

# 構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

畑中 重光<sup>1</sup>・長谷川 哲也<sup>2</sup>・谷川 恭雄<sup>3</sup>・伊藤 敬人<sup>4</sup>・三島 直生<sup>1</sup>

<sup>1</sup>三重大学大学院工学研究科 建築学専攻 (〒514-8507 三重県津市栗真町屋町1577)

<sup>2</sup>日本診断設計株式会社 (〒463-0809 愛知県名古屋守山区平池東802番)

<sup>3</sup>社団法人三重県建設資材試験センター (〒514-0303 三重県津市雲出長常町字中浜垣内1095)

<sup>4</sup>三重大学大学院工学研究科 分子素材工学専攻 (〒514-8507 三重県津市栗真町屋町1577) .

コンクリートや煉瓦でできた構造物の耐久性は、表層部の品質で決まると言っても過言ではない。これに対して本研究開発では、含浸性の高い新たな表層部強化剤の開発を行うと同時に、各種構造材料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3mm程度の孔）に抑えて定量的に推定できる携帯式削孔試験装置の開発を試みた。その結果、含浸強化剤に関しては、浸透性、品質改善効果、耐久性および施工性に関して、所定の性能が得られることを確認した。また、携帯式削孔試験装置に関しては、均質材料に対する良好な適用性が確認された。

キーワード 含浸強化剤, 携帯式削孔試験装置, 診断, 補修, 劣化, 耐久性

## 1. はじめに

コンクリートや煉瓦でできた構造物の耐久性は、表層部の品質で決まると言っても過言ではない。日本における明治以降の組積造、煉瓦造および(比較的新しいものを含む)鉄筋コンクリート造建築物や、国内外の歴史的な構造物のうち、現存するものの多くが建築材料の経年劣化により構造・意匠の両面において既に問題が発生し始めている。これらの表層部劣化に対する原因の究明および補修方法に関する学術的研究は必ずしも十分ではなく、また、特に建築構造物の補修においては外観の保全が重要になる場合も多く、意匠的な視点も含めると技術的な課題は多い。

これに対して本研究開発では、劣化した材料表層部の強度改善を目的として、含浸性の高い強化剤による補修工法の開発を試みた。ただし、効率的かつ確実に品質改善を行うためには、対象となる材料の劣化の程度や劣化深さを正確に診断する技術が不可欠であり、また、含浸強化剤の開発においても、含浸強化剤による改善効果の程度や範囲などを定量的に評価する技術が不可欠となる。このため、含浸強化剤の開発と並行して、既存コンクリート造およびレンガ造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3mm程度の孔）に抑えて定量的に推定できる携帯式削孔試験装置の開発も試みた。

本報では、第2章として携帯式削孔試験装置の開発を、第3章として含浸強化剤の開発を、第4章として現場試

験施工実験としてのアユタヤ遺跡(タイ)における試験施工結果をそれぞれ取りまとめる。

## 2. 携帯式削孔試験装置の開発

写真-1に、開発した携帯式削孔試験装置の構成を示す。本研究開発以前に作成した試作機の問題点を改良した仕様となっている。表-1に、既存試験装置の問題点と、本装置の改良点を示す。



(削孔試験機拡大)

- |   |            |
|---|------------|
| ① | 肩掛け用ベルト    |
| ② | つり下げ金具     |
| ③ | 削孔試験機本体    |
| ④ | フットスイッチ    |
| ⑤ | コントロールボックス |
| ⑥ | データログ      |
| ⑦ | 揚水ポンプ      |
| ⑧ | ダイヤモンドビット  |
| ⑨ | 板バネ        |
| ⑩ | 変位計        |

