

# 石造遺跡の凍結破壊と樹脂による 防止効果の実験（第2報）<sup>\*1</sup>

石造文化財の凍結—融解による劣化とその防止法に関する研究（IV）

福田 正己<sup>\*2</sup>・三浦 定俊・西浦 忠輝

## 1. はじめに

野外の石造遺跡が、凍結作用により破壊されることを防止するために合成樹脂を用いることがある。すでに筆者らはこの凍結破損防止を目的とした実験的研究を行ない、通常に用いられている合成樹脂の効果について検討した<sup>1)2)3)</sup>。これらの一連の実験的研究から、風化して空隙率の高い岩石の凍結破壊は、凍結過程での岩石内水分移動に伴なって発生するという破壊機構を示唆した。したがって、合成樹脂の使用効果は、岩石内への水の供給を断つことに由来するものと考えられる。実験で用いた樹脂のうちで、シリコン系樹脂がもっとも破壊防止効果にすぐれていることが示されたが、これはシリコン樹脂が撥水性を石に与えるからである。一般には合成樹脂による凍結破壊の防止は、処置後の固化に伴なり強度増加によって効果が生ずると考えられていた。しかし、凍結破壊にかかわる作用力（凍上力）は、合成樹脂処理後の強度補強された岩石の強度を超えることから、水の流れの阻止効果によるものと思われる<sup>4)</sup>。

そこで本研究では、合成樹脂による強度増加がどの程度見られるのか、また凍結破壊への抵抗性に関連するのかを明らかにするための実験を行なった。さらに、具体的に野外石造遺跡に処置を行うことを前提とした、合成樹脂の処理法による効果の差についても実験を行なった。これらの実験結果及び考察について報告する。

## 2. 合成樹脂処理による物性変化

### 2-1 処理方法

実験に用いた岩石試料は、前報と同じで凝灰岩（栃木県産大谷石）である。空隙率は約35%であり、凍結—融解の繰り返しで容易に破砕される。またシリコン系樹脂による処理によって凍結抵抗性が増加することが確められている<sup>1)</sup>。岩石試料は直径5cm、高さ5cmの円筒形に整形した。使用した合成樹脂は前報と同じである。これらの樹脂を次の4通りで処置した。

- a) 岩石試料を乾燥後、刷毛によって表面に樹脂溶液を塗付する。
- d) " 樹脂溶液に10分間浸漬する。
- c) " 樹脂溶液に60分間浸漬する。
- b) " 樹脂溶液に18時間浸漬する。

これらの処理法と合成樹脂の種類との組み合わせで、表—1に挙げる試料を作成し、一軸圧縮強度、圧裂引張強度、凍結—融解の各試験に用いた。

### 2-2 強度試験結果

一軸圧縮強度試験用の試料は、直径5cm、高さ10cmに整形し、同一条件の6サンプルを

<sup>\*1</sup> 保存科学第22号1～14ページの報告を第1報とする

<sup>\*2</sup> 北海道大学、低温科学研究所（昭和56年度招へい研究員）

表一 実験に用いた試料名と処理及び樹脂  
**Table 1** Sample codes with various treatments and synthetic resins

樹 脂 Resins	処 理	刷毛による 塗付 Brushing	浸漬10分間 Immersing for 10 min	浸漬60分間 Immersing for 1 hr	浸漬18時間 Immersing for 18 hrs	無 処 理 Control
アクリル Acrylic resin		A-a	A-b	A-c		
エポキシ Epoxy resin		E-a	E-b	E-c		
シリコン Silane		S-a	S-b	S-c	S-d	
無 処 理 Control						C

用いて測定を行なった。測定時の含水条件は約4~5%であり、樹脂と処理の違いによる相違はなかった。両端の仕上げが良好でないために、圧縮強度値はややばらつきが大きかったが、各々6個の平均値をとった。また超音波伝播速度もあわせて測定した。両者の関係を図-1に示す。一般に岩石の圧縮強度と超音波伝播速度の間には、次の経験式が成り立っている<sup>5)</sup>。

$$\sigma = A \cdot V_P^3$$

ここで $\sigma$ は一軸圧縮強度(kgf/cm<sup>2</sup>)で、 $V_P$ は超音波伝播速度(km/sec)、 $A$ は比例係数である。しかし、図-1の例では $V_P$ の増加とともに圧縮強度

の増加する傾向がみられるものの経験式に適合する明らかな関係は見いだされない。無処理(C)と比較して、シリコン系樹脂では強度も $V_P$ も増加するもの(S-a, S-d)と、 $V_P$ は増加するが強度は変化しないもの(S-b, S-c)とがある。アクリル樹脂(A)とエポキシ樹脂(E)については $V_P$ は増加する傾向が見られるが、E-aを除いて強度の変化は見られない。これらの結果から、 $V_P$ と強度の増加が明らかに認められるS-dを除けば有意な強度増加が生じたとは言えない。

一軸圧縮強度に比べて、測定バラツキが少ないのが圧裂引張強度試験である。また、破壊にかかわるのが、せん断力ないしは引張力と考えられる点から、合成樹脂効果の判定には圧裂引張強度試験がより適合するであろう。圧裂引張強度と $V_P$ の関係を図-2に示す。図中の

