

火害を受けた石の強度調査における非破壊試験の適用

日大生産工（PD） ○申 相澈 日大生産工 湯浅 昇 名古屋市立大 青木 孝義

1. はじめに

文化財・近代化遺産構造物など歴史的な建築物は希少価値があり、保存再生が求められている。組積造建築物は一般的に地震や火災に弱いと知られている。一例としてノートルダム大聖堂は、今年発生した火災により尖塔と屋根が崩落した。このように被害を受けた建築物を補修・補強するためには、災害によって変化した品質調査を行う必要があるが、歴史的な建築物の保存という観点からみると、破壊試験は適用できず、非破壊試験による調査が不可欠である。しかしこれに対する研究は少ない実情であり、歴史的な建築物の保存のための非破壊技術を確立することは非常に有意義である。

天然の石材は、石種によって耐熱性が異なる。ライムストーンや大理石は 600～700℃で材質の変化により強度が低下するが、これに対し砂岩の場合は 1000℃程度まで耐えられると知られている。それで、火害を受けた石の強度調査において、使用石種の耐熱性を理解し熱により変化する品質を検討することが重要である。

こういう背景から、本研究では建築材料として多く使われているライムストーン、大理石、

砂岩を対象とし、それぞれ数種の石を実際に焼き、加熱温度により変化する強度性状を調べた。また、リープと超音波伝搬速度による非破壊試験を行い、実際の組積造建築物に対する強度推定手法の適用可能性について検討した。

2. 実験内容及び範囲

2.1 実験概要

表 1 に実験概要を示す。石は常温のものを基準とし、加熱温度を 400℃、500℃、600℃、700℃、900℃、1100℃とした。加熱方法は図 1 に示すよう、目標温度まで 11 時間昇温、昇温後 12 時間維持し、その後炉内で徐々に冷却さ

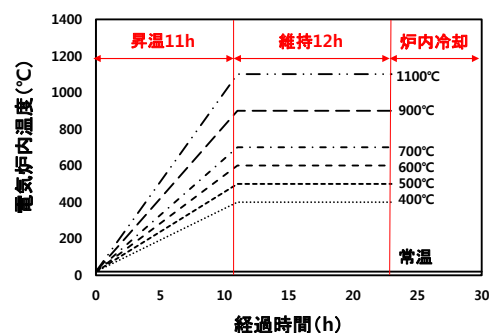


図 1 加熱方法

表 1 実験概要

石種	番号	石名	産地	目	寸法	加熱温度
ライムストーン	①	モカクリーム	ポルトガル	○	50 × 50 × 50 (mm)	常温(加熱無)
	②	カリザカプリ	スペイン			
	③	アンタラヤライムストーン	トルコ			
	④	ジュラグレー	ドイツ	○		
	⑤	コハラベージュ	イラン	○		
大理石	⑥	マーフィル	スペイン			400℃
	⑦	ビアンコカララ	イタリア			500℃
	⑧	マロンブラウン	トルコ			600℃
	⑨	ドラバーチン	イタリア	○		700℃
砂岩	⑩	レットサンドストーン	インド	○		900℃
	⑪	諫早石	日本			1100℃

Application of Non-destructive Test in Strength Investigation of Fired Stones

Sangchul SHIN, Noboru YUASA and Takayoshi AOKI

せる方法とした。ここで使用した電気炉は最大1150℃まで加熱できるものである。加熱後の石は一週間外観を観察し、破壊の程を調べた。また、壊れなかった試験体を対象とし圧縮強度、静弾性係数の試験を行った。同時にリープ硬さ、超音波伝搬速度試験を行い圧縮強度との関係を検討した。

2.2 使用した石材

本実験に用いた石は、①～⑤はライムストーン、⑥～⑨は大理石、⑩と⑪は砂岩であり、世界各地から得られるものである。⑪は長崎県の諫早石という日本の砂岩を用いた。石材はいずれも50×50×50mmの寸法でカットしたものを使用した。なお、目がわかるものは①モカクリム、④ジュラグレー、⑤コアラベージュ、⑨ドラバーチン、⑩レットサンドストーンであり、それ以外は目がはっきり区別できなかった。表1に各石の種類・産地を示しており、常温状態の石の様子を写真1に示す。

2.3 測定項目

図2に各試験の測定位置を示し、それぞれの試験方法は下記のとおりである。

2.3.1 外観調査

加熱後炉から出した石を20℃の恒温室に放置しながら1週間外観を調査した。手で触って状態を確認し、色変化を検討した。

2.3.2 圧縮強度および静弾性係数

外観調査後形上変化がなく圧縮試験が可能なものを対象として圧縮強度試験を行った。平目がある①、④、⑤、⑨、⑪の試験体については、目の流れ方向を上下にして加圧した。なお、試験体の圧縮強度を行う際に、加圧方向の変位を測長20mmのひずみゲージで測定し、応力-ひずみ曲線から静弾性係数を求めた。