写真-1 削孔試験装置の構成

表-1 携帯式削孔試験装置の問題点および改良点

No.	問題点	改良点
1)	機器の重量が重く削孔試験中の保持が難しい	直接削項に係するもの以外を別部品とした
2)	削孔試験時の電源投入動作で機器の保持状態が変化する	フットスイッチで電源投入できるものとした
3)	削孔とデータの収録が別々のスイッチとなっている	同上
4)	削孔水（先端ビットの冷却および潤滑用）の供給状態が安定しない	削孔水の吐出口を機器と一体化するとともに給水ポンプで供給することで水圧を安定化した
5)	測定精度および再現性の確保	2. (1)参照
6)	モルタルなどの不均質材料への適用性	2. (2)参照

表-2 ダイヤモンドビットの個体差の低減に関する実験の要因と水準

要因	水準
購入ロット本数	150本、 <u>10本</u>
砥粒の定着方法	電解法、 <u>非電解法</u>
砥粒の埋込み深さ	55%、 <u>65%</u>
非電解メッキ保持時間	1倍、1.25倍、 <u>1.5倍</u>

[注] 下線は個体差の低減に有効な水準

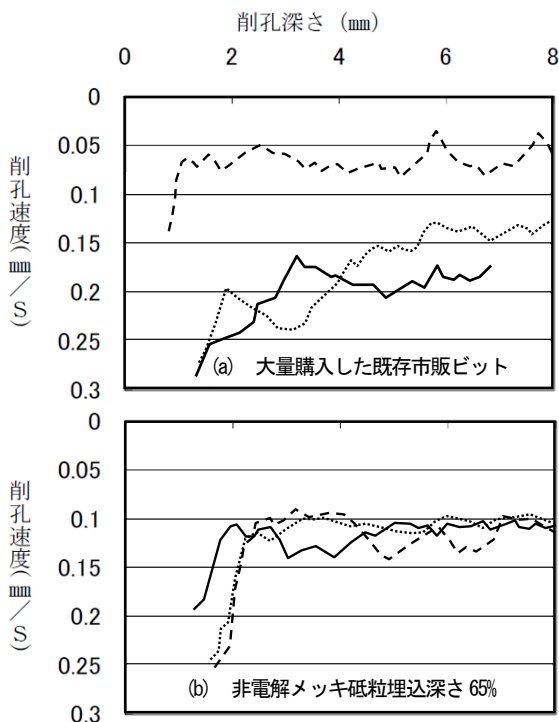


図-1 削孔試験結果に及ぼすダイヤモンドビットの個体差の影響の例

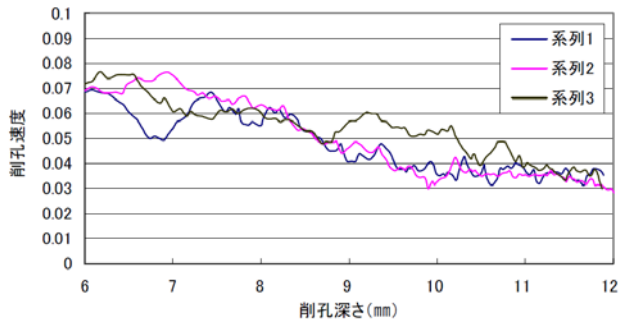


図-2 均質材料を対象とした既存の削孔試験装置の測定結果

(1) 測定精度および再現性の確保

削孔試験装置の問題として、試験時の測定精度の確保および測定結果の再現性の確保が非常に重要となる。しかし、既存の試験装置では、先端のダイヤモンドビットの品質およびダイヤモンドビットの固定方法などにより、必ずしも安定した測定がなされていなかった。これらの点に対し、本研究開発における検討結果を以下に示す。

a) ダイヤモンドビットの個体差の低減

市販のダイヤモンドビットを購入した場合に、製品の個体差が大きく、被測定体の強度の推定結果に大きく影響することが明らかとなった。このため、表-2に示すような項目を要因とした実験を行った。実験結果の例を図-1に示す。同図は別々のダイヤモンドビット3本で測定した結果を比較したものであるが、図-1(a)に示す大量購入した市販ビットに対して、図-1(b)に示す非電解法で砥粒を固定し、砥粒の埋込み深さを砥粒の65%で一定としたビットでは、ビットごとのバラツキが低減されていることがわかる。ただし、工業製品である以上、一定の不良率を見込む必要があり、この点に関しては試し削孔（キャリブレーション）等により検定した上でビットを用いるなどの対策が必要となる。ただし、強度の絶対値を推定する必要のない、相対的な評価の場合にはこの点は問題とはならない。