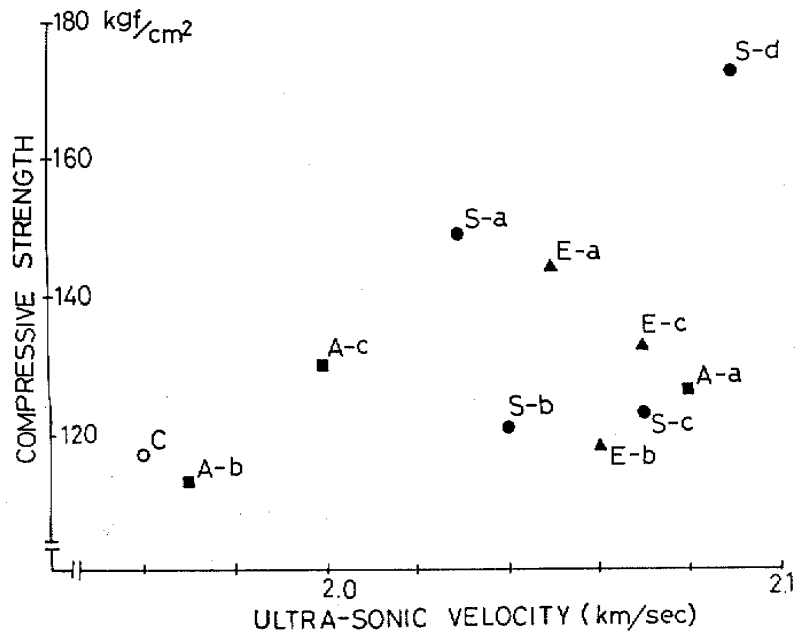


図-1 樹脂処置による一軸圧縮強度と超音波伝播速度の変化  
 (試料名と樹脂の種類は表1による)

**Fig. 1** Compressive strengths and ultra-sonic propagation velocities of the specimen before and after the treatment by resin (codes of plots, see table 1)

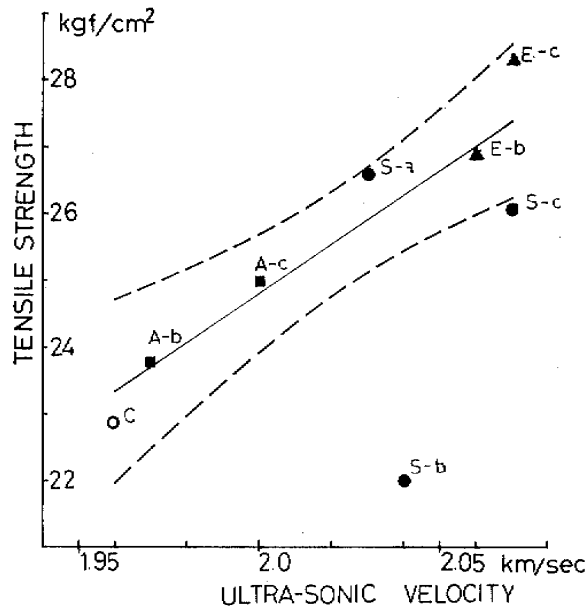


図-2 樹脂処理による圧裂引張強度と超音波伝播速度の変化(試料名コードは表1による)  
**Fig. 2** Tensile strengths and ultra-sonic propagation velocities of the specimen before and after the treatment by resin (codes of plots, see table 1)

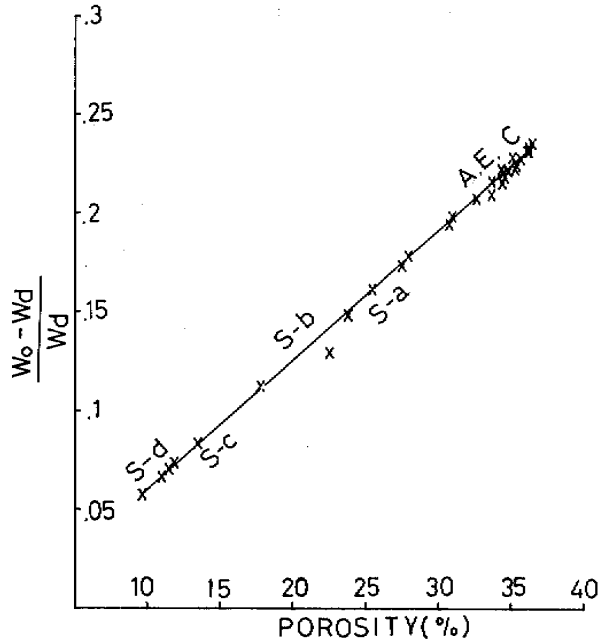


図-3 空隙率と飽和含水比との関係(試料名コードは表1による)  
**Fig. 3** Porosity v.s. saturated water content (codes of plots, see table 1)

S-b を除外すると、 $V_p$  と強度には一次比例関係が成り立っている。点線は90%の信頼区間である。しかし処理法によって強度の増加が生じてもおよそ10%以下の増加にすぎず、やはり測定のパラッキを考慮するなら、圧縮強度の例と同じく樹脂処理による固くないし強度の増加はあまり著しくない。

以上の強度試験結果からは、一部の試料で強度の増加が認められるものの、およそ10%程度にすぎず、またほとんど変化しないものもあるなど、有意な増強効果は生じないといえる。

2-3 吸水性の変化

前報の実験結果から、シリコン系樹脂処理によって吸水性が小さくなり、これが凍結破壊の抵抗性に関連することが示された。しかし、シリコン系樹脂による吸水性ないし透水性の変化を定量的に示すことは出来なかった。今回の実験では、次の方法により吸水性の変化を明らかにすることが可能となった。まず岩石試料を105°C、24時間乾燥させて重量を測定する( $W_d$ )。次に真空脱気下のデシケーター内に水浸して24時間放置し、水中秤量( $W_s$ )と空中重量( $W_0$ )を得る。外界に連結する空隙を水で置換した空隙率  $n$  は次式として得られる。

