

様式 C-19

科学研究費補助金研究成果報告書

平成 21 年 3 月 31 日現在

研究種目：基盤研究（B）
 研究期間：2006～2008
 課題番号：18300311
 研究課題名（和文） 打音試験法及びアコースティックエミッション法による石造文化財の劣化診断技術の開発
 研究課題名（英文） Development of the hammering test and acoustic emission technique for stone cultural properties
 研究代表者
 高妻 洋成 (KOHZUMA YOHSEI)
 独立行政法人国立文化財機構奈良文化財研究所・埋蔵文化財センター・保存修復科学研究室長
 研究者番号：80234699

研究成果の概要：

石造文化財の劣化状態を非破壊的に診断したり、状態をモニタリングする技術を開発することを目的に、打音試験法とアコースティックエミッション法の応用開発をおこなった。打音試験法では、石造文化財用の打音試験装置を試作し、実用化を図った。この打音試験装置では、従来定性的におこなってきた石造文化財の打音試験を、強度に関するデータについて定量化できるようになった。また、アコースティックエミッション法では、石造文化財の移動・運搬などで破壊が進行していないかどうかのモニタリング、温度ムラによる微細な破壊などを効率よく検出できるようになった。本研究では、高松塚古墳石室解体にともなう石材の調査、同石室解体時および運搬時の微小破壊の監視、カンボジア・西トップ寺院遺跡（アンコール遺跡内）における石材調査、日田市ガランドヤ古墳石材の劣化調査など、実際のフィールドでの応用もおこない、有意義な成果を挙げることができた。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2006 年度	7,600,000	2,280,000	9,880,000
2007 年度	2,800,000	840,000	3,640,000
2008 年度	2,300,000	690,000	2,990,000
年度			
年度			
総計	12,700,000	3,810,000	16,510,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：文化財科学・文化財科学

キーワード：打音試験法、アコースティックエミッション、石造文化財、劣化診断技術、保存、修復、非破壊計測、モニタリング

1. 研究開始当初の背景

石造文化財は、世界的に広く存在しており、その多くは屋外の環境に置かれ、絶えず風化の危険にさらされている。保存状態の良好な石造文化財についても、地球温暖化や酸性雨などに代表される環境の急速な悪化により、

劣化の進行が懸念される。石造文化財の劣化は、地下水や降水などの水の影響が大きく、石材成分の溶出による脆弱化、塩類風化による表面剥離、植物や地衣類の着生などが原因となっていると考えられる。このような石造文化財の保存対策としては、風化した石材を

強化するための薬剤含浸、降雨による水の影響を低減するための撥水处理、水の浸入を防ぐための止水工事や覆屋設置などの対策が講じられており、一定の成果を挙げているといえることができる。

石造文化財の科学的な保存修復処置は総合的に取り組んでいかなければならない。すなわち、石造文化財をとりまく環境分析と石材の材質的特徴や劣化の現状を正確に診断することにより、劣化要因を解明し、それらに対する適切な保存修復処置を施さなければならない。しかしながら、現状では、石材の劣化診断と劣化状況を定量的に捉える技術はなく、専ら経験に頼らざるを得ないのが実情である。また、屋内にあって安定した環境下で保存を図ることのできる文化財とは異なり、石造文化財の多くは保存処置後も自然環境の中に置かれるため、保存修復処置後も環境のモニタリングと石材の状態調査を実施し、メンテナンスを施す必要がある。

石材の劣化診断調査は、目視観察、岩石種の同定、含水比測定、強度試験、析出物の有無とその分析などによりおこなわれるが、石造文化財の場合、非破壊ないしは外観を損なわない程度のサンプリングしか許されないため、強度的な情報を得ることがきわめて困難な状況にあった。

