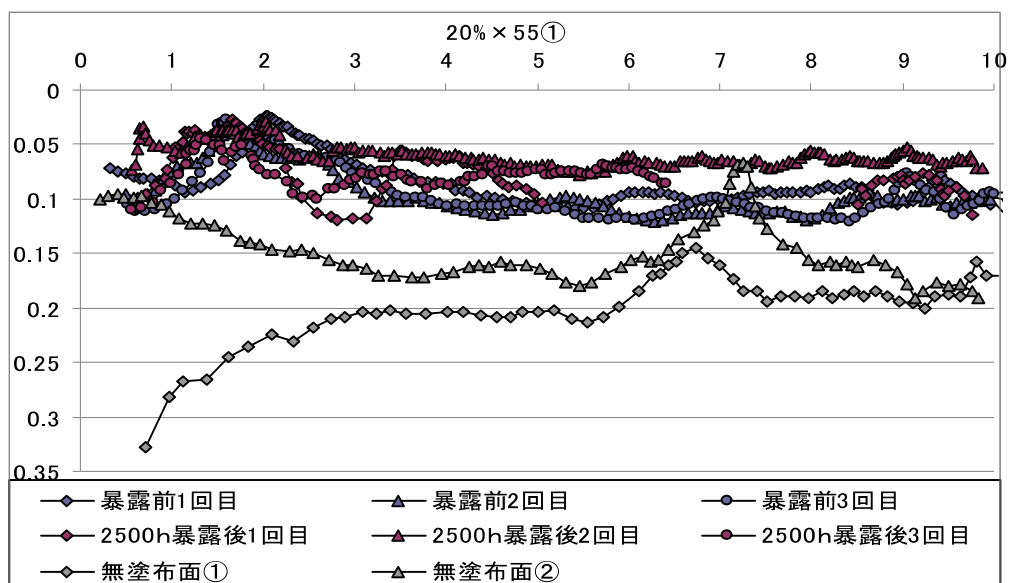


ダンカンソリッド・ダンカンコンクリート 2, 500 時間暴露試験前・後におけるの強度の変化測定

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 面にダンカンソリッド塗布(刷毛塗り) 20% 樹脂固形分 20%(ダンカンソリッド・ダンカンコンクリート)
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ある。

約17年相当の暴露試験結果に変化無し

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

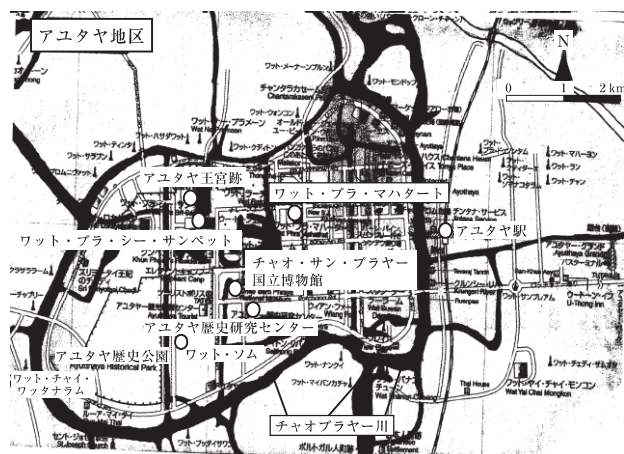


図-2 アユタヤ地区(黒い線が川)

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。

- 降雨、日射などの環境外力による劣化
- 塩類の析出による劣化
- 植物の生育による劣化
- 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