$$n = \frac{W_0 - W_d}{W_0 - W_s} \times 100 (\%)$$

また単位乾燥重量あたりの飽和含水比を、

$$w = \frac{W_0 - W_d}{W_d}$$

として算出する。

この空隙と飽和含水比の測定値を各サンプルごとにプロットしたのが図-3である。

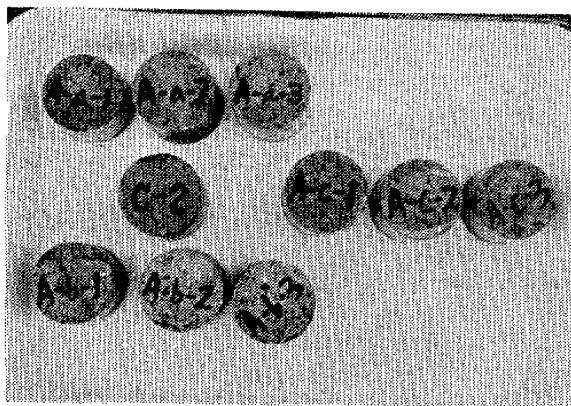
この両者は、直線回帰式から一次の比例関係にあることがわかる。ところが、シリコン系樹脂処理以外の試料(A, E, C)は、ほぼ空隙率36%、含水比0.23付近にあり、樹脂による差も処理条件の差も明らかでない。シリコン系ではS-aからS-dまでが順次回帰直線上に並ん

でいる。これは *S-a* から *S-d* に向って試料の吸水性が悪くなっていることを示している。したがって、シリコン系樹脂で処理することで、どの程度吸水性が低下したかは、回帰直線上の位置で示すことが可能となる。これは合成樹脂処理効果を、客観的に表わす一つの方法といえよう。

以上の吸水性の変化実験から *S-d* の場合吸水性の低下が著しく、凍結への抵抗性の高いことが予知される。一方、無処理、エポキシ樹脂、アクリル樹脂は吸水性があり、凍結抵抗性の小さいことが予測される。

### 3. 凍結—融解の繰り返し試験

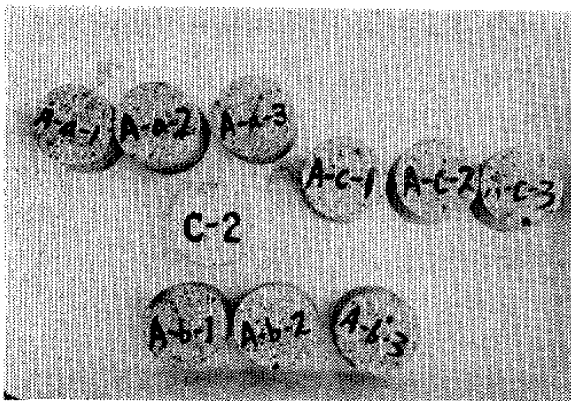
凍結による破壊状況と抵抗性を知るために、低温室内での凍結—融解の繰り返し試験を行な



[0 cycle]



[15 cycles]



[5 cycles]



[20 cycles]



[10 cycles]

写真—1 凍結—融解による岩石試料の破砕状況 (アクリル樹脂・5サイクルごと)

Photo 1 The breakage due to freezing-thawing cycles (treated by acrylic resin, every 5 cycles)

った。実験の条件は、 $-10^{\circ}\text{C} \sim +20^{\circ}\text{C}$ の変動幅で1日1サイクル変化させる。試料は底部に水を入れた容器に各樹脂ごとにさらしておく。この条件では下部から十分な水分供給がなされる。凍結開始前から5サイクルごとに  $V_P$ 、空隙率、飽和含水比、重量損失、試料長変化を測定して、20サイクルまで試験した。また5サイクルごとに形状変化を知るため写真にとった。写真1~3は、5サイクルごとの試料の形状変化を示している。各写真の中央にある試料(C)は無処理の試料である。まずアクリル樹脂の事例をみる(写真1)。5サイクル後では、とくに著しい凍結破損は生じていない。10サイクル後になると試料のへりの部分が剝落するなどの変化が生じている。15サイクル後では、多くのサンプルに水平方向のクラックが生じている。

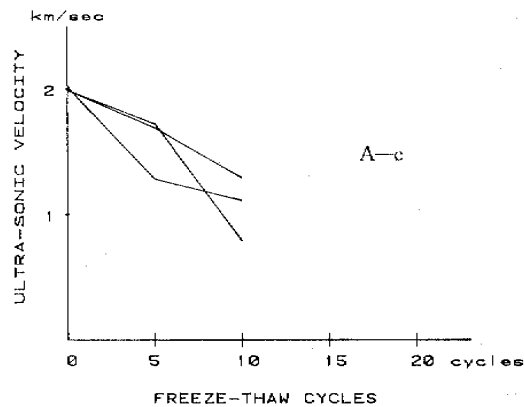
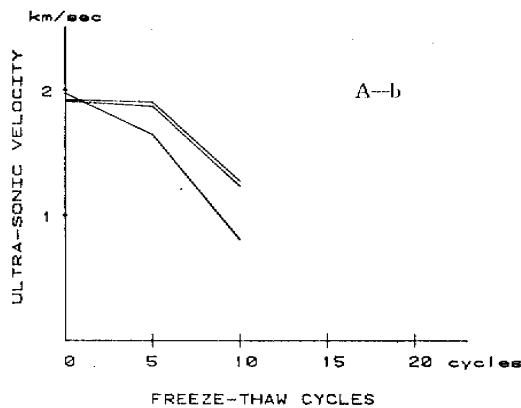
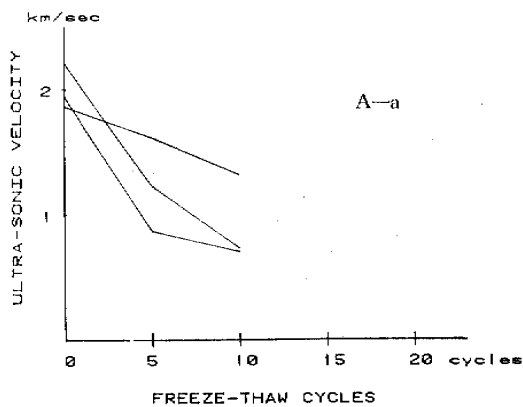