b) 削孔速度の深さ方向分布

測定精度に関しては、深さ方向に均質な材料を削孔した場合にも、図-2に示すように、深さ方向で削孔速度が低下することが最も大きな問題であった。この原因としては、削孔時に発生する切り粉が孔内から排出されずに残っていることが原因と推察された。このため、削孔径をダイヤモンドビットよりも大きくして切り粉の排出経路を確保する、また、削孔水を強制的に孔内へ噴射することで切り粉の排出を促進する、という2つの対策の効果を検討した。

まず、削孔径を大きくする方法としては、ダイヤモンドビットの固定位置を回転軸からわずかに偏芯させることとした。使用した偏芯コレット（ダイヤモンドビットを固定する部品）の例を写真-2に示す。実験では偏芯量を0.10~0.35mmまで変化させ、測定結果に及ぼす影響などを検討した。その結果、偏芯0.15mm以下では、深さ



写真-2 試作した偏芯コレットの例

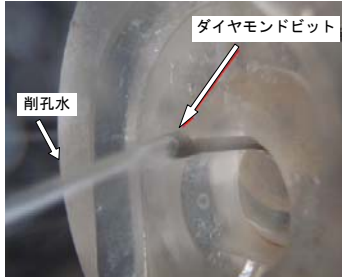


写真-3 削孔水の噴射状況

が増すほど削孔速度が低下する傾向が見られたが、それ以上の偏芯であれば、この低下傾向は解消される結果となった。また、偏芯0.35mmの場合には削孔速度自体が低下する結果となった。以上の結果より、偏芯は0.2~0.3mmの間が適切と判断し、以降の実験では偏芯0.3mmとして実験を行った。

その後の実験結果からは、上記の偏芯条件でも、ビット径や被測定体の種類によって削孔速度の低下傾向が見られる場合が見られた。そこで、削孔水の噴射圧および角度を要因として実験を行った。写真-3に削孔水の噴射状況を示す。その結果、噴射圧および角度に関する適切な条件を得ることができ、削孔速度の深さ方向の低下傾向は解消し、安定した削孔速度が得られるようになった。

## (2) モルタルなどの不均質材料への適用性の検討

モルタルなどの不均質材料に対して削孔試験装置を適用した場合には、ダイヤモンドビットの径が細骨材の粒径範囲に対して相対的に小さいために、細骨材の粒の影響を大きく受ける。細骨材は一般にセメントペースト硬化体よりも摩耗抵抗が大きく、削孔試験においては細骨材に当たった部分では極端に削孔速度が低下し、モルタル（すなわち細骨材とセメントペースト硬化体の複合材料）としての削孔速度の判定は困難となる。そのため本研究開発では、まずモルタル中のセメントペースト分の強度推定を行うこととし、削孔試験結果の処理方法について検討を行った。以下に処理方針を示す。

- ①削孔速度0.12mm/s以下は細骨材と考え除去
- ②削孔速度0.32mm/s以上は空隙と考え除去
- ③連続したデータが0.1mm/s以上変化した前後を除去

上記の処理により、比較的高強度なモルタルではある程度妥当な削孔速度が得られたが、低強度モルタルでは実際のペースト部分とは乖離した推定結果となった。

以上の結果から、モルタルやコンクリートといった不均質材料の場合、現時点では本方法の適用は難しく、今

表-3 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-4 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

