

〔報文〕 巖島神社大鳥居修理のための充填材料評価試験

早川 典子・館川 修・渡辺 慶乃*1・森井 順之・岡田 光治*2・原島 誠*3

1. はじめに (大鳥居について)

広島県廿日市市にある巖島神社は、寝殿造を基にした海上の木造建築であり、社殿の多くが国宝および重要文化財に指定されている。海上にある大鳥居は棟札から八代目と言われ、明治8年に建てられ現在に至る重要文化財である。

大鳥居は木造、丹塗り、屋根は桧皮葺の木造構造物で、柱は東西の主柱をそれぞれ二本の袖柱によって支えている。柱の規模は、主柱間隔(芯芯)約10.9m、棟高約16.6mである。それぞれの主柱は袖柱と上下二本の貫で繋がれており、貫通部分上部は楔により固定されている。主柱は楠材であり西の主柱は継ぎ木を行っており、継手は上の貫下から下の貫下に至る長さ約3.48mの金輪継である。また、東の主柱に金輪継ぎの記録はなく一本物であろうと考えられている。四本の袖柱は杉材であり、明治15年に最初の根継ぎ(おそらく楠)が営繕記録に記されており、その後も根継ぎや再塗装など何度も修理が行われている¹⁾。

この大鳥居の西主柱と西南袖柱の調査を平成21年8月と平成22年5月の二回にわたって行ったところ、西南の袖柱の根継ぎの継ぎ手部分側面に左右二カ所の空隙があることが確認された(写真1, 2)。空隙の大きさは、東側(写真2)は縦約30cm、横約10cm程度、西側(写真1)における根継ぎ部分左の空隙)は縦約30cm、横約5cm程度であり、奥行きは正確にはわからないものの少なくとも一部分は柱の反対側に貫通している。ただし、劣化している部分の多くは柱の矧ぎ木であり、主材の軟化は表層のみにとどまり構造補強はそれほど急がれないと推定されること²⁾から、緊急な構造補強ではなく、これ以上の劣化を防ぐためにこの空隙についての充填が必要とされている。特に空隙部分で風や波の影響により木材の動きが生じた場合に、追復



写真1 南西袖柱の根継ぎ周辺空隙



写真2 南西袖柱の根継ぎ周辺空隙

*1(株)宝建材製作所 *2大都産業株式会社 *3巖島神社 工務所

した部材に亀裂等の損傷が生じる懸念がある。そこで、木材の動きを防ぎつつ適度な透水性のある材料でこの部分を充填することを検討した。そのための材料評価の試験を行ったので本報で報告する。

厳島神社は、臨海環境という屋外環境でもさらに苛酷な環境下にある。直射日光、雨水、海風、塩水といった厳しい環境にさらされ、かつ大鳥居は、覆い屋などでそれらから保護されていない建造物である。このような環境で使用することができる材料は、他の現場でも応用できる可能性が高いため、今後の適用も考え、複数の観点から劣化試験を行い、材料を評価した。

2. 材料について

大鳥居の空隙部分の充填材料を検討するにあたり、下記の条件で材料を選択した。

- (1) 空隙部分に充填できるよう可塑性があること
- (2) 海上、屋外の条件下でも硬化・固定すること。
- (3) 立地上、潮の干満の影響を受けるため、短時間で充填作業（硬化）が終了すること
- (4) 作業時に、発熱など木材に影響を及ぼす現象が少ないこと
- (5) 木材と大きく比重が変わらないこと
- (6) 海虫や菌類など微生物の被害を受けにくいこと
- (7) 海上、屋外の条件下で急速に劣化することがないこと
- (8) 適度な透水性を持つこと

平成5年の大鳥居修理では、樹脂モルタルを使用している^{2),3)}ことから、樹脂モルタルを中心に検討を行った。樹脂モルタルは可塑性があるため上記条件の(1)を満たし、また、エポキシ樹脂であることから(2)の条件も満たす。さらに硬化剤の種類を適切に選択すれば(3)の条件を満たすことも可能である。

ただし、珪砂など比重の大きい骨材を使用する樹脂モルタルでは(5)の比重に関しての条件がやや問題がある。また、平成5年の大鳥居修理では、浅い空隙部分にはエポキシ系樹脂パテを用いた²⁾が、このエポキシ系樹脂パテを用いた場合、今回は空隙部分が大きいため大量の発熱が予想され、木材に影響すると考えられる。そこで鈹物系の軽量骨材を検討した。重要文化財平井家住宅保存修理において、梁の補修で使用したとの記録⁴⁾から、ユニカロン((株)宝建材製作所製)の使用を中心に、珪砂の樹脂モルタルと併せて材料評価を行った。ユニカロンは粘土質鈹物を高温焼成した軽量の骨材で、粒子内部は多孔質のため、比重は約0.5である。さらに、木部への充填であることから木粉、および同様に細かい粒度で生物の影響を受けにくいことからガラスマイクロバルーンも充填材料として検討した。

また、使用する樹脂については、作業が海上であり日々の作業時間が限定されることから、硬化時間が短いことを優先して選択した。平成13年の高舞台の修理で使用したグイトサイザーow200(大都産業(株)製)を中心に検討した。最初に、発熱温度と比重、圧縮強度について基礎的な評価をした上で、(6)と(7)の劣化条件に関連した強制劣化試験および現地曝露試験を行った。本項では、まず材料の基礎評価について報告する。

2-1. 材料

使用した骨材、および樹脂材料を下記に示す。

骨材

- 1) 珪砂(3号, 5号, 7号)((株)宝建材製作所)
- 2) ユニカロン(ϕ 3mm)((株)宝建材製作所)

