

ダンカン

キープオンコンクリート

技術資料

1. 対塩害・凍害耐久性試験結果
2. 塗布後曲げ試験結果
3. 耐候性促進試験結果
4. 浸透性試験結果



【写真は W/c : 100 %のセメントペースト角柱に対し、上は「キープオンコンクリート」を塗布し、下は無塗布のもの（バラバラになったので当て木し結束した）の暴露結果】

保存科学株式会社 〒468-0043 名古屋市天白区菅田一丁目906番地
Tel・Fax 052-808-0300 e-mail hozonkagaku@wings.ne.jp

CDF 試験による高含浸性強化剤の凍害・塩害の複合劣化に対する抵抗性の評価

Evaluation of Resistance Effect of Impregnating Type Chemical Agent to Composite Damage by Frost and Salt by CDF Test

1. 材料施工 - 13. 改修・維持保全 - b. 維持保全
表面含浸材 CDF 試験 高含浸性強化剤
コンクリート 凍害 浸透性吸水防止材

正会員 ○左口 泰平*¹ SAGUCHI Taihei
正会員 長谷川 哲也*² HASEGAWA Tetsuya
正会員 三島 直生*³ MISHIMA Naoki
正会員 畑中 重光*⁴ HATANAKA Shigemitsu

1. はじめに

コンクリートをはじめとして各種の構造物を構成する多孔質系材料の表層において、経年により、はく離や脆弱化などが発生し、耐久性・意匠の両面に問題が発生している。写真 1 (a)、(b) はその例であるが、(a) はコンクリートに凍結防止剤による塩を含んだ水が浸入し、凍結融解を繰り返すことによる凍害であると考えられる。また、(b) は煉瓦に塩を含む地下水が浸入し、煉瓦表層での水分の蒸発により析出した塩の膨張圧で起こる塩類風化であると考えられる。いずれの場合も塩を含む水分の侵入により多孔質系構造物の表層に劣化が生じている。

これらの劣化に対する耐久性を向上させるには、多孔質材料の表層部分への劣化因子の侵入を抑えるとともに、劣化作用を受けた部分の補強を行うことが必要となる。その方法として、表層の品質をある一定の深さまで連続的に改善することが有効であると考えられる。

本研究は、多孔質材料の表層部分の品質を改善できる表面含浸材として、新しいタイプの高含浸性強化剤¹⁾の開発を目的とした研究を行っている。本実験では、実際の凍害や塩害の複合劣化のメカニズムに比較的近い方法であり、供試体の指定した面に劣化作用を与えることができる CDF 試験²⁾を行い、高含浸性強化剤を塗布した供試体(セメントペーストおよびコンクリート)の耐凍害・塩害性を評価した。

2. 高含浸性強化剤

本研究で提案する高含浸性強化剤は、ウレタン系の樹脂に、添加剤を加えて被塗布材料への含浸性能を向上させたものである。被塗布材料への含浸後、硬化して残存する固形分(主剤+硬化剤)を樹脂固形分、高含浸性強化剤の全体量に対して含まれる樹脂固形分を樹脂固形分率と呼ぶ。高含浸性強化剤の成分とその機能を表 1 に示す。

3. CDF 試験方法

試験溶液には塩化ナトリウム水溶液(水:97%、塩化ナ



(a) コンクリートの凍害劣化 (b) 煉瓦の塩類風化

写真 1 多孔質系材料の表層劣化

表 1 高含浸性強化剤の成分とその機能

成分		機能
樹脂固形分	主剤	強度の向上
	硬化剤	硬化および弾性の付与
添加剤		強度および浸透性の制御

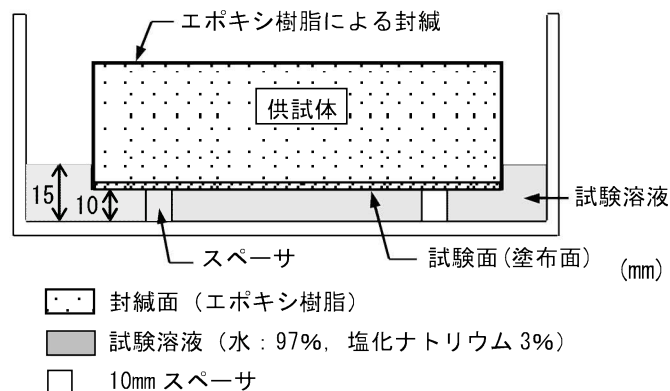


図 1 CDF 試験の概要

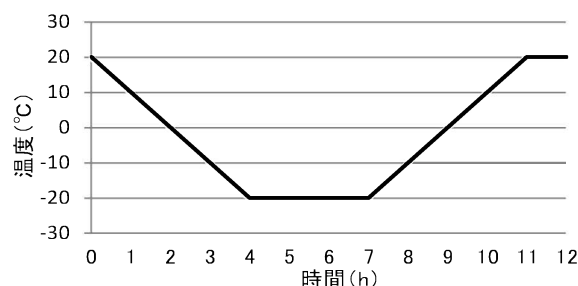


図 2 1 サイクルの温度変動

*¹ 三重大学大学院工学研究科・大学院生

*² 日本診断設計株式会社・博士(工学)

*³ 三重大学大学院工学研究科・准教授・博士(工学)

*⁴ 三重大学大学院工学研究科・教授・工博

Graduate Student, Graduate School of Eng., Mie Univ.

Japan Architectural Examination Design Office, Dr. Eng.

Assoc. Prof., Div. of Arch., Graduate School of Eng., Mie Univ., Dr. Eng.

Prof., Div. of Arch., Graduate School of Eng., Mie Univ., Dr. Eng.

トリウム：3%)を使用して、図1に示すように、試験面（各薬剤を塗布した面）を下に向けて、試験容器との間に高さ10mmのスペーサを挟み、試験溶液を15mmの高さまで満たすようにした。

また、図2に示すように、試験開始後、試験槽の温度を+20℃から4時間かけて-20℃まで降下させ、-20℃を3時間維持する。その後、-20℃から4時間かけて+20℃まで上昇させ、1時間維持する。これを1サイクルとして、1日2サイクルの凍結融解作用を与える。

凍結融解工程の前に、毛細管吸水させるために、1週間の予備吸水を実施し、予備吸水期間が終了した後に凍結融解作用を与え、各規定のサイクルに達した時点の劣化状況の確認と重量損失の計測を行った。計測時は超音波洗浄機で、劣化して剥離した部分をきれいに落とし、吸水した状態で重量損失量を計測した。また、スケーリング量は翌日に絶乾状態で計測した。nサイクル終了後のスケーリング量 m_n は式(1)で求めた。

$$m_n = \sum \frac{\mu_s}{A} \times 10^6 [g/m^2] \tag{1}$$

ここに、 μ_s ：nサイクル後の剥離材料の重量
A：試験面の面積

28サイクル後のスケーリング量によってスケーリング抵抗性を評価した。スケーリング量の基準値は RILEM 基準値に準じて 1500 g/m³とした。

供試体は試験面（各薬剤を塗布した面）を除いた他の面を試験の影響を受けないよう、エポキシ樹脂で封緘した。

4. セメントペーストを供試体とした実験（実験Ⅰ）

4. 1 実験概要

実験Ⅰとして、劣化した多孔質系材料の表層部分を想定して、W/Cが0.9のセメントペーストを供試体としてCDF試験を行った。塗布する薬剤は高含浸性強化剤（樹脂固形分率20%）と市販されているシラン系浸透性吸水防止材を使用し、耐凍害・塩害効果の比較を行った。また、薬剤の塗布による改善度合いを評価するために薬剤無塗布の供試体も用意した。

4. 2 供試体

表2に供試体の概要を示す。供試体は40×40×160(mm)のセメントペーストとし、調合はW/C 0.9のみとした。使用材料は普通ポルトランドセメント(密度3.15g/cm³)および水道水とし、練混ぜ時に、材料分離の低減のためにセルローズ系の増粘剤を添加した。三連型枠に打設後、材齢2日で脱型し、材齢14日まで水中養生した。その後は気中養生で供試体を乾燥させ、材齢28日以降に各薬剤を塗布した。

