

建設技術研究開発費補助金総合研究報告書

1. 課題番号 第29号
2. 研究課題名 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
3. 研究期間 平成22年度～平成23年度
4. 代表者及び研究代表者、分担研究者

代表者	畑中重光	三重大学大学院工学研究科・教授
研究代表者	畑中重光	三重大学大学院工学研究科・教授
分担研究者	長谷川哲也	日本診断設計株式会社・代表取締役
分担研究者	谷川恭雄	三重県建設資材試験センター・理事長
分担研究者	伊藤敬人	三重大学大学院工学研究科・教授
分担研究者	三島直生	三重大学大学院工学研究科・准教授

5. 補助金交付総額 29,840,000 円

6. 研究・技術開発の目的

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。本申請研究では、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目指す。本試験装置が開発されれば、構造体の劣化度に関する基礎データが、容易にかつ低コストで得られ、現在進められつつある各種の既存構造物の耐久性診断事業をより信頼性のある調査結果に基づいて進めることができるようになる。

また並行して、含浸性の高い新たな表層部強化剤の開発を行うことを目指す。現状では、高い含浸性を有する吸水防止剤はいくつか開発されているが、表層部の強化剤としては含浸性の大きなものは無く、塗布してもいずれ表層部で剥離する等の問題があった。これに対して本研究で開発する高含浸性の強化剤は、多孔質材料内部へ深く浸透し、微細空隙を埋めることなど材料そのものを強化するため、剥離しづらく、高耐久なものとする事ができるものとする。

含浸深さおよび品質改善効果について、本研究で開発した削孔試験装置を活用しつつ、定量的な評価を試みることで、表層部強化剤を活用した構造物の劣化診断から補修までの効率的なシステムの構築を目指す。

7. 研究・技術開発の内容と成果

1) コンクリート・煉瓦・木質構造物等の表層強度推定のための携帯式削孔試験装置の開発

研究初年度において、削孔試験装置の基本システムの設計・製作を行った。研究2年目には、削孔試験を行いつつ、不具合部分の改修を継続して行った。本研究開発の結果、比較的均質性の高いセメントペーストなどに対しては、十分な精度で硬化体の品質および高含浸性強化剤の含浸深さの測定が可能であることが明らかとなり、これまで不明であった高含浸性強化剤の調合および塗布の回数と含浸深さ(品質改善の程度の深さ方向分布)が明らかとなった。2年間の研究開発により、モルタルやコンクリートなどの不均質性の高い材料に対しては、測定データの処理方法などによりある程度妥当なデータが得られる結果を得ているものの、実用化に向けてはさらなる検討が必要であり、継続して研究を進める必要がある。

2) 含浸性の高い表層部強化剤の開発と改善効果の定量評価

高含浸性強化剤に関しては、研究初年度において、基礎的な使用材料および調合比率に関する検討を行った。研究2年目には、品質改善効果の確認、実用化に向けた現場での適用

性の把握、および各種促進試験による耐久性の確認を中心に行った。品質改善効果の確認に対しては、既述の削孔試験装置により、調合や施工条件の違いによる、深さ方向の品質改善の程度の分布が得られ、劣化状況に応じた調合および施工方法の選定を行うための基礎データが得られている。ただし、現時点では必要な品質改善効果の基準が不明確であり、この点に関しては今後も継続して検討を進める必要がある。実用化に向けた現場適用性の評価に関しては、海外の歴史的建造物（タイ・アユタヤ遺跡）などに対する試験を行い、現場の環境や被塗布体の形状や劣化状態に応じた施工方法により、十分に適用が可能であることを確認した。耐久性のうち紫外線劣化に対しては、必要な耐久性があることが確認された。また、耐凍害性に関しては、被塗布体としてセメントペーストおよびコンクリートを用いた検討を行い、既存の含浸強化剤と比較した結果、本研究で開発した高含浸性強化剤の優位性が示された。

3) 本研究で開発した削孔試験装置および高い含浸性を有する表層部強化剤を活用した構造物の劣化診断から補修までの効率的なシステムの構築

削孔試験装置および高含浸性強化剤について、それぞれの要素技術は満足のいく完成度が得られている。これらの技術は個々では十分な効果を発揮することができず、両方の技術を同時に保有している意義は非常に大きい。既述したように、削孔試験装置により劣化深さを判定し、必要な深さまで含浸強化できる高含浸性強化剤の調合および施工方法を選定し、施工した後はその改善効果を再度削孔試験により確認することで、補修技術を完全なものとするができる。今後、モルタルやコンクリートなどの不均質性の高い材料に対しては、測定データの処理方法など、実用化に向けてさらなる検討及び継続して研究を進めて行く。

併せて、完成した部分から順に実用化に向けた特許の取得および仕様書などの整備による普及活動を進めていく予定である。

詳細な研究成果については、以下の3部に分けて別途報告する。

第1部 小径ドリル式削孔試験機の開発

第2部 高含浸性強化剤の開発および性能評価

第3部 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

8. 研究成果の刊行に関する一覧表

刊行書籍又は雑誌名（雑誌のときは雑誌名、巻号数、論文名）	刊行年月日	刊行書店名	執筆者氏名
コンクリート構造物の非破壊検査論文集、Vol. 3、小径ドリル型削孔試験機を利用した高含浸強化剤の性能評価	2009. 8. 5	日本非破壊検査協会	長谷川哲也、畑中重光、三島直生、伊藤敬人、谷川恭雄
日本建築学会大会学術講演梗概集、A-1、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	2010. 7. 20	日本建築学会	左口泰平、長谷川哲也、金子光二、畑中重光、三島直生
日本建築学会大会学術講演梗概集、A-1、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	2011. 8（投稿中）	日本建築学会	左口泰平、長谷川哲也、三島直生、畑中重光

9. 研究成果による知的財産権の出願・取得状況

知的財産権の内容	知的財産権の種類、番号	出願年月日	取得年月日	権利者名
無し				

10. 成果の実用化の見通し

1) 表層強度の推定のための携帯式削孔試験装置の開発について

煉瓦等単一構成材料についての計測は、機器およびシステムが完成し、現地試験施工も良好である。コンクリート等複合構成材料については、計測方法および解析方法の検討中である。今後、実建造物の竣工検査、および劣化診断から補修までの効率的なシステムの構築へ発展させるべく研究を継続する必要がある。

2) 高含浸性の表層部強化剤の開発と改善効果の定量評価について

薬剤および定量評価については実用化レベルまで完成した。今後は市販を目指し、きめ細かいニーズに合わせたアレンジを行い、出来るだけ早く販売を開始することにより、建造物の高耐久化と新しい雇用の創出に寄与したい。

11. その他

無し

第1部

小径ドリル式削孔試験機の開発

—目次—

1. 開発目的（1・2号機の欠点及び改良方針）	
1.1 機械としての一般的性能面での欠点及びその改良方針（機器全体の改良）	．．．．． P. 1
1.2 測定精度面の欠点及びその改良方法（部分の改良）	．．．．． P. 2
1.3 建築構造体測定方法上の欠点及びその改良方法（使用方法の開発）	．．．．． P. 7
2. 機器全体の改良概要（3・4号機図面）	．．．．． P. 9
3. 部分の改良	
3.1 ビット毎の切れ味個体差の低減	
3.1.1 個体別のビット先端の地金の凸凹状況の同一化	．．．．． P. 16
3.1.2 ビット先端の地金の平滑性の向上	．．．．． P. 19
3.1.3 ダイヤモンド砥粒突出高さの同一化	．．．．． P. 21
3.1.4 ダイヤモンド砥粒数の一定化	．．．．． P. 24
3.2 削孔深さによる削孔速度低下の解消	
3.2.1 ビット取り付け時のビットの傾き調整によるビット先端の偏芯	．．． P. 29
3.2.2 ビット取り付け用コレットの穴の位置偏芯によるビット先端の偏芯	．．． P. 31
3.2.3 ビット取り付け方法の変更と芯取り付け治具の偏芯によるビット先端の偏芯	．．．．． P. 36
4. 使用方法の開発（モルタルの強度推定のための改良）	
4.1 $\phi 2$ 用削孔条件の決定	
4.1.1 $\phi 2$ に最適な偏芯量・水圧の選定	．．．．． P. 40
4.1.2 $\phi 2$ に最適な流水角度の選定	．．．．． P. 43
4.1.3 $\phi 2$ に最適なバネ力の選定	．．．．． P. 45
4.2 モルタルの強度測定方法の開発方針	
4.2.1 過去のモルタルの削孔試験結果（平成19年3月）	．．．．． P. 48
4.2.2 モルタルの削孔試験から強度を推定する可能性	．．．．． P. 49
4.2.3 モルタルの削孔試験から強度を推定する方法を求める手順	．．．．． P. 50
4.3 $\phi 2$ ビットでの削孔を遅くする骨材の最小径の把握	
4.3.1 セメント＋微粒分の供試体作成イメージ	．．．．． P. 51
4.3.2 セメント＋微粒分の供試体作成	．．．．． P. 53
4.3.3 削孔試験	．．．．． P. 59
4.4 $\phi 2$ ビットでのモルタル削孔結果の分析	．．．．． P. 64
5. 試験結果の考察および展望	．．．．． P. 71

1. 開発目的（1・2号機の欠点及び改良方針）

開発中の試験機はプロトタイプとして2台（以下1・2号機と呼ぶ）製造してある。
この1・2号機の欠点を以下に示す。

1.1 機械としての一般的性能面での欠点及びその改良方針（機器全体の改良）

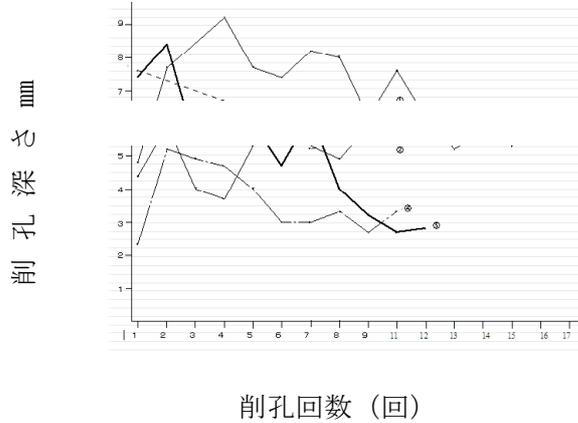
- 1) 機器の重量が重く削孔試験中に保持することが難しい。
改良方針：直接削孔に関係する部品以外は機器から取り外し、変位計を操作する者（以下計測者と呼ぶ）が保持したり地面に置けるようにする。
（削孔水容器およびコントロール BOX など）
さらに、機器の保持を肩掛け式とし、荷重は肩で受ける。
- 2) 削孔開始時に機器を保持し非削孔体を削孔する者（以後削孔者と呼ぶ）が行う電源投入動作は機器の保持状態を変化させるため、試験機が振れて、その動きがデータに悪影響を与える。
改良方針：削孔者がスイッチを入れるのではなく、計測者がスイッチを入れるか ON・OFF スイッチを試験機から取り外し、フットスイッチにする。
- 3) 削孔者が回転スイッチを押し、データ採取者が変位計を操作する。したがって両者のタイミングが合わない時にデータが抜け落ちる。
改良方針：前述と同じように回転スイッチと変位計の操作を計測者が行う。
- 4) 削孔水容器の取り付けおよび向きが毎回違うため、削孔水の落下位置が毎回違い、削孔能率に影響を与えている。
改良方針：削孔水の吐出口を機器と一体化するとともに吐出水圧を容器内の水面の高さによる水圧で制御するのではなく、吸水ポンプの圧力で行う。
- 5) ビットの保持軸が芯ぶれしているため、削孔径が1・2号機で違い、次に新しく機器を作成した場合にも同じ削孔速度（削孔径）とならず、再現性が無い。
改良方針：試験機の構造をビットの軸が芯ぶれしないようにする。

1.2 測定精度面の欠点及びその改良方法（部分の改良）

前述した1・2号機および今回作成した3・4号機に共通したビット周辺の欠点およびその改良点を述べる。

1) ビットが違くと削孔速度が違う

左図はドリル形φ2.3ビットを使ってセメントペーストを20秒間削孔を行い、その深さを測定し、それを10回から16回の削孔を5本のビットで行った結果である20秒削孔した場合3mmしか削孔出来ないビットから8mm削孔出来るまで切れ味がばらついている。



ドリル形φ2.3ビット20秒削孔深さ

改良方針：○個別のビット先端の地金の凸凹状況の同一化

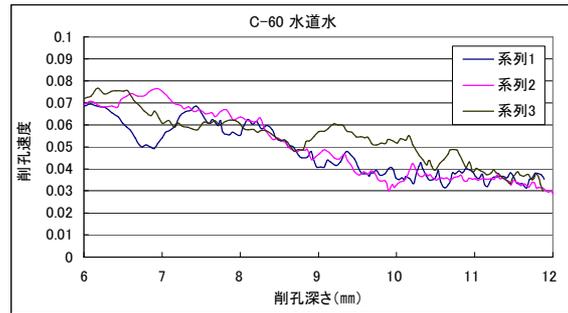
○ビット先端の地金の平滑性の向上

○ダイヤモンド砥粒突出高さの同一化

○ダイヤモンド砥粒数の一定化

2) 削孔深さが深くなった場合に、削孔速度が低下する特性がある

セメントペーストの測定結果の例を右図に示す。横軸が削孔深さを示し、その深さにおける削孔速度を縦軸にて示す。右図は削孔開始時には 0.07 mm/秒であり、削孔深さ 11 mm では 0.04 mm まで低下している。



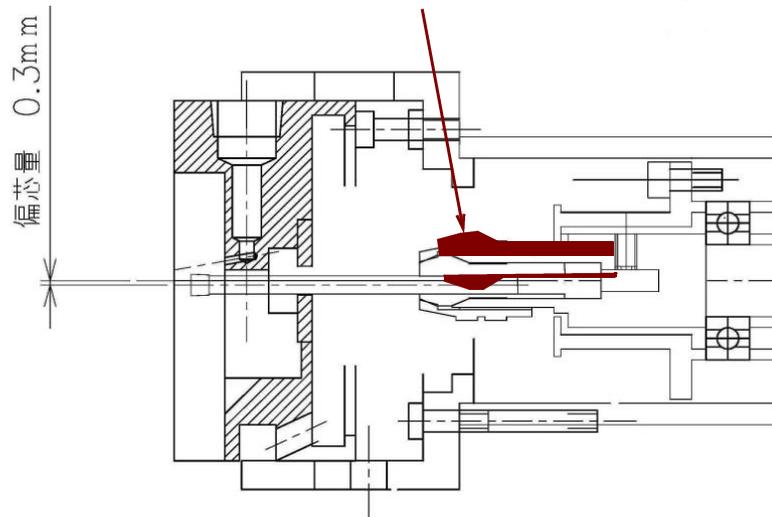
改良方針：これは、削孔時に発生する切り粉が孔内から排出されず残っている事が原因と推察される。ここでビットと削孔された孔の隙間が大きい方が切り粉の排出に有利となるのは明かである。したがってビット径より大きな径の孔を明けることとした。

一般にφ3のビットで削孔すれば非削孔体に出来る孔は直径が3mmとなる。ところがφ3のビットで偏芯して削孔すれば非削孔体に出来る孔は直径が(3 + 2 × α ※) mmの孔となる。(※=偏芯量)

ここである程度偏芯が大きくなれば、孔とビットの隙間から削孔水がビット先端に向かって入り込み、削孔開始から削孔終了までの速度が同じになる場合があることを筆者は確認している。

したがって、ビットを偏芯させて削孔し、非削孔体を開く孔をビット径より大きいものとする。以下にその偏芯方法を述べる。

- ビット取り付け時のビットの傾き調整によるビット先端の偏芯
 - ビット取り付け用コレットの穴の位置偏芯によるビット先端の偏芯
- コレット：片側は肉厚・もう一方は肉が薄い



コレットによる偏芯

作成した 0.1 mm
偏芯及び 0.2 mm
偏芯用コレット
を右写真に示す。



0.1と0.2mm 偏芯コレット写真

0.35mm偏芯コレットを右写真
に示す。

コレット先端部を上
に根本部を下に示す。

最大肉厚部を  で示し、
最小肉厚部を  で示す。



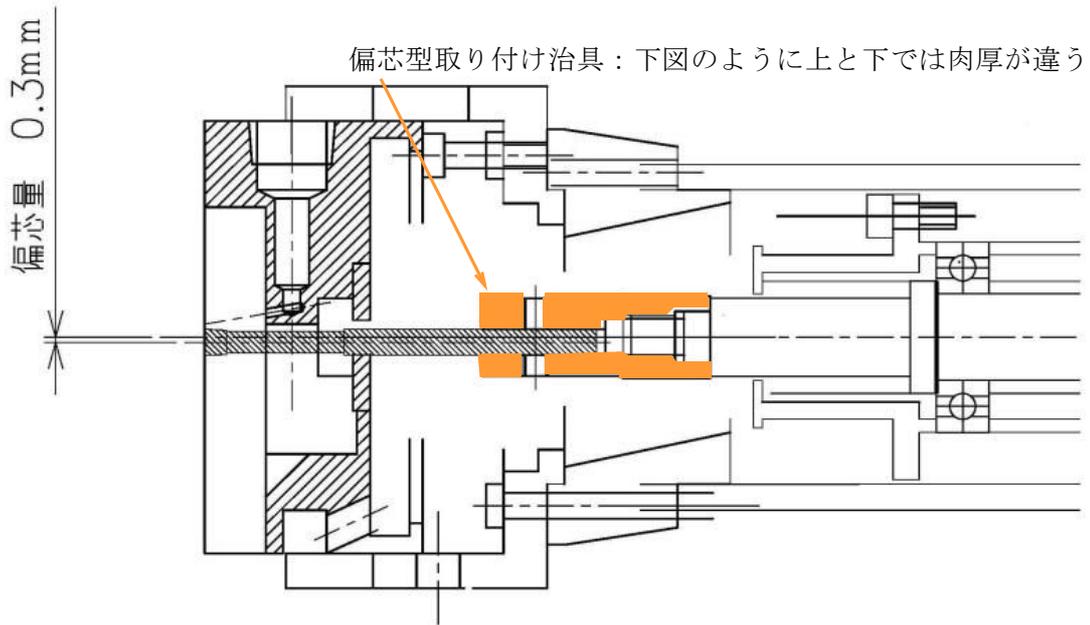
0.35mm偏芯コレット写真

今回作成した
偏芯コレットを
右写真に示す。左
から、0.1・0.15・
0.2・0.25・0.3・
0.35 mm偏芯コレ
ットである。



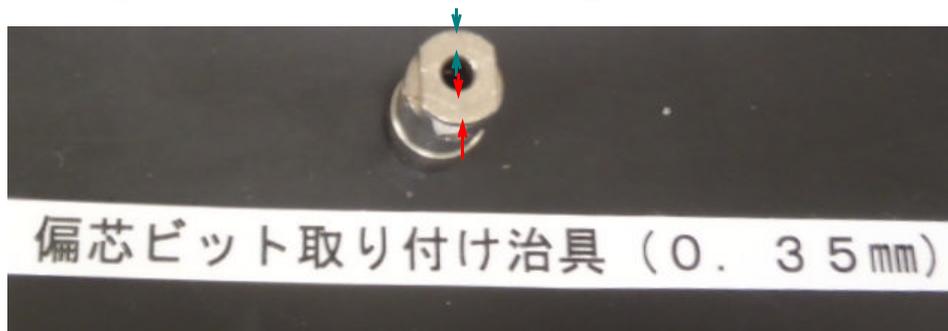
0.1・0.15・0.2・0.25・0.3・0.35 mm偏芯コレット写真

○ビット取り付け方法の変更と芯取り付け治具の偏芯によるビット先端の偏芯



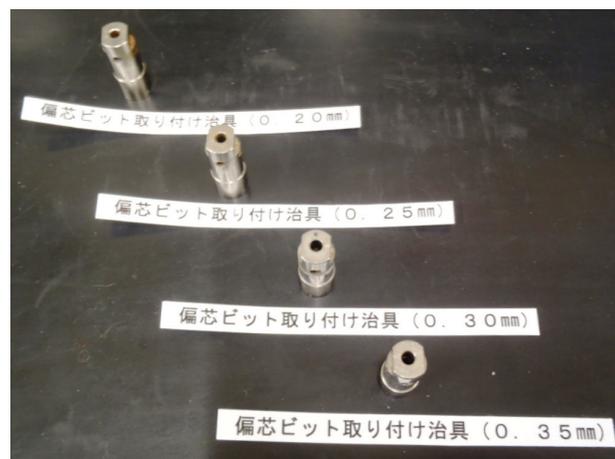
新取付ジグによる偏芯

0.35mm偏
芯治具を右
写真に示す。
最大肉厚部
を ↓ で示し、
最小肉厚部
を ↑ で示す。



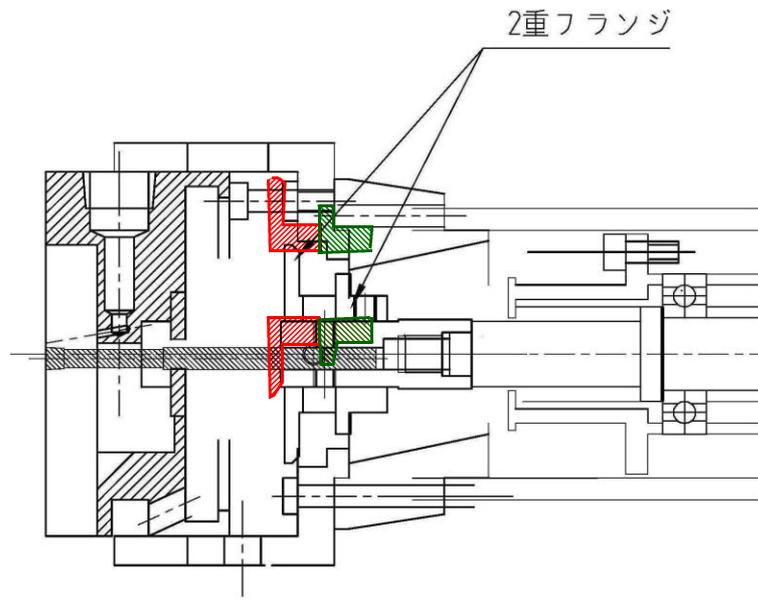
偏芯ビット取り付け治具 (偏芯 0.35 mm) 写真

今回作成した偏芯用治具
を右写真に示す。左から、
0.2・0.25・0.3・0.35 mmで
ある。



偏芯ビット取り付け治具
(偏芯 0.2・0.25・0.3・0.35 mm偏芯) 写真

さらに、削孔時に削孔水がビットの軸を伝って機器内の軸スライド部まで入る場合がある。その場合、削孔水内に含まれている切り粉がスライドの抵抗となり、その摩擦抵抗によって押しつけ力の低減（＝削孔速度の低減）を招く場合がある。すなわち削孔水をスライド部に入らないようにしなければならない。今回は2重フランジをビット根本に取り付けて削孔水の浸入を防いだ。



2重フランジ取付

2重フランジ図

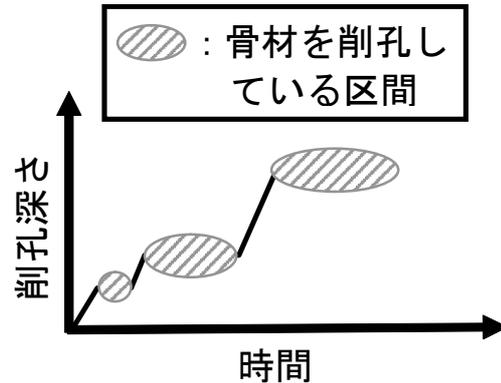


2重フランジ写真

1.3 建築構造体測定方法上の欠点及びその改良方法（使用方法の開発）

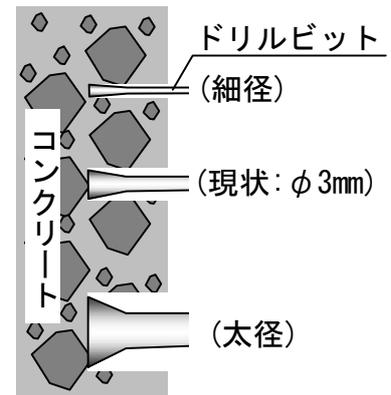
1) $\phi 2$ ビットの使用とその削孔条件の決定

単一構成材のセメントペーストについては計測可能であるが、砂とセメントペーストが組み合わさったモルタルのような複合構成材の削孔は削孔時は右図のような状態となり、どの削孔速度が強度を表しているか不明である。



改良方針：コンクリートとかモルタルのような複合構成材料を削孔する場合はこの試験機で削孔を行った場合、上図のように骨材の強度も測定する事になる。これらの強度を大きく支配しているのはセメントペーストである。したがって、なるべく骨材を削孔せず、セメントペーストを削孔することが望ましいと思われる。その場合下図のようにビット径が小さい方が骨材に当たらず、セメントペーストを削孔し易い。

現状では $\phi 3$ のビットを利用しているが偏芯を入れると3.6mm程度の孔を開けている。これで削孔した場合、ほとんど骨材を削孔していることになる。したがって、 $\phi 2$ のビットを使って少しでも骨材に当たらずに削孔する部分を多くすることをためしてみた。



その場合、ビット径が小さくなればなるほど、ビット間の切れ味の個体差がでて来るのでこれの低減と、削孔速度が速くなるため、 $\phi 2$ mmに合わせた削孔時の条件を決める必要がある。

以下について、 $\phi 2$ に最適な削孔条件を求めた。

- $\phi 2$ に最適な偏芯量・水圧の選定
- $\phi 2$ に最適な流水角度の選定
- $\phi 2$ に最適なバネ力の選定

2) $\phi 2$ ビットでの削孔を遅くする骨材の最小径の把握

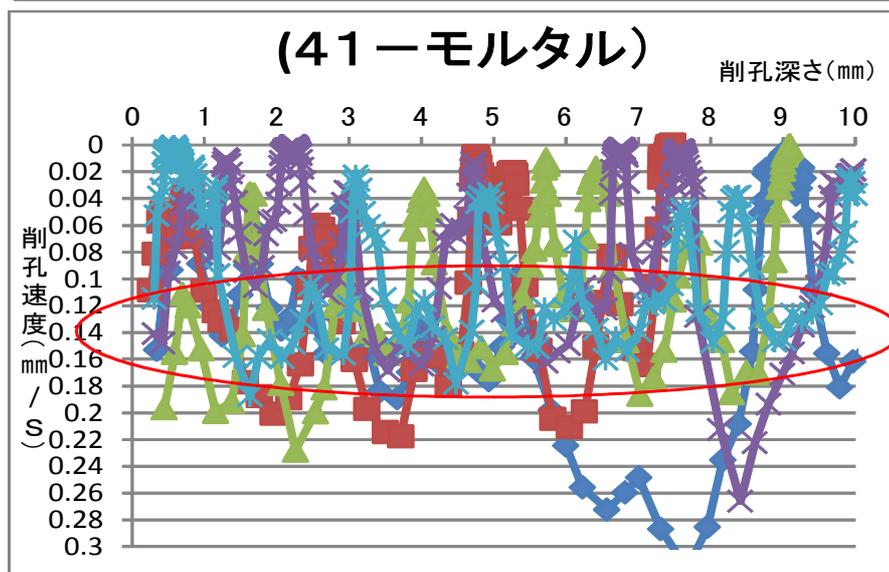
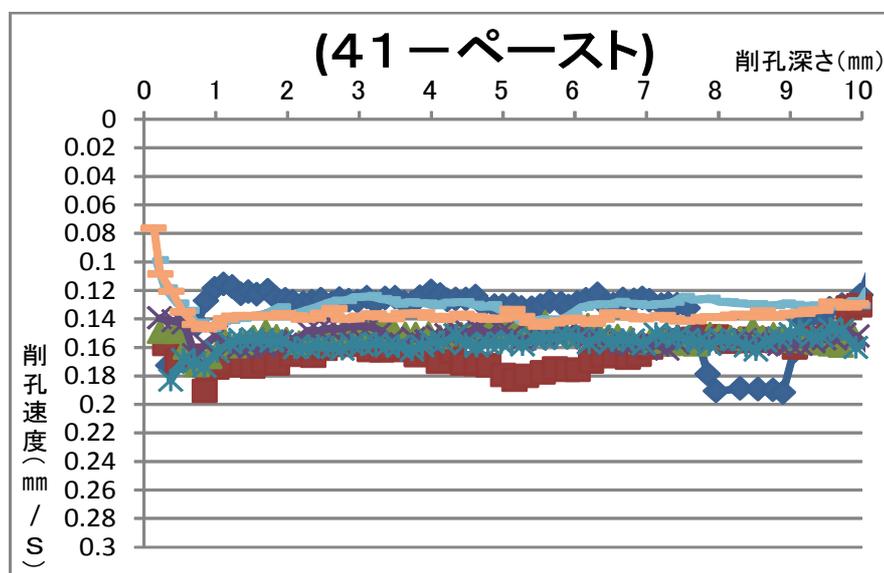
$\phi 2$ ビットを使用した場合、細骨材のうちどの大きさ以上の骨材が削孔速度を大きく低減するか?を調べた。

また、細骨材の内、微粒分は粒の数が多く、セメントペースト内に広く分布していると推定されるため、 $\phi 2$ のビットでも避けて削孔する部分はほとんど無いと思われる。したがって、セメントペーストの削孔速度と同じセメントペーストの中に微粒分の入ったものとの削孔速度の違いを調べた。

3) $\phi 2$ ビットでのモルタル削孔結果

$\phi 2$ ビットでモルタル削孔試験を行った。

上図は水セメント比41%のセメントペースト、下図は同じくモルタルの削孔図である。強度推定方法としては図中 ○ 部分のデータのみを取り出す必要がある。



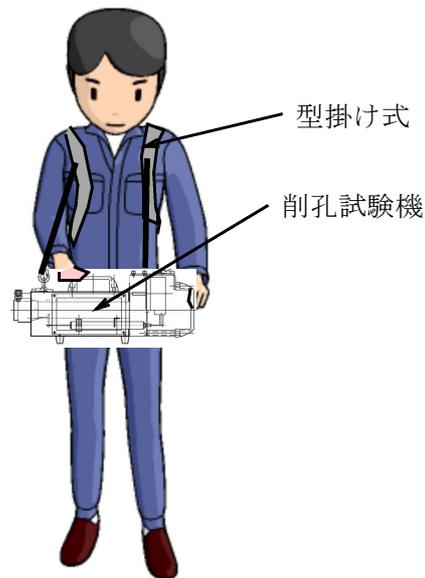
2. 機器全体の改良概要（3・4号機図面）

2.1 機械としての一般的性能面での欠点及びその改良（機器全体の改良）

1・2号機の欠点を考慮し、以下の機能を持つ3・4号機を作成した。

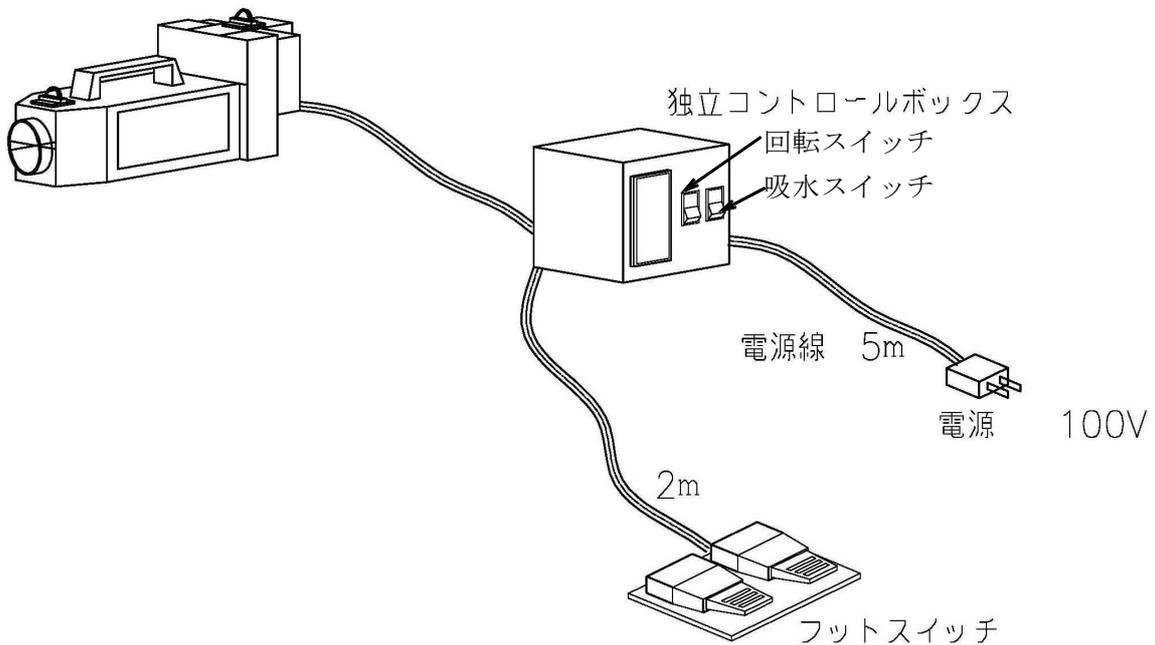
1) 機器を無理なく持つことができ、削孔を楽に行えるような改良

削孔水容器およびコントロール BOXなどを削孔機から外し、機器の保持を肩掛け式とし、荷重は肩で負担させた。以下に概要図を示す。



削孔試験機吊下げ写真

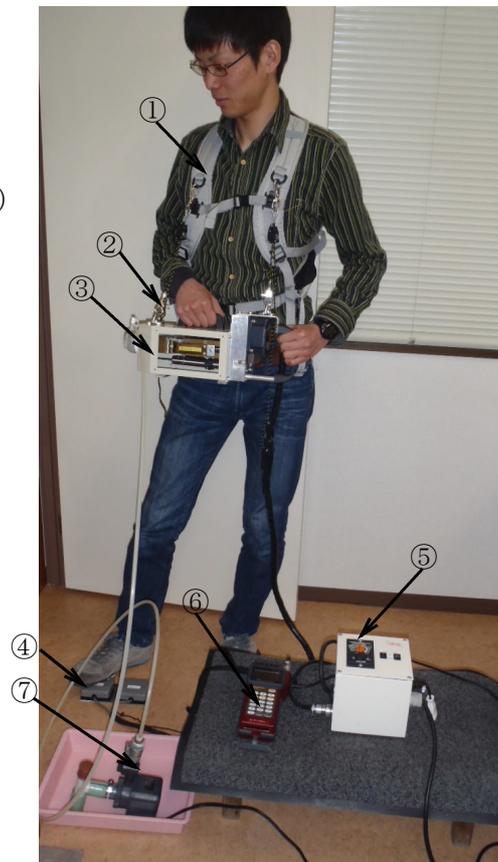
2)・3) 通常は計測者が回転スイッチと吸水スイッチおよび変位計の操作を行う。場合によって削孔者が回転スイッチと吸水スイッチを操作する時には、フットスイッチにて行う。



システム系統イメージ図

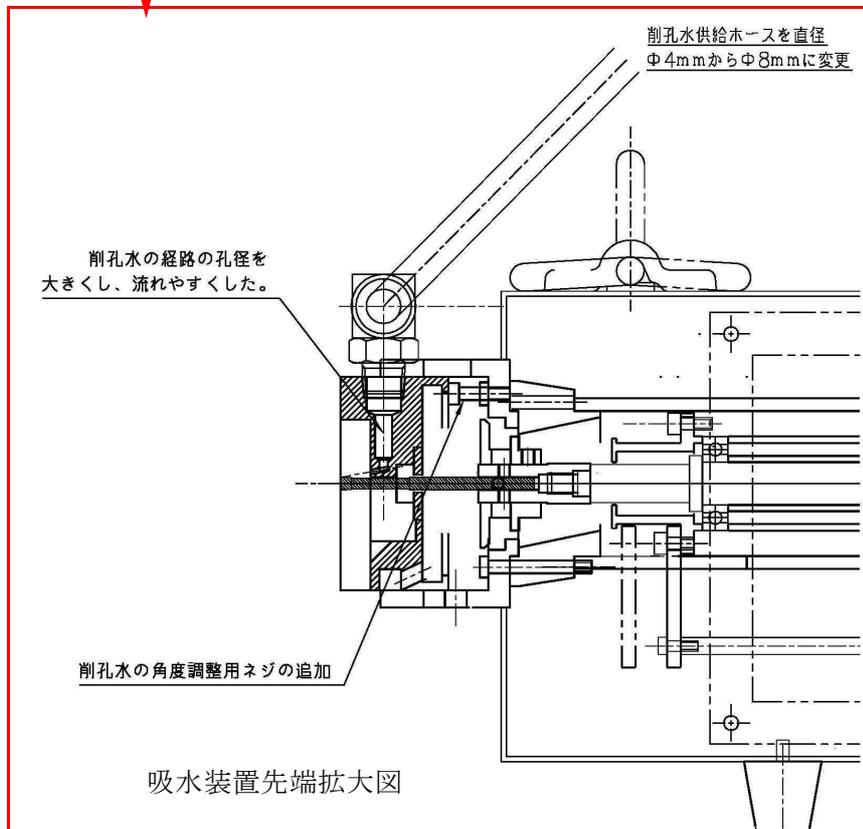
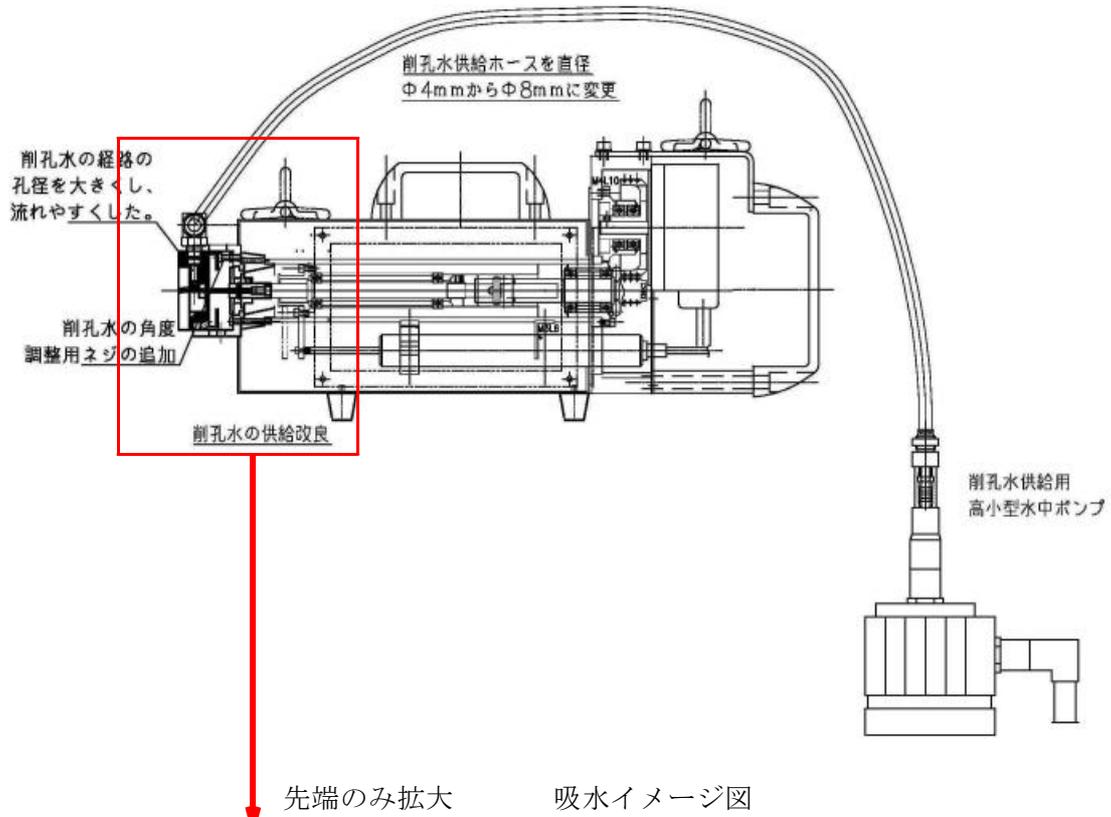
現場作業時のシステム全体を右写真に示す。

- ここで
- ①肩掛け用治具
 - ②吊下げ用治具 (長さ調整装置付)
 - ③削孔試験機
 - ④フットスイッチ
 - ⑤コントロールボックス
 - ⑥変位計
 - ⑦揚水ポンプ



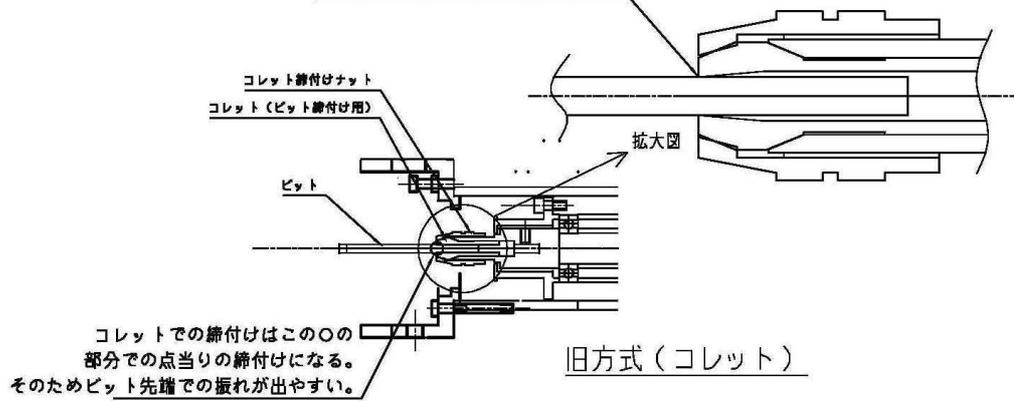
機器全体写真

- 4) 削孔水の吐出口を機器と一体化するとともに吐出水圧を容器内の水面の高さによる水圧で制御するのではなく、吸水ポンプの圧力で行う。

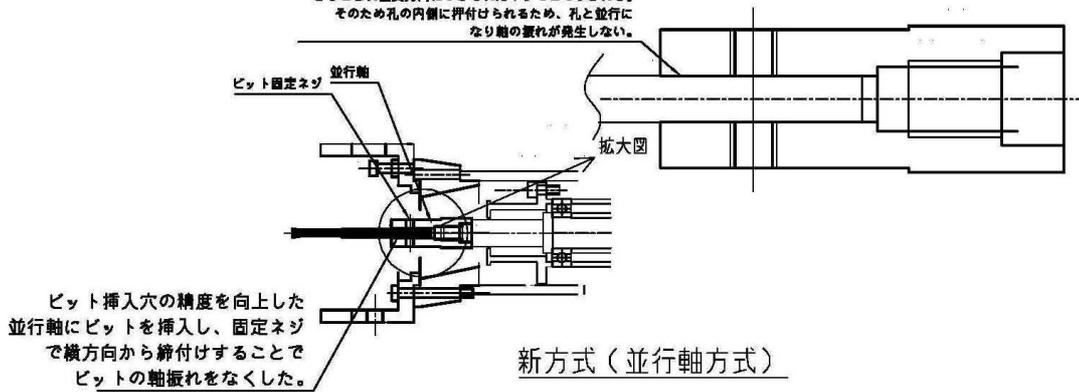


5) 試験機の構造をビットの軸が芯ぶれしないようにした。

コレットの先端を変形させてビットを固定するため、
先端のみが当る構造のためビットが傾くことがあり、
そのためビットの先端で振れが大きくなる。



ビットはビットの外径よりわずかに大きくつくられた孔に
さしこまれ直交方向につけられたネジでこてうされる。
そのため孔の内側に押付けられるため、孔と並行に
なり軸の振れが発生しない。