- 3) スギ木粉 (40メッシュ) (富山県西部森林組合)
- 4) ガラスマイクロバルーン (Q-CEL 7014) ((株)ポッターズ・バロッティニー)
- 5) ユニカロンとスギ木粉
- 6) ユニカロンとガラスマイクロバルーン

樹脂材料

- A. ダイトサイザーow200 (大都産業(株)製)
- B. ダイトサイザーow200 (改) (大都産業(株)製) Aより発熱量が小さい硬化剤を使用
- C. コニシボンドE-810LS (コニシ(株)製)

それぞれの樹脂材料の性状, 硬化性を表1に示す。

これらの樹脂材料と骨材を事前に混練し, 作業性の確認を行った結果, 表2の1~6に示す配合で骨材を使用することを決定した。

また, この比率で材料を混練し硬化した場合, 硬化後の樹脂モルタルに水を滴下すると材料下部からにじみ出ることを確認し, 透水性のある材料と判断した。

2-2. 発熱量

決定した混合比で材料を混練した場合の350 mlの発熱量を測定した。

測定容量: 350 ml (500 ml ポリ容器に70%充填)

測定機器: グラフィックレコーダ KR2000 ((株)チノー製)

得られた測定結果を表3に示す。

2-3. 比重測定

決定した混合比で材料を混練した場合の各試料の比重を, 比重カップ法と水中置換法の二通りで測定した。

表1 使用材料

	粘度/主剤 (mPa·s)	粘度/硬化剤 (mPa·s)	比重/主剤 (25°C)	比重/硬化剤 (25°C)	配合比 (主/硬)	可使時間 (23°C, 100g)	最高温度/ 到達時間
(a)ダイトサイザーow200	900	6000	1.124	1.094	5/2	24 min	140°C/43 min
(b)ダイトサイザーow200 (改)	900	800	1.124	1.031	5/2	40 min	84°C/90 min
(c)コニシボンドE-801LS	594	396	1.144	1.000	5/2	90 min	59°C/180 min

表2 樹脂と骨材の重量比 (樹脂を1とした場合の骨材の割合)

	1. 混合珪砂 (3号/5号/7号 =6/3/1)	2. ユニカロン	3. ユニカロン /木粉	4. ユニカロン/ ガラスマイクロバ ルーン	5. 木粉	6. ガラスマイ クロバルーン
A ダイトサイザー ow200	6	2.8	2.5/0.1	2.5/0.04	1/8	1/9
B ダイトサイザー ow200 (改)	6	2.8	2.5/0.1	2.5/0.04	1/8	1/9
C コニシボンド E-801LS	7	3.3	2.5/0.1	2.5/0.04	1/8	1/9

表3 発熱温度とその温度までの到達時間（骨材1～6と樹脂A～Cの組み合わせで表示）

	1-A	2-A	3-A	4-A	5-A	6-A
室内気温（℃）	21	23	23	23	21	21
（最高発熱温度）	29.0	34.8	35.4	35.6	159.7	156.8
最高発熱到達時間 （min）	95	63	56	59	26	28

	1-B	2-B	3-B	4-B	5-B	6-B
室内気温（℃）	21	23	23	23	21	21
（最高発熱温度）	26.1	29.4	30.4	29.6	130.4	114.4
最高発熱到達時間 （min）	84	55	54	48	48	39

	1-C	2-C	3-C	4-C	5-C	6-C
室内気温（℃）	21	21	21	21	21	21
（最高発熱温度）	24.0	24.9	25.7	26.2	143.0	122.9
最高発熱到達時間 （min）	157	141	115	110	103	110

2-3-1. 測定試料

直径：33 mm，高さ：25 mm

試料作成後，23℃で1週間静置し，測定に供した。

2-3-2. 測定方法

① 比重カップ法（JIS K7232に準じた。）

試料の重量を精度0.1 mgの電子天秤で精秤し，寸法を精度0.01 mmのデジタル式ノギスで測定した。これらの重量と寸法から比重を算出した。

② 水中置換法（JIS K7232に準じた。）

試料の重量 (m_1) を精度0.1 mgの電子天秤で精秤した。試料を蒸留水中に浸漬した上で，超音波装置にて30分間脱気した。JIS K0061に規定する装置を用い，25℃の蒸留水中に試料をつるし，そのときの値 (m_2) を電子天秤（精度0.1 mg）にて測定した。吊り糸の質量 (m_3) を精秤し， $S = m_1 / (m_1 - (m_2 - m_3))$ として比重 S を算出した。

2-3-3. 測定結果

得られた比重を表4に示す。

2-4. 圧縮強度

決定した混合比で材料を混練した場合の各試料の圧縮強度を JIS R5201 に準じて測定した。

表4 各材料の比重（骨材1～6と樹脂A～Cの組み合わせで表示）

	1-A	2-A	3-A	4-A	5-A	6-A
比重カップ法	2.022	0.878	0.953	0.852	0.742	0.523
水中置換法	2.040	0.970	0.972	0.960	0.979	0.966

	1-B	2-B	3-B	4-B	5-B	6-B
比重カップ法	2.044	0.837	0.928	0.916	0.903	0.598
水中置換法	2.073	0.977	0.985	0.961	0.986	0.968

	1-C	2-C	3-C	4-C	5-C	6-C
比重カップ法	1.972	0.794	0.97	0.94	0.916	0.691
水中置換法	2.027	0.926	0.995	0.993	0.986	0.974

