

◆ 特集：建設材料研究の新たな展開 ◆

石材を用いた土木構造物DBの作成と石材の劣化事例 －土木構造物への石材利用とその技術的な課題－

矢島良紀* 佐々木靖人**

1. はじめに

環境影響評価法、自然再生推進法、景観法が施行される等、機能性や効率性が最優先されがちな土木構造物に対しても自然環境や景観に配慮することが要請されている。例えば、多自然型川づくり等における護岸工のように、従来はコンクリート等の人工素材が使われていた構造物に対しても石材のような自然素材を使用する事例が増加している。

平成15年7月に国土交通省より発表された「美しい国づくり政策大綱」¹⁾では、「良質なものを長く使う姿勢」や「地域特性に根ざした美しい社会資本の整備」等の基本姿勢が提示されている。

石材は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。また工事にともなって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も期待できる。

しかし石材の使用方法に関しては体系化がなされておらず、個別事例毎に検討がなされているのが実情である。また、使用環境によっては早期劣化等の問題が生じるおそれもある。そこで本論文では、石材の活用方法についての提案をおこなうため、我が国における石材利用の変遷や現在の利用状況、具体の現場で問題となった石材の劣化事例とその原因を報告するとともに、耐久性評価の基礎資料として作成した「石材を使用した歴史的土木構造物データベース」²⁾について紹介し、今後の石材活用に向けた技術的な課題について述べる。

2. 我が国における石材利用の変遷

石材は木材と並び、我が国において構造物に対し、伝統的に使用されてきた素材である。

歴史を遡れば、7世紀に建造された奈良県の石舞台古墳のように巨石を使用した構造物があり、戦国時代以降は各地で城の石垣に多用されたほか、堤防、砂留め（砂防堰堤）等の土木構造物や石畳等にも広く使用されるようになった。また、江戸期以降ではヨーロッパよりもたらされた技術によって九州地方を中心に石造アーチ橋が多数建造されており、その多くが現在も供用されている。

明治以降、土木構造物の建造に西洋の近代的な工法が採用されるようになってからは、石材の用途は一層多様化した。特に我が国の近代化のために招かれたいわゆる「お雇い外国人」の指導のもとに建造された堰堤や護岸、堤防等、また交通網の発達とともに建設が進んでいったトンネルや橋梁等の構造物に対して石材が広く使われるようになった（写真-1）。

その後、我が国でコンクリートが普及しだしてからも、「練積み工法」による建設や、コンクリートに比べ強度が高いという特性を用いて、堰堤の水通し・水叩き等の部位や、コンクリート構造物の表面に石張りとして使用される例が多くなった。

このように古代より広く使用されてきた石材であるが、その切り出し、運搬および施工には多大な労力を要することもまた事実である。このため、殊に戦後の高度経済成長のもと安価で施工性の良いコンクリートが普及するようになると、石材の土木構造物への使用は減少していった。

しかし近年になって、前述したように周辺環境との調和を目的として、土木構造物に再び石材を用いる事例が増えつつあり、また外国産の石材ではなく、地場の石材を使用し、その地域らしい景観の形成に寄与している事例も見られる（写真-2）。



写真-1 三角西港護岸 (熊本県宇城市三角町)
オランダ人技師ムルドルの指導により明治初期に建設



写真-2 多自然型工法への石材の使用例 (茨城県つくば市)
河川改修に際し、周辺環境との調和と材料の有効利用を図る目的で、工事に伴う発生材 (筑波石) を用いて石積み護岸を施工

3. 石材利用の現状と技術的課題

3.1 石材利用手法の整備状況と問題点

平成2年に当時の建設省により「多自然型川づくり実施要領」が策定されて以降、各地でこれに基づいた河川事業が実施され、自然素材として石材を用いる事例が増加した。

また平成18年には、多自然型川づくりを発展させた「多自然川づくり」の指針が定められ、個別箇所のみならず河川環境全体を考慮した取り組みが求められている。これらを背景に平成18年8月に国土交通省河川局河川計画課より「河川の景観形成に資する石積み構造物の整備に関する資料」³⁾が公表され、その中で、河川における石積み構造物の実態や美しい石積み構造物を作る上での留意点、発生材のストックによる石材の安定確保方策、石積み技術者の育成等、今後の石材の利用について検討すべき項目が示されている。また、主に民