薬剤の塗布は、打設時の側面（型枠面）に対して、シ

表 2 供試体名と薬剤の塗布回数

供試体名	使用薬剤	塗布回数
N	無塗布	—
H	シラン系浸透性吸水防止材	3
J5	高含浸性強化剤	5
J20		20

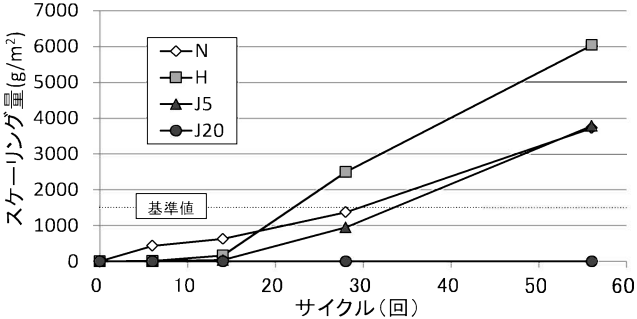


図 3 スケーリング量の推移

		供試体名			
		N	H	J5	J20
サイクル数(回)	6				
	14				
	28				
	56				

図 4 各サイクル終了時の供試体状況

ラン系浸透性防止材は規定量から、高含浸性強化剤は過去の成果より必要と考えられる塗布量として、表2に示す回数まで、刷毛を用いて繰り返して行った。なお、表2には供試体名も併せて記載してある。

4. 3 試験方法

凍結融解作用を与え、6、14、28、56サイクルに達した場合のスケーリング状況を写真に収め、劣化状況の確認と重量損失の計測を行った。また同時に吸水率の測定を行った。

4. 4 結果と考察

図3に、凍結融解期間におけるスケーリング量の推移を示す。同図より、無塗布供試体は試験開始後より徐々にスケーリングが発生したが、高含浸性強化剤およびシラン系浸透性吸水防止材を塗布した供試体は14サイクルまでほとんどスケーリングの発生はなかった。28サイクル後にJ5およびHでスケーリングが発生し、J20においては依然スケーリングは見られなかった。最終的に56サイクルを終えた時点でJ5およびHのスケーリング量は

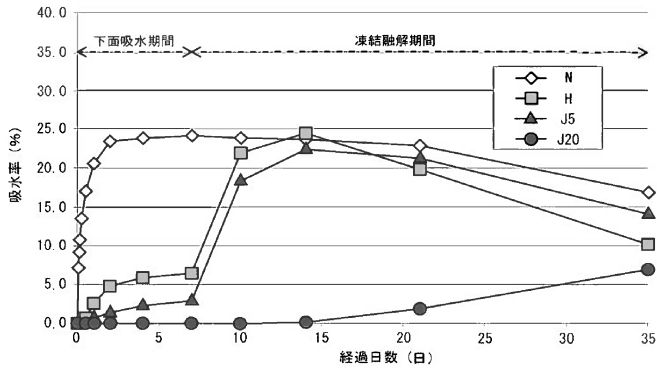


図 5 吸水率の推移

無塗布供試体と同様に基準値（1500g/m²）を大きく上回る結果であった。J20 は 56 サイクルが経過してもスケーリングはほとんど見られなかった。図 4 に測定を行ったサイクル毎の供試体の劣化状況を示す。

図 5 に吸水期間および凍結融解期間における吸水率の推移を示す。同図より、N は浸水直後より吸水を始め、凍結融解サイクル開始時には吸水率は約 24% であった。また、凍結融解サイクル開始時に H は約 6%、J5 は約 3% の吸水率であり、J20 は吸水がほとんど無かった。凍結融解を開始して 6～14 サイクル中に、H および J5 は吸水率が 20% 以上となった。この後、これらの供試体にスケーリングが発生していることから、吸水した塩を含む水が内部で凍結膨張したことで破壊が起こり、スケーリングが発生したと考えられる。これに対して、J20 の吸水率が最大値となる 56 サイクル経過後の吸水率は 6% 程度であった。

シラン系浸透性吸水防止材および高含浸性強化剤には、いずれも撥水作用があるが、スケーリング量には大きな差が表れた。これは今回使用した被塗布供試体の試験面に乾燥収縮によると思われる微細なひび割れが生じていたため、シラン系浸透性吸水防止材を塗布した供試体はこの微細なひび割れから進入した水の凍結により破壊が起こり、表層の撥水領域以深へと水が浸入し、破壊が進んでいったと考えられる。これに対し、高含浸性強化剤はこのひび割れ内に樹脂が入り込み、水の浸入を妨げると同時に接着作用により強化したことで破壊が抑えられたと考えられる。

5. コンクリートを生試体とした実験（実験Ⅱ）

5. 1 実験概要

一般的なコンクリートに対して高含浸性強化剤を塗布し、凍害・塩害への抵抗性の評価を行うため、CDF 試験を行った。また、シラン系浸透性吸水防止材を塗布した供試体、無塗布供試体も同時に試験を行い、結果の比較を行った。

5. 2 供試体

コンクリート供試体の材料および調合を表 3 および表

4 にそれぞれ示す。コンクリートは、100×100×400 (mm) の鋼製型枠に打設し、材齢 1 日で脱型した後に、標準養生を行った。材齢 21 日に水中から取り出し、各コンクリート角柱体より、100×100×100 (mm) の大きさの供試体を 3 個ずつ切り出し CDF 試験用供試体とした、端材は含浸深さ測定用として用いた。供試体整形後は気中養生を行い、材齢 28 日以上経過した後に薬剤を塗布した。

薬剤の塗布は、表 5 に示すように、目標とする塗布量を設定し、コンクリート供試体のカット面に対して、刷毛を用いて繰り返し塗布を行った。実際の塗布量とそれまでに要した塗布回数は表中に示すとおりである。

また、供試体作成時の端材にも同様に塗布し、含浸深さの測定を行った。

5. 3 試験方法

凍結融解作用を与え、表 6 に示すサイクル終了時点でスケーリング状況の確認と、重量損失の計測を行った。

当初は 84 サイクルまで試験を行う予定であったが、84 サイクル終了時に、高含浸性強化剤を塗布した供試体において、顕著な差が見られなかった事、H のスケーリング量が非常に大きかった事、最適塗布回数を選定を行う事を目的として、H、J3、J5、J10 の 4 種類の供試体に対して、表中下線部の 98、112、126、140 サイクルを設定し、長期にわたる供用での耐久性、および高含浸性強化剤の最適塗布回数の評価を行うこととした。

表 3 コンクリートの使用材料

項目	記号	種類
練混ぜ水	W	地下水
セメント	C	普通ポルトランドセメント(密度: 3.15g/cm ³)
細骨材	S	柳田川水系(密度 2.60、粗粒率 2.8%、最大寸法 25mm)
粗骨材	G	柳田川水系(密度 2.62、実積率 62.0%、最大寸法 25mm)
混和剤①	A1	AE減水剤
混和剤②	A2	AE助剤

表 4 コンクリートの調合

調合条件				単位容積質量 (kg/m ³)					
水セメント比 W/C (%)	スランプ (cm)	粗骨材の最大寸法 (mm)	空気量 (%)	細骨材率 s/a (%)	水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤① A1
59	18	25	4.5	47.3	174	295	845	948	2.95
									混和剤② A2
									2.36

表 5 目標塗布量と塗布結果

供試体名	使用薬剤	目標塗布量 (g/m ²)	実際の塗布量 (g/m ²)	塗布回数 (回)
N	無塗布	—	—	—
H	シラン系浸透性吸水防止材	300	300	3
J3	高含浸性強化剤	300	312	3
J5		500	525	5
J10		1000	1012	8
J15		1500	1500	11

表 6 測定サイクル

供試体名	測定サイクル
N	6, 14, 28, 42, 56, 70, 84
H	6, 14, 28, 42, 56, 70, 84, <u>98, 112, 126, 140</u>
J3	6, 14, 28, 42, 56, 70, 84, <u>98, 112, 126, 140</u>
J5	6, 14, 28, 42, 56, 70, 84, <u>98, 112, 126, 140</u>
J10	6, 14, 28, 42, 56, 70, 84, <u>98, 112, 126, 140</u>
J15	6, 14, 28, 42, 56, 70, 84

(注) 下線部は長期供用での検証のために追加で行った

含浸深さの測定は供試体をカットし、断面に散水した時に撥水している深さを含浸深さとして測定した。

5. 4 結果と考察

各供試体の含浸深さを図 6 に示す。塗布量がほぼ同量の H および J3 の含浸深さを比較すると、J3 は H の 2 倍程の含浸深さであり、高含浸性強化剤の方が含浸しやすいことがわかる。また、高含浸性強化剤は塗布量に伴い深く含浸する。

CDF 試験における、84 および 140 サイクル終了時の供試体の様子を図 7 に、スケーリング量の推移を図 8 に示す。28 サイクル時点のスケーリングの量は、N は 820.0 g/m^2 と顕著であり、J3 は 36.7 g/m^2 、J5 は 26.7 g/m^2 のスケーリングが生じていた。他の供試体はスケーリングが生じていなかった。この時点で、一般的なコンクリートの通常の供用では、本試験で使用したシラン系浸透性吸水防止材および高含浸性強化剤は耐凍害・塩害性を有していると考えられる。