2-4-1. 測定試料

縦×横×高さ：40 mm×80 mm×40 mm

試料作成後、23℃で1週間静置し、測定に供した。各試料はそれぞれ5点ずつ測定し、その平均値を圧縮強度とした。

2-4-2. 測定条件

測定機器：オートグラフ AG-100kNG（島津製作所製）

測定範囲：縦×横×高さ＝40 mm×15.82 mm×40 mm

測定速度：1 mm/min

測定温度：23℃±2℃

2-4-3. 測定結果

得られた圧縮強度を表5に示す。

表5 基礎評価試験における圧縮強度試験結果

（骨材1～6と樹脂A～Cの組み合わせで表示）

	1-A	2-A	3-A	4-A	5-A	6-A
圧縮強度	62.1	15.6	16.0	15.7	30.7	11.7

	1-B	2-B	3-B	4-B	5-B	6-B
圧縮強度	68.5	14.2	19.9	19.0	41.1	19.0

	1-C	2-C	3-C	4-C	5-C	6-C
圧縮強度	65.1	10.0	19.0	14.3	43.8	15.6

圧縮強度単位：N/mm²

2-5. 考察

それぞれの樹脂の発熱温度と比熱、圧縮強度を測定した。発熱温度に関しては、1～4の鉱物系の骨材を使用した場合に、温度上昇が抑えられていることが確認され、木粉やガラスマイクロバルーンは単体でエポキシ樹脂に混入した場合、100℃を越える発熱が見られたこと、また実際の施工容量は実験の350 ml よりもはるかに大きい点から、今回の修理作業には不適当であると考えられる。また、最高発熱温度に至るまでの時間はBの樹脂が最も短く、これは硬化が早いことを示している。

比重については1)の珪砂を用いた場合は2前後、それ以外は1以下であった。実際の木材の比重は樹種や含水率により異なるが、一般的には1以下であることを考えると、2～6の試料が比較的、木材に近い値と考えられる。

圧縮強度の結果は、1)の珪砂がどの樹脂の場合でも高く、2)のユニカロンの試料が最も低かった。

以上の結果から、発熱温度の結果を考慮し、骨材は珪砂とユニカロン、そして作業性の面からユニカロンに木粉やガラスマイクロバルーンを加えたもの、つまり骨材1)～4)を劣化試験の評価対象とした。また、樹脂については、最も硬化が早く発熱温度の低いグイトサイザーow200(改良)を選択した。これを組み合わせた材料(1-B, 2-B, 3-B, 4-B)について、紫外線劣化、耐湿潤冷熱繰り返し性、塩水噴霧による腐食性の強制劣化試験を行い、かつ現地にておける曝露試験も行ったので、以下に報告する。

3. 紫外線による強制劣化試験

材料の基礎評価により選択した試料を対象に、紫外線による強制劣化試験を行った。今回、充填を検討している箇所は柱の内部であるため紫外線による影響は少ないと考えられるが、エポキシ樹脂劣化の大きな要因である紫外線による影響は確認しておく必要がある。JIS K5600-7-8に基づき、下記の条件で紫外線照射試験をし、評価は目視と色差、圧縮強度により行った。

3-1. 試験条件

試料：4 cm×4 cm×8 cmの試料を作成し、1週間養生後、試験に供した。色差および圧縮強度試験については、それぞれの試料につき5点を測定し、平均値を算出した。

使用機器：アイスーパーUV テスター (SUV-W151) (岩崎電気(株)製)

紫外線：ランプ型式 MO4-L21WBX (295 nm～450 nm)、照度150±8 mW/cm²

照射サイクル：1サイクル 照射4時間→結露4時間、180サイクル

3-2. 試験結果

3-2-1. 目視観察

膨れ、割れなどはどの試料においても確認されなかった。色の変化については、20サイクル終了時点で、上面に樹脂の白色化が生じているのが確認されており、その後、30サイクル時点では白色化がかなり進み、一部が分解消失していることも確認された。40サイクル時点では上部の樹脂はほぼ失われている(写真3)。ただし、紫外線が照射されていない下面の樹脂は180サイクル終了後もほぼ健全な状態を示していた。(写真4)この傾向は、骨材の種類によらず、すべての試料で確認された。

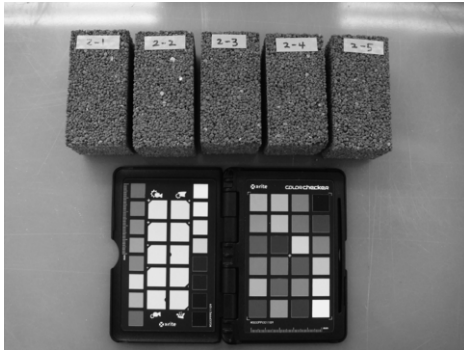


写真3 紫外線照射試験40サイクル終了後
2-B 上面



写真4 紫外線照射試験180サイクル終了後
2-B 下面

3-2-2. 色差測定

色彩色差計 CR-200 (コニカミノルタ(株)製) を用いて、 ΔL^* 、 Δa^* 、 Δb^* を測定し、色差を $\Delta E = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2}$ として算出した。

得られた色差 ΔE の変化を図1に示す。試料の上面と下面では変化の傾向が異なる傾向がある。ユニカロンを使用した2-B～4-Bサンプルでは、上面は20サイクル目で色差が大きくなり、その後低下する傾向がある。これは20サイクル時点でエポキシ樹脂が紫外線で劣化して白色化するという目視観察結果とも一致する。その後、樹脂が分解するにつれ、ユニカロン単体の色にもどっていくため色差は減少していくのだと考えられる。1-Bの珪砂骨材に関しては、目視では同じようにエポキシ樹脂の変化が確認されているが、色差が徐々に上昇していくのは、試料作成時に骨材の色みが樹脂により暗く変化していたため、樹脂が消失するにつれ、珪砂単体の色に戻っていき、その色と試料作成時との色差が大きいためと考えられる。

