

- (i) 粘度が極めて低く、石、レンガ、瓦等の無機質材料内部に良く浸透する。
- (ii) 常温で硬化する。
- (iii) 含浸処置した無機材料に強い凝集力を与えると同時に、極めて高い撥水性を付与する。
- (iv) 無機系の樹脂であるため、その耐久性は極めて優秀である。
- (v) 無色透明であり、含浸処置に伴う色、艶の変化はほとんどない。

この樹脂は、諸外国において石造建造物の保存処置に広く用いられており²⁻⁴⁾、我国においても、近年、熊野磨崖仏の保存処置に用いられ大きな成果を上げた⁵⁾ほか、石造文化財の強化処置に多く用いられるようになって来ている⁶⁻⁷⁾。

3. 試 験 方 法

3-1 吸水率

(1) 含浸強化処置前の吸水率の測定

(2-1) に示した劣化古瓦3種 (Z, H, J) と新瓦1種 (N) を、105°C の乾燥器中で24時間乾燥し、室温まで冷却の後秤量し、直ちに常温水中に浸漬した。そして、一定時間後 (1時間, 4時間, 1日, 2日) の重量を測定し、乾燥時の重量に対する増加率を算出し、これを吸水率とした。

$$A = \frac{W_w - W_d}{W_d} \times 100$$

A : 吸水率

W_d : 乾燥時の重量

W_w : 水中浸漬後の重量

(2) SS 含浸処置

吸水率測定を終えた劣化古瓦3種 (Z, H, J) については、次の方法でSS含浸処置を行った。まず、60°C で1週間乾燥し、更に105°C で24時間乾燥した後室温まで冷却し、秤量後、SS (触媒3%添加) 中に浸漬した。4時間後取出し秤量の後、室温にて1週間風乾し、更に乾燥促進のため60°C にて3日間乾燥した後最終的に秤量した。本処置における劣化瓦中へのSSの含浸状態を表-1に示す。尚、本稿では以降、SS含浸処置を施した瓦にはtを、無処理の瓦にはcを付して、例えば、SS含浸処置をした瑞巖寺古瓦はZt、無処理の定光寺古瓦はJcという具合に書き表わすこととする。

(3) SS 含浸処置瓦の吸水率

SS含浸処置を終えた劣化古瓦について、(1)と全く同じ方法で吸水率を測定し、(1)の結果と比較した。

次に、SS含浸処置による防水性付与効果の耐久性を調べるために、以下に示す劣化促進処理を施し、その後の吸水率をやはり同じ方法で測定した。

(A) 煮沸繰り返し—寒熱繰り返し処理

Jt に対して (沸騰水中にて煮沸<5 hrs>→105°C の乾燥器中放置<18 hrs>) を2回繰り返した後、(105°C 乾燥器中放置<2 hrs>→-30°C 冷凍器中放置<2 hrs>) を5回繰り返す。

(B) 凍結融解処理

Jc, Jt について、沸騰水中で4時間煮沸の後、更に24時間常温水中に浸漬して十分吸水させた後、ポリエチレンシートで包み、完全にシールしてから、凍結融解試験器 (図-2) にて、+30°C (1 hr) $\xrightarrow{1\text{hr}}$ -30°C (1 hr) $\xrightarrow{1\text{hr}}$ +30°C を1サイクルとして、320

