

平成 30 年 6 月 5 日現在

機関番号：17401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K06167

研究課題名(和文)石橋の維持管理に最適な補修・補強方法の開発と洪水に強い石橋の提案

研究課題名(英文) Development of suitable repair and strengthening methods of stone arch bridges for maintenance and the proposal of flood-resistant stone arch bridges

研究代表者

山尾 敏孝 (Yamao, Toshitaka)

熊本大学・大学院先端科学研究部(工)・シニア教授

研究者番号：40109674

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)： 現有する石橋を維持管理しながら保存・活用するために、本研究では次の5項目の問題についての研究を実施し、課題解決に努めて成果を得た。1)石橋に存在する石材のすき間や割れの損傷に対して、ステンレス鋼棒等を用いた補修・補強方法の開発を行い実験で確認した。2)石材高欄の高度強化を目指し、石材の中に鉄筋補強とエポキシ樹脂による接着を併用する高欄を開発し、効果を確認した。3)洪水に強い石橋形式の開発は模型実験に検討を行った。4)地震による壁石崩壊のメカニズムは壁石と中詰め材の関係を石橋模型実験により検討し、中詰め材の効果を確認した。5)石橋の設計法の開発を行ない提案し、石橋の施工法の検討を行った。

研究成果の概要(英文)： In order to conserve and utilize existing stone bridge while maintaining it, the research on the following five items was carried out and research results were got. 1) The repair and reinforcement methods using stainless steel rod etc. were developed against the damage of the stone gap and crack existing in the stone bridge and confirmed by experiment. 2) Aiming at high strength of stone material high column, we developed high column which reinforced reinforcement and adhesion by epoxy resin were combined in stone, and confirmed the effect. 3) Development of a stone bridge type resistant to flooding was investigated by using model experiments. 4) The mechanism of the wall stone collapse due to the earthquake examined the relation between the wall stone and the filling material by the stone bridge miniature model experiment and confirmed the effect of the filling material. 5) The development and proposal of the design method of stone arch bridge were conducted.

研究分野：構造力学

キーワード：石橋 維持管理 壁石 補修・補強 石アーチ模型 洪水 エポキシ樹脂 高欄

1. 研究開始当初の背景

石橋の多くは100年以上に渡って使用されている高耐久構造物であり、洪水による崩壊以外で壊れた例はほとんどない。多くの石橋は時間とともに、アーチ部分の輪石に大きな割れや石材間のすき間、石材の抜け落ち及び荷重を伝達する壁石の膨らみなどの損傷が見られるようになった。石橋が道路橋として敬遠された要因として、石材強度に対する不確定性、橋の耐荷力や地震時挙動や耐震性能評価が困難であったことに加え、石材高欄の高強度化する仕組み、石材の安定的確保や石橋の設計法自体が存在していないことが考えられる。既往の研究では、模型実験より得られた摩擦モデルとプログラムの接触モデルを使用して2次元解析モデルを作成し、静的挙動のみならず地震時挙動が解析可能な技術へと発展させた。また、開発した解析手法は、アーチ輪石の模型を用いて得られた静的挙動の結果や振動台を用いた模型の共振曲線や地震時挙動の結果と比較をすることにより開発した解析手法の有効性を確かめてきた。しかしながら、石橋の損傷状況に応じた最適な補修・補強工法がなく、持続可能な維持管理手法が確立していない。また、石橋の架設には絶対必要である設計手法が存在しない課題は大きな問題である。

2. 研究の目的

現有する石橋を維持管理しながら保存・活用するために、本研究では次の5項目の問題や課題についての研究を実施し、解決に努めた。1)石橋に存在する石材間のすき間や割れの損傷、壁石の面外方向への膨らみなどの損傷状況に応じた最適な補修・補強工法を開発し、持続可能な維持管理手法を提案する。2)石材高欄の高度強化を目指し、道路橋用に使用可能な新形式高欄を開発する。3)解析手法と石材の加工技術を用いて洪水に強い新形式の石橋を開発し、現有の石橋の洪水対策も検討する。4)地震により石橋の壁石が崩壊する被災が発生したことより、壁石と中詰め材の関係より壁石崩壊のメカニズムを石橋模型実験により検討する。5)スパン30m程度の石橋を地方の道路橋として生かし、石橋の架設するには絶対必要である設計手法を提案し、地方型の橋梁として活用することを目指す。高耐久ながら環境に優しい現有の文化財として存在する石橋を護り、先端技術を利用しながら維持管理が不要な新形式の石橋を建設促進することにより、石橋を持続型社会の社会基盤の実現にふさわしい地方型の橋梁として提案し、設計・架設を目指す。