下面は、変化があまりなく、紫外線の直接あたらない面については変化が少ないことが色差測定からも確認された。ただし、4-Bについては、やや変化が大きい。この試料は骨材に含まれるガラスマイクロバルーンの色が白色であることから、樹脂が劣化した場合に、この色が目立ちやすいからと考えられる。

3-2-3. 圧縮強度測定

JIS R5201セメントの物理試験方法に準じて紫外線照射終了後の試料の圧縮強度を測定した。

圧縮強度測定機：1-Bの測定 オートグラフ50TB ((株)島津製作所製)
2-B～4-Bの測定 インストロン5581型 (INSTRON(株)製)

測定範囲：縦×横×高さ = 40 mm×15.82 mm×40 mm

測定速度：2 mm/min

測定温度：23°C ± 2°C

得られた結果を表6に示す。

1-Bと4-Bが試験後の強度発現率が70%台であり、2-Bと3-Bがほぼ変化していない点と比較するとやや低い結果が出ている。これは、この二試料がそれぞれ色差の結果で上面、下面のそれぞれ最も大きな値を示したことも照応する。

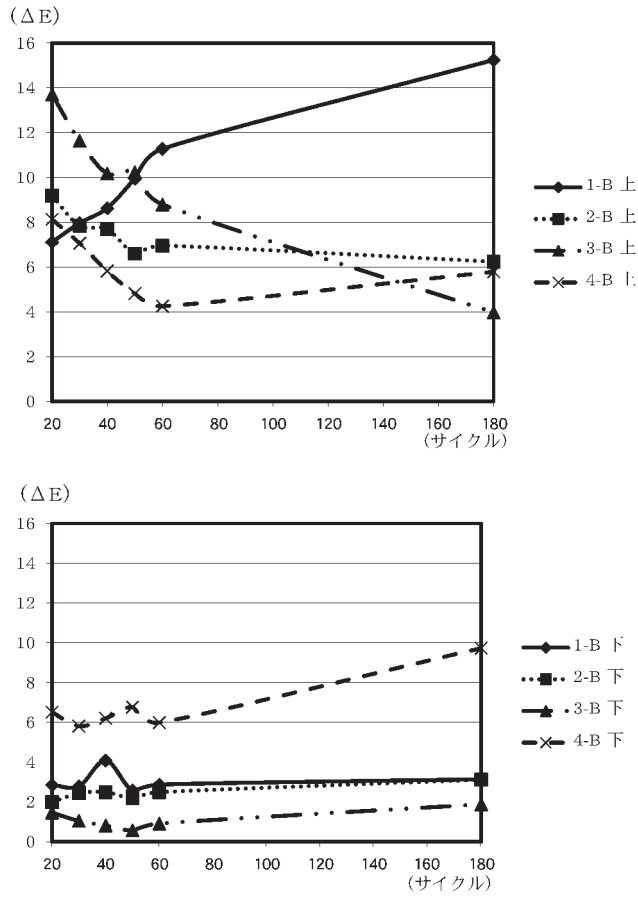


図1 紫外線劣化試験における色差変化 (1-B (混合珪砂), 2-B (ユニカロン), 3-B (ユニカロン/木粉), 4-B (ユニカロン/ガラスマイクロバルーン))

表6 劣化試験における圧縮強度試験結果

(1-B (混合珪砂), 2-B (ユニカロン), 3-B (ユニカロン/木粉), 4-B (ユニカロン/ガラスマイクロバルーン))

	強制劣化試験用 ブランク	紫外線照射試験	耐湿潤繰り返し ブランク	塩水噴霧	屋外曝露 ブランク	屋外曝露
1-B (1-B強度発現率)	84.81	64.69 76%	48.00 59%	71.44 84%	59.88	49.69 83%
2-B (2-B強度発現率)	9.87	10.1 102%	8.88 90%	10.01 101%	11.62	10.61 91%
3-B (3-B強度発現率)	12.36	12.32 100%	10.84 88%	14.48 117%	13.85	10.29 72%
4-B (4-B強度発現率)	16.23	11.81 72.80%	10.49 65%	15.88 98%	11.36	10.23 90%

圧縮強度単位: N/mm²

4. 耐湿潤冷熱繰り返し性試験

巖島神社は海の中にあり、強い日差しや高い湿度、水分の影響を受ける環境である。使用する材料は温度湿度の大きな変化の影響を受けることになる。そこで、温湿度の変化による劣化状態を確認するため、JIS K5600-7-4に準じて冷熱サイクル試験をし、その評価を目視と色差および圧縮強度試験で行った。

4-1. 試験条件

試料：4 cm×4 cm×8 cm の試料を作成し、1週間養生後、試験に供した。色差および圧縮強度試験については、それぞれの試料につき5点を測定し、平均値を算出した。

使用機器：日立恒温恒湿槽 EC-126HH2S（日立製）

冷熱サイクル：サイクル条件1 湿潤（50℃，95%RH）18時間→低温（-20℃）3時間→標準状態（23℃，50%RH），180サイクル

4-2. 試験結果

4-2-1. 目視観察

20サイクル終了後、2-Bと3-Bは大きな変化はない一方、1-Bと4-Bは樹脂部分が白色化していることが確認された。この傾向は特に4-Bに強く、上面よりもむしろ下面の方に顕著である。これは、樹脂に混合されたガラスマイクロバルーン粒子が湿度の影響により界面で樹脂と剥離しているからではないかと考えられ、湿度（水分）を含みやすく、かつ樹脂分の多い下面でこの現象が生じやすいのではないと思われる。