表一 劣化古瓦へのSS含浸処置

Table. 1 Impregnation treatment with SS-101 to the decayed old rooftiles

Specimens	Weight before treatments	Weight just after treatment (Content of solution)	Weight after dry (Content of gel)
Z-1	2,408 g	2,789 g (15.8%)	2,548 g (5.8%)
2	1,594	1,870 (17.3)	1,695 (6.3)
3	1,785	2,086 (16.9)	1,895 (6.2)
4	1,831	2,151 (17.5)	1,947 (6.3)
5	1,603	1,869 (16.6)	1,700 (6.1)
6	1,558	1,825 (17.1)	1,652 (6.0)
		Ave ((16.9))	Ave ((6.1))
H-1	1,725	1,997 (15.8)	1,824 (5.7)
2	1,847	2,147 (16.2)	1,956 (5.9)
3	1,395	1,598 (14.6)	1,467 (5.2)
4	1,585	1,838 (16.0)	1,680 (6.0)
5	2,150	2,469 (14.8)	2,262 (5.2)
6	1,920	2,200 (14.6)	2,020 (5.2)
		Ave ((15.3))	Ave ((5.5))
J-1	1,441	1,628 (13.0)	1,512 (4.9)
2	1,530	1,740 (13.7)	1,607 (5.0)
3	1,773	1,977 (11.5)	1,860 (4.9)
4	1,527	1,740 (13.9)	1,606 (5.2)
		Ave ((13.0))	Ave ((5.0))

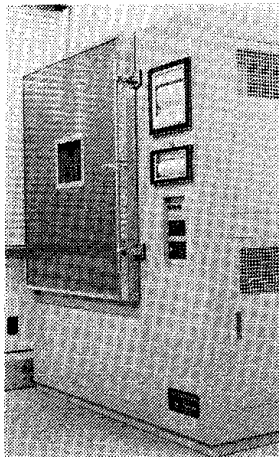


図-2 凍結融解試験器

Fig. 2 Freeze-thaw chamber

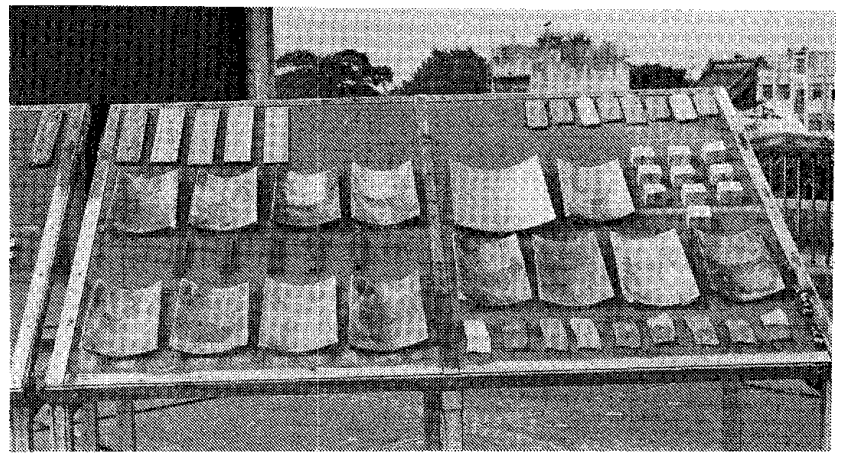


図-3 屋外曝露試験（東京国立文化財研究所屋上）

Fig. 3 Rooftiles being exposed outside

サイクル処理し、その後更に130サイクル、合計450サイクル処理した。

(C) 屋外曝露

Nc, Zt, Ht, Jc, Jt について、東京国立文化財研究所屋上設置の屋外曝露台で曝露（継続中、図-3）。

3-2 曲げ強度

定光寺劣化古瓦（J）を図-4に示す如く、縦に2つに割り、片方はそのまま（Jc）、もう片

方には、3-2 (2)と同様の方法でSS含浸処置を施し (Jt), それぞれ, 次の条件で曲げ試験に供した。

(試験機 オートグラフ
荷重速度 0.5 mm/min
スパン 20 cm)

尚, 本方法では, 荷重方向がJISに規定された方法 (P. 63 参照) とは90° 違っており, 又, スパン, 荷重面長も小さくなるが, 無処置とSS含浸処置との差を明確にするために, 同一瓦で比較する必要上, あえてこの方法を採用した。従って, 当然のことながら, 曲げ強度の指標としては最大曲げ破壊荷重ではなく曲げ破壊係数 (kg/cm²) を採用した。この方法によれば, 個々の瓦の厚みのファクターも標準化される。