軸の芯振れ解消

6) 3・4号機システム全体写真・試験機製作図および先端部最終改良予定図

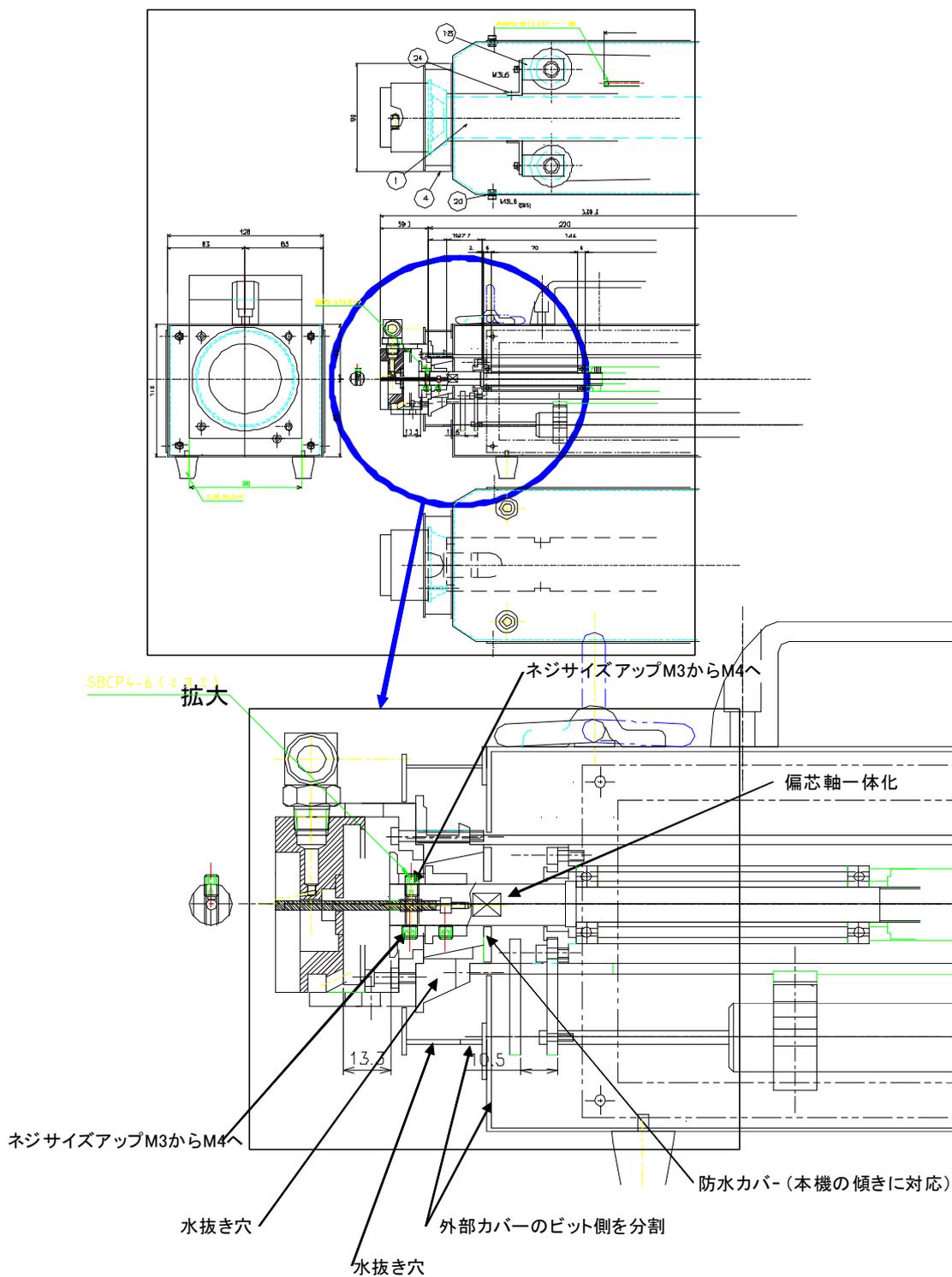


3・4号機全体写真（正面から）



3・4号機全体写真
（斜め前から）

先端部最終改良予定図



3. 部分の改良

3.1 ビット毎の切れ味個体差の低減

同種ビットで同一強度の非削孔体を削孔した場合、ビット毎で削孔速度が違うという不具合に対して、ビットを改良していくことにより、不具合を修正していった。

以下にて、改良過程である、各ビットの比較実験について述べる。

3.1.1 ビット先端の地金の平滑性の向上

(1回のロットの本数の違いによる切れ味のばらつき低減)

同種ビットで同一強度の非削孔体を削孔した場合、ビット毎で削孔速度(切れ味)が違った。削孔試験を行っていく中で、購入時に大量に購入した場合に削孔速度(切れ味)の違いが大きいように思われた。そこで大量(150本)購入した場合と少量(10本)購入した場合の削孔速度を比較した。以下に実験の詳細について述べる。

1) 試験方法

小径ドリル削孔試験装置を用いて供試体を削孔し、削孔速度により深さ方向の強度分布を推定した。下表に試験機の条件を示す。供試体は40×40×80(mm)のセメントペーストで配合は水セメント比90%のものを使用した。使用するビットは150本まとめて購入した時のビット(以下、山田ビットと言う)と10本しか購入しなかった時のビット(以下、本多再現ビットと言う)の2本を使用した。山田ビット、本多再現ビット共無作為に抽出した3本のビットを使って削孔試験を行った。各ビット毎に3回の削孔を行い、各々1秒毎のビット先端位置を削孔深さとして測定した。最大削孔深さは8(mm)とした。削孔時には、先端ビットの磨耗抑制および削粉排出を目的として、ビット先端部に水滴(水道水に下記HCBを5%入れたもの)を垂らしながら湿式の測定を行なった。

表 試験機の条件

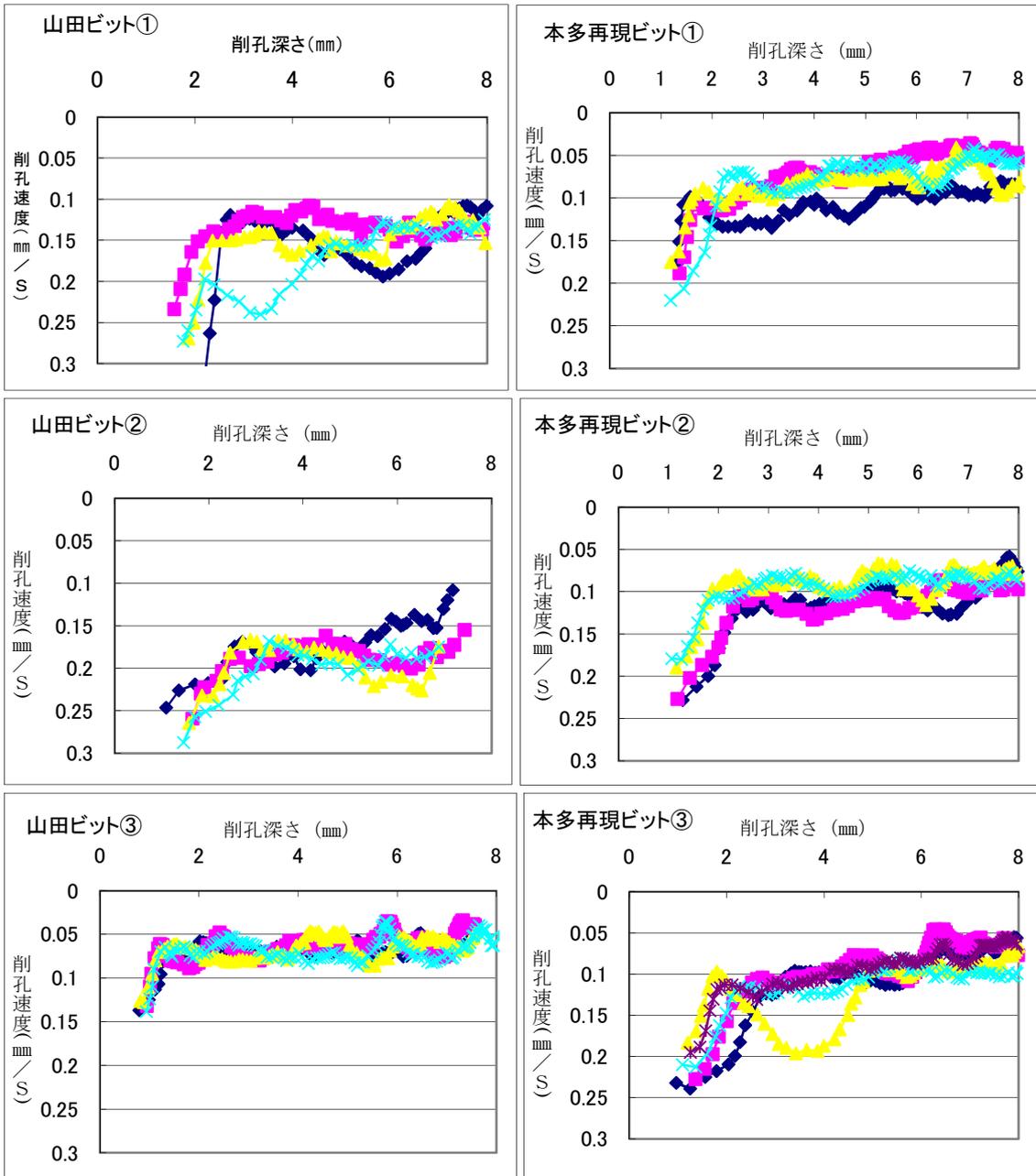
試験装置	2号機
バネ強さ	13.02-0.05 α [N]*
ビット径	3[mm]
回転数	4000[rpm]
削孔水	HCB**
同上自然落下水量	52[g/min]

*: α = 削孔深さ(mm)

** : HCB = フローリック高性能AE減水剤SF500H
CB(ポリカルボン酸系)5%溶液

2) 試験結果

以下試験結果を示す。X軸は削孔深さ (mm)、Y軸は削孔速度 (mm/秒) を示す。



3) 考察

以下に、この実験結果について考察を述べる。

山田ビット・本多再現ビット各種3本毎の削孔速度を比較してみると、山田ビットに比べて本多再現ビットはビット毎の削孔速度の差が小さかった。原因として考えられるのは、一般的に電解によってビット先端にダイヤモンドを固定する場合、メッキ天端は中央が低く、周辺部が高くなる。大量のビットを同一ロットで製造した場合、端子の近くのビット

には付着するメッキ量が多くなり、端子から離れると少なくなる傾向がある。したがって同時に多くの量を造る方がメッキ量の差が多くなり、この高低差が大きくなると思われる。この高低差が大きい事が削孔速度のバラツキとなって表れているものと思われる。したがって一度に大量のビットを製造するのでは無く、1ロットで10本くらいの製造とすれば、メッキ量の差が少なく、ビット毎の切れ味差がなくなるものと考えられる。

また以下の問題点も挙げられる。

本多再現ビットにおいても、山田ビットほどビット毎の削孔速度に差はないものの、ビット毎に削孔速度の差が見られた。この問題点の改良を次項に述べる。

3.1.2 ビット先端の地金の平滑性の向上（少数発注ロット内の切れ味のばらつき低減）

少量発注ロットの同種ビットで同一強度の非削孔体を削孔した場合にビット毎で削孔速度（切れ味）が違った。前項で述べたように、少量（10本）発注したビットでもビット先端の地金は中央部がへこんでおり、外周部が飛び出している。この凸凹は、電解で砥粒を取り付ける場合は避けられない現象である。この凸凹が切れ味に影響している可能性が高い。したがって地金表面がフラットに仕上がる非電解法で砥粒を付着させる事とした。以降、非電解法で砥粒を付着させたビットを森ビットと呼ぶ。

以下、今までの電着ビット（本多再現ビット）と新しい非電解（森ビット）の切れ味の個体差を検証した。

1) 試験方法

小径ドリル削孔試験装置を用いて供試体を削孔し、削孔速度により深さ方向の強度分布を推定した。下表に試験機の条件を示す。供試体は40×40×80（mm）のセメントペーस्टで、配合は水セメント比90%のものを使用した。使用するビットは電解メッキビット（本多再現ビット）と非電解メッキビット（森55ビット：埋め込みの深さが、ダイヤモンド砥粒の直径の55%である）の2種類について各3本ずつ使用した。

削孔時には先端ビットの磨耗抑制および削粉排出を目的として、ビット先端部に水滴（水道水に下記HCBを5%入れたもの）を垂らしながら湿式の測定を行なった。

表 試験機の条件

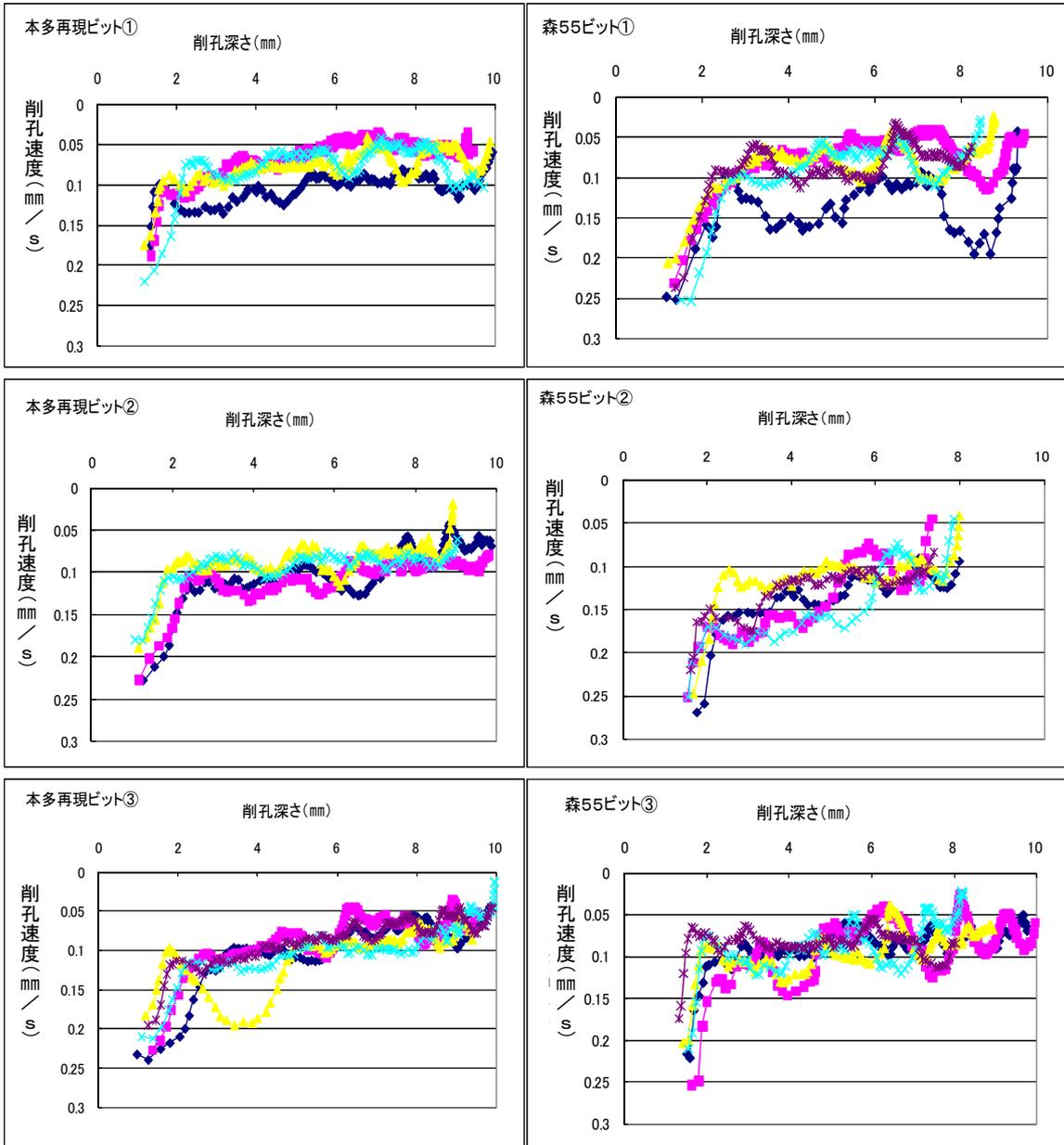
試験装置	2号機
バネ強さ	13.02-0.05 α [N]*
ビット径	3[mm]
回転数	4000[rpm]
削孔水	HCB**
同上自然落下水量	52[g/min]

*: α = 削孔深さ(mm)

** : HCB = フローリック高性能AE減水剤SF500H
CB (ポリカルボン酸系) 5%溶液

2) 試験結果

以下、試験結果を示す。X軸は削孔深さ (mm)、Y軸は削孔速度 (mm/秒) を示す。



3) 考察

以下に、この実験結果について考察を述べる。

電解ビット (森再現ビット) でも非電解メッキビット (森ビット) でもビット毎の削孔速度の差はまだ見られ大きな違いは無い。しかし、やや電解ビット (森再現ビット) の削孔速度が遅い (削孔速度が 0.05 mm/s まで下がっている)。したがって、ビットは非電解に変えたもので、さらに切れ味の個体差を無くす必要がある。

次項では、これに引き続いて、砥粒の歯の高さおよび高さの一定化が切れ味の個体差を無くす要因になりうるかを検証する。

3.1.3 ダイヤモンド砥粒突出高さの決定

前項で述べたように、地金表面がフラットに仕上がる非電解法で砥粒を付着させたビットについて、砥粒の歯の高さおよび高さの一定化が切れ味の個体差を無くす要因になりうるかを検証した。歯の高さは砥粒の埋め込み深さで管理する。

この砥粒の埋め込み深さが深ければ逆に歯の高さが低くなり、埋め込み深さが浅ければ歯の高さは高くなる。すなわち前者より後者の方が切れ味が良い（削孔速度が速い）。したがって今回以降は埋め込み深さを指定してビットを製造することとした。

ここで埋め込み深さが浅すぎれば砥粒がすぐ取れてしまい、埋め込み深さが深すぎれば切れ味が悪くなる。この埋め込み深さはこれまでの経験から、砥粒の55%と65%としたビットを使用した。

1) 試験方法

小径ドリル削孔試験装置を用いて供試体を削孔し、削孔速度により深さ方向の強度分布を推定した。下表に試験機の条件を示す。供試体は40×40×80 (mm) のセメントペーストで配合は水セメント比90%のものを使用した。

使用するビットは非電解メッキとし、砥粒のメッキ内への埋め込み深さが粒径の55%のビット（森55ビット）と埋め込み深さが粒径の65%のビット（森65ビット）およびコントロール用として小ロットの電解ビット（本多再現ビット）の3種類について各3本ずつ使用した。

削孔時には、先端ビットの磨耗抑制および削粉排出を目的としてビット先端部に水滴（水道水に下記HCBを5%入れたもの）を垂らしながら湿式の測定を行なった。

表 試験機の条件

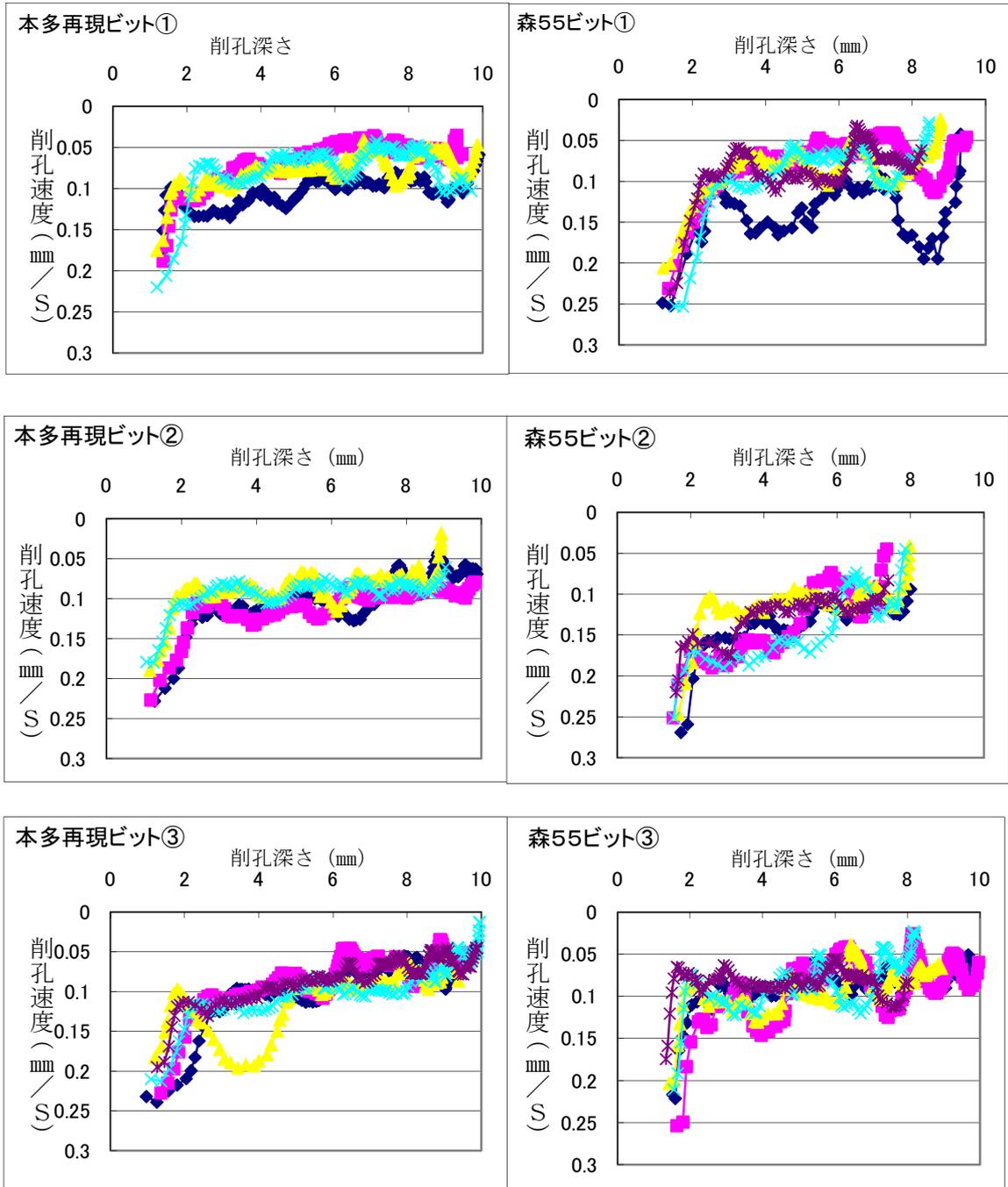
試験装置	2号機
バネ強さ	13.02-0.05 α [N]*
ビット径	3[mm]
回転数	4000[rpm]
削孔水	HCB**
同上自然落下水量	52[g/min]

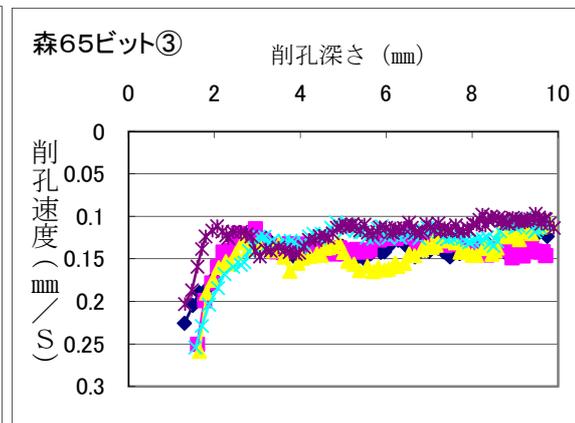
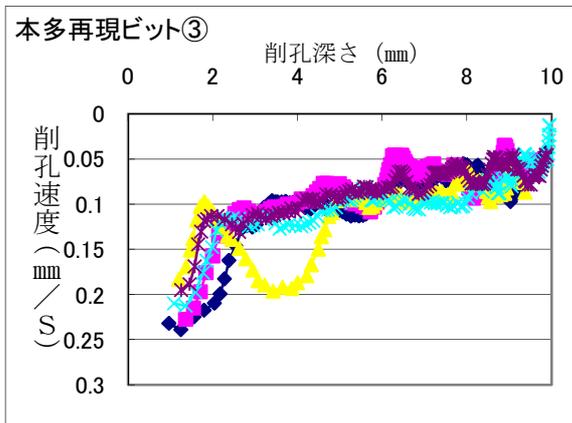
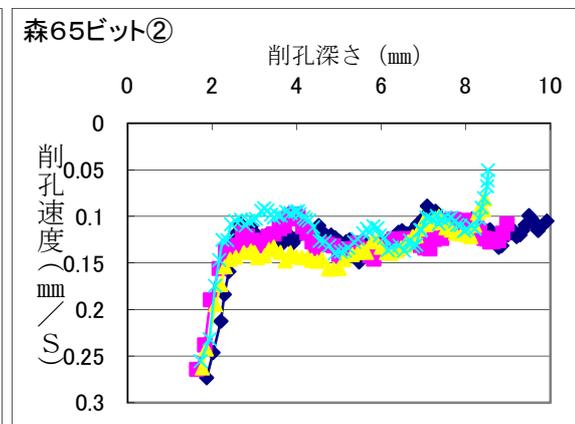
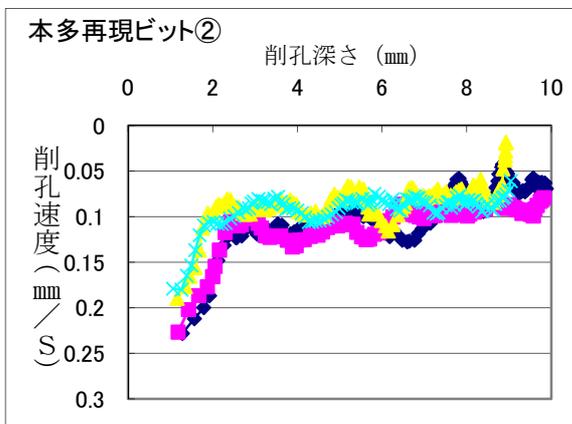
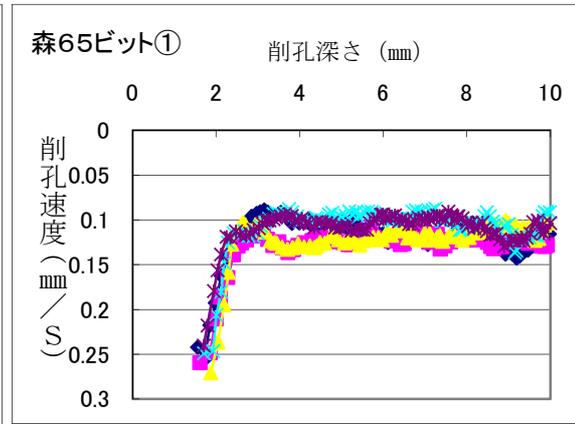
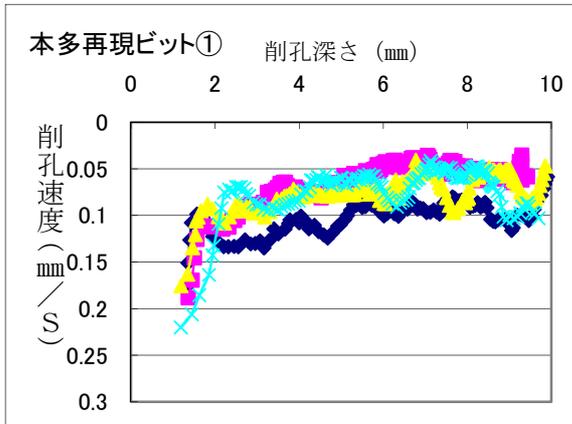
*: α = 削孔深さ(mm)

** : HCB = フローリック高性能AE減水剤SF500H
CB (ポリカルボン酸系) 5%溶液

2) 試験結果

以下、試験結果を示す。X軸は削孔深さ (mm)、Y軸は削孔速度 (mm/秒) を示す。



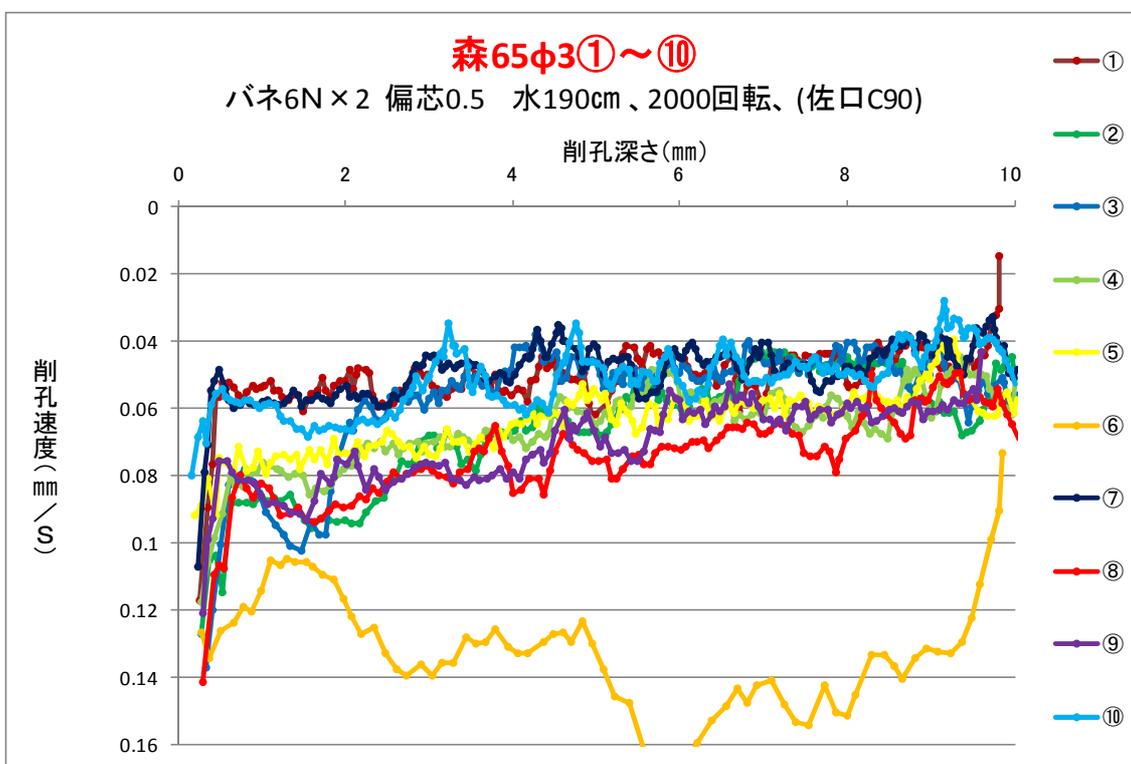
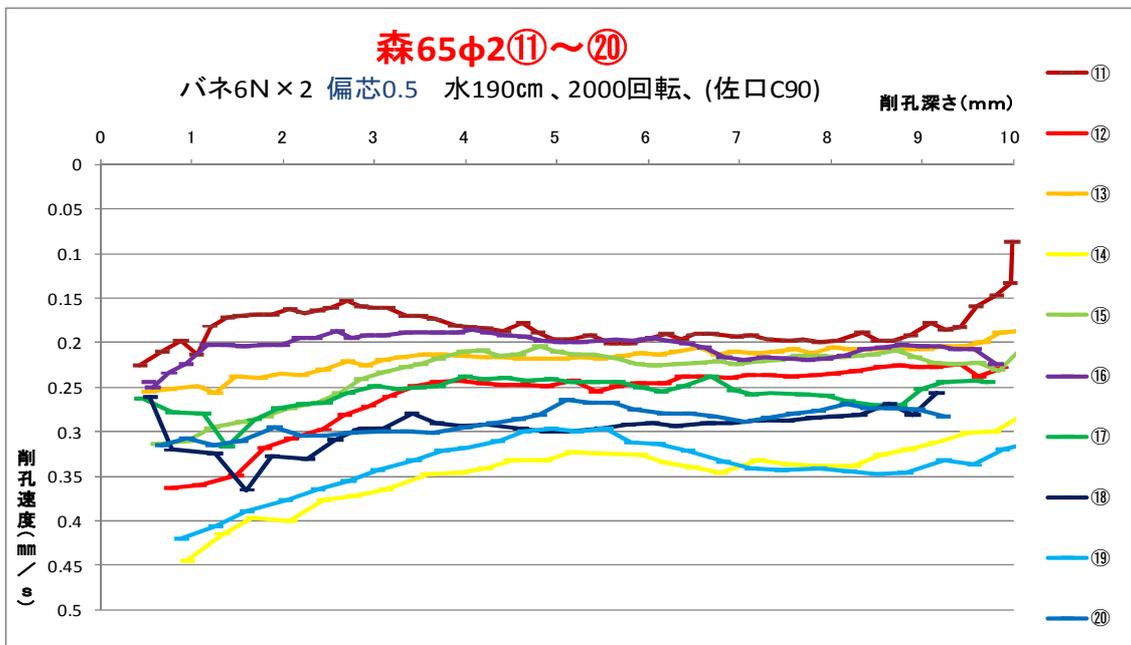


3) 考察

実験から、森非電解65ビット（ダイヤモンド砥粒の埋め込み深さが砥粒の直径の65%）は、普通品及び森非電解55に比べてビット毎の削孔速度の差が少なく安定していたことがわかった。

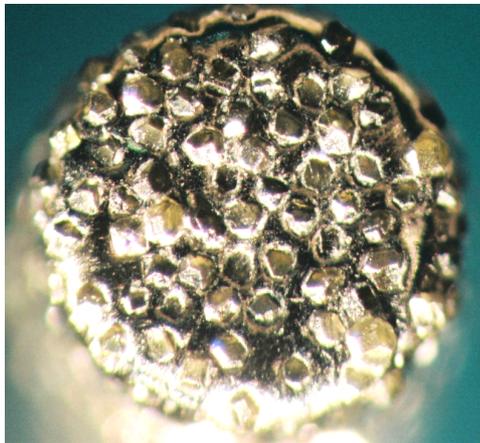
3.1.3 ダイヤモンド砥粒数の一定化

今まででビット切れ味の個体差がいちばん少ない森非電解65ビットでの削孔を行っている中でまだビット切れ味の個体差があった。以下、φ2とφ3のビット10本の削孔試験結果を示す。

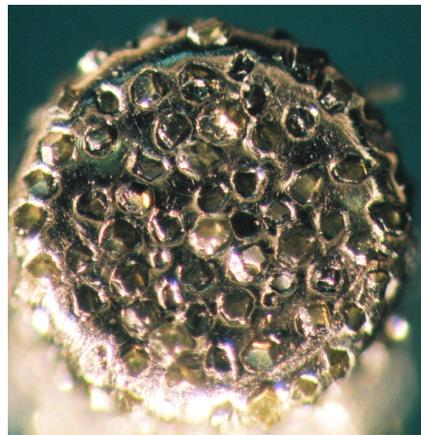


これによれば、φ 2の方が切れ味の個体差が多かった。

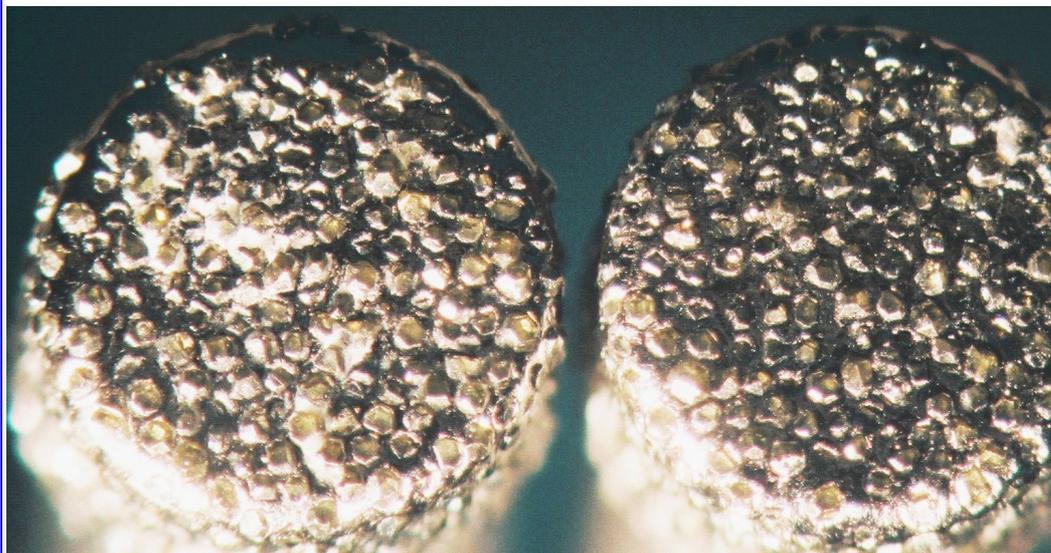
ここでφ 2とφ 3の削孔速度が速いものと遅いもののビット先端の拡大写真を示す。



φ 2⑭早いビット: 砥粒均一(埋め込み均一?)
砥粒の数も多い



φ 2①遅いビット 砥粒に大小がある(埋め込み不均一?)
砥粒の数も少ない(地金が多く見えている)



φ 3⑥早い 砥粒はぎっしりつまっており地は見えない
上写真で砥粒が黒いのは低い、黄色いのは突出している。

φ 3⑦遅い 砥粒の突出部分は少ない。

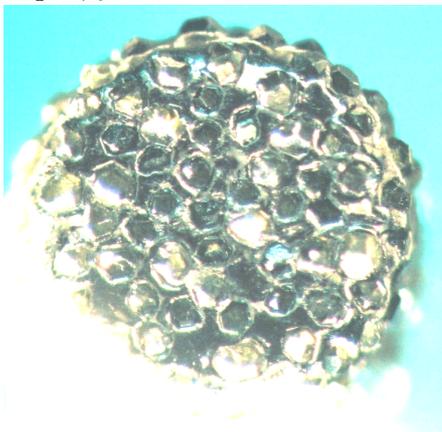
写真のようにビット先端の砥粒がびっしり付着し地金が見えないようになっており、飛び出た砥粒も多いビットは削孔速度が速く、砥粒の隙間で地金が見えるような分散した砥粒付着状況のものは削孔速度が遅い。

これの対処方法として、ダイヤモンド砥粒が天端に目一杯付着している場合には砥粒数が一定に近くなると仮定し、ダイヤモンド砥粒を目いっぱい付着させることとした。すな

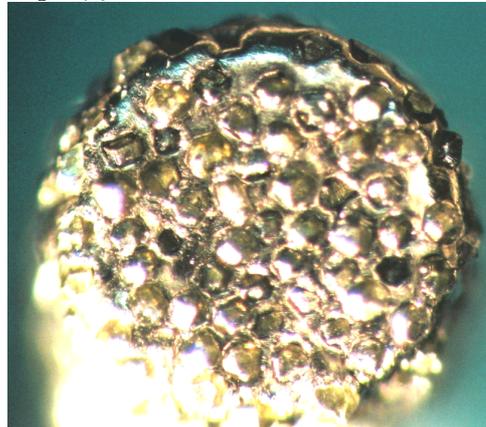
わち電着時間を延ばすこととした。(保持時間・100%・125%・150%)とした。
次にφ2ビットの保持時間・100%・125%・150%のビット天端の写真を示す。

■φ2 150%

φ2② 砥粒少?

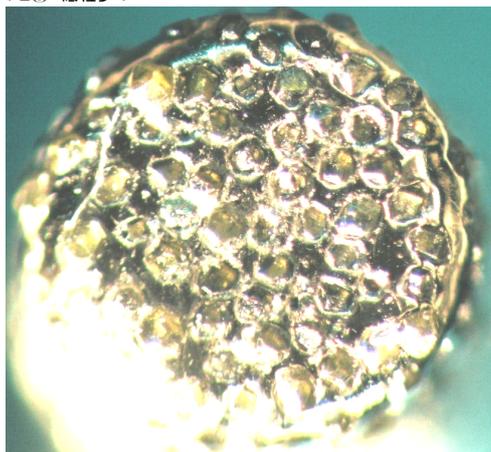


φ2⑧ 砥粒多?

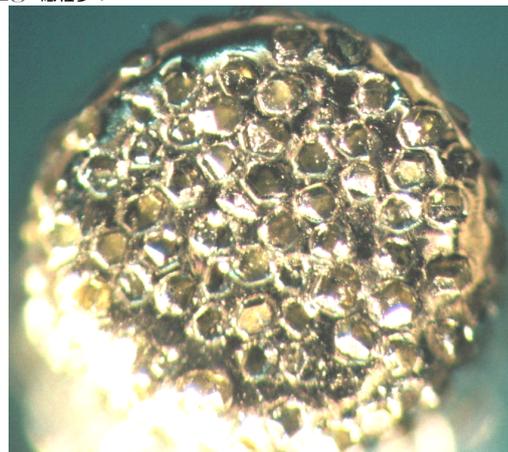


■φ2 125%

φ2③ 砥粒少?

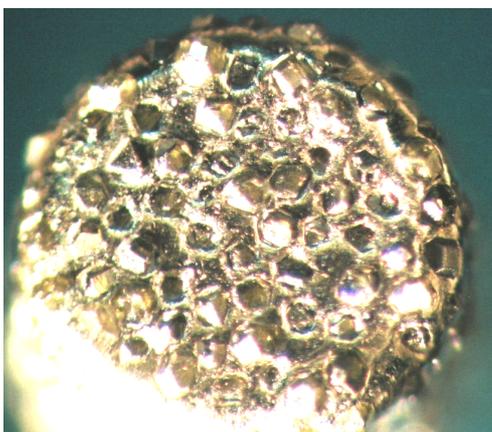


φ2① 砥粒多?