また、この変化傾向は180サイクル終了後には強く見られ（写真5）、4-Bは下面だけでなく上面でも白色化が確認された。

4-2-2. 色差測定

3-2-2.と同様に色差を測定し、算出した。得られた色差のサイクル数による変化を図2に示す。

今回は紫外線照射とは逆に下面の色差が大きい傾向があり、特に4-Bのマイクロバルーンを含む試料に関しては、下面の色差は非常に大きい。これは湿度の影響を下面の方が受けやすいからと思われる、目視観察の結果と一致する。これ以外の試料については、上面下面の変化傾向は下面の方がやや大きいものの、ほぼ同様に推移しており、湿度の影響を均一に受けていると考えられる。

また、1-B珪砂の試料については、他の試料と異なり、徐々に色差が大きくなっていく傾向がある。樹脂の顕著な劣化は見られないことから（写真6）、珪砂についても湿度により樹脂と界面剥離を生じている可能性がある。

4-2-3. 圧縮強度測定

3-2-3.と同様に劣化試験後の試料の圧縮強度試験を測定した。得られた結果を表6に示す。目視観察や色差測定の結果から、1-Bと4-Bについては骨材粒子と樹脂の界面で剥離が



写真5 耐湿潤サイクル試験180サイクル終了後（4-B 下面）

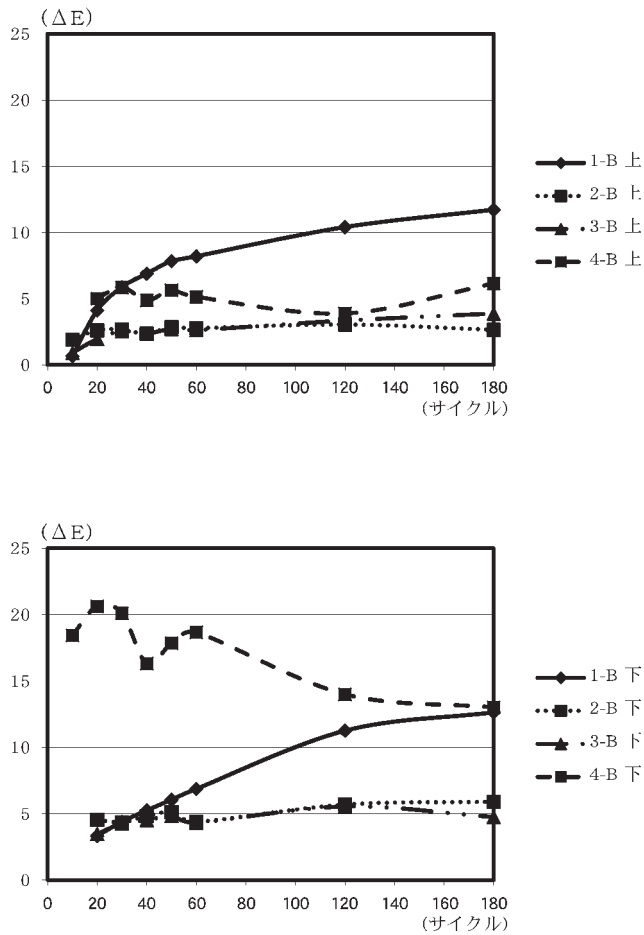


図2 耐冷熱サイクル試験における色差変化 (1-B (混合珪砂), 2-B (ユニカロン), 3-B (ユニカロン/木粉), 4-B (ユニカロン/ガラスマイクロバルーン))

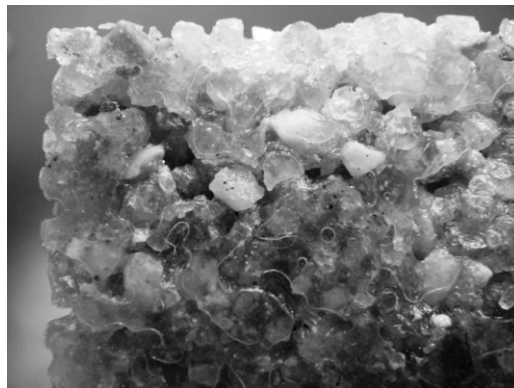


写真6 耐湿潤サイクル試験180サイクル終了後1-B

生じている可能性があるが、強度試験においてもこの二試料は強度発現率が6割程度と低くなっており、この現象を裏付けている。その一方、2-Bと3-Bについては、9割程度の強度発現率であり、ユニカロンを使用する場合は、単体、もしくは木粉の混合剤を使用した方が温湿度の変化を受けにくいと考えられる。

5. サイクル腐食試験方法 一塩水噴霧／乾燥／湿潤

厳島神社は、海の上にあるため、海水の影響を受けることになる。そこで塩水による影響を確認するために、JIS K5600-7-9に準じて塩水噴霧／乾燥／湿潤のサイクル腐食試験を行った。評価は目視とおよび圧縮強度試験で行った。試験に用いる塩の析出により色みの変化を受けるため、色差測定は評価に用いなかった。

5-1. 試験条件

試料：4 cm×4 cm×8 cmの試料を作成し、1週間養生後、試験に供した。色差および圧縮強度試験については、それぞれの試料につき5点を測定し、平均値を算出した。

使用機器：複合サイクル試験機 BQ-2 (板橋理化工業(株)製)

冷熱サイクル条件：塩水噴霧 (35℃) 2時間→乾燥 (60℃, 20~30%RH) 4時間→湿潤 (50℃, 95%RH) 2時間, 180サイクル

5-2. 試験結果

5-2-1. 目視観察

180サイクル終了後も樹脂光沢を全試料とも保持しており、割れ、膨れなどもなく大きな変化は認められない。塩分の付着は認められるが、樹脂自体の変化はほとんど認められない。また、骨材の割れや骨材による塩類析出の促進などは確認されなかった。