図-4 凍結-融解による超音波速度の変化 (アクリル樹脂)  
 Fig. 4 Ultra-sonic velocity changes due to freezing-thawing cycles (treated by acrylic resin)

これはサンプルの冷却方向と垂直な面であり、土の凍上の場合のアイスレンズの形成と類似している。20サイクル後では、すべての試料は剝離ないし分離して、中心部分がわずかに円筒形をとどめているにすぎない。こうした形状の変化に対応して、 $V_P$ と空隙率がどのように変化したかを図-4と5に示す。 $V_P$ の変化では樹脂処理の違いにかかわらず、5サイクル後ですでに  $2 \text{ km/sec}$  以下となり、10サイクル

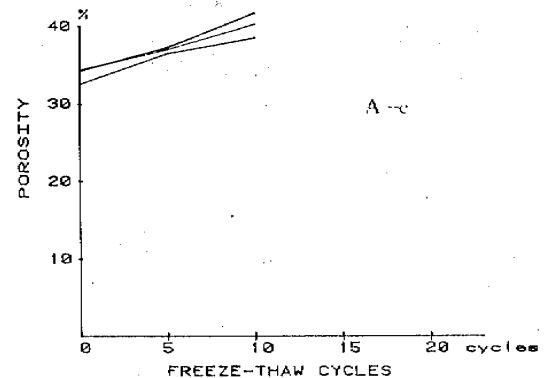
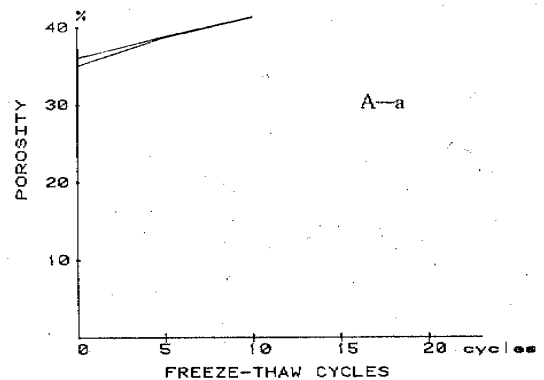
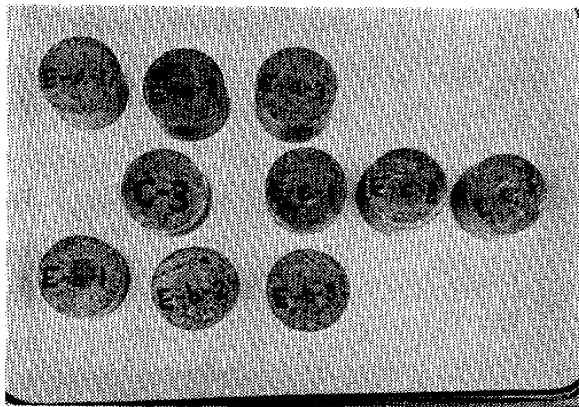
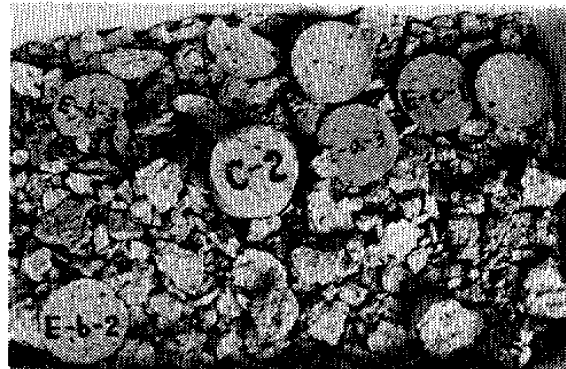


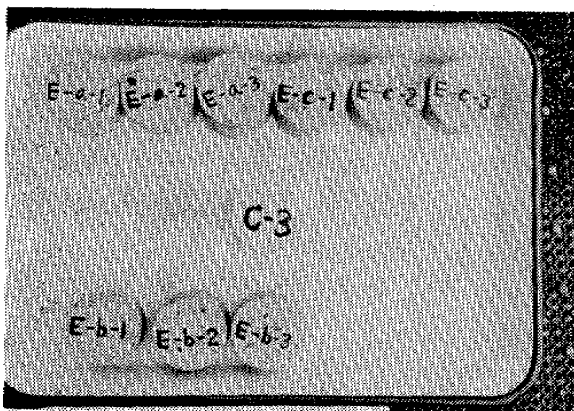
図-5 凍結-融解による空隙率の変化 (アクリル樹脂)  
 Fig. 5 Porosity changes due to freezing-thawing cycles (treated by acrylic resin)



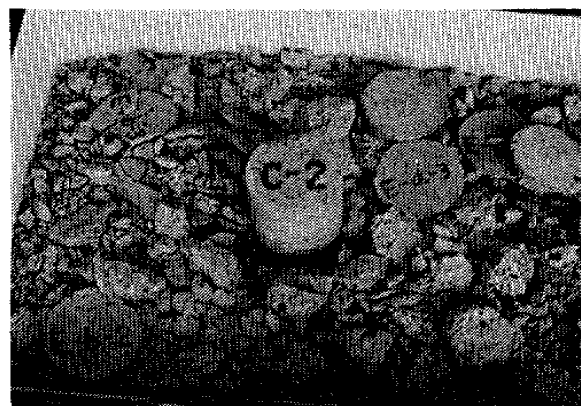
[0 cycle]