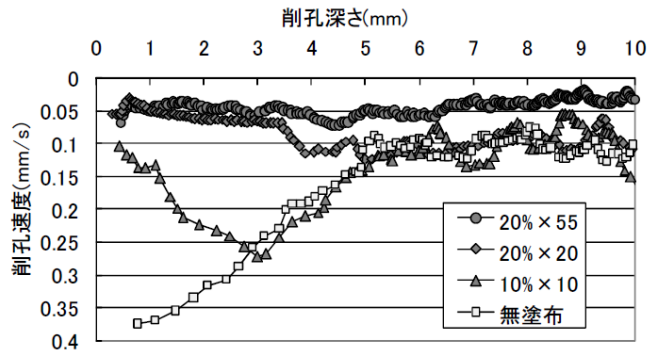


図-5 削孔試験結果の例

後さらに検討を進める必要がある。

## 3. 高含浸性強化剤の開発および性能評価

コンクリートをはじめとして煉瓦、木材、石材等の各種の構造物を構成する多孔質材料の表層には、経年による各種劣化により、構造・意匠の両面に問題が発生している。本研究開発では、これらの劣化の中から、長期にわたって極めて顕著な表層劣化を引き起こす塩類風化および凍害を、とくに取り上げて検討対象とした。

### (1) 高含浸性強化剤による改質効果の評価手法

本節では、4種類の調査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材料の改質効果の評価方法を検討した。

#### a) 実験概要

高含浸性強化剤としては、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用いた。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-3に示す。

被塗布材料としては、内部までほぼ均一な強度を期待できるセメントペースト供試体とした。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。

表-4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

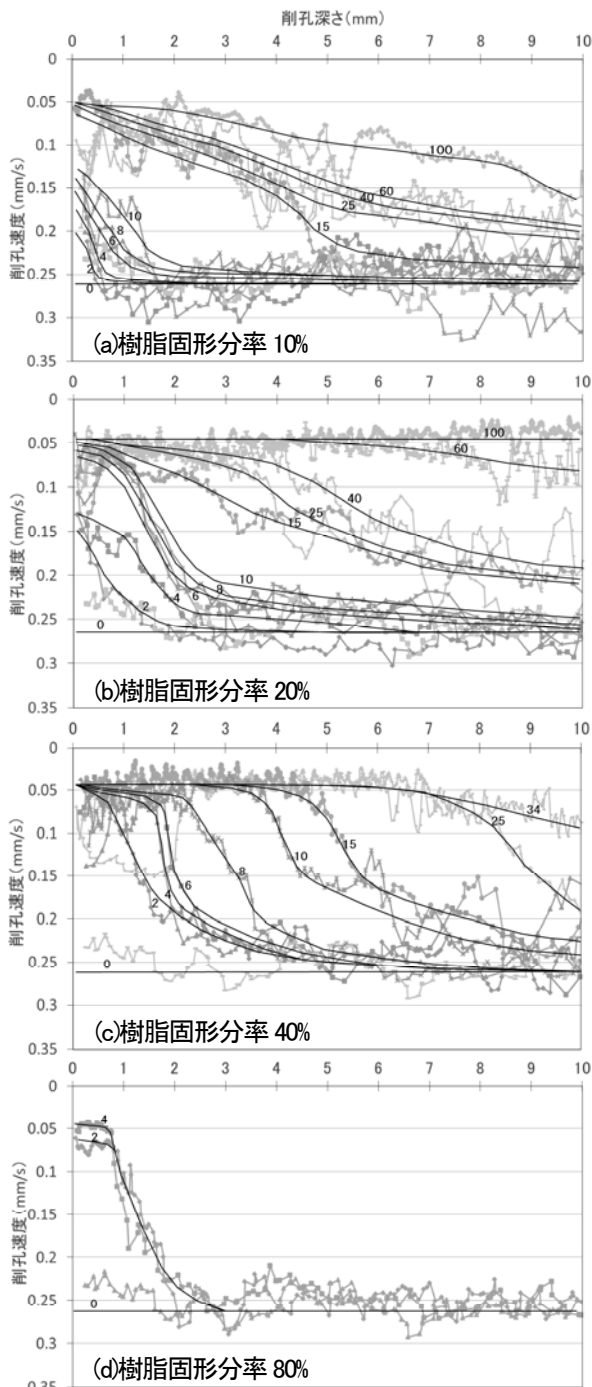


図-6 削孔試験結果(図中の数字は塗布回数を示す)