5-2-2. 圧縮強度測定

3-2-3.と同様に劣化試験後の試料の圧縮強度試験を測定した。得られた結果を表6に示す。1-Bは強度発現率が84%であり、ユニカロンを含む2~4-Bはほぼ100%の値が得られている。このことから、試料を海水浸漬した場合でも塩類風化などによる強度の低下は生じにくいことが示された。特にユニカロンは内部が多孔質であり、塩類風化の懸念があったが、材料製造時の高温により、粒子表面が粘土質で覆われ、内部に塩水が浸透しないため、本試験では塩類風化が生じなかったのだと考えられる。

6. 現地曝露による劣化試験

1-B~4-Bの試料を実際に現地近くにて1年以上の期間、曝露試験を行い、劣化状態を確認した。

6-1. 試験条件

試料：1-B~4-Bを表2の混合比で混合した。ただし、モルタル充填作業の施工性を向上させるため、本試験の試料については1.3%重量のアエロジル(流動性改善剤)を加えて混練した。

試験体1：ヒノキ新材および古材に縦18 cm×横8 cm×深さ8 cmの充填箇所を作り、樹脂を充填する。同一木材に8カ所の充填箇所を行ったものを4本作成した。

試験体2：4 cm×4 cm×8 cmの試料を一試料につき5点作成。併せて室内保管用プランクも5点ずつ作成した。

試験体1, 2とも平成22年6月2日から4日にかけて作成し、翌6月5日より曝露を行った。

曝露期間：平成22年6月5日～平成23年9月13日（途中、台風による試験体の流失を避けるため、平成22年8月11日～平成22年11月6日および平成23年5月27日～平成23年6月8日の2回、曝露を中断した。）

曝露場所：巖島神社平舞台下（潮間帯）平舞台により雨の影響は軽減されるが、平舞台の床板間から雨水は流入する（写真7）。

曝露方法：試験体1の4本は、海に向かって90°ずつ角度を変え、それぞれの試料の4方向の劣化状況を確認できるように設置し、固定した（写真7）。試験体2については、ポリエチレン性メッシュコンテナ内にそれぞれの試験片を固定した上で、曝露場所にコンテナを固定した。（写真8）

評価：目視、含水率測定、圧縮強度測定



写真7 現地曝露試験 試験体1の設置



写真8 現地曝露試験コンテナ設置箇所

6-2. 目視観察

試験開始後2ヶ月目までは1ヶ月おき、その後はほぼ3ヶ月おきに観察を行った。

試験開始約1ヶ月後の平成22年7月13日の時点で、樹脂モルタルと木材との間に隙間が生じていることが確認された（写真9）。この現象は、樹脂モルタル試料の種類によらず確認され、試験体の設置方向による規則性は認められなかった。また、ヒノキの新材の試験体にもみ見られ、古材では生じていなかったことから海水浸漬による木材の膨張収縮により隙間が生じたと考えられる。この隙間はその後の観察では広がってはならず、2～3 mm程度でおさまっているため、海水による木材の膨張と干潮時の収縮は浸漬直後の影響が大きいと考えられる。また、2ヶ月目の観察においては、試験体1の樹脂モルタルの下部に白い液状のものが確認され（写真10）、以降15ヶ月目まで同じような状態であった。これは、塩類の析出の可能性、生物の可能性の他、15ヶ月の間に変化がないことから材料に混ぜたアエロジルの溶出の可能性もある。

1ヶ月後の観察以降、樹脂モルタルの大きな変化は認められず、6ヶ月経過後（曝露休止期間を含むため、実質曝露期間は3ヶ月程度）あたりからフジツボなどの着生が確認されたにとどまる（写真11）。

15ヶ月経過後の最終観察では、材料自体の亀裂や軟化、硬化阻害、構造破壊、塩類析出などはすべての試料において確認されなかった。ただし、干潮時においても試験体は完全に乾くことはなく濡れているため、塩類析出や粉状化などは確認することが不可能であった。

また、試験体2については、直方体試料の辺が削られた欠失が生じていることが確認された(写真12)。さらに、試料の底面でユニカロンの粒子が削られ、断面が見られる状態も観察された(写真13~16)。この状態は3-Bで多く見られ、4-Bではあまり確認されなかった。



写真9 現地曝露1ヶ月後に生じた新材と樹脂充填材との間隙



写真10 樹脂充填材料表面の白色液状物質



写真11 フジツボの着生(曝露開始3ヶ月後)

6-3. 試験体の含水率調査

試験体1の含水率計測を実施した。計測対象は試験体1のうち古材(ヒノキ)に四角い穴を開け、各充填材料を埋め込んだものとした。これは、目視観察で新材は水分変化が大きいことから、古材の方が樹脂モルタル自体の変化を把握しやすいためである。機器は木材水分計ターク(ケット科学研究所)を用い(選定樹種・ヒノキ)、海側に向けた面・山側に向けた面にそれぞれ埋め込まれた充填材料の表面を3か所計測した。なお、厳島神社における充填材料の曝露試験は平舞台の床下で行われているため、含水率計測も床下に進入可能な引き潮時(主に干潮時)にて行われた。