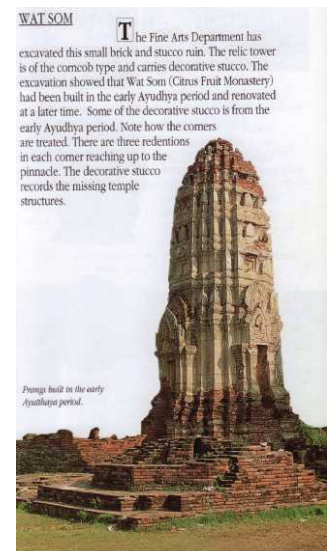


写真-10 Wat Som

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

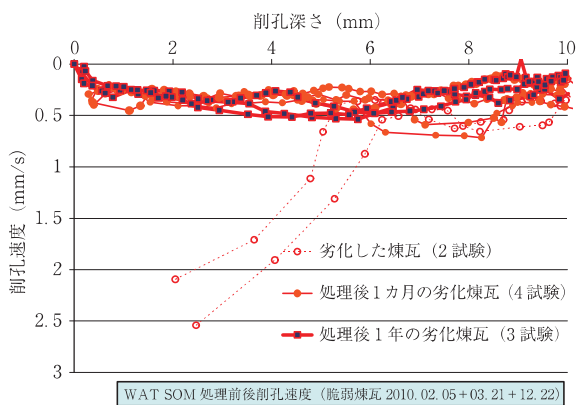


図-3 ドリル削孔試験による削孔速度一削孔深さ関係（劣化煉瓦、処理後1カ月、1年のデータ）（深さ約6mmまで劣化、処理後の削孔抵抗は内部までほぼ一様、1年後も効果は安定）

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：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，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

文化財に用いられた石材への表層部強化処理剤の浸透性評価方法に関する研究 (携帯式表層強度測定器の使用例)

文化財
強化剤

表層強度
浸透性

材料評価
補修

正会員 ○ 長谷川 哲也 *1
同 長谷川 直司 *2
同 三島 直生 *3
同 畑中 重光 *4
同 谷川 恭雄 *5

1. はじめに

屋外暴露されている古い建築物や文化財では、その構成材が吸水し易い岩石等であった場合には、内部に浸入した塩類が表層近くで結晶膨張し、表層が剥離したり、表層が脆弱化することが多い。脆弱化が進行するとそこに刻まれた文字が消えたり、形状も変わってくる場合がある。

これらの材質の劣化に対する対策として、2つの処置が必要である。一つは脆弱部の強化および浸透している塩類の膨張阻止、もう一つはさらなる塩類の供給防止である。

本報では、筆者らが開発中の表層強度測定器^{1)~4)}を用いて、脆弱部の強化用薬剤の浸透性を測定することにより測定器の有効性の確認を行った。対象とした岩石は、復元された二葉荘(川上貞奴邸, 名古屋市)においてオリジナル材の劣化が激しい門柱に使用されている砂岩と同じものを用い、これに各種含浸強化剤を塗布し、養生後、開発中の試験器で削孔することにより、各種含浸強化剤の浸透深さおよび相対強度の評価を行った。

2. 実験概要

2.1 試験機の仕様

図-1に、本試験で用いた携帯用表層強度測定器の概要を示す。本試験器は定トルク・定押し付け力で測定体を削孔できる装置であり、ドリルビットにはφ4のダイヤモンドビット(ダイヤモンド砥粒#120)を用いた。ドリルビットの回転数は4000rpmとした。測定は内蔵した変位計により削孔深さを1秒毎に計測した。削孔深さは最大で約10mmとした。

削孔結果は削孔時間と削孔深さの関係で表されるが、図-2に示すように被削孔体の削孔抵抗によってグラフの傾きが変化する。

2.2 評価する項目

表層強度測定器の測定結果から含浸強化剤の浸透深さおよび削孔抵抗の改善効果に関する評価を行う。

供試体は、旧川上貞奴邸に使用されていた砂岩を80×80×20mmに切り出し、露出した健全な面に対し各々の薬剤を塗布したものを用いた。塗布回数は特に指定せず、1~2分のインターバルで塗布を続け、砂岩表面に液体が余剰分として残った時を塗布の終了