申請者らは石造文化財のより合理的な保存修復を目指すことを目的に、石造文化財の劣化診断法の開発研究を進めてきた。強度的な性質を把握する方法のひとつとしては、石材表面に一定荷重で針を貫入させたときに求められる針貫入勾配（針を1 mm貫入させるのに要する力）から回帰式を用いて一軸圧縮強度を推定する方法がある¹⁻²⁾。しかしながら、この方法は凝灰岩などの軟岩を対象としたものであり、さまざまな岩石に対して適用することは困難であった。さらに測定する箇所が石材表面に限られており、内部の状態までを把握することは不可能であった。

このような状況の中で、申請者らはコンクリート構造物の欠陥検出に活用されている打音試験法と微細な破壊や振動が生じた際に発生するアコースティックエミッションを観測・解析するアコースティックエミッション法に着目し、これらの方法が石造文化財の非破壊的な劣化診断技術として応用できるかどうかについて検討をおこなってきた。

打音試験では、一般に、コンクリート強度が高いほど高い周波数域の音が現れ、逆にコンクリート強度が低くなると低い周波数域の音が現れ、しかも低周波数ほど持続するようになること、ならびに浮きなどがある場合、特定の周波数の音が持続することがわかっている⁵⁾。申請者らは、室内実験によりいくつかの石材について同様の現象が生じることを確認し、実際にイースター島のモアイ像、カ

ンボジアのアンコール地区西トップ寺院遺跡および大分県ガランドヤ古墳において打音試験をおこなった。その結果、風化が進行して強度の低下した部分、きわめて健全な部分、表層が剥離している部分において、コンクリートで得られている周波数の特性とほぼ同様の結果を得ることができた。

一方、アコースティックエミッション法を石造文化財の劣化診断技術として応用した例は、国内外ともに見当たらない。申請者らは、アコースティックエミッション計測装置を用いて、温度変化あるいは水分変動による微細な亀裂の動きを観測することを試みている。大分県ガランドヤ古墳においておこなった調査では、石室内外に露出面をもち、かつ亀裂を有する石材に対して石材の表面温度を石室内外において測定しつつ、アコースティックエミッションの発生事象数を計測した。その結果、石室内外において温度差が最も大きくなる日中の時間帯において、アコースティックエミッションの発生事象数が増大する現象が認められた。これまで、打音試験法とアコースティックエミッション法に関する予備的な研究には簡易な装置あるいは既製の装置を用いてきたが、フィールドにおいて石像文化財に対して実用化できるように基礎的なデータの収集と石像文化財に適した装置の開発をおこなう必要があった。

2. 研究の目的

石造文化財の保存の問題は、環境分析、劣化診断、保存修復処置および処置後のメンテナンスという総合的な観点から取り組んでいかなければならない。この中で、石造文化財の劣化状態の診断とその評価法に関する情報を得ることが困難な状況にあり、早急な劣化診断技術の開発が必要である。

本研究の特色および独創的な点は、コンクリート構造物の欠陥検出などに応用されている打音試験法とアコースティックエミッション法による石造文化財の非破壊的な劣化診断技術を開発することにある。コンクリート構造物の欠陥検出に対しては、材質的に均質であること、対象物の形状が比較的複雑ではないことなどから、強度に関する情報および亀裂や空洞などの内部欠陥に関する情報を得やすい。しかしながら、石造文化財の場合、用いられている岩石には様々な種類のものであること、複雑な形状を有していることなどから、基礎的なデータの収集と実用化が必要となる。

本研究課題を遂行することにより、石造文化財の強度や内部欠陥に関する情報を非破壊で得ることができると、石造文化財の保存において、対象となる石造文化財の劣化の程度とその分布を詳細に把握した後、最適な保存修復対策の検討と実施をおこなうこと

ができるようになることは意義深い。

3. 研究の方法

これまで岩石テストピースおよび石造文化財に対して試験的におこなってきた打音試験とアコースティックエミッション測定から得られた知見を基に、石造文化財に適用できるように改良を加えた装置を試作するとともに、両試験法による基礎データの収集を図り、フィールド調査における石造文化財の状態調査をおこなう。