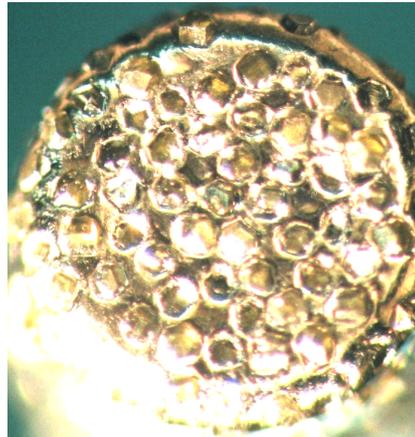


■φ2 100%

φ2⑦ やや遅い



φ2⑬ やや速い



1) 試験方法

小径ドリル削孔試験装置を用いて供試体を削孔し、削孔速度により深さ方向の強度分布を推定した。下表に試験機の条件を示す。供試体は 40×40×80 (mm) のセメントペーストで、配合は水セメント比 90% のものを使用した。使用するビットは非電解メッキとし、砥粒のメッキ内への埋め込み深さが粒径の 65% のビット (森 65 ビット) とした。試験機は 3 号機で回転数を 2000 に固定し、下記のビットの比較を行った。なビットの先端は $\Phi 2\text{mm}$ であり、削孔条件は偏芯 0.5mm、バネ 6N×2、水圧 150cm である。

○非電解メッキの保持時間 100% ※・・・森非電解 65 ビット (100%)

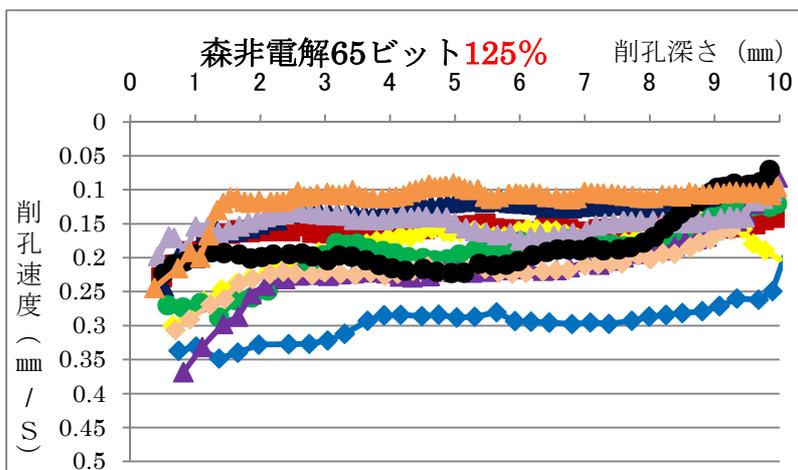
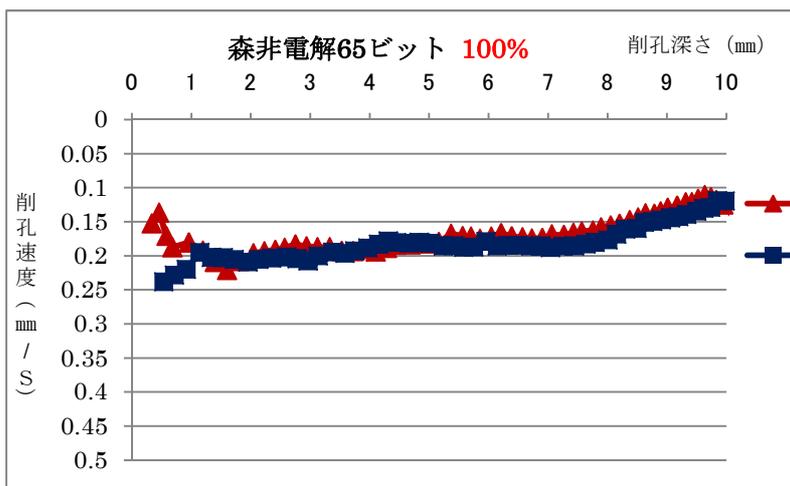
※ (これまでの保持時間と同様)

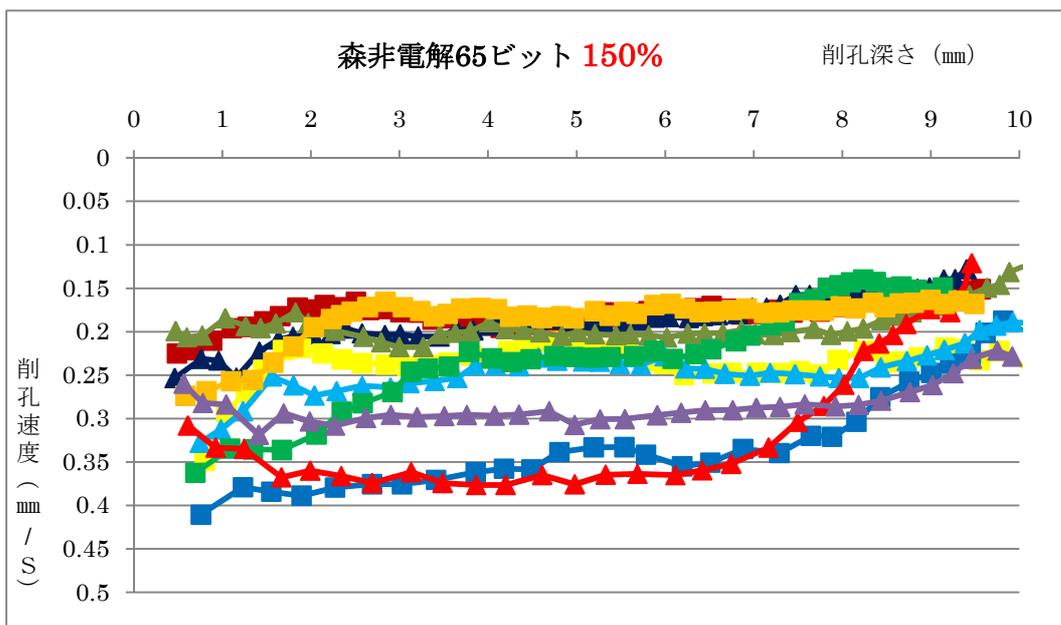
○非電解メッキの保持時間 125%・・・森非電解 65 ビット (125%)

○非電解メッキの保持時間 150%・・・森非電解 65 ビット (150%)

2) 試験結果

以下、試験結果を示す。X軸は削孔深さ (mm)、Y軸は削孔速度 (mm/秒) を示す。





3) 考察

これらのビットでは、非電解メッキ保持時間 100%→125%→150%の順でビットの削孔速度が上がったことがわかった。また、ビットの天端を顕微鏡で見ると、非電解150%ビットは、他のビットに比べてダイヤモンドの砥粒が多く付着しているように見える。ビット毎の速度に注目すると、非電解150%ビットは、10本のうち異様に速い3本をのぞき削孔速度は類似していた。

3.2 削孔深さによる削孔速度低下の解消

削孔深さが深くなった場合に、深くなるほど削孔速度が低下する特性がある

これは、削孔時に発生する切り粉が孔内から排出されず残っている事が原因と推察される。ここでビットと削孔された孔の隙間が大きい方が切り粉の排出に有利となるのは明らかである。したがってビット径より大きな径の孔を開けることとした。

それには、ビット先端を偏芯させる必要がある。以下にその方法を列挙する。

- ビット取り付け時のビットの傾き調整によるビット先端の偏芯
- ビット取り付け用コレットの穴の位置偏芯によるビット先端の偏芯
- ビット取り付け方法の変更と新取り付け治具の偏芯によるビット先端の偏芯

以下、各々の方法で削孔試験を行った結果を述べる。

3.2.1 ビット取り付け時のビットの傾き調整によるビット先端の偏芯

ビットを取り付ける時、できるだけ斜めに取り付け、その結果、削孔孔が大きくなるようにして削孔を行った。

1) 試験方法

小径ドリル削孔試験装置を用いて供試体を削孔し、削孔速度により深さ方向の強度分布を推定した。下表に試験機の条件を示す。供試体は、この偏芯による削孔速度の安定方法が強度に関係無く可能であることを確認するために 40×40×80 (mm) の寸法で、配合は水セメント比60%と90%のセメントペーストを使用した。使用するビットは、砥粒の埋め込み深さが粒径の65%のビット（森65ビット）のφ2.95とした。

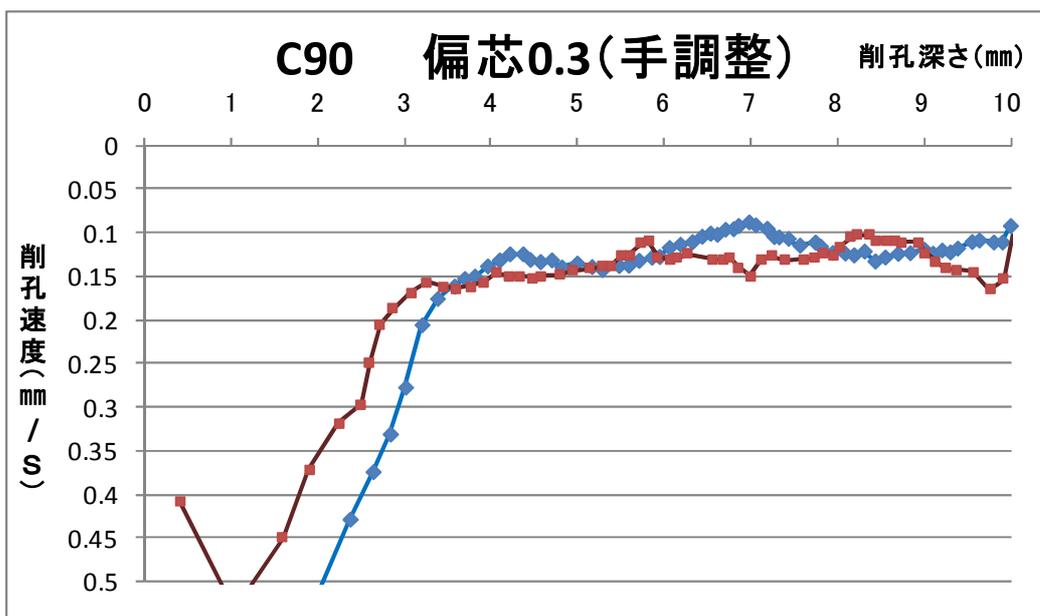
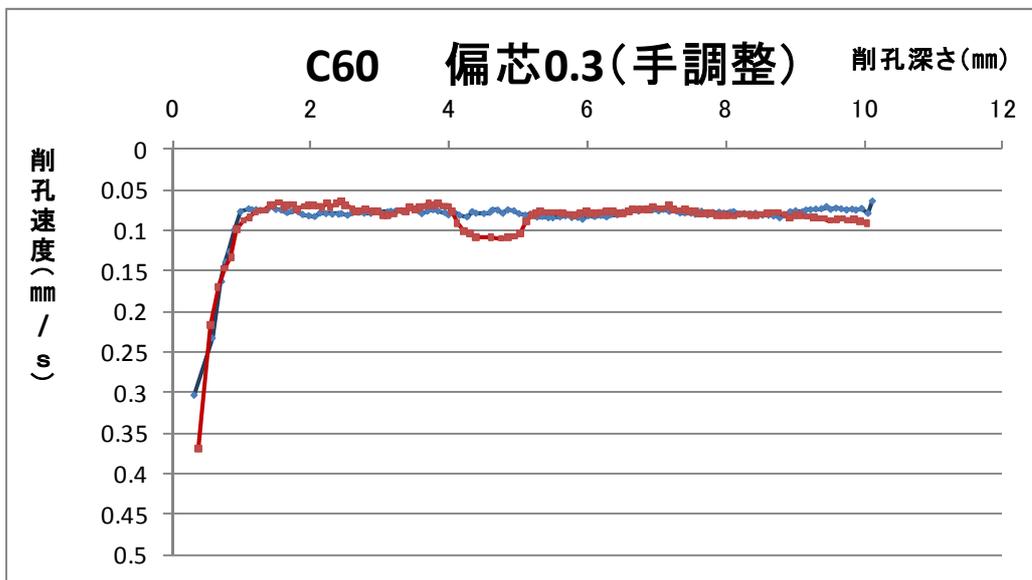
ここで3号機はポンプにより加圧吐出しているため、吐出口での水圧を示した。また、偏芯した場合の削孔水は、偏芯しない場合に使用した高性能AE減水剤を使わず水道水で行った。その他、試験条件は以下とした。

試験装置	3号機
バネ強さ	9.8[N]×2本
ビット径	2.95[mm]
ビット偏芯	0.3目標
回転数	4000[rpm]
削孔水	水道水
同上水圧:水平到達距離* (吐出水量)	110[cm]

*: φ1のパイプ先端から水平吐出させた水がパイプ高さより90cm下がった時の水平距離

2) 試験結果

以下、試験結果を示す。X軸は削孔深さ (mm)、Y軸は削孔速度 (mm/秒) を示す。

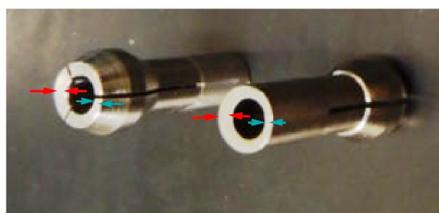


3) 考察

この結果からすれば、水セメント比40%も60%も、ビット偏芯が0.3mmあれば削孔深さが深くなっても削孔速度は変わらなかった。しかし、ビット取り付け時にビットを斜めに取り付ける方法では、いつも同じ偏芯が得られないため、機械の方で偏芯を発生させる方法が必要と思われる。

3.2.2 ビット取り付け用コレットの穴の位置偏芯によるビット先端の偏芯

削孔時にビット先端を偏芯させて削孔穴をビット径より大きくし、水が先端に多く回るようにし、切り粉が排出し易くした。偏芯させる方法として下記のようにコレットが偏芯したものを作成した。以下に 0.35 mm偏芯させたコレットの写真を示す。赤い→部分が肉厚部分を示し、青い→部分が肉薄部分を示す。



0.35 偏芯コレット写真

作成した偏芯コレットは0.1 mm偏芯、0.15 mm偏芯、0.2 mm偏芯、0.25 mm偏芯、0.3 mm偏芯、0.35 mm偏芯の6種類である。

1) 試験方法

小径ドリル削孔試験装置を用いて供試体を削孔し、削孔速度により深さ方向の強度分布を推定した。下表に試験機の条件を示す。供試体は 40×40×80 (mm) のセメントペー
ストで、配合は水セメント比60%のものを使用した。使用するビットは、砥粒の埋め
込み深さが粒径の65%のビット（森65ビット）のφ2.95とした。

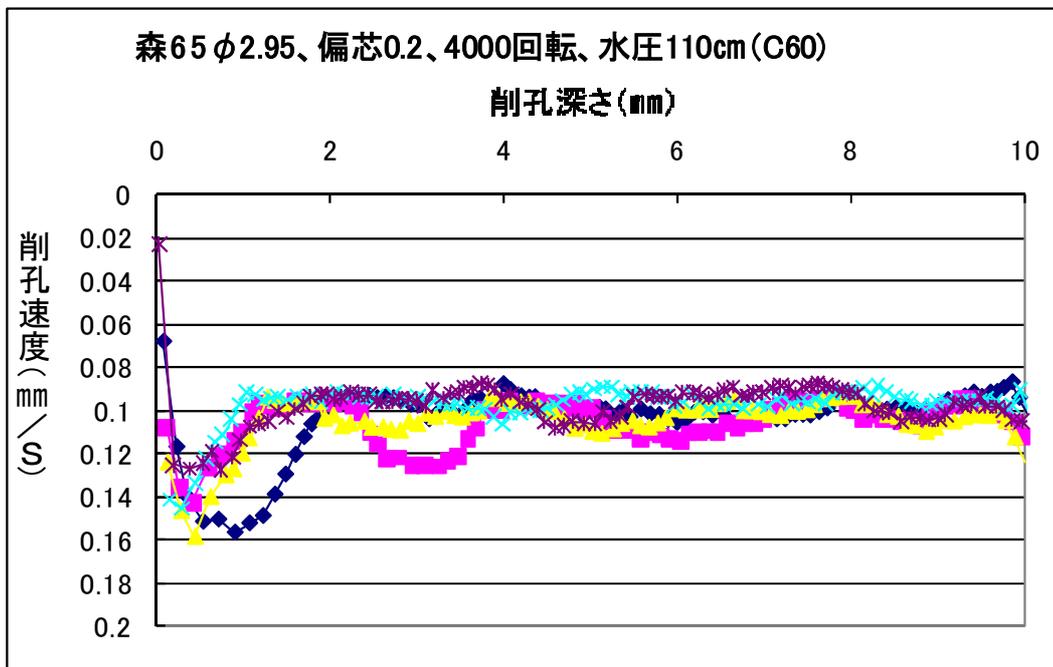
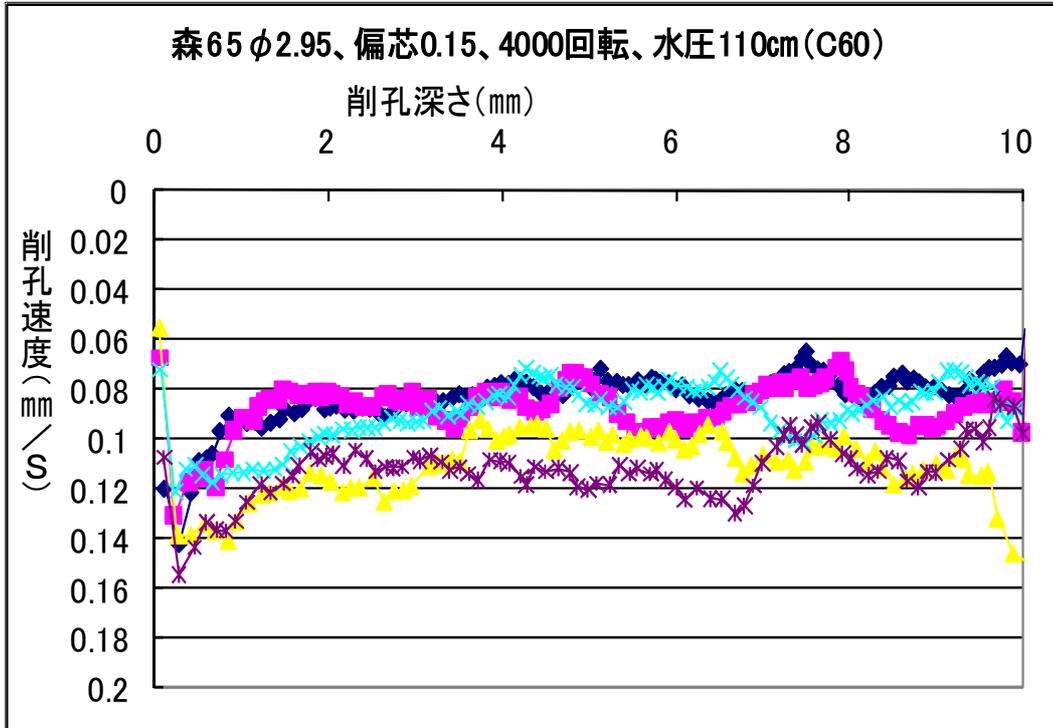
ここで、3号機はポンプにより加圧吐出しているため、吐出口での水圧を示した。また、偏芯した場合の削孔水は、偏芯しない場合に使用した高性能AE減水剤を使わず水道水で行った。その他、試験条件は以下とした。

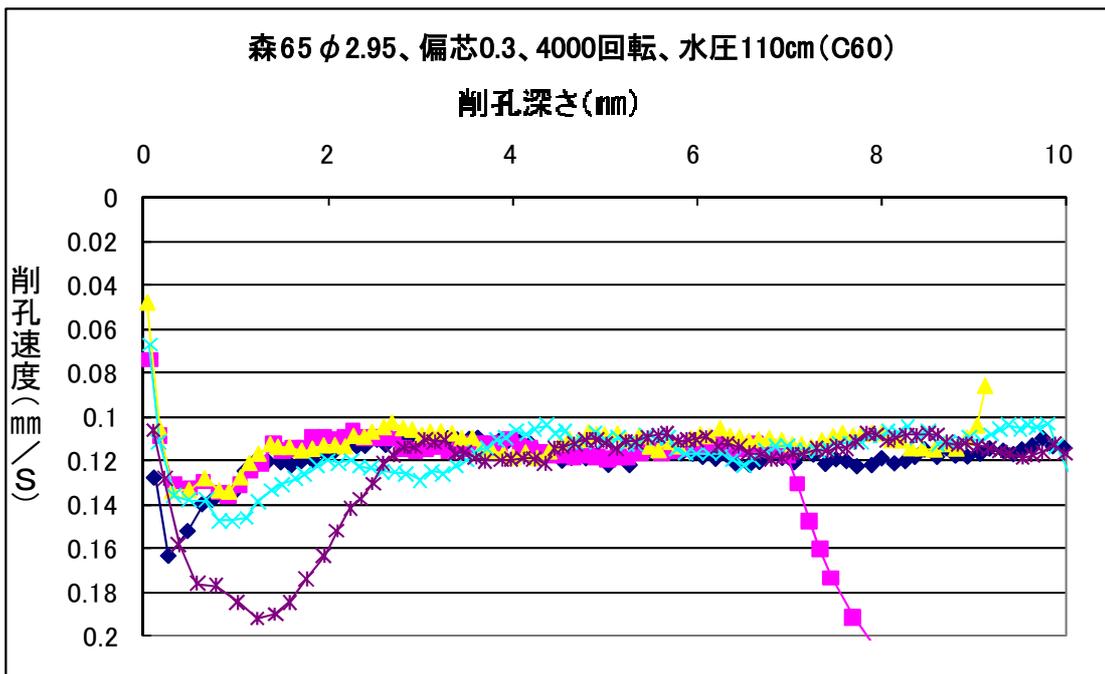
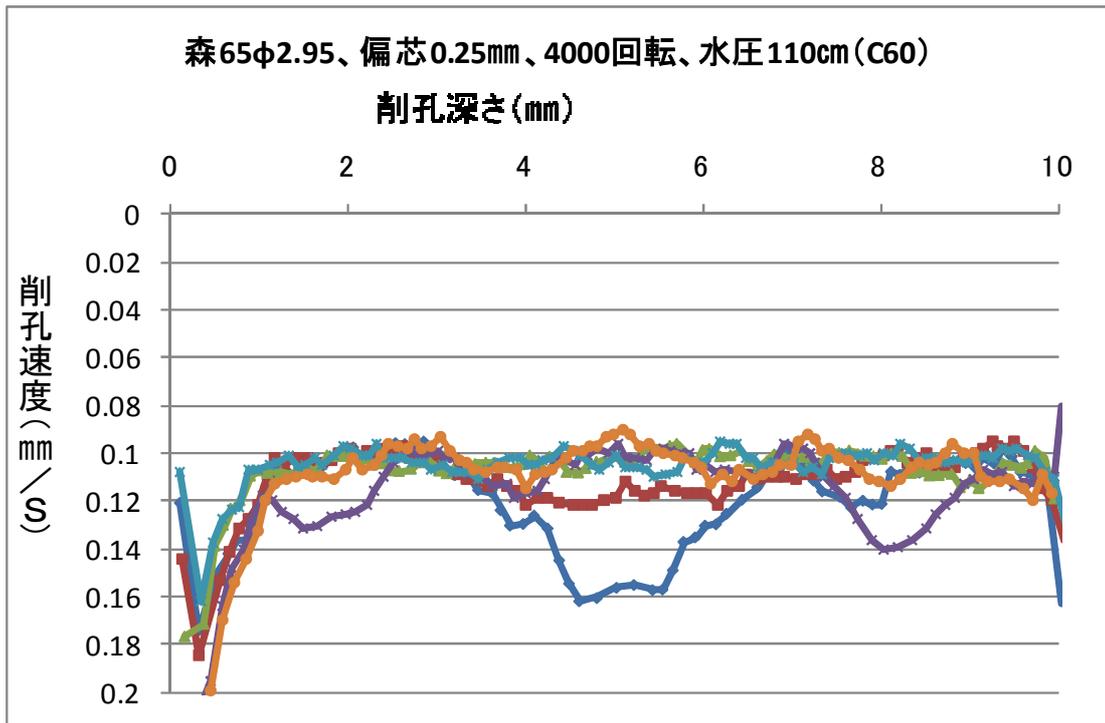
試験装置	3号機
バネ強さ	9.8[N]×2本
ビット径	2.95[mm]
ビット偏芯	0.15,0.2,0.25,0.3,0.35[mm]
回転数	4000[rpm]
削孔水	水道水
同上水圧:水平到達距離* (吐出水量)	110[cm]

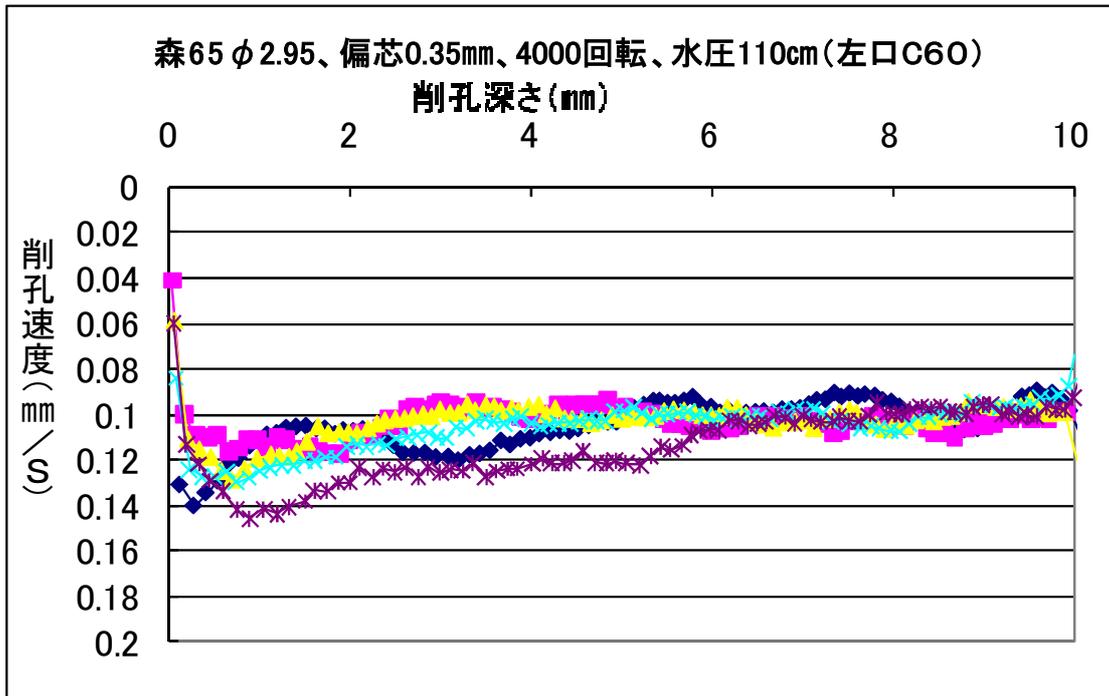
*: φ1のパイプ先端から水平吐出させた水がパイプ
高さより90cm下がった時の水平距離

2) 試験結果

以下、試験結果を示す。X軸は削孔深さ (mm)、Y軸は削孔速度 (mm/秒) を示す。







3) 考察

実験した結果の概要は、以下のとおりである。

偏芯 0.15 mmは、削孔深さが深いほど速度が低下し、逆に偏芯 0.35 mmになると全体の速度やや低下傾向になる。偏芯 0.2 mm・0.25 mm・0.3 mmの平均速度には前後1割の差があった。以上から、偏芯 0.2~0.3 mmは、速度が安定しており、本案件は適当と思われる。

しかし、このコレットによる偏芯は偏芯の再現率が一定ではなかった。これは、コレットをナットで固定する時にナットとコレットの接触面が1箇所であり、取り付けるたびにコレットが同じ状態（軸に対する角度）で固定されないためである。以下に、コレットの偏芯別に削孔径から推定する実際の偏芯を測定した結果を示す。

偏芯 0.2 mmのコレットを使用した場合、実際の孔の大きさは0.4 mm大きくなるはずが下表では0.52 mmになっている。逆に偏芯 0.3 mmのコレットを使用した場合、実際の孔の大きさは0.6 mm大きくなるはずが下表では0.54 mmになっている。すなわち 0.2 mmの偏芯コレットと 0.3 mmの偏芯コレットでは実際の孔の偏芯がほぼ同じになった。

偏芯による孔径の増加(偏芯寸法×2になることが望ましい)

偏芯寸法 回数	0.15	0.2	0.25	0.3	0.35
1回目	0.26	0.57	0.37	0.52	0.61
2回目	0.26	0.41	0.37	0.54	0.58
3回目	0.26	0.43	0.34	0.57	0.71
4回目	0.27	0.55	0.41	0.59	0.6
5回目	0.28	0.57	0.48	0.48	0.74
6回目	0.37	0.59	0.49	0.48	0.58
7回目	0.24	0.53	0.37	0.62	0.58
8回目	0.37	0.45	0.47	0.61	0.61
9回目	0.39	0.58	0.43	0.52	0.72
10回目	0.37	0.55	0.48	0.47	0.71
平均値	0.307	0.523	0.421	0.54	0.644
標準偏差	0.057	0.0636	0.0536	0.0525	0.063435
変動係数	18%	12%	13%	10%	10%
対目標率	1.023	1.3075	0.842	0.9	0.92

このように、偏芯すれば削孔深さが深くなっても削孔速度は変化しないが、コレットによる偏芯では、問題点として、偏芯の再現率が一定ではないことが挙げられた。

3.2.3 ビット取り付け方法の変更と芯取り付け治具の偏芯によるビット先端の偏芯

削孔時にビット先端を偏芯させて削孔穴をビット径より大きくし、水が先端に多く回るようにし、切り粉が排出し易くした。偏芯させる方法として偏芯再現率の悪いコレットでは無く、偏芯した取り付け治具を作成した。以下に、0.35 mm偏芯させた取り付け治具の写真を示す。赤い→部分が肉薄部分を示し、青い→部分が肉厚部分を示す。



偏芯ビット取り付け治具（偏芯 0.35 mm）写真

作成した偏芯取り付け治具は、0.2 mm偏芯、0.25 mm偏芯、0.3 mm偏芯、0.35 mm偏芯の4種類である。

1) 試験方法

小径ドリル削孔試験装置を用いて供試体を削孔し、削孔速度により深さ方向の強度分布を推定した。下表に試験機の条件を示す。供試体は、40×40×80 (mm) の寸法で配合は水セメント比60%のセメントペーストを使用した。

使用するビットは、砥粒の埋め込み深さが粒径の65%のビット（森65ビット）のφ2とした。

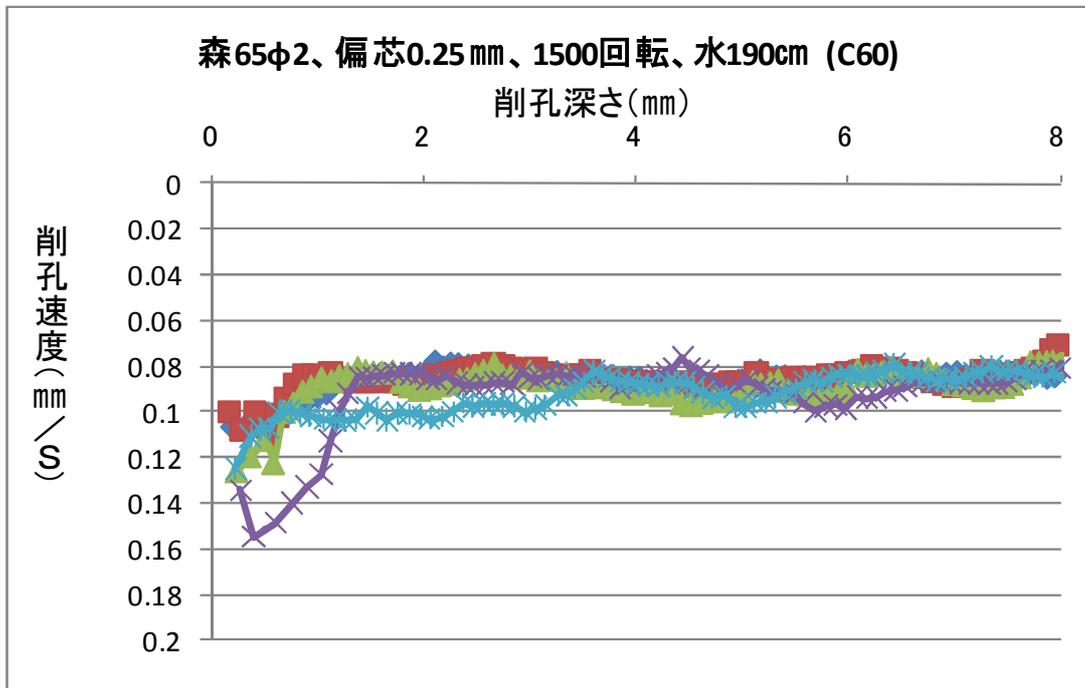
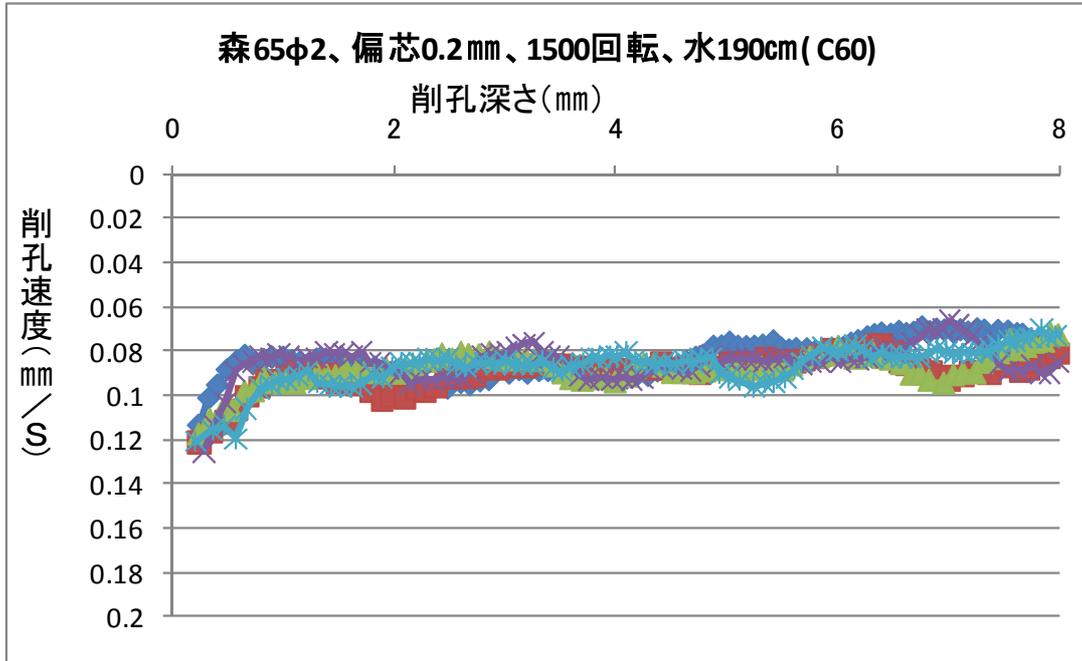
ここで、3号機はポンプにより加圧吐出しているため、吐出口での水圧を示した。また、偏芯した場合の削孔水は、偏芯しない場合に使用した高性能AE減水剤を使わず、水道水で行った。その他、試験条件は以下とした。

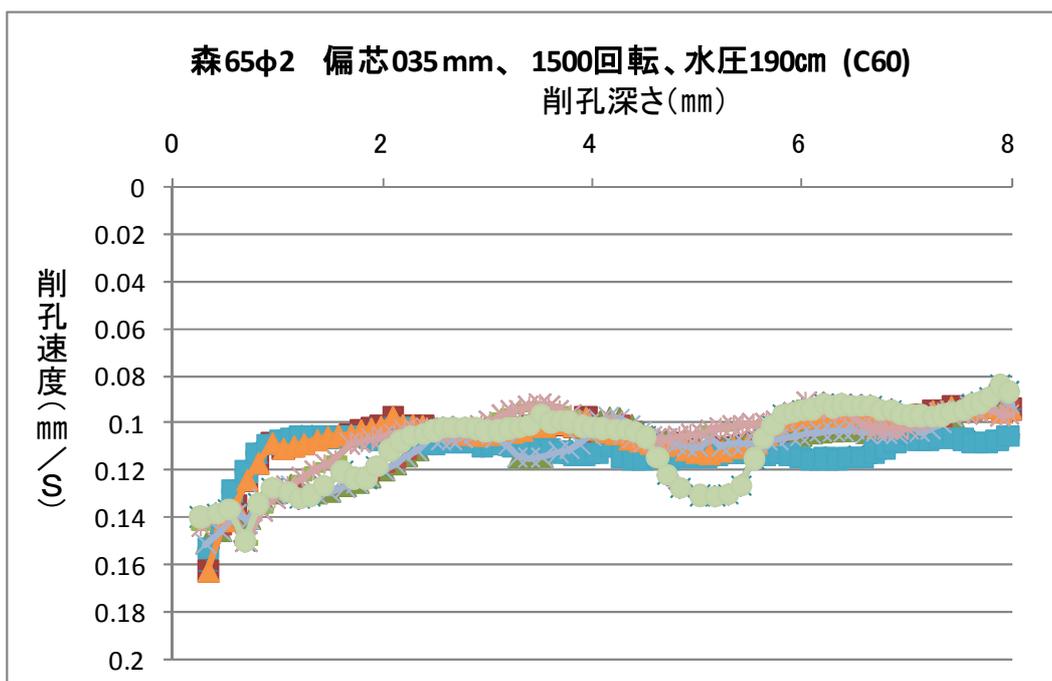
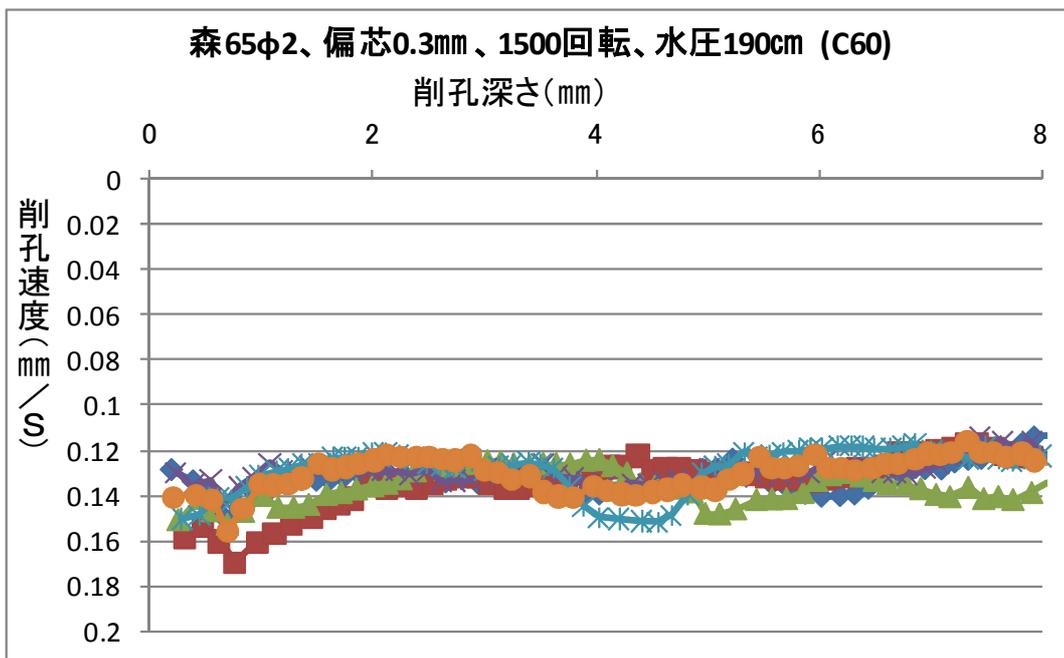
試験装置	3号機
バネ強さ	5.88[N]×2本
ビット径	2.[mm]
ビット偏芯	0.2,0.25,0.3,0.35
回転数	1500[rpm]
削孔水	水道水
同上水圧:水平到達距離* (吐出水量)	190[cm]

*: φ1のパイプ先端から水平吐させた水がパイプ高さより90cm下がった時の水平距離

2) 試験結果

以下、試験結果を示す。X軸は削孔深さ (mm)、Y軸は削孔速度 (mm/秒) を示す。





3) 考察

実験結果の概要を以下に述べる。

0.2 mm偏芯、0.25 mm偏芯、0.3 mm偏芯、0.35 mm偏芯のいずれの偏芯でも削孔深さによる削孔速度の低下はほぼ見られ無かった。

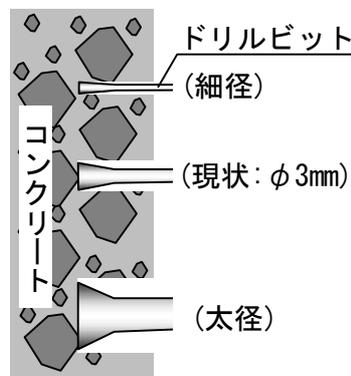
偏芯方式を変更したことにより予定する偏芯の再現率はやや改善され、この治具はねじ込み式で、治具と軸の接触する面が完全平行に加工されていないため、締め付け強さによって接触面が違い、そのためこの治具を取り付ける度に治具の取り付け角度が違い、予定していたビットの偏芯量が得られない場合が発生した。これを無くすためには軸と治具が一体になっている必要がある。

4. 使用方法の開発（モルタルの強度推定のための改良）

本章では、モルタルの強度推定を行うために使用するビットをφ2と仮定し（根拠等は後述する）その削孔条件を求め、モルタルの削孔試験を行った。この試験ではモルタルの削孔時に削孔速度が低下を引き起こす砂の粒径も確認した。

4.1 φ2用削孔条件の決定

単一構成材料（煉瓦や石）の削孔についてはφ3のビットを利用しているが偏芯を入れると3.6mm程度の孔を開けることになる。これでコンクリートやモルタルを削孔した場合、右図のように骨材にあたる率が多い、したがって、φ2のビットを使って少しでも骨材に当たらずに削孔する部分を多くすることとした。



その場合、ビット径が小さくなればなるほど、ビット間の切れ味の個体差がでて来るのでこの低減と、削孔速度が速くなるため、φ2mmに合わせた削孔時の条件を決める必要がある。

φ2の削孔に最適な削孔条件を求めるために、以下の項目について検証した。

- φ2に最適な偏芯量・水圧の選定
- φ2に最適な流水角度の選定
- φ2に最適なバネ力の選定

4.1.1 φ2に最適な偏芯量・水圧の選定

φ2のビットでモルタル等に対し最適な削孔を行うための偏芯量および水圧を求めた。

1) 試験方法

小径ドリル削孔試験装置を用いて供試体を削孔し、削孔速度により深さ方向の強度分布を推定した。下表に試験機の条件を示す。供試体は、40×40×80（mm）の寸法で配合は水セメント比90%のセメントペーストを使用した。

使用するビットは、砥粒の埋め込み深さが粒径の65%のビット（森65ビット）のφ2.0とした。（ビット偏芯は0.2,0.25,0.3,0.35 [mm]、水圧は150・190・225 [cm]で行った。）

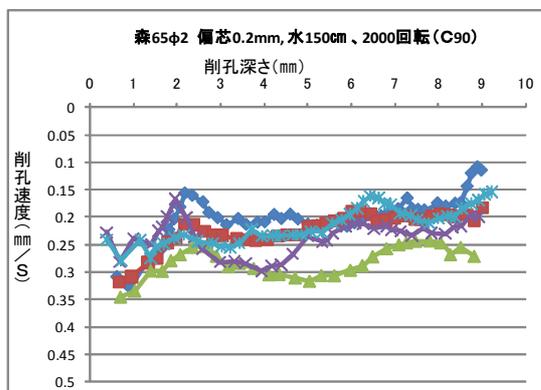
その他の試験条件は以下とした。

試験装置	3号機
バネ強さ	5.88[N]×2本
ビット径	2.0[mm]
ビット偏芯	0.2,0.25,0.3,0.35[mm]
回転数	2000[rpm]
削孔水	水道水
同上水圧:水平到達距離* (吐出水量)	150・190・225[cm]

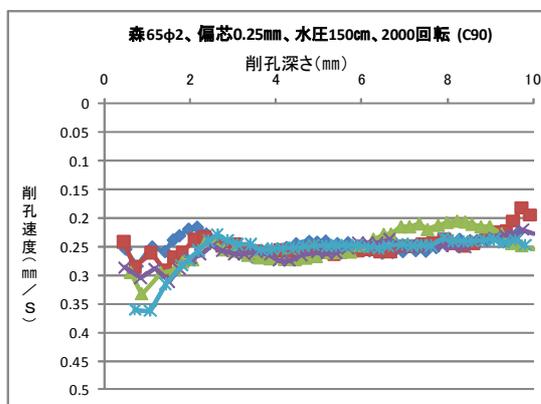
*: φ1のパイプ先端から水平吐き出した水がパイプ高さより90cm下がった時の水平距離

2) 試験結果

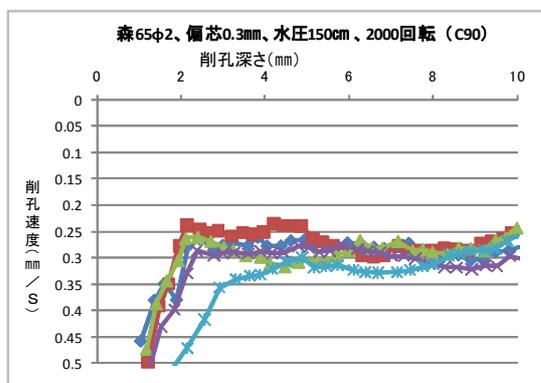
以下、最適な偏芯量を求めるため偏芯のみ変えた削孔試験結果を示す。X軸は削孔深さ (mm)、Y軸は削孔速度 (mm/秒) を示す。



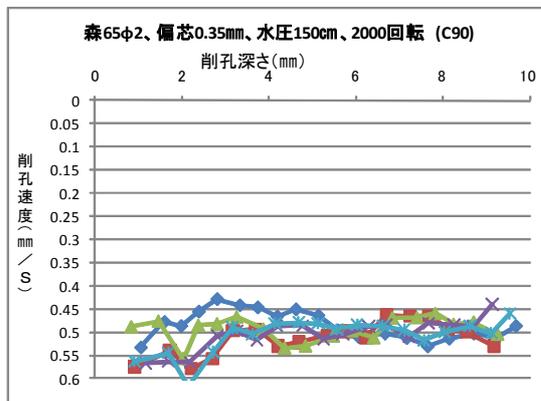
削孔速度
0.18 ~ 0.25 (mm/S) ※
例外 1 本を除く
やや上がり



削孔速度
0.20 ~ 0.28 (mm/S)
やや上がり

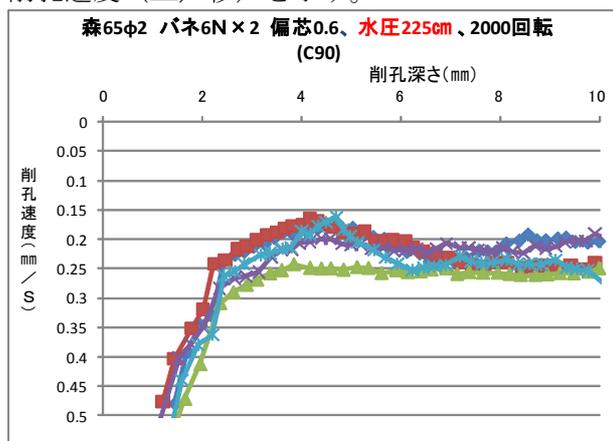


削孔速度
0.24 ~ 0.33 (mm/S)
水平

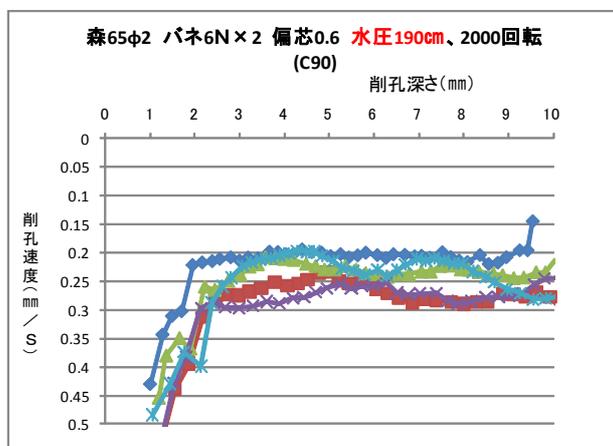


削孔速度
0.46 ~ 0.53 (mm/S)
水平

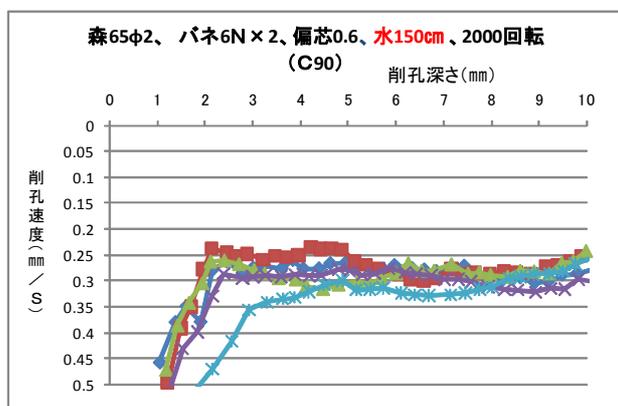
以下、最適な水圧を求めするため水圧のみ変えた削孔試験結果を示す。X軸は削孔深さ (mm)、Y軸は削孔速度 (mm/秒) を示す。