3. 研究の方法

研究方法は課題ごとに以下のように実施した。

1)の課題については、石橋の石材間のすき間や石材の割れについては、ステンレス鋼棒を用いた補修工法の開発を石材はり模型を

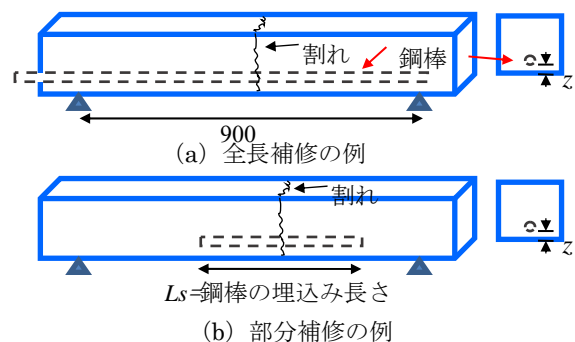


図1 曲げ試験供試体の補修方法



(a) 3点荷重 (b) 4点荷重

写真1 荷重の様子



図2 折れた石材のエポキシ樹脂による補修後供試体

用いた曲げ試験で検討した。図1は、石材はりの曲げ試験に用いた砂岩と阿蘇溶結凝灰岩(Aso-1,4)の3種類を用いた供試体である。供試体寸法は高さ200mm、幅200mm、長さ1000mmの正方形断面とし、支間長Lは900mmとした。供試体数は、Aso-4が9体、砂岩が8体、Aso-1が6体であった。実験は無損傷な石材はりを写真1に示すような4点荷重により最大曲げ強度や変形挙動を把握した。次に図1に示すように、2つに折れた石材はりを割れ面が中央になるよう鋼棒を入れて補修した後、同様に曲げ荷重試験を実施した。補修の手順として、まず、割れた石材の破断面を加工した後、高粘度エポキシ樹脂剤で繋ぎ養生する。石材が繋がったら片側から穴を開け、鋼棒と中粘度エポキシ樹脂剤を流し込み養生する。補修に使用した鋼棒は長期間のメンテナンス不要かつ付着が大きなネジ切りステンレス鋼棒を用い、鋼棒直径をφ10とφ13の2種類とした。鋼棒の埋め込み位置zは、石材下面から20mmと30mmの2種類とし、鋼棒の埋込み長さLは鋼棒の直径φの10~30倍(片側の鋼棒長さ)と部材全長を補修する場合を考えて比較検討した。また、壁石の面外方向への膨らみ等の損傷問題について実石橋の問題であり観察や原因除去の対処法を検討した。

2)石材高欄の高強度化問題については、石材の中に鉄筋補強とエポキシ樹脂による接着を併用する高欄を開発し、実物大模型によ

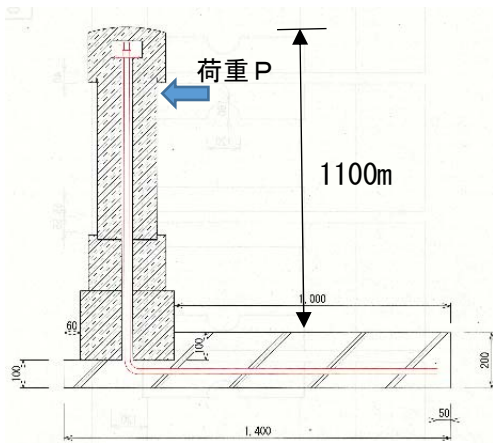


図3 高欄支柱の断面図



写真2 石材高欄の模型 接着のみ模型(左)と接着と補強した模型(右)