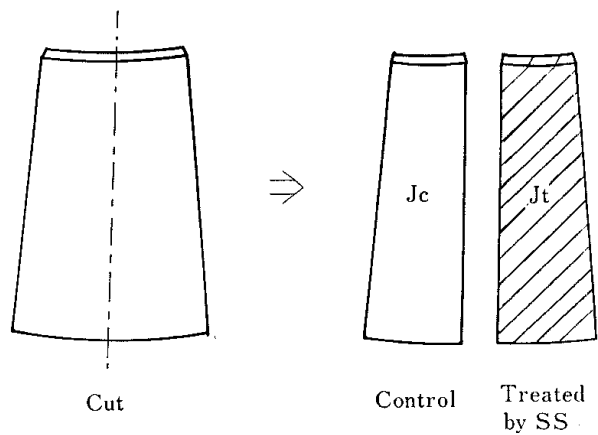


図-4 曲げ試験用テストピース
Fig. 4 Test pieces for bending test

4. 試験結果

4-1 吸水率

表-2, 3 及び図-5にSS含浸処置前後の吸水率を示す。明らかに, SS含浸処置によって吸水率が大幅に低下し, その値は新瓦をも大きく下回っている。これは, 瓦の内部で硬化したSSの成分中のメチル基 (-CH₃) が強力な撥水性を瓦に付与しているためである。

表-2 SS含浸処置前の吸水率
Table. 2 Rate of water absorption in rooftiles before consolidation by impregnation with SS-101

	Immersion time in water			
	1 hr	4 hrs	1 day	2 days
New				
Nc	2.8 %	4.6	5.2	5.2
Old				
Zc	17.0	17.4	17.7	17.8
Hc	11.5	13.9	14.0	14.1
Jc	12.0	13.1	13.4	13.5

(Average of 6 pieces for Nc, Zc and Hc, 4 pieces for Jc)

表-3 SS含浸処置後の吸水率
Table. 3 Rate of water absorption in old rooftiles after consolidation by impregnation with SS-101

	Immersion time in water									
	0.5 hr	1 hr	4 hrs	1 day	2 days	4 days	6 days	10 days	14 days	20 days
Zt	—	0.4	0.5	0.8	1.0	1.3	—	—	2.2	2.7 (%)
Ht	—	0.5	0.6	1.0	1.7	2.3	—	—	3.9	4.5
Jt	0.2	0.3	0.5	1.1	1.5	—	1.9	2.0	—	—

(Average of 6 pieces for Zt and Ht, 4 pieces for Jt)

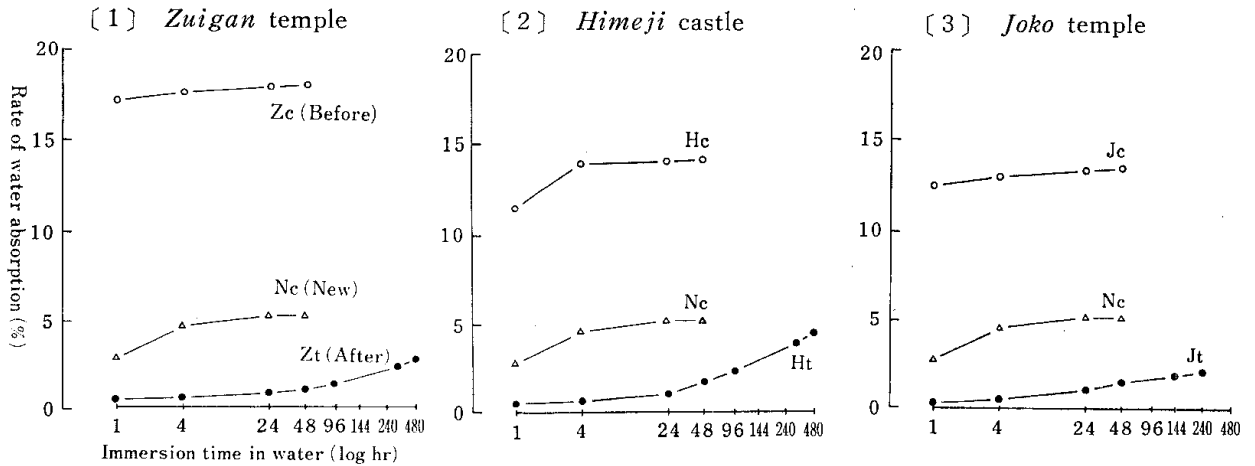


図-5 SS 含浸処置前後の吸水率

Fig. 5 Rate of water absorption in old rooftiles before and after consolidation by impregnation with SS-101

