

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 5 日現在

機関番号：17401

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2010～2013

課題番号：22360172

研究課題名(和文) 石造アーチ技術の再評価による高耐久・長大石橋の開発

研究課題名(英文) Development of the highly-durable and long spanned stone arch bridge by revaluation of the traditionally stone arch techniques

研究代表者

山尾 敏孝 (YAMA0, TOSHITAKA)

熊本大学・自然科学研究科・教授

研究者番号：40109674

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,300,000円、(間接経費) 3,990,000円

研究成果の概要(和文)：石橋で使用している石材を収集し、圧縮強度試験やせん断試験を実施して材料特性を明らかにした。次に、せん断試験より得られた摩擦特性と石材の接触モデルを用いて離散型有限要素解析手法を開発した。スパン・ライズ比が0.2と0.35の石アーチ輪石模型を多数製作し、静的および動的載荷試験を行ない、解析との比較により石橋の挙動特性を明らかにした。長大かつ高耐久の石造アーチ橋の開発を目指して多くの研究成果を得た。

研究成果の概要(英文)：The material properties of stone which is used in stone bridges revealed by carrying out shear tests and compressive strength tests. Next, we have developed a discrete finite element analysis method using a contact model and stone friction model obtained from the shear test. A large number of stone arch test models with span-rise ratio 0.35 and 0.2 subjected to static and dynamic loading test were carried out and, behavior characteristics of the stone bridge were clarified by comparison of test results and analytical ones. The development of the highly-durable and long spanned stone arch bridge was achieved.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・土木材料・施工・建設マネジメント

キーワード：石橋 模型実験 静的・動的解析 周波数特性 接触・摩擦モデル 石材の特性

### 1. 研究開始当初の背景

多数のRC橋や鋼製橋梁は架設後50-60年で老朽化が目立ち、架替えの時期になったが予算の平準化により長寿命化修繕対策が求められている。これに対し、石橋のほとんどは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ない。また、石造アーチ橋の90%は九州に存在し、地域の象徴として保存・活用され、自然と調和した景観と癒しを与える石橋であるが、道路橋としての新規に架設はないのが現状である。さらに、石橋のアーチ輪石に大きな割れや石材間のすき間、石材の抜け落ちなどの損傷が見られ、維持管理不足が背景にある。また、石橋が道路橋として敬遠された背景として、強度に対する不確定性や耐震性能に関する評価が困難であったことが要因として考えられる。石橋のアーチ部材や壁石が損傷を受けた場合の強度性能についての研究はほとんどなく、アーチ石の抜け落ちや石材のひび割れ等の損傷を有する石橋と同じ構造形式を有するアーチ輪石の模型実験は日本初の試みであった。また、石橋の健全度評価を行うには、実橋の載荷試験のみでは費用も時間もかかるので、精度よい解析手法が必要となる。離散体構造物の解析を行うにあたり、石材表面粗度を反映した摩擦特性が必要となり、石材のせん断試験から求めることになる。一方、橋梁の長寿命化修繕対策等により新規架設がほとんど不可能になった場合、小スパン橋梁を数多く抱える地方自治体にとっては非常に重大な問題となる。この問題の解決策の一つとして新形式の石橋の利用を提案するものである。

### 2. 研究の目的

30m~50mクラスのスパンを有する低コストの長大な石橋架設をめざし、かつ歴史的な石橋の築造技術を再確認することが目的である。これにより、今後の時代に求められる健全度評価手法の提案と維持管理費が少なく、地方自治体にとって、持続可能な社会基盤建設の実現に大きく貢献できるようにする。本研究で解決すべき課題は以下である。

1)旧式の石橋の築造技術や性能特性を再評価し、健全度評価手法の提案をする。3次元の挙動を精緻に把握する数値解析手法に、石材面の摩擦特性モデルを組み込み、模型実験解析を通してその精度を上げる。特に、旧式の石橋の健全度評価においては評価基準を早急に決める必要がある。石橋の築造技術を再評価し、開発した数値解析手法で最低限評価に必要な石橋特有な静的特性と固有モードなどの動的特性を明確にする。