り効果を調べた。実験に使用した石材高欄模型を図3に示し、石材模型の全景を写真2に示した。模型は2種類で、柱の構成部材をエポキシ樹脂で接着剤を使用した模型と接着と支柱の部材内部を鉄筋で補強した模型を用いた。高欄の横梁の長さは2000mm、支柱の高さは1100mmである。「防護柵の設置基準・同解説」を参考にして、高欄部材の実験を次のように実施した。図3に示すように石材高欄が水平方向の静的荷重を受けて変形し、支柱が耐えられる最大支持力 P_{max} を求めた。模型の支柱の高さ80cmの位置に作用させた。

3) 洪水に強い石橋形式課題については、水路の中に石アーチ模型を設置して、常流から洪水流を作用させて挙動実験で検討を行った。実験に使用した石アーチ模型は2体製作し、2体の石アーチ模型の輪石の列数は、既往の研究より13列と15列とした。2つの模型ともライズ $f=70\text{mm}$ 、スパン $L=350\text{mm}$ 、幅員150mmとした。模型のアーチ輪石厚はすべて35mmと同じとし、スパン及びライズは水路実験の水路幅を考慮して決定した。実験水路は図4に示

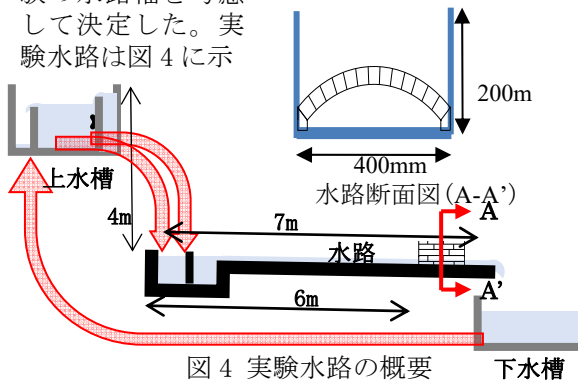


図4 実験水路の概要



写真3 実験水路と石アーチ輪石模型

表1 3パターンの水位、流速、流量

	パターン1	パターン2	パターン3
水位	1.2cm	2cm	2.3cm
模型流速 V_m	34.28cm/s	60.88cm/s	67.52cm/s
模型流量 Q_m	1645cm ³ /s	4870cm ³ /s	6211cm ³ /s





表2 3パターンの水位と水圧

	パターン1	パターン2	パターン3
水位	1.2cm	2cm	2.3cm
圧力	1.2 N/c m ²	3.3 N/c m ²	4.4 N/c m ²

す断面で、幅400mm、高さ200mm、全長が7m、水路勾配は1/150とした。水路内の水はポンプで上の水槽に貯め、調節口にて流量を調整して用いた。写真3は水路に設置した石アーチ模型と水路である。石アーチ模型に水流を作用させる実験では、相似則を考慮して上流と射流を求めて流し、水路の流量や流速および輪石に作用する水圧を計測した。求めた水位、流量、流速及び水圧の関係を3パターンに分けて決定した結果を表1と表2に示した。パターン3は本水路で流せる最大の水位、流量、流速及び圧力である。

4) 地震による壁石崩壊のメカニズムは、壁石と中詰め材の関係を石橋模型実験により検討し、中詰め材の効果を確認した。実験に使用した石橋模型は、アーチ輪石が支間長900mm、幅員270mm(スパンライズ比0.2)ので、写真4に示す模型と図5に示すような中詰め材を入れ、壁石を積み上げたものである。本実験では、地震時の壁石挙動を把握するための基礎実験として、正弦波振動をさせて崩壊に至るまでの壁石挙動を調べた。この壁石崩壊には、壁石の形状と中詰め材が影響すると推測されたので、壁石の形状として直方体(大、小)と四角錐の3種類を用い、中詰め材は表3に示すような砂、砂利、黒ぼく土及び砂と砂利の混合した4種類を使用して壁石の崩壊に及ぼす影響を調べた。また、実石橋では長年にわたり自重等により壁石に圧力(拘束圧)が作用していると考えられることから、これを考慮するために壁石の上部の両端から拘束棒で拘束した場合としない場合を比較した(写真4、矢印)。振動台に模型を設置した後、加速度0.2Gとして、3~15Hzの正弦波を橋軸方向に加振した場合と橋軸直角方向に加振した場合について壁石の崩壊に至るまで挙動を比較検討した。