84 サイクル時点では、28 サイクルの時点でスケーリングが生じていなかった H のスケーリング量が 933.3 g/m^2 で急激に増加した。28 サイクルの時点でスケーリングの

生じていた J3 の 84 サイクル時点のスケーリング量は 440.0 g/m^2 で、J5 が 360.0 g/m^2 であったので、これを上回ったことになる。これは高含浸性強化剤がシラン系浸透性吸水防止材 H よりも深く含浸していたため、供試体の表面からスケーリングが進行していき、先に含浸域が無くなってしまった可能性がある。また、シラン系浸透性吸水防止材が撥水により、塩を含んだ水分の浸入を抑えることでスケーリングの発生を低減させているのに対して、高含浸性強化剤は、撥水性に加え接着により被塗布体を強化するため、これによってスケーリング量の増加を抑えられたと考えられる。以上のことより、長期に渡る供用においては、シラン系浸透性吸水防止材よりも、高含浸性強化剤の方が耐凍害・塩害性が優れていると考えられる。

98 サイクル時点におけるスケーリング量は、H が 1513.5 g/m^2 で基準値を僅かに超えていたが、J3 は 596.7 g/m^2 、J5 は 530.0 g/m^2 、J10 は 170.0 g/m^2 で高含浸性強化剤を塗布した供試体は基準値を大きく下回っていた。本試験における 98 サイクルはコンクリート構造物が概ね 100 年間に受ける凍結融解のサイクルに相当する。

最終的に 140 サイクルまで試験を継続した結果、H はスケーリング量が 4450.0 g/m^2 で非常に多かった。これに対して高含浸性強化剤を塗布した供試体のスケーリング量は J3 が 1310.0 g/m^2 、J5 は 1216.7 g/m^2 、J10 は 673.3 g/m^2 で基準値を上回ることにはなかった。以上の結果より長期の供用においては、本試験で使用したシラン系浸透性吸水防止材は、耐凍害・塩害性を有していないものと考えられる。一方で、高含浸性強化剤は長期の供用においても耐凍害・塩害性を有しているものと考えられる。また、高含浸性強化剤は塗布量が多いほど耐凍害・塩害性の効果は大きくなるが、塗布回数が 3 回ほどであっても十分に耐凍害・塩害性を発揮するものと考えられる。

6. まとめ

新たに開発した高含浸性強化剤を塗布した供試体について CDF 試験を行った。強度の低いセメントペーストであっても、塗布量が多い場合には十分に耐凍害・塩害性が付与された。コンクリートに対しては、3 回ほどの塗布であっても長期の凍結融解の作用に耐えうる性能が得られることがわかった。

【参考文献】

- 金子光二，長谷川哲也，左口泰平，畑中重光，三島直生：含浸強化剤の樹脂固形分率および塗布回数含浸深さに及ぼす影響に関する基礎的研究（セメントペースト硬化体を対象とした検証），日本建築学会大会学術講演梗概集（北陸），pp.163-164，2010
- RILEM TC 117-FDC / Freeze-thaw and deicing resistance of concrete pp.540-551, Materials and Structures, Vol.29(1996)

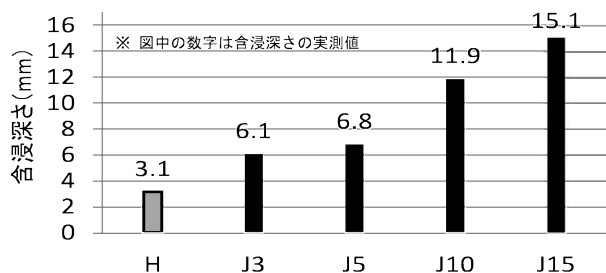


図 6 薬剤の含浸深さ

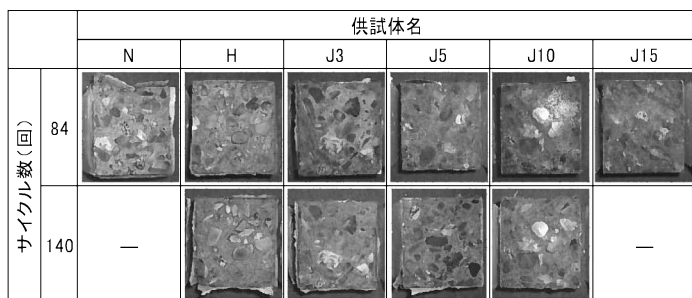


図 7 84, 140 サイクル終了時の供試体の状況

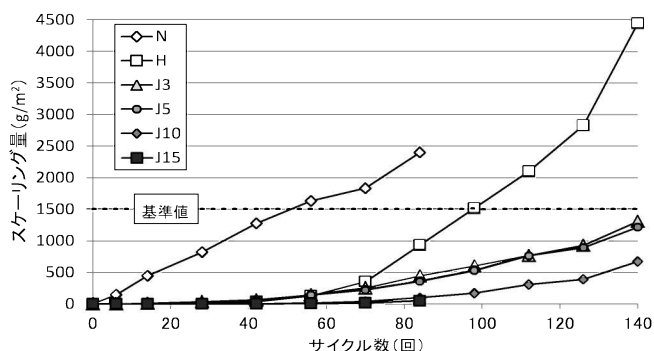


図 8 スケーリング量の推移

「キープオンコンクリート」を塗布したセメントペースト及び煉瓦 の曲げ強度向上性付与の評価

1 概説

高含浸性強化剤を塗布した面の曲げ荷重（引張荷重）への抵抗性の向上を確認する試験を行った。

2 試験方法

供試体は $40 \times 40 \times 160$ (mm) のセメントペースト、または煉瓦で、高含浸性強化剤の配合毎に各 3 本ずつ用いた。図 1 に示すように、塗布面を下向きに供試体を設置し、供試体上部の中央より一点载荷による曲げ試験を行った。

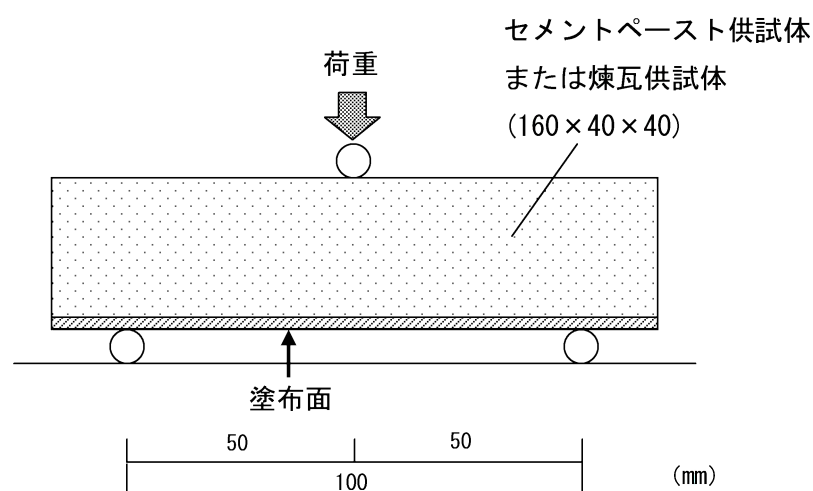


図 1 曲げ試験方法

① セメントペーストの曲げ強度の向上性付与の評価

a) 概説

W/C=0.9 のセメントペーストを供試体として高含浸性強化剤を塗布した面の強度向上性を曲げ試験により評価した。

b) 実験の条件

要因と水準を表 1 に示す。塗布は刷毛を用いて、所定の回数まで行った。高含浸性強化剤の調合は樹脂固形分率 20, 40, 80%を使用し、各調合に塗布回数を設定した。無塗布供試体と曲げ試験の結果を比較することにより、曲げ強度の改善状況の評価を行った。