削孔速度
0.17 ~ 0.25 (mm/S)
水平



削孔速度
0.2 ~ 0.29 (mm/S)
水平



削孔速度
0.23 ~ 0.33 (mm/S)
水平

3) 考察

以下に、この実験結果について考察を述べる。

- 偏芯が多くなるにしたがって、削孔速度が速くなる。
- 偏芯 0.2、0.25 は 1 本の削孔で深くなるにつれて削孔速度が遅くなる。
- 偏芯 0.35 は削孔速度が速すぎて脆弱部の強度測定が難しいと思われる。
- 以上から、偏芯は 0.3 mm が良いと思われる。
- 水圧は 150 cm が削孔速度が速かった。しかし水圧が高い方が削孔速度が遅くなったことは理論的におかしく、水圧以外の要因がある可能性が高い。

4.1.2 φ 2 に最適な流水角度の選定

前項で求めた偏芯 0.3 mm と水圧 150 cm で削孔を行ううちに、削孔深さが 6 mm 以深で削孔速度が低下する傾向が見られた。削孔深さが 6 mm 以深での削孔をスムーズにするために以下の方法が考えられる。

○削孔水が孔の奥まで届くようにする（前項で水圧はテストしたので、今回は吐出口の向き（流水角度）を検討した）

○ビットの押しつけ力を大きくする。

本項では、φ 2 の削孔に対し、最適な流水角度の選定を行った。

1) 試験方法

小径ドリル削孔試験装置を用いて供試体を削孔し、削孔速度により、深さ方向の強度分布を推定した。下表に試験機の条件を示す。供試体は 40 × 40 × 80 (mm) の寸法で配合は水セメント比 60% のセメントペーストを使用した。

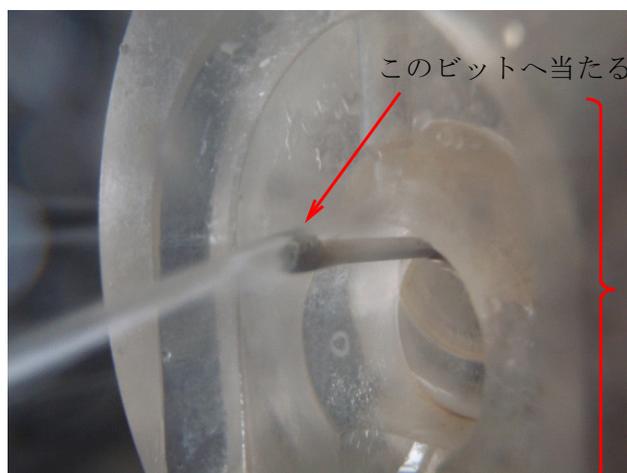
使用するビットは、砥粒の埋め込み深さが粒径の 65% のビット（森 65 ビット）の φ 2.0 とした。（ビット偏芯は 0.3, [mm]、水圧は 150 [cm] でおこなった。）

さらに、吐出口が一体化している先端ケースを前に 0.5 度（勾配 1%）、後ろ約 1 度（勾配 1.6%）に倒すものと現状のままのものとで削孔を行った。

その他の試験条件は以下とした。

試験装置	3号機
バネ強さ	5.88[N] × 2本
ビット径	2.0[mm]
ビット偏芯	0.3[mm]
回転数	4000[rpm]
削孔水	水道水
同上 水圧: 水平到達距離* (吐出水量)	150[cm]
水流出角度(ケース角度)	現状・1%前倒し・1.6%後ろ反り

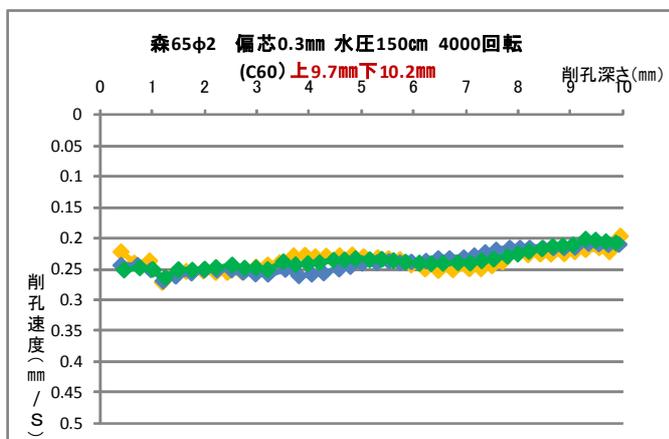
*: φ 1 のパイプ先端から水平吐させた水がパイプ高さより 90 cm 下がった時の水平距離



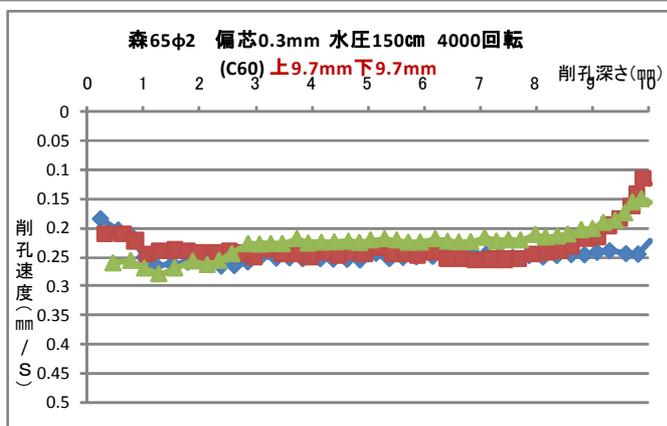
ケース全体の角度を変えることにより。

2) 試験結果

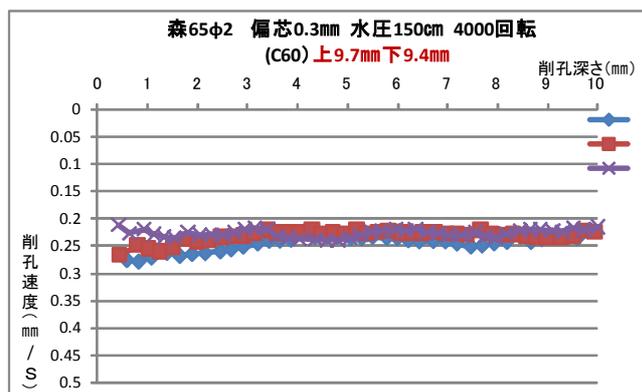
以下、削孔試験結果を示す。X軸は削孔深さ (mm)、Y軸は削孔速度 (mm/秒) を示す。



- ・後ろ約1度
(勾配1.6%)
削孔深さが深くなるにしたがって削孔速度が落ちる



- ・現状のまま
8 mm以深で削孔速度が低下する。



- ・前に0.5度(勾配1%)
削孔始めから終了まで削孔速度は変わらない。

3) 考察

以下に、この実験結果について考察を述べる。

- 先端ケースを現状より前に0.5度(勾配1%)傾けた場合、削孔速度が安定した。

4.1.3 φ2に最適なバネ力の選定

前項で述べたように偏芯 0.3 mmと水圧 150 cmで削孔を行ううちに、削孔深さが 6 mm以深で削孔速度が低下する傾向が見られた。削孔深さが 6 mm以深での削孔をスムーズにするため、ビットの押しつけ力を大きくする方法を検証した。

1) 試験方法

小径ドリル削孔試験装置を用いて供試体を削孔し、削孔速度により深さ方向の強度分布を推定した。下表に試験機の条件を示す。供試体は 40 × 40 × 80 (mm) の寸法で配合は水セメント比 90 %のセメントペーストを使用した。使用するビットは、砥粒の埋め込み深さが粒径の 65 %のビット (森 65 ビット) の φ 2.0 とした。(ビット偏芯は 0.3, [mm]、水圧は 150 [cm]、ケース勾配は前に 0.5 度 (勾配 1 %) で行った。)

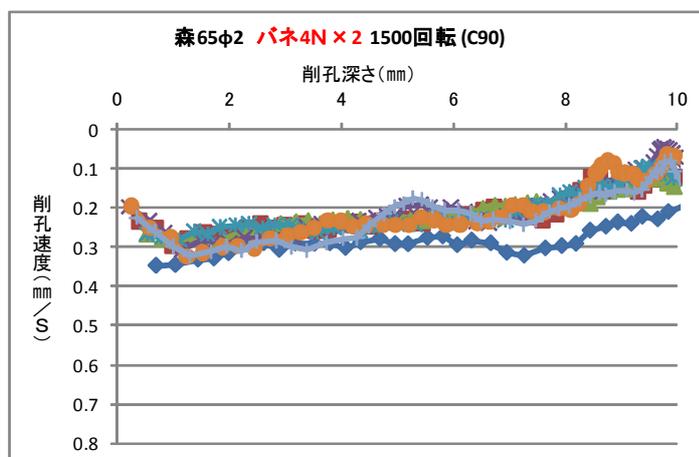
さらに、バネ力は 3.9N × 2 個、5.9N × 2 個、7.8N × 2、9.8N × 2 個を検証した。その他の試験条件は以下とした。

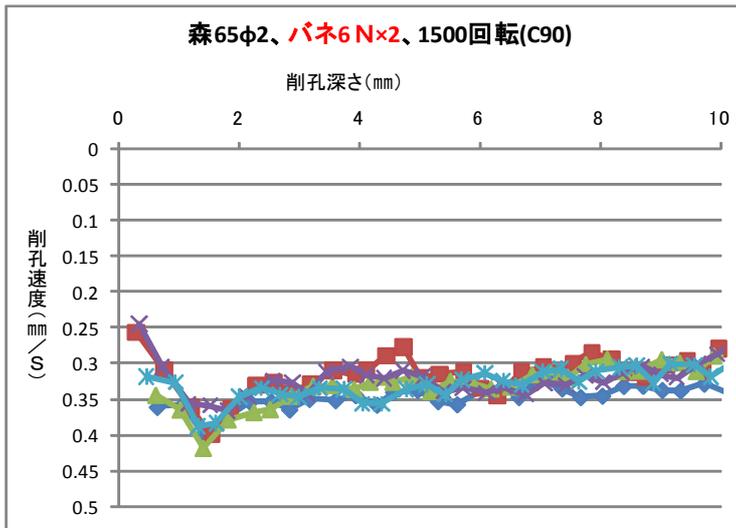
試験装置	3号機
バネ強さ	(3.9、5.9、7.8、9.8) [N] × 2本
ビット径	2.0 [mm]
ビット偏芯	0.3 [mm]
回転数	1500
削孔水	水道水
同上水圧 : 水平到達距離* (吐出水量)	150 [cm]
水流出角度 (ケース角度)	1%前倒し

*: φ1のパイプ先端から水平吐させた水がパイプ高さより90cm下がった時の水平距離

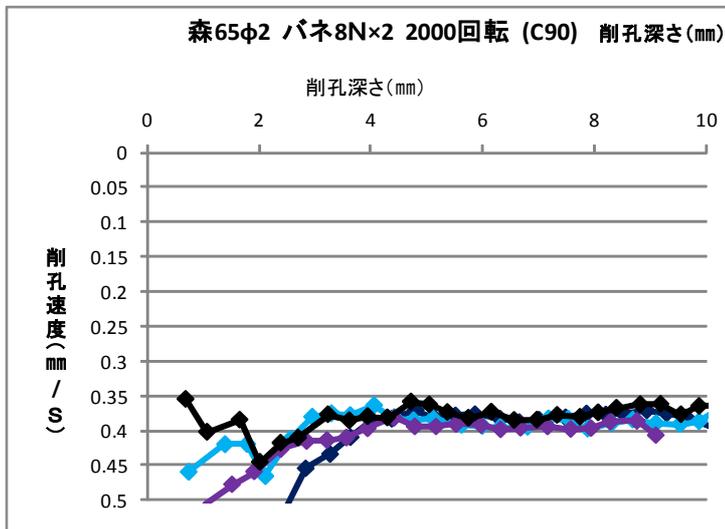
2) 試験結果

以下、削孔試験結果を示す。X軸は削孔深さ (mm)、Y軸は削孔速度 (mm/秒) を示す。

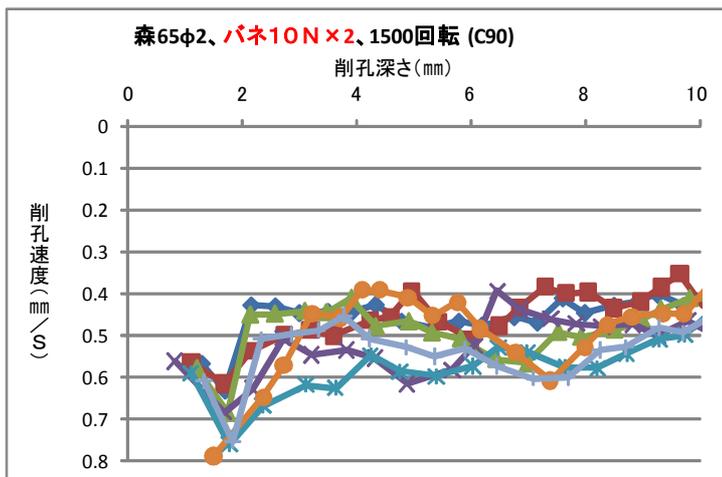




- ・ 初速
0.35 mm/S
深さにつれて
速度減少 小



- ・ 初速
0.38 mm/S
深さにつれて
速度減少 無し



- ・ 初速
0.42 mm/S
深さにつれて
速度減少 小

3) 考察

以下に、この実験結果について考察を述べる。

- 7.8 N×2のバネが削孔深さが深くなっても削孔速度が変わらなかった。
したがって、モルタルの削孔は以下の条件で行うこととする。

試験装置	3号機
バネ強さ	7.85[N]×2本
ビット径	2.0[mm]
ビット偏芯	0.3[mm]
回転数	1500
削孔水	水道水
同上水圧:水平到達距離* (吐出水量)	150[cm]
水流出角度(ケース角度)	1%前倒し

*: $\phi 1$ のパイプ先端から水平吐出させた水がパイプ
高さより90cm下がった時の水平距離

4.2 モルタルの強度測定方法の推定方針

4.2.1 過去のモルタルの削孔試験結果（平成19年3月）

削孔試験を行ったモルタル供試体の配合を表1に示す。

表1 モルタル供試体の配合

試験体No.	W/C	Vs/Vm	単体量 (kg/m ³)			混和剤添加率		測定結果 Air(%)
			W	C	S	AFK/C	SFCA/C	
1.0-0.55	1.00	0.55	288.0	288.0	1425.0	0.002	0.2	10.0
0.9-0.55	0.90	0.55	281.0	312.0	1425.0	0.002	0.2	9.3
0.8-0.55	0.80	0.55	272.0	340.0	1425.0	0.002	0.2	7.2
0.6-0.55	0.60	0.55	249.0	414.0	1425.0	0.000	0.1	8.2
0.9-0.45	0.90	0.45	355.0	394.0	1166.0	0.002	0.5	8.1
0.9-0.50	0.90	0.50	318.0	353.0	1295.0	0.002	0.3	8.4
0.9-0.60	0.90	0.60	244.0	271.0	1554.0	0.002	0.2	8.6
0.9-0.55 air	0.90	0.55	333.0	370.0	1425.0	0.002	0.1	1.2

このなかで、試験体No. 0.9-0.45 の削孔試験結果を図1に示す。

ここで、X軸は削孔時間、Y軸は削孔深さを示す。

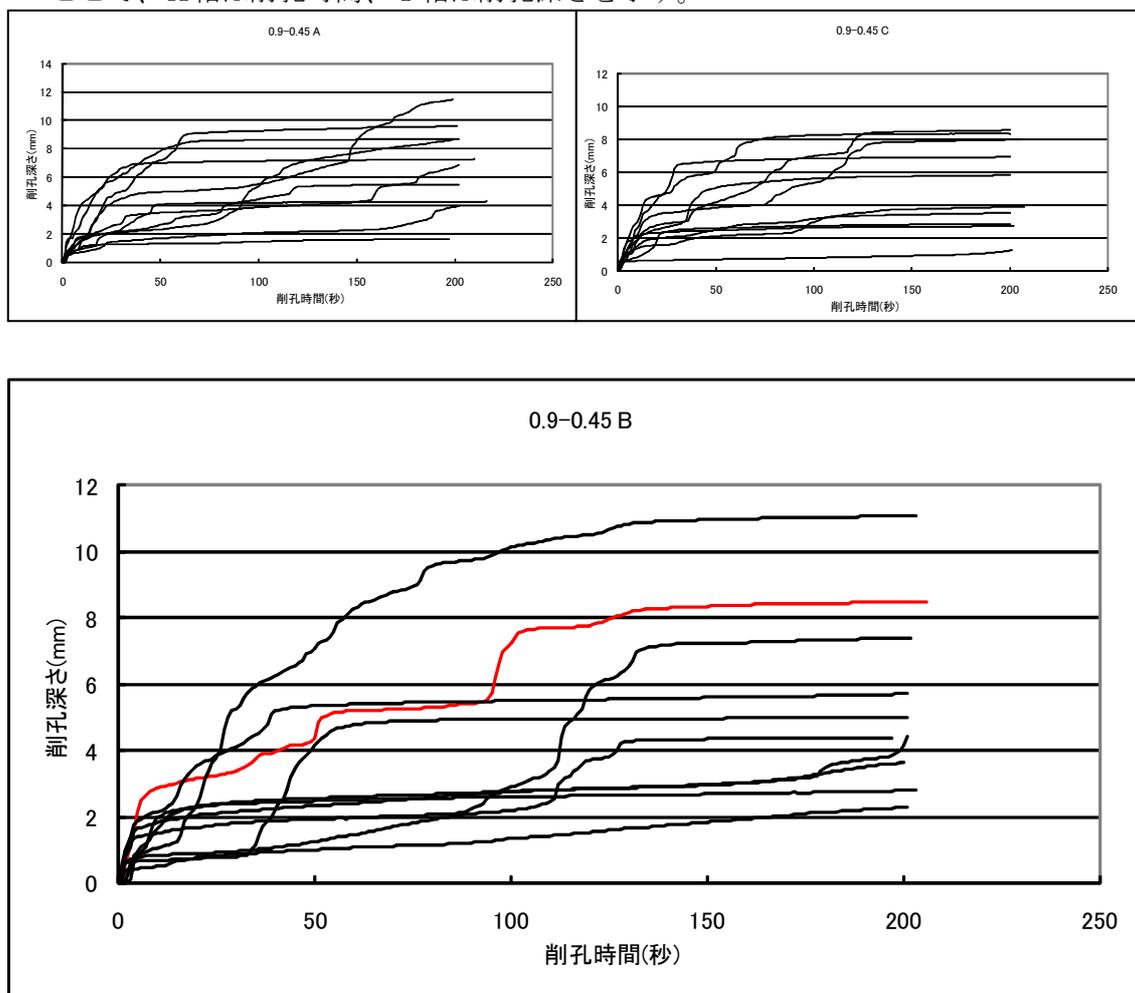
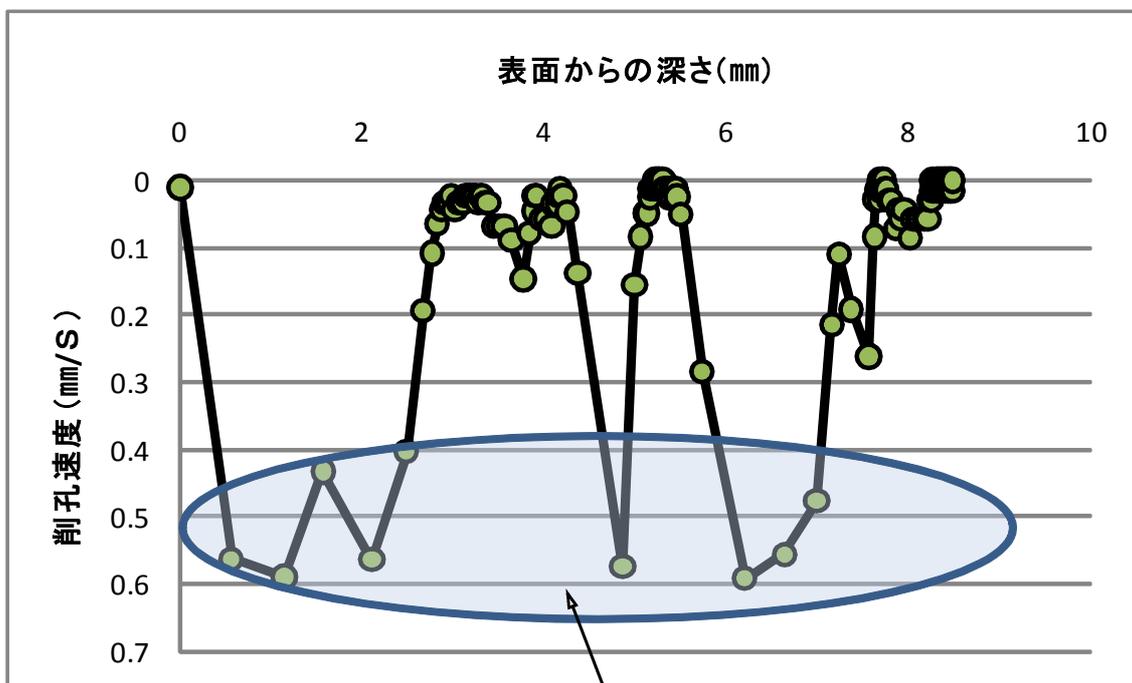


図2 モルタル供試体（試験体No. 0.9-0.45）の削孔試験結果

上図の赤線のデータから削孔深さに対する削孔速度を求め、次頁に示した。

4.2.2モルタルの削孔試験から強度を推定することの可能性

前項のモルタル供試体（試験体No. 0.9-0.45-1：図2の赤線データ）の削孔位置と深さを図3に示す。



大きな砂粒に当たっていないと思われる範囲

図3 モルタル供試体（試験体No. 0.9-0.45-1）の削孔試験結果（深さ・速度表示）

これによれば、表面から 0.5 mm～2 mm、4.6 mm、6 mm～7 mmの範囲が大きな砂粒に当たっていないと思われる範囲である。したがって、この部分の削孔速度を強度に変換できればこのドリルによって強度が測定出来ると思われる。

尚、削孔中に砂粒に当たる確率はビットが小さければ小さい程低くなると推定されるため、今回はφ2のビットを使用した。

4.2.3モルタルの削孔試験から強度を推定する方法を求める手順

以下の手順で行う予定である。

ステップ1：図3の大きな砂粒に当たっていないと思われる削孔速度は何を削孔しているのか？を探る。

※この部分の可能性は：セメントペーストのみ

：セメントペースト+0.15 mm以下の微粒分

：セメントペースト+0.3 mm以下の微粒分

：セメントペースト+0.6 mm以下の微粒分

さらに、どの大きさまで微粒分が入っていた場合に削孔速度が安定するか？

その安定した削孔速度はセメントペースト単体の削孔速度より遅いのか？などを見極める必要がある。

ステップ2：W/Cを変化させたセメントペースト+微粒分（前項で安定していると思われた最大の粒度による）の検量線図を作成する。

ステップ3：強度が既知のモルタルを削孔し、前項の検量線の有効性を確認する。

ステップ4：強度が既知のコンクリートを削孔し、前項の検量線の有効性を確認する。

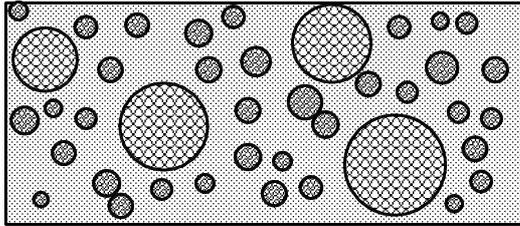
ステップ5：コンクリートを削孔した結果から、大きな砂粒に当たっていたと思われるデータを取り除くソフトの開発を行う。

4.3 φ2のビットでの削孔を遅くする骨材の最小径の把握

(図3で大きな砂粒に当たっていないと思われる削孔速度は何を削孔しているのか?を探る。)

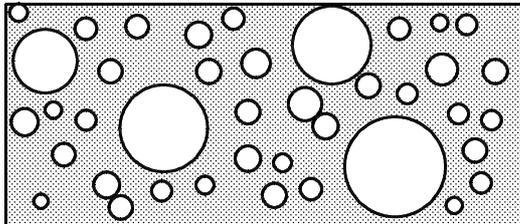
4.3.1 セメント+微粒分の供試体の作成イメージ

コンクリート断面のイメージ



-  : 0.6 mm以下の細骨剤 (砂) の微粒分
-  : 0.6 mmを超える細骨剤 (砂)
-  : 2.5 mm以下の粗骨剤 (砂利)

コンクリート中の0.6 mm以下の細骨材 (砂) の微粒分の存在イメージ
(0.6 mmを超える細骨剤 (砂) と2.5 mm以下の粗骨材 (砂利) が無いとした場合)



-  : 0.6 mm以下の細骨材 (砂) の微粒分

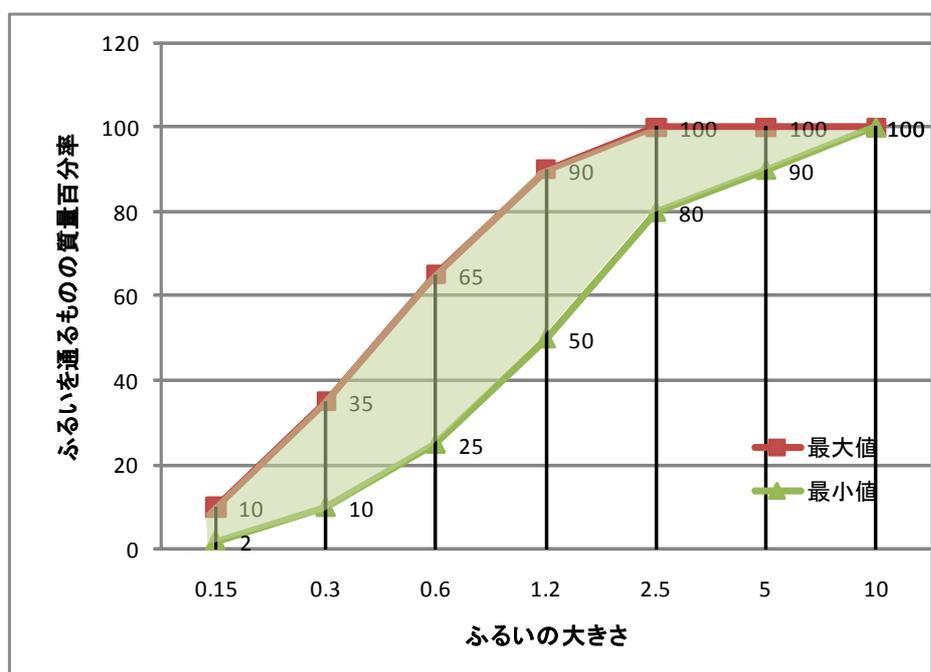
以上のように、セメントペーストと微粒分の関係は、コンクリートの配合の中から粗骨材と微粒分より大きい砂粒を抜いたもので考えれば良いものと思われる。

平成9年建築工事標準仕様書・同解説（鉄筋コンクリート工事：JASS 5）の

表 4.3 砂利および砂の標準粒度を下記に示す。

（1行）

種類	ふるいを通るものの質量百分率(%)													
	ふるいの呼び寸法(mm)	50	40	30	25	20	15	10	5	2.5	1.2	0.6	0.3	0.15
砂		-	-	-	-	-	-	100	90~100	80~100	50~90	25~65	10~35	2~10



4.3.2セメント+微粒分の供試体の作成

モルタル供試体の削孔速度について、安定した速度となる範囲（大きな砂粒に当たっていないと思われる範囲）における微粒分の最大寸法を見極めるための実験を行うにあたり、供試体作製における問題点の有無の確認、および当りをつけて実験水準の簡素化を図るための事前実験用モルタル供試体を以下の配合で作製する。

1) JASS5の調合表に基づいたモルタル供試体の作製

①使用材料の種類及び品質

材 料	種類及び物理的性状
セメント (C)	普通ポルトランドセメント (太平洋セメント) 密度 : 3.15g/cm ³
水 (W)	水道水
細骨材 (S)	川砂 (櫛田川流域産) 表乾密度 : 2.60g/cm ³ 吸水率 : 1.27%

②モルタル供試体の大きさ

断面40mm平方、長さ160mmの角柱 : 1調合につき3本

③モルタル供試体の基本調合 (4調合)

a) W/C 41%、スランプ 21cm

基準配合 (kg/m ³)				
W/C (wt%)	C	W	S	G
41	150	195	681	918
モルタル供試体の調合 (kg/m ³)				
川砂の大きさ	C	W	S	合 計
0.6以下 65%	917	379	858	2154
0.3以下 10%	1273	526	182	1981

b) W/C 69%、スランプ 21cm

基準配合 (kg/m ³)				
W/C (wt%)	C	W	S	G
69	273	189	894	884
モルタル供試体の調合 (kg/m ³)				
川砂の大きさ	C	W	S	合 計
0.6以下 65%	551	378	1162	2091
0.3以下 10%	885	608	289	1782

※ 微粒分を表乾状態にするのは困難であるため、モルタル供試体に用いる細骨材は、絶乾状態の試料を使用し、その試料の吸水率分の水量を単位水量に加えることとする。

以下、モルタル供試体の配合を示す。

材料	密度(g/cm ³)
セメント	3.15
細骨材	2.60
粗骨材	2.60

W/C 41% スランブ21cm							
		W/C	セメント	水	砂	砂利	合計
基本配合	l/m ³	—	150	195	262	353	960
	kg/m ³	41	471	195	681	918	2265
	l/m ³	—	156	203	273	368	1000
供試体No.	41-1.2-90-①/41-1.2-90-②/41-1.2-90-③						
1.2以下 90%	l/m ³	—	156	203	246	—	605
	kg/m ³	41	813	336	1056	—	2205
	l/m ³	—	156	203	246	—	605
供試体No.	41-1.2-50-①/41-1.2-50-②/41-1.2-50-③						
1.2以下 50%	l/m ³	—	156	203	137	—	496
	kg/m ³	41	992	409	718	—	2119
	l/m ³	—	156	203	137	—	496
供試体No.	41-0.6-65-①/41-0.6-65-②/41-0.6-65-③						
0.6以下 65%	l/m ³	—	156	203	177	—	536
	kg/m ³	41	917	379	858	—	2154
	l/m ³	—	156	203	177	—	536
供試体No.	41-0.6-25-①/41-0.6-25-②/41-0.6-25-③						
0.6以下 25%	l/m ³	—	156	203	68	—	427
	kg/m ³	41	1150	475	416	—	2041
	l/m ³	—	156	203	68	—	427
供試体No.	41-0.3-35-①/41-0.3-35-②/41-0.3-35-③						
0.3以下 35%	l/m ³	—	156	203	96	—	455
	kg/m ³	41	1080	446	549	—	2075
	l/m ³	—	156	203	96	—	455
供試体No.	41-0.3-10-①/41-0.3-10-②/41-0.3-10-③						
0.3以下 10%	l/m ³	—	156	203	27	—	386
	kg/m ³	41	1273	526	182	—	1981
	l/m ³	—	156	203	27	—	386
供試体No.	41-0.15-10-①/41-0.15-10-②/41-0.15-10-③						
0.15以下 10%	l/m ³	—	156	203	27	—	386
	kg/m ³	41	1273	526	182	—	1981
	l/m ³	—	156	203	27	—	386
供試体No.	41-ペースト-①/41-ペースト-②/41-ペースト-③						
セメントペースト	l/m ³	—	156	203	—	—	359
	kg/m ³	41	1370	565	—	—	1935
	l/m ³	—	156	203	—	—	359
供試体No.	41-モルタル-①/41-モルタル-②/41-モルタル-③						
モルタル	l/m ³	—	156	203	273	—	632
	kg/m ³	41	778	321	1123	—	2222
	l/m ³	—	156	203	273	—	632

WC 69% スランプ21cm							
		W/C	セメント	水	砂	砂利	合計
基本配合	l/m ³	—	87	189	344	340	960
	kg/m ³	69	273	189	894	884	2240
	l/m ³	—	91	197	358	354	1000
供試体No.	69-1.2-90-①/69-1.2-90-②/69-1.2-90-③						
1.2以下 90%	l/m ³	—	91	197	322	—	610
		—	149	323	528	—	1000
	kg/m ³	69	469	323	1373	—	2165
供試体No.	69-1.2-50-①/69-1.2-50-②/69-1.2-50-③						
1.2以下 50%	l/m ³	—	91	197	179	—	467
		—	195	422	383	—	1000
	kg/m ³	69	614	422	996	—	2032
供試体No.	69-0.6-65-①/69-0.6-65-②/69-0.6-65-③						
0.6以下 65%	l/m ³	—	91	197	233	—	521
		—	175	378	447	—	1000
	kg/m ³	69	551	378	1162	—	2091
供試体No.	69-0.6-25-①/69-0.6-25-②/69-0.6-25-③						
0.6以下 25%	l/m ³	—	91	197	90	—	378
		—	241	521	238	—	1000
	kg/m ³	69	759	521	619	—	1899
供試体No.	69-0.3-35-①/69-0.3-35-②/69-0.3-35-③						
0.3以下 35%	l/m ³	—	91	197	125	—	413
		—	220	477	303	—	1000
	kg/m ³	69	693	477	788	—	1958
供試体No.	69-0.3-10-①/69-0.3-10-②/69-0.3-10-③						
0.3以下 10%	l/m ³	—	91	197	36	—	324
		—	281	608	111	—	1000
	kg/m ³	69	885	608	289	—	1782
供試体No.	69-0.15-10-①/69-0.15-10-②/69-0.15-10-③						
0.15以下 10%	l/m ³	—	91	197	36	—	324
		—	281	608	111	—	1000
	kg/m ³	69	885	608	289	—	1782
供試体No.	69-ペースト-①/69-ペースト-②/69-ペースト-③						
セメントペースト	l/m ³	—	91	197	—	—	288
		—	316	684	—	—	1000
	kg/m ³	69	995	684	—	—	1679
供試体No.	69-モルタル-①/69-モルタル-②/69-モルタル-③						
モルタル	l/m ³	—	91	197	358	—	646
		—	141	305	554	—	1000
	kg/m ³	69	444	305	1440	—	2189

以下、供試体の姿写真を示す



以下、供試体の強度試験結果を示す

供試体作製日	平成22年9月27日	試験材齢	66日		
試験日	平成22年12月2日	供試体公称寸法	φ50×100mm		
養生方法	9/27~10/25(材齢28日);標準養生 10/26~12/2(材齢38日);気中養生				
W/C 41% スランプ21cm					
砂の大きさ(mm)	試験番号	供試体質量(kg)	最大荷重(kN)	圧縮強度(N/mm ²)	平均値(N/mm ²)
ふるいを通る質量百分率					
1.2以下 90%	1	0.415	154	78.4	77.4
	2	0.417	150	76.4	
	3	0.410	152	77.4	
1.2以下 50%	1	0.424	147	74.9	76.9
	2	0.425	157	80.0	
	3	0.426	149	75.9	
0.6以下 65%	1	0.415	165	84.0	79.4
	2	0.413	141	71.8	
	3	0.411	162	82.5	
0.6以下 25%	1	0.398	187	95.2	95.0
	2	0.396	186	94.7	
	3	0.396	187	95.2	
0.3以下 35%	1	0.409	170	86.6	83.9
	2	0.411	163	83.0	
	3	0.409	161	82.0	
0.3以下 10%	1	0.391	165	84.0	82.1
	2	0.395	154	78.4	
	3	0.394	165	84.0	
0.15以下 10%	1	0.396	159	81.0	75.4
	2	0.397	146	74.4	
	3	0.397	139	70.8	
セメントペースト	1	0.376	168	85.6	85.1
	2	0.379	160	81.5	
	3	0.381	173	88.1	
モルタル	1	0.413	146	74.4	75.7
	2	0.418	154	78.4	
	3	0.414	146	74.4	

W/C 69% スランプ21cm						
砂の大きさ ふるいを通る質量百分率	試験 番号	供試体質量 (kg)	最大荷重 (kN)	圧縮強度 (N/mm ²)	平均値 (N/mm ²)	
1.2以下 90%	1	0.395	72.0	36.7	36.4	
	2	0.394	68.9	35.1		
	3	0.395	73.6	37.5		
1.2以下 50%	1	0.399	66.6	33.9	34.5	
	2	0.400	69.1	35.2		
	3	0.399	67.4	34.3		
0.6以下 65%	1	0.397	76.3	38.9	39.6	
	2	0.398	77.1	39.3		
	3	0.395	80.0	40.7		
0.6以下 25%	1	0.368	62.4	31.8	33.6	
	2	0.367	66.9	34.1		
	3	0.347	68.6	34.9		
0.3以下 35%	1	0.376	66.7	34.0	33.2	
	2	0.377	63.0	32.1		
	3	0.374	65.9	33.6		
0.3以下 10%	1	0.348	53.0	27.0	26.8	
	2	0.350	54.1	27.6		
	3	0.346	50.8	25.9		
0.15以下 10%	1	0.349	55.2	28.1	29.5	
	2	0.353	57.7	29.4		
	3	0.331	61.0	31.1		
セメントペースト	1	0.342	72.8	37.1	36.8	
	2	0.344	71.7	36.5		
	3	0.347	72.3	36.8		
モルタル	1	0.409	72.9	37.1	37.4	
	2	0.413	72.6	37.0		
	3	0.416	74.8	38.1		

4.3.3 削孔試験

1) 試験方法

供試体は、前項で述べた断面40mm平方、長さ160mmの角柱供試体とし、配合とその供試体No.は以下とする。

W/C 41% スランプ21cm							
		W/C	セメント	水	砂	砂利	合計
基本配合	l/m ³	—	150	195	262	353	960
	kg/m ³	41	471	195	681	918	2265
	l/m ³	—	156	203	273	368	1000

供試体No.	供試体の配合
41-1.2-90	粒径1.2mm以下で構成された砂が、基本配合の砂の重量の90%入っており砂利が入っていないもの
41-1.2-50	粒径1.2mm以下で構成された砂が、基本配合の砂の重量の50%入っており砂利が入っていないもの
41-0.6-65	粒径0.6mm以下で構成された砂が、基本配合の砂の重量の65%入っており砂利が入っていないもの
41-0.6-25	粒径0.6mm以下で構成された砂が、基本配合の砂の重量の25%入っており砂利が入っていないもの
41-0.3-35	粒径0.3mm以下で構成された砂が、基本配合の砂の重量の35%入っており砂利が入っていないもの
41-0.3-10	粒径0.3mm以下で構成された砂が、基本配合の砂の重量の35%入っており砂利が入っていないもの
41-0.15-10	粒径0.15mm以下で構成された砂が、基本配合の砂の重量の10%入っており砂利が入っていないもの
41-ペースト	基本配合で砂利と砂が入っていないもの
41-モルタル	基本配合で砂が入っていないもの

WC 69% スランプ21cm							
		W/C	セメント	水	砂	砂利	合計
基本配合	l/m ³	—	87	189	344	340	960
	kg/m ³	69	273	189	894	884	2240
	l/m ³	—	91	197	358	354	1000

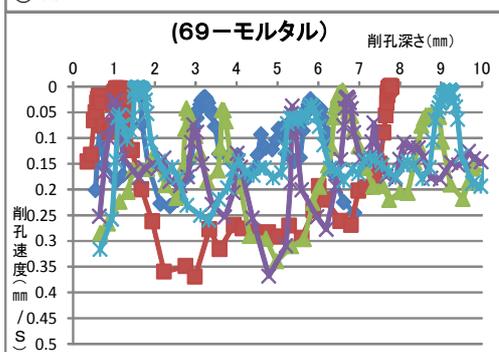
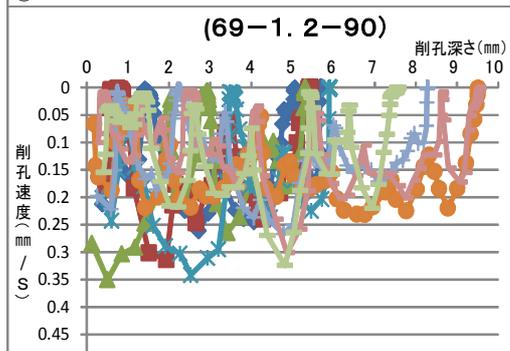
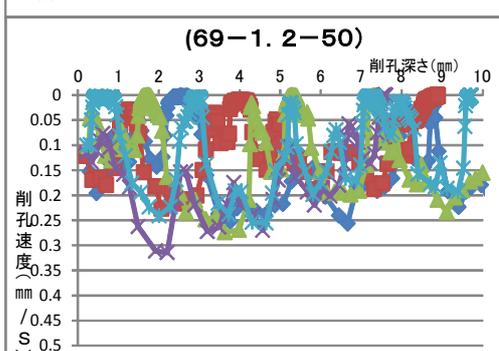
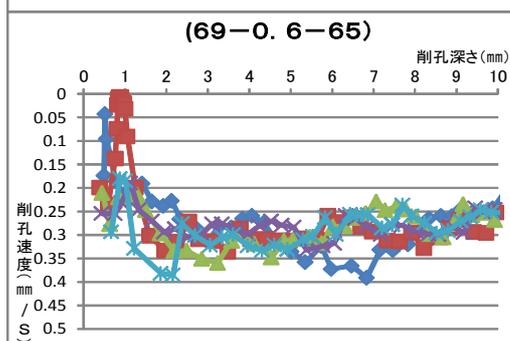
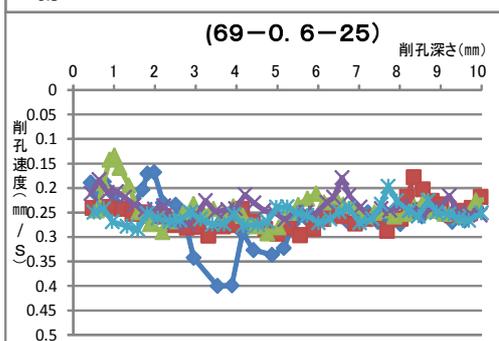
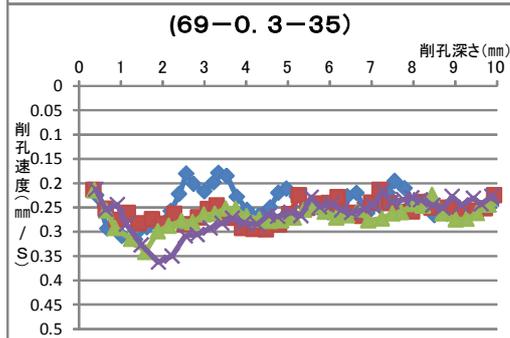
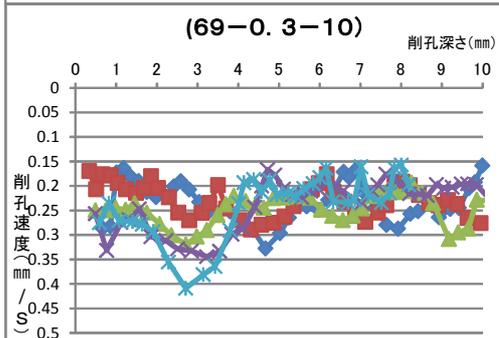
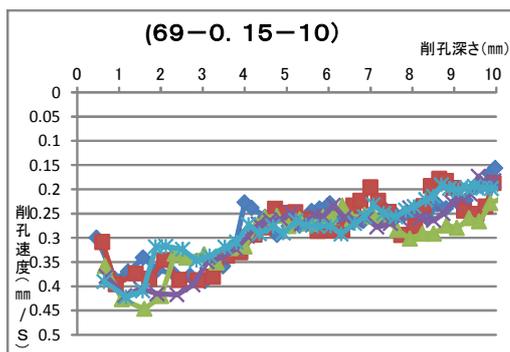
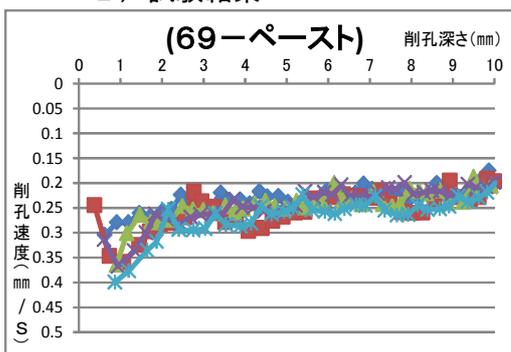
供試体No.	供試体の配合
69-1.2-90	粒径1.2mm以下で構成された砂が、基本配合の砂の重量の90%入っており砂利が入っていないもの
69-1.2-50	粒径1.2mm以下で構成された砂が、基本配合の砂の重量の50%入っており砂利が入っていないもの
69-0.6-65	粒径0.6mm以下で構成された砂が、基本配合の砂の重量の65%入っており砂利が入っていないもの
69-0.6-25	粒径0.6mm以下で構成された砂が、基本配合の砂の重量の25%入っており砂利が入っていないもの
69-0.3-35	粒径0.3mm以下で構成された砂が、基本配合の砂の重量の35%入っており砂利が入っていないもの
69-0.3-10	粒径0.3mm以下で構成された砂が、基本配合の砂の重量の35%入っており砂利が入っていないもの
69-0.15-10	粒径0.15mm以下で構成された砂が、基本配合の砂の重量の10%入っており砂利が入っていないもの
69-ペースト	基本配合で砂利と砂が入っていないもの
69-モルタル	基本配合で砂が入っていないもの

