

高松塚古墳石室石材の強度

1. はじめに

高松塚古墳の石室石材は、現在、仮設修理施設において絵画面を上にした状態で保管されている。高松塚古墳の石室を再構築するためには、組み上げるのに十分な強度を石材が有していることが必要である。

石室解体に際しては、石材を把持するために必要な力を検討するため、天井石1、東壁石1及び閉塞石の露出している面に対して、針貫入試験を実施し、石室石材の一軸圧縮強さを推定した。今回は、現状の石室石材の強度を把握するため、天井石1及び東壁石1に対して針貫入試験を実施し、解体前の強度との比較を行った。

2. 針貫入試験

針貫入試験には軟岩ペネトロ計 SH70 を用いた。二上山の凝灰角礫岩の強度は、含水比の増加とともに低下する傾向が認められる。そこで、あらかじめ、石材表面の任意に選定した点の赤外線吸光度を近赤外水分計により測定した。石材の含水比は、得られた赤外線吸光度から既知の検量線により求めた。これらの含水比測定を行った各点に対し、針貫入試験を実施した。

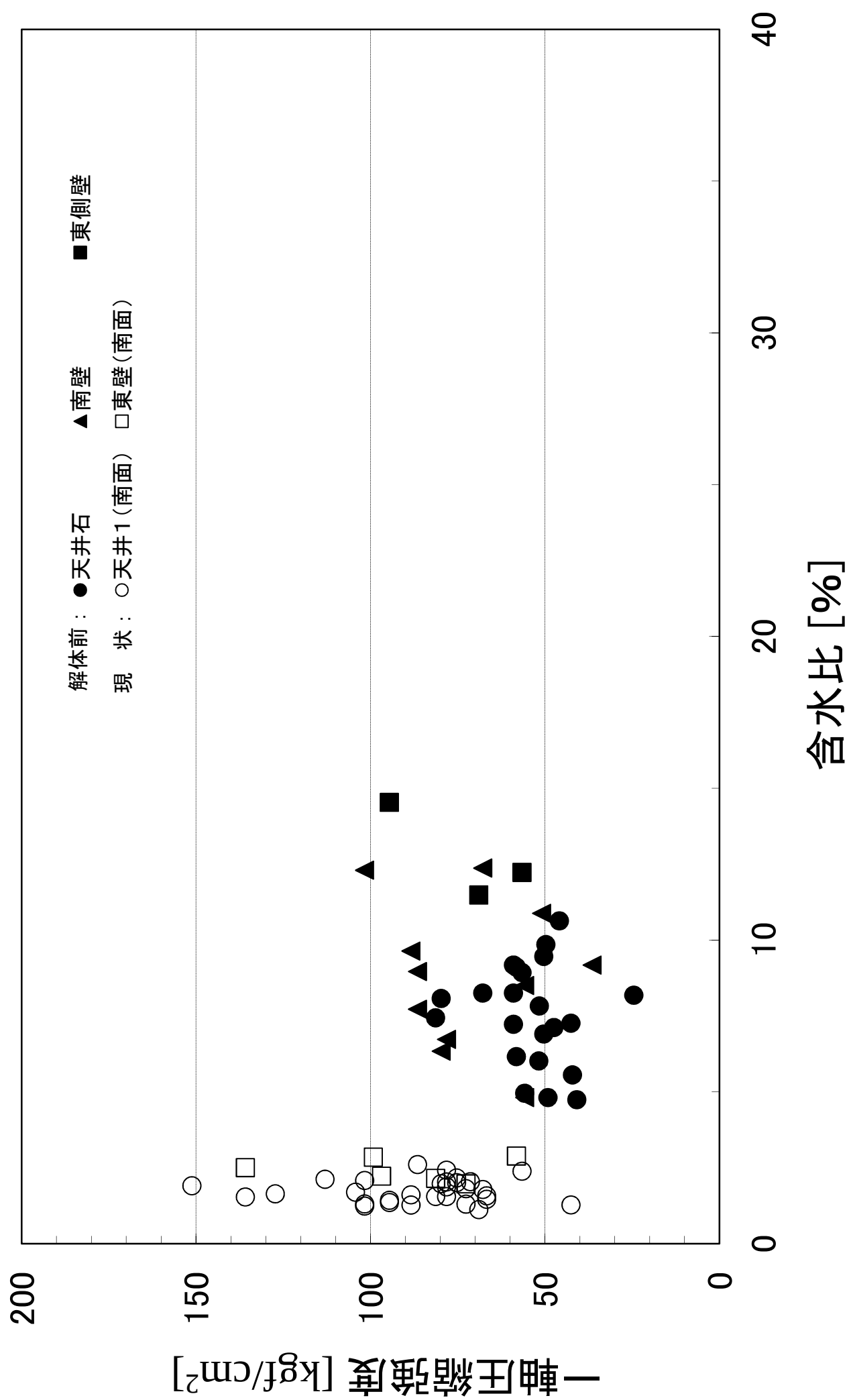
3. 試験結果

針貫入試験の結果を図に示す。黒塗りの記号は解体前に実施した針貫入試験結果であり、白抜きの記号は今回、修理施設において実施した針貫入試験結果である。解体前、取り合い部の空間に露出していた石材の含水率は5～15%であった。修理施設の温度と相対湿度はそれぞれ21℃、55%で保たれており、乾燥した環境となっている。そのため、石材の乾燥が進み、現状ではその含水率はほぼ2%程度となっている。

解体前においては25～102 kgf/cm²の範囲であったが、現状では43～151 kgf/cm²の間に分布している。平均値では前者が61 kgf/cm²、後者が87 kgf/cm²であった。石材の強度としてはかなり低いものであることが明らかである。