だけ繰り返し塗布を行った。なお樹脂固形分率が高い調合の場合で、計画した塗布回数以下で含浸が不可能となった時には、その時点で塗布を終了した。

塗布効果の評価のため、前章で示した携帯式削孔試験装置を用いて、深さ方向の削孔速度分布を測定した。最大削孔深さは10mmとした。

#### b) 実験結果と考察

図-5に、削孔試験結果の例を示す。高含浸性強化剤を塗布していない供試体(図中では無塗布)では、表層部にセメント硬化体の成分溶脱によると考えられる弱化層が形成されていることが分かる。これに対して、高含浸性強化剤を塗布した供試体では、含浸深さおよび強化程

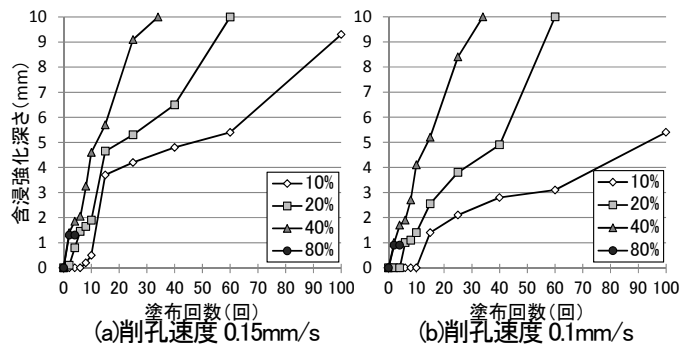


図-7 含浸深さと塗布回数の関係

度によって削孔速度が低下(すなわち材料として強化)していることが分かる。

図-6(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、図中の数字は塗布回数を表す。図からわかるように、高含浸性強化剤の調合および塗布回数により、セメントペースト内部の強化範囲が定量的に評価できている。

図-7に、品質改善目標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-7(a)は、品質改善目標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-7(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-7(a)によれば、目標削孔速度を0.15mm/sと設定した場合、どの調合であっても、塗布回数が増えると共に、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-7(a)と(b)を比較すると、設定する削孔速度が遅い(強度が高い)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調合および塗布回数の選定が可能となると考えられる。

#### (2) 塩害および凍害に対する耐久性評価

高含浸性強化剤を塗布した多孔質材料の凍害や塩害に対する抵抗性の評価を行うために、強制的に凍結融解を繰り返すCDF試験を行った。このCDF試験は温度変化による凍結融解の繰り返し作用と同時に、塩類を含んだ水の吸水作用も合わせて実施できる試験方法であるため、比較的現実に近い性能評価ができる。

##### a) 実験概要

CDF試験はRILEM TC 117-FDCに準拠した。

被塗布供試体はセメントペーストおよびコンクリートを用いたが、ここではコンクリートの結果のみを示す。コンクリートの調合はW/C=59%、空気量4.5%の普通コンクリートとし、供試体サイズは100mm角の立方体とした。

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 <sup>2</sup> )	実際の塗布量 (g/m <sup>2</sup> )	塗布回数 (回)
N	無塗布	—	—	—
H	シラン系撥水剤	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