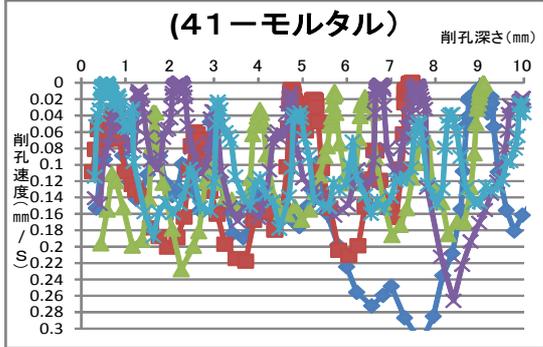
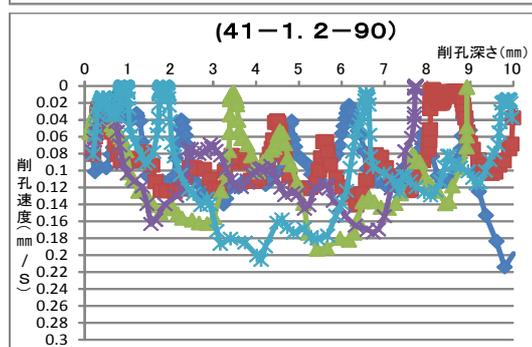
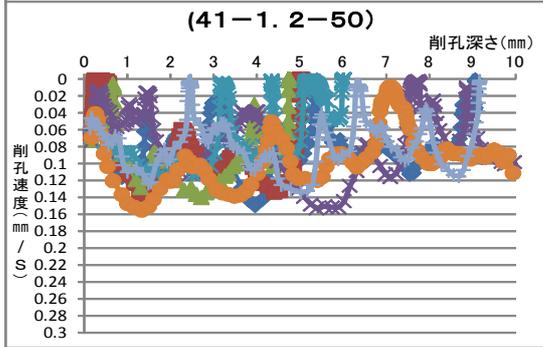
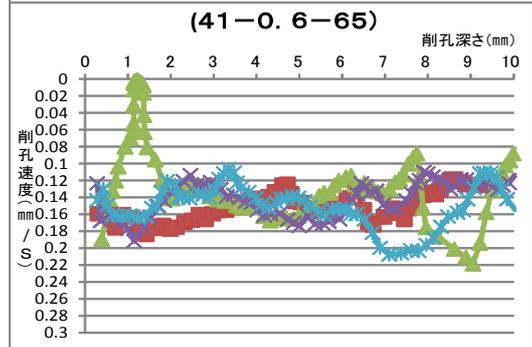
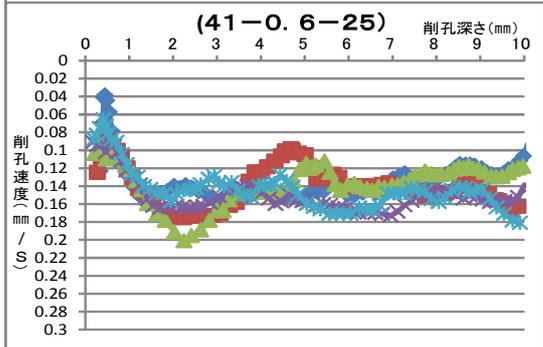
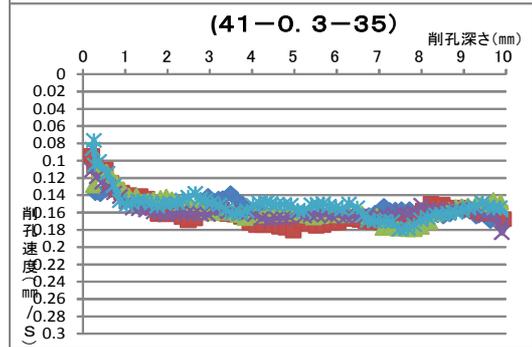
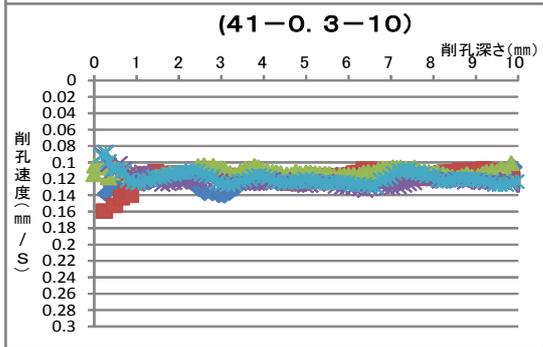
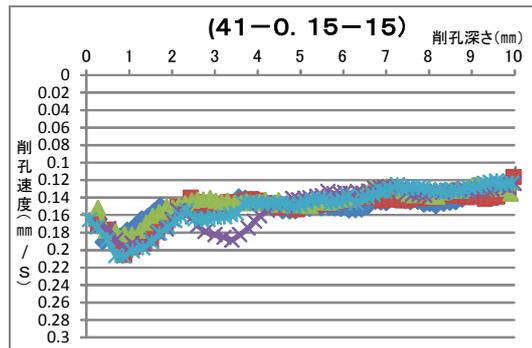
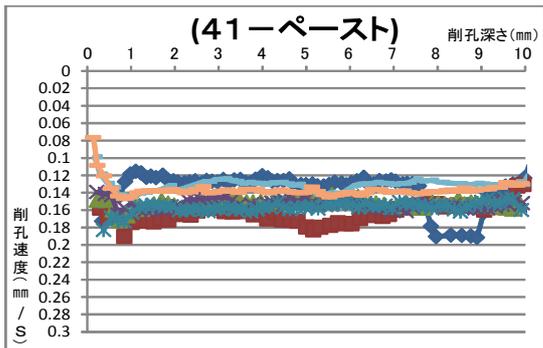
試験は、小径ドリル削孔試験装置を用いて上記供試体を削孔し、削孔速度により深さ方向の強度分布を推定した。下表に試験機の条件を示す。

試験装置	3号機
バネ強さ	7.85[N]×2本
ビット径	2.0[mm]
ビット偏芯	0.3[mm]
回転数	4000
削孔水	水道水
同上水圧:水平到達距離* (吐出水量)	150[cm]
水流出角度(ケース角度)	1%前倒し

*: φ1のパイプ先端から水平吐き出した水がパイプ高さより90cm下がった時の水平距離

2) 試験結果





3) 考察

水セメント比69%の基本配合に対して、粒径0.3mm以下で構成された砂が、基本配合の砂の重量の10%入っており砂利が入っていないもの(69-0.3-10)の削孔試験結果を示す。これによると、深さ2~3mmの間で若干速度が速いが、これは打継ぎか空隙と思われる、その他は削孔速度0.25mm/Sの付近である。

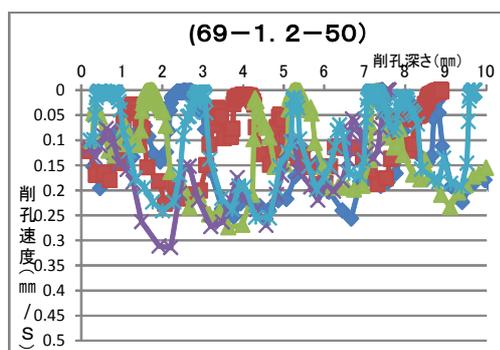
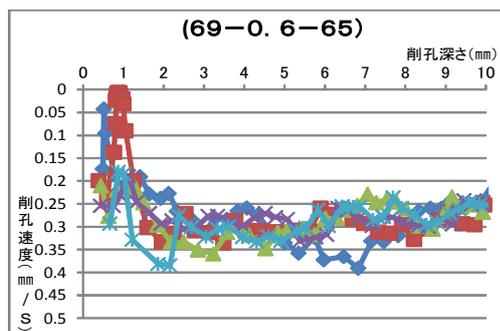
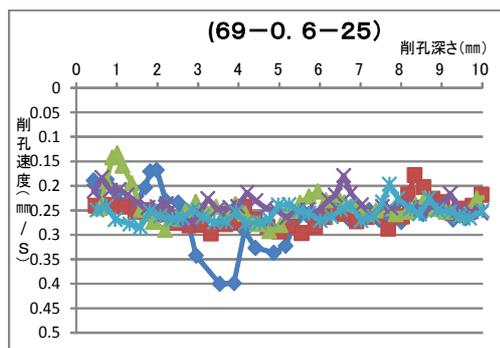
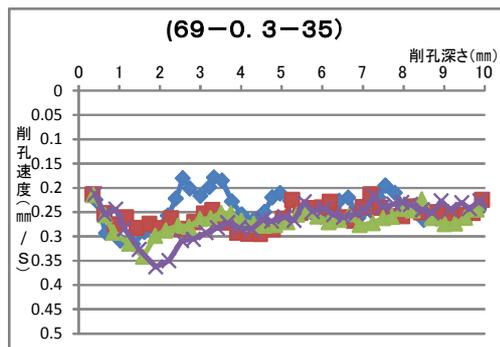
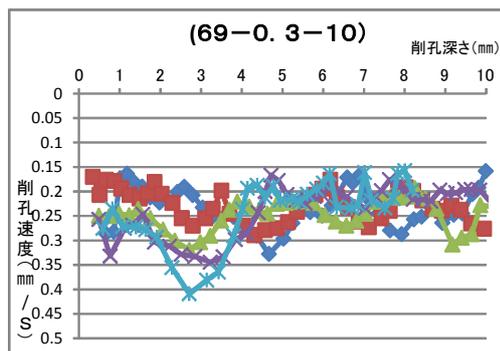
(69-0.3-35)は、ほとんど全部0.25mm/Sの付近である。

(69-0.6-25)もほとんど全部0.25mm/Sの付近である。

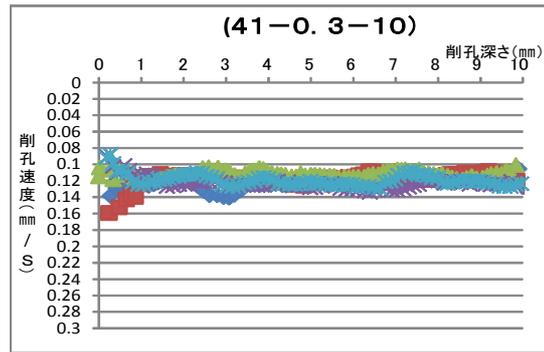
(69-0.6-65)の1mm付近に硬い部分があるが、その他ほとんど全部0.3mm/Sの付近である。

(69-1.2-50)では、いたるところで硬い部分が見受けられた。

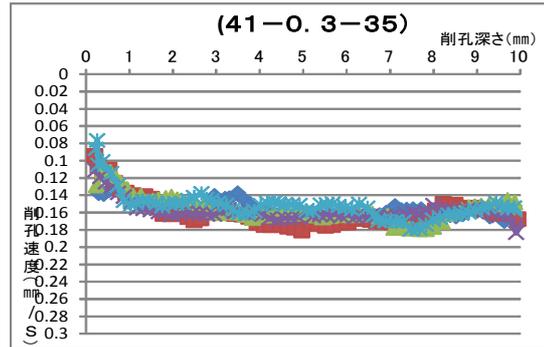
したがって、ベースが69%のセメントペーストの場合、砂の粒径が0.6mm以下の場合は、φ2ビットでの削孔速度にほとんど影響を与えない事が解った。



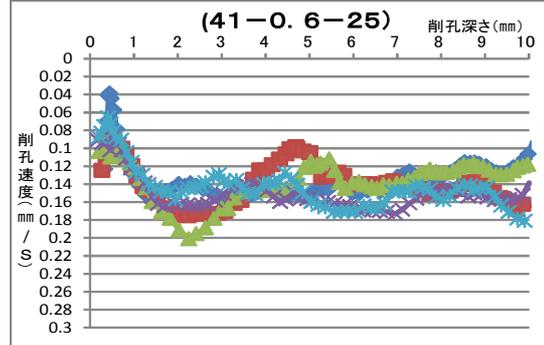
水セメント比 4 1 % で、基本配合に対して粒径 0.3 mm 以下で構成された砂が、基本配合の砂の重量の 10 % 入っており砂利が入っていないもの (41-0.3-10) の削孔試験結果を示す。これによると、全ての削孔速度は 0.13 mm / S の付近である。



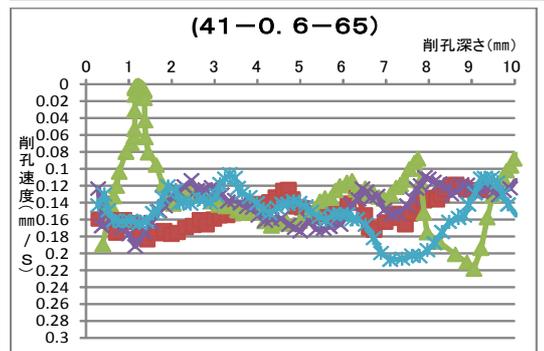
(41-0.3-35) は、表面が硬いが、その他ほとんど 0.15 mm / S の付近である。



(41-0.6-25) も若干上下し始めたが表面近く以外は、ほとんど全部 0.15 mm / S の付近である。

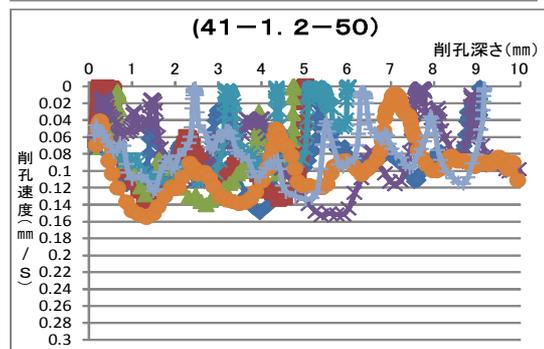


(41-0.6-65) の 1 mm 付近に硬い部分があり、その他も上下に少し凸凹はあるが、その他ほとんど全部 0.13 mm / S の付近である。



(41-1.2-50) では、いたるところで硬い部分が見受けられた。したがってベースが 4 1 % のセメントペーストの場合、砂の粒径が 0.6 以下の場合は φ 2 ビットでの削孔速度に影響を与えない事が解った。

これは 6 9 % でもそうだったので、モルタル中の砂で φ 2 の削孔を送らせるのは、砂径が 0.6 mm を超える砂である事が解った。

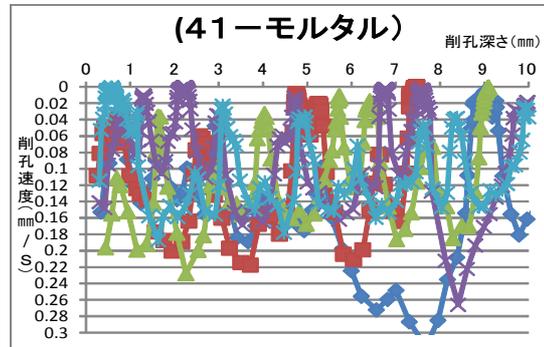


4.4 φ2ビットでのモルタル削孔結果の分析

前項4.3.3 2) の試験結果から、モルタルの強度推定を行う方法についての提案を以下に述べる。

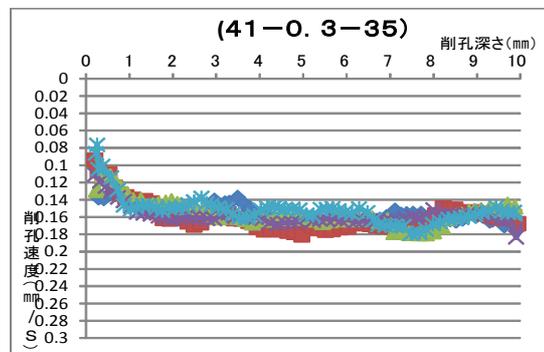
水セメント比41%のモルタルを8回削孔して5回のデータが得られた。残り3回は削孔途中で60秒間全く削孔が出来なかったため、その時点で削孔をやめた。これはビット先端が粒径の大きい砂に当たったものと思われる。

右図は、その5回分の削孔のデータである。このデータは全て前後3回分の移動平均で表現した。

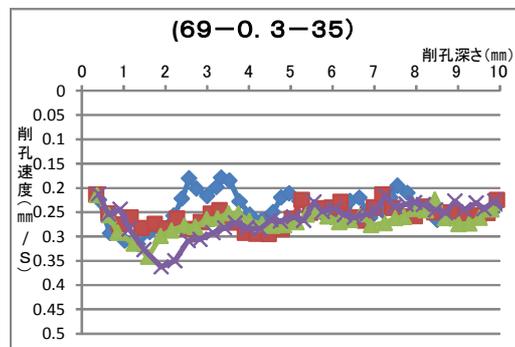


このデータから砂と空隙のデータを除去する方法例を示す。

右図に、0.3 mm以下の微粒分が入った水セメント比41%のモルタルのデータを示す。このデータでは、ほぼ0.15 mm/S ~ 0.17 mm/Sの値となっている。この時の圧縮強度は83.9 N/mm²であった。これから推定すれば、削孔速度が0.10 mm/Sになれば、100 N/mm²を超えると推定される。



右図に、0.3 mm以下の微粒分が入った水セメント比69%のモルタルのデータを示す。このデータでは、ほぼ0.25 mm/S ~ 0.30 mm/Sの値となっている。この時の圧縮強度は33.2 N/mm²であった。これから推定すれば、削孔速度が0.35 mm/Sになれば10 N/mm²以下と推定される。



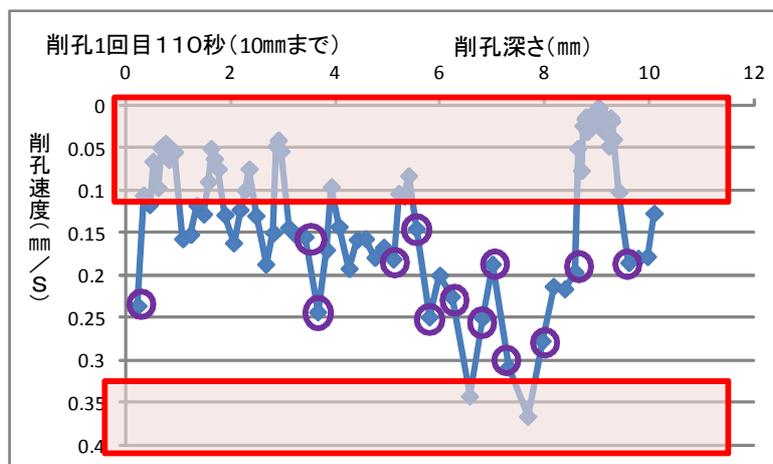
したがって削孔速度が0.10 mm/Sより遅いデータ、および0.35 mm/Sより速いデータを削除する。また砂や空隙に当たると速度が急激に変化するため、連続したデータが大きく変化する。この大きくデータが変化した前後のデータも除去することとする。

除去及び除去後の手順は以下とした。

- ①砂および空隙のデータを除去する。
- ②5回分のデータを1つのデータに集積する。
- ③削孔深さでソートする。
- ④このデータを移動平均で表示する。次頁以降に操作例を示す。

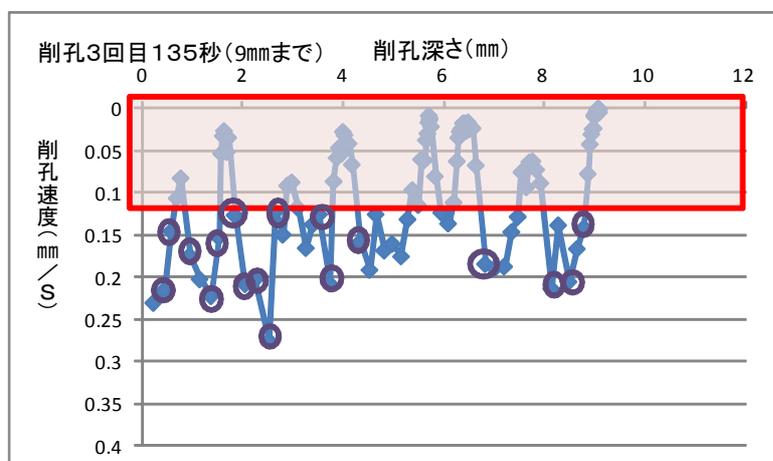
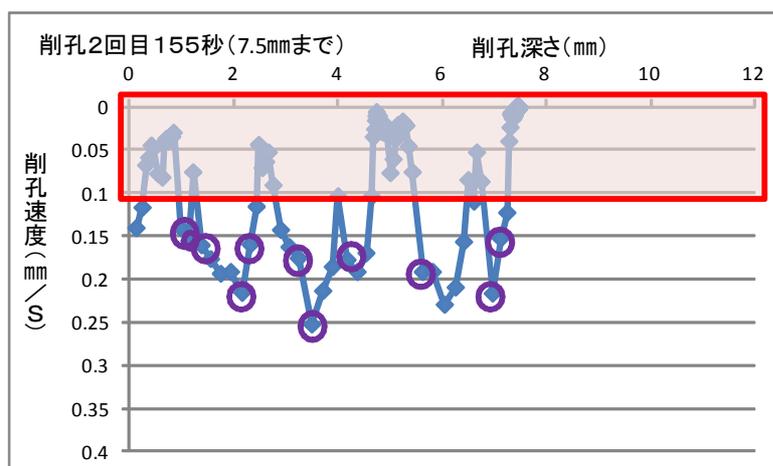
4.4.1 砂および空隙のデータを除去する

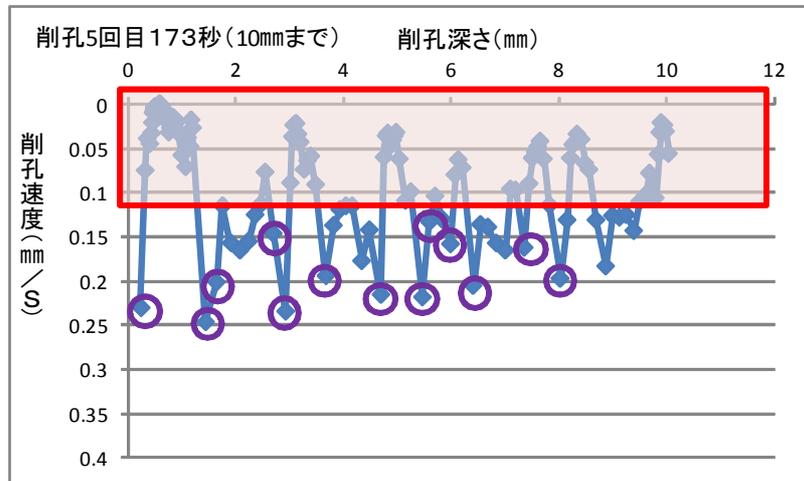
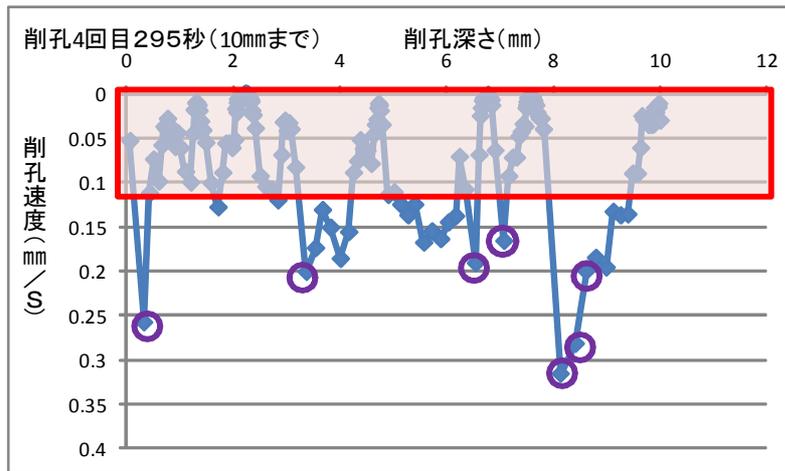
各削孔毎に除去すべきデータを示す。



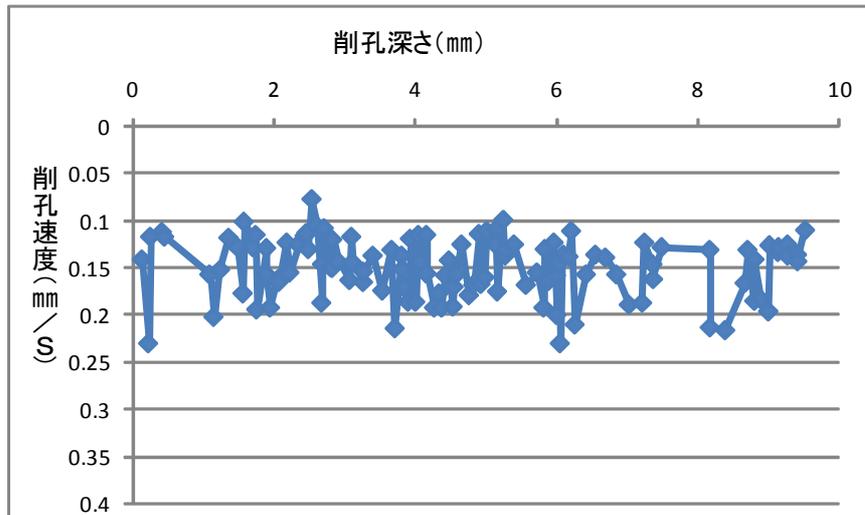
ここで  は、砂と空隙分として除去するデータを示す。

 は、連続したデータが大きく変化した場合で、大きくデータが変化した前後のデータとして除去するデータを示す。



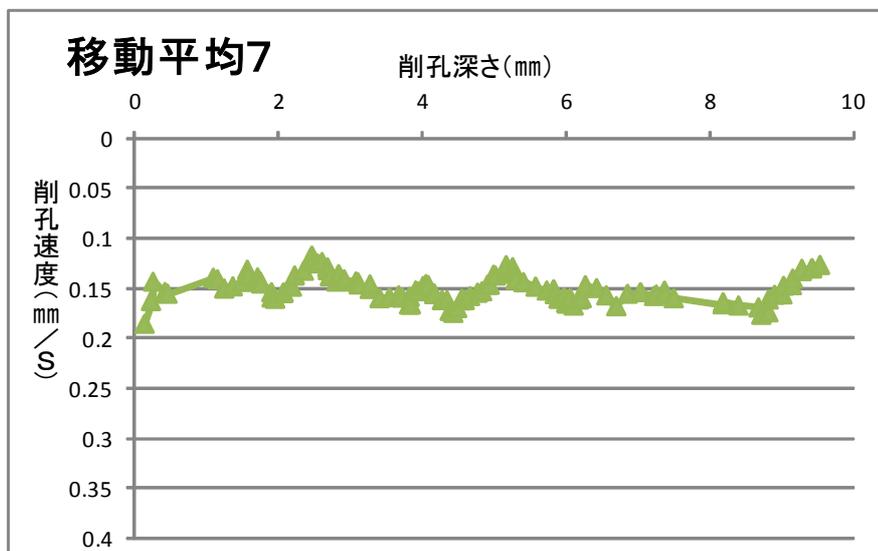


4.4.2 除去済の5回分のデータを1つのデータに集積し、削孔深さでソートする。
 除去済の5回分の削孔データを1つのデータに集積し、削孔深さでソートしたデータをグラフにして以下に示す。

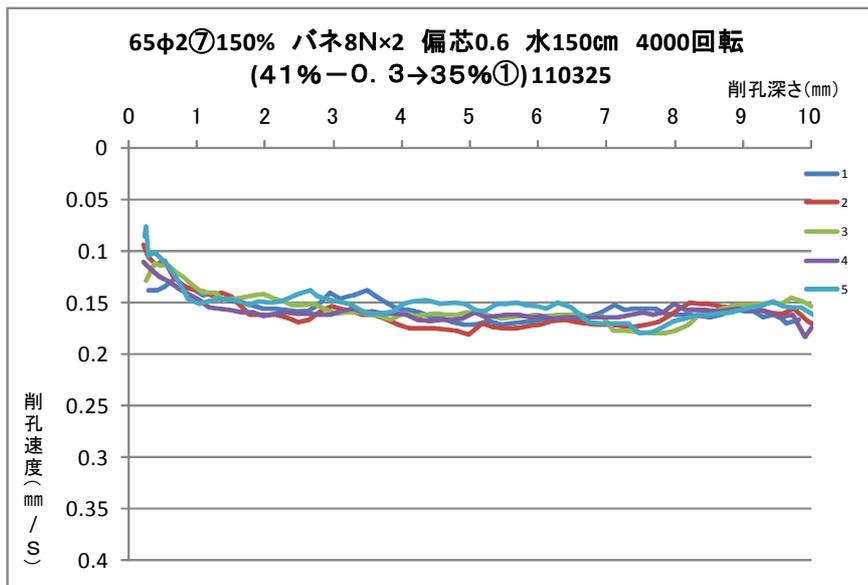


4.4.3 移動平均で表示する。

前項のデータを7つのデータの移動平均した図を以下に示す。



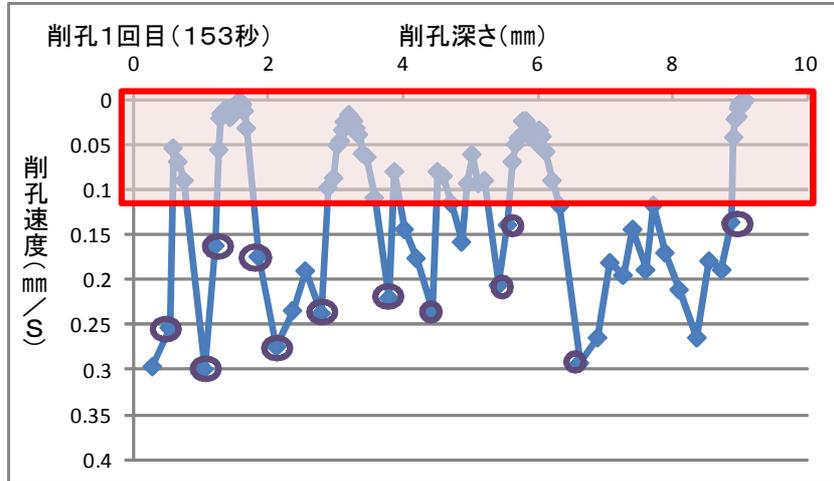
下図に 0.3 mm以下の微粒分が入った 水セメント比 41% のモルタルのデータを示す。



4.4.4 69%モルタルのセメントペースト分の抽出結果

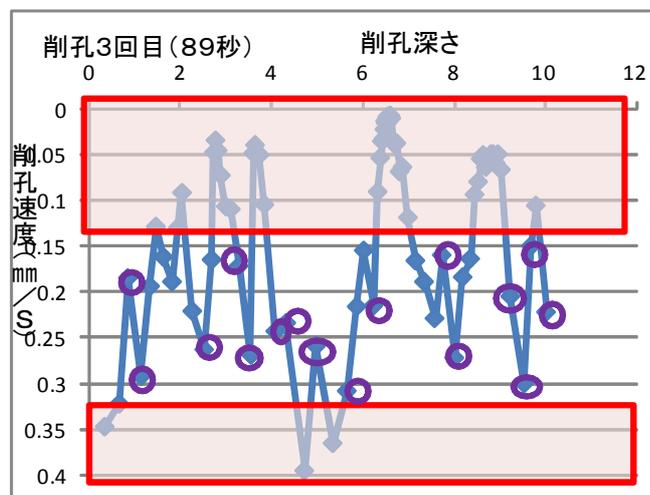
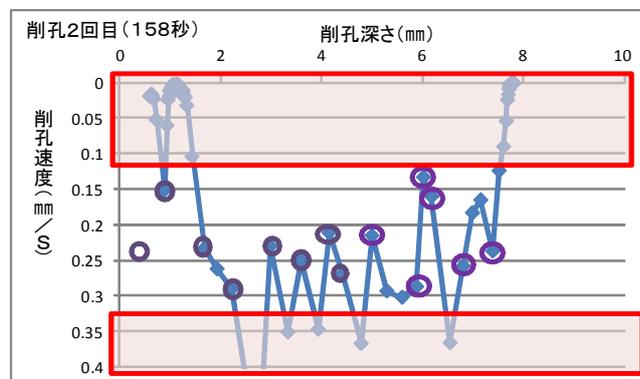
前項と同じく、69%モルタルからセメントペースト分の抽出を行った結果を示す。

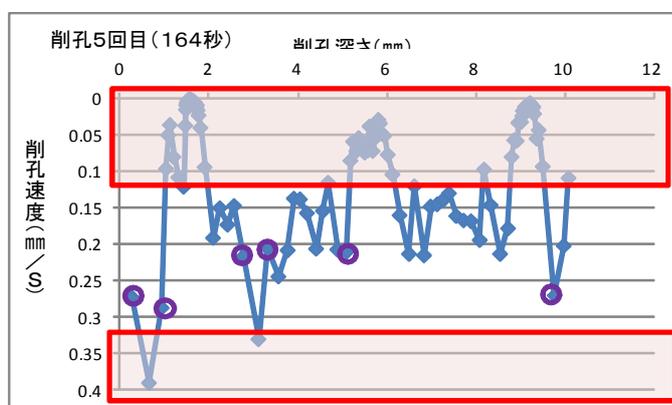
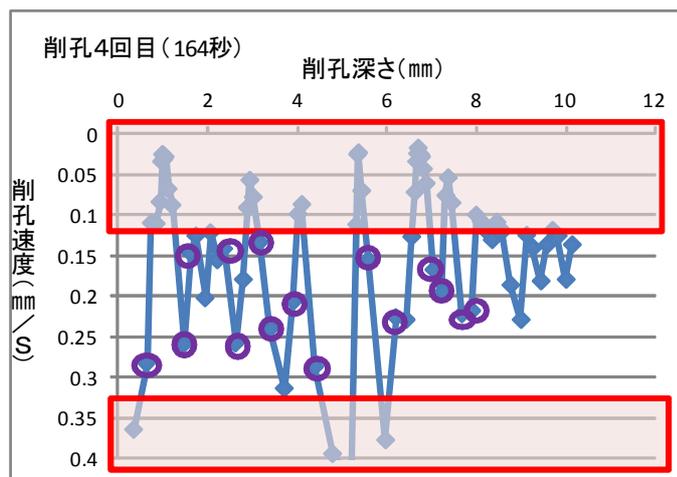
○各削孔毎に除去すべきデータを示す。



ここで  は、砂と空隙分として除去するデータを示す。

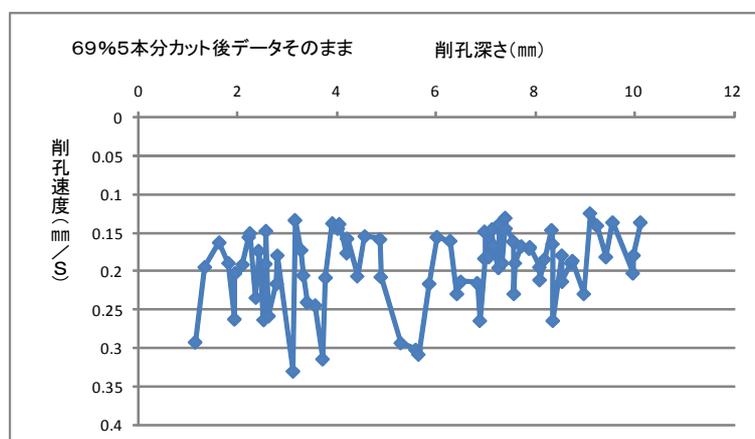
 は、連続したデータが大きく変化した場合で、大きくデータが変化した前後のデータとして除去するデータを示す。





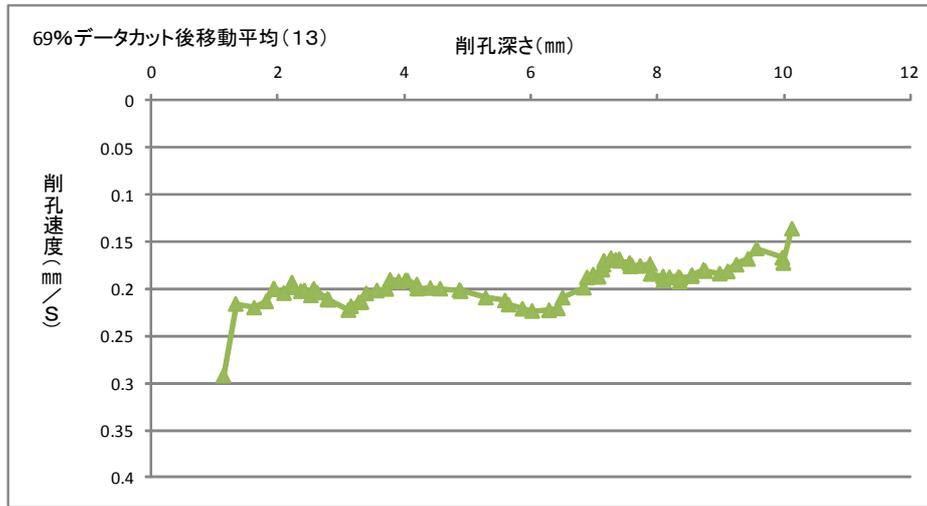
※は試験機のデータが1秒毎のため、41%と違い69%はすぐに削孔できてしまうためセメントペースト分のデータが少ない、これに対しセメントペーストにほんの僅か砂をかんで削孔速度が遅くなったところは逆にデータが多くなっている可能性がある。

- 除去済の5回分のデータを1つのデータに集積し、削孔深さでソートする。
除去済の5回分の削孔データを1つのデータに集積し、削孔深さでソートしたデータをグラフにして以下に示す。

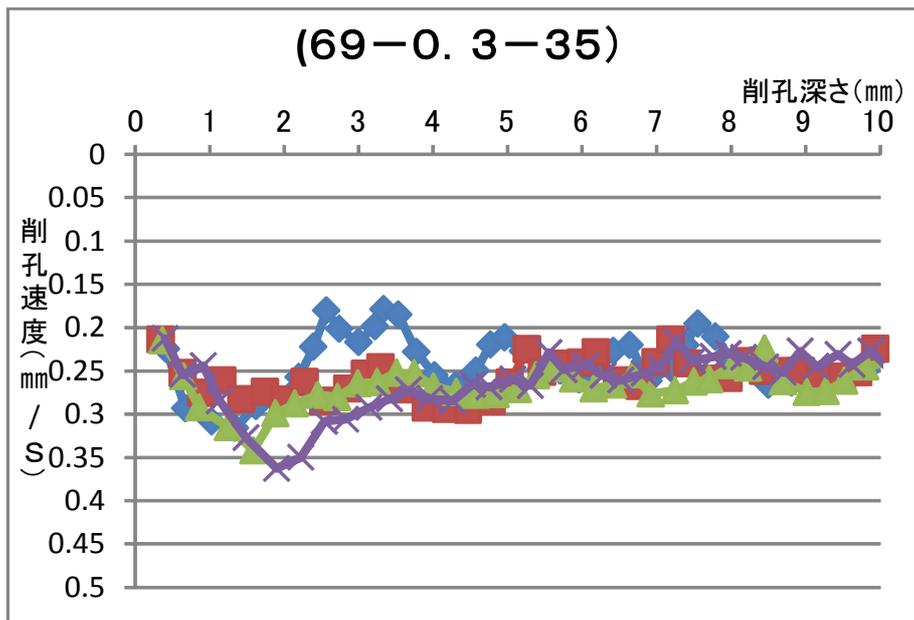


- 移動平均で表示する。

前項のデータ（13のデータ）を移動平均した図を以下に示す。



これに対しセメントペースト+微粒分のデータは以下であった。



これからすれば、今回の整理方法では本来のセメントペースト+微粒分のデータと乖離があるものと思われる。

5. 研究成果と今後の展望

今回の研究成果は以下のようにまとめられる。

- I. 煉瓦や石及びセメントペーストに対し、 $\phi 3$ のビットを用いて削孔速度に深さ補正を使わず削孔深さに対する削孔速度分布を測定できるようになった。

この場合の削孔条件は以下である。

試験装置	3号機
バネ強さ	5.88[N]×2本
ビット径	3[mm]
ビット偏芯	0.3[mm]
回転数	1500 ^{※1} [rpm]
削孔水	水道水
同上水圧:水平到達距離 ^{※2} (吐出水量)	150[cm] (221[g/min])

※1:1500は脆弱な場合

※2: $\phi 1$ のパイプ先端から水平吐出させた水がパイプ高さより90cm下がった時の水平距離

- II. モルタルに対し、 $\phi 2$ のビットで削孔速度に深さ補正を使わず、削孔深さに対する削孔速度分布を測定できるようになった。

この場合の削孔条件は以下である。

試験装置	3号機
バネ強さ	7.85[N]×2本
ビット径	2.0[mm]
ビット偏芯	0.3[mm]
回転数	4000
削孔水	水道水
同上水圧:水平到達距離* (吐出水量)	150[cm]
水流出角度(ケース角度)	1%前倒し

*: $\phi 1$ のパイプ先端から水平吐出させた水がパイプ高さより90cm下がった時の水平距離

II. モルタルの強度推定を行うために、モルタル内のセメントペーストの強度を求めるために以下の方法によって砂の値を除去することを考えた。高強度のモルタルでは強度を表す削孔速度が得られたが、この除去方法では低強度のものは砂だけでなく、本当の強度を表している部分も除去し、除去後のデータと本来のセメントペーストの強度のデータが乖離した。

以下に、今回行った砂と空隙分の影響をデータから除去する方法を示す。

- 削孔速度 0.12 mm/S 以下は砂と考え除去した。
- 削孔速度 0.32 mm/S 以上は空隙分と考え除去した。
- 連続したデータが大きく (0.1 mm/S 以上) 変化した場合、大きくデータが変化し前後のデータを除去した。

今後の展望

I. モルタルの強度推定方法の考案

今回、低強度のモルタルについて強度を表していると推察される削孔速度を検出できなかった。これを解消するため、引き続き以下の事項を検討する必要がある

○砂のデータの除去方法を変える。

現状では強度を表しているデータも除去している可能性がある

○1回/秒のデータの記録間隔を4回/秒で記録する。

セメントペーストの強度を表している部分は少ないと思われるが、弱いモルタルではその部分を速く削孔してしまい、データが少なくなるため。

○移動平均では、速度が遅い方に近い結果となるのでこれに替る方法を考える。

例えば、最初の 1 mm が 0.20 mm/S であればデータは5つとなる。

次の 1 mm が 1 mm/S であればデータは1つである。

この 2 mm の平均は 0.6 mm/S が正解であるが、移動平均では 0.33 mm になってしまう。

II. モルタルの強度推定が出来た場合、コンクリートの強度推定へと展開する。

第 2 部

高含浸性強化剤の開発および性能評価

—目次—

1. 序論	
1.1 本研究の背景	．．．．．P. 1
1.2 本研究の目的	．．．．．P. 3
2. 既存の材料と開発薬剤の概要	
2.1 概説	．．．．．P. 4
2.2 コンクリート含浸改質材料の分類	．．．．．P. 4
2.3 含浸改質材料の現状と開発する含浸強化剤	．．．．．P. 6
2.4 開発薬剤の概要	．．．．．P. 7
2.5 開発研究の進め方	．．．．．P. 7
3. 被塗布供試体への塗布による高含浸性強化剤の性能評価	
3.1 調合・塗布回数・含浸深さ・向上強度の関係	
3.1.1 予備試験	
1) セメントペーストへの塗布（1回目）	
①概説	．．．．．P. 8
②薬剤の調合	．．．．．P. 8
③供試体の作成	．．．．．P. 9
④実験の条件	．．．．．P. 9
⑤試験方法	
a) 着色による含浸深さの評価	．．．．．P. 10
b) 削孔試験による含浸深さの評価	．．．．．P. 10
⑥実験の結果と考察	
a) 着色による含浸深さの評価	．．．．．P. 12
b) 削孔試験による深さの評価	．．．．．P. 13
⑦今後の課題	．．．．．P. 18
2) 供試体の養生方法の検討	
①概説	．．．．．P. 19
②供試体の調合	．．．．．P. 19
③実験の条件	．．．．．P. 19
④試験方法	．．．．．P. 20
⑤実験の結果と考察	．．．．．P. 21
⑥今後の課題	．．．．．P. 23

3) セメントペーストへの塗布 (2回目)	
①概説	．．．．．P. 24
②高含浸性強化剤の調合	．．．．．P. 24
③供試体の作成	．．．．．P. 25
④実験の条件	．．．．．P. 25
⑤試験方法	．．．．．P. 26
⑥実験の結果と考察	．．．．．P. 26
⑦今後の課題	．．．．．P. 29
4) 材料別の含浸深さの確認	
①概説	．．．．．P. 30
②供試体	．．．．．P. 30
③高含浸性強化剤の調合	．．．．．P. 30
④実験の条件	．．．．．P. 31
⑤試験方法	．．．．．P. 31
⑥実験の結果と考察	．．．．．P. 32
⑦今後の課題	．．．．．P. 32
⑧増粘剤による影響 (参考)	．．．．．P. 33
3.1.2 本試験	
1) セメントペーストへの塗布 (3回目)	
①概説	．．．．．P. 34
②高含浸性強化剤の調合	．．．．．P. 34
③供試体の作成	．．．．．P. 35
④実験の条件	．．．．．P. 35
⑤試験方法	
a) 断面の撥水による含浸深さの評価	．．．．．P. 36
b) 削孔試験による含浸深さおよび強化の評価	．．．．．P. 36
⑥実験の結果と考察	
a) 断面の撥水による含浸深さの評価	．．．．．P. 37
b) 削孔試験による含浸深さおよび強化の評価	．．．．．P. 42
c) 評価方法による比較 (撥水断面観察法と削孔試験法による比較)	．．．．．P. 59
2) 煉瓦への塗布 (参考)	
①概説	．．．．．P. 63
②高含浸性強化剤の調合	．．．．．P. 63
③供試体	．．．．．P. 63
④実験の条件	．．．．．P. 64
⑤試験方法	．．．．．P. 64