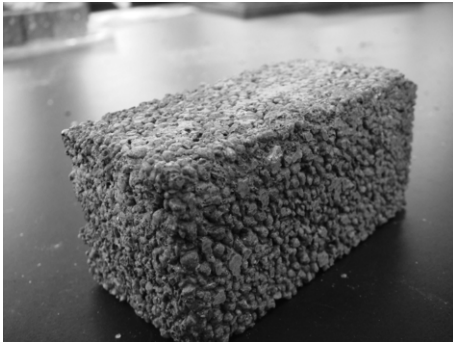


写真12 現地曝露試験後に生じた欠失
(左奥の短辺)

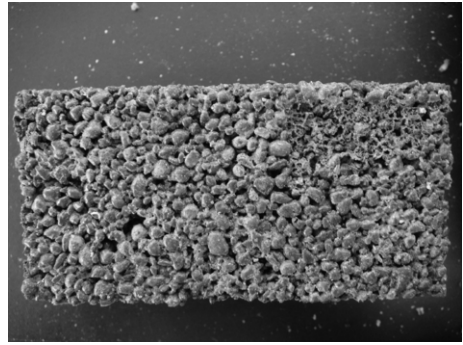


写真13 現地曝露試験後に生じた粒子の割れ
(2-B)

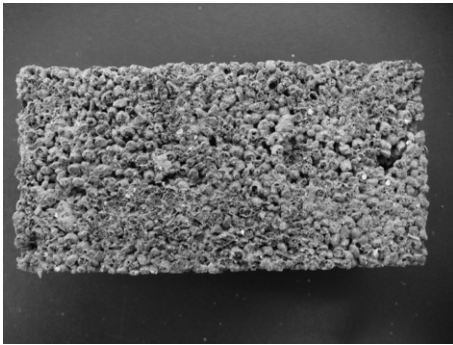


写真14 現地曝露試験後に生じた粒子の割れ
(3-B)

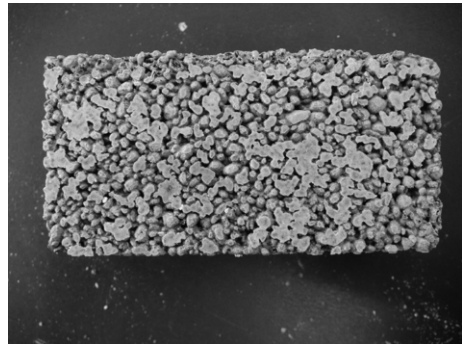


写真15 現地曝露試験後に生じた粒子の割れ
(4-B)



写真16 現地曝露試験後に生じた粒子の割れ
(3-B拡大)

試験開始後2ヶ月目までは1ヶ月おき、その後はほぼ3ヶ月おきに測定を行ったがその間に台風襲来があり試験の中断等があったことや雨天の測定日があったため、そのデータは指標としては用いず雨天時以外の測定値を用いて、充填材料と木材の相関や各充填材料の含水率特性について解析を行った。

図3に測定点a～fを図示する。図4に典型的な事例として2011年3月4日に計測した結果を示す。計測時は晴れ、引き潮の状態（ほぼ干潮時）であった。各試料の含水率は、3-B（65.1%）> 1-B（53.7%）> 4-B（52.0%）> 2-B（51.9%）（カッコ内平均値）の順に含水率が高く、2-Bが最も透水性が良いことが確認できた。また、海側（a, b, c）の測定値においては、どの充填材料も最も含水率が低いのはbであり、a, cのほうが高くなっていた。山側（a～f）の測定値においては、柱の中央に向けて含水率が高くなり、含水率が最も高いのはdであった。このことから、図3における矢印の通り木材から充填材料への水分移動があるため、図4のような計測結果になったと考えられる。

この結果、今回試験したどの充填材料も木材と比較して透水性が優れており、満潮時に試験体が一度濡れた後は木材のほうが含水率が高く、木材から充填材料へ水の移動があることが把握できた。また、Bが最も透水性が良いことが確認できた。

6-4. 圧縮強度測定

曝露期間終了後に試験体2の試験片を引き上げ、流水にて洗浄した。十分に乾燥させた後、3-2-3.と同様に劣化試験後の試料の圧縮強度試験を測定した。また、ブランク試料も併せて測定した。得られた結果を表6に示す。

強度発現率がいずれも低下していることが確認された。特に3-Bは72%まで低下しており、これは目視判定で下部の粒子が最も削られていることと照応する。1-Bは目視では大きな変化は見られなかったものの、強度発現率は83%であり、2-B、4-Bの90%程度よりは低い。