4. 今後の予定

石室石材16石に対し、測定可能な部位に対して針貫入試験をおこない、現状の強度を把握するとともに、亀裂や断裂についても記録を行い、石室石材の強度性状を明らかにしていく予定である。



石材の調査結果について（凝灰角礫岩の強度調査）

1. 二上山採取岩石の調査

(1) 岩石の比重、有効間隙率測定結果

試験に用いた岩石は高松塚古墳石室の石材と同じ二上山の凝灰角礫岩である。この試料の水飽和状態の比重、絶乾状態の比重はそれぞれ、 1.60g/cm^3 、 1.27g/cm^3 であり、有効間隙率は32.1%であった。

(2) 岩石の一軸圧縮強度

凝灰角礫岩の一軸圧縮試験は、自然状態（含水比が2.3%、比重が 1.30g/cm^3 ）で行った。一軸圧縮強度は、 6.39MN/m^2 (65.2kgf/cm^2) であった。また、針貫入試験を行ったところ、強度の弱い白く大きな斑紋状の部分の換算一軸圧縮強度は、 59.3kgf/cm^2 であったので、一軸圧縮強度は、岩石の弱部の強度にほぼ一致することが分かった。

(3) 岩石の引張強度

岩石の引張強度は、岩石の圧裂試験により求めた。岩石の状態は自然状態（含水比が2.3%、比重が 1.30g/cm^3 ）である。引張強度は、 1.06MN/m^2 (10.8kgf/cm^2 , 108tf/m^2) であった。

(4) 岩石の亀裂面上のせん断応力

定圧一面せん断試験結果から、なめらかな平面のせん断面におけるせん断応力と垂直応力の関係を求めた。岩石の状態は自然状態（含水比が2.3%、比重が 1.30g/cm^3 ）である。測定結果を図1に示す。実際の岩石の亀裂面はなめらかではないので、この試験結果よりせん断応力は大きくなるものと考えられる。