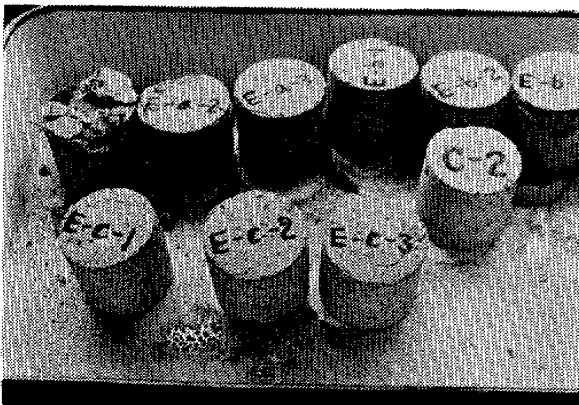
[15 cycles]



[5 cycles]



[20 cycles]



[10 cycles]

写真-2 凍結-融解による岩石試料の破碎状況 (エポキシ樹脂・5サイクルごと)

Photo 2 The breakage due to freezing-thawing cycles (treated by epoxy resin, every 5 cycles)

後では 1 km/sec 前後となつてすでに岩石内部でのクラックの成長が著しいことを示している。空隙率も 5~10 サイクルと増加して 40% を超え、次の 15 サイクルでは完全に破壊されることの前兆となっている。

次にエポキシ樹脂の例を写真-2 に示す。5 サイクル後までは外形を保っているが、10 サイクル後には、冷却方向に垂直な、サンプルをたてて置いた水平方向に多くのクラックが形成された。15 サイクル後には、すべての試料が破壊された。20 サイクル後には、さらに細分化が進んでいるが、円筒の両端面のみがごくうすい円板状に残されている。これは樹脂による固化がごく浅く表面層にとどまることをうかがわせている。次に  $V_P$  のサイクルごとの変化を図-6 に示す。いずれの場合も、5 サイクル後に 1 km/sec 以下に低下していて、内部でのクラック

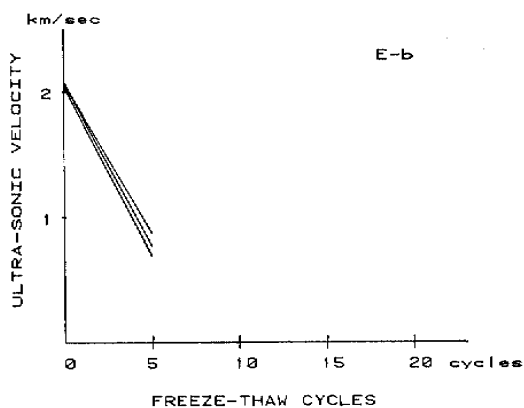
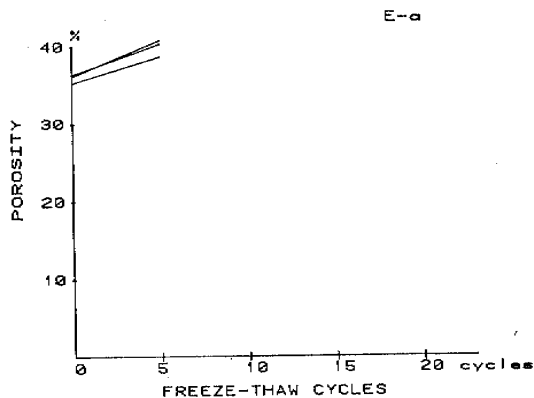
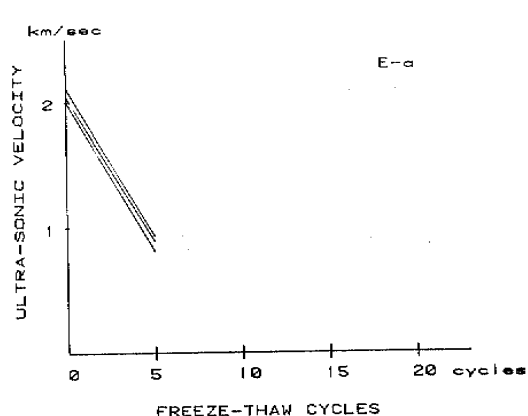


図-7 凍結-融解による空隙率の変化 (エポキシ樹脂)  
 Fig. 7 Porosity changes due to freezing-thawing cycles (treated by epoxy resin)

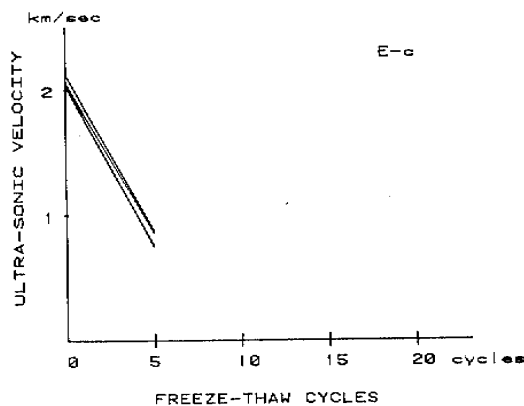


図-6 凍結-融解による超音波速度の変化 (エポキシ樹脂)  
 Fig. 6 Ultra-sonic velocity changes due to freezing-thawing cycles (treated by epoxy resin)

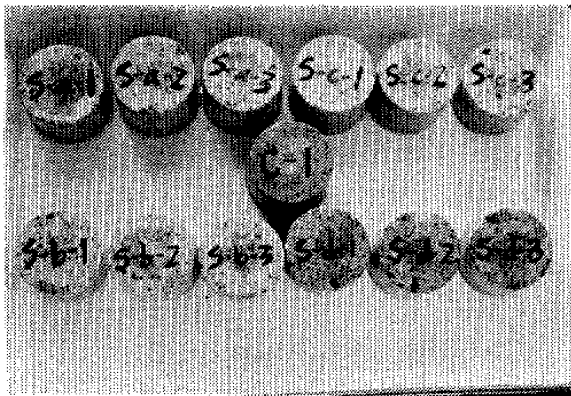
の形成の著しいことがわかる。10サイクル後には、 $V_p$  の測定ができないまでに破壊された。空隙率の変化の例を図-7に示す。5サイクル後ですでに40%にもなっていて、外界へ連結したクラックの形成の著しいことが示されている。