(1) 石造文化財用打音試験装置の試作

コンクリート構造物に対しておこなわれている打音試験法を石造文化財に適用できるようにする。そのために石造文化財を損傷することのない程度に打撃エネルギーを低減できるようにする。

(2) 石造文化財用アコースティックエミッション法の開発

石造文化財の微細な破壊・変形を検出するアコースティックエミッション法を石造文化財に適用できるようにする。

(3) 石造文化財に適した打音試験法を開発するための基礎データの収集

石造文化財に多用され、深刻な風化の問題が生じている岩石である砂岩、凝灰岩および花崗岩の3種類の石材試験片を用いて、打音試験に関する基礎データを収集する。

a) 岩石種による固有周波数の違い

b) 石材の密度と周波数成分の解析

浮き、空洞などの内部欠陥をもつ石材から発生した打撃音の特性

(4) フィールド調査における石造文化財の状態調査

平城宮跡、高松塚古墳、日田市ガランドヤ古墳などのフィールドにおいて、石造文化財の状態調査と打音試験およびアコースティックエミッション測定をおこない、データを蓄積する。

4. 研究成果

(1) 石造文化財の劣化状態を知るための打音試験法の応用 - 打撃音の周波数解析と浮き・空洞の検出 -

打音試験法は、石材をハンマーで打撃した時に発生する音の周波数特性から石材内部の損傷状態を推定する手法である。健全な石材では観測される周波数が高いほど強度が大きいこと、内部に損傷がある石材では低周波数成分が顕著に観測されるようになること、また、浮きなどの内部に空洞を有する場合には特定周波数の減衰時間が長くなることが知られている。

調査に際しては、ハンマーによる打撃で発生した音をマイクロフォンで集音し、デジタルデータとして記録した。録音装置からデータを wave 形式のファイルとし、解析ソフト

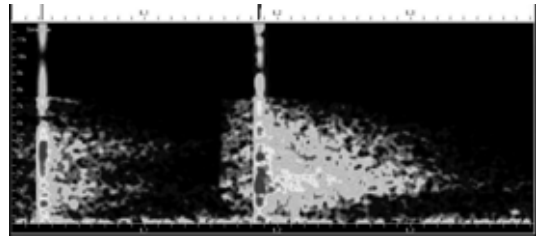


図1 打音試験のソナグラム解析

を用いて周波数解析をおこないソナグラムを作成し、劣化状態の解析を試みた。ソナグラムとは、横軸に計測時間を、縦軸に周波数を取り、周波数別にその音圧を諧調表示したものである。

調査の一例として大分県日田市ガランドヤ古墳の石室石材についておこなった打音試験の結果を示す。ガランドヤ古墳はその墳丘がほとんど失われ、石室石材が露出した状態にある。石材は安山岩質の熔結凝灰岩で構成されており、小さいもので20cm大、大きいものでは1mをこえる大きさのものが積み上げられている。今回は、石材の浮きや強度が低下していると推定される箇所の検出にこの打音試験法が適用できるかどうかを試みた。図1左は測点11のソナグラム、同右は測点12のソナグラムである。本来ならば、打撃エネルギーを一定にするか、あるいは加えた打撃エネルギーを計測し、欠陥に関する定量的な取り扱いをおこなうことが可能であるが、今回は、打撃により発生した「音」の周波数分布と特定周波数における減衰時間の長短をみることで、定性的に検討をおこなうこととした。測点11では高周波数域が特に強く観測されていないことから、強度的に大きいとは言えないが、著しい欠陥を生じているわけではない。それに対し、測点12では測点11に近接しているものの、2.5 kHz近傍に約100 msec程度の減衰時間が観測されており、浮きが存在していることが推定される。

今回は、打撃により岩石から生じた音を解析し、定性的ではあるが、相対的な劣化状態を比較し、さらに石材表面の浮きを検出することができた。これまで、浮きが認められる花崗岩、安山岩、熔結凝灰岩などについての基礎的な実験および数箇所の遺跡におけるフィールド調査においても同様の浮きの検出をおこなうことができた。