図1から、せん断抵抗力 τ と垂直応力 σ の間には、下記の式が成り立つ。

$$\tau = C + \mu \sigma \quad \dots \dots (1)$$

ここで、 $C = 25\text{ kN/m}^2$

$$\mu = 0.77$$

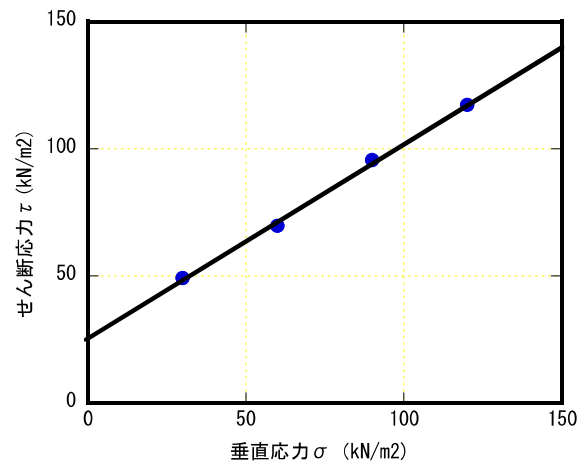


図1. 岩石の垂直応力とせん断応力の関係

2. 高松塚古墳石室石材の調査

(1) 針貫入試験による高松塚古墳石室の石材強度の推定

高松塚古墳の石室の天井石、南壁、東壁の一軸圧縮強度を針貫入試験装置（軟岩ペネトロ計）により測定した結果を図2に示す。天井石の一軸圧縮強度は、 $4 \sim 6\text{MN/m}^2$ の値を中心に、 $2 \sim 8\text{MN/m}^2$ の範囲となった。一軸圧縮強度の平均値は以下の通りである。

天井石 5.6MN/m^2 (57kgf/cm^2)

南壁 7.0MN/m^2 (71kgf/cm^2)

東壁 7.5MN/m^2 (77kgf/cm^2)

この値は、1-(2)の岩石の一軸圧縮強度試験で得られた一軸圧縮強度とほぼ対応している。

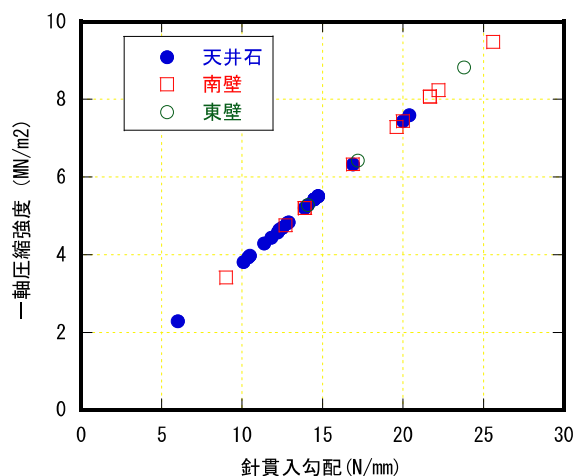


図2. 針貫入試験による高松塚古墳石室の石材の一軸圧縮強度の測定値（天井石、南壁、東壁）

(2) 高松塚古墳の石室天井石南第 1 石の亀裂面に加わる摩擦力の評価

高松塚古墳の石室天井石南第 1 石は、図 3 の様に中央部で割れていると考えられる。第 4 案の石室の解体修理を行う場合は、中央部で割れている天井石を東西方向から押しつけて持ち上げることができるかどうかを明らかにすることが必要である。ここでは、横から押しつけた力により、亀裂面にどの程度の摩擦力が生ずるか検討した。

