大谷石の吸水膨張特性に関する実測評価

MEASUREMENT EVALUATION ON CHARACTERISTICS OF EXPANSION ON WATER ABSORPTION FOR OYA STONE

鈴木裕也 — *1 小西敏正 — *2
中村成春 — *3 西堀千穂 — *4

Yuya SUZUKI — *1 Toshimasa KONISHI — *2
Shigeharu NAKAMURA — *3 Chiho NISHIBORI — *4

キーワード：
大谷石, 凝灰岩, 吸水膨張, 拘束変形

Keywords:
Oya stone, Tuff, Expansion on water absorption, Restraint deformation

The absorption factor of an Oya stone is very high, and it expands greatly when it absorb water. Moreover, the compressive strength in the wet condition quite falls less than in the dry condition. Furthermore, as compared with details of the stone, the specific gravity of rough-textured Oya stone is small, and its compressive strength is also low both in the dry and wet condition. The swelling pressure is hardly produced even if the Oya stone absorbs water for a long time, and then the internal structure is vulnerable. We are going to get behind the behavior of the Oya stone in this study.

1. はじめに

大谷石は、栃木県大谷町付近に採掘場があり、古くから建築物の内外壁用建材として幅広く使用されている。大谷石の一般的な特徴は、次のようにまとめられる¹⁾。大谷石の埋蔵分布については、10度前後の傾斜で分布し、上々部層では巨大なみそが密集し石材としての価値はなく、30m 前後の上下部層では石材として優良で、185m 前後の中部層では石材としてもっとも採掘され、100m 前後の下部層では風化により崩れやすい石材が多い。その成因は、約 2000 万年前の新生代第 3 紀中新世の前半に、流紋岩質火山の爆発により噴出した火山灰や軽石を含んだ火山灰質が堆積凝固したもので、うすい緑色の凝灰岩の一種である。石基は、多量の浮石質ガラス、斜長石、石英と少量の黒雲母角閃岩輝石で構成され、また、褐色のみそには、含水量の多い沸石およびモンモリロナイトの粘土鉱物からなる少量の蛋白石鉄塩鉱物などの不純物を含む。さらに、石質が軟らかいために加工が容易で、質量も軽いことが知られている。

しかしながら、その大谷石の建材としての基本的な諸特性については、十分に検討されておらず、不明な点が多い。特に、水分吸収に伴う膨張特性や、その膨張を押さえ込んだ拘束特性は、外装材や塀、擁壁など建築物の外壁に使用する際に明確であるべき材料品質と考えられるが、定量化されていない。また、屋外に露出した大谷石は表層に剝離損傷が発生することが知られており、凍害や化学反応などの原因が挙げられているが、拘束を受けた状態での水分吸収に伴う膨張現象という視点での研究はほとんどなされていない。

本報告は、大谷石の吸水膨張特性を把握し、建材として使用する上での基礎的資料を得ることを目的としている。

2. 実験概要

実験は、見掛比重試験、吸水率試験、圧縮強度試験、一面吸水膨張試験、拘束変形試験を実施した。ここで、大谷石の岩種は、粗目、中目、細目の 3 種に等級分けされており、それぞれに力学的性質が異なること²⁾が報告されている。そのため、本報告では粗目、中目、細目の各 6 体、計 18 体の試験体を実験に供した。

2.1 見掛比重試験、吸水率試験、圧縮強度試験

本試験では、JIS A 5003 (石材) に準じて、見掛比重、吸水率、圧縮強度を実測した。図 1 に吸水率試験の概要を示す。JIS による圧縮強度試験では、図 1 により十分に吸水させた後の湿潤状態が指

図 1. 吸水試験方法

図 2. 一面吸水膨張試験方法

写真 1. 強度試験概要

*1 宇都宮大学大学院工学研究科 博士後期課程・工修
(〒321-8585 栃木県宇都宮市陽東7-1-2)

*2 宇都宮大学工学部建設学科 教授・工博

*3 宇都宮大学工学部建設学科 助教授・工博

*4 宇都宮大学大学院工学研究科 博士前期課程

*1 Graduate Student, Graduate School of Engineering, Utsunomiya Univ., M. Eng.

*2 Prof., Dept. of Architecture and Civil Engineering, Faculty of Engineering, Utsunomiya Univ., Dr. Eng.

*3 Assoc. Prof., Dept. of Architecture and Civil Engineering, Faculty of Engineering, Utsunomiya Univ., Dr. Eng.

*4 Graduate Student, Graduate School of Engineering, Utsunomiya Univ.