表 1 要因と水準

要因	樹脂固形分率 (wt.%)	塗布回数 (回)
水準	20	4, 8, 20
	40	7, 10
	80	1, 2
	無塗布	

c) 実験の結果と考察

図2に各供試体の曲げ試験の結果を示す。同図によると無塗布供試体の曲げ強度は 2.5N/cm^2 であった。樹脂固形分率20%を塗布した供試体は、塗布回数4回では、曲げ強度が 2.4N/cm^2 であったので、強度の向上は見られなかったが、塗布回数8回では 2.7N/cm^2 、塗布回数20回で 3.2N/cm^2 であり、塗布回数を重ねる毎に曲げ強度の向上が見られた。樹脂固形分率40%を塗布した供試体は、塗布回数7回で 3.5N/cm^2 、塗布回数10回で 3.7N/cm^2 であり、樹脂固形分率20%を塗布した場合と比較すると少ない塗布回数で強度の改善効果が大きくなると考えられる。樹脂固形分率80%を塗布した供試体は、塗布回数1回で 3.0N/cm^2 であったが、最大塗布回数時の塗布回数2回でも 3.0N/cm^2 であり、塗布回数を増やしても強度の向上は見られなかった。樹脂固形分率80%は塗布回数が増えても、含浸深さはほとんど増加していなかった。

以上のことから、高含浸性強化剤の塗布により、曲げ強度の向上が可能であることがわかった。ただし、樹脂固形分量と、含浸深さの関係が密接に関わっていると考えられるため、曲げ強度の強化状況を評価するにはさらに研究が必要である。

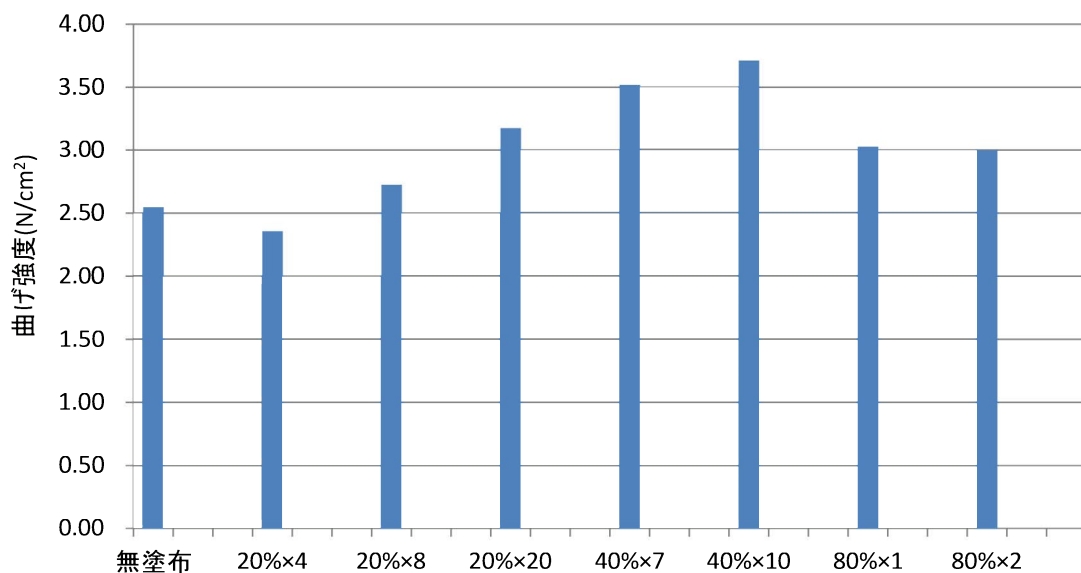


図2 曲げ試験結果

② 煉瓦の曲げ強度向上性付与の評価（参考）

a) 概説

上記のセメントペーストで行った試験を他の材料でも確認した。他の材料として焼成温度 1100℃および 700℃の煉瓦を用いた。高含浸性強化剤の調合は樹脂固形分率 20%を塗布した。

b) 実験の条件

要因と水準を表 2 に示す。被塗布供試体は焼成温度が 700℃および 1100℃の煉瓦を使用した。高含浸性強化剤の調合は樹脂固形分率 20%で、刷毛を用いて繰り返し塗布を行った。今回は傾向の確認のため、塗布回数は 55 回とし、無塗布供試体と比較を行い、曲げ強度の改善状況の評価した。供試体数は各要因につき 2 個ずつ用意し、曲げ強度および含浸深さはこの 2 個の平均を使用した。含浸深さは破断面に散水し、撥水する領域の表面からの深さを測定することで行った。

表 2 要因と水準

要因	水準
塗布回数(回)	0, 55
焼成温度(℃)	700, 1100

c) 実験の結果と考察

煉瓦供試体ではセメントペースト供試体に見られたひび割れは見られず特異な破壊も発生しなかった。

図3に曲げ試験結果を示す。同図より焼成温度 1100℃供試体の曲げ強度は無塗布では4.1 (N/mm²)であったが塗布供試体では 4.7 (N/mm²) となり少量ではあるが強度の増加が見られる。焼成温度 700℃供試体は無塗布では 1.7 (N/mm²) であったが塗布供試体では 2.2 倍の 3.8 (N/mm²) となり大幅に強度が増加している。

図4に含浸深さを、図5に破断面の含浸状況を示す。図4より焼成温度 1100℃供試体の含浸深さは 21.6mm であるのに対して焼成温度 700℃供試体の含浸深さは 3.7mm であり、含浸深さに大きな差が見られた。ここで図6に煉瓦の吸水率を示すが、焼成温度 1100℃の煉瓦の吸水率は 10.5%であるのに対して、焼成温度 700℃の煉瓦の吸水率は 15.3%である。これは焼成温度 700℃の煉瓦は構成する鉱物が完全に焼結する温度まで至らず、内部に空隙が多く残っているため焼成温度 1100℃の煉瓦より多量に吸水したと考えられる。このように焼成温度 1100℃供試体と比べて焼成温度 700℃供試体は空隙の量が多かったため、この空隙で高含浸性強化剤が留まり内部まで含浸しにくい状況であったと考えられる。

また、このことから焼成温度 1100℃供試体と焼成温度 700℃供試体は高含浸性強化剤の塗布量は同じであるが、焼成温度 700℃供試体は樹脂固形分の多くが表層に留まったため、曲げ応力を大きく受ける表層部の引張力を樹脂が負担し、強度が大きく増加したものと推測される。

