

## IV-11 自然素材としての石材の土木構造物への有効利用法に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平16～平17

担当チーム：地質チーム

研究担当者：佐々木靖人、矢島良紀

### 【要旨】

環境に対する意識の高まりを背景に、土木構造物に対しても環境に配慮することが要請されており、石材のような自然素材を使用する事例が増加している。しかしながら石材を土木構造物に使用するにあたっては、安全性の確保が不可欠であり、そのため石材の劣化への耐久性等、土木構造物に対する必要物性を整理することが重要である。本課題では、石材の有効利用法確立のための基礎資料として、石材の利用実態調査や劣化状況の整理を行うとともに、耐久性評価のためのエコーチップ等を用いた非破壊の強度測定方法等について検討を行い、その有効性とともに使用にあたっての留意点を示した。

キーワード：石材、歴史的土木構造物、エコーチップ、非破壊試験

### 1. はじめに

自然再生推進法、環境影響評価法、景観法が施行される等、国民の環境に対する意識の高まりを背景として、土木構造物に対しても環境に配慮することが要請されており、石材のような自然素材を使用する事例が増加している。石材は我が国において伝統的に利用されてきた素材であり、老朽化しても味わいのある美しさを保持する上に、生物の良好な生息・生育環境の復元といった自然との共存共栄支援を促進しやすく、景観的にも好ましいという利点を持っている。また工事ともなう発生する石材を有効利用することが可能となれば、経済性の向上といった利点も同時に得ることが期待できる。しかしながら石材は人工材料と比べると品質面でのばらつきが大きく、材質やその利用環境によっては早期劣化など安全性の問題が懸念される。そのため本課題は、石材の利用実態の整理を行うとともに、石材の構造物とその使用環境に応じた必要物性を整理することを目的として、既存構造物に使用された石材の劣化状況や、その耐久性評価のための非破壊の強度測定方法等について検討を行った。

### 2. 研究方法

#### 2.1. 石材の利用実態整理

##### 1) 歴史的な土木構造物データベースの作成

明治期から昭和初期にかけて建設がなされた土木構造物には、地場の石材を多く用いたものがあり、老朽化しても周囲の景観と調和し、好ましいばかりでなく、地域の象徴的な存在になっている例も見受けられる。また、これらの構造物に使用された石材は使用開始後

数10年～100年以上が経過しているため、これらの劣化程度を調査することにより、石材の耐久性を評価することが可能である。そのため石材の利用実態の把握と耐久性評価に際しての基礎資料とすることを目的に、「石材を使用した歴史的土木構造物データベース」の作成を行った。

##### 2) 全国採石場マップの作成

採石場にて採取される石材の特性は、その位置する地質状況に大きく影響される。石材の特性を総論的に把握するために、GISを用いて採石場所在地と1/100万地質図を重ね合わせた「全国採石場マップ」を作成した。

#### 2.2. 石材の耐久性調査

##### 1) 歴史的土木構造物の調査

石材の利用環境に応じた必要性能を整理するために、明治期～昭和初期にかけて建造された歴史的な土木構造物（堰堤、トンネル、橋梁等）のうち石材を使用したものについて現地調査を行い、劣化の状況や原因等について整理を行った。

##### 2) 多自然型川づくりに使用された石材の調査

河川護岸のかご工に使用した割栗石の一部について、施工後数ヶ月～数年足らずの短期間に劣化したという事例を受け、劣化の原因とその進行の可能性について現地調査ならびに室内試験を行った。

#### 2.3. 既存構造物の強度測定手法の検討

石材の物性値の一つに強度があり、その低下はすなわち石材の劣化を表す指標となる。通常、石材の強度の測定には、円柱状または角柱状の試料を切り出して試験に供するが、対象が既存の土木構造物である場合

にはこのような試料の採取は最小限にする必要がある。そのため試験は現地において非破壊で行うことが望ましいが、岩石やコンクリートに対してよく用いられるシュミットハンマーは、非破壊試験機とはいえ対象物に与える衝撃力が大きく、損傷させるおそれがあるため、特に歴史的な構造物に対する使用は適当でない。そのため本課題では、シュミットハンマーよりも対象に与える衝撃エネルギーの小さいエコーチップに着目し、この使用の可能性について検討した。