次に、3-1 (3)に示した劣化促進処理を施した後の状態について述べる。

(A) 煮沸繰り返し—寒熱繰り返し処理

本処理は SS 含浸処置定光寺古瓦 (Jt) についてのみ行ったが、この処理によって、外観上の変化 (色、艶の変化やクラックの発生等) は全く見られなかった。処理後の吸水率を処理前の吸水率と対比させて図-6 に示す。

(B) 凍結融解処理

○ 320サイクル処理後の状態

<外観>

Jc: 表面層が顆粒状に崩れると同時に、広範囲に渡って表面層が薄く浮き上がる状態、一部に比較的深いクラックも入る。

Jt: 極く一部分ではあるが鱗片状の剥れが表面層に発生するもおおむね変化なし。

<吸水率>

図-7 に示す。

○ 450サイクル処理後の状態

<外観>

Jc: 劣化著しく、層状に何層にも渡って剥れる状態 (図-8) で、わずかの衝撃でもポロボロ崩れる。吸水率測定不能

Jt: 極く一部に鱗片状の剥れが見られる他は変化なし。

<吸水率>

図-7 に示す。

(C) 屋外曝露

現在、曝露を継続中である。曝露開始後約半年経過した現在迄の所、外観上の変化は全く見られない。今後継続して観察を続けると同時に一定期間経過毎に吸水率測定を行い、

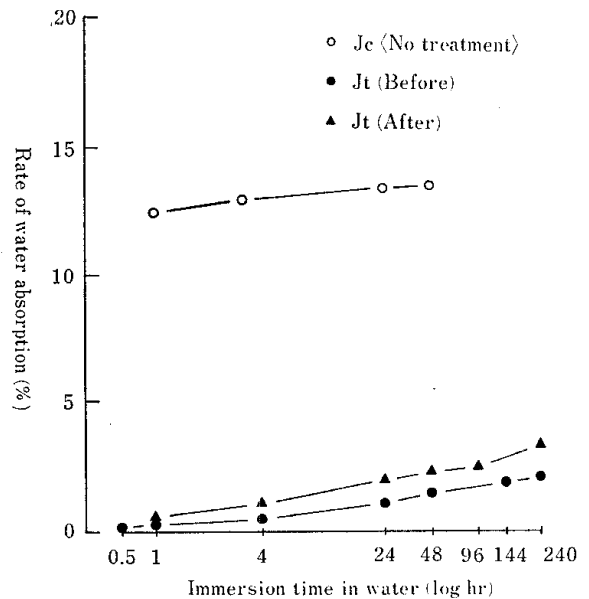


図-6 劣化促進処理による吸水率の変化 (Jt)

Fig. 6 Rate of water absorption in the old rooftile consolidated by impregnation with SS-101 before and after accelerated deterioration treatment.

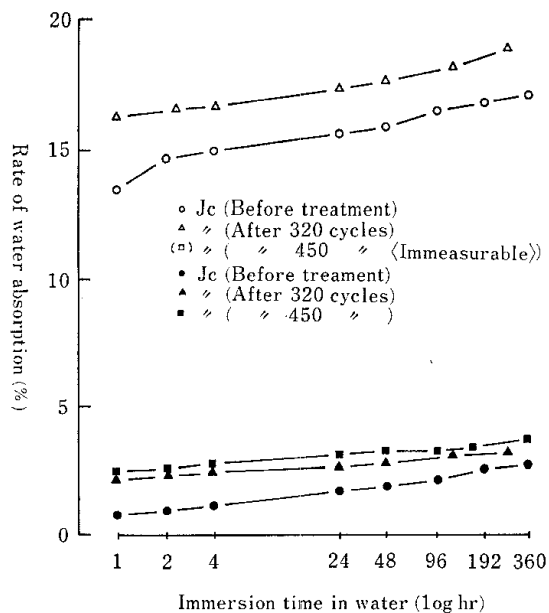


図-7 凍結融解処理による吸水率の変化 (Jc, Jt)