表 3 模型に使用した中詰材

中詰材	砂	砂利	黒ぼく土	砂と砂利の混合
材料の様子				
粒径(mm)	0.06~2	13~20	0.074以下	0.06~20
単位体積重量 (kN/m ³)	13.35	16.86	10.38	16.92
含水率(%)	9.7	0.35	21.9	4.9

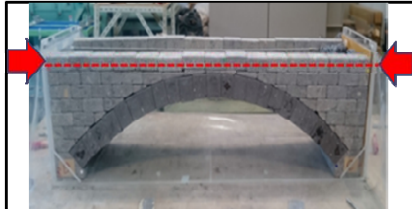
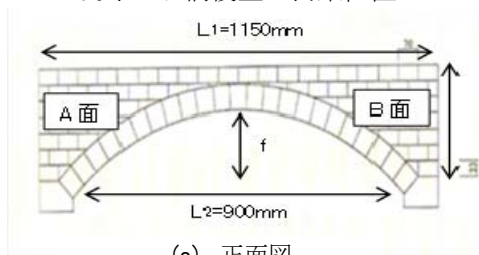
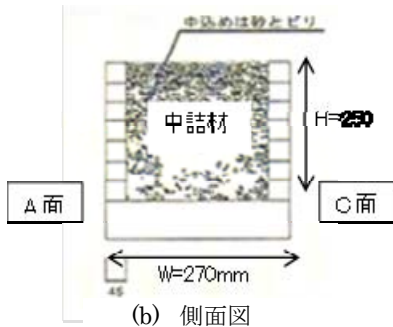


写真 4 石橋模型と拘束位置



(a) 正面図



(b) 側面図

図 5 石橋模型寸法

5) 地方型の橋梁として、スパンが 30m 程度の石橋で、高強度な石材高欄を有し、洪水にも強い新形式の石橋を通常の土木技術者の手で架設可能になるような石橋開発を試みる。具体的には、産官学で構成する石橋研究会で、石橋の設計法の在り方について道路示方書や中国の石橋設計基準を参考にしながら検討した。また、石橋の維持管理のガイドラインを作成し、点検手法についても検討した。

以上のように地方橋梁として石橋の開発と地方貢献及び石橋の設計法の確立を目指して実施する。

4. 研究成果

(1) 石橋の補修・補強方法の開発と考察

Aso-4、砂岩、Aso-1 の 3 種類の石材を用いた各供試体の補修前後の最大曲げ荷重を比較した。供試体の最大荷重でみると補修前の最大荷重と比較して 1.11 倍、 $z=30\text{mm}$ では 0.89 倍となり、 $z=20\text{mm}$ が望ましい結果となった。つまり、 $z=20\text{mm}$ の位置に鋼棒を配置し

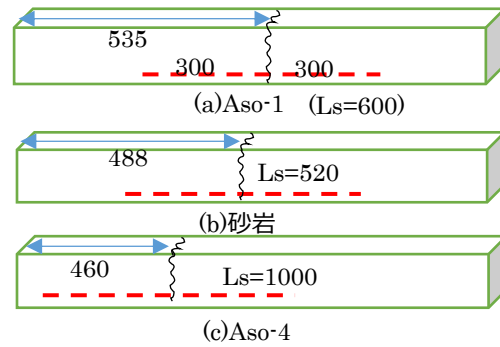


図 6 補修後の折れ方の典型例



(a) Aso-4 の供試体 6 (Ls=200mm)



(b) 砂岩の供試体 5 (Ls=400mm)