### 3. 研究結果

#### 3.1. 石材の利用実態調査結果

##### 1) 石材を使用した歴史的土木構造物データベース

作成にあたり収録条件として以下を設定した。

- ① 外部に石材を使用した土木構造物（建物を除く）
- ② 建設年代が原則として明治以降のもの

また、データ項目として構造物の種類、所在地、建設年、石材の種類、石材の使用方法を設定し、それぞれ整理をおこなった。これらの諸元データは既存資料によったが、一部では現地実態調査を実施しデータの補足を行った。さらに地域の地質と比較した結果、これら構造物に使用されている石材は都市部を除き、その多くが地場のものを使用しており地域特有の景観創造に寄与していることが確認できた。九州地方の溶結凝灰岩による石橋や、岡山県の花崗岩による水門などはその代表例である。作成したデータベースを GIS を使用して地図上で表現したものを図-1 に示す。

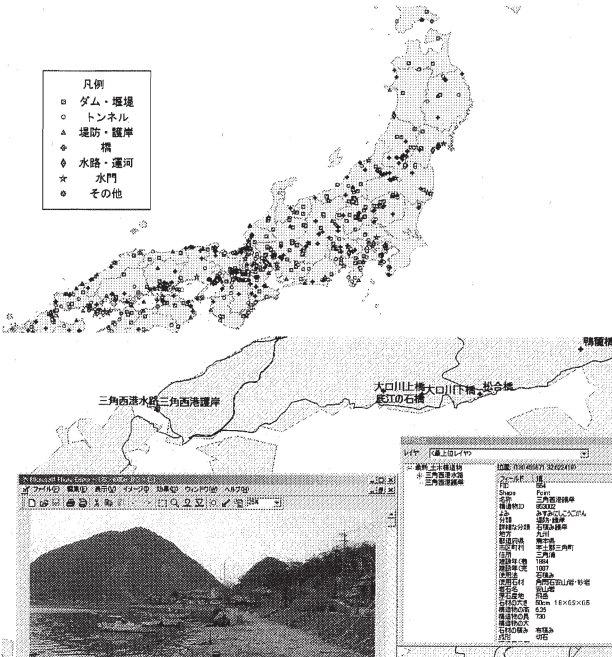


図-1. 石材を利用した歴史的土木構造物マップ  
(位置をクリックすることにより諸元や写真(一部)を表示)

##### 2) 全国採石場マップの作成

土木地質図ならびに日本砕石協会発行の会員名簿に記載されている採石場のデータに座標を付与し地質図と重ね合わせの上、マップとして整理を行った。表-1 に各地質区分における採石場数、図-2 に作成したマップの表示例を示す。異なる地域間における石材についても採石場が同様の地質であれば、その特性にある程度の相関が認められる。本マップの作成によって、石材産出の現状のみならず、採石場間の地質的關係が明確になり、これまで個別事例的であった石材の特性評価に他地域における石材の各種情報を応用することが容易となり、これがより適切に行えるものと考えられる。

表-1 採石場所在地の地質分類

	第四紀	新第三紀	古第三紀	中生代	古生代
火山岩	250	511	54	155	—
深成岩	—	28	80	644	9
堆積岩	346	294	61	170	71
変成岩	—	—	—	149	36
付加体	—	—	69	501	129

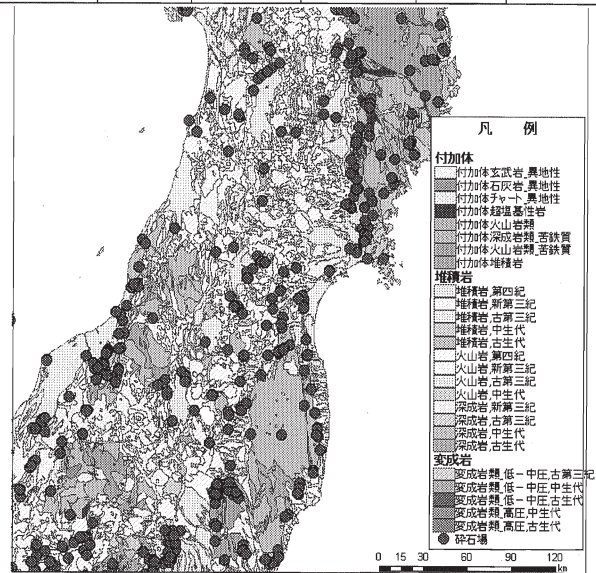


図-2. 全国採石場マップ(東北地方の例)