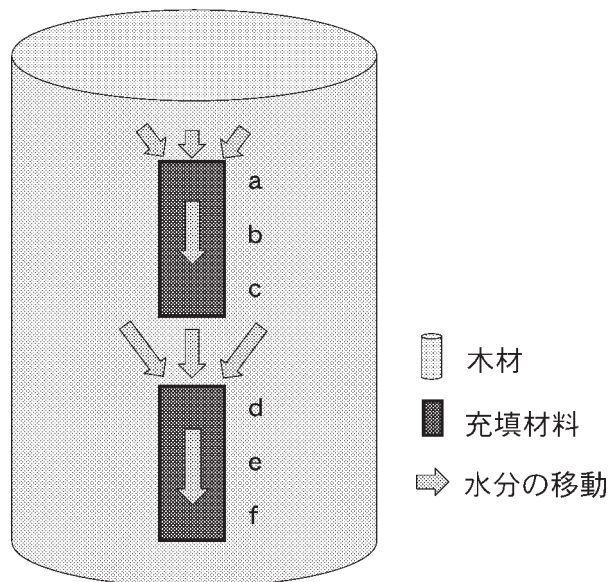


図3 充填材料の曝露試験における含水率計測地点（a～f）

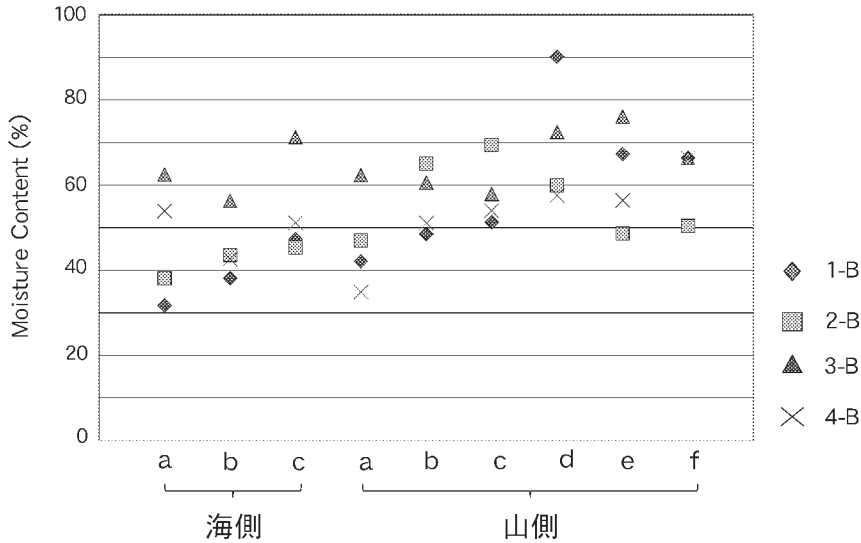


図4 充填材料の含水率分布 (2011/3/4) (1-B (混合珪砂), 2-B (ユニカロン), 3-B (ユニカロン/木粉), 4-B (ユニカロン/ガラスマイクロバルーン))

7. 結語

厳島神社大鳥居の修理, 特に空隙充填のための材料を検討した。今回の目的には, 強度的な補強よりも安定した物性での充填が求められるため, 紫外線照射, 耐冷熱サイクル, 塩水噴霧, 現地曝露の劣化試験を行い, 評価した。

総合的には, 2-Bの骨材をユニカロン単体にした場合が, 各種の劣化条件に対して最も安定していた。また, 現地曝露における透水性もよいことが確認された。ただし, 垂直面など立体物への充填を行う場合にはこの材料は作業性の面でやや劣る。今回, 現地曝露用の立体試験体は, アエロジル (流動性改善剤) を混入して作成した。

1-Bの珪砂を骨材とするサンプルがその次に安定していたと考えられるが, この材料は比重が大きいので, 木材内部の空隙部分が多い場合の使用は, 重量や重心などについて検討が必要とされる。また, 耐湿潤サイクル試験において樹脂との界面剥離を生じる傾向もある。

3-Bと4-Bのユニカロンに粉状のフィラーを加えた試料については, いずれも粉状フィラーの影響が見られた。木粉の場合は現地曝露で削れやすい傾向にあり, ガラスマイクロバルーンを加えた場合は, 耐湿潤サイクル試験において, 樹脂とバルーン粒子との界面剥離が見られた。

本研究で確認された物性に基づき, 今後の修理を検討する予定である。

参考文献

- 1) 藤井義久, 藤原裕子, 木川りか, 原島誠, 喜友名朝彦, 杉山純多, 早川典子, 川野邊渉: 厳島神社大鳥居の生物劣化調査, 保存科学, 50, 157-172 (2011)
- 2) 財団法人 文化財建造物保存技術協会: 二 大鳥居樹脂工事「国宝 厳島神社本社本殿不名門ほか二十六棟保存修理 (災害復旧) 工事報告書」134-142, (1994)

- 3) 坪田実：塗料・塗装の基礎知識と試験法 第38回 素量設計の基本【Q & A】，塗装技術，50，121-127 (2011)
- 4) 財団法人 文化財建造物保存技術協会：「重要文化財平井家住宅保存修理報告書」113 (2003)

キーワード：厳島神社 (*Itsukushima* shrine)；木材建造物 (wooden architecture)；充填材料 (filling materials)；評価 (evaluation)；耐久性 (durability)

Evaluation of Filling Materials for the *Torii-gate* in Itsukushima Jinja

Noriko HAYAKAWA, Osamu TATEKAWA, Yoshino WATANABE*,
Masayuki MORII, Kohji OKADA*² and Makoto HARASHIMA*³

Itsukushima Jinja is placed under severe conditions (i.e. high temperature and humidity in summer, strong sunshine, strong wind, salt weathering and wave damage) because it is built on the sea. Deteriorating condition of the *torii-gate*, which is built in the sea, was surveyed in 2009 and 2010. It was found that there are two cavities on the southwest sub-post of the main post to the west around the area where the wooden members are joined.

In order to select suitable materials for filling the cavities, resins and filler materials were evaluated. Mixtures of epoxy resin (Daito-sizer ow 200 (improved)) with different fillers (silica and Yunikaron (a kind of burnt clay)) were examined by UV durability test, temperature cycle test, salt weathering test and outdoor exposure test at the site. The results were evaluated by change of color, compressive strength and visual observations.

The mixture containing only Yunikaron showed that it had efficient water permeability and durability but that it tended to be difficult to handle. For this reason, it may be necessary to improve the rheology of this material if it is to be applied. Regarding the mixture containing silica and that containing Yunikaron and glass micro balloon, micro-exfoliation occurred between filler granule and resin in temperature cycle test. Regarding the mixture containing Yunikaron and wood powder, cross section of the Yunikaron granule was exposed as its surface was washed away by waves.

*Takara Kenzai Seisakusho Co., Ltd. **Daito Sangyo Co., Ltd.

**3Itsukushima Jinja Komusho (Technical Office)