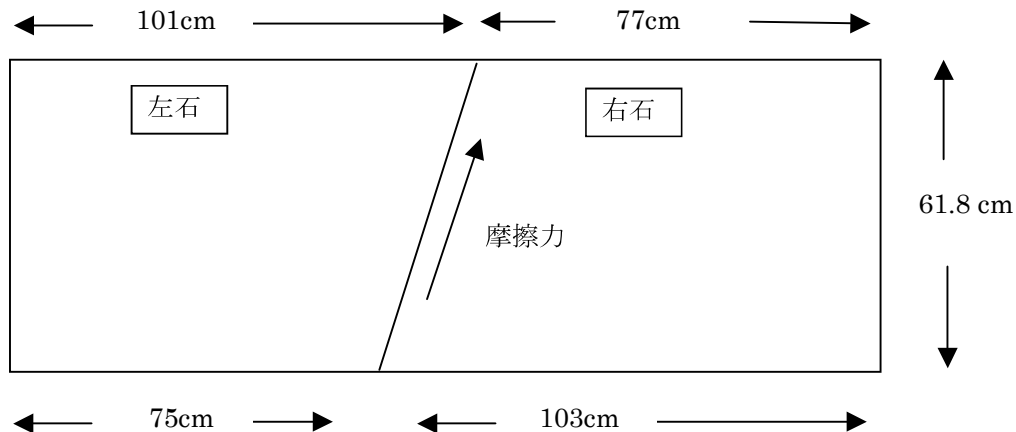


図 3．高松塚古墳の石室天井石南第 1 石の亀裂面の模式図

ここで、南から見て右側（東側）の天井石を右石、左側（西側）の天井石を左石と仮に呼ぶことにする。力の釣り合いを考える上で、石の奥行（厚さ）1 cm のもので検討する。右石の厚さ 1 cm の重さは、1-（1）の岩石の比重の測定結果から水飽和状態の密度は $1.60\text{g}/\text{cm}^3$ 、右石の面積は 5562cm^2 であるので、約 8.9kg と見積もられる。

つぎに、1-（2）や 2-（1）で求められた一軸圧縮強度よりはるかに小さい $20\text{kN}/\text{m}^2$ の応力を天井石南第 1 石の右側と左側から一様に加えた場合を考える。この場合に、亀裂面に加わる垂直応力により、図 1 の関係により、亀裂面に摩擦力（1cm あたり、 2MN (20kgf) 以上）が発生し、左右の石は滑ったり壊れたりすることなく一体として持ち上げられることができる。

この見積もりは、亀裂面がなめらかな平面で考えたが、実際はなめらかな平面ではないので、摩擦力は上記のものより大きくなり、もっと小さい力で押しつけた場合でも一体で持ち上げることができると考えられる。

I. 平成 17 年度報告概要

I-1 石室の石材に関する岩石学および力学的調査

(1) 石室を構成する石材の同定に関する調査

高松塚石室を構成する岩石(石材)について、現在観察可能な南壁石(閉塞石)、南天井、北天井、東南壁石、西南壁石、北天井石の一部を調査した結果、従来から報告されているいわゆる『二上山の流紋岩質凝灰角礫岩』である。観察の結果、基質の火山ガラスと各種の礫で構成されており、最も顕著な礫は、黒色で樹脂状光沢を呈する数 mm から数 cm 大におよぶ火山礫(溶結)凝灰岩の角礫と数 mm から数 cm 大におよぶ白色のパミスである(図 1)。この黒色溶結凝灰岩は下部ドンズルボー層に分布する火山礫(溶結)凝灰岩である。黒色の溶結凝灰岩は堅牢であるが、白色のパミスや基質は軟弱であり、風化の著しい石材では強度の不均衡が構造体への影響を及ぼす可能性がある。強度の不均衡と同様に、凝灰岩を構成する礫種による含水比の不均衡も大きいと予想される。

以上の特徴を示す凝灰岩は、岩相の類似性などから石材の採集地として鹿谷寺跡周辺域が推定される。なお、このタイプの凝灰岩は、古墳時代から奈良時代まで石材として多量に使用されており、キトラ古墳や石のカラト古墳などの古墳石室の構築部材として、また、平城宮跡では基壇の化粧石など建築部材として大量に使われていた。

(2) 石室石材の強度等の物理的性質に関する調査

高松塚石室石材の物理的性質に関する調査については、現地で測定可能な強度および含水比に関する調査を実施した。なお、石材の密度については現地で直接測定できないので、高松塚石室と同様な下部ドンズルボー層産の凝灰角礫岩を用いた実験を実施した。

密度の測定には、アルキメデス法、ピクノメータを用いた方法に加えて、高エネルギー X-CT による CTn (CT 値) から石材の密度分布を測定した(図 3)。なお、この測定においては下部ドンズルボー層産の凝灰角礫岩を用いた 1/10 の石室模型を製作して実施した。その結果、凝灰角礫岩の見掛け密度はおおよそ 1.6-1.8g/cm³ を示し、真密度は 2.2-2.4g/cm³ 前後を示した。

強度分布については、石室外側、つまり取り合い部から南天井側面、南壁石などについて調査した。また、参考として平城宮跡から出土した劣化の著しい凝灰岩についても測定した。測定には、軟岩ペネトロメータ