定されているが、乾燥状態での性質も比較するため、105℃～110℃の電気乾燥器内で恒量になるまで乾燥させた試験体と、吸水率測定直後の湿潤状態の試験体について圧縮強度試験を行った(写真1)。

2.2 一面吸水膨張試験

本試験では大谷石が外壁材として使用されている状況を考え、石材の一側面のみが水分吸収面となる状態での吸水膨張状態を検討した。試験体は、圧縮強度試験と同じ石材から切り出したものを使用し、粗目、中目、細目各3体、計9体の試験体 100×100×150mmを用いた。試験体は、予め 105℃～110℃の電気乾燥器内で恒量になるまで乾燥させた後、質量及び寸法を計測する。図2のように浸水面と乾燥面の両面を測定面とし、試験体にコンタクトチップを取り付け、コンタクトゲージによって、歪みを実測した。測定面以外の面の水分蒸発を防ぐため、試験体の側面にはアルミテープでシールを施した。試験体の上部 70mm が常に水上面となるように浸水させた状態で 20±3℃、湿度 60%RH の恒温室内に 10 日間置き、変形状況を継続的に測定した。ここでは上面の乾燥と下面の吸水を同時に行っているため、質量の変化は質量変化率として評価した。

2.3 拘束変形試験

本試験では、大谷石が外壁材や塀材として雨水がかかる部位に使用されている状況に即し、拘束状態での吸水膨張特性を検討した。実験に使用した試験体は、両端面を研磨して平滑にし、100×100mm断面、高さ 140mm とした。大谷石岩種は細目、中目、粗目の3種類とした。それぞれの岩種で無拘束の自由変形を測定するため、試験体の側面 100mm 間でクリップゲージを取付け、伸び量を実測し、歪みに変換した。

拘束変形試験は、大谷石角柱体の両端部を、鉄板と鋼製ボルト 4本からなる拘束フレームで外部拘束した状態で 20±3℃の恒温室内の水中に静置し、大谷石が膨張した際に鉄板とボルトで膨張変形を抑え、試験体に拘束応力を発生させる。鋼製ボルトは発生拘束応力に対して弾性変形すると考えられ、拘束応力作用時のボルトの歪みを測定することで、別途測定した拘束フレームのみの実測剛性を用いて、大谷石に作用している拘束応力が間接的に定量できる。

拘束フレームの設置及び実験概要を、図3及び写真2に示す。外部拘束用ボルトは、中央に長さ 10mm の歪みゲージを貼り、それをブチルゴムテープでシールし、防水に配慮した。拘束治具は、試験体側面 4 面に、それぞれボルトを 1 本づつ配し、4 本のボルトで拘束をした。歪みと温度の測定データは、データロガーを中継してパソコンに記録した。また、拘束フレームのみの剛性を測定するため大谷石のない状態で拘束フレームのみの引張試験を行った。その際、大谷石試験体断面と同面積の鋼板を拘束フレーム内側にボルトで取付け、実際の拘束状態と同様に拘束フレームの鋼板部に面による引張力を加えた。拘束試験体が 2 体、無拘束の自由変形試験体が 1 体を同時に測定した。ここで、拘束を始めてからの材齢を拘束材齢と呼ぶ。拘束試験を始めたときの試験体は、手でボルトを隙間のないよう締め付けた状態で拘束フレームに固定し、その状態を 0 とした。

図4に拘束変形試験の評価モデルの概要を示す。拘束フレーム全体にかかる荷重 P_0 は、それぞれのボルトが負担する荷重 $P_i (i=1\sim4)$ との釣り合いから式(1)が成り立つ。

$$P_0 = P_1 + P_2 + P_3 + P_4 \quad \dots (1)$$

図3. 拘束フレーム概要

単位: mm

写真 2.1 拘束フレーム剛性測定状況

写真 2.2 拘束フレームの取付状況

写真 2.3 試験体の吸水状況

写真 2.4 拘束変形試験状況

写真 2. 拘束変形試験概要

図4. 拘束変形時の評価モデル

表 1. 見掛け比重、吸水率、圧縮強度試験結果

試験体	見掛け比重試験結果				吸水率試験結果(%)				圧縮試験結果(N/mm ²)			
	乾燥時		湿潤時 ^{*1}		測定値 ^{*1}		計算値 ^{*2}		乾燥時		湿潤時 ^{*1}	
	比重	平均	比重	平均	吸水率	平均			強度	平均	強度	平均
粗目	粗D	1.36	—	—	—	—	—	—	12.83	—	—	—
	粗D'	1.37	—	1.71	24.52	—	—	—	—	5.93	—	—
	粗E	1.38	—	—	—	—	—	—	14.62	—	—	—
	粗E'	1.38	—	1.70	23.31	—	—	—	—	5.69	—	—
	粗F	1.38	—	—	—	—	—	—	13.93	—	—	—
中目	中D	1.41	—	—	24.61	—	—	—	—	5.91	—	—
	中D'	1.40	—	1.74	—	—	—	—	19.00	—	—	—
	中E	1.39	—	—	24.28	—	—	—	—	5.81	—	—
	中E'	1.42	—	1.74	22.86	—	—	—	17.67	—	—	—
	中F	1.41	—	—	—	—	—	—	18.19	—	—	—
細目	細D	1.46	—	—	23.67	—	—	—	25.07	—	—	—
	細D'	1.45	—	1.79	—	—	—	—	—	8.00	—	—
	細E	1.45	—	—	—	—	—	—	24.52	—	—	—
	細E'	1.44	—	1.79	24.62	—	—	—	—	8.26	—	—
	細F	1.45	—	—	—	—	—	—	26.15	—	—	—
	細F'	1.45	—	1.79	—	—	—	—	—	7.91	—	—