シリコン樹脂の結果を写真-3に示す。10サイクル後まで、外観上の変化はみられない。15サイクル後では破壊された試料と変化のない試料に分かれる。S-a, S-bでは3つの試料のうち2つまでが破壊された。S-cでは1つの試料が破壊された。S-dはまったく変化がなかった。20サイクル後では15サイクルで破壊されなかった試料はそのままの形状を保っているが、他の試料は細砕化が進んだ。 $V_p$  の変化を図-8に示す。S-a, S-bの試料では5サイクル後に1 km/secまで低下して、15サイクル後には細砕化されて測定できなくなっている。ただ、各々1サンプルは変化がなく、

20サイクル後でももとの形状をとどめていることが写真-3に示されている。S-cでは、2サンプルは20サイクル後にわずかに低下するものの、1サンプルは10サイクル後に1 km/sec以下となって破壊された。S-dでは、3サンプルともわずかな低下傾向がみられるものの、破損を受けていない。空隙率では、S-aでは10サイクル後に36%以上になっているが、S-dでは20サイクル後でも10~20%にとどまっている (図-9)。

最後に無処理の試料の  $V_p$  変化を図-10に、また空隙率の変化を図-11に示す。15サイクル後に破壊されたが、エポキシ樹脂やアクリル樹脂処理の試料よりも凍結抵抗性があるようにみえる。この理由は、樹脂処理によって試料内に固化増強された部分とそのままの部分とがむらに

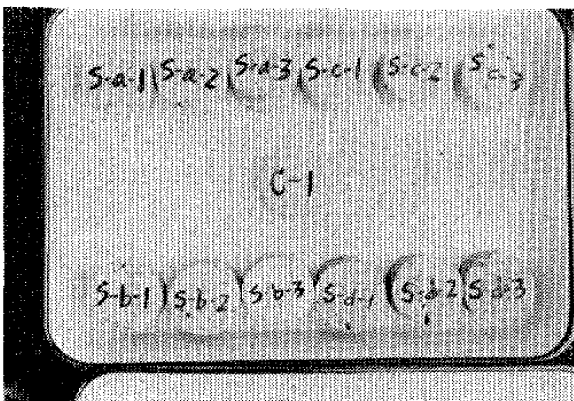




[0 cycle]



[15 cycles]



[5 cycles]



[20 cycles]



[10 cycles]

写真-3 凍結-融解による岩石試料の破砕状況 (シリコン樹脂・5サイクルごと)

Photo 3 The breakage due to freezing-thawing cycles (treated by silane, every 5 cycles)

なり、凍結時発生作用力（凍上力）が弱い部分に局所的に作用して破壊が著しくなったものと考えられる。

#### 4. 考 察

アクリル、エポキシ、シリコンの3種類の合成樹脂で処理した凝灰岩は、一軸圧縮強度と圧裂引張強度の変化は明瞭には生じなかった。つまり、合成樹脂による固化、あるいは強度増加の効果はあまりないと言える。ところが水置換による空隙率では、シリコン樹脂ではいずれも処理後は小さくなっており、岩石空隙内部へ水が入りにくくなった。しかも凍結-融解の繰り返し試験でも、これらの試料が破壊抵抗性が高いことが示された。以上の実験結果から、合成樹脂による劣化岩石の処理で凍結破壊を防止するのは、吸水性あるいは透水性の低下によるこ