2.3.3 リープ表面硬さ

リープ硬さ試験器は、内部のチップを測定対象物の表面に落下させ、落下時と跳ね返り時に速度に応じて発生する誘導電圧を検知し、硬さを算出するものである。本実験では、試験体の加圧方向の上下面において9点ずつ合計18点を測定した。なお、リープ硬さ試験器の硬さ数値は次の式により求める。

$$HL = (vb/va) \times 1000$$

ここに、HL：硬さ数値

Vb：跳ね返り速度

Va：衝撃速度

2.3.4 超音波伝搬速度

コンクリートの圧縮強度推定方法としてよく用いられている超音波伝搬速度試験を本実験に採用し試験体の上下で2回測定、試験体組織の緻密さを検討した。



写真1 常温の石の様子

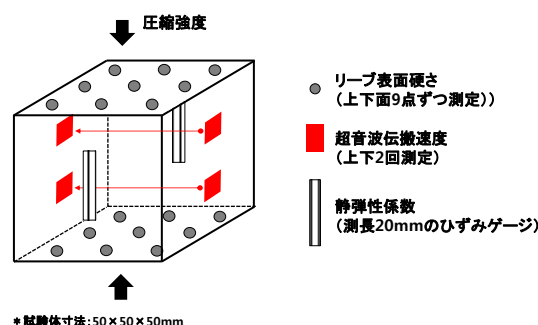


図2 各試験の測定位置

表2 外観調査結果

石種	番号	加熱温度 (℃)						
		常温	400	500	600	700	900	1100
ライムストーン	①	○	○	○	▲	×	×	×
	②	○	○	○	○	×	×	×
	③	○	○	○	▲	×	×	×
	④	○	○	○	○	×	×	×
	⑤	○	○	○	○	×	×	×
大理石	⑥	○	○	○	○	×	×	×
	⑦	○	○	○	▲	×	×	×
	⑧	○	○	○	○	×	×	×
	⑨	○	○	○	○	×	×	×
砂岩	⑩	○	○	○	○	○	○	○
	⑪	○	○	○	○	○	○	○

○：健全な状態、▲：一部ひび割れあり、×：粉末化

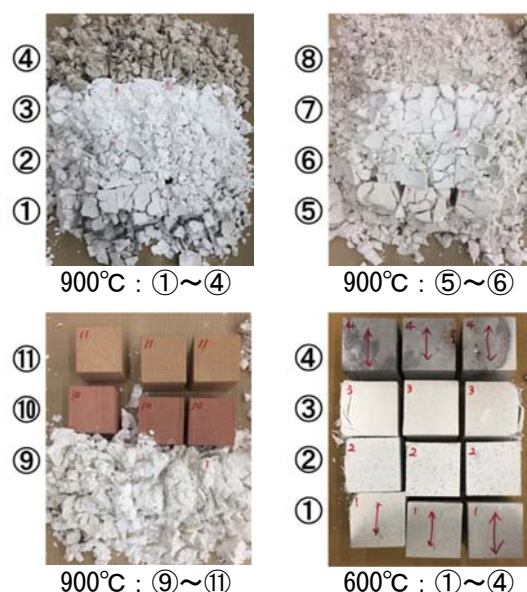


写真2 加熱後の石の様子

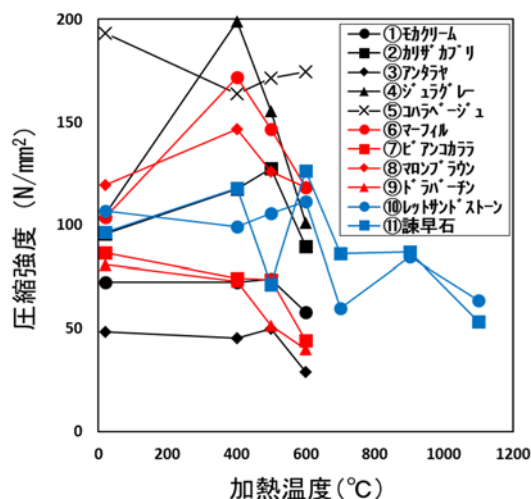


図3 圧縮強度試験結果

3. 実験結果および考察

3.1 外観調査

加熱後の試験体の外観を調査した結果を表1に、加熱後の石の様子を写真2に示す。

健全な状態は「○」、一部ひび割れがあったものは「▲」、組織が壊れ粉末化したものは「×」のように判定した。全ての試験体で加熱温度500℃までは外観の変化が見られなかった。600℃で加熱した場合は、①モカクリーム、③アンタラヤライムストーン、⑦ピアンコカラで一部ひび割れが生じたが、圧縮試験ができるような状態であった。加熱温度700℃以上になると、ライムストーンと大理石はいずれも崩れて粉末の状態となった。反面、砂岩は1100℃まで加熱しても形の変化はなかったが、赤色系に変色された。