2)橋を地方の道路橋として生かすべく、

30m~50mクラスのスパンを有し、現在の加工技術による石材を用いて、現在の土木技術者で架設可能な低コストの新式の石橋を開発する。地方の道路橋として活用することを主眼に置き、低コストで今の土木技術で建設可能な構造形式と石材の加工技術を融合させ、水回りなどの維持管理の問題点に注意を払った長大な新石橋とする。

### 3. 研究の方法

研究目的を達成するため、次の4項目について検討した。1)石橋に使用されている石材の収集と圧縮強度試験とせん断試験の実施、2)アーチ輪石模型を用いた静的・動的挙動試験の実施、3)石材の接触モデルと摩擦モデルを導入した離散型有限要素法を用いた、石橋の静的・動的挙動の解析手法開発、4)実石橋の動的特性を把握する実験、石橋点検マニュアルの作成と健全度評価手法の開発である。

#### (1)石橋に使用されている石材の材料特性

石橋にはアーチ輪石や壁石などに種々の石材が使用されている。九州に存在する石橋の多くは灰石と呼ばれる阿蘇溶結凝灰岩をはじめ、砂岩、花崗岩、安山岩などが使用されている。特に、阿蘇溶結凝灰岩については、生成時期や溶結の度合いなどが異なるものが存在するため、不特定の石橋の石材に適用可能な指標を作成するためには、できるだけ多くの石材の材料特性を把握することが必要となる。石材の材料試験としては、乾燥密度試験、弾性波速度試験、圧縮強度試験およびせん断試験を行い、材料特性の把握をした。

材料試験の試験体は、写真1に示すように、石材の堆積方向による違いを確認するため、堆積方向(V)と堆積層方向(H)から3本ずつ直径50mmの円柱状のコアを抜いて行った。円柱状の供試体の高さは100mmとし、一つの石材につき6本ずつ試験体を製作した。なお、火成岩である安山岩については、堆積方向が存在しないため、異なる方向から3本のコアを抜き、方向による違いが見られるか調べた。石材の材料特性を求めめるために、試験体に長さ30mmのひずみゲージを片面に2枚を高さの中心において軸方向と直角方向で、面に接着した(写真2)。圧縮試験により静弾性係数、ポアソン比および一軸圧縮強度を求めた。

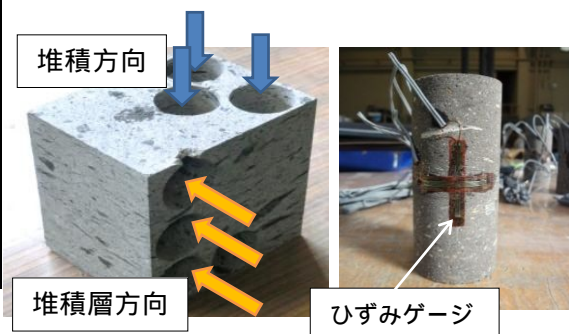


写真1 岩石のコア抜き 写真2 圧縮試験体

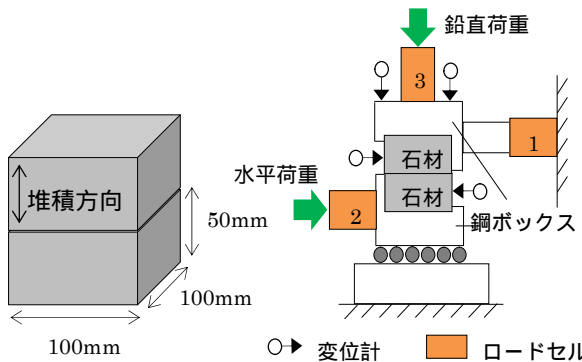


図1 せん断試験供試体

図2 せん断試験装置

せん断試験は、圧縮試験の石材と同じ種類を使用し、一つの石材の寸法を  $100 \times 50 \times 100$  mmとしたものを2枚使用した。なお、実際の石橋において、アーチ輪石の石材は堆積方向(V)がアーチの軸線方向になるように積み重ねられていることが多いため、せん断試験においても図1に示すように石材を重ねて用いた。図2にせん断試験の装置の概要を示すが、石材のせん断試験では、実石橋のアーチ輪石に作用する軸力を想定した上乗荷重を用いた。試験に使用した鉛直荷重は、5800N、11500N、17500Nとし、それぞれの石材にこれら3パターンの荷重を作用させた。