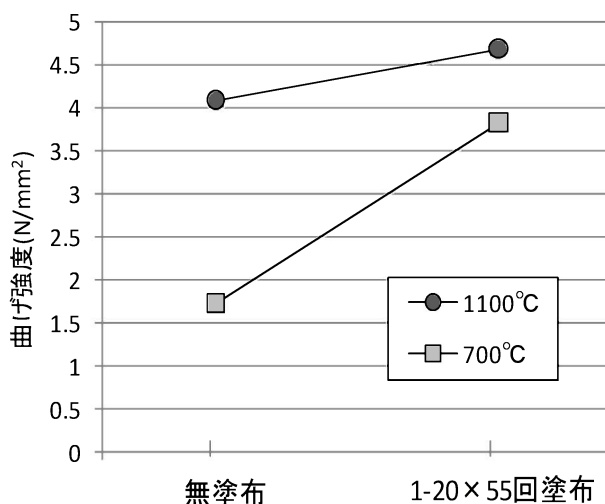


図3 曲げ強度試験結果

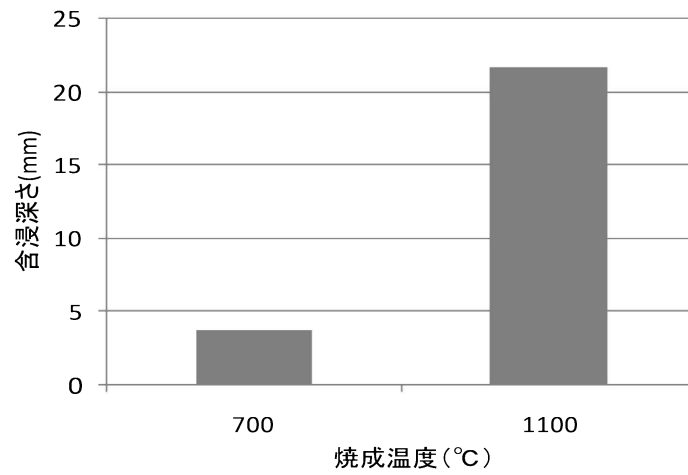


図4 含浸深さの計測結果

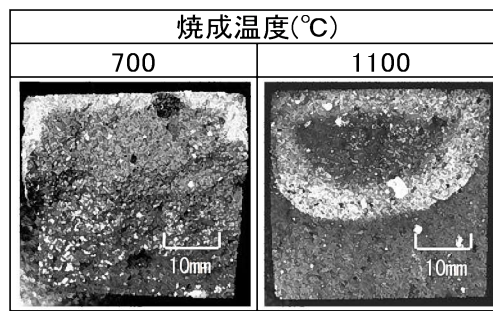


図5 断面の撥水状況

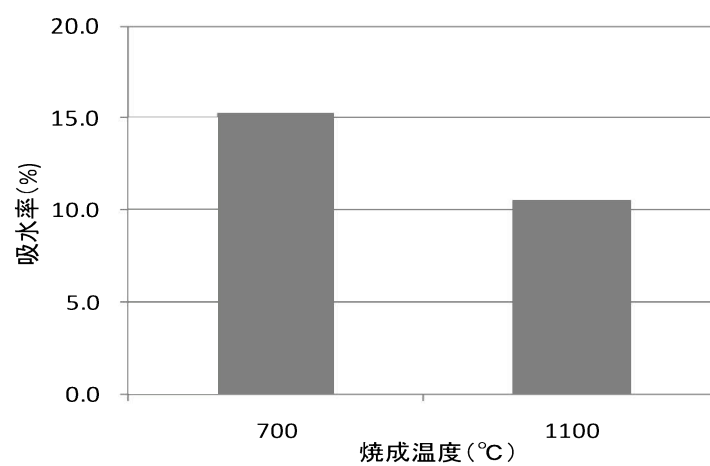
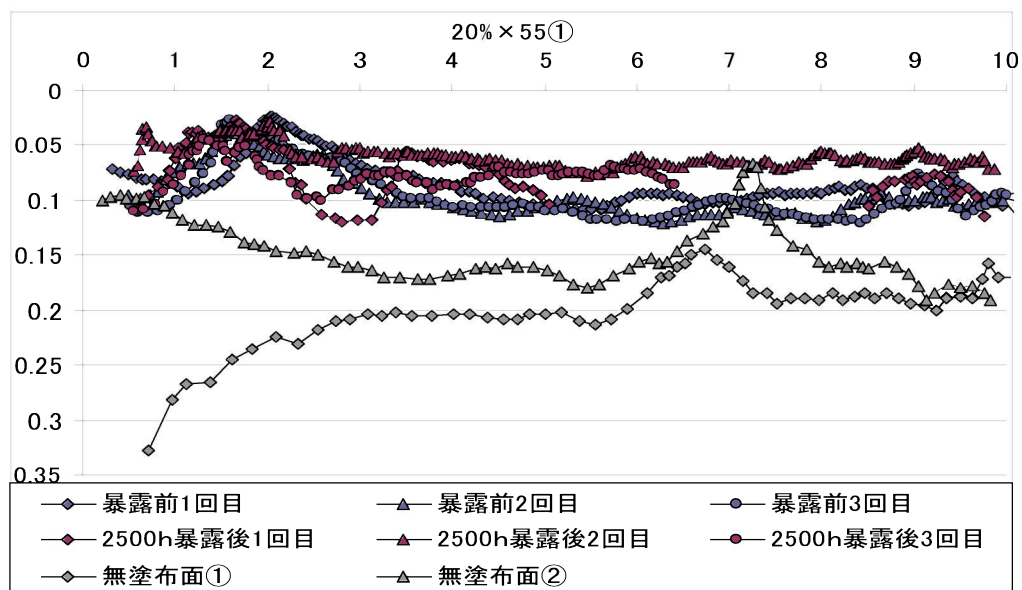


図6 無塗布供試体の給水率

ダンカン キープオンコンクリート 2, 500 時間暴露試験前・後におけるの強度の変化測定

供試体 セメントペースト供試体 寸法 40×40×160
塗布材料 40×160 面にキープオンコンクリート塗布(刷毛塗り)
樹脂固形分 20%(キープオンコンクリート)
強化深さ測定 削孔式表層試験器
暴露試験 ウエザーメーターによる降雨環境暴露試験
150 時間 で約一年に相当

削孔試験結果 塗布量により含浸深さは異なる。また材料・劣化の程度・吸水等によっても含浸深さは異なる
表面塗布量 約 5,000g/m²



暴露前と暴露後では、表層の強化された部分(7mm)程度の強度は同程度でsる。

約17年相当の暴露試験結果に変化無し

高含浸性強化剤による改質効果の評価手法に関する基礎的研究

正会員 ○左口泰平*¹ 同 長谷川哲也*²
同 三島直生*³ 同 畑中重光*⁴

表面含浸剤 強化剤 削孔試験
高含浸性 表層強度分布 無機多孔質体

1 はじめに

コンクリートをはじめとして各種の構造物を構成する多孔質材料の表層において、経年により、剥離や脆弱化等が発生し、耐久性・意匠の両面に問題が生じている。この原因の多くは、主に外部からの劣化因子の浸透による。材料の耐劣化性能を向上させるには、多孔質材料の表層部分の品質をある一定の深さまで連続的に改善することが有効であると考えられる。

本研究は、多孔質材料の表層部分の品質を改善できる高含浸性強化剤の開発を目的とする。本報では、4 種類の高含浸性強化剤を塗布した比較的低強度のセメントペースト供試体に対して削孔試験を行い、高含浸性強化剤による改質効果を評価する方法を検討した。

2 実験概要

2.1 使用材料

(1) 高含浸性強化剤

本研究では、ウレタン系の樹脂に、添加剤を加えて被塗布材料への含浸性能を向上させたものを高含浸性強化剤¹⁾と呼ぶ。被塗布材料への含浸後、硬化残存する固形分（主剤＋硬化剤）を樹脂固形分、また高含浸性強化剤の全体量に対して含まれる樹脂固形分を樹脂固形分率と呼ぶ。高含浸性強化剤の成分とその機能を表-1 に示す。

(2) 被塗布材料

被塗布材料として内部まで均一な強度を期待できるセメントペースト供試体を作成した。調査は劣化した多孔質材料の表層を想定して W/C が 0.9 のものとした。また供試体作成時に材料分離の低減のためにセルローズ系の増粘剤を使用した。高含浸性強化剤の含浸を妨げる可能性があったため、供試体を硬化後に 400℃に加熱することで増粘剤の除去を行った。

2.2 実験要因と塗布回数

表-2 に示すように、実験要因として高含浸性強化剤の樹脂固形分率と塗布回数を取り上げた。樹脂固形分率 10, 20, 40, 80%について、刷毛により、表中の塗布回数だけ繰り返し塗布を行った。樹脂固形分率が大きい調査に、含浸が不可能となる塗布回数が存在したため、実際の塗布はそれ以下の回数で行った。

2.3 試験方法

小径ドリル型削孔試験機²⁾により、削孔抵抗を測定した。本測定方法はドリルで供試体を削孔し、削孔速度から深さ方向の強度分布を推定しようとするものである。最大削孔深さは 10mm とした。

表-1 高含浸性強化剤の成分とその機能

成分		機能
樹脂固形分	主材	強度の向上
	硬化剤	硬化および弾性の付与
添加剤		強度および浸透性の制御

表-2 実験要因と塗布回数

樹脂固形分率 (wt.%)	塗布回数(回)										最大塗布回数 (回)
	2	4	6	8	10	15	25	40	60	100	
10	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	100
20	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	100
40	○	○	○	○	○	○	○	×	×	×	34
80	○	○	×	×	×	×	×	×	×	×	4

[注] ○: 塗布可能 ×: 塗布不可能

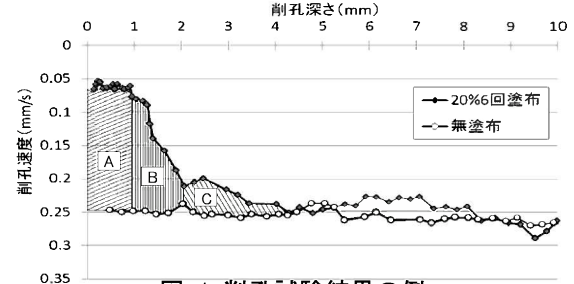


図-1 削孔試験結果の例

3 実験結果と考察

図-1 に削孔試験結果の例を示す。縦軸は削孔速度で、値が小さい（上側）ほど速度が遅く、削孔抵抗が大きいことを示す。本報では削孔抵抗を強度と見なすこととする。同図には、塗布および無塗布供試体の削孔試験結果を併示した。無塗布供試体の削孔速度は、供試体の表面から内部まで 0.25mm/s 前後の一定値であり、これが供試体元来の削孔抵抗であると考えられる。これに対して高含浸性強化剤を塗布した供試体は、表面から 1mm の深さまで削孔速度が 0.06mm/s であり（後述 A 部）、1mm から 4mm の深さにかけて削孔速度は漸増し（後述 B, C 部）、4mm 以深では 0.25 mm/s 前後となっている。このことから高含浸性強化剤の塗布により、表面から 4mm の深さまで強化されたと判断できる。この強化部分は、強化状況の違いから、同図中の斜線部で示した A, B, C の 3 つの領域に分割できる。領域 A は樹脂が十分に含浸し、対象とする被塗布体に対して高含浸性強化剤が強化できる上限まで達している部分。領域 B は深さと共に含浸量が減少し、強度に勾配が生じている部分。領域 C は含浸はしているものの、含浸量は微量であり、強度改善も微小な部分である。