3.2 圧縮強度

図3に圧縮強度試験結果を示す。

ライムストーンと大理石は、一部例外はあるが、加熱温度400℃までは圧縮強度の低下が大きくなく、400℃を超える条件で顕著に低下する傾向が認められた。砂岩の場合は、加熱温度600℃までは常温のものと比べて同程度であったが、600℃と700℃の間で強度値が落ちる結果となった。砂岩を1100℃で焼いた試験体の圧縮強度は、常温時の圧縮強度の60%水準となった。全体的に見ると、耐熱度がより低いライムストーンと大理石の圧縮強度は400℃以上で急に低下した半面、耐熱度が高い砂岩は徐々に強度値が低下することから、耐熱度による強度低下のパターンが違ふことが確認された。ここでライムストーンと大理石は、両方ともその主成分がCaCO₃であるため、比較的同様な結果となったと考えられる。

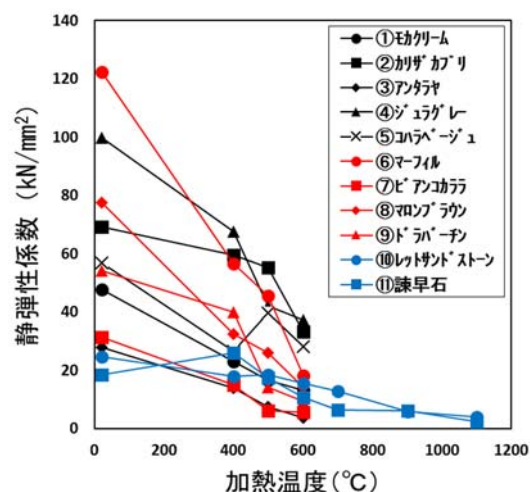


図4 静弾性係数試験結果

また、ライムストーンと大理石は、同じ石種であっても各々の石の強度値には大きな違いがあった。ライム石の⑤コハラベージュは、常温状態で200N/mm²に近い値であり、600℃で加熱しても174N/mm²となつて、本実験の範囲では最も高い強度性状を見せた。一方で、⑩レットサンドストーンと⑪諫早石の強度性状は同程度であった。

なお、一部試験体において常温時の圧縮強度よりも400℃で加熱した試験体の強度が高くなったことは再検討が必要である。

3.3 静弾性係数

図4に静弾性係数の試験結果を示す。

圧縮強度試験結果とは異なり、全体的に加熱温度が高くなるほど静弾性係数は低下する結果を示した。特に、ライムストーンと大理石は、400℃の測定値が常温と比較して大幅に低下した。また、砂岩の場合は、常温での静弾性係数が一番低く、圧縮強度試験結果と同様に加熱温度が増加することにより、静弾性係数は緩やかに低下する傾向にある。

3.4 非破壊試験の適用性検討

図5にリープ硬さと圧縮強度の関係を示す。ライムストーンと大理石では、直線的な関係が見られ、リープ硬さ試験器による組積造の圧縮強度推定の可能性を確認した。しかし、④ジュラグレーは、同様のリープ硬さの範囲にもかかわらず、圧縮強度は最大2倍程度の差が出て、相関が見えなかった。これに対してはさらなる検討を行い明らかにする課題となっている。一方で、砂岩の場合は、リープ硬さ600～700の値に対して圧縮強度は50～130 N/mm²となった。加熱温度が高くなっても、リープ硬さ値は大して変わらない結果となつて、リープ硬さ試験器