(2) 3列アーチ輪石模型の載荷実験

図3は載荷実験に用いたアーチ輪石模型の一例である。模型はスパン  $L=900$  mm、ライズ  $f=180$  mm および橋幅  $w=270$  mm で、石材厚さは  $t=60$  mm、スパンライズ比  $f/L=0.2$  で、アーチの幅方向に3列を有するアーチ模型である。なお、実験では  $f/L=0.35$  の模型や橋軸方向の輪石列数を变化させた模型も製作した。使用した石材は阿蘇溶結凝灰岩で、物性値は静弾性係数  $11500$  N/mm<sup>2</sup>、圧縮強度  $22.56$  N/mm<sup>2</sup>、ポアソン比  $0.21$  であった。アーチ輪石模型には、静的荷重を作用させる載荷試験と振動台に載せて、正弦波振動実験や地震波を作用させる動的試験を行った。

静的載荷試験では変形挙動を調べるため、模型の両基部、 $L/4$  点、 $L/2$  点および  $3L/4$  点の輪石の上面と下面にひずみゲージを橋軸方向に接着した。また、アーチ輪石間の圧縮応力分布を調べるために、輪石間に圧力測定フィルムを挟み、一軸ひずみゲージ値から求められる応力値と圧力測定フィルムで計測される応力値との比較を行った。図3には、計測に使用した変位計の位置やひずみゲージの貼付位置および基部付近と  $L/4$  点に圧力測定フィルムを挟んだ例を示した。実験では  $L/4$  点と  $3L/4$  点为上側に変形することが予想されたため、 $L/4$  点と  $3L/4$  点に変形拘束板を設置した。荷重はアーチクラウン部に鉛直集中荷重を単調増加で載荷した。

振動台加振実験は、図4に一例を示すが、アーチ輪石模型の周波数特性と地震波加振時の挙動を確認するために実施した。模型の各点にひずみゲージ式の加速度計を設置し

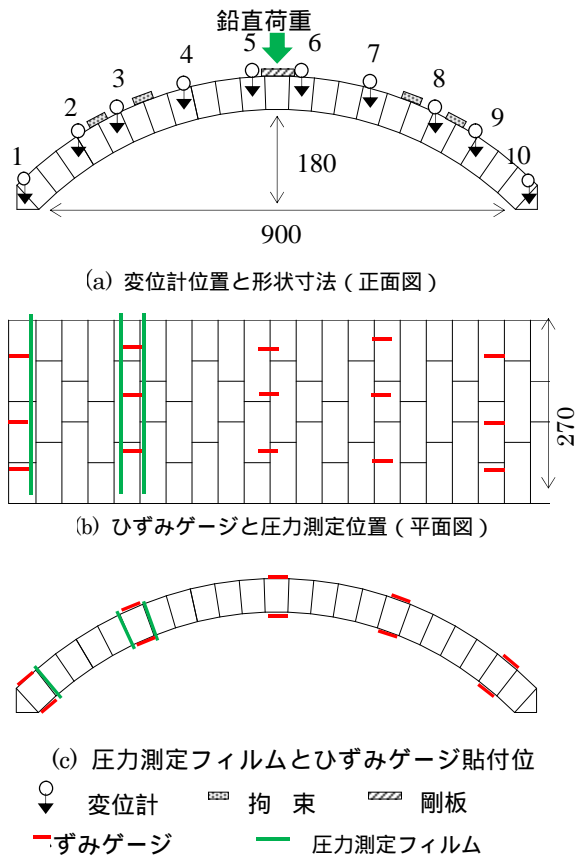
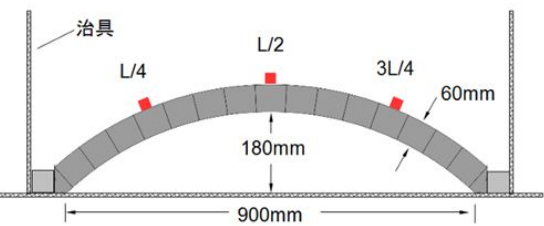