(2) 石造文化財へのアコースティックエミッション法の応用

物体になんらかの応力が発生し、変形や破壊を生じる際には、新たな破面形成、仕事、熱、音などの種々の形態でエネルギーが放出される。この中で固体が変形あるいは破壊されるときに「音」が発生する現象をアコースティックエミッション(AE)と呼んでいる。屋外にある石造文化財の中には、温度変化、水

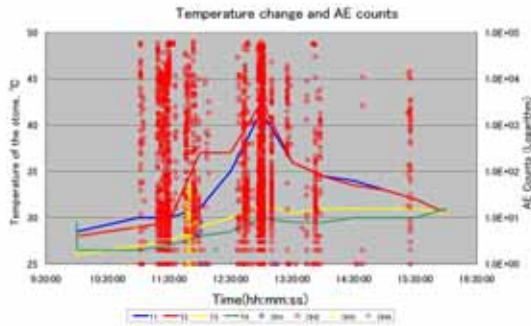


図2 石材の温度変化と AE 発生状況

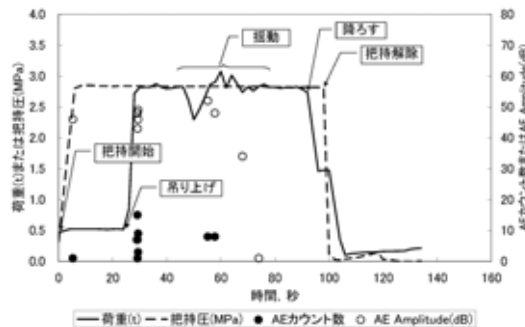


図3 型治具のみによる吊り上げ時の AE 発生状況

分量の変化、構造的な応力集中などに絶えずさらされており、微細とはいえ絶えず破壊が進行しているものも多い。今回はこのような進行性の破壊をモニタリングするための手段として AE 法を石造文化財に应用することを検討した。

カンボジアのアンコールトム遺跡内にある西トップ寺院遺跡はラテライトブロックで構築された先行するストウパを、後世に砂岩ブロックで覆うようにして新たに構築された構造を有している。ラテライトブロックは風化が進行しており、建造物としてはきわめて不安定な状態にある。また、後世の砂岩ブロックも層理面に沿った亀裂や表層の剥離を生じている。

石材は熱により膨張することから、不均一な温度分布を生じた場合、亀裂の進展が生じる可能性がある。測定対象とした石材は砂岩であり、層理面に沿った割れを有していた。日中は絶えず日照を受ける面とほとんど受けない面があり、温度分布には大きなムラを生じる。石材表面に接触型の温度センサーを4個貼り付け、それらの近傍に AE センサーを設置した。

図2は測定した石材の4箇所温度変化とその間に観測された AE のカウント数を示したものである。測定開始時にはおよそ29と均一であったが、13時には最大で12.5の温度差が生じていた。AE の発生状況を見ると、温度差が広がり始める11時から最大の

温度差に到達する13時までに AE が多く発生し、それ以降に発生頻度が低下していく傾向が認められた。特に割れの近傍に設置した AE センサーによるカウント数が突出しており、この部分における微細な変形・破壊の進展が推察される。

高松塚古墳石室石材には多くの亀裂が生じている。壁画の恒久保存対策として実施される石室解体においては、天井石、北壁および閉塞石を水平方向（壁画に接触することのない両側面）に拘束して把持する方法で吊り上げ、取り出される方針が決定された。その際、把持による亀裂面の破壊、吊り上げ時の破壊、移動時の破壊など、解体工程における破壊の進展が懸念された。そこで、石室石材と同じ寸法で調製した凝灰岩製の模型に亀裂を作り、石材を治具で把持して吊り上げ、AE の発生状況を測定した。