##### 3.2. 石材の耐久性調査

石材の劣化原因は大きく分類すると以下の3タイプであり、これらが複合的に作用することによって劣化が生じる。

- ① 石材の物理的・化学的劣化
- ② 構造的応力による力学的な破壊
- ③ 生物に由来する劣化

①は季節変化による凍結融解や乾燥湿潤の繰り返し、また塩類風化などによるもので、外的要因としての環境と内的要因としての鉱物組成などの相互関係によって生じる。②は荷重や衝撃により石材が亀裂等を生じるもので、荷重のかかる石橋のアーチ部や、波浪等が



打ち寄せる堤防、護岸などにあらわれることが多い。またこの作用により損壊する構造物もある。③は生物活動によるもの、例えば植物の根による圧力や、微生物の活動による化学変化、一部の貝類による穿孔などによって石材が劣化するものである。

### 1) 歴史的な土木構造物の調査結果

現地調査の結果、歴史的土木構造物に使用された石材の多くは良好な状態を保持していたものの、一部の石材には風化による亀裂や表面に剥離が生じているものがあつた(図-3)。風化の要因や、風化を受けた後の強度等については、今後とも継続的に調査を行う。



図-3 石材劣化の例(風化による剥離)

また多くの石造構造物において、石材そのものの劣化程度は小さいものの、石材間の隙間から浸水し損壊する事例が見られた(図-4)。石材を構造物に使用するには、石材そのものの品質のみならず適切な接合方法についても今後、調査を行う必要がある。

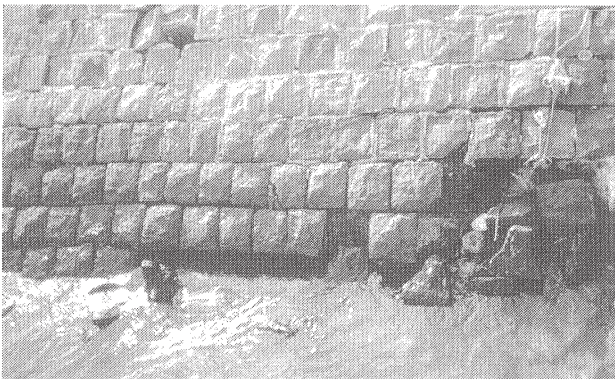


図-4 接合部の劣化による石材の抜け落ち

### 2) 多自然型川づくりで使用された石材の調査結果

割ぐり石として使用された石材は、地質学的分類では古第三系四万十帯に属する砂岩および泥岩である。原石山で採取したばかりの石は新鮮堅硬であり、吸水率 1.5%未満、一軸圧縮強度 140~200MPa と良好な値を示すほか、亀裂等も見られない。しかしながら施工から数ヶ月~数年が経過したものは、泥岩系では細片

状、砂岩系では土砂状になるなど一部で劣化が進行している(図-5)。また劣化の程度は施工後の経過年数が長いほど顕著であつた。



亀裂を生じた泥岩。さらに劣化が進むと細片状となる。



劣化が進行し土砂状になった砂岩。

図-5 劣化した割ぐり石の例

石材が劣化に至ったメカニズムと今後、他の石材においても劣化が生じる可能性の有無を検討するため、耐久性試験として乾湿繰り返しによるスレーキング試験を実施した。現地では冬季においても気温が0℃を下回ることが少ないため、同じ耐久性試験である凍結融解試験は実施しなかつた。試験は供試体作成後、以下の手順を1サイクルとし、これを繰り返した。