図3 アーチ輪石模型の形状と測定状況



(a) スパンライズ比 0.2 アーチ輪石模型



(b) 模型と加速度計

図4 振動台加振実験の様子

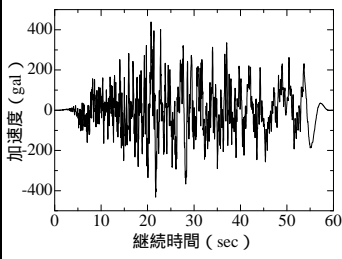


図5 Type I-III-3 釧路地震波

てアーチ輪石の応答加速度を計測した。設置箇所はアーチスパン中央の  $L/2$  点、基部とそ

の間の2点を埋めるようにL/4点、3L/4点に加え、入力地震波を確認するため振動台上にも設置した。なお、振動台の加振方向は鉛直方向あるいは橋軸方向とした。

実験での減衰定数の算出は、アーチ輪石の任意の点に衝撃を与え、その応答加速度から求めた。そして、周波数特性を把握するための正弦波加振実験を、振動数範囲として10 Hz~40 Hz、上昇ステップを0.2 Hzとし、1ステップ当たりの継続時間20秒として実験を行った。地震波加振実験では、入力地震波として、地震発生機構の違いを考慮し、プレート境界型として、北海道東方沖地震の釧路川堤防周辺地盤上で観測されたType I-III-3 (図5参照)を、内陸直下型として、兵庫県南部地震のポートアイランド内地盤上で観測されたType II-III-3の地震波を用いた。この波の最大加速度振幅を50galに換算したものを、釧路地震波は10, 20, 30, 40, 50, 60秒と短縮したものを、同様に、神戸地震波については10, 20, 30, 40, 50秒と継続時間を短縮した合計11波で加振した。

### (3)アーチ輪石模型の静的・動的解析手法の開発

離散化有限要素法に、アーチ輪石モデルの接触が起こりうる石材間に、接触モデルと摩擦モデルを導入して解析可能な手法を提案した。解析手法は、使用する解析プログラムにより対応が異なり、本研究ではABAQUSを用いた場合とMscMARCを用いた2種類の手法を開発した。前者の解析プログラムにおいては、接触モデルとして、図6に示す間隙量 $c_0$ と接触圧 $p_0$ の関係が指数関数で定義されるモデルを導入した。また、石材間の摩擦特性は、せん断試験の結果を参照して、実現象に近い挙動を再現するため、図7に示す固着状態とすべり状態の二段階で表現できるバイリニア型の摩擦モデルを使用した。

開発した静的・動的解析プログラムの妥当性確認を模型実験値との比較により行った後、壁石を含む実石橋の静的・動的挙動について、実石橋の測定値との比較により検討した。

### (4)実石橋の健全度評価と石橋設計法の開発

実石橋の健全度評価手法を開発するため、まず、種々の実石橋の動的特性を把握するため、石橋路面上での錘落下試験や20ton車両による走行実験を行い、石橋の固有振動特性