間企業によって開発された技術のデータベースであるNETIS (公共工事における新技術情報提供システム) にも多自然型工法として石材を活用した新技術が数多く登録されている。

このように石材の使用法については、検討が進められているが、一方で、石材そのものの耐久性に関してはあまり評価がなされておらず、これに関しては明確な基準がないのが現状である。例えば、日本工業規格 (JIS) A5003石材⁴⁾では、石材の欠点は、寸法の不正確、そり、き裂、むら (色調の不揃い)、くされ (部分的な風化)、欠け、へこみ等と記されているにすぎない。また石材の分類に関しても、花こう岩類、安山岩類といった大きな分類の他は形状および一軸圧縮強度による区分のみであり、参考値として吸水率及び密度が示されている程度である (表-1)。これは老朽化しやすい木造橋に対して、石造橋を永久橋と呼ぶことがあるように、そもそも石材は丈夫であるという考えに基づいており、事実、多くの石材は他の素材と比較しても長期にわたって使用に耐えるが、一部の石材とその使用環境によっては想定した以上の早期劣化が生じることもある。

このような早期劣化を避けるため、重要構造物であるダム (ロックフィルダム) に使用する石材の耐久性に関しては、土木研究所によって数多くの試験が実施されており (例えば⁵⁾、試験結果による

表-1 JIS-A5003による石材の物性区分

種類	圧縮強さ N/cm ²	参考値	
		吸水率 %	密度 g/cm ³
硬石	4,903以上	5未満	約2.7~2.5
準硬石	4,903~981	5~15	約2.5~2
軟石	981未満	15以上	約2未満

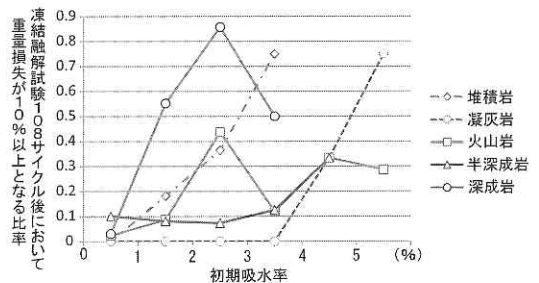


図-1 凍結融解試験による重量損失と初期吸水率⁵⁾などによる

と凍結融解に対する耐久性（凍結融解試験108サイクル後において供試体の重量損失が10%未満のものは耐久性が良好と判断できる）は岩石の吸水率と良い相関があることが示されている（図-1）。また、モンモリロナイト等の膨潤性粘土鉱物が多く含まれると乾燥・湿潤の繰り返しによって、急速に劣化を生じる（スレーキング現象）ことがあるほか、塩類が析出する際の結晶圧によって、劣化が促進されることもある（塩類風化）。

3.2 石材の早期劣化事例の分析

ここで、河川護岸に使用した石材が早期劣化を生じた事例を紹介する。当該河川は国立公園地域内にあることから、施工にあたっては多自然型工法としてかご工が採用されたが、中込材として使用した割ぐり石の一部に早期劣化が生じた（写真-3）。このため、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調査を実施した。

割ぐり石として使用された石材は、四万十帯に属する原石山より採取された砂岩および泥岩である。採取されたばかりの石は新鮮堅硬で一軸圧縮強度は140～200MPaであり、吸水率も15%未満を示すほか、目立った亀裂もなく、JIS A5006割



写真-3 劣化を生じた割ぐり石

ぐり石（物性区分は表-1に示したA5003石材⁴⁾と共通）によれば硬石に分類される石であった。しかし、施工後半年から数年程度の短期間のうちに劣化を生じ、劣化の著しいものについては砂岩系の石材は軟質化し土砂状に、泥岩系の石材は細片状になっているほか、これらの割ぐり石について物理試験を実施した結果、施工時と比較して密度の低下や吸水率の増加が見られ、劣化が進んでいることが伺えた。

劣化の原因として、当該地域は比較的温暖で冬季にあっても気温が0℃を下回ることが稀であることから、凍結融解の繰り返しによる劣化は起こりにくい。また現地調査では、常時水中に没している石材については劣化が進んでいなかった。そこで、劣化は乾燥湿潤の繰り返しによる可能性が高いと判断し、膨潤性の粘土鉱物の確認のためX線回折装置を用いた鉱物分析および耐久性試験として乾湿繰り返し試験を実施した。