⑥実験の結果と考察	．．．．．	P. 65
3.2 曲げ強度の向上性付与の評価		
3.2.1 概説	．．．．．	P. 75
3.2.2 試験方法	．．．．．	P. 75
①セメントペーストの曲げ強度向上性付与の評価		
a) 概説	．．．．．	P. 76
b) 実験の条件	．．．．．	P. 76
c) 実験の結果と考察	．．．．．	P. 77
②煉瓦の曲げ強度向上性付与の評価		
a) 概説	．．．．．	P. 78
b) 実験の条件	．．．．．	P. 78
c) 実験の結果と考察	．．．．．	P. 79
3.3 吸水防止性の評価		
3.3.1 概説	．．．．．	P. 81
3.3.2 要因と水準	．．．．．	P. 81
3.3.3 試験方法	．．．．．	P. 82
3.3.4 実験の結果と考察	．．．．．	P. 83
3.4 水蒸気透過性の評価		
3.4.1 概説	．．．．．	P. 84
3.4.2 要因と水準	．．．．．	P. 84
3.4.3 試験方法	．．．．．	P. 84
3.4.4 実験の結果と考察	．．．．．	P. 85
3.5 塩害および凍害に対する耐久性試験		
3.5.1 概説	．．．．．	P. 87
3.5.2 試験方法	．．．．．	P. 87
3.5.3 セメントペーストでの評価		
①概説	．．．．．	P. 89
②実験の条件	．．．．．	P. 89
③実験の結果と考察	．．．．．	P. 90
3.5.4 コンクリートでの評価		
①概説	．．．．．	P. 93
②実験の条件		
a) 被塗布供試体	．．．．．	P. 93
b) 塗布量	．．．．．	P. 93
c) 測定サイクル	．．．．．	P. 94
③実験の結果と考察	．．．．．	P. 95

4. 総括
4.1 結論

. P. 99

1. 序論

1.1 本研究の背景

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おいて、経年のために各種劣化により構造・意匠の両面に問題が発生している。

表 1-1 に屋外にある構造物表層の材料劣化の種類を示す。本研究では、これらの劣化の中から長期にわたり、より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する。

ここで塩類風化とは、雨水や地下水を媒介として構造体内部に侵入した塩類が、溶液の蒸散により構造体内部に塩を析出し、これが繰り返されることにより成長した塩の結晶の膨張圧で構造物表層の剥離を引き起こす風化機構である。コンクリートにおいても硫酸塩劣化として深く関わっている。**写真 1-1** に煉瓦の塩類風化の状況を示す。ここで**(a)**は珍しい初期劣化の一例であり、**(b)**は劣化がかなり進行した例である。

表 1-1 各種構造物の表層劣化の種類

分類	劣化の種類・原因
物理的風化 (破砕)	除荷風化
	シーティング*1
	日射風化
	乾燥風化、スレーキング*2
	塩類風化
生物風化	凍結破砕風化(凍害)
	虫害
	植物による 地衣菌類による
化学的風化 (分解)	水和作用
	加水分解作用
	溶解作用
	酸化作用
	炭酸化
化学的浸食	溶脱
機械的浸食	溶食
	雨食
	河食
	風食(砂)
	海食
人的破壊	雪食
	氷食

*1: 花崗岩等の岩石が地表に露出した際に、岩石にかかっていた力が減少し、地表に平行な割れ目が形成される現象。

*2: 堆積岩類が乾湿繰り返しにより土砂化する現象。



(a) 煉瓦の塩類結晶膨張による部分的隆起



(b) 塩類風化による煉瓦の欠損

写真 1-1 塩類風化の状況

(参考)

本研究では実験に先立ち、明治から大正時代に建造された京都府舞鶴市の赤煉瓦倉庫群の劣化調査を行なった。**写真 1-2** にその一例を示す。**写真 1-2(b)** は表層が劣化により剥落し材料内部へと劣化が進行している状況である。原因としては塩類風化が疑われた。ここでは過去の補修により**写真 1-2(c)** に示すようにモルタルによる剥落部分の被覆が行われているが、外観を損ねるばかりか、将来の経年劣化により内部劣化部分を含めて剥落する恐れがある。

また札幌における事前調査では、塩類風化とは異なるが、煉瓦、コンクリート、タイル等の多孔質材料に、**写真 1-3** に示すように塩を含む水の凍結によるひび割れや、スケーリングが発生していた。

歴史的建造物においては劣化状況を現在の状態に留め、有形で保存、修復することが求められる。またコンクリート等の構造物は、ライフサイクルの立場から考えると、美観・景観を確保しつつ本来の使用年数までメンテナンスをして使用していくことが望ましい。これに対して、これらの修復・保存や劣化予防が出来る材料はほとんど無いのが現状である。

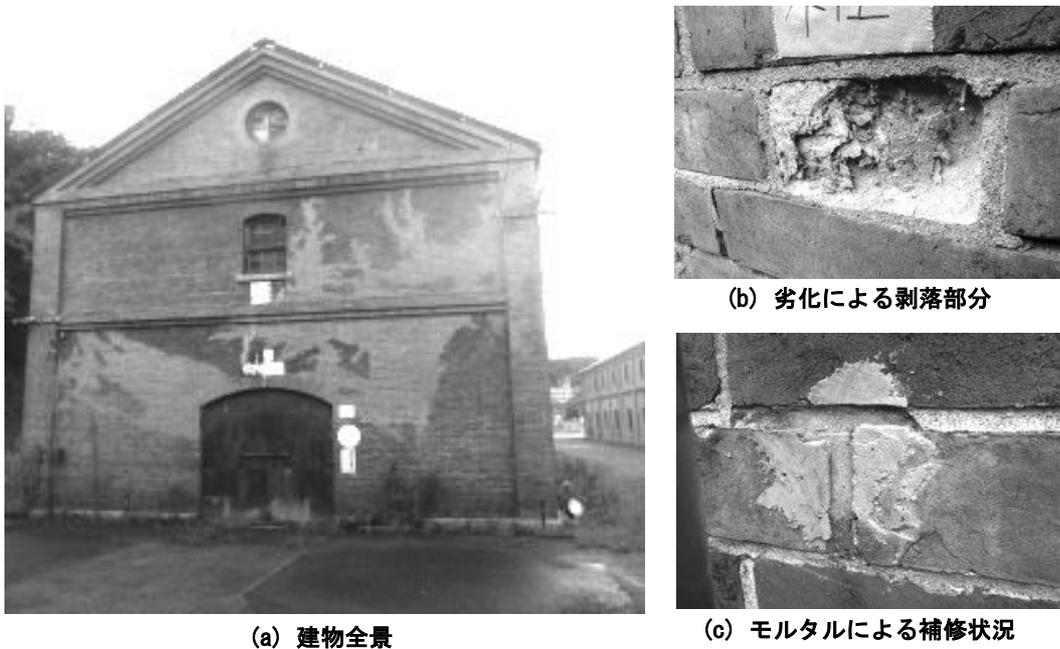


写真 1-2 舞鶴煉瓦倉庫

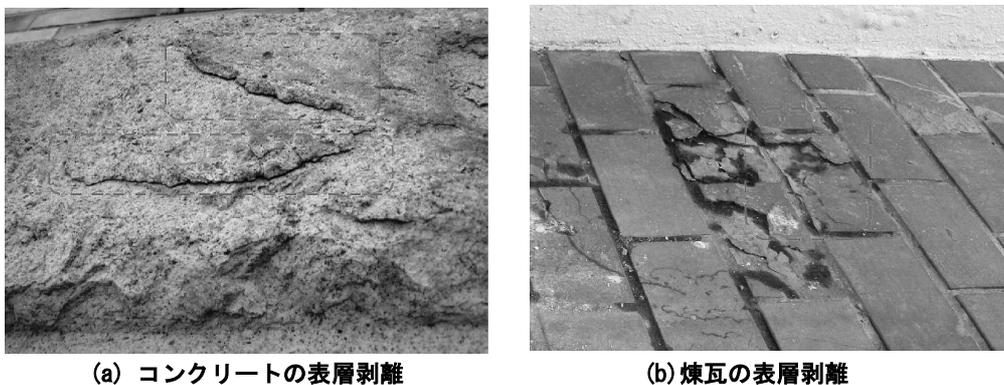


写真 1-3 寒冷地における凍害

1.2 本研究の目的

現在、材料本来の外観を保ちつつ、補修・劣化予防を行う材料として含浸改質材がある。しかし、それらの多くが防水や吸水抑制の性能に特化した材料であり、表層の強度の改質を行う物はほとんど無い。

表層劣化の一例として多孔質材料の表層は凍害や塩類風化等により微細なひび割れが生じ始め、症状が進むとひび割れはさらに大きくなり、最悪の場合には表層部分の剥落も発生してくる。このように脆弱化した劣化部分に対して、モルタルやエポキシ樹脂等の表層欠落部分の充填および強化による補修では、長期的に見た場合、強化部裏面の脆弱部において応力が発生し、補修部分一帯が剥落する可能性がある。

そこで本研究では、高い含浸性を持ち、コンクリート、石材、煉瓦、木材などの多孔質材料の表層部分の強度を改善し、さらに水や各種塩類および CO_2 などの劣化因子の侵入防止効果、また場合によっては内部空気の熱膨張に対応できる水蒸気透過性を有する高含浸性強化剤の開発を目指す。図 1-1 に表層劣化のイメージと期待される高含浸性強化剤の諸特性を示す。

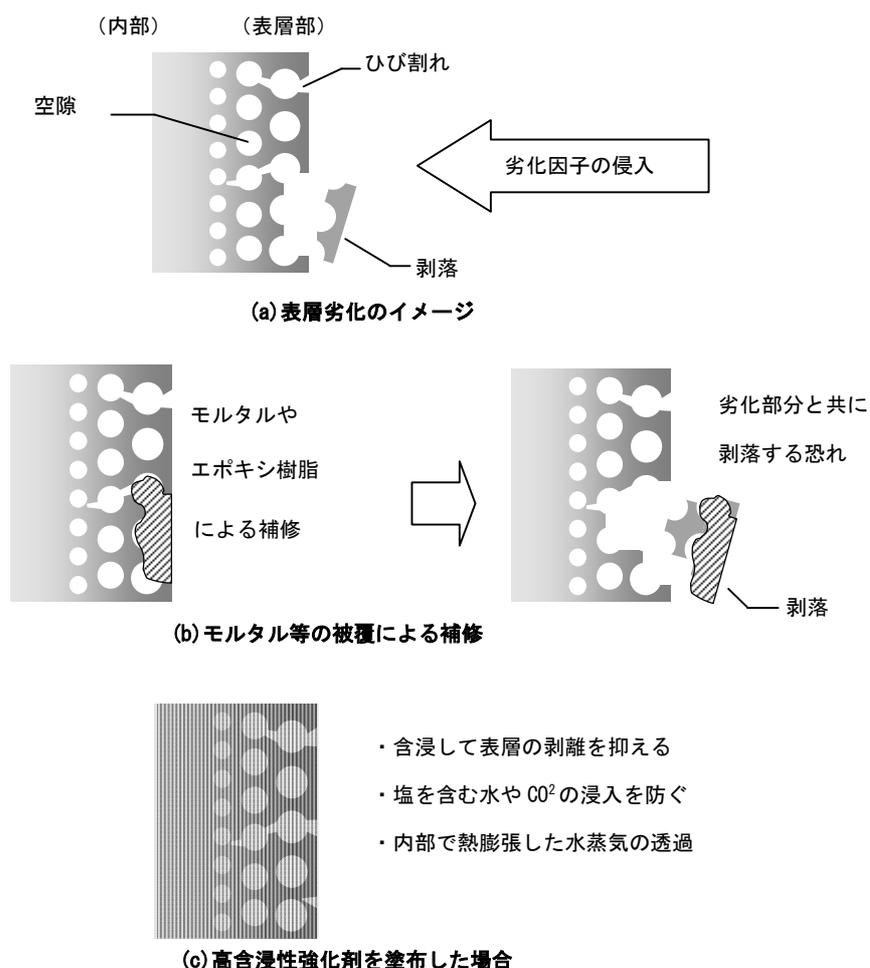


図 1-1 表層劣化のイメージと期待される高含浸性強化剤の諸特性

2. 既存の材料と開発薬剤の概要

2.1 概説

含浸改質材とは、コンクリートの表面より含浸させることでコンクリート表層部分の組織の改質を行い、コンクリート構造物の耐久性を向上させる材料である。

本章では現在用いられている代表的な含浸改質材の種類と効果を示すとともに、開発を行う含浸強化剤に求められるニーズについて述べる。

2.2 コンクリート含浸改質材料の分類

代表的な含浸改質材について、発揮する効果と含浸改質材の主成分から図 2-1 に示すように分類する。

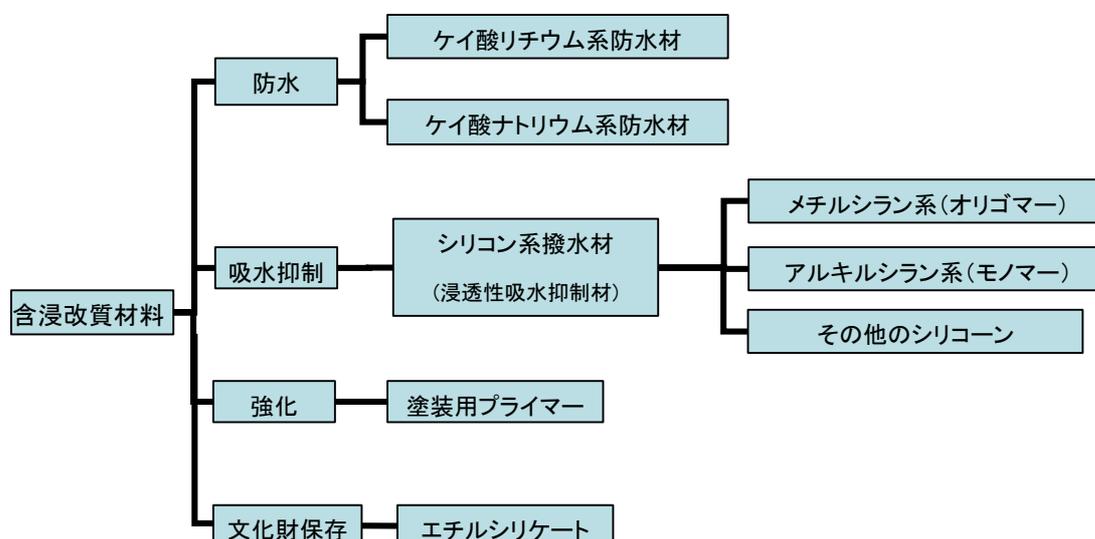


図 2-1 含浸改質材料の分類

(1) 防水

a) ケイ酸リチウム系防水材料

ケイ酸リチウム (Li_4SiO_4) を主成分とする水溶液である。水溶液中では図 2-2 に示すような $\text{Si}(\text{OH})_5$ の連続する鎖状の分子が存在している。含浸後はコンクリートの細孔表面でナノメートル単位の厚さの固形の連続した被膜を形成する。コンクリート中の中性化した組織をアルカリ性のポリシリケートの連続被膜で覆い、コンクリートの中性化を抑える働きを持つ。コンクリートの脆弱部では、脆弱組織間を連続被膜で覆うことで、脆弱部を強化する働きを持つ。コンクリートの細孔を完全に充填しないため、含浸層は水蒸気透過性を有している。

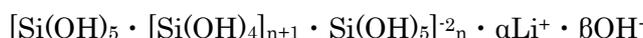
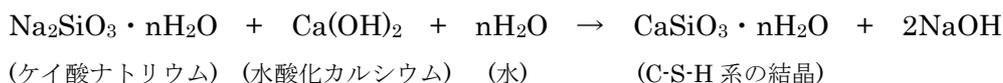


図 2-2 水溶液中でのケイ酸リチウムの構造膜式図

b) ケイ酸ナトリウム系防水材料

被塗布コンクリート中の水酸化カルシウムと反応し、毛細管空隙中にケイ酸カルシウム水和物(C-S-H)を形成する。この反応は水分存在下で緩やかに進行し、含浸後も水分が供給されると、未反応のケイ酸ナトリウムがゲル状になり、水分移動に伴いコンクリート内部に浸透する。また乾燥によりケイ酸ナトリウム系含浸材自体がガラス状に硬化する。コンクリートの中性化部分では、細孔がアルカリ性のケイ酸ナトリウム系表面含浸材で充填されるため、その部分の組織はアルカリ性となる。コンクリート脆弱部分においては脆弱組織間にガラス状物質が充填されることで、脆弱部分を強化する働きがある。



(2) 吸水抑制 (撥水材)

a) シリコン系

シリコン系表面含浸材は図 2-3 に示すようなアルキルアルコキシシランモノマーあるいはオリゴマー、またはこれらの混合物を主成分とし、水または有機溶剤であるミネラルスピリットやイソプロピルアルコールで希釈されている。コンクリート表層部に含浸させることにより疎水層を形成し、外部からの水や塩化物イオンの浸入を抑制する。シリコン系含浸材によって細孔が充填されることはないため、コンクリート内部からの水蒸気透過性を有する。

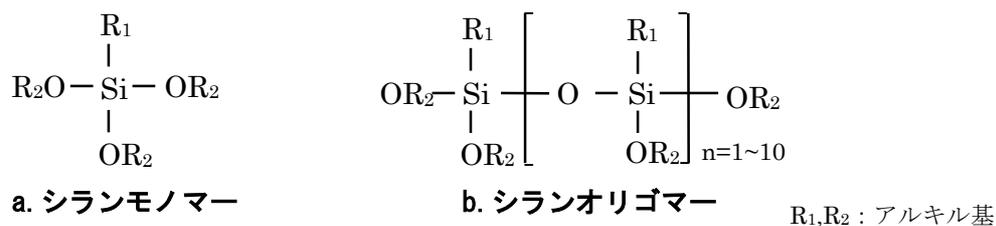


図 2-3 アルキルアルコキシシランモノマーおよびオリゴマーの構造式

(3) 強化

a) プライマー

仕上材の施工を行う前に、コンクリートやモルタル表面の脆弱部分の強化を行う。また、多孔質材料表面を被覆し、接着面積を大きくさせる事で仕上材の接着性を向上させる。

(4) 文化財保存

a) エチレンシリケート

エトキシ基を有するシロキサン結合で構成される無機ケイ素化合物でエトキシ基は加水分解反応により脱離する。

2.3 含浸改質剤の現状と開発する含浸強化剤

近年、研究発表の対象となった表面含浸材の種類ほとんどがシラン系およびケイ酸塩系表面含浸材であり、吸水防止性とそれに伴う遮塩性の付与によるコンクリートの耐塩害性が向上できるという結果を示しているものが多い。これに対して強化の点から見ると、ケイ酸質系の含浸材は、被塗布材内部へ含浸して内部空隙に結晶を生成することにより組織を緻密化し、表層の強度の向上を図ろうとするものである。これは空隙を充填する結晶物質が応力を負担することで圧縮強度もしくは耐摩耗性が向上しているが、脆弱組織の接着を行っているわけではないため引張応力（脆弱部の剥落等の抵抗性）に弱いと考えられる。また、材料表面におけるひび割れのように、劣化オーダーが大きくなると対応が難しい。また、プライマーは表面より含浸して材料表層の強度の改善を行うが、本来の目的は下地処理であり、ごく表層のみの強化に留まり、脆弱部分の補修材として用いることには難がある。

そこで本研究では、材料表面より接着力のある樹脂を材料内部の健全部分まで含浸させ、表層の脆弱部分との接着を行うことで表層の剥落を抑え、吸水抑制効果等の現状の含浸改質剤の持つ効果も有する含浸性強化剤の開発を行う。また、ケイ酸系含浸改質材と異なり、コンクリート中の物質（水酸化カルシウム）との反応によらず、自身が材料内で反応硬化するため、コンクリートに限らず、木材や煉瓦等の多孔質材料への使用も視野に入れて研究開発を行うこととする。

2.4 開発薬剤の概要

本研究では含浸強化剤の硬化体として耐候性に優れ、多孔質材料内部の空隙を充填するとともに粒子間の接着力を増強させることのできるウレタン系の樹脂を使用した。同強化剤は、塗布するだけで被塗布体内部に浸透し、ウレタンの主剤と硬化剤の共重合により得られるポリウレタンの硬化体（以下、樹脂固形分と呼ぶ）を形成させることを目的としている。しかし原液のままでは粘度が高く、多孔質材料へ塗布する際には、材料内部に含浸しにくいいため、含浸性を増すことのできる添加剤の混入を行った。さらに防汚性と吸水防止性を付与するためにシリコン系の助剤(1)を、または水蒸気透過性等を付与するための細孔形成のために同じく親水性の樹脂であり文化財の修理現場でも使用される助剤(2)を添加した調合も含めて実験を行う。表 2-1 に本実験で使用した含浸強化剤の成分とその機能を示す。

表 2-1 含浸強化剤の成分と機能

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
助剤(1)		防汚・吸水防止性の付与
助剤(2)		浸透性・水蒸気透過性の付与・地衣菌類の着床防止

2.5 開発研究の進め方

劣化した多孔質体の表層部分を想定し、主にセメントペーストを供試体として使用し、ここに高含浸性強化剤の塗布を行い、改質効果の評価を行う。高含浸性強化剤は、調合および塗布量（塗布回数）を要因として数種類の水準をとり、各種試験を行った。

表 2-2 に示す項目の測定を行った。浸透深さの測定により、含浸のしやすい調合、塗布回数と含浸深さの関係の評価を行い、削孔試験により強度改善深さの評価を行う。また、曲げ試験による材料の改質状況の評価、含浸強化剤の塗布面からの吸水性および水蒸気透過性の評価、塩害および凍害に対する抵抗性の評価を行う。

表 2-2 測定項目

測定項目	浸透性
	削孔抵抗性
	曲げ強度の向上性
	吸水防止性
	水蒸気透過性
	塩害および凍害に対する抵抗性

3. セメントペースト供試体への塗布による高含浸性強化剤の性能評価

3.1 調合・塗布回数・含浸深さ・向上強度の関係

3.1.1 予備試験

1) セメントペーストへの塗布（1回目）

①概説

本試験では目標とする含浸深さを得るための調合および塗布回数の最適解を求めるために、各塗布条件における高含浸性強化剤の含浸深さおよび強度の測定を行った。高含浸性強化剤の着色による含浸深さの測定、削孔試験による表層強度分布および含浸深さの評価を行った。

②薬剤の調合

表 3-1 に高含浸性強化剤の成分とその機能を示す。主剤と硬化剤により得られる樹脂の硬化体を樹脂固形分と呼び、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。図 3-1 に高含浸性強化剤の各成分の調合比率を示す。

表 3-1 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		浸透性の制御

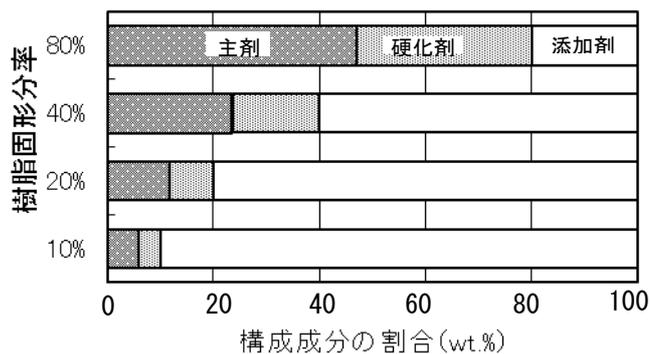


図 3-1 成分の調合比

③供試体の作成

供試体は劣化した多孔質体を想定し、W/Cが0.9の強度の低いセメントペースト硬化体(40×40×80 [mm])とし、養生期間は脱型後の水中養生期間を14日とした。表3-2に使用材料を、表3-3に各材料の調合と圧縮強度試験結果を示す。

表 3-2 使用材料

材料	摘要
水	水道水(密度:1.0 g/m ³)
セメント	普通ポルトランドセメント(密度:3.15 g/m ³)
増粘剤	メチルセルロース系増粘剤

表 3-3 セメントペースト供試体の調合

水セメント比 W/C	単位量(g/L)			圧縮強度 (MPa)
	水 W	セメント C	増粘剤 A	
0.9	740	823	7.35	12.3

④実験の条件

表3-4に示す要因と水準により試験を行った。塗布回数については、各調合の最大塗布回数および異なる調合間での塗布回数で比較を行えるように、表のような回数で塗布を行った。また、塗布回数を増やしていき、それ以上含浸しなくなる塗布回数を最大塗布回数とした。

表 3-4 調合および塗布回数

要因	樹脂固形分率 (wt.%)	塗布回数 (回)											
		2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24
水準	10	-	2	4	6	-	8	10	-	15	-	-	90*
	20	-	2	4	6	-	8	10	-	15	20	55*	-
	40	-	2	4	6	7	8	10	14*	-	-	-	-
	80	1	2*	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	無塗布	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

[注] *:最大塗布回数

⑤試験方法

a) 着色による含浸深さの評価

高含浸性強化剤に着色料を添加し、供試体への塗布を行った。養生して樹脂を硬化させた後、供試体を切断し、着色された部分を含浸深さとして測定することとした。表 3-5 に使用した着色料の概要を示す。

表 3-5 着色料の概要

着色料の分類	成分	色
粉体染料	C.L.Solvent Blue 44	青
	C.L.Solvent Red 132	赤
油性インク	溶剤(キシレン、アルコール等)、 顔料、樹脂(ダンマル樹脂等)	青
		赤

b) 削孔試験による含浸深さの評価

小径ドリル削孔試験装置を用いて供試体を削孔し、削孔速度により深さ方向の強度分布を推定した。表 3-6 に試験機の条件を示す。供試体は 40×40×80 (mm) のセメントペーストとし、高含浸性強化剤の配合毎に各 2 本ずつ用いた。各供試体に 3 回の削孔を行い、各々 1 秒毎のビット先端位置を削孔深さとして測定した。最大削孔深さは 10 (mm) とした。削孔時には先端ビットの磨耗抑制および削粉排出を目的としてビット先端部に水滴を垂らしながら湿式の測定を行なった。試験状況を写真 3-1 に示す。

表 3-6 試験機の条件

試験装置	2号機
バネ強さ	13.02-0.05 α [N]*
ビット径	3[mm]
回転数	4000[rpm]
削孔水	HCB**
自然落下水量	52[g/min]

*: α = 削孔深さ(mm)

** : HCB = フローリック高性能AE減水剤SF500H
CB (ポリカルボン酸系) 5%溶液



写真 3-1 削孔試験の状況

削孔試験の結果より、時間と深さの関係が得られる。(図 3-2) このグラフの傾きが削孔速度を表す。当該試験装置 (2 号機) は機構の特性上、削孔深さが深いほど同じ強度であっても削孔速度が低下するため (主に削粉による摩擦抵抗の影響と考えられる)、削孔速度の算出には深さ方向に補正値を使用した。ここで得られた深さと削孔速度の関係 (図 3-3) から削孔強度分布の評価を行った。

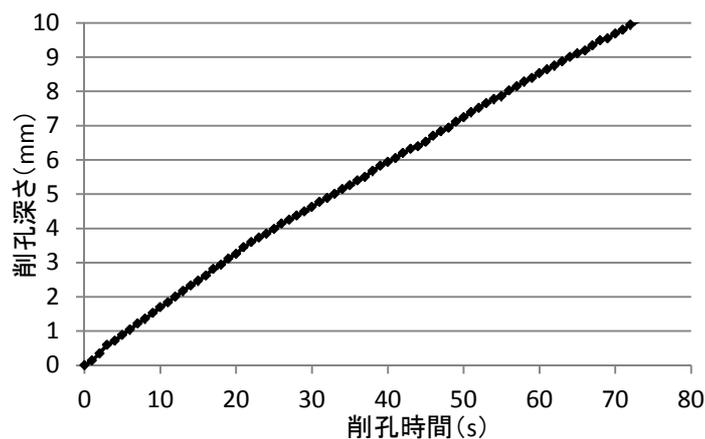


図 3-2 削孔時間と削孔深さの関係
(セメントペーストを供試体とした場合)



図 3-3 削孔深さと削孔速度の関係

⑥実験の結果と考察

a) 着色による含浸深さの評価

写真 3-2 に切断面の様子を示す。粉体染料および油性インク共に、図中に示す矢印間程度のごく表層部分に留まり、内部まで含浸していなかった。一方、切断面への散水によれば、濡れ色に差違が見られ、これが含浸部分と非含浸部分を示していると考えられるため、着色料と高含浸性強化剤は分離し、高含浸性強化剤のみ含浸したと考えられる。再度実験を行い、断面の評価を行う必要がある。

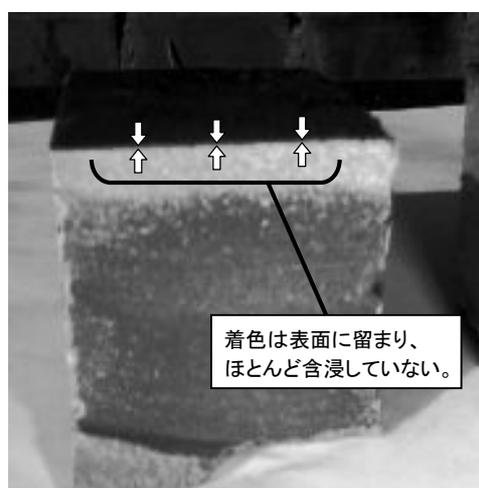


写真 3-2 切断面の様子

b) 削孔試験による含浸深さの評価

図 3-4 に削孔試験結果の例を示す。縦軸は削孔速度を表し、上側にいくにしたがって速度が遅い (=強度が高い) ことを示す。同図によると、無塗布供試体は表面が 0.35~0.4mm/s と最も速く (=強度が低く)、内部にいくにしたがって速度が遅く (=強度が高く) なっている。深さ 5mm 付近まで遅くなり続け、それ以降は 0.12m/s 付近で一定であった。この結果より無塗布セメントペースト供試体の表面から 5mm 程度の表層部は脆弱であり、それより深い部分は一様な強度を有していると考えられる。これに比べて、樹脂固形分率 20%を 20 回塗布した供試体を例に挙げると、表面から 4mm 程度までは削孔速度が 0.1mm/s より遅く、強度の上昇が見られ、5mm 以深は無塗布供試体とほぼ同様の削孔速度を示している。この結果からは、セメントペースト供試体の表層部に存在する脆弱な部分が強化されていることがわかる。樹脂固形分率 10%を 10 回塗布した供試体での削孔試験結果では、3~10mm の深さは無塗布供試体と同様の削孔速度であるが、3mm を境に表面にかけて削孔速度が遅くなり強度が上昇している。樹脂固形分率 20%を 55 回塗布した供試体では、0~10mm と全ての深さにおいて削孔速度は 0.05mm/s 前後であり、強度が上昇している。このように無塗布供試体と比べ、強化がなされたと判断できる深さを、「含浸強化深さ」として、樹脂固形分率と塗布回数と含浸強化深さの関係を調査した。

各種調合、塗布回数について同様に測定した。図 3-5~9 に無塗布供試体および各調合と各塗布回数の削孔試験の結果を示す。図 3-10 に、各調合と塗布回数毎の含浸強化深さを示す。同図によれば、ばらつきは大きいものの、塗布回数が多くなるほど含浸強化深さは深くなる傾向があり、両者の関係に及ぼす樹脂固形分率の影響は見られない。ただし、樹脂固形分率が多くなるほど最大の塗布回数が少なくなるため、最大含浸深さは、樹脂固形分率が少ないほど深くなる。

本試験で使用したセメントペースト供試体は前述したように、表面から 5mm ほどの深さの表層部分が脆弱であり、強度に勾配が生じていた。このため、高含浸性強化剤の含浸量と向上した強度の関係を評価することは困難であった。また塗布による含浸量の多い供試体において高含浸性強化剤の硬化後に表層にひび割れが生じていた。これは脆弱部分と健全部分の間で含浸量に大きな差が生じたため、樹脂の硬化時に発生する内部応力に差が生じたことが原因と考えられる。

これらの供試体の表層の脆弱部分は、低強度のセメントペーストを作成するために、水中養生の期間を 2 週間としたことが原因と考えられる。高含浸性強化剤の塗布量と向上強度の関係の評価を行うには、表面から内部まで均一な強度の供試体が必要である。

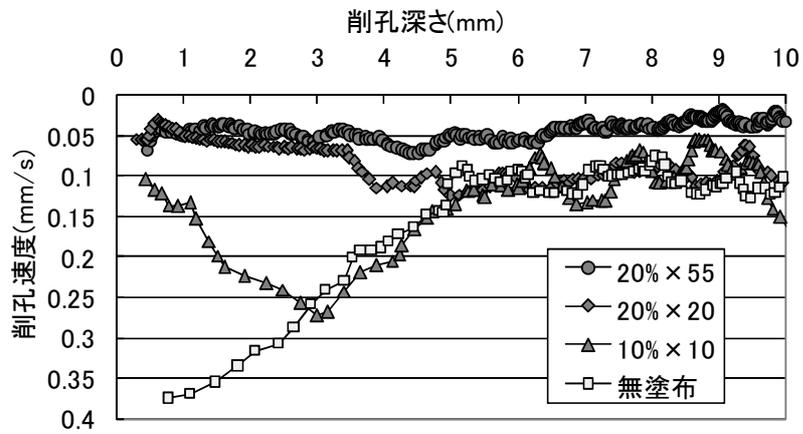


図 3-4 削孔試験結果の例

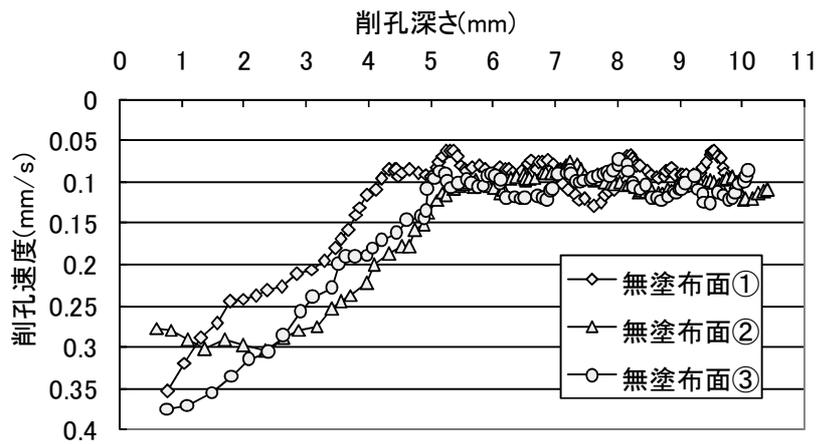
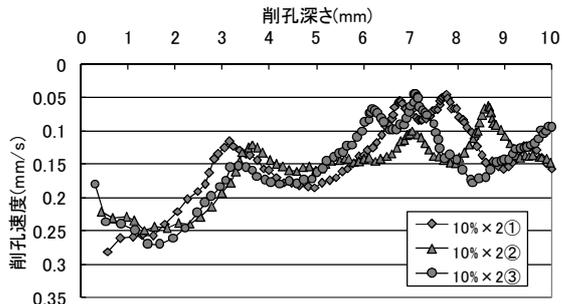
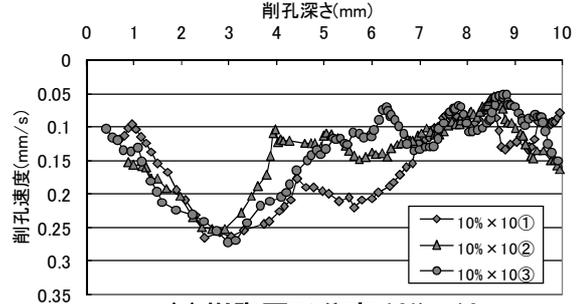


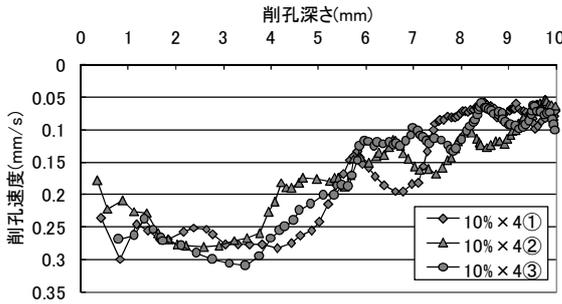
図 3-5 削孔試験結果 (無塗布)



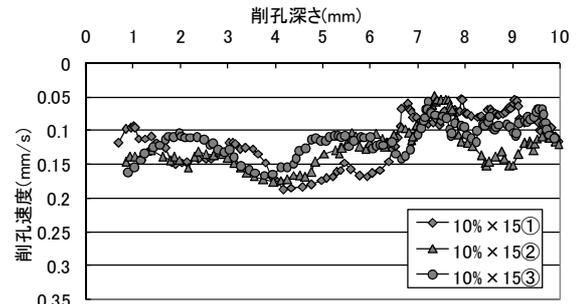
(a) 樹脂固形分率 10% × 2



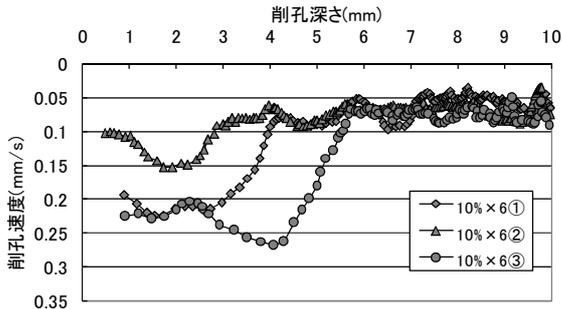
(e) 樹脂固形分率 10% × 10



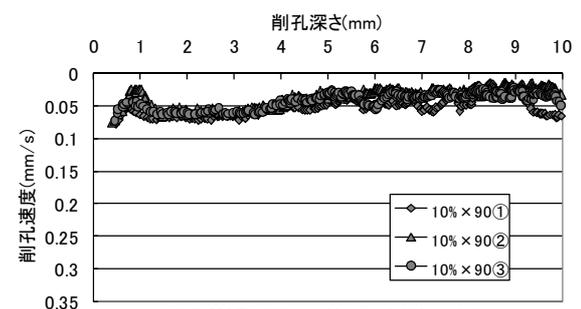
(b) 樹脂固形分率 10% × 4



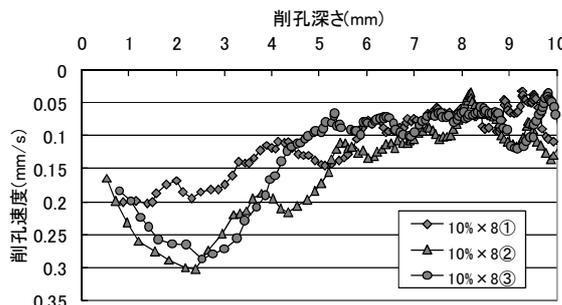
(f) 樹脂固形分率 10% × 15



(c) 樹脂固形分率 10% × 6

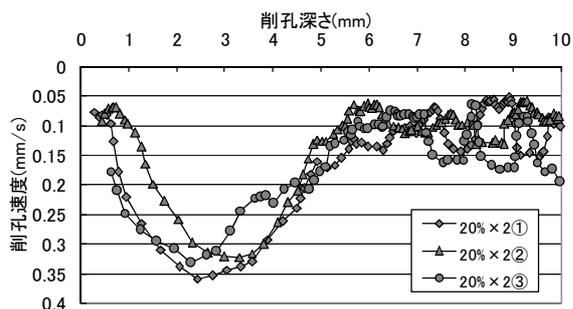


(g) 樹脂固形分率 10% × 90

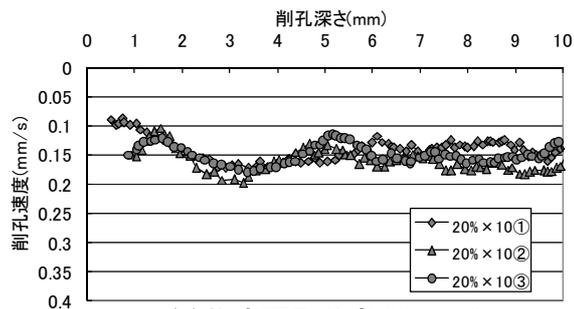


(d) 樹脂固形分率 10% × 8

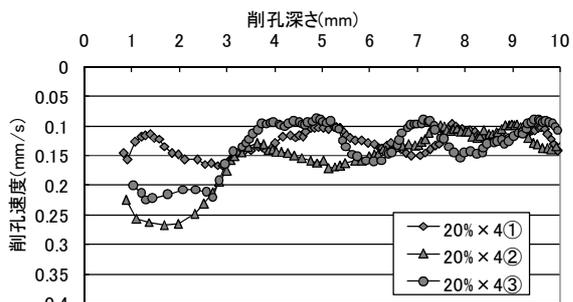
図 3-6 削孔試験結果 (樹脂固形分率 10%)



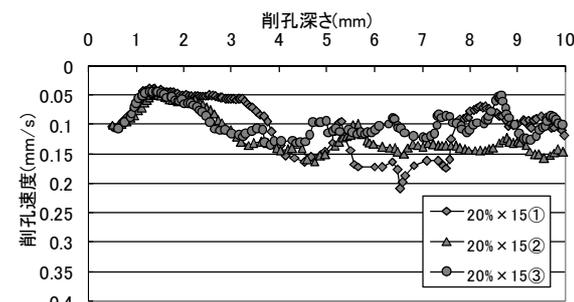
(a) 樹脂固形分率 20% × 2



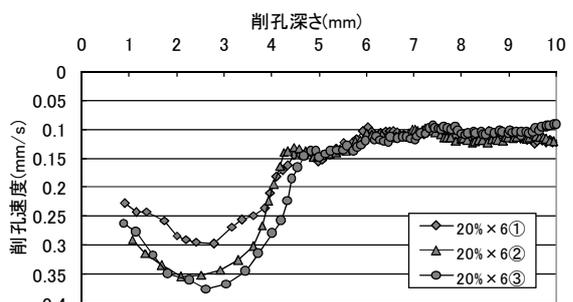
(e) 樹脂固形分率 20% × 10



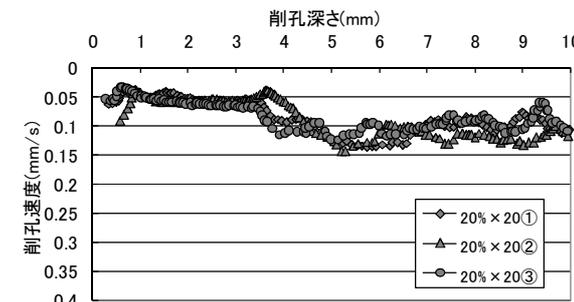
(b) 樹脂固形分率 20% × 4



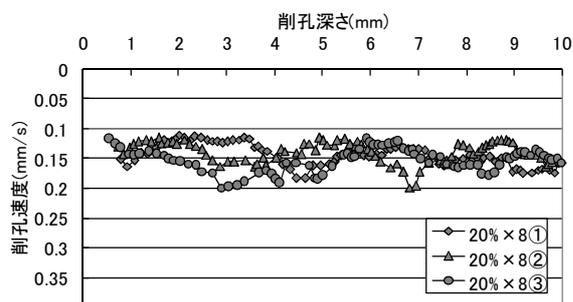
(f) 樹脂固形分率 20% × 15



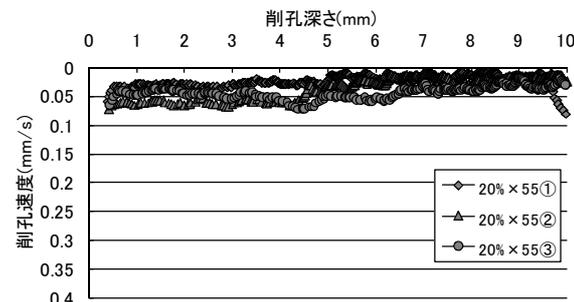
(c) 樹脂固形分率 20% × 6



(g) 樹脂固形分率 20% × 20

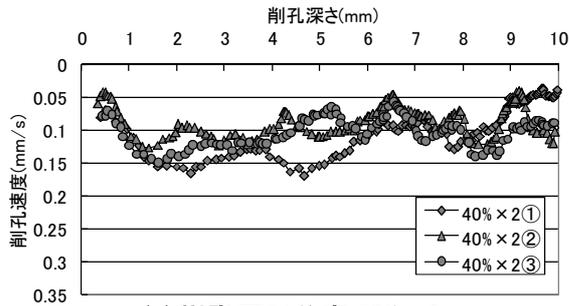


(d) 樹脂固形分率 20% × 8

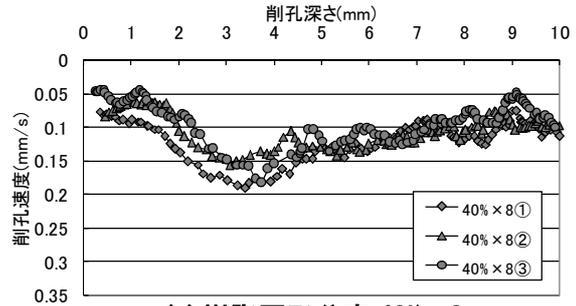


(h) 樹脂固形分率 20% × 55

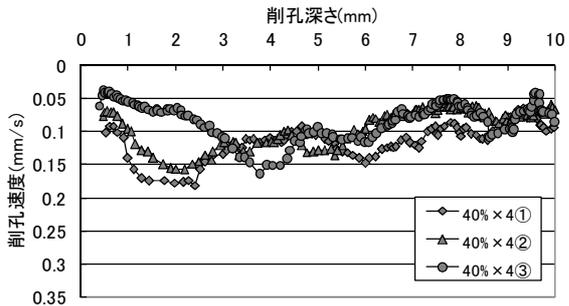
図 3-7 削孔試験結果 (樹脂固形分率 20%)