- ① 24時間以上風乾後40℃で48時間乾燥
- ② 室温まで冷却後、24時間水浸した後、排水水浸開始前と終了時に試料の観察を行い、表-2に示すスレーキング指数に従い、これを判定した。

表-2 スレーキング指数

区分	0	1	2	3	4
形状					
変化なし	変化なし	割れ目が少しできる。 または、周辺が少し崩れる。	全体に割れ目が多数でき、いくつかの岩片がはがれる。または、周辺がかなり崩れる。	全体が細片化する。 または周辺がほとんど崩れる。	全体が泥状化 または全体が砂状化

A ; 泥岩によくみられるタイプ B ; シルト岩、砂岩、凝灰岩によくみられるタイプ



表-3 スレーキング試験結果

	1回目		2回目		3回目		4回目		5回目		6回目		7回目		8回目	
	開始	終了	開始	終了	開始	終了	開始	終了	開始	終了	開始	終了	開始	終了	開始	終了
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0.5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1.5	1.5
3	0	0	0	0.5	0.5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
7	0	0	0	0	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	1	1	1
8	0	0	0	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	1	1	1	1	1	1	1
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0.5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

試験の結果を表-3 に示す。スレーキング現象の進行をより詳細に観察するために、今回は表-1 に示した指数をさらに2分類し判定を行った。その結果、サイクル数が増加するにつれ、スレーキング指数ならびにスレーキングの発生率とも増加する傾向が見られた。特にシルト岩～泥岩に分類されるものは、程度の差こそあれ、その多くがスレーキングを生じている。この原因については、膨潤性鉱物の存在等、複数の要因が考えられ、未だ断定はできていないが、スレーキングを生じた試料に表面に硫酸塩鉱物の結晶が析出していることから(図-6)、析出の際に生じる結晶圧によって亀裂等の劣化が生じているものと推測できる。今後はこのような劣化しやすい石材の劣化機構や評価方法を整理していく必要がある。

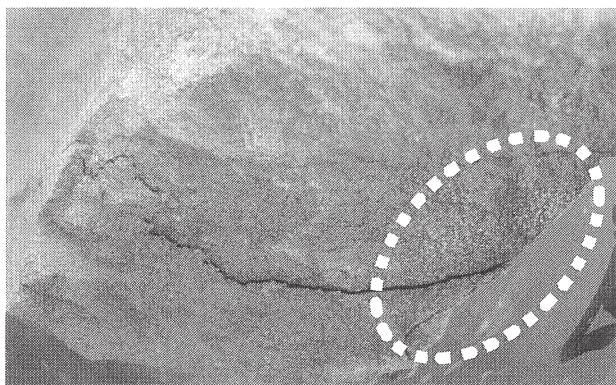


図-6 スレーキングを生じた試料  
(点線内は析出した硫酸塩鉱物)

### 3.3. 既存構造物の強度測定手法の検討

強度試験に採用したエコーチップは、本来は金属の硬度を測定するために開発された試験装置であり、小型で軽量、さらに操作が容易であるという利点を持っている(図-7)。また対象物に与えるインパクトエネルギーがD型インパクト装置で11Nmm、同G型で90Nmmであり、同じく非破壊強度試験機であるシュミットハンマーKS型(2207Nmm)と比べ約1/20~1/200

と非常に小さい。そのため対象物を損傷させることなく、強度を測定することが可能である。しかしながら、インパクト装置およびインパクトエネルギーが小さいため、測定結果が石材全体の強度より、打撃地点の部分的な強度の影響を受けている可能性もあるため、これについて検証をおこなった。

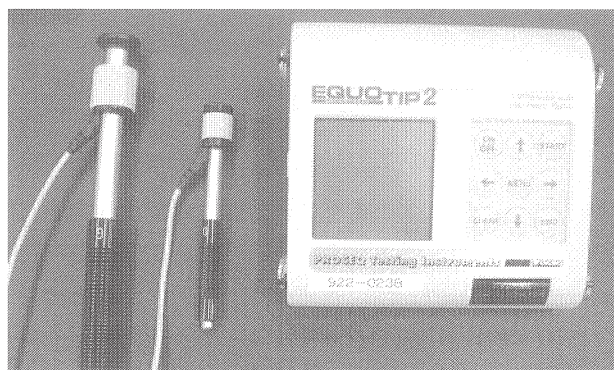


図-7 エコーチップ試験機

(左よりG型インパクト装置、同D型、データロガー)