Fig. 7 Rate of water absorption in the old roof tiles consolidated and unconsolidated with SS-101 before and after freeze-thaw cyclic deterioration treatment (-30°C ↔ +30°C)

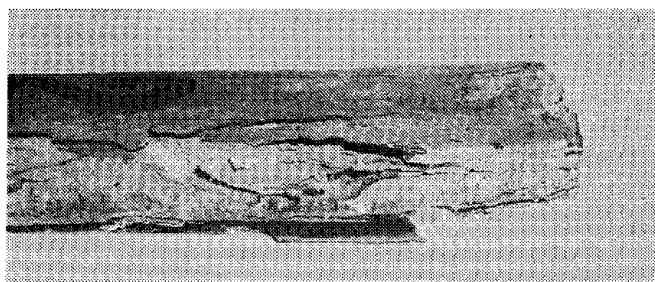


図-8 凍結融解処理により著しく劣化した無処置瓦 (Jc)

Fig. 8 Extreme deterioration to the old roof tile (Jc) by freeze-thaw cyclic treatment.

表-4 曲げ試験結果

Table. 4 Bending strength of the old roof tiles consolidated by impregnation with SS-101 in comparison with unconsolidated ones

	Untreated σ_c	Treated σ_t (Increasing rate)	Required by JIS σ_s^*
1	55.3 kg/cm ²	57.1 (3.3%)	≥45.2 kg/cm ²
2	75.2	80.4 (6.9)	53.3
3	74.8	64.4 (Δ13.9)	49.9
4	74.1	84.1 (13.5)	46.9
5	66.6	73.7 (10.7)	41.5
6	71.5	71.0 (Δ 0.7)	46.9

A : Max bending load for JIS regulation (120 kg)

L : Span (20 cm)

a : Width of the each specimen (cm)

b : Thickness of the each specimen (cm)

$$* \sigma_s = \frac{3}{2} \times \frac{A \times L}{a \times b^2}$$

経時の変化を追って行く予定であるが、相当長期に渡る試験になるであろう。

4-2 曲げ強度

試験結果を表-4に示す。曲げ強度に関しては、個々にバラツキはあるものの、SS 含浸処置による強度増加は余り期待できない。しかし、いずれにしても、JIS 規格で要求される強度は上回っている。

5. 考 察

粘土瓦の具備すべき品質条件として、JIS 規格では別掲の様に定めている。この規格そのも

JIS A 5208-1977 (抜 萃)

4. 品 質

4.1 粘土がわらは、使用上有害な変形、さず、き裂、焼成むら、ふき上げ後見付け部分における素地の露出、また色調の好ましくない不ぞろいがあるてはならない。

4.2 粘土がわらは5.2及び5.3に規定する試験を行い、表-2の規定に適合しなければならない。

表-2

曲げ破壊荷重 kgf [N]	吸 水 率 %	
	ゆう薬がわら	いぶしがわら
120 [1177] 以上	14 以下	20 以下

備 考 粘土がわらに耐凍害性の必要がある場合は、5.4に規定する試験を行い、その結果を付記する。

5. 試験方法

5.1 試験体 試験体は、気乾状態⁽³⁾の粘土がわら全形のままとする。

注⁽³⁾ 気乾状態とは、窯出しした粘土がわらを乾燥した室内に放置し、ほぼ室温に達した状態をいう。

5.2 曲げ試験 スパン 200 mm を直径約 30 mm の鋼製丸棒で支持し、スパン中央全幅に支持と平行させて直径約 30 mm の鋼製丸棒を介して荷重速度約 5 kgf/s [49 N/s] で均一に載荷する。

5.3 吸水試験 試験体を空気乾燥器に入れ、その温度を約 110°C に保ち、24 時間以上経過した後取出して放冷し、室温に達したときの質量を乾燥時の質量とする。