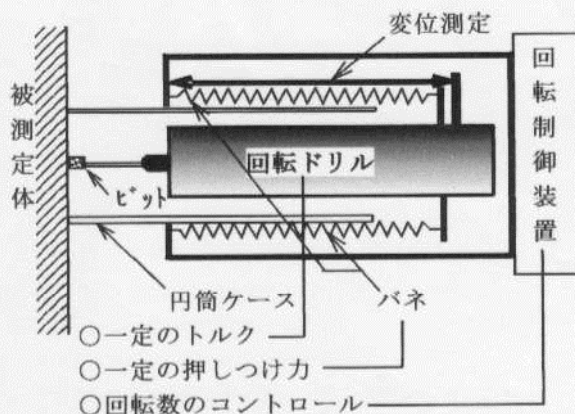


図-1 携帯用表層強度測定器の概要(測定開始時)

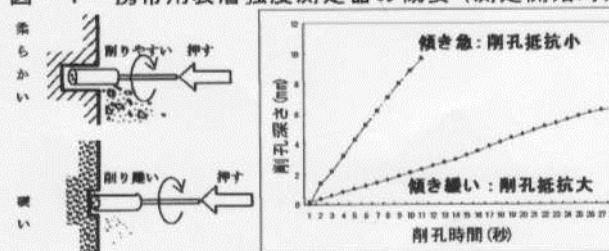


図-2 試験方法と結果のイメージ図

表-1 含浸強化剤一覧表

記号	主剤	内容
E1	エポキシ樹脂	分子量を小さくした
E2		反応性希釈剤を混入
i0 i7	イソシアン酸 エステル	主剤と下記薬剤を適宜調合 (弾力性を持たせる薬剤 反応性希釈剤に近い薬剤 希釈剤(2種))
e	エチルシリケート	市販品

とした。

2.3 含浸強化剤の種類

評価する薬剤は、一般に文化財石造物の強化に使われているエチルシリケートと無黄変タイプのエポキシ樹脂系およびイソシアン酸エステル系とした。

各薬剤の設計意図および記号を表-1に示す。

Evaluation of Permeability of Surface Strengthening Agents for Building Stone Used in Cultural Heritage
(Usage of Portable-type Surface Strength Measurement Apparatus)

HASEGAWA Tetsuya, HASEGAWA Naoji, MISHIMA Naoki, HATANAKA Sigemitsu and TANIGAWA Yasuo

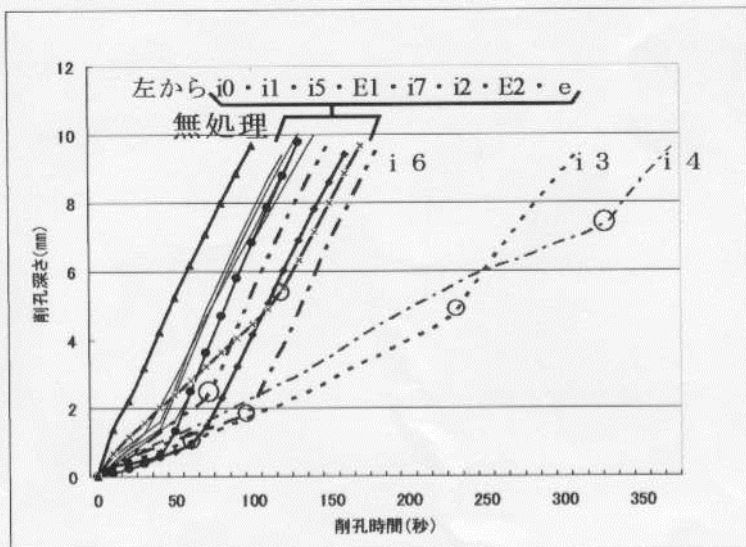


図-3 削孔深さと削孔時間の関係

ここで $i2 \cdot i3 \cdot i4$ は樹脂固形分は同じものとして溶剂量のみ変化させてそれぞれ樹脂固形分量 44%, 35%, 29% とした。なお, $i0$ と $i5$ は樹脂固形分 100% とした。

3. 試験結果

図-3 に削孔深さと削孔時間の関係を示す。同関係曲線の傾きが被削孔体の削孔抵抗の大きさを示す。

図によれば無処理の試験体以外は、いずれもある程度まで勾配が小さく、その後は無処理とほぼ同じ勾配になっている。これは勾配の小さい範囲が含浸強化剤によって強化されたことを示している。