#### 1) 測定方法について

表面が風化した岩石の未風化部分の強度をシュミットハンマーによって測定する際は、同一地点で複数回打撃を行う測定方法である「連打法」が適するとされている(松倉・青木, 2004)。これは、連打することによって岩石表面の風化層、緩み層の影響を除去できるためであり、またこのことはエコーチップ試験でも同様に適用できるとしている。このことについて検証試験を行った。試験には、花崗岩、安山岩、玄武岩、砂岩、泥岩、礫岩の石材について各2試料ずつ、計12試料を使用した。試料の形状はいずれも直径5cm、高さ10cmの円柱状である。また、インパクト装置はいずれもD型を用いた。試料の端面において10回の連続測定によって得られた結果を図-8 に示す。測定値の分散を少なくするため、図-9 のように各試料の上下端面においてそれぞれ9箇所ずつ、計36箇所を測定し、その平均値を求めた。

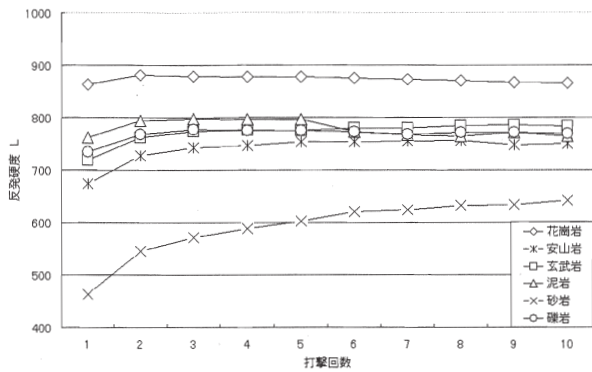


図-8 測定回数と反発硬度Lの関係

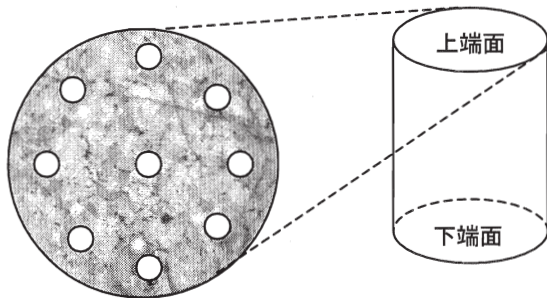


図-9 打撃箇所

初回から数回の測定では反発硬度Lは増加するものの、その後ほぼ一定の値となる。数回の打撃によって風化部の影響が除去できたためと推測でき、このことから石材全体の強度を求めるには初回値ではなく、一定となった後の最大値を採用することが適当であると判断できる。しかし一定となる回数は岩種によって異なり、砂岩や安山岩でその回数が多くなっている。また間隙率の大きいこれらの岩石は、繰り返しの打撃によって未風化の組織が塑性変形を受けた可能性があり、このような岩石の場合は測定値としてどの値を採用するか、さらに検討が必要である。

## 2) 測定値に与える鉱物の影響について

エコーチップ試験機を使用するにあたり、そのインパクト装置ならびに打撃エネルギーが小さいため、測定値が打撃箇所の鉱物等によって影響を受けることが考えられる。このため上述1)で行った測定結果の分散を整理し、各岩種ごとにヒストグラムを作成した(図-10)。縦軸は頻度、横軸には平均値からのずれを割合で表している。なお、今回の測定値は10回の連打法によって得られた最大値を用いた。これより、安山岩、泥岩、砂岩においてはほぼ正規分布に従っており、その幅も $\pm 5\sim 10\%$ の範囲内である。花崗岩、玄武岩においては、ざくろ石や黒雲母等の風化を受けやすい鉱物を打撃した際に小さな値となる傾向があった。また礫岩は比較的ばらつきが大きく、打撃箇所による影響を