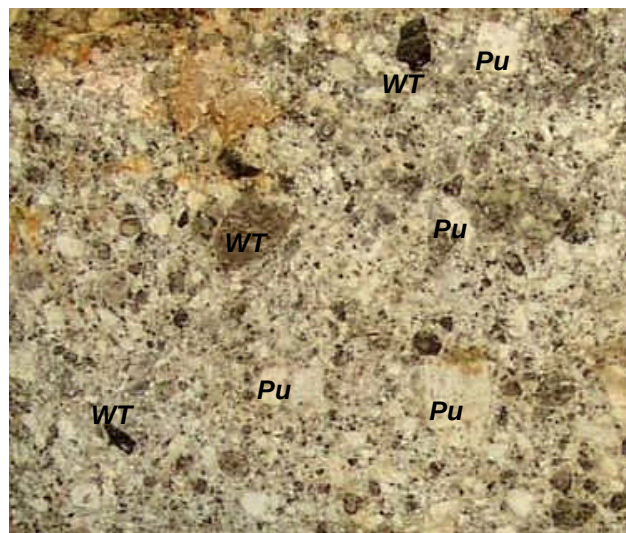


図 1. 北天井石の漆喰が剥落して石材の特長がよく観察できる部分(北東)、WT; 溶結凝灰岩礫 Pu; パミス

を用いて針貫入勾配を求め、回帰式から一軸圧縮強度を推定した。測定部位は黒色の溶結凝灰岩礫はさけて、基質部分について測定を実施した。その結果、高松塚石室石材については、予想されたように強度のバラツキは大きい、黒色溶結凝灰岩の礫を除くと、平均的な値として天井石側面：54kgf/cm²(5.4MN/m²,5.4Mpa)、南壁：72kgf/cm²(7.2MN/m²,7.2Mpa)、東壁：73kgf/cm²(7.3MN/m²,7.3Mpa)を示した。これらの値は、すでに報告されている三村委員による調査結果と一致する(パミス部で50kgf/cm²、溶結凝灰岩部で、200kgf/cm²)。なお、凝灰岩は湿潤状態に比べて乾燥状態のほうが強度は大きい、乾燥しすぎると粒子間の膠着力が低下して、ねばりがなくなりクラック等に影響が生じると考えられるので、石室解体までは急激な乾燥はせずに、湿潤状態を持続することが望ましい。しかし、一方では過度な水分は石材の劣化を早めたり、カビやコケ(光がある場合)の発生原因となるので、将来的には石材が安定する自然状態の環境(異常な温度・湿度環境をさける)に適応させることが望ましい。

含水比(固形分に対する水の割合を百分率で示した値)については、赤外線吸光度法により、盗掘孔付近に見られる天井石などについて測定した。いずれも表面に土が付着しておりやや乾いた色調を呈していた。測定結果も5-15%とかなりバラツキを示すものの、予想していたよりは含水比はやや低い傾向を示した。平城宮跡から出土する著しく劣化した凝灰岩では最大含水比は30数%に達する(図2)。