図3は、型治具のみを用いて天井石を吊り上げ、揺動させたときに、石材にどのような影響が生じるかを計測したものである。今回は、把持の時よりも吊り上げ時に AE が発生したが、吊り上がった状態では AE は発生しなかった。その後、上下方向に揺動させたところ、ほとんど AE は発生しなかった。型治具を用いたこれらの実験結果からは、石材を把持した時と吊り上げた時に AE が発生するが、吊り上げた状態や揺動させた時などにはほとんど AE が発生しないことが明らかとなった。

(3) 高松塚古墳石室解体におけるアコースティックエミッション法の応用

高松塚古墳石室の解体および石材の移動をおこなう際には、石材に微小な破壊が生じることが想定された。このような微小な破壊の連続的な進展は最終的には取り返しのつかない大きな破壊に結びつく危険性があるため、石室解体時および石材移動時の安全を確保することを目的に、目視観察をはじめ、コンクリートマイクによる破壊音監視、治具の梁応力測定などとともに AE 法を適用することとした。

高松塚古墳の石室解体では、取り上げる石材の形状・破損状態などを考慮して、各石材の解体に最適な治具を調整・使用した。全石室石材16石について、地切り、把持移動、梱包移動、回転、搬送などの各工程での AE を得たが、ここでは、比較的取り上げが困難であった天井石1（南から1番目）の把持移動（2007年5月30日実施）に際して得られた AE データを紹介することにする。

なお、AE の測定には携帯型の AE 計測装置（Physical Acoustics Corporation, Pocket AE）を用いた。AE センサーはシクロドデカンを用いてあらかじめ石材の表面に接着しておいた鉄板（縦5 cm×横5 cm×厚1 mm）に両面テープと粘着テープで固定した。

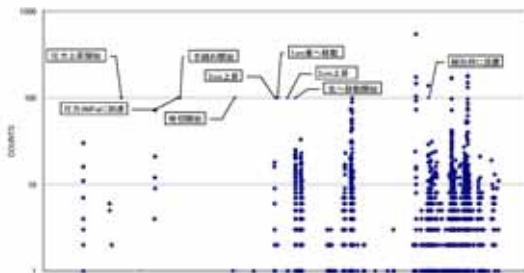


図4 把持移動時のAEカウント数

図4に天井石1の地切りをおこなった時に観測されたAEのカウント数を示す。圧力を上昇させるまでに観測されたAEならびに梱包枠に設置した後で観測されているAEはボルトなどを扱ったときに接触した工具などのノイズによるものである。また、北に移動中に観測されたAEは天井クレーンの電気的なノイズに起因していることがわかっている。10時32分に観測されているAE、10時51分のAE、梱包枠に設置する直前の11時13分から設置し終わるまでに観測されたAEは、それぞれ把持圧の上昇により南北方向の亀裂がわずかに閉まったこと、2cm上昇のときのわずかな衝撃、梱包枠への石材の接触と南北方向の亀裂のわずかな動きを反映するものと考えられる。これらのAEは瞬間的なものであり、石材の破壊の進行を示唆するものではなかった。

観測時には様々なノイズなどもあったが、事前にそれらの事象を把握しておくことにより、石材の破壊に起因するものであるかどうかをある程度区別することができた。石室解体工程において、AEをモニタリングすることで、石材に破壊が進行していないかどうかを把握することが可能となり、安全な石室解体の遂行の一助とすることができたといえる。AE法は石造文化財のみならず、様々な文化財の取扱・移動などにおいてきわめて有効なモニタリング法のひとつであるといえることができる。

(4) 石造文化財用打音試験装置の開発

石造文化財用の打音試験装置については、2006年度からその打撃方式について様々な改良を加えてきた。2008年度は最終的な改良をおこない、強度に関するデータを定量化できるようにした。打撃装置により石材を打撃すると、その振動は石材に接したセンサーを介して記録される。個々の打撃において、厳密にその打撃エネルギーを一定にすることは不可能であるが、打撃と同時に打撃装置に取り付けられた振動センサーにより、打撃時の振動を計測し、一定の振動エネルギーに規格化することで、石材に伝播した振動を定量的に取り扱える