図 7 補修鋼棒がない位置で折れた供試体

たことで、RC はりの鉄筋と同様な効果を得ることができたこと、鋼材の引張強度の差が生じる前に石材の最大強度に達したことが判明した。図 6 は石材の供試体を曲げ試験より破損させ、その後鋼棒に補修した後再度曲げ試験をした時、補修前後で折れた位置がほぼ同じであった供試体例として 3 種類の石材で示した。荷重作用点は 4 点曲げ载荷なので、供試体の両端より 350mm の位置となる。大半の供試体がこのように荷重作用点の内側で折れた。しかしながら、供試体 Aso-4 や砂岩の供試体では、図 7 に示すように補修前後の折れ位置が変化したもので、鋼棒の補修長さが足りずに、鋼棒の外側で折れてしまったケースと考えられる。このため補修後の最大強度は平均値より低くなった。つまり、補修時の鋼棒の長さは十分検討する必要があることが分かった。なお、曲げ供試体の中に入れた鋼棒に作用する力については、鋼棒にひずみゲージを貼付することにより、最大強度に至るまで鋼棒による補修効果を確認できた。なお、壁石の面外方向への膨らみ等の損傷問題については、現状は経過観察が主体であり、路面に水が流入しないような処置をとることで対応している。

(2) 石材高欄の模型実験と考察

図 8 は、2 つの模型の中央部の水平荷重と水平変位の関係を比較したものである。なお、载荷途中で荷重を 5 分間保持している。図より、最大水平荷重である最大支持力は、接着のみの模型の場合 1.33tf であったのに対し、補強をした場合 2.69tf であり、2 倍の支持力増加となっていることがわかる。これは高欄

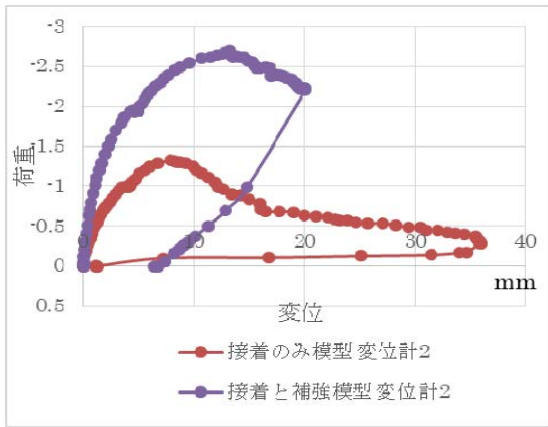


図8 2つの高欄模型の載荷点部の水平荷重と水平変位関係

支柱に図3のように鉄筋を基部で曲げて入れている補強効果と考えられる。また、対応する変位は、補強した模型の載荷を途中で止めているので比較はできないが、35mm程度まで十分可能と思われる。また、荷重作用点の中央部の水平変位が大きくなった。エポキシ樹脂で接着した模型では最大水平荷重は50%程度の低下まで作用させているが、補強した模型では20%程度低下したところで止めていることがわかる。

(3)水路を用いた模型実験と考察

普段の状態の河川を想定した水流パターン1は、常流状態で見た目の流れは緩やかである。アーチ基部は動くことなく静止していた。パターン2では射流に属し、見た目の流れも相当速いことが確認できた。実際に流速もパターン1の時と比べて約2倍速くなり、水位も約2倍となった。パターン1では、ほぼアーチ基部のみに水流が達したが、パターン2ではアーチ輪石部分にも水流が達していた。しかし、パターン1の時と同様に特に変化は見られなかった。パターン3ではパターン2の時とほぼ同様な結果であった。写真5は、パターン3における水流を受ける石アーチ模型を正面から見た写真で、模型の大きさと比較しても発生流量が少ないことがわかる。これは、実験できる水路幅に対し発生できる流量を十分確認しないまま模型を製作したこと起因するものである。想定する実石橋の重量は20tonであることから、相似則から考えると模型の重量