したがって、各薬剤とも緩勾配から無処理と同じ勾配になる屈折点(図には○で示す)の深さが浸透強化深さである。この各剤の浸透深さを表-2 に示す。

これによれば、従来から使われていた e 剤はやや削孔抵抗は弱いものの、5.16 mm までの浸透力を示した。

さらに、今回調査した薬剤 $i4$ は e 剤よりも削孔抵抗が強く、7.55 mm までも浸透するため、含浸強化剤として十分な効果が得られるものと思われる。

これらの結果から携帯用表層強度測定器による各含浸強化剤の評価方法については以下の点が判明した。

- 1) 図-3 から各含浸強化剤の屈折点は明確に判断でき、浸透深さの判定が可能であった。
- 2) 含浸強化剤が浸透していない部分の勾配と無処理の勾配とはほぼ同じであった。これはこの試験器の誤差が小さいことを表している。
- 3) 各含浸強化剤処理後の砂岩の強さ(圧縮強度・粘性・耐摩耗性・凝集力などのうちどれかは不明)が、相対的にはあるが判定できた。

4. まとめ

表-2 各薬剤の浸透深さ

薬剤No.	浸透深さ(mm)
E1	0.77
E2	1.15
i0	1.68
i1	1.35
i2	2.40
i3	4.83
i4	7.55
i5	1.35
i6	1.94
i7	1.79
e	5.16

※ここで無溶剤は $E1 \cdot i0 \cdot i5$

今回の結果から試験器の測定結果について推定されることを以下に述べる。

- 1) 無処理のものと各含浸強化剤が浸透していない部分の傾きはほぼ同じであることから、表層強度測定器の測定結果の信頼性は高いと判断される。
- 2) 含浸強化部分と浸透していない部分の違いは顕著であり、浸透深さは明確に判定できた。
- 3) 含浸強化剤の削孔抵抗は含浸強化部分の傾きによって判定できる。

以上より、当該測定器による削孔試験では、砂岩のような単一構成材に対しては削孔範囲内の相対強度、含浸強化部分に対しての浸透深さおよび相対強度を正確に計測できることがわかった。

参考文献

- 1) 長谷川哲也他:構造体の表層部強度を推定するための携帯用測定機器の開発, 日本建築学会東海支部研究報告集, 第41号, pp. 121-124, 2003. 2
- 2) 長谷川哲也他:構造体の表層部強度を推定するための携帯用測定機器の開発, 日本非破壊検査協会シンポジウム, コンクリート構造物の非破壊検査への期待論文集, Vol. 1, pp. 107-114, 2003. 7
- 3) 長谷川哲也他:構造体の表層部強度を推定するための携帯用測定機器の開発(その2:測定器におけるビットの性能), (その3:れんがの強度特性と検量線作成用資料の調整方法), 日本建築学会大会学術講演梗概集(東海), pp. 821-822, 823-824, 2003. 9
- 4) 長谷川哲也他:構造体の表層部強度を推定するための携帯用測定機器の開発, コンクリートの試験方法に関するシンポジウム, pp. 2-79-2-84, 2003. 11. 21

*1 日本診断設計株式会社・三重大学大学院博士課程 Japan Architectural Examination Design Office CO., LTD
 *2 国土交通省国土技術政策総合研究所 Head, National Institute for Land and Infrastructure Management, MLIT
 *3 三重大学工学部建築学科助手・博士(工学) Research Assoc., Dept. of Arch., Faculty of Eng., Mie Univ., Dr. Eng.
 *4 三重大学工学部建築学科教授・工学博士 Prof., Dept. of Arch., Faculty of Eng., Mie Univ., Dr. Eng.
 *5 名城大学大学理工学部建築学科教授・工学博士 Prof., Dept. of Arch., Faculty of Science and Technology, Meijo Univ., Dr. Eng.