次にこれを水温 15~20°C の清水中に木羽立とし、その上面が水面下約 10 cm になるように全形を浸し、24 時間以上経過した後取出し、手早く各面を湿布でふき、直ちに測定したときの質量を吸水時の質量とし、次によって吸水率を算出する。

$$\text{吸水率(\%)} = \frac{\text{吸水時の質量(g)} - \text{乾燥時の質量(g)}}{\text{乾燥時の質量(g)}} \times 100$$

なお、質量は 5 g の精度で測定する。

ただし、吸水時の質量は 1 時間煮沸した後、室温まで放冷したときの質量を用いてもよい。

5.4 凍害試験 試験体を 15~20°C の清水中に 24 時間以上浸し、吸水させてから取出し、直ちに -20±3°C の冷凍そう内に入れて置く。これを 8 時間以上経過してから再び 15~20°C の清水中に 6 時間以上入れた後取出して湿布でふき、試験体のひび割れ及びはく離の有無を観察する。この凍結融解及び観察の操作を 1 回とし、所定の回数繰返し⁽⁵⁾、凍結融解によるひび割れ及びはく離欠点の有無を調べる。

なお、冷凍そう内の試験体間及び器壁からの距離を 10 cm 以上離して置く。

注⁽⁵⁾ 繰返しの回数は、当事者間の協定によって定める。

のは大変緩く、いわば必要最小限の条件が示されているもので、決して品質上十分な条件を保証しているものではないと考えるべきであろうが、いずれにしても、曲げ強度と吸水率を問題にしている。凍害については、これは、凍害そのものが吸水に伴って起こる現象であり、又、凍害の影響はそれによって起こる表面層の剥れに伴う吸水性の増大が主に問題になるので、結局は吸水性の問題に帰する場合がほとんどである。吸水性に関連して、また、透水性についても考える必要がある。つまり、上部から吸水した雨水を下部から浸出する率のことであるが、これ

は、吸水の絶対量ではなく、吸水の速度を問題にしていると考えて良いであろう。すなわち、飽水に近い状態に到るまでの時間のファクターで捉えることができるのである。従って、瓦の物性の指標としては、曲げ強度と吸水率について考察すればほぼ良いであろうということになる。そこで、次に、曲げ強度について考えてみよう。瓦に一定の曲げ強度が要求されるのは、瓦を葺く場合やその他何等かの事由で、人間が屋根に乗った時にその重さ（豪雪地帯における大量の雪の重み等も稀にはあるが）に耐えられるだけの強さが必要であるというのが實際上ほとんどの理由であり、従って JIS 規格でも強度としてではなく、厚みを考慮しない破壊荷重で規定している。実際には、著しく劣化し、一目で再使用不可と判断されるような古瓦でも、亀裂が入っていない限りは、曲げ破壊荷重が JIS 規格値を下回ることは非常に稀である。しかし、一見健全に見える瓦でも内部に亀裂が存在すると、曲げ強度は大幅に低下し、JIS 規格値を大きく下回ることになる。SS 含浸処置では内部亀裂をカバーすることはできないので、そのような瓦は再使用不能として強化処置の対象から除外しなければならない訳だが、かかる瓦は打診によって容易に判定することができるのでこのことが実際に古瓦の強化処置を進める上で問題になることはない。以上のことから、劣化古瓦の強化再使用のための処置を考える場合は、吸水率を中心に考察すればほぼ十分であるということができる。

試験結果から明らかのように、SS 含浸処置によって吸水率は大幅に低下し、その値は、品質的には現在最高級とみなされる新瓦 (N) をも大幅に下回っている。吸水速度も勿論極めて遅く、このことは、 \langle 吸水率-浸漬時間 \rangle 曲線が凹型、すなわち $dA/dt' > 0$ (A : 吸水率, t' : $\log t$, t : 水中浸漬時間) であることで明らかに表わされている (図-5 参照)。本試験に供した古瓦は、いずれも劣化程度が大きく、そのままでは再使用は到底不可能と判定されたものであるが、吸水率試験結果 (表-2) から見ると、吸水率そのものは 20% 以下であり、JIS 規格から見る限りは規準値を下回っている。しかし、前述のようにこの規格値は非常に高く設定されているので、この場合、吸水率の値そのものよりも、吸水速度が極めて早いことに注目すべきであろう (図-5 参照)。