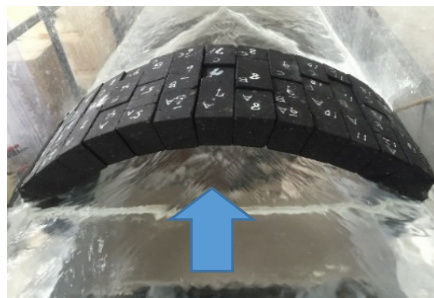


写真5 パターン3の正面方向図

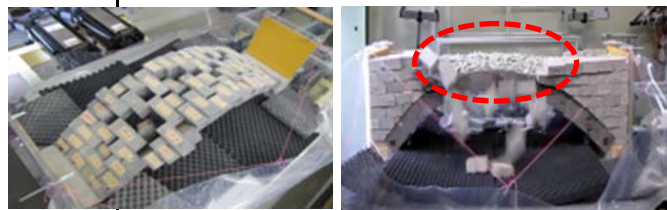
表4 振動実験の結果のまとめ

中詰材	加振方向	拘束	卓越固有周期(Hz)	主な発生挙動
無(アーチ輪石のみ)	橋軸(X)	無	4.1~4.5	輪石全体が橋軸方向に波打つように振動
	橋軸直交(Y)		4.6~5.3	
砂	橋軸(X)	有	7.6~8.0	壁石の孕み(大)、抜け落ち
			6.8~7.6	壁石の孕み(小)、抜け落ち
	橋軸直交(Y)	有	17~18	一部壁石の崩壊
			16~17	壁石の抜け落ち、孕み(小)
砂利	橋軸(X)	有	5.9~6.5	壁石の崩壊
			6.3~7.2	壁石の抜け落ち、孕み(大)
	橋軸直交(Y)	有	8.0~9.0	壁石の崩壊
			9.0~10.0	壁石の孕み(大)
黒ばく土	橋軸(X)	有	7.0~7.2	壁石の崩壊、中詰の流出
			7.8~8.0	壁石の孕み(小)
	橋軸直交(Y)	有	12~12.6	一部壁石の崩壊
			9.5~10	壁石の孕み(大)
砂と砂利の混合	橋軸(X)	有	8.7~9.6	壁石の孕み(小)、抜け落ち
			7.5~8.1	壁石の孕み(微小)
	橋軸直交(Y)	有	11~13	上部壁石の一部落下
			9.6~10.8	壁石の孕み(小)

は2.5kgが妥当であるが、本実験での石アーチ模型は5kgの重量であり、約2倍であった。実験に使用した石アーチ模型の単位重量は1.9(g/cm³)であることから、約半分の単位重量を持つ材料でアーチ輪石の模型を製作するか、水路を大きくして流量を増やした実験を行う必要があることがわかった。また、水路が小さいためモルタル接着の模型実験まで実施することはできなかったため、今後の課題である。

(4)地震による壁石崩壊のメカニズムの模型実験に検討と考察

アーチ輪石のみの振動実験及び壁石模型で、4種類の中詰材を用いた振動実験の結果を表4にまとめて示した。なお、壁石模型の場合すべて直方体形状の壁石を使用した。表には拘束の有無のケースと実験で発生した主な挙動等について記述した。写真6(a)は、アーチ輪石のみに橋軸方向の加振をした時の挙動を示しているが、4~5Hzの振動数で輪石に大きな開きが発生していることがわかる。なお、アーチ輪石は崩壊に至らなかった。しかし、中詰め材と壁石がある模型実験ではこのような大きな輪石の開きは発生せず、開きは十分小さく抑えられることが判った。写真6(b)から写真6(d)は、中詰め材として砂利を用いた石橋模型の崩壊に至るまでの挙