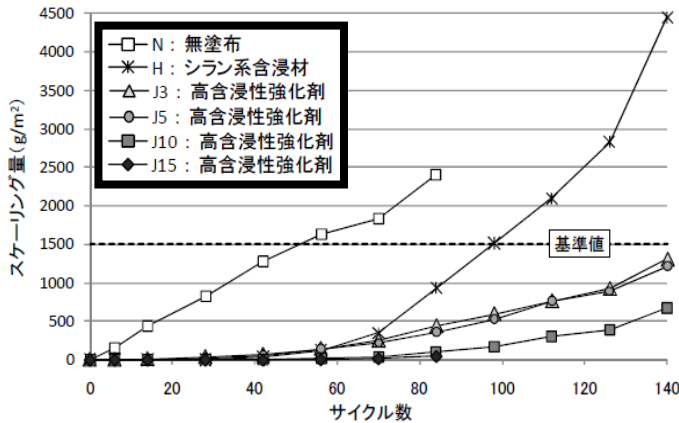


図-8 スケールリング量の推移

高含浸性強化剤は樹脂固形分率を20%とし、撥水性を付与するために助剤を樹脂固形分の質量に対して5%添加したものを用いた。また、比較対象として、市販のシラン系撥水剤も用いた。高含浸性強化剤の塗布回数および塗布量を表-5に示す。

#### b) 実験結果と考察

スケールリング量の推移を図-8に示す。一般的に評価の対象とされている28サイクル時点のスケールリングの量は、供試体Nでは820.0g/m<sup>2</sup>と顕著であり、J3では36.7g/m<sup>2</sup>、J5では26.7g/m<sup>2</sup>と、塗布量に応じて漸減した。他の供試体は、スケールリングが生じなかった。すなわち、一般的なコンクリートの通常の供用の場合、本試験で使用したシラン系撥水剤および高含浸性強化剤は、良好な耐凍害・耐塩害性を期待できると考えられる。

供試体Hでは、28サイクルの時点でスケールリングが生じていなかったが、84サイクル時点ではスケールリング量が933.3g/m<sup>2</sup>と急激に増加した。一方、28サイクルの時点でスケールリングが生じていたJ3は84サイクル時点のスケールリング量が440.0g/m<sup>2</sup>で、J5は360.0g/m<sup>2</sup>であったので、これを上回ったことになる。また、高含浸性強化剤の含浸深さはJ3では6.1mm、J5では6.8mmであったのに対し、シラン系撥水剤のHへの含浸深さは3.1mmと浅かったため、Hでは供試体の表面からスケール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、シラン系含浸材の場合、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ルリングの発生を低減させているのに対し、高含浸性強化剤では、撥水性に加え、接着により被塗布体を強化す



写真-4 Wat Chai Watthanaram

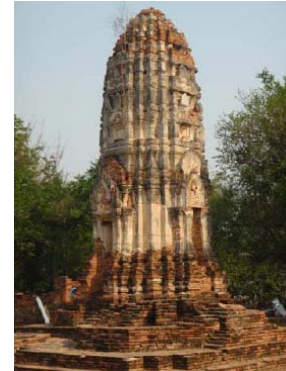


写真-5 Wat Som

ることでスケールリングを抑えたと考えられる。以上より、長期に渡る供用では、シラン系撥水剤よりも、高含浸性強化剤の方が耐凍害・耐塩害性が優れていると考えられる。

#### 4. タイ国アユタヤのWat SomおよびWat Chai Watthanaramにおける保存処理の試行およびその効果確認試験

本章では、高温多湿な熱帯環境下にある煉瓦構造物とその表層の劣化防止・抑制策としての本工法の適用性を検証する。そのため、ここではタイ国の世界文化遺産であるアユタヤ遺跡の煉瓦建造物に生じている塩類風化等の劣化の現状を調査するとともに、小面積において劣化防止処理を行い、経過観察を行った。

##### (1) 対象とした建造物と劣化の概要

今回の劣化防止処理を行った場所は、写真-4および5に示したWat Chai WatthanaramおよびWat Som (Ayutthaya Historical Park, Ayutthaya Province) である。両寺院の劣化状況の概要を以下に記す。

- ・仏塔の表層の煉瓦では塩類風化が進行しており、とくに焼成温度が低いと思われる煉瓦の劣化が著しい。
- ・表層の煉瓦の風化に伴い、建設当時の文化を伝える表層のレリーフ(漆喰)は、ほとんどが剥離・剥落している。