さて、SS 含浸処置によって付与された強力な防水効果がどの程度持続するか、言い替えれば、SS 含浸処置瓦の耐久性 (耐候性) を判定することは極めて重要なことである。そのため最適な方法は、それらを実際の建造物の屋根に葺き、一定期間経過毎に取り外して吸水率測定を行うことであるが、これは事実上、非常に困難である。そこで、次善の策として当研究所屋上の曝露台で曝露している。しかし、いずれにしてもこの方法では結果が出る迄に非常に長い時間がかかることは言うまでもない。そこで、何等かの方法によりその耐久性を推定する事が必要であり、そのために人工的劣化促進処理を行った訳である。処理としては、(A) 煮沸繰り返し-寒熱繰り返し処理と、(B) 凍結融解処理の二つを行ったのだが、(A) の場合は主に含浸された SS の成分自体の耐久性を見るためのものであり、従って、処置瓦 (Jt) のみを対象とした。(B) については、瓦中の水分の凍結に伴う瓦自体の劣化 (凍害) を調べるために行ったものであるが、今回用いた試験方法は JIS に規定された方法よりはるかに条件の厳しいものである。それは、瓦を含水させた後ポリエチレンシートで包み込み完全にシールした事による。例えば、大谷石の場合、この方法によれば、わずか 10 サイクル程度で大きなクラックが大量に入り、ボロボロに割れる状態となるが、一方、JIS に規定されている方法ではほとんど変化は見られない。勿論、瓦と大谷石ではその耐久性 (凝集力) において大きな差があるが、いずれにしても、今回の凍結融解処理は非常に厳しいものである。さて、(A)、(B) の劣化促進処理による SS 含浸処置瓦の劣化程度は極めて軽微であり、耐久性が非常に高いことを示している。しかし、この結果から SS 含浸処置瓦の寿命を推定することは無理であって、あくまで、相当長期に渡

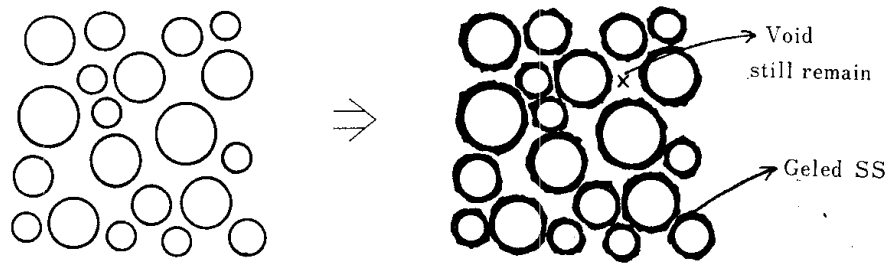


図-9 SS 含浸処置をした瓦の内部の模式図

Fig. 9 Illustration of the section of the rooftile consolidated by impregnation with SS-101

る寿命を有していると考察されるにとどまざるを得ない。唯、ここで重要なことは、もし、SS 含浸処置効果の持続性が期待された程でなく、比較的早い時期にその効力を失ったとしても、その時点で再度含浸処理を行うことができるし、又、その時点でより良い方法が開発されていれば、その方法を適応する事に対して以前の SS 含浸処置が悪影響を与えることは多分ないであろう考えられることである。

SS 含浸処置によって、瓦の曲げ強度の増加を期待できないことは、原理的に考えて当然のことである。すなわち、図-9に示すように、SS の成分は、瓦内部の空隙を充填するのではなく、内部空隙表面を覆う形で固化し、瓦内部には依然として大量の空隙が連続的に存在するからである。このことは、しかし、同時に、SS 含浸処理瓦が気体の出入りを阻害しないことを、又、撥水効果が瓦の内部に及んでいるので、その防水効果が極めて長期に渡って保持される事を意味している。SS 含浸処置によっては曲げ強度を増加し得ないことは、本研究の試験結果からも確認された。しかし、ここで考えなければならないことは、本試験に用いた古瓦は、劣化は相当著しいものの、曲げ強度に関しては JIS 規格値を上回っていたという点である(表-4 参照)。つまり、こと曲げ強度に関する限り強化の必要はなかったのであり、従って、本試験結果は、SS 含浸処置の効果を論じる上で特に問題にはならないのである。曲げ強度に関しては、次の点を、実験的には確認していないが十分考えられることとして挙げておきたい。すなわち、劣化が極めて著しく曲げ強度が JIS 規格を下回っている様な瓦の場合には、亀裂が入っている場合を除いて、SS 含浸処置により、JIS 規格を多少なりとも上回る程度にまでは強度増加させることができるのではないかという点、又、どうしても強度を増加させたい場合には、含浸処理を数回繰り返すことにより、かなりの程度まで増加させることができるのではないかという点である。