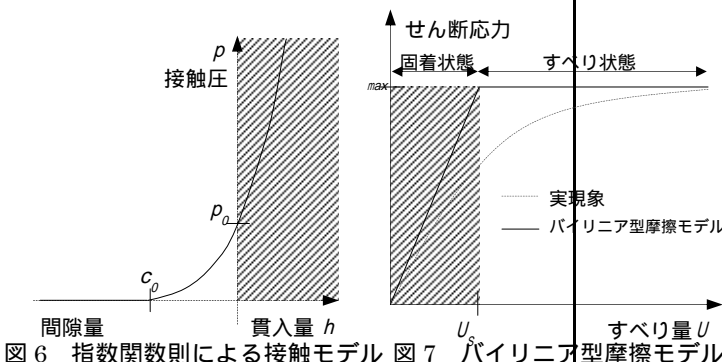
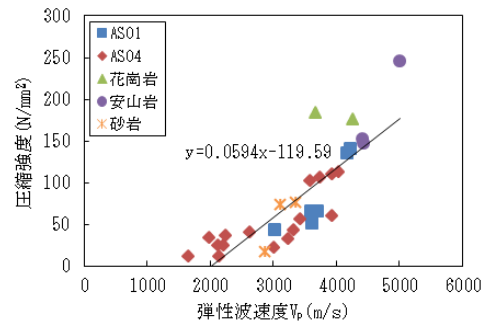
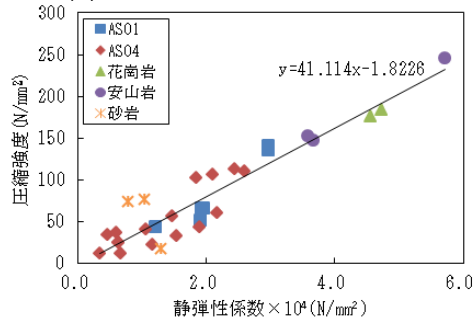


図6 指数関数則による接触モデル 図7 バイリニア型摩擦モデル



(a) 圧縮強度と乾燥密度の関係



(b) 圧縮強度と静弾性係数の関係

図8 全石材と材料特性

や変位挙動を把握し、データを収集した。また、橋梁の長寿命化に対応して、今まで存在しなかった石橋点検マニュアルを作成する試みを行った。特に、点検調査項目等を決定し、調査票により石橋点検を試みた。以上のような点検マニュアルと実石橋での車両走行実験ならびに解析手法の開発により、石橋の健全度評価手法の確立を目指した。

## 4. 研究成果

### (1)石材の材料特性の結果と考察

図8には石材の種類ごとに圧縮強度と乾燥密度の関係および圧縮強度と静弾性係数の関係のみを示した。得られた結果を比較すると、阿蘇溶結凝灰岩は、圧縮強度と乾燥密度や弾性波速度および静弾性係数との関係が同じように思われる。しかし、花崗岩、安山岩および砂岩については、圧縮強度と乾燥密度や弾性波速度および静弾性係数との関係が変化していることがわかる。また、花崗岩、安山岩は圧縮強度が大きく、砂岩が最も小さかった。阿蘇溶結凝灰岩に関しては、採取した種類も多く、ある程度の傾向が確認できたが、阿蘇溶結凝灰岩には生成時期の異なるもの

のや溶結の度合いが異なるものがあるため、圧縮強度、乾燥密度、弾性波速度、静弾性係数には、それぞれの値にばらつきがあった。

図9は、せん断試験で得られた全石材について、無次元化したすべり発生変位  $U/b$  とせん断応力の大きさの関係について、最小2乗

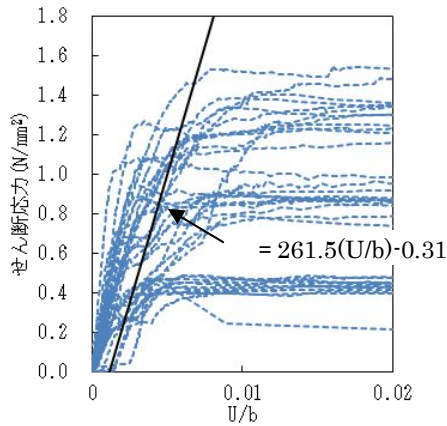


図9 せん断応力とすべり発生変位

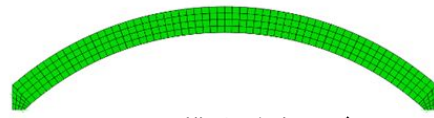
法で近似して求めた結果であり、図中に示す関係式が得られた。この式を用いれば、すべり発生変位を推定することが可能となる。