写真-6 削孔試験装置機による表層強度の測定



写真-7 漆喰レリーフの劣化防止処理

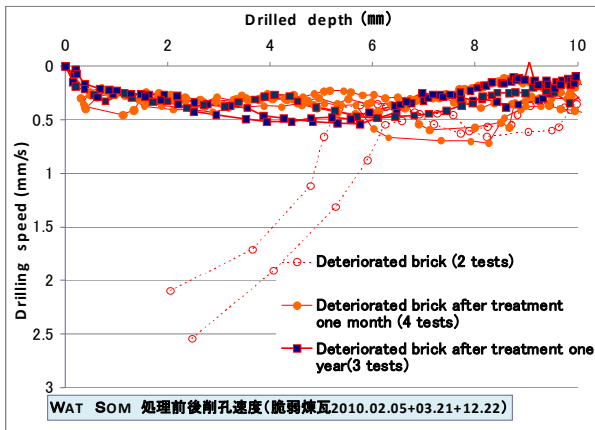


図-9 煉瓦表層の強度分布（劣化した煉瓦、処理1ヵ月後、1年後）の測定値の比較

## (2) 劣化状況の把握と劣化防止処理

小径ドリル型削孔試験装置および高含浸性強化剤を用いた提案工法を用いて、以下のように仏塔の劣化状況を定量的に把握し、続いて劣化の防止処理を行った。

- ・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10mmの深さまで連続した強度分布を測定し、処理前の劣化程度を評価した（2010年2月5日～7日、**写真-6**、**図-9**）。
- ・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）を行った。
- ・漆喰の劣化防止処理（剥落防止・表層劣化防止）を行った(**写真-7**)。

## (3) 処理部分の経過観察と評価

脆弱部強化および劣化防止処理を行った煉瓦について、表層から内部への強度分布を測定し（測定時期は1ヶ月後、および5年後までの任意の時期とする）、処理効果について、以下のように短期および長期的な評価を行う。

- ・2010年3月21日： 処理剤硬化後（約1ヶ月後）の強度試験および塩類の回り込み防止処理
- ・約半年後： 浮きおよび変色調査を実施

- ・約1年～5年後まで： 暴露後の強度試験、浮き、変色を調査予定

以上、セメントペーストサンプル2体と木材サンプル1体は、アユタヤ公園事務所の近くの屋外で暴露を行い、定期的に観察を行うこととした。なお、同様なセメントペーストのサンプルは、日本においても平均的気候の地域（最高40℃～最低-3℃）と特に寒い地域（最高25℃～最低-30℃）で同時期に屋外暴露している。

## 5. 総括

本研究開発では、含浸性の高い新たな表層部強化剤の開発を行うと同時に、各種構造材料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3mm程度の孔）に抑えて定量的に推定できる携帯型削孔試験装置の開発を試みた。本研究開発で得られた結果をおおよそ以下のようにまとめられる。

- 1) 高含浸性強化剤に関しては、浸透性、品質改善効果、耐久性および施工性に関して、所定の性能が得られることを確認した。
- 2) 当該材料の強度や劣化度に応じて、薬剤の配合割合だけでなく、塗布回数（塗布量）などの施工条件を適切に設定することで、所定の含浸深さと塗布後の材料強度を得ることが可能となる。
- 3) 携帯型削孔試験装置に関しては、均質材料に対する良好な適用性が確認された。すなわち、表層の深さ10mm程度までの削孔抵抗（強度分布に相当）を、連続的に測定することが出来る。
- 4) 本装置を用いることで、劣化した材料の劣化度と劣化深さを定量的に測定し、その上で、補修効果を定量的に評価することが出来る。
- 5) モルタルやコンクリートなど、内部に骨材を含む火均質材料の強度推定を行うには、データ整理についてさらに検討を深める必要がある。