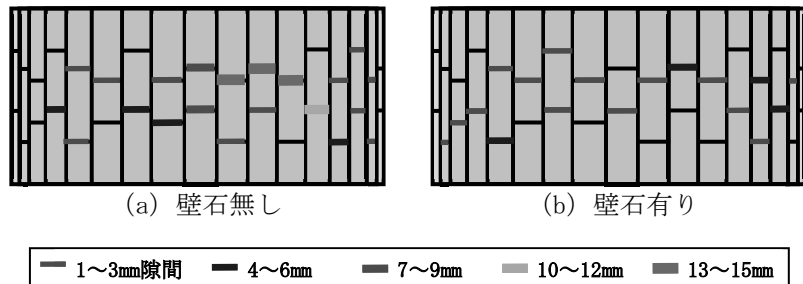


図-11 実験後のアーチ輪石の石材間開きの比較

ると開きはわずか数 mm で、最大でも 4mm 程度であった。特徴的なのは、模型の橋軸方向に中央ライン沿って隙間が連なって開きが生じていることである。軸力が緩むことで石材の接触面が微妙に変化していき、開きの方向に変位を起こすと考えられる。一度拵がり出すと石材の自重が偏心し作用するため、さらに開きの現象が進行したものと考えられる。しかし、壁石と中詰め土があればアーチ輪石に大きな軸力が発生し、連なる隙間は小さくなるのが分かった。今回の地震では、宇城市の下鶴橋がこのような輪石のすき間が開く現象が発生しており、地震動が橋軸直角方向に入力したものと考えられる。ただし、上下方向の加速度が作用した場合模型実験で生じた輪石のずれは、大きくなくこれも壁石の存在が影響したものと思われるが、今後さらに実際の地震動の入力方向も含めて解明する予定である。なお、壁石は静的な荷重のみならず動的荷重に対しても非常に重要な役割していることが分かった。また、壁石の崩壊については

孕みなどの初期変形の存在が大きく影響したと考えられるが、今後、壁石付きの模型実験により、動的載荷実験により解明する予定である。

5. 結 論

本研究では、現在までに石橋 17 橋の被害が判明し、報告されており、これら被害状況の分析と被害の特徴の分析を試みた。本震のみならず、余震発生地が広がっていることから、両者の影響を受けたものと考えられる。特に、アーチ輪石も含めて崩壊した石橋はなく、壁石垣の崩落が発生した石橋が数橋で、その他の被害のほとんどが高欄部の崩壊である。本研究から得られた主な結論を以下に示す。

- 1) 石橋の被災状況は、高欄の崩壊、壁石垣の崩落、アーチ輪石のすき間の発生、壁石の孕み等であった。
- 2) アーチ輪石の橋軸直角方向にすき間が発生した石橋が3橋ほどあり、実験模型との対応が見られた。

中でも下鶴橋(宇城市)は石垣部の崩壊に加えて、アーチ輪石に大きなすき間が発生し、さらに崩壊が発生したアーチ基部の輪石は多くの石材が割れており、地震の影響が大きいことが判明した。

- 3) 壁石を有するアーチ輪石は、揺れによる石アーチ部分のずれや隙間などの損傷を軽減できることを動的実験により確認した。つまり、壁石は静的な荷重のみならず動的荷重に対しても非常に重要な役割していることが分かった。

謝 辞

石橋の熊本地震の被害調査で、現地調査へのご協力および貴重な写真や資料の提供を熊本県や関係市町村の教育委員会からいただきました。記して感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 山本健次郎, 城幸央, 山尾敏孝: 石橋模型を用いた損傷を有するアーチ部材の挙動特性実験, 土木学会第 62 回年次学術講演会講演概要集(CD-ROM), I-154, pp. 307-308, 2007.
- 2) 古賀圭一郎: 石橋に用いられる石材の材料特性と石アーチ解析手法の検討, 平成 21 年度卒業論文, 2010.
- 3) 柿川伸介: 石材の材料特性と石アーチ模型による静的挙動特性に関する実験的検討, 平成 22 年度卒業論文, 2011.
- 4) 藤田千尋: 石材の材料特性の収集と石アーチ模型の変形挙動と応力状態の検討, 平成 23 年度卒業論文, 2012.
- 5) 藤田千尋: 石造アーチ橋の模型実験および動的解析による地震時挙動の検討, 熊本大学大学院自然科学研究科, 平成25年度修士論文, 2014.
- 6) 九州構造・橋梁工学研究会(KABSE): 石橋の設計ガイドラインと維持管理ガイドライン、2014.
- 7) 工藤祐資: 石橋の3次元動的挙動解析手法の開発と地震時動的挙動に関する研究, 熊本大学大学院自然科学研究科, 平成21年度修士論文, 2010.
- 8) 藤田千尋, 山尾敏孝, 古賀圭一郎, 岩内明子: 石橋に用いられる石材の材料特性とすべり挙動の解析手法の検討, 土木構造・材料論文集, 第28号, 2012.
- 9) 小倉 猛: 接触モデル・摩擦モデルを用いた解析手法の模型試験や実石橋への適用, 熊本大学大学院自然科学研究科, 平成26年度修士論文, 2015.