図5 石造文化財用打音試験装置

ようになった。その結果、欠陥の検出という定性的な試験と強度に関する定量的な試験をおこなうことが可能となり、石造文化財への打音試験装置の実用化を図ることができた。

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8件)

高妻洋成・脇谷草一郎・肥塚隆保「イースター島モアイ石像の保存科学的研究」『奈良文化財研究所紀要 2006』pp.34-35、2006.6 (査読無し)

肥塚隆保「石室解体にむけた実験」『文化庁月報』No.461、pp.10-11、2007.2 (査読無し)

高妻洋成「高松塚古墳石室石材の運搬」『文化庁月報』No.466、pp.12-13、2007.7 (査読無し)

肥塚隆保・建石徹「高松塚古墳の石室解体の実施」『文化庁月報』No.467、pp.12-15、2007.8 (査読無し)

肥塚隆保・高妻洋成・降幡順子・建石徹・田辺征夫「国宝高松塚古墳壁画保存修理のための石室解体」『2007 東アジア文化遺産保存国際シンポジウム』pp.153-158、2007.11 (査読無し)

肥塚隆保・高妻洋成・降幡順子「石室解体と輸送」『月刊文化財』532号、pp.22-37、2008.1 (査読無し)

Yohsei Kohdzuma, 'Application of the hammering test and acoustic emission technique to stone cultural properties', *Study of Environmental Conditions Surrounding Cultural Properties and Their Protective Measures*, pp.103-109, 2008.3 (査読無し)

肥塚隆保・高妻洋成・降幡順子「高松塚古墳石室解」『奈良文化財研究所紀要2008』pp.32-33、2008.6（査読無し）

(3)連携研究者
なし

〔学会発表〕(計4件)

高妻洋成・脇谷草一郎・降幡順子・肥塚隆保「石造文化財の劣化状態を知るための打音試験法の応用 打撃音の周波数解析と浮き・空洞の検出」『日本文化財科学会第23回大会研究発表要旨集』、pp.34-35、日本文化財科学会、2006.6.17-18、東京学芸大学

高妻洋成・降幡順子・脇谷草一郎・肥塚隆保「石造文化財へのアコースティックエミッション法の応用」『日本文化財科学会第24回大会研究発表要旨集』、pp.330-331、日本文化財科学会、2007.6.2-3、奈良教育大学

高妻洋成「音波による石造文化財の劣化評価」『第31回文化財の保存および修復に関する国際研究集会』pp.50-52、文化財の保存および修復に関する国際研究集会、2008.2.5-7、東京文化財研究所

高妻洋成・降幡順子・脇谷草一郎・肥塚隆保・建石徹「高松塚古墳石室解体におけるアコースティックエミッション法の応用」『日本文化財科学会第25回大会研究発表要旨集』、pp.36-37、日本文化財科学会、2008.6.14-15、鹿児島国際大学

6. 研究組織

(1)研究代表者

高妻洋成 (KOHZUMA YOHSEI)

独立行政法人国立文化財機構奈良文化財研究所・埋蔵文化財センター・保存修復科学研究室長

研究者番号：80234699

(2)研究分担者

肥塚隆保 (KOEZUKA TAKAYASU)

独立行政法人国立文化財機構奈良文化財研究所・埋蔵文化財センター・センター長

研究者番号：10099955

降幡順子 (FURIHATA JUNKO)

独立行政法人国立文化財機構奈良文化財研究所・都城発掘調査部・主任研究員

研究者番号：60372182

脇谷草一郎 (WAKIYA SOICHIRO)

独立行政法人国立文化財機構奈良文化財研究所・企画調整部国際遺跡研究室・特別研究員

研究者番号：80416411