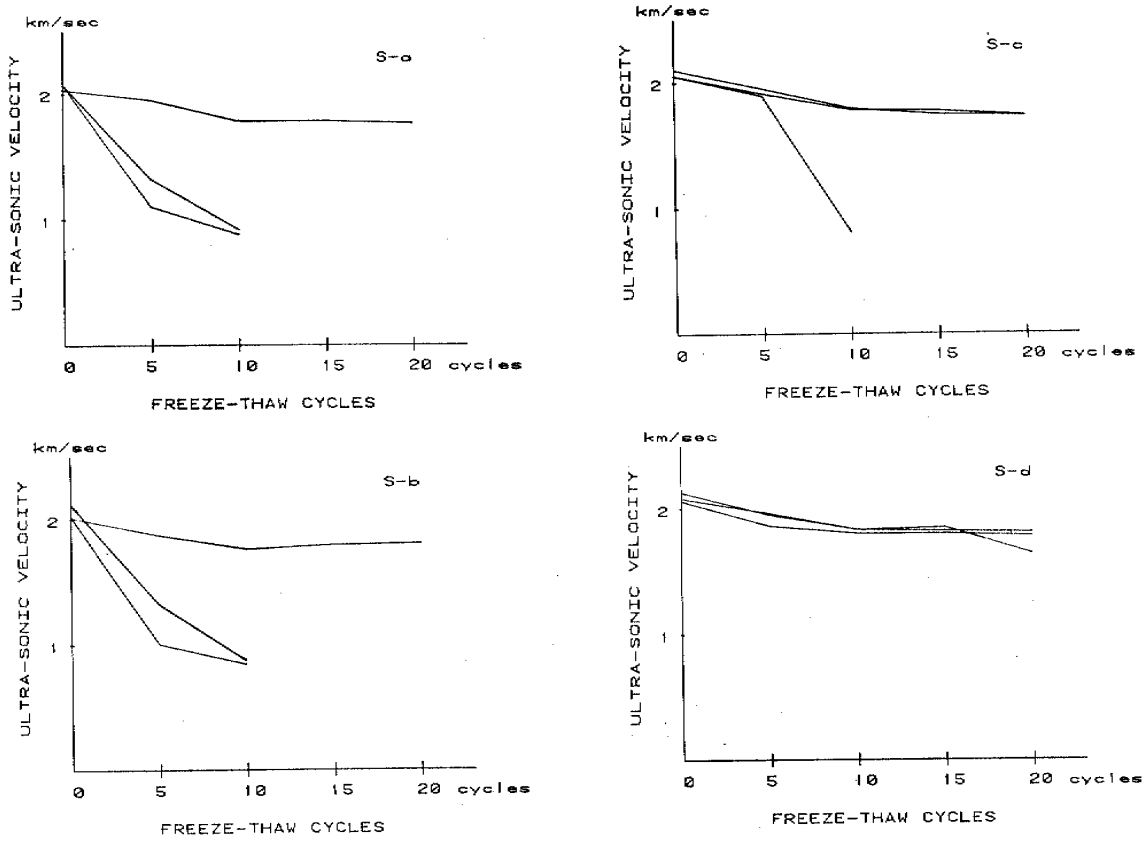


図-8 凍結-融解による超音波速度の変化 (シリコン樹脂)

Fig. 8 Ultra-sonic velocity changes due to freezing-thawing cycles (treated by silane)

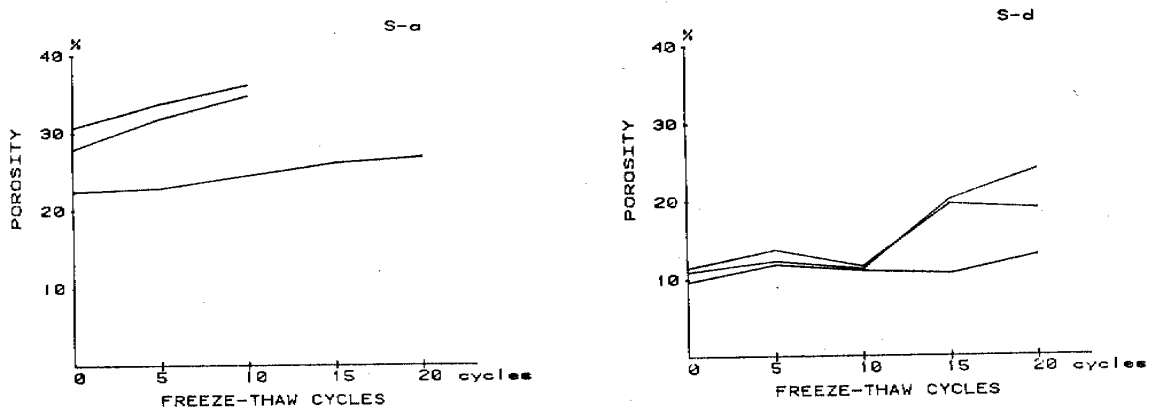


図-9 凍結-融解による空隙率の変化 (シリコン樹脂)

Fig. 9 Porosity changes due to freezing-thawing cycles (treated by silane)

とが示唆された。これはすでに前報で、凍結しつつある岩石内の間隙水圧の測定から、凍結面に向う水の流れの存在が指摘されたことと一致する。

凍結による破壊機構については、いまだ明らかではないが、土の凍上現象との多くの類似が見い出されている。前述の凍結過程での水の流れもその1つである。さらに破壊された岩石試料には、凍結面と平行（冷却の熱流と垂直）にアイスレンズが幾層にも形成されていた（写真-4）。これは写真-5に示す凍上を起した土の構造とくにアイスレンズの形成ときわめて類似している。したがって、合成樹脂による破壊防止効果は、こうしたアイスレンズの形成の阻止効果にあると言える。

本研究では、さらにシリコン系樹脂を用いた岩石試料の吸水性の低下を客観的に示す方法と

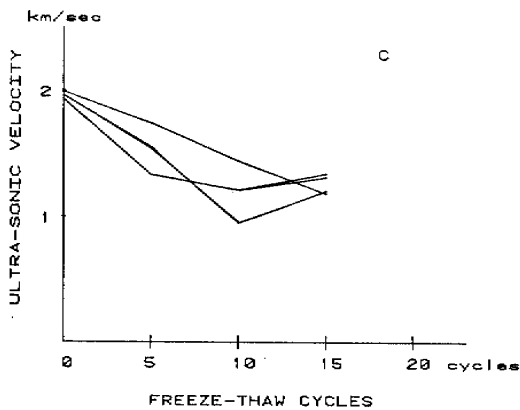


図-10 凍結-融解による超音波速度の変化(無処置)

Fig. 10 Ultra-sonic velocity changes due to freezing-thawing cycles (control)

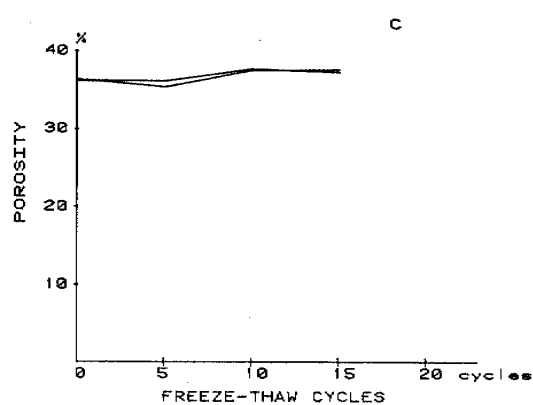


図-11 凍結-融解による空隙率の変化(無処置)

Fig. 11 Porosity changes due to freezing-thawing cycles (control)