(a)アーチ輪石の挙動 (b)アーチ上部の壁石の倒壊



加振前 加振後 (c)壁石の開き(孕みだし) (d)中詰材の流出

写真6 壁石崩壊のメカニズム

動特性を示したものである。橋軸方向に加振した場合、石橋模型は橋軸方向に波打つように振動し、壁石はアーチ輪石のクラウン部に接触する壁石から孕みだしが生じ崩壊に至った。一方、橋軸直角方向に加振した場合、石橋模型全体が小刻みに振動し、上部の壁石が徐々に孕みだし壁石が外側に開く様子が観察され、写真6(c)には加振前後の様子を比較して示した。この場合、振動により壁石が中詰材により押し出され崩壊に至る様子が観察された。更に加振を続けると、写真6(d)に見られるように、中詰材が流出し壁石を巻き込みながらほぼ全域の壁石が崩壊に至った。特に、中詰材として砂利を使用した場合、砂や黒ぼく土と比較しても壁石の崩壊に与える影響が大きかった。中詰材として砂と砂利を半々に混合し、水で混ぜた場合には壁石の崩壊挙動が最も影響が小さくなり、激しい崩壊には至らなかった。この要因としては、表4に使用した中詰材の単位体積重量と含水率を示しているが、砂と水の混合剤は、他の中詰材と比較すると重量が大きく、振動により材料地震の分離がほとんど発生しないため、アーチ輪石への適度な圧縮効果が得られるため、壁石内の移動が小さく壁石に与える影響が小さくなったものと考えられる。また、壁石が崩壊した際には、粒径の大きい砂利と比べ中詰材が締め固まっていたため、壁石を巻き込んでの流出が小さいため壁石の崩壊も抑えられたと考えられる。以上により、壁石崩壊に至るには中詰め材の影響が大きいことが判明した。

(5) 石橋の設計法及び維持管理の開発

石橋研究会(40名弱)では、ワーキンググループに分かれて研究調査活動を行ってきた。得られた研究調査結果をまとめたものとして、石橋の設計ガイドラインや石橋の維持管理ガイドラインとして提案した。特に、維持管理ガイドラインは、石橋の目視点検には欠かせないもので、石橋の健全度評価に貢献できた。石橋にはアーチ形式の他に桁石形式がある。これらの形式も石橋に含める必要があり、これらの桁石形式の点検要領も作成している。また、石橋の設計ガイドラインを用いた石橋設計と施工について検討しており、これらをまとめつつある。このような石橋に関する設計・施工から維持管理まで総合的な研究成果を得ることができた。

研究の途中で熊本地震が発生し、石橋に被災が発生したことで、現地調査を行うことができ、石橋の中詰めの様子などが確認できた。しかし壁石復旧への助言や関連する研究課題が増え、当初の研究課題を十分研究できない課題もあった。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計1件) 査読有

- ① 山尾敏孝, 堀田昂良, 金子和明, 荒木祐一郎: 桁橋や樋門等に使用された石材の補修方法に関する実験的検討, 土木構造・材料論文集, 第32巻, pp.99-109, 2016.

〔学会発表〕(計12件)

- ① 山尾敏孝, 金子和明, 堀田昂良: 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, 第19回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, 2016. 7. 12~13, 東京都.
- ② Akira Horita, Toshitaka Yamao and Kazuaki Kaneko: Experimental Study on repair Methods of Broken Members Stone Structures, Proceedings of Asian Conference on Civil, Material and Environmental Sciences, ACCMES, CD-ROM, p.498, 2016. 7.21~22, Sapporo.
- ③ Toshitaka Yamao, Akira Horita and Kazuaki Kaneko: Investigation of a Miniature Arch Bridge Composed of Stone Blocks and Backfill Sands, Proceedings of Asian Conference on Civil, Material and Environmental Sciences, ACCMES, CD-ROM, pp.608-609, 2016. 7. 21~22, Sapporo.
- ④ 金子 和明, 山尾 敏孝, 堀田 昂良: 壁石を有する石橋模型の壁石効果と変形挙動の解明, 土木学会第71回年次学術講演会講演概要集(CD-ROM), I-461, pp. 925-926, 2016. 9. 7~9, 仙台市
- ⑤ 山代大貴, 堀田昂良, 戸田善統, 山尾敏孝, 霍本将志: 水流を受けるアーチ輪石の挙動解明に関する模型実験, 土木学会西部支部研究発表概要集(CD-ROM), I-0434, pp. 67-68, 2017. 3. 4, 佐賀市

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.civil.kumamoto-u.jp/str>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山尾敏孝 (YAMA O TOSHITAKA)

熊本大学・大学院先端科学研究部・シニア教授

研究者番号: 40109674

(2) 研究分担者

葛西 昭 (KASAI AKIRA)

熊本大学・大学院先端科学研究部・准教授

研究者番号: 20303670

(3) 連携研究者

なし

(4) 研究協力者

なし