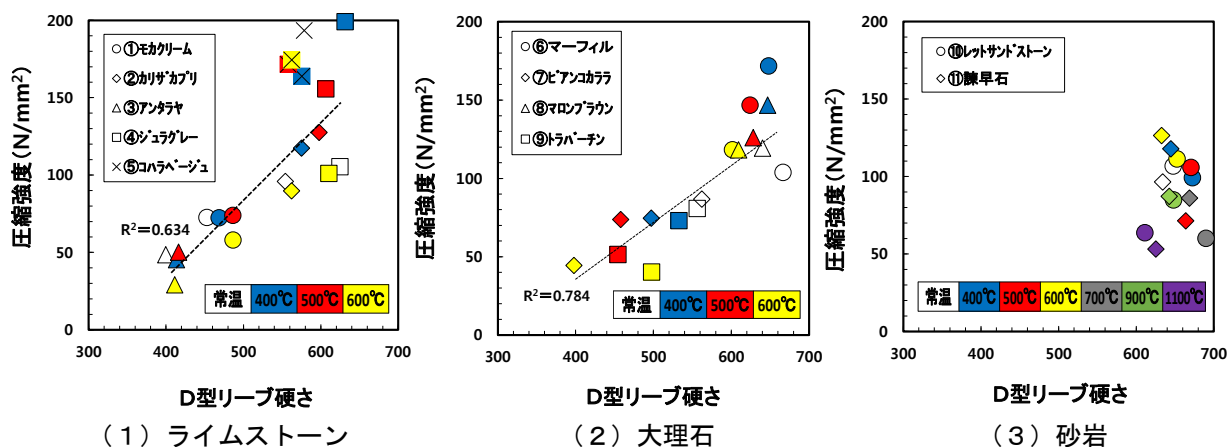


図5 リーブ硬さと圧縮強度の関係

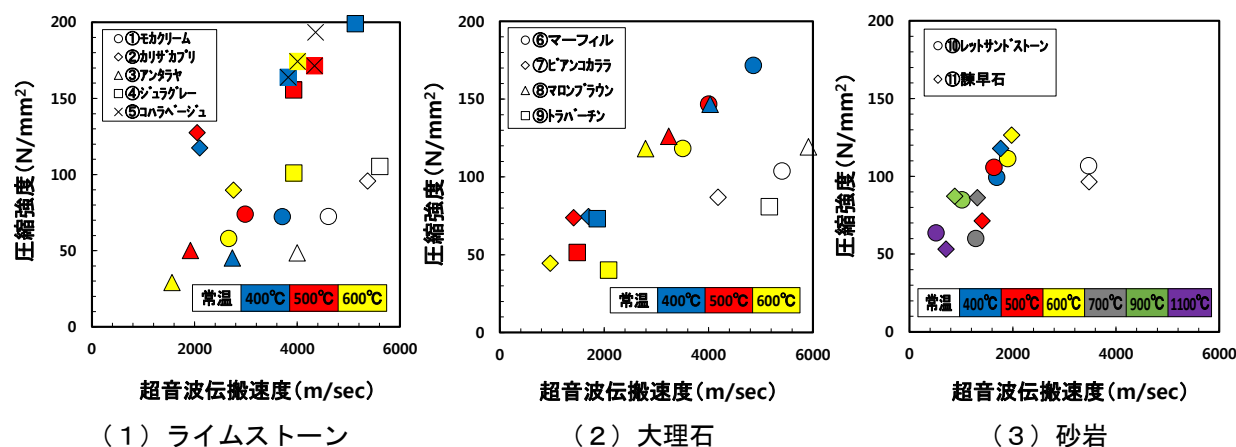


図6 超音波伝搬速度と圧縮強度の関係

の強度推定手法としての適用は無理であると思われる。また、砂岩は他の石材と比べて、同程度の強度レベルでもっと高いリーブ硬さ値を示している。それで、砂岩は石灰ストーンや大理石よりも表面の硬さが高いことが確認されたが、試験体の表面硬さが圧縮強度の推定指標にはならないことがわかった。

図6に超音波伝搬速度と圧縮強度の関係を示す。全ての試験体において、常温時の超音波伝搬速度が最も高く、常温以外の試験体の間にはある程度直線的な関係が確認された。また、加熱温度が高くなるほど超音波伝搬速度は低下する傾向が見られる。圧縮強度が低下しなかった加熱温度400°Cの条件でも、試験体によって程度差はあるが、超音波伝搬速度は低下した。よって、火害を受けた石は内部組織が変わるようになるが、その組織変化が必ず圧縮強度に影響を及ぼすわけではないと考えられる。一方で、砂岩の場合、他の試験体と比べて低い値を示しているが、超音波と圧縮強度の相関は最も高いことが認められた。従って、砂岩の場合、前述したようにリーブ硬さ試験器の適用は難しい

が、超音波試験による強度推定は可能であると考えられる。

4. まとめ

- 1) 外観調査結果、石灰ストーンと大理石は600°C前後で組織が崩れ始め、700°Cでは完全に粉々になった。一方で、砂岩は1100°Cで加熱しても外観は変化しないことがわかった。
- 2) 全体的に加熱温度が高くなるほど、圧縮強度と静弾性係数は低くなる傾向にある。石灰ストーンと大理石の圧縮強度は、400°Cを超える条件で顕著に低下した。
- 3) リーブ硬さ試験や超音波伝搬速度試験により、ある程度組織の強度推定が可能であると考えられる。

「参考文献」

- 1) 湯浅昇, コンクリートの強度に関する非破壊・微破壊試験方法の現状, 非破壊検査協会, (2017) p. 119~128.