(2) アーチ輪石模型の実験結果と解析値との比較結果および考察

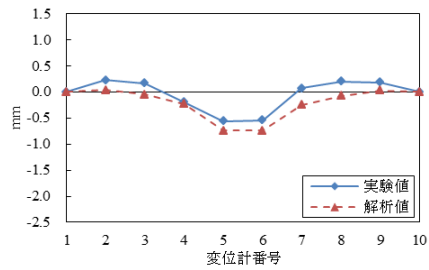
図10(a)は、アーチ模型の解析モデルを示したもので、(b)はアーチクラウン部に1000Nの鉛直集中荷重を作用させ、アーチ模型の静的変位挙動について実験値と解析値を比較して示したものである。図から、1000N 載荷時については実験値と解析値は比較的良好に対応していることがわかる。また、ここには図示していないが、輪石の上・下表面のひずみゲージ値から求まる応力値と圧力測定フィルムから得られた応力値は比較的良好に対応した。また、隣接する輪石の角に当たる部分は、他の断面と比べて大きな応力が作用していることが、アーチ模型実験より判明した。つまり、石橋のアーチ輪石の割れについては、アーチ輪石の組み方が大きく関係し、輪石の軸方向幅の不均一性が影響していることがわかり、輪石の割れを発生させるメカニズムが推定できた。また、模型実験より長大石橋の架設が可能であることも判明した。

図11は、スパンライズ比0.2のアーチ輪石模型に正弦波加振した時の実験値と解析値の結果を無次元化して示した。図より、実験値のL/2点において振動数が大きくなるにつれ徐々に応答も大きくなり、31.6 Hzでピークを迎えた後急激に減少していることから振動数31.6 Hzが共振点であることが推察できた。また、3L/4点では18.2 Hzで2倍近い応答が確認できるが、L/4点では逆に小さくなった。ここでのL/4点と3L/4点における加速度応答の変化がともに急激であり、アーチの左右で応答が異なるモードが低振動数で現れることは考えにくく、この模型特有の挙動と思われる。

図12は、スパンライズ比0.2のモデルに神戸地震波を10sec~50secを入力した場合で、10secのL/2点での加速度応答とフーリエ・スペクトルを一例として示した。



(a) アーチ模型の解析モデル



(b) 1kN 載荷時鉛直変位挙動の比較

図10 アーチ輪石模型の変位比較

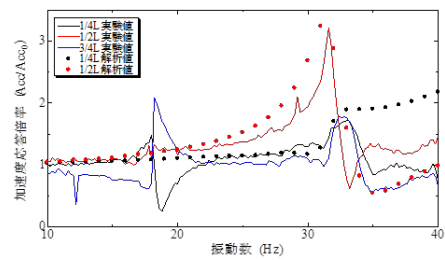
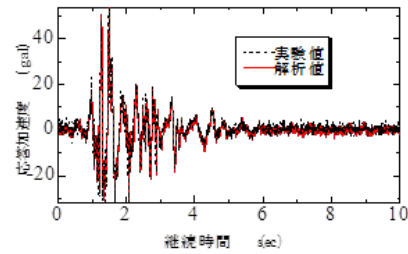
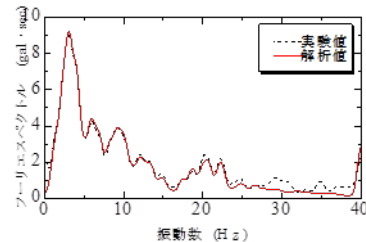


図11 アーチ輪石模型の共振曲線



(a) L/2 の点応答加速度



(b) L/2 のフーリエ・スペクトル

図12 スパンライズ比0.2モデル 神戸地震波 10sec

解析条件は、 $c_0=0.01$  mm、 $p_0=1.132$  N/mm<sup>2</sup>、 $U_s=0.36$  mmとした。図から、ここで用いた地震波では、応答加速度および周波数成分のフーリエ・スペクトルの解析値は実験値と傾向も非常に良く対応していることがわかった。特に、短周期の波を多く含む地震波10secのケースでは、各計測点で周波数全域にわたってよく対応しており、解析手法の妥当性が判明した。また、実石橋の静的挙動解析や多連形式の石橋の地震時挙動解析が可能となった。また、ここに示していないが、