上記で示した改質効果は、樹脂固形分率と塗布回数によって異なる。図-2(a) ~ (d) は、各供試体への削孔試験結果を平均化して樹脂固形分率ごとに表したもので、図

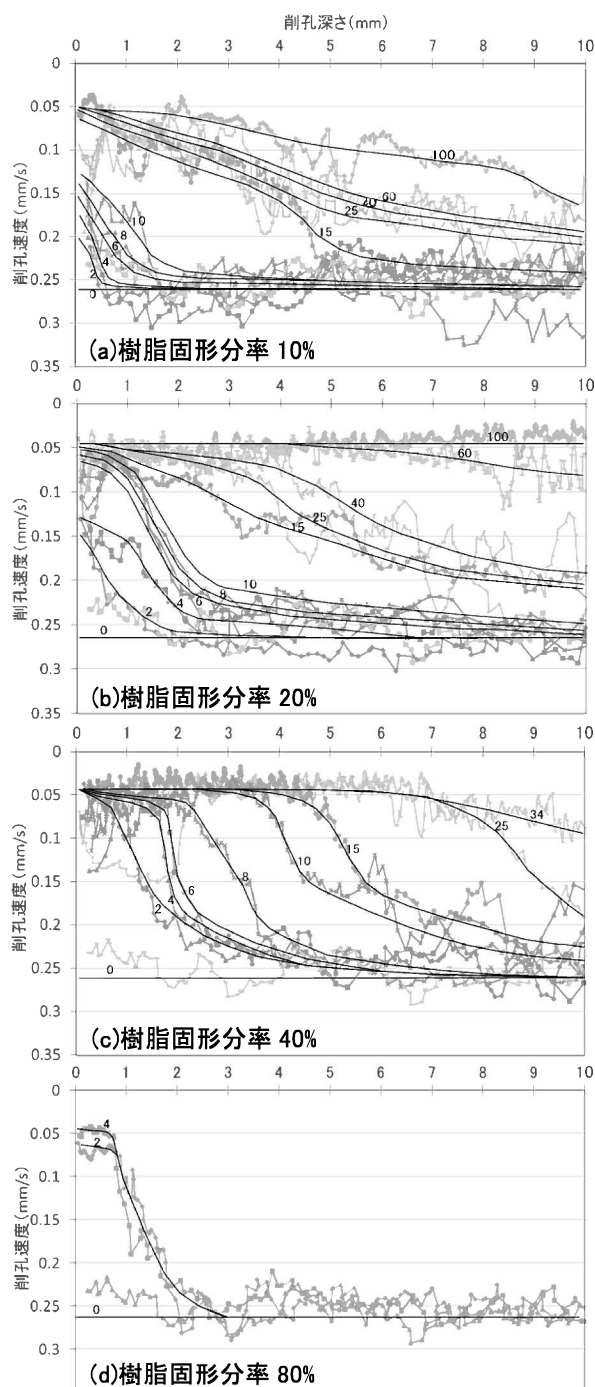


図-2 削孔試験結果(図中の数字は塗布回数を示す)

中の数字は塗布回数を表す。図-2(a)より樹脂固形分率 10%では、塗布回数が少ない場合は、領域 A は存在せず、領域 B も少なく、含浸強化部分のほとんどが領域 C である。塗布回数を増やしていくと領域 B が拡大し、領域 C の強度も増加するため両領域の境界は曖昧となる。ただし領域 A は僅かであり深くまで強化することはできない。

図-2(b)に示す樹脂固形分率 20%では、樹脂固形分率 10%と同様の傾向であるが、塗布回数が増えたと領域 B の部分が領域 A となり、含浸強化が内部に進行している。

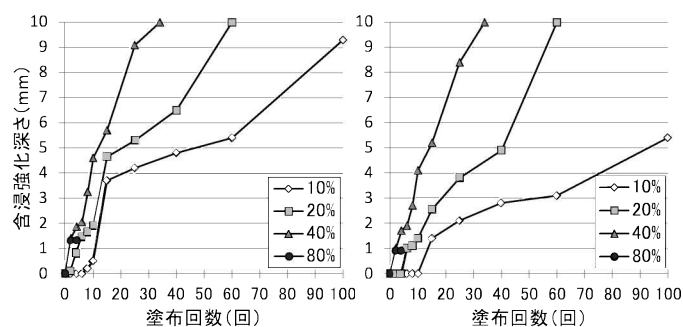


図-3 含浸深さと塗布回数の関係

図-2(c)に示す樹脂固形分率 40%では、少ない塗布回数でも表層は領域 A となり、塗布を重ねるとさらに深くまで領域 A が増加していく。すなわち、少ない塗布回数でも比較的深くまで強化することができる。

図-2(d)に示す樹脂固形分率 80%では、少ない塗布回数で極く表層(深さ約 1mm まで)は領域 A となるが、塗布回数を増してもこれ以上はほとんど含浸しない。

以上の結果より、樹脂固形分率が高いほど領域 A の割合が大きくなるものの、含浸深さは、浅くなる。また塗布回数が多いほど領域 A が拡大し、領域 B, C では強度が緩やかに上昇していく。

図-3 に、目標強度としての削孔速度を設定し、これに達した場合の含浸強化深さと塗布回数の関係を示す。図-3(a)は、目標強度として削孔速度が最大値の概ね半分となる 0.15mm/s とした場合、図-3(b)は、0.1mm/s とした場合である。なお、含浸強化深さが 10mm 以上のものもあったが、ここでは 10mm までを表示している。

図-3(a)によれば、目標削孔速度を 0.15mm/s と設定した場合、どの割合であっても、塗布回数が増えたと共に、含浸強化深さは大きくなるが、樹脂固形分率が小さいほど、同じ含浸強化深さを得るための塗布回数は多くなる。図-3(a)と(b)を比較すると、設定する削孔速度が遅いほど、樹脂固形分率による影響は顕著となり、同じ含浸強化深さを得るための塗布回数は多くなる。

目標とする削孔速度の設定、および被塗布体の種類や状態などによって上記の関係は変化するが、条件に応じて今回と同様の試験および評価を行うことにより、目標とする強度を発現するための高含浸性強化剤の割合および塗布回数の選定が可能となると考えられる。

【謝辞】

本研究費の一部は、国土交通省建設技術研究開発助成金(研究代表者: 畑中重光)によった。付記して謝意を表する。

【参考文献】

- 金子光二, 長谷川哲也, 左口泰平, 畑中重光, 三島直生: 含浸強化剤の樹脂固形分率および塗布回数が含浸深さに及ぼす影響に関する基礎的研究(セメントペースト硬化体を対象とした検証), 日本建築学会大会学術講演梗概集(北陸), pp.163-164, 2010
- 長谷川哲也, 畑中重光, 三島直生, 本田千絵美, 谷川恭雄: 小径ドリル型削孔試験機によるセメントペーストの圧縮強度推定, 日本建築学会構造系論文集, 第 621 号, 1-8, 2007 年 11 月

*1 三重大学大学院工学研究科・大学院生

*2 日本診断設計株式会社・博士(工学)

*3 三重大学大学院工学研究科・准教授・博士(工学)

*4 三重大学大学院工学研究科・教授・工博

*1 Graduate Student, Graduate School of Eng., Mie Univ.

*2 Japan Architectural Examination Design Office, Dr. Eng.

*3 Assoc. Prof., Div. of Arch., Graduate School of Eng., Mie Univ., Dr. Eng.

*4 Prof., Div. of Arch., Graduate School of Eng., Mie Univ., Dr. Eng.