乾湿繰り返し試験の方法は、地盤工学会基準（JGS 2125-2006 岩石の促進スレーキング試験）⁶⁾に準拠し、以下の手順を1サイクルとして行った。

- ①24時間以上風乾後40℃で48時間炉乾燥
- ②室温まで冷却後、24時間水浸した後、排水試験サイクル毎に地盤工学会⁶⁾に基づきスレーキング指数を判定した。なお、今回は劣化の進行を詳細に観察するため、各指数をさらに2分類し判定した。

原石山より採取した未風化試料（いずれもシルト岩）についての試験結果を図-2、試験前後の試料の変化を写真-4に示す。乾湿繰り返しによる劣化はゆっくりとしたものであったが、数サイクルから遅くとも10サイクル程度までには、クラックが発生し、その後網目状にクラックが発達、開口した。また、クラックの発達に伴い、一部の試料からは錆汁の溶出が見られたほか、試料表面に白色結晶の晶出を確認した。

X線回折装置を用いた鉱物分析では、膨潤性のある粘土鉱物が確認できなかったことから、結晶の析出時に発生する応力によりクラック等の劣化が進行する塩類風化であるとの認識のもと、この結晶に対して、電子顕微鏡観察ならびにエネルギー分散型X線分析装置による元素分析を行った。

その結果、白色結晶に含まれている元素は、Ca、S、Oの3種類であり、この元素の構成比率ならび

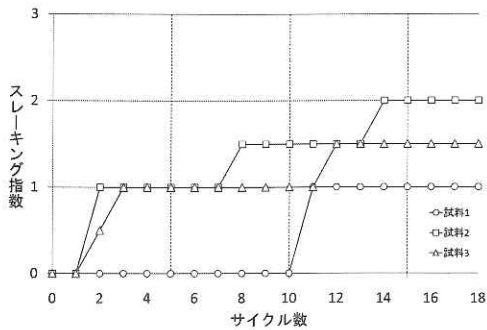


図-2 乾湿繰り返し試験結果

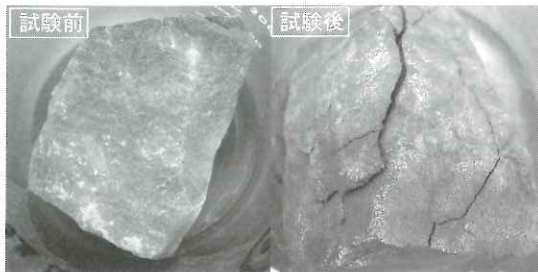


写真-4 試験前後の試料の変化

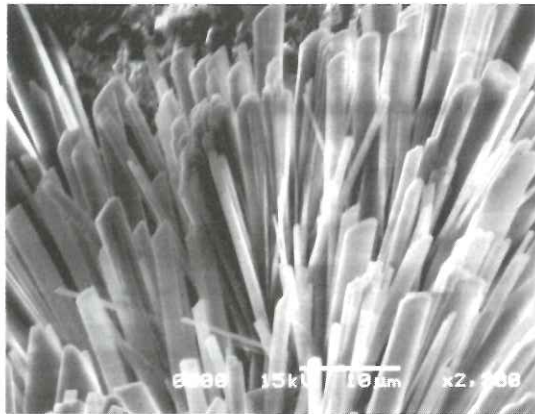


写真-5 白色結晶（石膏）の電子顕微鏡写真

に電子顕微鏡観察結果（写真-5）よりこの結晶は硫酸塩鉱物の一つである石膏（ CaSO_4 ）であることがわかった。このメカニズムを考察すると、試料の光学顕微鏡観察で黄鉄鉱が確認されたこと、一部の試料より錆汁の溶出が見られたことから、岩石中に含まれた黄鉄鉱等の硫化鉱物が酸化を受け、硫酸を生成し、それが岩石中のカルシウムと結合して石膏を生成、乾燥に伴い石膏が析出したと判断でき、この時の応力が劣化の一因となった可能性が考えられる。

本事例では、かご工に使用した割ぐり石の調達

要件として、「JIS A5006割ぐり石に適合していること」としており、現場で使用された石材もこれに関しては適合したものとなっていた。しかしながら、本件において劣化は確かに生じており、石材を使用する際には、既存の基準のみならず、使用条件によっては岩石とそこに含まれる鉱物についても考慮する必要があることがわかった。ただし、問題となる鉱物がどの程度含まれていれば劣化を生じさせるか、ということについては、使用条件以外にも岩石の膠結物や固結度の違い等、様々な条件によって劣化の閾値は変化すると考えられる。そのため、今後はこのように劣化した事例および劣化していない事例について収集・調査を行い、劣化の原因とその指標について明確化を行っていく予定である。