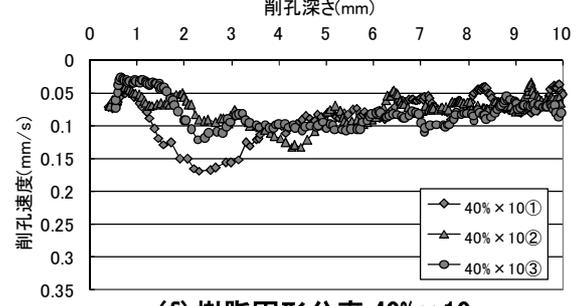
(a) 樹脂固形分率 40% × 2



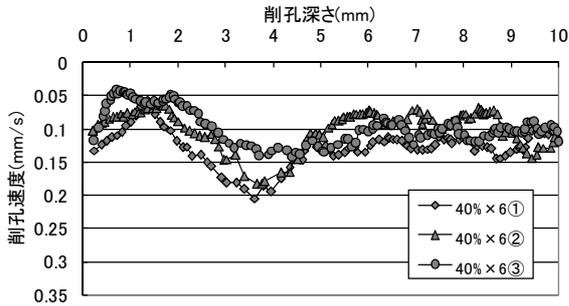
(e) 樹脂固形分率 40% × 8



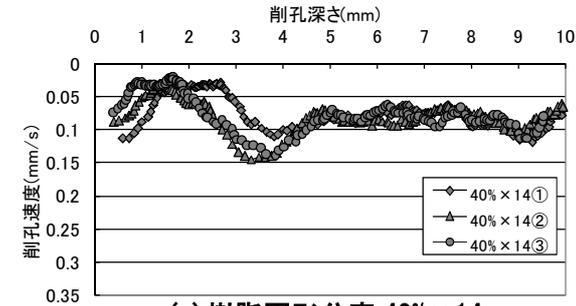
(b) 樹脂固形分率 40% × 4



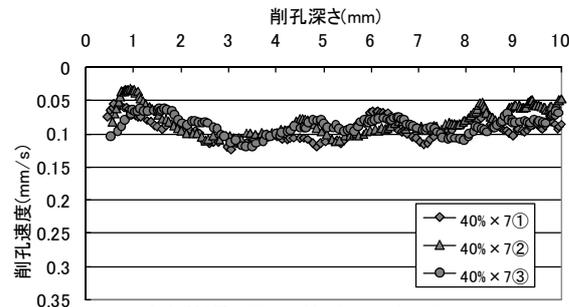
(f) 樹脂固形分率 40% × 10



(c) 樹脂固形分率 40% × 6



(g) 樹脂固形分率 40% × 14



(d) 樹脂固形分率 40% × 7

図 3-8 削孔試験結果 (樹脂固形分率 40%)

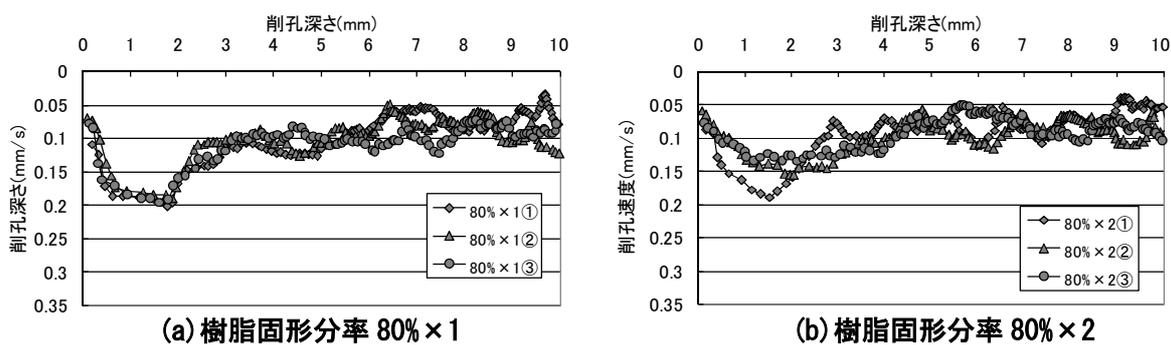


図 3-9 削孔試験結果（樹脂固形分率 80%）

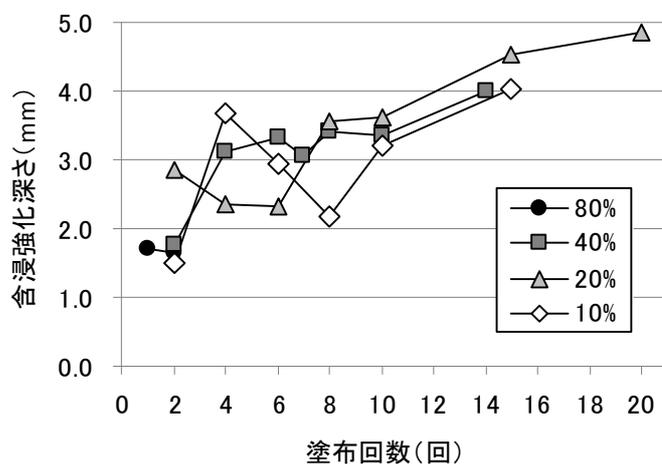


図 3-10 塗布回数と含浸強化深さの関係

⑦今後の課題

高含浸性強化剤の着色による含浸深さの評価を行うことは不可能であったが、含浸部分と非含浸部分に水を散水した際に濡れ色に差違が生じることから含浸深さを判断できる可能性があるため、調査が必要である。

削孔試験において、調合と塗布回数による強度の向上状況を評価するには被塗布体は均質な材料である必要がある。供試体作成時の養生による影響の調査が必要である。

2) 供試体の養生方法の検討

①概説

劣化した多孔質体を想定し、低強度の供試体を作成するために、作成可能限度である W/C を 0.9 としたセメントペーストを供試体とし、水中養生期間を 14 日とした結果、約 4mm 以深は削孔速度が一定であるが、約 4mm の深さから表面にかけて削孔速度が徐々にあがっており、供試体の内部と表層部分で削孔強度に勾配が生じていた。塗布による正確な含浸深さや強化程度の判断のためには、被塗布供試体は表面より内部にかけて一定の強度である必要がある。養生期間と表層強度の関係を調べるために養生期間を変えたセメントペースト供試体の表層強度分布を削孔試験により求めた。

②供試体の調合

強度の低い供試体を作成するために W/C が 0.9 のセメントペーストを作成した。セメントペーストの調合を表 3-7 に示す。

表 3-7 セメントペーストの調合

水セメント比 W/C	単分量 (g/L)		
	水 W	セメント C	増粘剤 A
0.9	740	822	5.88

③実験の条件

供試体は 40×40×160 (mm) のセメントペーストで、高含浸性強化剤の塗布を行う供試体と同様に W/C は 0.9 とした。セメントペースト供試体は材齢 2 日で脱型を行い、その後、気中養生 (気温 20℃, 湿度 60%) としたものの、水中養生の後に気中養生としたもの、材齢 28 日まで水中養生としたものを使用した。表 3-8 に供試体の表記とそれに対応する養生条件を示す。なお表中の [] 内の数字は脱型後に実際に行った水中養生の日数である。

表 3-8 実験条件

供試体表記	W/C	水中養生 終了材齢 (日)	備考
90N	0.9	- [0]	脱型直後より気中養生
90W7		7 [5]	水中養生終了後、材齢 28日まで気中養生
90W14		14 [12]	
90W21		21 [19]	
90W28		28 [26]	脱型後より水中養生

④試験方法

すべての供試体は、材齢 28 日に小径ドリル式削孔試験装置により削孔試験を行った。最大削孔深さは 10mm とし、ビットの回転数は供試体の強度に合わせて 800rpm とした。削孔時には摩耗抑制および削粉排出を目的としてビット先端部に水流を当て、湿式の測定を行った。試験機の条件を表 3-9 に示す。また強度試験用に削孔試験用供試体と同じ養生条件による $\phi 50 \times 100\text{mm}$ の円柱供試体を用い、材齢 28 日に圧縮強度試験も行った。

表 3-9 試験機の条件

試験装置	3号機
バネ強さ	5.88[N] × 2本
ビット径	2.95[mm]
ビット偏芯	0.5[mm]
回転数	800[rpm]
削孔水	水道水
水圧:水平到達距離* (吐出水量)	150[cm] (221[g/min])

*: $\phi 1$ のパイプ先端から水平吐出させた水がパイプ高さより90cm下がった時の水平距離

本試験で使用した 3 号機 (写真 3-3) は、バネ力の働かない変位計を使用し、押しつけバネの強さは削孔深さによらず一定のものを使用した。またビットを偏芯させることにより、ビット先端に水流を送りこみ、削粉の排出を円滑にした。これにより、深さ方向の削孔速度の低下を無くし、補正係数を使用せずに削孔速度の算出を行った。

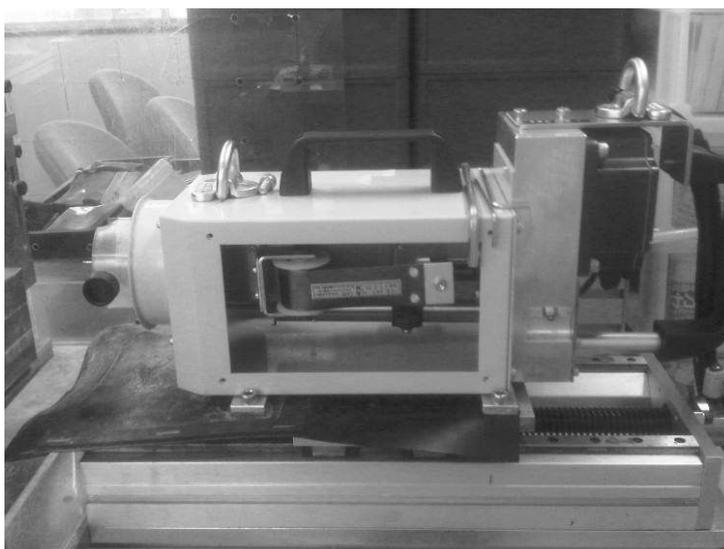


写真 3-3 削孔試験機 (3号機)

⑤結果と考察

圧縮強度試験の結果を図 3-11 に示す。同図によると、90W28 は 14.9N/mm^2 、90W21 は 15.2N/mm^2 でありほぼ同様の圧縮強度を示したが、90W14 では 13.7N/mm^2 、90W7 は 12.3N/mm^2 、90N は 11.2N/mm^2 と水中養生の期間が少ないほど圧縮強度は低くなった。

図 3-12 に各供試体への削孔試験の結果を示す。各図を見ると 90N および 90W7 では削孔回ごとのデータにばらつきがあることがわかる。これは供試体中のセメントが十分に水和反応しておらず均質化していないためであると考えられる。その他の結果は同じ条件であれば比較的安定しているが、内部空隙の影響とみられる削孔速度の乱れがあった。図 3-13 に各供試体への削孔試験結果を平均化したものを示す。

90N は、表面から 6mm の深さまで 0.15mm/s の値を示し、それより深い部分は削孔速度が 0.13 前後であり僅かに削孔速度が遅くなっている。90W07 は表面から 4mm の深さまで削孔速度は 0.12mm/s で、それより深い部分では一度は削孔速度が 0.07mm/s 付近まで遅くなるが、速度が上下を繰り返し、安定しない。

90W14 は、表面から 2.5mm の深さまでは速度が安定せず、それ以深は 0.07mm/s で安定している。90W21 および 90W28 は表面から 1mm の深さまで、脆弱な部分が生じており、それ以深は 0.07mm/s で安定している。

以上の結果より、水中養生を行った期間が短いほど表層の削孔速度が速く、強度が低い。水中養生の期間が長くなるほど内部の削孔速度が 0.07mm/s 付近の遅い値で安定する。これは、水中養生終了後に行った気中養生により表層から順に内部にかけて水が蒸発したために水和反応が止まり、強度が十分に発現しなかったと考えられる。また 90W21 および 90W28 の削孔試験結果より、同様の結果を示していることから材齢 21 日で十分に強度が発現しているものと考えられる。これらの結果は圧縮強度試験の結果と同様の傾向がある。

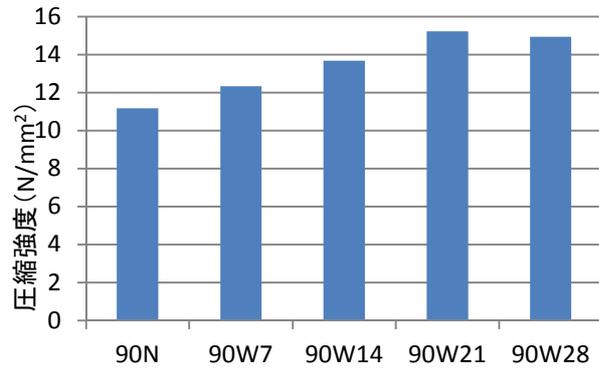


図 3-11 圧縮強度試験結果 (W/C=0.90)

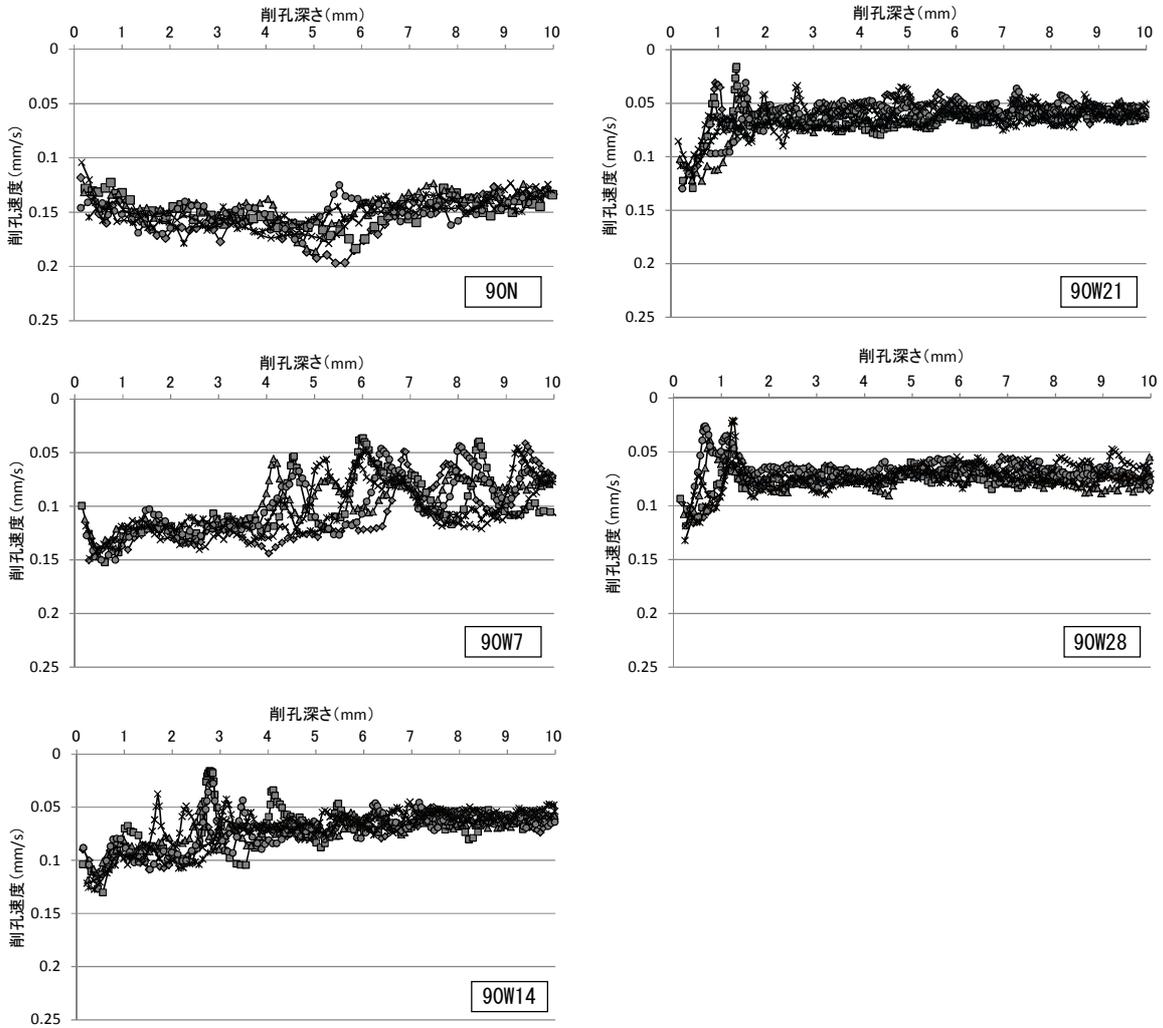


図 3-12 削孔試験結果

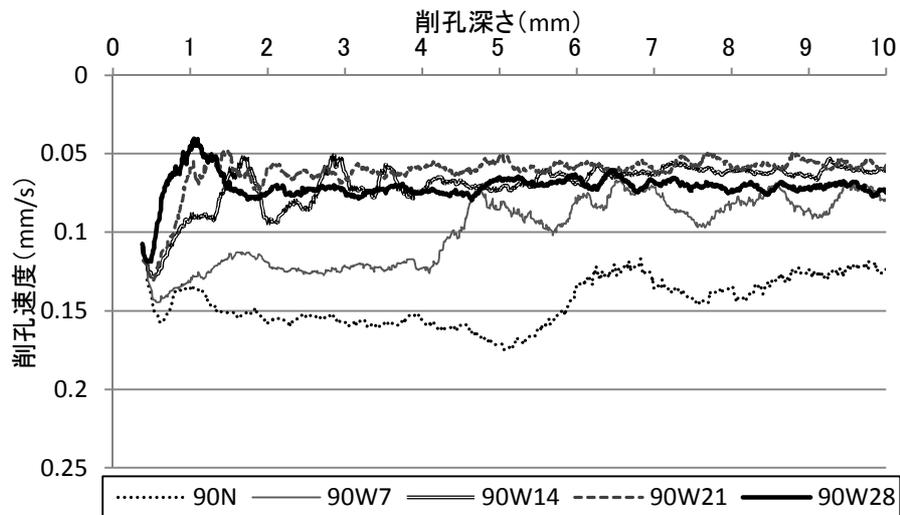


図 3-13 養生期間による削孔強度

⑥今後の課題

水中養生を材齢 28 日まで行った場合にも、表面から約 1mm の深さの極く表層部分において強度の低下がみられた。これは水中養生によるセメント成分の溶脱の可能性等が考えられ、別途確認が必要であるが、本報では水中養生 28 日とした供試体を使用することとした。

3)セメントペーストへの塗布（2回目）

①概説

前塗布試験では、被塗布供試体が表面から数 mm の深さにかけて削孔速度が速く、内部までの強度が安定していなかったため、高含浸性強化剤の塗布による含浸部分の改善効果を精査することができなかった。本試験では内部までの安定した強度を期待して、水中養生の期間を 28 日としたセメントペースト(W/C=0.9)を供試体として高含浸性強化剤を塗布し、削孔試験により含浸強化の状況から考察を試みた。

②薬剤の調合

表 3-10 に高含浸性強化剤の成分とその機能を示す。図 3-14 に高含浸性強化剤の各成分の調合比率を示す。

表 3-10 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		浸透性の制御

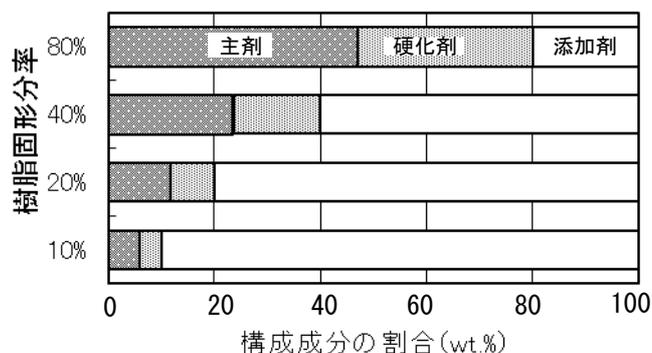


図 3-14 成分の調合比

③供試体の作成

供試体は劣化した多孔質体を想定して強度の低いW/Cが0.9のセメントペースト硬化体(40×40×80 [mm])で、養生期間は脱型後の水中養生期間を28日とし、供試体の乾燥のために気中に28日静置した後、塗布を行った。表3-11に使用材料を、表3-12に各材料の割合と圧縮強度試験結果を示す。

表 3-11 使用材料

材料	摘要
水	水道水(密度:1.0 g/m ³)
セメント	普通ポルトランドセメント(密度:3.15 g/m ³)
増粘剤	メチルセルロース系増粘剤

表 3-12 セメントペーストの割合

水セメント比 W/C	単分量 (g/L)		
	水 W	セメント C	増粘剤 A
0.9	740	822	5.88

④実験の条件

表3-13に示す要因と水準により試験を行った。塗布回数については、各割合の最大塗布回数および異なる割合間での塗布回数での比較を行えるように表のような回数で塗布を行った。

表 3-13 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)
	1	2	4	6	8	10	15	20	50	70	
10	-	○	○	○	○	○	○	○	○	○	70
20	-	○	○	○	○	○	○	○	×	×	35
40	-	○	○	○	○	○	×	×	×	×	10
80	○	○	×	×	×	×	×	×	×	×	2

[注] ○:塗布可能 ×:塗布不可能

⑤試験方法

すべての供試体は、高含浸性強化剤の塗布を行った1ヶ月後に小径ドリル型削孔試験装置により削孔試験を行った。最大削孔深さは10mmとし、ビットの回転数は供試体の強度に合わせて4000rpmとした。削孔時には摩耗抑制および削粉排出を目的としてビット先端部に水流を当て、湿式の測定を行った。試験機の条件を表3-14に示す。試験面は供試体の高含浸性強化剤の塗布を行った面と、無塗布面として高含浸性強化剤の塗布を行った面の裏側の面とした。

表 3-14 試験機の条件

試験装置	3号機
バネ強さ	5.88[N] × 2本
ビット径	2.95[mm]
ビット偏芯	0.25[mm]
回転数	4000[rpm]
削孔水	水道水
水圧: 水平到達距離* (吐出水量)	150[cm] (221[g/min])

*: φ1のパイプ先端から水平吐き出した水がパイプ高さより90cm下がった時の水平距離

⑥実験の結果と考察

前回の塗布を行った試験と比較して最大塗布回数は少ない傾向であった。

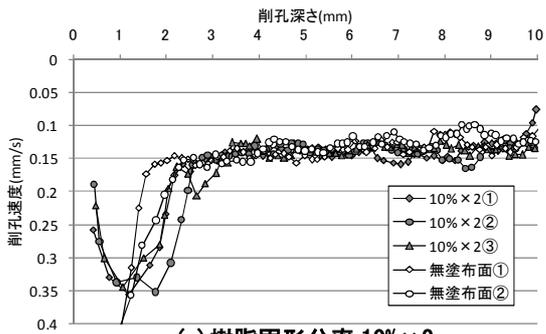
図3-15~18に削孔試験の結果を示す。樹脂固形分率10%では脆弱な部分は塗布回数8回で健全である部分と同程度の削孔速度となった。塗布回数50回で6mm、塗布回数70回で7mm程度まで削孔速度が遅くなり、強度が上昇したと考えられるが、上昇量の差が大きくなり、正確に判断することは困難であった。

樹脂固形分率20%では、塗布回数4回程度で脆弱部分は健全部分と同程度の削孔速度となり、塗布回数35回で2.8mm程度まで強度の改善がされている。

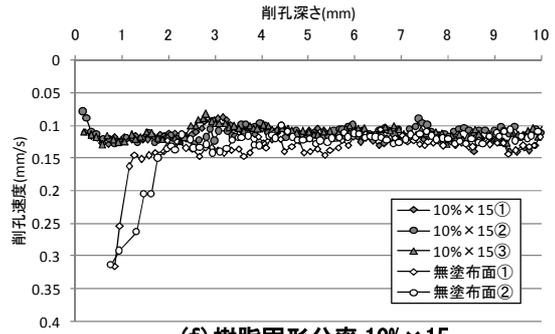
樹脂固形分率40%では、塗布回数6回で脆弱部分が健全部分と同程度の削孔速度となるが、それより多い塗布回数時は判断が難しかった。

樹脂固形分率80%では塗布回数1回で脆弱部分は健全部分と同程度の削孔速度となり、最大塗布回数2回でも同程度の改善がされたと思われる。

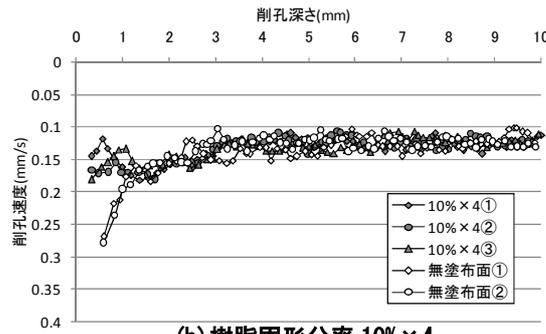
全体的に高含浸性強化剤の含浸深さは事前に想定していたものを下回る結果であった。



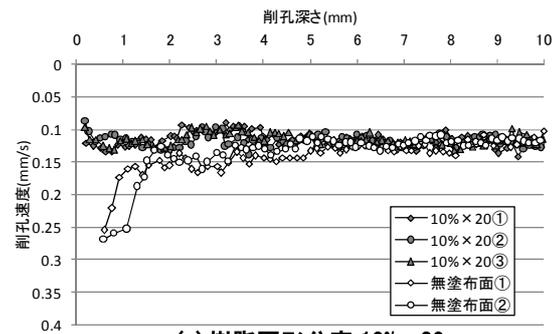
(a) 樹脂固形分率 10% × 2



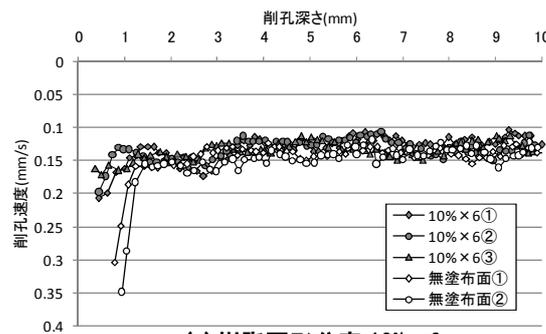
(f) 樹脂固形分率 10% × 15



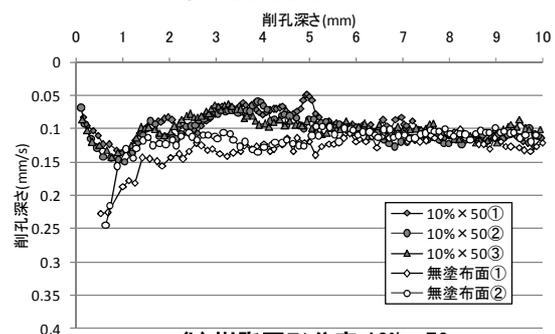
(b) 樹脂固形分率 10% × 4



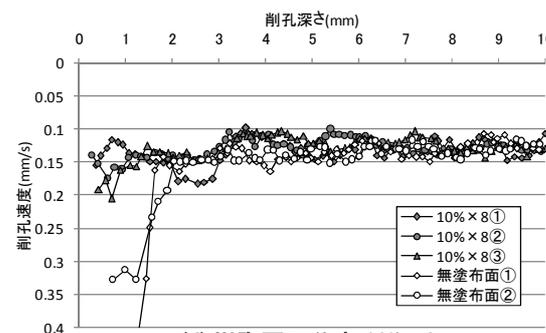
(g) 樹脂固形分率 10% × 20



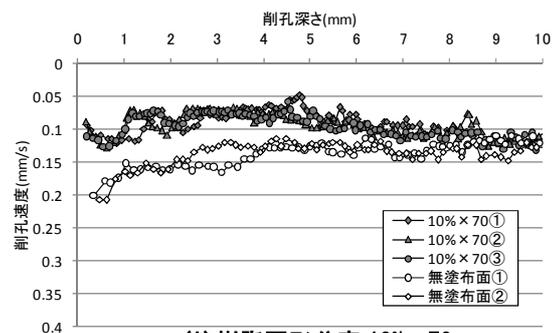
(c) 樹脂固形分率 10% × 6



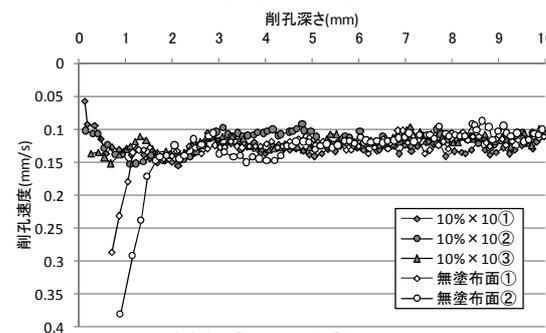
(h) 樹脂固形分率 10% × 50



(d) 樹脂固形分率 10% × 8

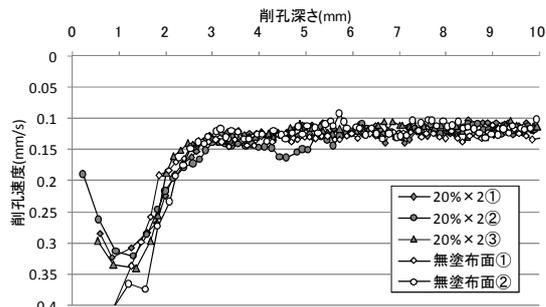


(i) 樹脂固形分率 10% × 70

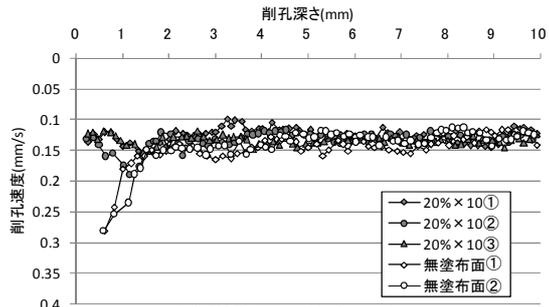


(e) 樹脂固形分率 10% × 10

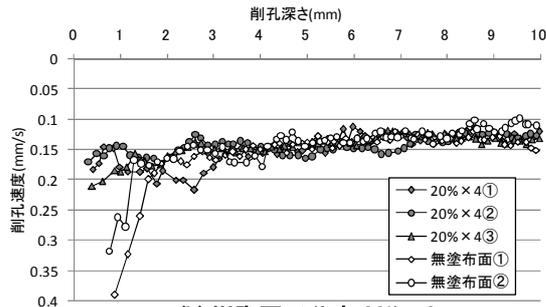
図 3-15 削孔試験結果 (樹脂固形分率 10%)



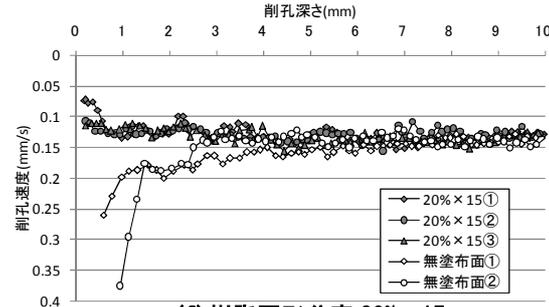
(a) 樹脂固形分率 20% × 2



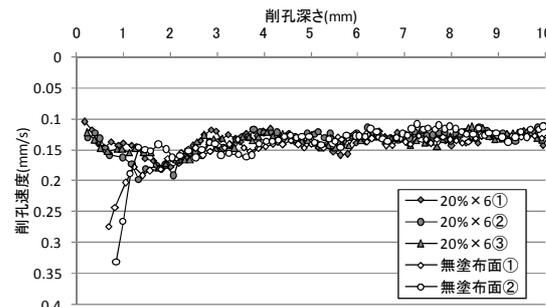
(e) 樹脂固形分率 20% × 10



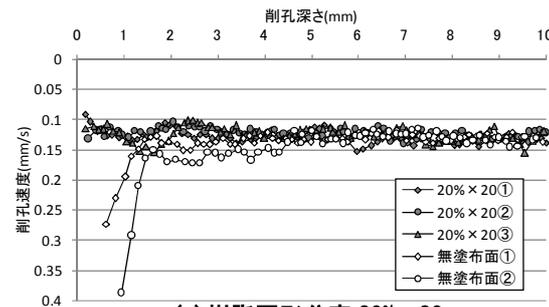
(b) 樹脂固形分率 20% × 4



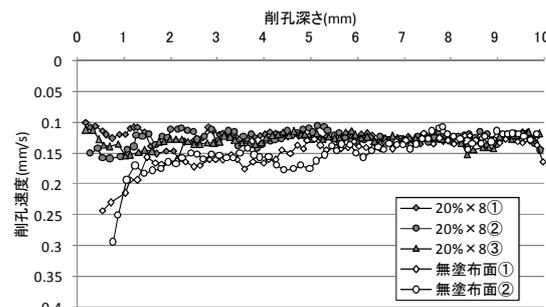
(f) 樹脂固形分率 20% × 15



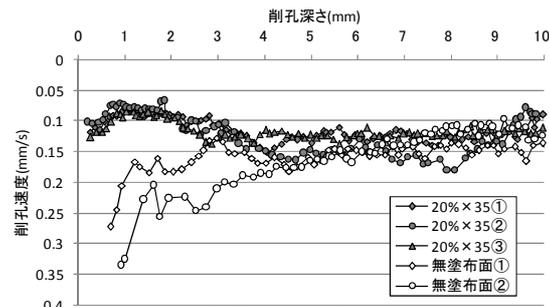
(c) 樹脂固形分率 20% × 6



(g) 樹脂固形分率 20% × 20



(d) 樹脂固形分率 20% × 8



(h) 樹脂固形分率 20% × 35

図 3-16 削孔試験結果 (樹脂固形分率 20%)

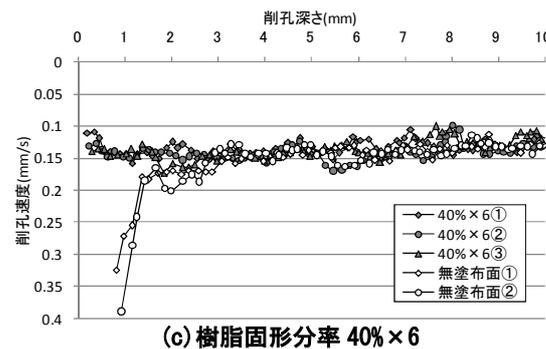
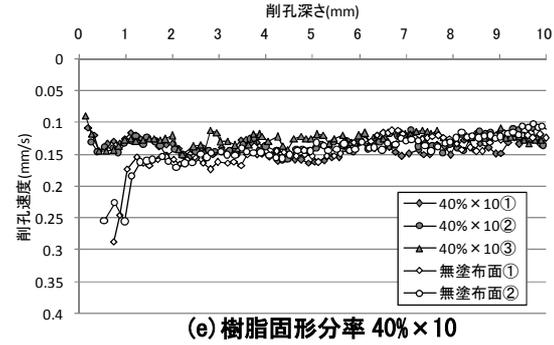
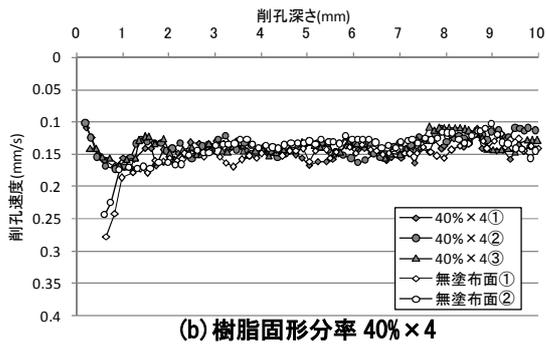
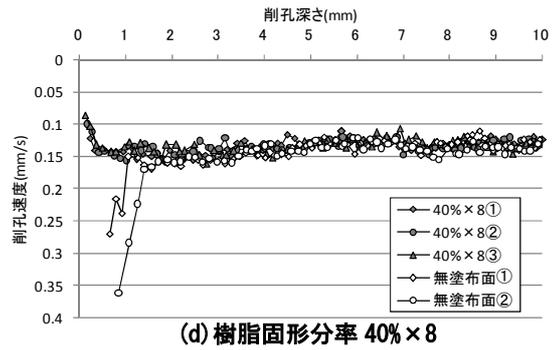
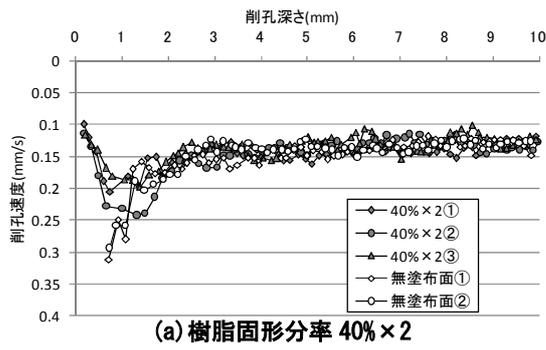


図 3-17 削孔試験結果 (樹脂固形分率 40%)

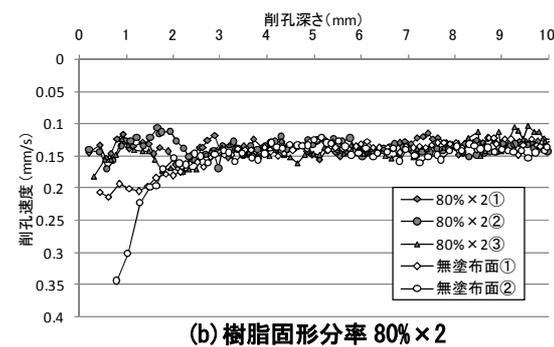
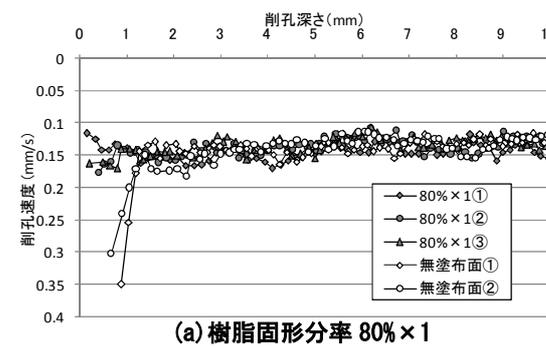


図 3-18 削孔試験結果 (樹脂固形分率 80%)

⑦今後の課題

高含浸性強化剤の含浸深さは想定していたものよりも小さい値であった。高含浸性強化剤の浸透性の確認のために、セメントペースト供試体に加え、コンクリートや煉瓦に対して塗布を行うこととした。

4) 材料別の含浸深さの確認

①概説

前試験において、想定していた含浸深さが得られなかった。この原因を究明するためにセメントペースト以外の煉瓦やコンクリートを供試体とし、各種の被塗布体に対して塗布を行い、含浸深さの測定を行った。

②供試体

表 3-15 に示すように焼成温度の異なる煉瓦、W/C の異なるセメントペーストおよびコンクリートを被塗布供試体として使用した。

表 3-15 供試体とその概要

供試体	概要
煉瓦	焼成温度500℃
煉瓦	焼成温度700℃
煉瓦	焼成温度900℃
セメントペースト	W/C=0.6
セメントペースト	W/C=0.9
コンクリート	

③高含浸性強化剤の調合

樹脂固形分率 20%の高含浸性強化剤を使用し、ここに吸水防止性の付与を行うために助剤(1)を樹脂固形分量の 5wt.%で添加した。含まれる成分を表 3-16 に示す。また図 3-19 に樹脂固形分と添加剤の調合比を示す。

表 3-16 高含浸性強化剤の成分とその機能

成分表記		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
溶剤		浸透性の制御
助剤(1)		防汚・給水防止性の付与

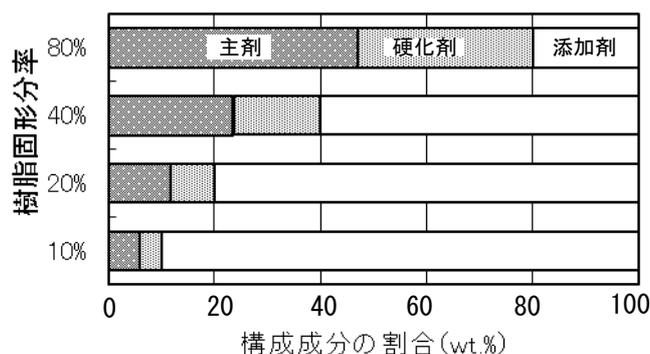


図 3-19 成分の調合比

④実験の条件

表 3-17 に示す多孔質系の各種材料に対して塗布を行った。なお表中の「○」は塗布が可能で塗布を行ったが、「×」は含浸が飽和状態で塗布が不可能であったことを表している。

表 3-17 被塗布材と塗布回数

被塗布材料	塗布回数						最大塗布回数 (回)
	2	4	8	16	24	32	
煉瓦(焼成温度500°C)	○	○	○	○	○	○	32
煉瓦(焼成温度700°C)	○	○	○	○	○	○	32
煉瓦(焼成温度900°C)	○	○	○	○	○	○	32
セメントペースト(W/C=0.6)	○	○	×	×	×	×	4
セメントペースト(W/C=0.9)	○	○	○	○	×	×	16
コンクリート	○	○	○	○	×	×	16

[注] ○:塗布可能
×:塗布不可能

⑤試験方法

被塗布体として煉瓦(焼成温度 500, 700, 900°C)、セメントペースト硬化体(W/C=0.6, 0.9)、コンクリートを取り上げ、樹脂固形分率 20%の高含浸性強化剤で塗布を行った。

塗布後 10 日間、含浸した樹脂の硬化のために養生を行った。養生後に供試体を割裂し、水に浸漬させた後、断面が撥水している部分を最終含浸深さとして表面からの深さを測定した。深さは切断面を 3 等分した点を計測位置とし、3 つの計測結果の平均を含浸深さとした。

⑥実験の結果と考察

図 3-20 に塗布回数と含浸深さの関係を示す。同図によると、焼成温度 900℃の煉瓦は塗布回数 32 回で 16.7mm、焼成温度 700℃の煉瓦は塗布回数 32 回で 9.1mm、焼成温度 500℃の煉瓦は塗布回数 32 回で 8.1mm であり、さらに塗布することが可能であった。

セメントペースト (W/C=0.6) は塗布回数 8 回で含浸しなくなり、含浸深さは 1.6mm であった。セメントペースト (W/C=0.9) は塗布回数 16 回で 4.6mm まで含浸したが、これ以上は含浸せず、塗布を行うことができなかった。コンクリートは塗布回数 16 回で 11.9mm まで含浸したが、これ以上は塗布しても含浸しなかった。

セメントペーストとコンクリートの塗布量が同程度であるにもかかわらず含浸深さに大きな差が発生していた。セメントペーストとコンクリートを構成している材料はセメントおよび骨材以外ではセメントペースト作成時に使用したセルロース系増粘剤がある。このため含浸深さに大きな差が発生した原因として増粘剤による影響が可能性の一つとして考えられた。