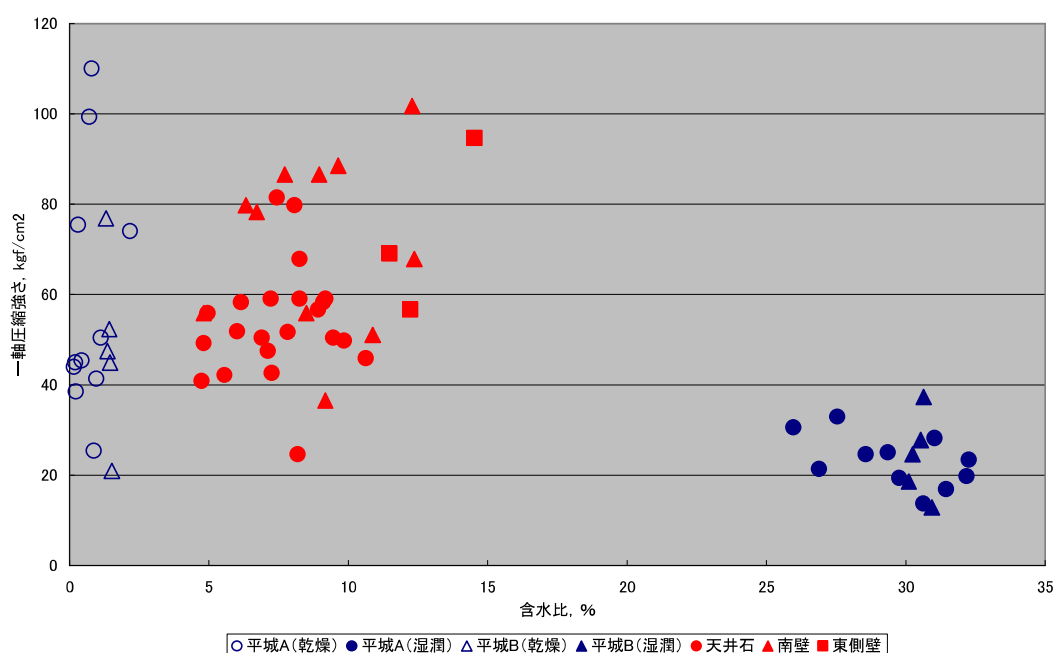


図 2. 各凝灰角礫岩の含水比と一軸圧縮強度。高松塚石室石材の一軸圧縮強度は40-60kgf/cm²に分布するが、それより高い数値を示すものもある。同質の凝灰岩では、含水比は高くなると強度は低下している。含水比が小さくなれば、強度は大きくなると言われているが、劣化の激しい凝灰岩では強度が大きくならないものもある。



高エネルギーX線 CT を用いた 1/10 石室模型（凝灰角礫岩）の密度分布測定

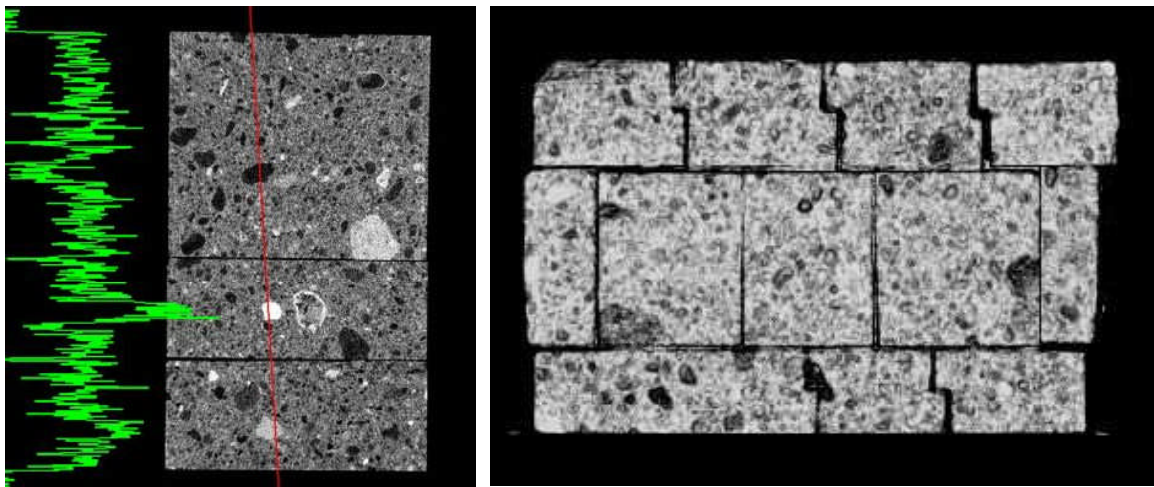


図 3. 凝灰角礫岩製の 1/10 石室模型の X 線 CT 画像、黒い部分は CT 値が低く（密度が小さい）、白い部分は CT 値が高い（密度が大きい）ことを示している。CTn:1010~4553 を示し、標準試料較正により密度を求めると、最小で 0.63g/cm^3 、最大で 2.4g/cm^3 を示した。パミスは水中でも浮くので、密度は 1.0 より小さくなる。劣化が著しいこのタイプの凝灰岩では、カサ比重（カサ密度）はより低下するので、 $1.2\text{-}1.3$ を示した。石材の一軸圧縮強度は、ほぼ $57\text{-}157\text{kgf/cm}^2$ 。（注：右図と左図は明るさを変えている）