4. 土木構造物データベースの作成

石材の耐久性を確認するために、最も確実な方法は実際の使用環境における暴露試験であるが、これは試験期間が非常に長期にわたることから、実務では促進試験が用いられることが多い。

ところで、過去に建設された構造物に使用されている石材は、その建設時より現地の環境下で暴露されていると見なしてよい。そのため、これらの構造物に使用された石材の劣化程度は、石材の使用構造物とその使用環境に応じたおおよその耐久性についての指標となる。

そこで事例調査の基礎資料とするために、主に江戸末期から昭和初期にかけて建設がなされた土木構造物（歴史的土木構造物）のうち石材を使用したものについてデータベース化を行った。データベースの作成にあたってはその収録条件として以下の2点を設定した。

- ①外部に石材を使用した土木構造物（ただし建物を除く）
- ②建造年代が原則として江戸末期～昭和初期であること

データ項目として構造物の種類（ダム・堰堤、トンネル、堤防・護岸、橋梁・橋脚、水路・運河、水門、その他、の7分類）、諸元、所在地、建設年、石材の種類、原石産地、石材の使用方法を設定し、それぞれ整理をおこなった。また、所在地が特定できた全ての構造物に対し座標の付与を行い、GISでの利用に備えた。

これらのデータは土木学会の調査結果⁷⁾や国土交通省ならびに各都道府県の教育委員会等が作成した資料等(例えば^{8)~10)}を参考に整理したが、一部では現地調査を実施しデータの補足を行った。データベースより作成した歴史的土木構造物の分布状況を図-3に示す。

これらの構造物は図-4に示すとおり、明治維新頃より建設数が増加し、1880年~1940年にかけてそのピークとなっている一方、戦後その数は急激に減少していることがわかる。

構造物の種類別(表-2)に見ると「橋梁・橋脚」が最も多く1,154件と全体の58%を占める。これは九州地方を中心に多数の石造アーチ橋が建造されたことに加え、鋼橋においても橋脚やその隅石に石材が使用され、またその多くが現存しているためと見られる。次いで「ダム・堰堤」が316件、16%程度を占めている。特に砂防堰堤に使用された例が多く、明治期の空積み堰堤を始め、

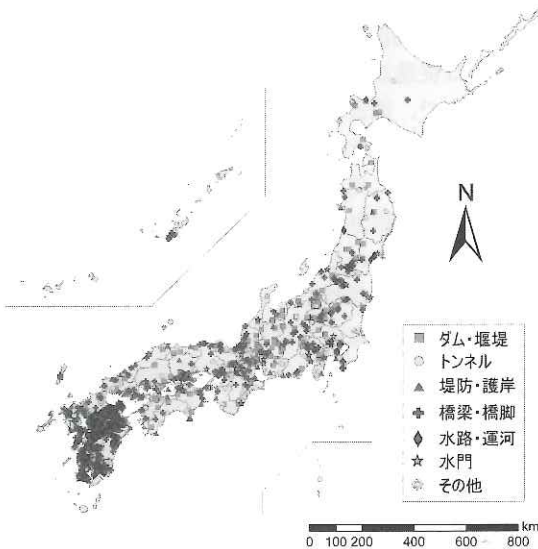


図-3 歴史的土木構造物データベース²⁾を改変

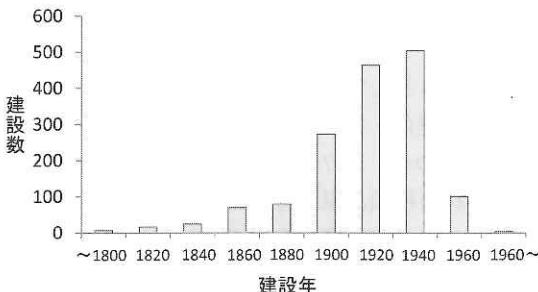


図-4 歴史的土木構造物の建設年

その全部または一部に石材を使用したものが、現在でも数多く存在し、その効果を発揮している。また、トンネル(カルバート含む)は、内部まで石材を使用した石造トンネルはあまり多くはなく、多くは坑門のみ、またはその一部に石材を使用している。その他、堤防や護岸、水門等にも石材は広く使用されていることがわかる。