*1. JIS A 5003 に基づき計測

*2. 計算吸水率は以下で求めた。

$$\text{計算吸水率}(\%) = \frac{\text{表乾質量} - \text{絶乾質量}}{\text{絶乾質量}}$$

図 5. 強度試験結果

拘束フレームのみの剛性 E_s は、各ボルトに生じた歪み ε_i ($i=1\sim4$) より式(2)で評価できる。

$$\left. \begin{aligned} P_0 &= \sigma_1 A_s + \sigma_2 A_s + \sigma_3 A_s + \sigma_4 A_s \\ &= (\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 + \varepsilon_4) A_s \cdot E_s \\ E_s &= \frac{P_0}{(\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 + \varepsilon_4) A_s} \end{aligned} \right\} \dots (2)$$

以上より、大谷石試験体に作用する拘束応力となる吸水膨張圧は、式(3)で求められる。

$$\left. \begin{aligned} P_0 &= \sigma_0 \cdot A_0 = (\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 + \varepsilon_4) A_s \cdot E_s \\ \sigma_0 &= (\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 + \varepsilon_4) \frac{A_s \cdot E_s}{A_0} \end{aligned} \right\} \dots (3)$$

3. 実験結果及び考察

3.1 見掛比重試験、吸水率試験、圧縮強度試験

表 1 及び図 5 に見掛比重試験、吸水率試験、圧縮強度試験の結果を示す。各試験について岩種別に平均値をとり、比較を行った。

絶対乾見掛比重は、粗目が平均 1.37、中目が 1.41、細目が 1.45 となった。粗目は組織が荒く空隙が多いため、比重は最も小さい。細目は比重が最も大きく、組織が緻密になっている。表乾比重も同じ傾向にある。

吸水率は、粗目・中目・細目の平均で 23.9% と大きな値を示した。見掛比重試験結果との関連を見ると、比重の小さい試験体ほど高い吸水率を示している。これは大谷石が多孔質であり、内部に有する空隙の影響が明確に現れているものと考えられる。得られた絶対乾比重と吸水率から、文献⁹⁾によると大谷石は組織の結合度が非常に低い『very weak』に区分できる。

圧縮強度は、乾燥状態では粗目が 13.8N/mm²、中目が 18.3N/mm²、細目が 25.3N/mm² であり、目の細かさによる強度の差が顕著に現れた。湿潤時の圧縮強度をみると、粗目が 5.8N/mm² (乾燥時の 42%)、中目が 6.8N/mm² (乾燥時の 37%)、細目が 8.1N/mm² (乾燥時の 32%) と強度が大きく低下し、岩石内部組織の結合度が低いことを補完している。強度の低下率は細目が最も高くなった。

3.2 一面吸水膨張試験

一面吸水膨張試験の結果を図 6、図 7 に、吸水 200 時間後の平均歪み及び質量変化率を表 2 に示す。吸水面の変形状態は、浸水直後に大きく膨張し、その後も徐々に膨張を続けているが、粗目・中目は 24 時間をピークに変形が止まっている。細目は微量ではあるが膨張を続け、120 時間あたりで安定している。吸水面 (下面) の最大歪みは、粗目が 3600 μ 、中目が 2450 μ 、細目が 5060 μ となり、大谷石の吸水膨張変形が大きいことを表している。一方、乾燥面 (上面) の変化は浸水後目の違いによる差異がほとんどなく、ほぼ一定の割合で膨張を続けており、200 時間では各々の目で最終歪み値に

表 2. 200 時間後の一面吸水時の平均歪み及び質量変化率

岩種	歪み (μ)	質量変化率 (%)
粗目	上面 2200	20.45
	下面 2870	
中目	上面 1900	18.25
	下面 2290	
細目	上面 1830	16.41
	下面 4520