比較的受けやすいもののその幅は $\pm 10\%$ に収まる。

このことより、粒径が小さい岩石に対しては測定位置による影響は小さいこと、粒径の比較的大きな岩石や、風化を受けた鉱物を含む岩石を測定する際は、その岩石を代表する箇所を測定し、また複数箇所の測定が望ましいことが分かった。なお測定中に、打撃角度や打撃地点のずれが生じると測定値が大きく変化することがあるため、測定にあたっては機器のぐらつきを

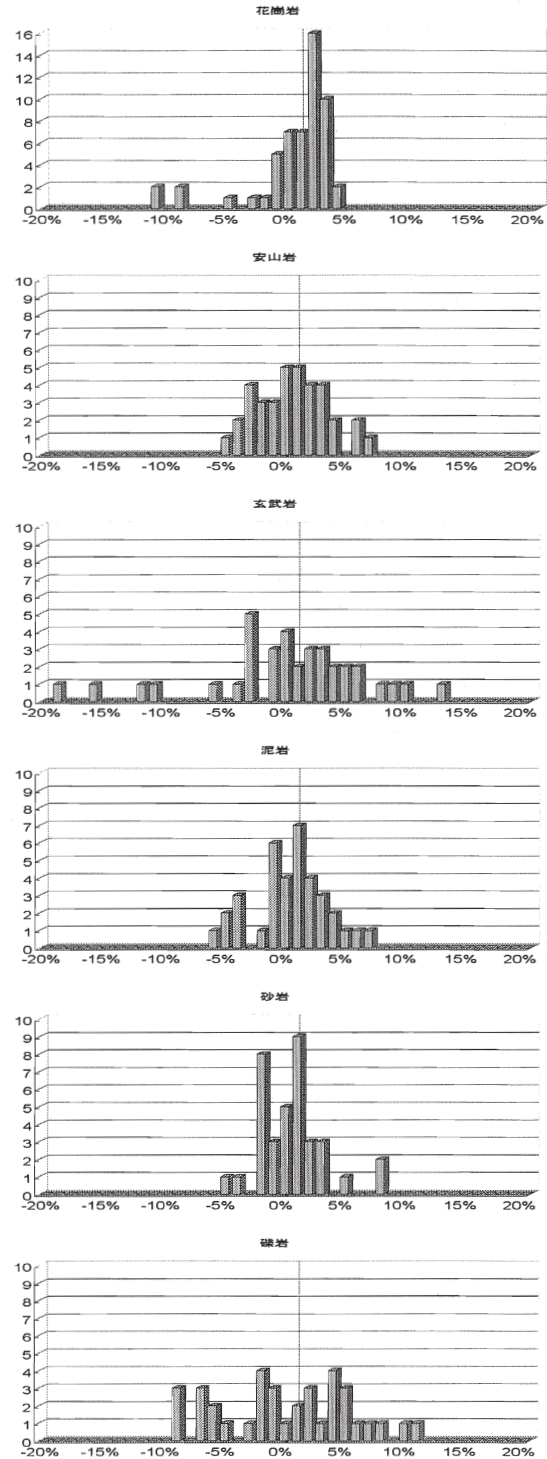


図-10 測定箇所の違いによる測定値の変化



防ぐように心がけなければならない。

### 3) 一軸圧縮強度との比較

エコーチップ試験を実施した石材試料を一軸圧縮試験に供し、反発強度 L (18箇所測定) の平均値) 一軸圧縮強度 UCS の比較を行った (表-4)。

表-4 一軸圧縮強度試験結果

石材名	初回値	最大値	UCS (MPa)
花崗岩	882.34	903.83	127
〃	860.06	886.89	62.5
安山岩	663.89	775.56	68.7
〃	684.39	788.00	73.5
玄武岩	725.11	802.56	142
〃	714.06	801.45	130
泥岩	779.99	829.95	114
〃	745.28	793.11	147
砂岩	568.73	704.73	35.9
〃	356.72	597.62	5.07
礫岩	746.06	802.67	60.6