構造物に使用された石材の内訳を表-3に示す。石材種類が不明なものも相当数あるものの、軟らかく加工が容易なため九州地方を中心に石造アーチ橋に多用された凝灰岩類が突出して多く、次いで強度が高く、水門や堰堤、橋脚等に全国で幅広く用いられた花崗岩、安山岩が続いている。一般的に、これらの構造物は、現地周辺で採取された石材を使用することが多いが、その構造物が社会的に特別な意味を持つ場合など、遠方より良質の石材を調達する事例も見られる。

作成したデータベースをもとに、実態調査を行った結果、使用されている石材の多くは健全な状態にあるものが多いものの、一部の石材については凍結融解等による劣化(写真-6)や、想定以上の応力等による亀裂の発生が確認された。また石材そのものには劣化が少ないものの、接合部から崩壊しているものもある(写真-7)。

本データベースはこのような劣化実態調査を行う上で有用なツールであるが、いくつかの改善すべき点が残されている。例えば、収録したデータには東北日本のデータが少ない等、地理的な偏りがあり、使用石材が不明なものも多い。耐久性の指標とするためには、石材種類、構造物種類、使

表-2 収録した土木構造物の内訳

	北海道	東北	関東	中部	近畿	中国	四国	九州	全国
ダム・堰堤	6	15	45	146	53	24	13	14	316
水門	0	4	5	12	5	16	2	7	51
堤防・護岸	1	4	10	19	11	32	12	32	121
トンネル	3	16	27	78	46	21	12	71	274
橋梁・橋脚	3	32	29	70	48	27	15	930	1,154
水路・運河	1	6	2	2	0	0	0	1	12
その他	11	0	10	0	0	3	2	9	35
合計	25	77	128	327	163	123	56	1,064	1,963

表-3 土木構造物の使用石材

花崗岩	安山岩	凝灰岩	砂岩	その他	不明
147	41	798	26	28	923

参考文献

- 1) 国土交通省：美しい国づくり政策大綱, 15p, 2003
- 2) 矢島良紀・佐々木靖人：石材を使用した歴史的土木構造物データベースの作成、日本応用地質学会平成18年度研究発表会講演論文集, pp.437-438, 2006
- 3) 国土交通省河川局河川計画課：河川の景観形成に資する石積み構造物の整備に関する資料, 34p, 2006
- 4) 日本規格協会：JISハンドブック（土木Ⅱ）, pp. 686-690, 2006
- 5) 建設省土木研究所：寒河江ダム岩石材料耐久性試験、土木研究所資料, No.1621, 1980
- 6) 地盤工学会：岩の試験・調査方法の基準・解説書 平成18年度版, pp.1-42, 2006
- 7) 土木学会土木史研究委員会編：日本の近代化遺産－現存する重要な土木構造物2800選－ [改訂版]、土木学会, 374p, 2005
- 8) 国土交通省砂防部：登録有形文化財に登録された歴史的砂防施設、国土交通省砂防部ホームページ, <http://www.mlit.go.jp/river/sabo/bunkazai/>
- 9) 青森県教育庁文化課編：青森県近代化遺産総合調査報告書, 149p, 2000
- 10) 上塚尚孝ほか編：熊本の石橋313、熊本日日新聞社, 242p, 1998



写真-6 歴史的土木構造物に見られた石材の劣化



写真-7 接合部の劣化により崩壊した護岸

用地域がバリエーションに富むことが望ましく、今後とも引き続き内容の充実に努めていく。

5. おわりに

土木構造物への石材の有効利用のためには、安全性の確保が第一である。今後、多自然型工法等を採用した事業において石材の利用が増加することも予想されるが、その機能や外見のみならず、使用環境における耐久性も考慮に入れ石材の選定を行う必要がある。石材耐久性についての指標となるパラメータの整理を行うため、引き続き実態調査と劣化機構の研究を進めて行く予定である。

矢島良紀*



独立行政法人土木研究所
つくば中央研究所材料地盤研究グループ地質チーム研究員
Yoshinori YAJIMA

佐々木靖人**



独立行政法人土木研究所
つくば中央研究所材料地盤研究グループ地質チーム
Yasuhiro SASAKI