図 6. 一面吸水による歪み変化

図 7. 一面吸水による質量変化

図 8. 無拘束試験体の自由変形歪み

図 9. 拘束フレームの剛性

到達していないと思われる。吸水時の質量変化も同様な傾向が見られ、浸水直後に質量増加量が大きく、その後変化量が漸増しながら質量増加が続く傾向にある。

3.3 拘束変形試験

図8に示す無拘束の自由変形歪みの経時変化は、一面吸水膨張試験と同様、時間が経つにつれて膨張変形が大きくなる。なお、大変形になるにつれて、試験体側面に取り付けていたクリップゲージ用治具の接着面がはがれてしまう状況もあり、多孔質軟質系の凝灰岩の変形測定の実験が困難さが現れた。

図9に拘束フレームの剛性の実測結果を示す。今回使用したフレームは、歪みと応力の関係を正比例とみなすことができ、その剛性は、 $0.109(\text{N}/\text{mm}^2)/\mu$ の値となった。

拘束時の外部拘束用ボルトの歪みの経時変化を用いて評価した拘束応力となる吸収膨張圧を、図10.1～3に示す。

ここで、細目については、水中浸漬時の無拘束水中温度変化ボルト歪みを実測していたので、その水温変動歪を除去した。中目と粗目については無拘束水中温度変化ボルト歪みを計測していなかったため、水中温度変化にゲージの熱膨張率を掛けておおよその無拘束時の水温変化ボルト歪みを計算し、水温による歪み補正を行ったため、日変動の歪が少し残った結果となった。

作用応力は、どの目も非常に小さい値となり、拘束材齢2時間位までに最大吸水膨張圧を示した。また、長時間の拘束につれて、吸水膨張歪みの変化量が小さくなることで、応力緩和が生じ、吸水膨張圧が漸減している。拘束応力の変化状況は細目が大きく粗目が小さい。さらに拘束直前と拘束終了直後の試験体表面に描いた方眼を目視観察したが、明確な変化は認められなかった。

以上の結果をふまえ、吸収膨張時の拘束変形特性を考察する。吸水時の自由変形では大きく膨張しているが、この膨張時の歪みは、大谷石の多孔質材料的性質に鑑み、内部の結合組織がゆるみ、みかけ上、スポンジのようにふくらんでいることが考えられる。大谷石のみそ部を構成している吸水膨張歪みが大きいモンモリロナイト鉱物自体の吸水膨張圧は、殆ど生じない結果³⁾と類似傾向にある。ここで、粗目ではゆるみに伴う歪みの吸収が拘束当初から大きく作用し、初期の吸水膨張圧も小さく、見かけ上、応力変化が小さくなったと考えられる。細目では、拘束当初に吸水膨張圧が大きく現れたが、長期間の拘束時に歪みが吸収されて、見かけ上、応力変化が大きく見える応力緩和が生じたと推察される。別に実施した圧縮強度試験結果でも、乾燥試験体より湿潤試験体の圧縮強度の方がかなり低下しており、大谷石の内部構造が吸水膨張する際、結合組織がゆるみ、スポンジの様に脆弱化していることが理解できる。

従って、吸水膨張時に拘束された大谷石の建材としての性能は、実用範囲で問題視する必要はないといえる。ただし、長期間乾湿繰り返し作用を受けた場合などは、大谷石内部組織にダメージが蓄積されることが考えられ、さらなる研究が必要と思われる。

4. まとめ

大谷石の吸水膨張特性を把握し、建材として使用する上での基礎的資料を得ることを目的とした実験の結果、以下が明らかになった。

大谷石は吸水率が非常に高く、水分吸収時には大きく膨張する。また、湿潤状態での圧縮強度は乾燥時よりも大きく低下する。さら

図 10. 吸水膨張圧の変化

に、粗目の大谷石は、細目と比較して比重が小さく、乾燥・吸水時共に圧縮強度も低い。大谷石の吸水膨張時に拘束した拘束変形特性は、水分供給が長時間にわたると、大谷石内部構造のゆるみによる脆弱さから吸水膨張圧はほとんど生じないことがわかった。

謝辞

本研究を実施するにあたり、日本基督教団安藤記念教会に多大なご支援を賜った。調査にご協力いただきました佐野英二牧師、間瀬惇平氏ならびに教会関係者の方々、高橋景子氏（有限会社高橋佑知商店）に深く感謝致します。本報のとりまとめにご協力いただきました宇都宮大学大学院の李榮蘭氏、星里佳氏に深く感謝致します。

参考文献

- 1) 大谷資料館ホームページ：http://www.oya909.co.jp/
- 2) 吉岡丹，小西敏正，篠原道正，田中敏夫：大谷石の凍害に関する研究，日本建築学会大会学術講演会梗概集（北陸）別冊材料施工・防火・海洋，pp.97～98，1983.9
- 3) 地盤工学会，岩の力学委員会：岩の工学的性質と設計・施工への応用，地盤工学会，pp.158～161，1974.4

[2005年4月20日原稿受理 2005年7月22日採用決定]