6. 結 論

古建築の古瓦を新瓦と取替えることなく再使用するための強化処置法として、Methyl Triethoxy Silane (SS-101) の含浸は極めて効果的である。特に防水性は著しく高まり、その防水性の持続性(耐久性)も極めて優秀である。機械的強度、特に曲げ強度に関しては、ある程度(JIS 規格値以上)強度のあるものについて、それ以上上昇させる効果は少いが、劣化が著しく強度が大幅に低下しているものについては、JIS 規格値を上回る程度まで増強することは出来よう。但し、内外部を問わずクラックが入っていて、そのために曲げ強度が大きく低下しているものについては、本処置によっては強化することはできないので、打診によって除外する必要がある。

7. 謝 辞

本研究を進めるに当り、終止、御指導を賜った、東京国立文化財研究所、伊藤延男所長、同、樋口清治室長、及び、瓦の製造と物性について種々御教授頂いた、奈良県立工業指導所主幹、西城晃氏、瓦宇工業所、小林章男氏の各氏に対し深く感謝致します。

尚、本研究は文部省科学研究費補助金にて行われた。記して深謝致します。

文 献

- 1) 西浦忠輝「石造文化財の修復処置に関する研究〔I〕樹脂処理石材の耐久性」保存科学第16号, 17~29 (1977)
- 2) H. Weber: Stone Restoration and Consolidation using Silicones and Silicic Esters, The conservation of Stone I, 375~385 (1976)
- 3) Anne Moncrieff: The Treatment of Deteriorating Stone with Silicone Resin: Interim Report, Studied in Conservation 21, 179~191 (1976)
- 4) T. Stambolov: The Deterioration and Conservation of Porous Building Materials in Monuments, 49~52 (1976)
- 5) 樋口清治「熊野磨崖仏修理における合成樹脂処置と今後の課題」昭和53年度文化財保存修復研究協議会記録, 32~38 (1979)
- 6) 青木繁夫「源義賢墓の修復について」保存科学第17号, 53~59 (1978)
- 7) 青木繁夫「石櫃の修復」保存科学第19号, 85~89 (1980)

Study on the Conservation of Rooftiles [I]

Experimental Study on the Consolidation of Old Rooftiles for Reuse

Tadateru NISHIURA

The rooftile is an important part of the original fabric of a building. In the case of a monumental or historic building, therefore, the old rooftiles, especially the original ones, should be preserved as part of the original structure. For this purpose, consolidation methods for deteriorated old rooftiles to permit their reuse were investigated by the author.

Satisfactory results were obtained for the consolidation of the old rooftiles by impregnation with a 35% solution of Methyl Tri-ethoxy Silane in organic solvent (SS-101).

One of the biggest advantages of this technique is that its procedure is very simple. The old rooftile is immersed in SS-101 for about two hours, and then dried in air for more than two weeks. By this treatment, the rate of water absorption in the old rooftile is extremely reduced, as for example, absorption was reduced from about 15% down to only 1% after 24 hours of immersion in water. This treatment also increases the bending strength of the very deteriorated rooftile, except the cracked ones, and allows for their reuse. The durability of the consolidated old rooftile was tested by artificially accelerated deterioration, mainly as to the rate of water absorption; these results were compared with results of tests on both unconsolidated tiles and new ones. This test proved that the old rooftiles consolidated by SS-101 had a very good durability.