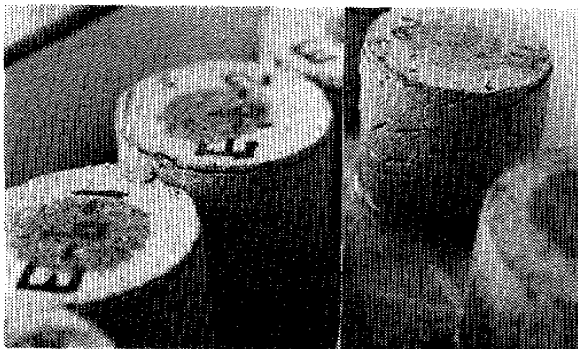


写真-4 岩石試料に形成されたアイスレンズ(エポキシ樹脂・10サイクル後)

Photo 4 Ice-lenses formation after 10 cycles (treated by epoxy resin)

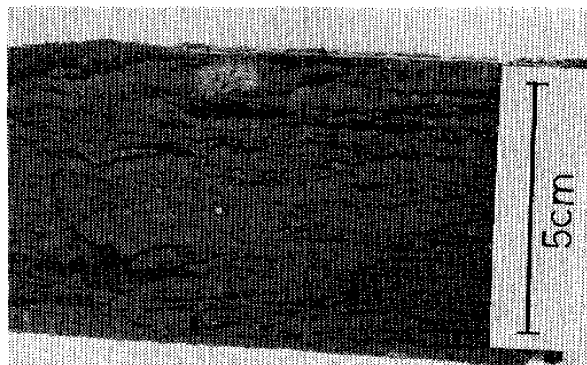


写真-5 凍上した土の構造とアイスレンズ(苫小牧火山灰質ローム)

Photo 5 Structure of frozen soil with ice-lenses (Tomakomai loam)

して、水置換による空隙率と飽和含水比の一次回帰直線の上の位置で示す方法が適切であることを明らかにした(図-3)。さらに凍結融解の繰り返し試験から、空隙率が20%以下で、飽和含水比が0.1以下であれば、十分な凍結破壊への防止効果が期待されることがわかった。こうした吸水性の低下を実現するためには、少なくともシリコン系樹脂溶液に1時間以上浸漬させる必要がある。現場での処置法として考えられる刷毛による塗付では、かならずしも高い破壊防止効果は得られず、処置に際してはこの点充分に考慮する必要がある。

### 5. ま と め

合成樹脂による凝灰岩の処置では、岩石の強度の変化(固化)によって凍結破壊の防止効果は生じない。処置によって、岩石内への水の吸水性ないし透水性が低下するシリコン系樹脂では、破壊防止効果が認められた。特に溶液中に1時間以上浸漬する処理法が樹脂の浸透も良く、効果のあることがわかった。今後、実際の野外石造遺跡を対象とした野外実験を行ない、長期間での破壊防止効果の評価を行う必要がある。

本研究にあたっては、北海道大学低温科学研究所木下誠一教授、東京国立文化財研究所保存科学部江本義理部長から多くの示唆を受けた。また一軸圧縮強度試験にあたっては、清水建設

研究所了戒公利氏の協力を得た。あわせて感謝の意を表わします。また本研究の経費の一部は、財団法人鹿島学術振興財団研究助成金に依った。

#### 文 献

- 1) 福田正己・三浦定俊・西浦忠輝・松岡憲知：石造遺跡の凍結破壊と樹脂によるその防止効果の実験，保存科学，**22**，1—14（1983）
- 2) 福田正己・松岡憲知：岩石内の水の凍結点降下と弾性波速度変化について，保存科学，**22**，15—19（1983）
- 3) 三浦定俊・福田正己・西浦忠輝：シングアラウンド式音速測定法による岩石の凍結—融解破壊の判定，保存科学，**22**，21—26（1983）
- 4) 福田正己：凍結—融解による岩石の破碎機構論，地形，**1**，89—95（1980）
- 5) 大久保彪・寺崎晃：岩石の物理的性質と弾性波速度，土と基礎，**19**，31—37（1971）

The Breaking of Stone Remains Caused by Freezing  
and Its Protection by the Treatment with Synthetic Resins (Part II)

—Studies on the Deterioration of Stone Caused by  
Freeze-thaw Cycles and Its Preservation (IV)—

Masami FUKUDA, Sadatoshi MIURA  
and Tadateru NISHIURA

The present authors conducted the freezing-thawing experiments of weathered tuff related with the protection of stone remains by frost. A tertiary tuff from Tochigi prefecture, central Japan, was used as rock specimens. Three widely used synthetic resins (i. e., silane, epoxy and acrylic resin) were tested their effectiveness to frost damage.

The compressive and tensile strengths of rock specimens both treated by resin and non-treated were measured. The values of strengths indicated no significant differences between non-treated and treated specimens. This result implies hardening effects by the synthetic resin does not occur. Porosities and saturated water contents of the specimens treated by epoxy and acrylic resin did not change before and after the treatments. On the other hand, both values of porosity and water content of the specimen by treated silane decreased. The decrease of porosity and water content were due to the impeding effects of water into the specimens.

The specimens were exposed to the freezing-thawing cycles in a cold room with water supply. At every 5 cycles, porosity, water content, ultra-sonic propagation velocity and weight loss were measured. The most of specimens were damaged after 10 cycles except the specimens treated by silane. In previous report, the authors suggested that water migrated through the specimen during freezing, and accumulated in frozen parts forming ice-lenses. This frost heave mechanism might be adopted to the frost damage of porous rocks. The protection effects by the treatment with silane is due to not the hardening effect but the impeding effect of water. The treatment with silane lowered the hydraulic conductivity of rocks and impeded the water migration through rocks during freezing.

For the evaluation of the treatment with silane, porosity and saturated water content might be measured. If porosity is lower than 20% and water content is lower than 0.1 after the treatment, the protective effect to frost damage might be expected.