両者の関係を縦軸に UCS、横軸に L 値をとり、値をプロットした結果を図-11 に示す。

ここで得られた換算式の決定係数は測定値として初回値を採用したもので 0.79、最大値を採用したもので 0.71 であり、ややばらつく傾向にある。考察するに今

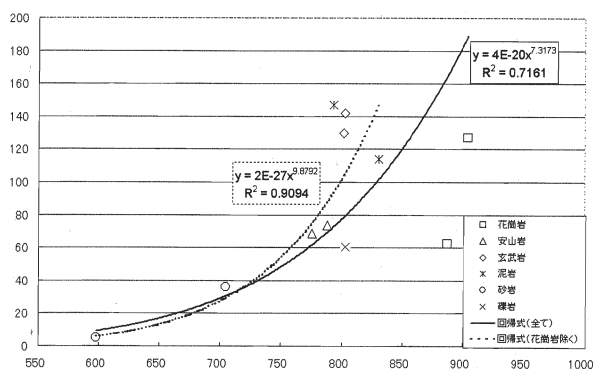
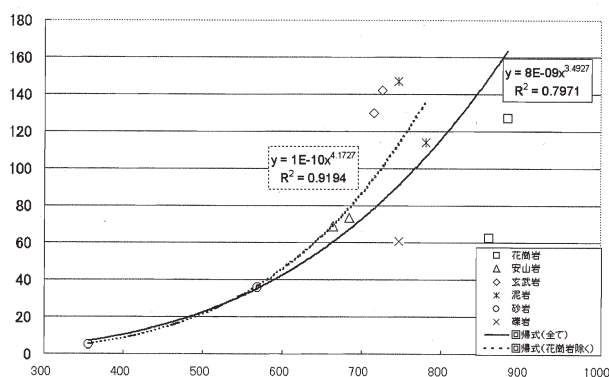


図-11 L 値と UCS の関係図 (上: 初回値、下: 最大値)

回試験を行った石材のうち花崗岩にはクラックが多数存在していた。これらのクラックはいずれも密着していたものの、一軸圧縮試験においては、これが弱面となり破壊に至ったと考えられる。今後このような弱面

を持つ石材についても評価できるような手法を検討する予定である。なお、今回の測定結果の中からクラックによる影響が大きいと思われる花崗岩を除いた上で改めて換算式を求めると、その決定係数は初回値、最大値のどちらを用いても 0.9 程度と非常に強い相関となった。

### 4) 既存構造物への適用性について

エコーチップ試験を既存構造物に適用するにあたっての検討結果を以下のとおり整理する。

- ① 石材が風化を受けている場合は、連打法による測定が適している。しかしながら軟質な石材に対しては、塑性変形を生じるおそれがあり、打撃回数等は今後の検討事項である。
- ② 測定位置による値の変化は少ないが、対象とする石材の代表的な箇所を複数選び測定することにより誤差を最小にできる。
- ③ エコーチップ試験の測定結果と一軸圧縮強度には高い相関があるが、クラック等の弱面を持つ石材はエコーチップ試験結果がこれを反映できず相対的に高い値を示す。

加えて、エコーチップ試験は表面がある程度平滑でなければならないとされているが、土木構造物に使用されている石材の表面は粗いことが多く、また試験のために石材表面を研磨することは困難である。粗度による影響ならびにこれらの石材に対する測定手法の検討は今後の課題であり、引き続き行っていく。

## 4. まとめ

- (1) 石材の利用実態の把握、耐久性評価のための基礎資料として、「石材を使用した歴史的土木構造物データベース」ならびに「全国採石場マップ」を作成した。
- (2) 既存の土木構造物の調査から石材劣化の状況や劣化の原因について整理を行うとともに、石材劣化の事例に対して、耐久性試験を実施することにより、その原因の検証を行った。
- (3) 既存構造物に使用される石材の強度評価のため、エコーチップ試験の適用性を検討し、適切な試験方法や留意点、測定値の一軸圧縮強度への換算式等を示した。

## 参考文献

- 1) 矢島良紀:「自然素材としての石材の土木構造物への有効利用法に関する研究」, 土木技術資料, 47-3, pp. 12, 2005.