文化財（煉瓦建造物）の保存技術への挑戦

畑中 重光^{*1}・長谷川哲也^{*2}

1. はじめに

我が国では近年（1996年）、文化財保護に関する法律の一部改正に伴い、文化財登録制度が導入された。このような事情を背景として、現在、歴史的建造物の補修・補強工事が増加しつつあるが、煉瓦造や石造建造物の調査・診断・補修・補強技術については、まだ十分な研究がなされておらず、場当たりの方法が採られることが多い。

特に、調査・診断方法について言えば、重要文化財などに指定された煉瓦造や石造建造物では、コア供試体の採取やはつり作業が許されない場合が多く、非破壊検査技術の適用性に関する検討が強く望まれている。また、補修・補強方法についても、外観を損なうことなく、遺構を残したままにするという大前提があるため、従来RC構造物で適用されてきた補修・補強方法がそのままでは採用できない場合が多い。

本稿では、煉瓦建造物の不易流行に関わる事例として、JCI研究委員会で学んだ文化財保存の考え方、および筆者らが取り組んでいるタイ国アユタヤ遺跡の保存事業の一端を紹介したい。

2. JCI研究委員会での活動

平成17年に日本コンクリート工学協会に設置された「建築・土木分野における歴史的構造物の診断・修復に関する研究委員会」（委員長：谷川恭雄・名古屋大学名誉教授）では、煉瓦造を中心とし、石造・RC造を含む歴史的建造物の調査・診断・補修・補強方法に関する既往の研究・事例を整理・分類し、問題点を抽出し、歴史的建造物のための新たな診断技術・補修工法を提示することなどの目的を持って活動した^{1),2)}。そこで確認され、我々が認識しておくべき主な基本的事項を以下に挙げておく。

- ・煉瓦造や石造の目地には、漆喰やモルタルなどの結合材が用いられている。
- ・鉄筋コンクリート（RC）造が煉瓦造や石造などの組積造と決定的に異なるのはモノリシックな構造である点である。逆に、組積造ではパーツの組替えが可能である。
- ・歴史的構造物であるから、材料や外観を損なうことなく、遺構を残したまま、診断・補修・補強を行うこと

が望まれる。

- ・歴史的遺産として守るべきものは「オーセンティシティ（authenticity）」であり、それは「由緒正しさ」というニュアンスを伝える言葉と解することができる。
- ・歴史的構造物の保存・再生・活用には、①なぜ残すか、②何を残すか、③どう残すか、という大別して3つのテーマがある。

最後に記した「残す」べきものがまさに「不易」ということになろうか。煉瓦造や石造などの歴史的構造物の保存事業に関わる際に、セメントやコンクリートを専門分野とする我々が学ばなくてはいけないことも多い。ただ、コンクリート工学がこの種の構造物の保存・修復に寄与すべき学問分野として期待され、また貢献しなくてはいけないのも事実である。

3. アユタヤ遺跡の調査・補修

3.1 アユタヤの歴史概要

アユタヤ遺跡は、バンコクから北へおよそ80km、チャオプラヤー川とその支流に囲まれた中州にある。1350年から417年間にわたり、35代の王がこの地でアユタヤ王国の歴史を築いた。15世紀には、カンボジアのクメール王朝を滅ぼし、さらにタイ北部にあるスコタイ王朝を併合した。1767年にビルマ（現ミャンマー）軍のたび重なる攻撃によって滅ぼされた。寺院等の遺跡が多く点在するこの地は、1991年に世界文化遺産に登録された。参考のためアユタヤの位置を図-1に、アユタヤ地区の地図を図-2に示す。



図-1 タイ国とアユタヤの位置

*1 はたなか・しげみつ／三重大学大学院 工学研究科 教授（正会員）

*2 はせがわ・てつや／日本診断設計㈱ 代表取締役（正会員）

3.2 ワット・プラ・マハタートの現状調査

アユタヤ地区の遺跡には、ビルマ軍によって破壊された仏塔や仏像が数多く残っている。寺院の遺跡の一例として、2005年にワット・プラ・マハタートの仏塔群を調査した³⁾。遺跡の様子を写真-1～写真-3で紹介する。

(1) 構造的視点

図-2に示したように、アユタヤ地区は、チャオプラヤー川の中州状になっており、構造体にとって地盤条件が極めて悪い。そのため、ほとんどといって良いほど多くの仏塔が不同沈下を生じて傾いている(写真-3)。

ビルマ軍による攻撃で破壊された仏塔も多いと思われるが、中には、不同沈下が引き金になって上部から偏心荷重がかかり、大きな割裂ひび割れおよびせん断ひび割れを生じている仏塔や倒壊に至った仏塔も散見される。

(2) 材料的視点

1) 外 観

当初は、ほとんどすべての仏塔の表面に化粧漆喰(ス

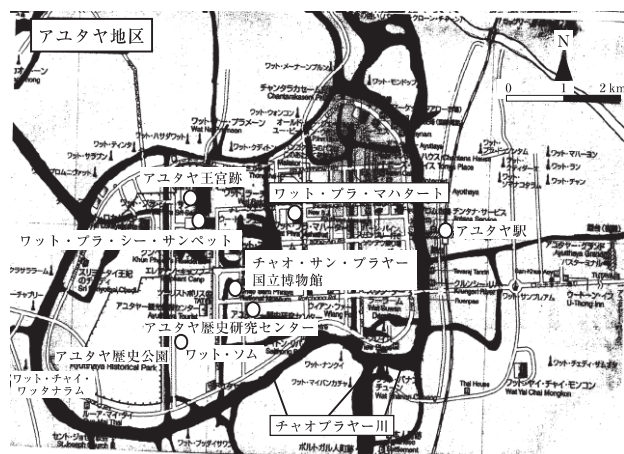


図-2 アユタヤ地区(黒い線が川)

タッコ)の仕上げが施されていたようであるが、現在では、漆喰が残っている仏塔は少なくなっている。すなわち、大部分の仏塔は、ほとんどの漆喰が消失して煉瓦が剥き出しになっている。写真-4は比較的多くの漆喰が残っている仏塔の例であるが、周囲の状況から判断して、このままほおって置けば仏像のレリーフもいずれ消滅してしまう危険性が高い。写真-5に示した仏塔でも同様のことがいえる。三角形部の周辺は漆喰で出来た見事なレリーフで飾られている。この漆喰のレリーフは当時の技術のすばらしさを証明するもので、伝承者の居なくなった現在の技術では復元するのは大変難しいものと思われる。写真中に示したように、A部とB部では表面の様相が異なる。すなわち同じ構造体でも方角によって劣化度合いが異なることが分かる。

2) 劣化原因

以上の変状・劣化を材料的視点に基づいて考察すれば、以下の原因等が考えられる。

- a. 降雨、日射などの環境外力による劣化
- b. 塩類の析出による劣化
- c. 植物の生育による劣化
- d. 生物の食害による劣化(写真-6)

アユタヤ地区は年間を通じて最高気温が30～35℃と高く、湿度は70～80%程度(乾季を除く)である。寺院の建設後およそ600年以上も経過していることから、一般的には、主な原因として、項目a.が考えられるが、最近では、重要な劣化原因として「塩類風化」(項目b.)に着目した研究^{4),5)}も報告されている。

また、ある程度まで表層劣化が進行した場合であろうが、煉瓦の目地に草木が生えるという不具合も多く生じている(写真-4)。

写真-6は、仕上げ漆喰の変状に着目したものである。



写真-1 ワット・プラ・マハタートの様子(一部)



写真-2 木の根に包まれた仏像の頭部



写真-3 傾いた仏塔



写真-4 仏像のレリーフが危険な状態にある仏塔(植物の繁茂も気になる)



写真-5 方角で劣化状況の異なる仏塔



写真-6 昆虫による食害

拡大写真によれば、彫刻刀で抉られたようになっている箇所がある。これは、生物が漆喰を食べた跡であると考えられる。抉られた溝から推定すれば、微生物ではなく、もっと大きな昆虫並みのものが漆喰に混合された有機成分を食べているものと思われる（タイの博物館資料によれば、漆喰に混合されたものとしては、例えば、動物の油脂、餅米、バナナ、卵白、サトウキビなどが考えられる）。なお、このような変状は、我が国でも生じており、地蜂が漆喰を食べているという左官職人の話もある。

また、漆喰だけでなく、前述のように、煉瓦そのものが風化し（写真-7）、形が大きく変わっている仏塔も多い。建設当初は漆喰仕上げで表層が保護されていたと考えられるため、内部の煉瓦に生じた風化の多くは漆喰の剥落・消失の後から生じたと考えることができる。ここで、アユタヤ遺跡で使用された煉瓦は焼成煉瓦であるといわれていることに注目したい。もし仮に、すべての煉瓦が十分に高い温度で焼成されたものであれば、これらの写真に見られるような風化が生じるとは考えがたい。指先ですぐに粉体化するような箇所もあることから、低温で焼成された煉瓦も多く使われていることが想定された。写真-8は、高さ方向に劣化状態の異なる仏塔の例である。基礎から水分が上昇し構造体の表面で塩類風化



写真-7 溶解したように見える煉瓦
(手で触れると砂状になる)