3次元モデルでの全体挙動も解析できるようになったが、解析精度を上げるための工夫が必要である。

#### (4)実石橋の健全度評価と石橋設計法の検討

実石橋の健全度評価手法を開発するため、まず、県内に存在する種々のスパンを有するアーチ形式の実石橋を対象に、石橋路面上での錘落下による試験や20ton車両による走行載荷実験を行なった。これらの実験では、変位挙動や固有振動特性を把握し、貴重なデータを収集した。また、橋梁の長寿命化に対応して、今まで存在しなかった石橋点検マニュアルを作成し、点検調査項目等を決定して、調査票により石橋点検を試みた。点検調査ではアーチ形式の石橋で単一および多連形式でも対応可能にするため、実際に利用してもらって修正を繰り返した。また、耐久性があり、長寿命化が可能な中小スパンの橋梁として石橋を用いることを目的に、石橋の設計・施工に使用できる石橋設計ガイドラインを作成した。この試みも初めてであり、今後実際に架設設計や解析計算をし、施工を試みることにしている。現在の加工技術により製作した石材を用い、設計ガイドラインを用いれば低コストの石橋の架設も可能になる道筋が得られた。

以上のような結果が研究期間内に得られた主な事項である。石橋の石材特性のデータ収集、石橋点検マニュアルでの点検実施と実石橋での車両走行実験結果ならびに静的・動的解析手法の併用することにより、ほぼ石橋の健全度評価手法を確立することができた。

#### 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(7)件 すべて査読有

森本敏弘, 浅井光輝, 水田洋司, 山尾敏孝:  
ゴムマットを有するコンクリートブロック多段積み構造における共振メカニズムの解析的考察, 構造工学論文集 Vol.60A, pp. ,2014.3

藤田千尋, 山尾敏孝, 古賀圭一郎, 小倉孟: 石アーチモデルによる静的挙動とアーチ輪石の割れのメカニズム, 構造工学論文集, Vol.59A, pp.20-36,2013.3

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, pp.123-131, 2012.12

Chihiro FUJITA, Toshitaka YAMAQ, Keiichiro KOGA and Akira Kasai: DEVELOPMENT OF STATIC AND DYNAMIC ANALYTICAL METHOD OF STONE ARCH MODEL, Proc. of the 11<sup>th</sup> International Conference on Steel, Space and Composite Structures, 12-14 December 2012, Qingdao, China, pp.215-224, 2012.12

Toshitaka YAMAQ, Chihiro FUJITA, Keiichiro KOGA: Investigation of structural behavior and stress distribution of stone arches, Proc. of 8th Annual IIIRR Conference on Disaster Management 2012 in Kumamoto, August 24-26, Japan, pp.476-482, 2012.8

[学会発表](計12件)

小倉孟, 藤田千尋, 山尾敏孝: 石アーチモデルの静的挙動解析による検討, 土木学会第68回年次学術講演会講演概要集(CD-ROM), I-327, pp.653-654, 2013.9

藤田千尋, 山尾敏孝: 石アーチモデルの変形挙動と石材間の応力状態の検討, 土木学会第67回年次学術講演会講演概要集(CD-ROM), I-082, pp.163-164, 2012.9

古賀圭一郎, 山尾敏孝, 葛西 昭, 水田洋司, 藤田千尋: 石材間摩擦に着目した石アーチの動的解析手法の開発, 土木学会第67回年次学術講演会講演概要集(CD-ROM), I-081, pp.161-162, 2012.9

古賀圭一郎, 藤田千尋, 山尾敏孝, 葛西昭: 石材のすべり変位関係を考慮した石アーチモデルの動的解析手法の検討, 日本地震工学会大会 2011 梗概集, pp.206-207,2011.11

[その他]

ホームページ

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

#### 6. 研究組織

##### (1)研究代表者

山尾 敏孝 (YAMAQ TOSHITAKA)  
熊本大学・大学院自然科学研究科・教授  
研究者番号: 40109674

##### (2)研究分担者

浅井 光輝 (ASAI MITSUTERU)  
九州大学・工学系研究科・准教授  
研究者番号: 90411230

##### (3)連携研究者

なし

##### (4)研究協力者

友田 祐一 (TOMODA YUUICHI)  
熊本大学・工学部・技術専門職員  
研究者番号: 90418830