写真-8 高さ方向で異なる劣化状況



写真-9 芸術局の許可証

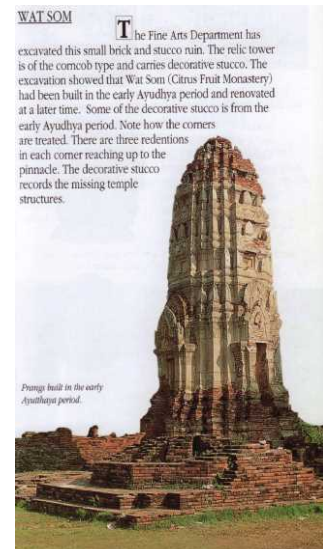


写真-10 Wat Som

を生じたと考えると理解しうる。

3.3 アユタヤ遺跡の現地実験

アユタヤ遺跡群の保存に関わる現地実験は、2006年にタイ国政府芸術局から許可（写真-9参照）を頂いた直後から開始するのだが、それまでの苦労話は紙面の関係で割愛する。以下、2010年に芸術局にて口頭で説明し、提出した報告書の中から一部を抜粋する。

（1）研究目的

アユタヤ遺跡の建造物に生じている塩類風化等による劣化の現状を定量的に調査するとともに、小面積において材料の劣化防止処理を行いながら、建造物表層のレリーフなど、特に重要な文化遺産を保存することを第1の目的として、最適な処理方法の開発を目指した。

（2）対象とした建造物の概要

今回の劣化防止処理を行った場所は、Wat Som および Wat Chai Watthanaram (Ayutthaya Historical Park, Ayutthaya Province) である。両寺院の概要を以下に記す。

1) Wat Som

ワット・ソム（写真-10）は、アユタヤ歴史公園の事務所近くに位置する。そのクメール風のプラーン（仏塔）や装飾された化粧漆喰の形から、アユタヤ王朝初期に建てられたと推測される。このプラーンは、アユタヤの中でも保存状態のよい化粧漆喰の装飾（写真-11）が残っているもののひとつで、高度な幾何学模様や多くの神話上の絵が見られる。この建物の歴史的背景は、まだ十分には知られていない。

2) Wat Chai Watthanaram

ワット・チャイ・ワッタナラム（写真-12）は、アユタヤの南西部に位置する。1673年、プラサート・トーン王が母親のために建てた寺院の跡である。アンコール遺跡に似ており、境内中央にそびえる大プラーン（仏塔）は宇宙の精神的中心を表し、その周りを小プラーンが取り囲んでいる。古代クメール様式の影響が見られる寺院である。



写真-11 補修の対象としたレリーフ



写真-13 ドリル削孔試験



写真-12 Wat Chai Watthanaram



写真-14 高含浸性強化剤の吹付け

(3) 本研究と並行して行った技術開発

国土交通省・建設技術開発助成制度の補助を受け、各種構造物の表層部強度を簡易に、かつ測定対象の損傷を最小限（直径 3 mm 程度の孔）に抑えて定量的に評価できる携帯式削孔試験装置および含浸性の高い表層部強化剤の開発を進めた^{6),7)}。その結果、

- ①携帯式削孔試験装置による構造物表層の劣化状況の把握
- ②劣化状況に応じた高含浸性強化剤の調合と施工方法の選定
- ③携帯式削孔試験装置による再チェック

という補修工程の一連の流れが出来上がった。

基本的には、これらの携帯式削孔試験装置と高含浸性強化剤を適用して補修実験に望んだのであるが、この際、対象物件に対して以下のような点にも留意した。

- ・削孔箇所としては、劣化（風化）程度の差異を意識し、2カ所の煉瓦を選定。
- ・煉瓦表層へ適用する高含浸性強化剤の配合比は、劣化した表層がおおよそ元の強度に戻るよう決定。
- ・構造体内部への高含浸性強化剤の適用にあたっては、地下からの水分浸透の抑制効果が得られるよう配合比を決定。

以下、現地実験について記す。

(1) Wat Som

1) 診断・補修作業

・風化した煉瓦および健全な煉瓦について、表層から内部へ 10 mm の深さまで連続した強度分布を測定し、



写真-15 浮きの打音調査

処理前の劣化程度を評価（写真-13、なお、劣化度合いについては図-3 参照）。

・高含浸性強化剤を用い、煉瓦の脆弱（劣化）部の強化および劣化防止処理（表層劣化防止）を実施（写真-14）。

・高含浸性強化剤およびエポキシ樹脂を用い、漆喰の劣化防止処理（剥落防止・表層劣化防止）を実施（写真-15～写真-17）。

2) 評価

・脆弱部強化および劣化防止処理を行った煉瓦について、表層から内部へ 10 mm の深さまで連続した強度分



写真-16 補修工事における養生



写真-18 木材への高含浸性強化剤の吹付け



写真-17 樹脂注入工程

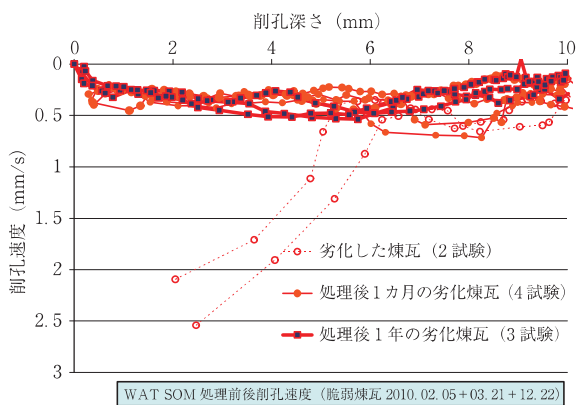


図-3 ドリル削孔試験による削孔速度一削孔深さ関係 (劣化煉瓦, 処理後1カ月, 1年のデータ) (深さ約6mmまで劣化, 処理後の削孔抵抗は内部までほぼ一様, 1年後も効果は安定)

布を測定し (測定時期は1カ月後, 1年後, およびその後の任意の時期とする), 処理効果について短期および長期的な評価を実施 (図-3)。

・劣化防止処理を行った煉瓦と漆喰について, 目視および打音調査を行い, 劣化処理の効果の持続性を評価。

(2) Wat Chai Watthanaram

1) 補修作業

・高含浸性強化剤を用い, 漆喰の劣化防止処理 (剥落

防止・表層劣化防止) を実施。

・高含浸性強化剤を用い, 腐朽した木材の脆弱部強化および劣化防止処理 (剥落防止・表層劣化防止) を実施 (写真-18)。

2) 評価

・劣化防止処理を行った漆喰と脆弱部強化および劣化防止処理を行った木材について目視調査を行い, 劣化処理の効果の持続性を評価。

4. むすび

本稿では, 煉瓦建造物の保存技術への挑戦と銘打って (「流行」のつもりで) 筆者らが取り組んできたタイ国アユタヤ遺跡における現地実験について紹介した。冒頭にて, 煉瓦造や石造などの歴史的建造物の保存事業には, 我々コンクリート工学を専門とする技術者の協力が期待されていると記した。実のところ, これまでに関わったいくつかの事例を通じ, コンクリート工学の分野だけでは経験し得ない多くのことを学ぶ良い機会を与えてもらっていると, 逆に感謝している。

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学協会: 建築・土木分野における歴史的建造物の診断・修復研究委員会報告書, 382p., 2007. 6
- 2) 畑中重光: コンクリート工学に漂う文化の香り, コンクリート工学, Vol.44, No.7, 2006. 7
- 3) 長谷川哲也・畑中重光・Prinya Chindapasirt・Thanudkij Chareeat: タイ国アユタヤ遺跡の劣化調査と修復方法の提案, 日本建築士学会大会学術講演会研究発表論文集, pp.62~65, 2006. 10
- 4) 朽津信明・早川典子: 文化財の保存を目的とした煉瓦の樹脂処理効果に関する研究, 保存科学, No.40, pp.35~45, 2001
- 5) Kuchitsu, N., Ishizaki, T., Nishiura, T.: Salt Weathering of a Brick Monuments in the Ayutthaya Site, Thailand, Engineering Geology, No.55, pp.91~99, 1999
- 6) 畑中重光・長谷川哲也・谷川恭雄・伊藤敬人・三島直生: 建造物の表層強度分布測定装置および含浸強化剤の開発研究, 建設技術研究開発助成制度報告書, 282p., 2011. 3
- 7) 左口泰平・長谷川哲也・三島直生・畑中重光: 高含浸性強化剤による改質効果の評価手法に関する基礎的研究, 日本建築学会学術講演梗概集 (材料施工), pp.265~266, 2011. 8