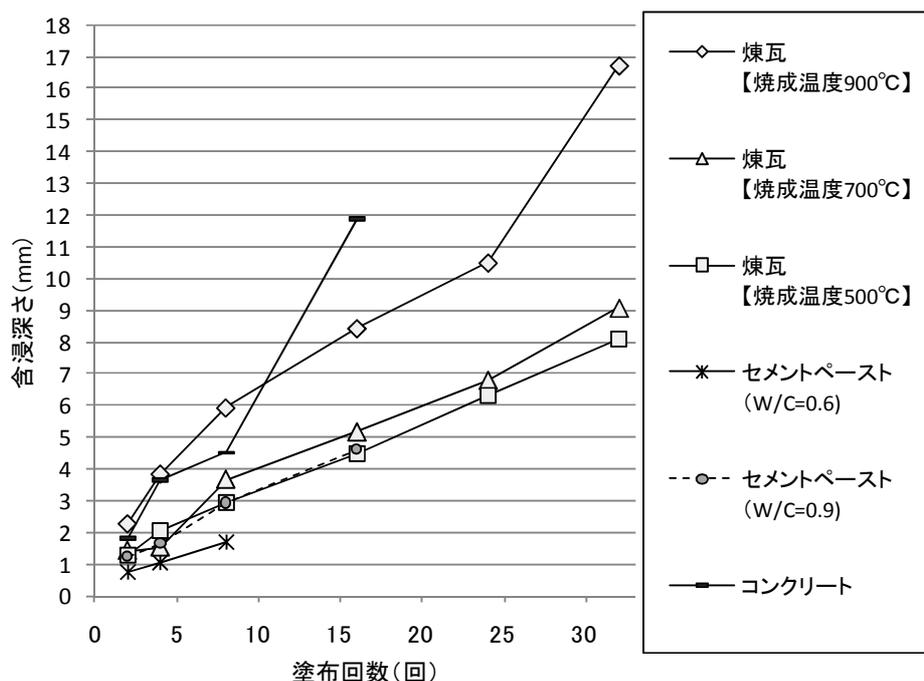


図 3-20 塗布回数と含浸深さの関係

⑦今後の課題

セメントペーストとコンクリートの含浸深さの違いから、セメントペースト作成時に使用した増粘剤による高含浸性強化剤の浸透を妨げる可能性が考えられた。増粘剤を除去したセメントペースト供試体に対して高含浸性強化剤の塗布を行い、含浸深さの調査を行う必要がある。

⑧増粘剤による影響（参考）

前試験結果から考えられた増粘剤の高含浸性強化剤の浸透妨害の理由を考える。セメントペーストの作成時に、材料分離の低減ために加えたメチルセルロース系の増粘剤が高含浸性強化剤の浸透を妨げる可能性が考えられた。そのため、増粘剤の除去を目的としてセメントペースト供試体を加熱した。加熱温度はメチルセルロースが400℃で90%以上が炭化すること、セメントペーストの水和結合に影響を与えないことを考慮して400℃とした。

表3-18に示すように、この供試体へ高含浸性強化剤を塗布すると、塗布回数32回で7mmまで含浸し、さらに塗布することが可能であった。図3-21は前試験結果にセメントペースト（W/C=0.9）[400℃加熱]へ塗布した結果を合わせて表示したものである。

以上の結果より、次の試験ではセメントペーストを400℃で加熱し、増粘剤の除去を行ったものを供試体として使用する。

表 3-18 塗布回数

被塗布材料	塗布回数						最大塗布回数 (回)
	2	4	8	16	24	32	
セメントペースト(W/C=0.9) [400℃加熱処理]	-	○	○	○	-	○	32

[注] ○: 塗布可能
×: 塗布不可能

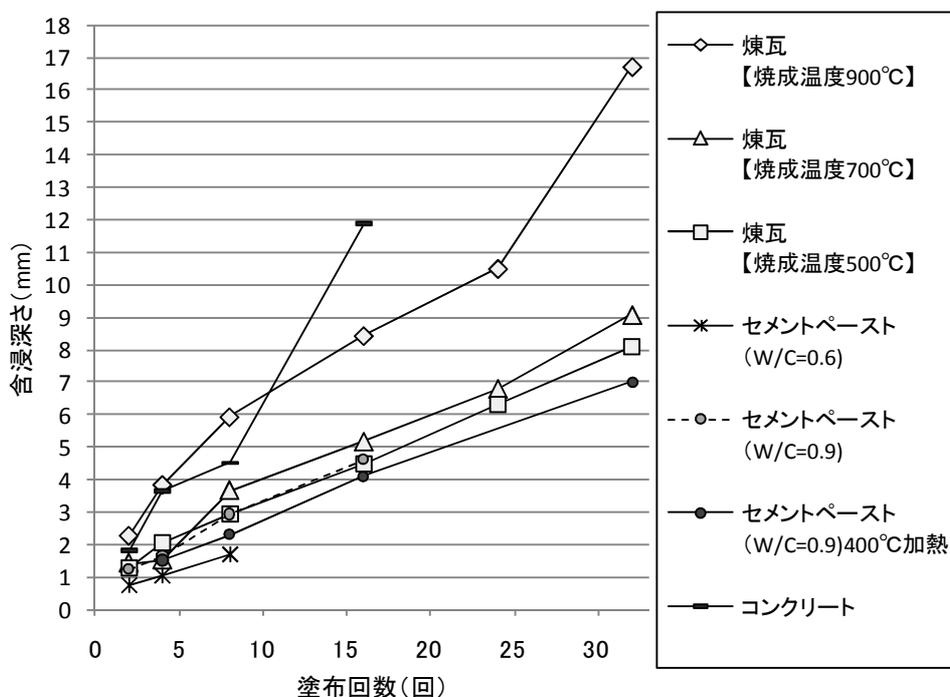


図 3-21 含浸深さ

3.1.2 本試験

1) セメントペーストへの塗布 (3回目)

①概説

セメントペースト供試体の水中養生期間の調整、吸水防止効果の付与、セルローズ系増粘剤の除去を行ってきた。高含浸性強化剤の調合および塗布量による、含浸深さや強度改善状況の評価を、セメントペーストを被塗布供試体として、削孔試験および供試体の断面の撥水状況により行った。

②高含浸性強化剤の調合

表 3-19 に高含浸性強化剤の成分とその機能を示す。図 3-22 に樹脂固形分と添加剤の調合比率を示す。また吸水性防止のために助剤(1)を樹脂固形分の 5wt.%添加した。

表 3-19 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		浸透性の制御
助剤(1)		防汚・給水防止性の付与

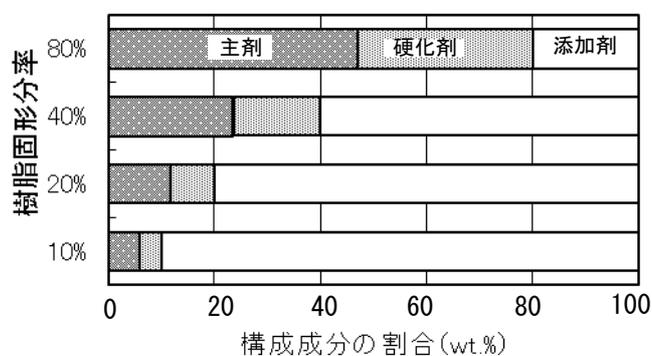


図 3-22 成分の調合比

③供試体の作成

予備試験の結果より、高含浸性強化剤の浸透を妨害すると考えられる増粘剤（メチルセルロース系）の除去のために400℃で熱処理を行ったW/C=0.9のセメントペーストを供試体として試験を行った。セメントペーストは材齢2日で脱型し、材齢28日まで水中にて養生を行った。乾燥のために気中に1カ月以上静置し、その後、増粘剤除去のために400℃で加熱した。表3-20にセメントペーストの材料を、表3-21に調合を示す。

表 3-20 使用材料

材料	摘要
水	水道水(密度:1.0 g/m ³)
セメント	普通ポルトランドセメント(密度:3.15 g/m ³)
増粘剤	メチルセルロース系増粘剤

表 3-21 セメントペーストの調合

水セメント比 W/C	単位量 (g/L)		
	水 W	セメント C	増粘剤 A
0.9	740	822	5.88

④実験の条件

表3-22に実験の要因と塗布回数関係を示す。樹脂固形分率10, 20, 40, 80%について、刷毛を用いて、表中の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合に、含浸が不可能となる回数が生じたため、実際にはそれ以下の回数で行った。

表 3-22 実験の要因と塗布回数

被塗布供試体	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
セメントペースト (W/C=0.9) [400℃加熱]	10	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	100
	20	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	100
	40	○	○	○	○	○	○	○	×	×	×	34
	80	○	○	×	×	×	×	×	×	×	×	4

[注] ○:塗布可能
×:塗布不可能

⑤試験方法

a) 断面の撥水による浸透深さの評価

高含浸性強化剤に撥水性の付与を行うために、撥水性のある助剤(1)を添加した調合により塗布を行い、その撥水域を測定した。高含浸性強化剤を塗布後、14日間の養生期間を経過した供試体を切断し、水に数秒間浸漬した時に水に濡れていない領域の表面からの深さを浸透深さとして測定した。切断面を3等分した点を計測位置とし、3つの計測結果の平均を含浸深さとした。

b) 削孔試験による含浸深さおよび強化の評価

小径ドリル削孔試験装置を用いて供試体を削孔し、削孔速度により深さ方向の強度分布を推定した。表 3-23 に試験機の条件を示す。供試体は、20×40×80 (mm) のセメントペー
スト角柱体を用いた。削孔試験は、1秒毎のビット先端位置を削孔深さとして測定した。最大削孔深さは10 (mm) とした。削孔時には水流により先端ビットの磨耗抑制および削粉排出を行い、測定は湿式とした。

表 3-23 試験機の条件

試験装置	3号機
バネ強さ	5.88[N]×2本
ビット径	2.95[mm]
ビット偏芯	0.3[mm]
回転数	1500[rpm]
削孔水	水道水
水圧:水平到達距離* (吐出水量)	150[cm] (221[g/min])

*: φ1のパイプ先端から水平吐出させた水がパイプ
高さより90cm下がった時の水平距離

④実験の結果と考察

a) 断面の撥水による浸透深さの評価

図 3-23～26 は、セメントペースト供試体を切断した断面の様子で、水を散水すると高含浸性強化剤の吸水防止効果により、含浸部分は濡色にならないため、この部分を含浸深さとして計測した。

塗布回数と含浸深さの関係を図 3-27 示す。塗布回数が増えるほど含浸深さは増加していく。樹脂固形分率による比較を行うと、樹脂固形分率 10, 20%では、セメントペーストに対して 100 回以上の塗布が可能であり、含浸深さは、塗布回数が増えるほど深くなるが、塗布回数と含浸深さの関係は樹脂固形分率によって異なる。

樹脂固形分率 10%は塗布回数 100 回で、含浸深さは 12.9mm であった。樹脂固形分率 20%は塗布回数 100 回で 20mm まで達していた。樹脂固形分率 40%は塗布回数 25 回の時点で、含浸深さが 9.7mm であり、最大塗布回数である塗布回数 34 回で含浸深さが増加していないことから、含浸深さは限度に達していると考えられる。樹脂固形分率 80%は塗布回数 2 回で、含浸深さは 1.6mm となるが、これ以上は含浸しなかった。

図 3-28 は、セメントペースト供試体に含浸した高含浸性強化剤のうち、硬化して供試体中に残存する樹脂固形分量と含浸深さの関係である。高含浸性強化剤の調合が、樹脂固形分率 10%および、樹脂固形分率 20%の場合は、含浸した樹脂固形分量に対する含浸深さが、ほぼ同様の値を示すことから、本実験で使用した供試体に対して双方は同等の含浸性能を有していると考えられる。任意の深さまで、等量の樹脂固形分を含浸させようとする場合、樹脂固形分率 20%と樹脂固形分率 10%は同じ含浸性能を有しているため、一回の塗布でより多くの樹脂固形分量を含浸させることができる樹脂固形分率 20%の方が実際の塗布施工においては有効である。

樹脂固形分率 40%は塗布量が $798\text{g}/\text{m}^3$ で含浸深さが 9.7mm であった。樹脂固形分率 10%は塗布量が $832\text{g}/\text{m}^3$ で含浸深さは 12.9mm、樹脂固形分率 20%は塗布量が $862\text{g}/\text{m}^3$ で含浸深さが 15.0mm である。以上より、樹脂固形分率 40%の調合では、樹脂固形分率 10 および 20%の調合と比較すると含浸性能は劣る。

同じ樹脂固形分量であれば、樹脂固形分率が低い調合ほど、深くまで含浸する傾向があることがわかる。

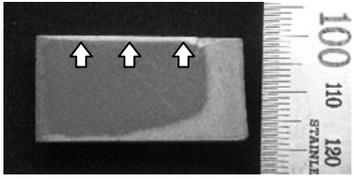
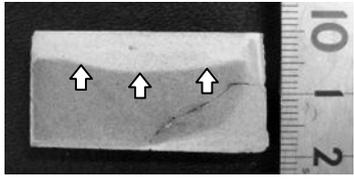
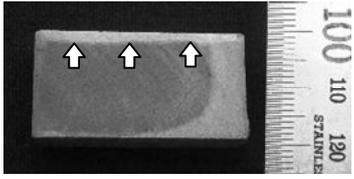
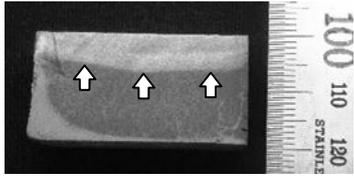
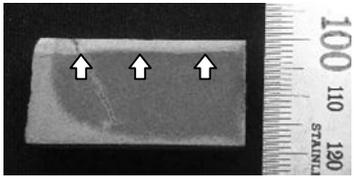
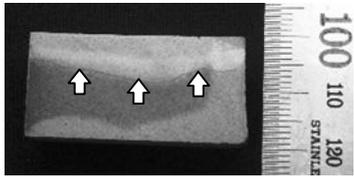
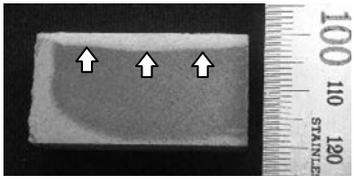
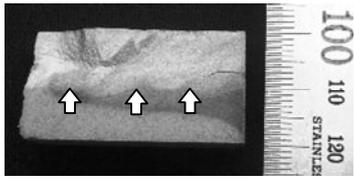
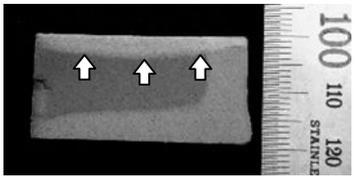
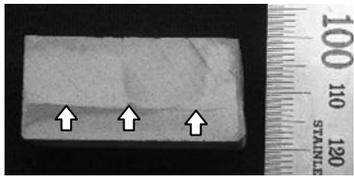
塗布回数 (回)	含浸深さ (mm)	樹脂固形分率10% (C90[400°C加熱])	塗布回数 (回)	含浸深さ (mm)	樹脂固形分率10% (C90[400°C加熱])
2	1.1		15	5.7	
4	2.0		25	6.4	
6	2.3		40	7.2	
8	3.0		60	10.9	
10	3.6		100	12.9	

図 3-23 セメントペースト供試体断面の撥水状況
(樹脂固形分率 10%を塗布)

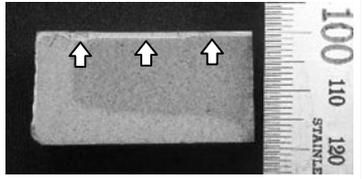
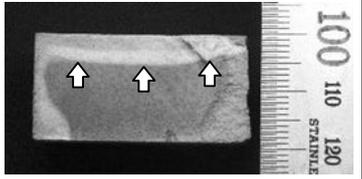
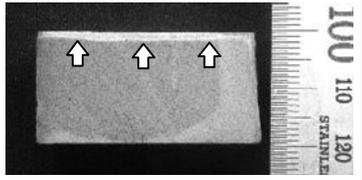
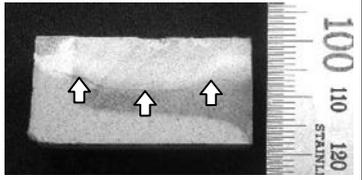
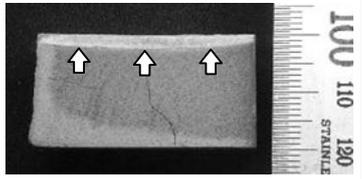
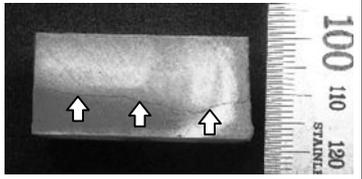
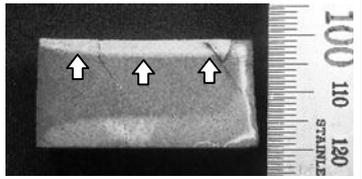
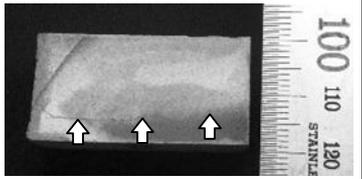
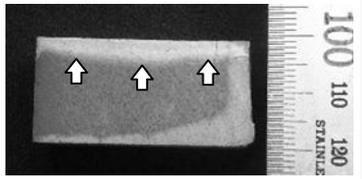
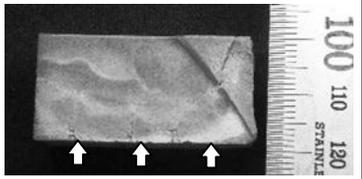
塗布回数 (回)	含浸深さ (mm)	樹脂固形分率20% (C90[400°C加熱])	塗布回数 (回)	含浸深さ (mm)	樹脂固形分率20% (C90[400°C加熱])
2	1.0		15	5.0	
4	1.6		25	8.5	
6	2.4		40	11.3	
8	2.9		60	15.0	
10	4.1		100	20.0	

図 3-24 セメントペースト供試体断面の撥水状況
(樹脂固形分率 20%を塗布)

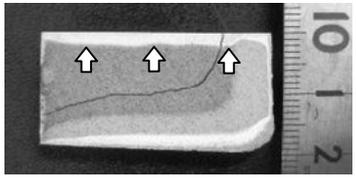
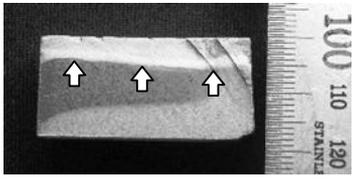
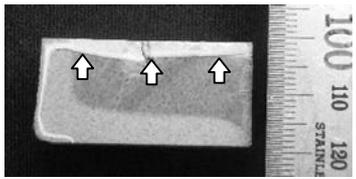
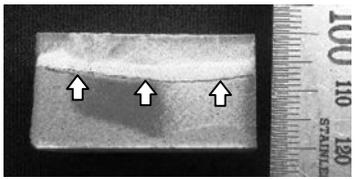
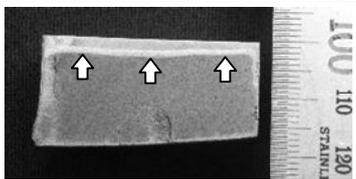
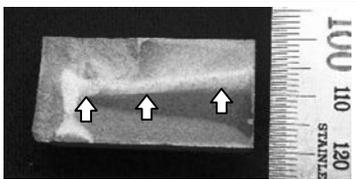
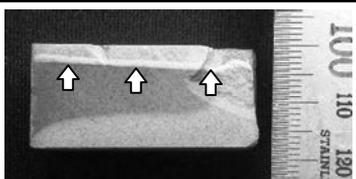
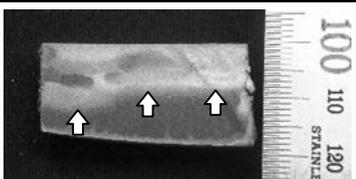
塗布回数 (回)	含浸 深さ (mm)	樹脂固形分率40% (C90[400°C加熱])	塗布回数 (回)	含浸 深さ (mm)	樹脂固形分率40% (C90[400°C加熱])
2	2.2		10	4.7	
4	2.6		15	7.6	
6	3.0		25	9.7	
8	3.7		34	9.6	

図 3-25 セメントペースト供試体断面の撥水状況
(樹脂固形分率 40%を塗布)

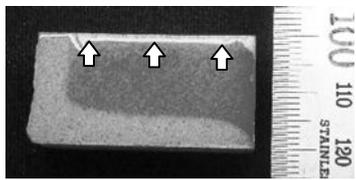
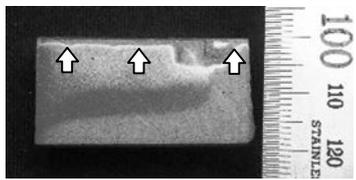
塗布回数 (回)	含浸 深さ (mm)	樹脂固形分率80% (C90[400°C加熱])	塗布回数 (回)	含浸 深さ (mm)	樹脂固形分率80% (C90[400°C加熱])
2	1.4		4	1.5	

図 3-26 セメントペースト供試体断面の撥水状況
(樹脂固形分率 80%を塗布)

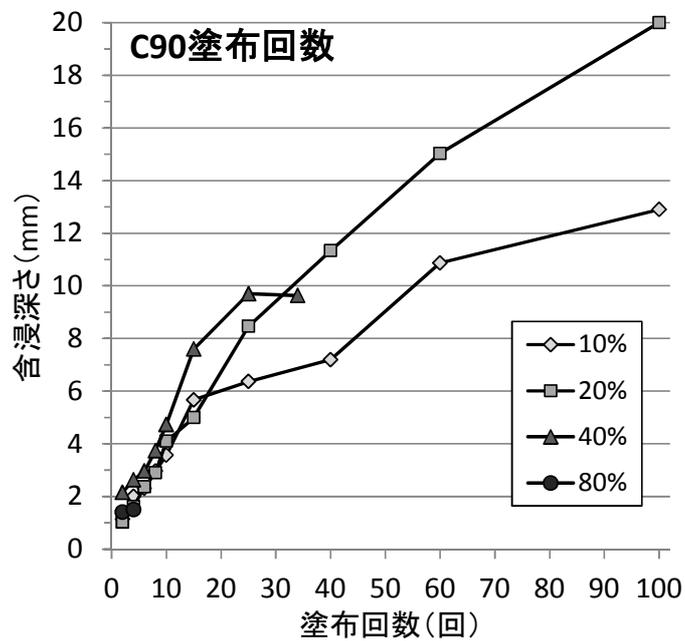


図 3-27 塗布回数と含浸深さの関係

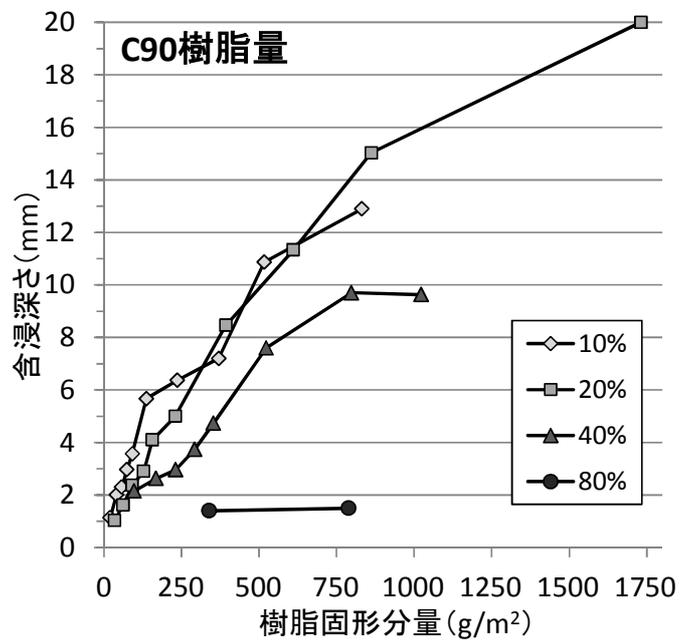


図 3-28 樹脂固形分量と含浸深さの関係

b) 削孔試験による含浸深さおよび強化の評価

削孔試験結果の例として、無塗布供試体への削孔試験結果と樹脂固形分率 20%を 6 回塗布した供試体への削孔試験結果を比較したものを**図 3-29**に示す。無塗布供試体への削孔速度は 0.25mm/s 前後の一定値である。これに対して、樹脂固形分率 20%を 6 回塗布した供試体では、表面から 1mm の深さまで削孔速度は 0.06mm/s であり、1mm から 4mm の深さにかけて削孔速度は漸増し、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。ここで、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。

この領域の分布は樹脂固形分率と塗布回数によって異なる。**図 3-30~33**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、以下の方法によりスムージングしたものである。図中に表示する数字は塗布回数を表す。また、元の全データは**図 3-38~42**に示す。

- ・無塗布供試体の深さ 0~10mm までの削孔速度の平均値である 0.26mm/s をセメントペースト供試体の素の削孔強度とし、これより速い削孔速度は供試体の不備として考慮しないこととする。
- ・塗布供試体の削孔試験結果のグラフデータ上の点を結んでいく。このとき塗布回数の少ないものからプロットしていき、これより塗布回数の多い供試体の試験結果はこのプロットを下回らないように設定する。

塗布回数 0 回の無塗布供試体の削孔速度は表面から内部まで 0.25mm/s 前後の一定値であり、これが供試体元来の削孔に対する強度であると考えられる。ここに高含浸性強化剤を塗布すると、塗布を行った表面から、削孔速度が遅くなり、削孔に対する強度が向上する。塗布回数を増やすと、既に強化された部分はさらに強度が向上し、削孔速度は 0.05mm/s 付近へと近づいていく。そして強化される部分は供試体の内部へと進行していく。また、樹脂固形分率で比較を行うと、樹脂固形分率が小さいほど塗布回数に対する強度の向上は小さくなる傾向がある。

ここに、前述の領域 A, B, C を適用すると、**図 3-30**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 C 領域である。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。固形分が少なく深くまで含浸しやすいが、塗布回数を増やしても領域 A は僅か大きく強化することはできない。

図 3-31 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、塗布回数が増えると領域 B であった部分が領域 A となり、含浸強化が内部に進行する。

図 3-32 に示す樹脂固形分率 40%では、少ない塗布回数であっても領域 A となり、塗布を重ねるとさらに領域 A は増加していく。このため少ない塗布回数でも大きく強化することができる。一方で、領域 B, C の割合は小さい。

図 3-33 に示す樹脂固形分率 80%では、少ない塗布回数で極く表層は領域 A となるが、これ以上はほとんど含浸せず、表面で膜状になってしまう。

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 は強度が緩やかに上昇していく。

これらの図から、供試体の意図した深さおよび強度に対する樹脂固形分率と塗布回数の選定が可能となる。例として、深さ 3mm の地点の削孔速度を 0.10m/s としたい場合、樹脂固形分率 20%の調合においては、図 3-34 より、塗布回数 15 回と 25 回の中の塗布が必要となることがわかる。樹脂固形分率 40%の調合では、図 3-35 より、塗布回数 8 回および 10 回の中の塗布が必要ということになる。

以上の様に改善する目標強度を削孔速度として設定し、これに達した場合の含浸強化深さと塗布回数の関係を図-36 に示す。ここでは、高含浸性強化剤による削孔速度の改善効果の最大値の概ね半分となる削孔速度 0.15mm/s を目標強度として設定した。ただし、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。また比較のために、削孔速度が 0.10 および 0.20 mm/s まで強化されている深さも示す。

図-36 (b) に示すように、目標とする削孔速度を 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、調合の樹脂固形分率が小さいほど、同じ含浸強化深さを得るには塗布回数は多くなる。また目標として設定する削孔速度が 0.10mm/s[図-36 (a)], 0.15mm/s[図-36 (b)], 0.20mm/s[図-36 (c)]の比較を行うと、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ようとしたとき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同関係は変化するが、各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。

図 3-37 は、無塗布セメントペースト供試体への削孔試験および圧縮強度試験の結果より、削孔速度-圧縮強度の検量線を導いたものである。ここに、高含浸性強化剤の塗布を行った供試体の削孔試験結果より、十分に高含浸性強化剤が浸透し、強度の改善が行われていると判断できる部分の削孔速度として 0.05mm/s を代入すると、約 20N/mm²のセメントペーストと同程度の削孔抵抗まで改善されていることがわかる。

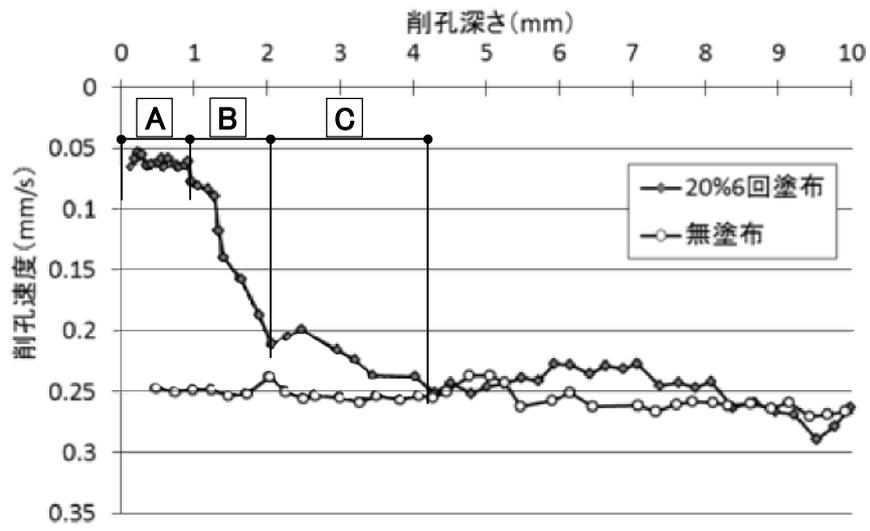


図 3-29 削孔試験結果の例

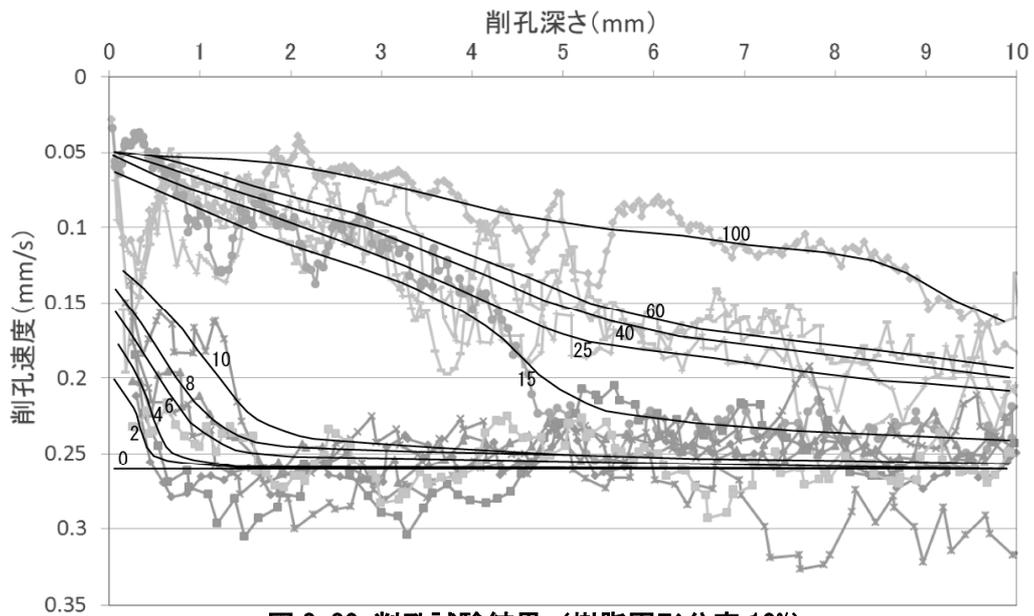


図 3-30 削孔試験結果（樹脂固形分率 10%）

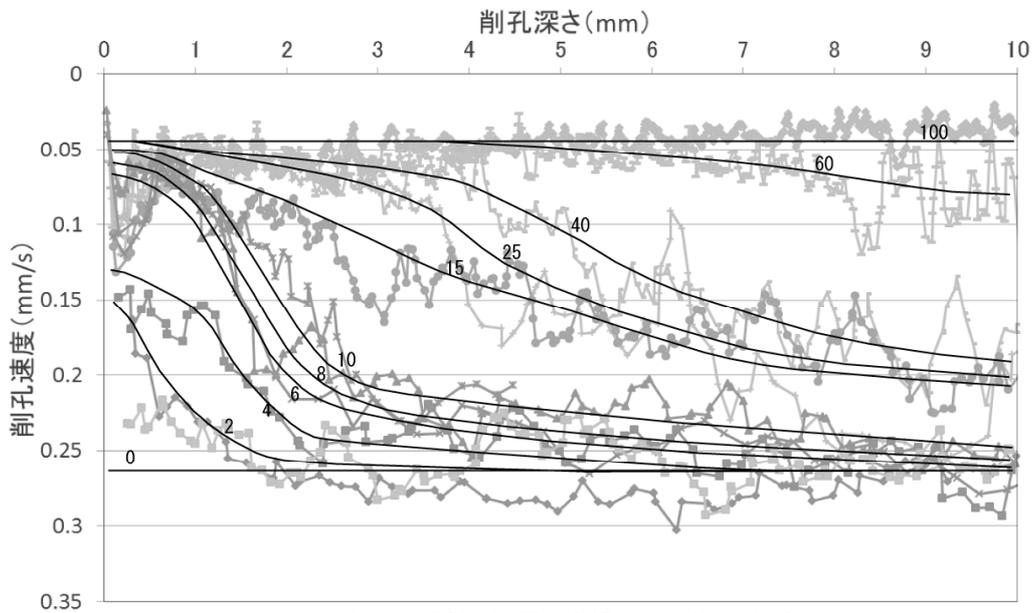


図 3-31 削孔試験結果（樹脂固形分率 20%）

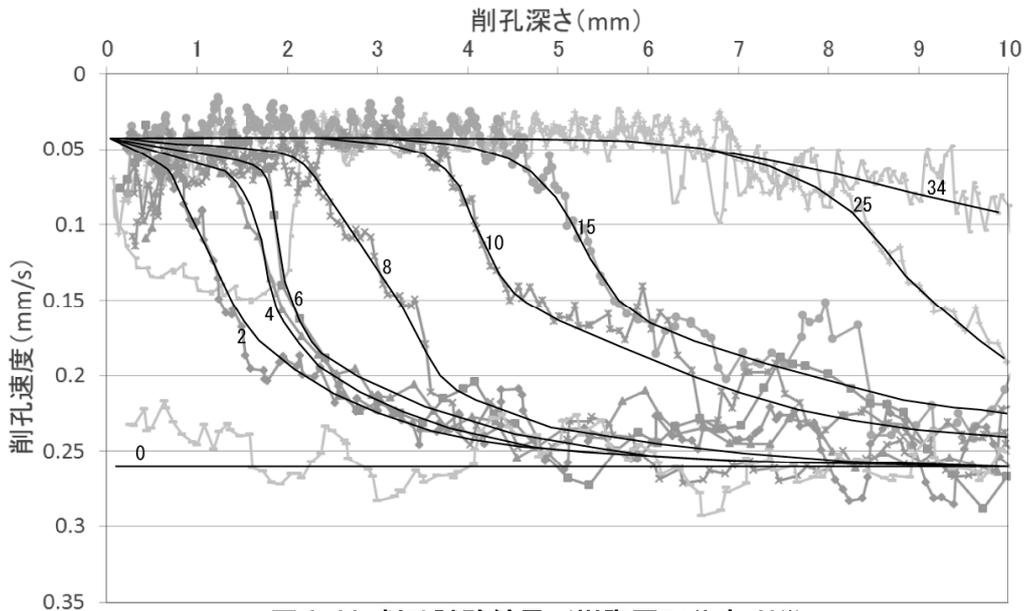


図 3-32 削孔試験結果 (樹脂固形分率 40%)

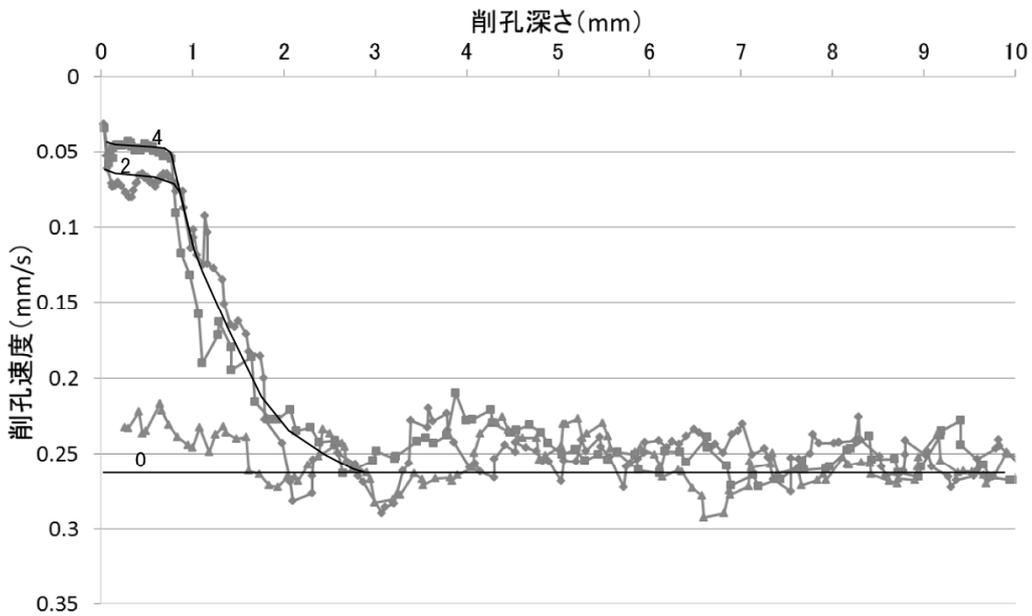


図 3-33 削孔試験結果 (樹脂固形分率 80%)

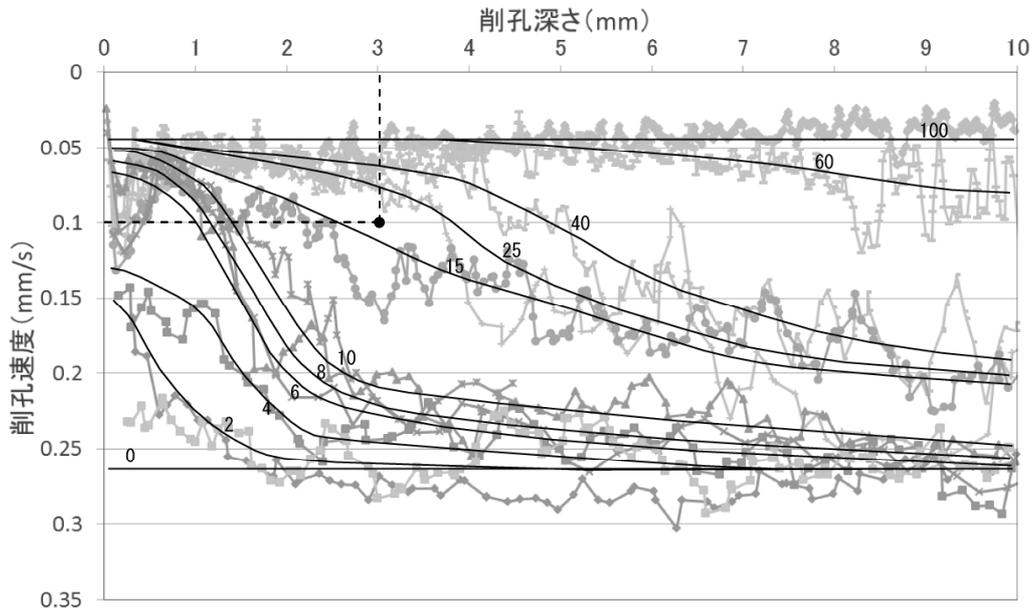


图 3-34 塗布回数選定方法 (樹脂固形分率 20%)

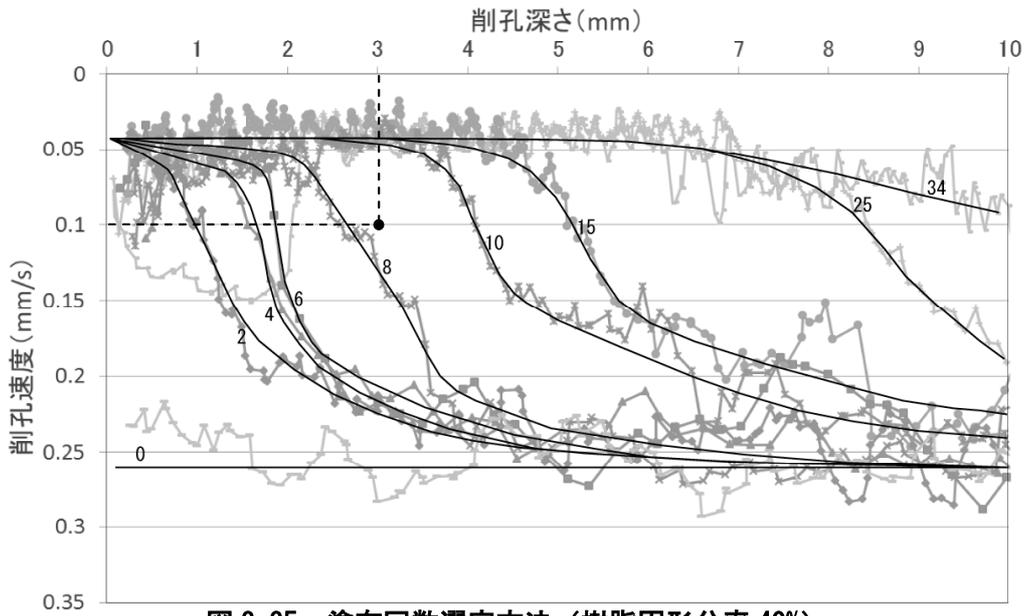
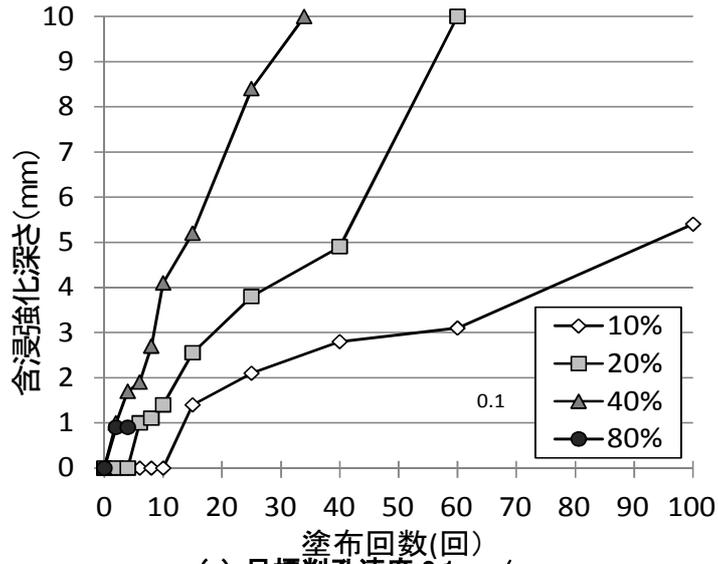
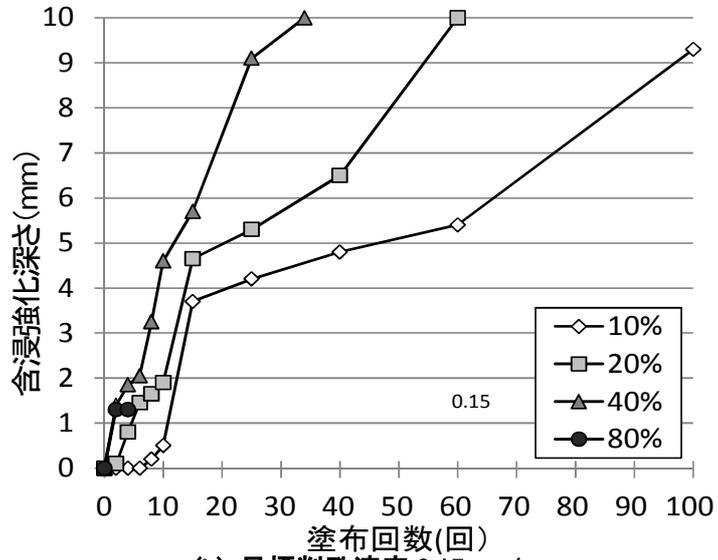


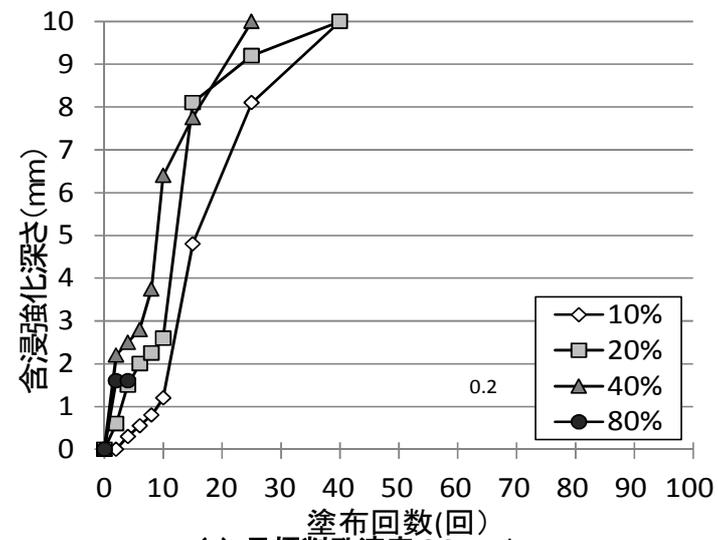
图 3-35 塗布回数選定方法 (樹脂固形分率 40%)



(a) 目標削孔速度 0.1mm/s



(b) 目標削孔速度 0.15mm/s



(c) 目標削孔速度 0.2mm/s

図 3-36 目標削孔速度における含浸強化深さと塗布回数の関係

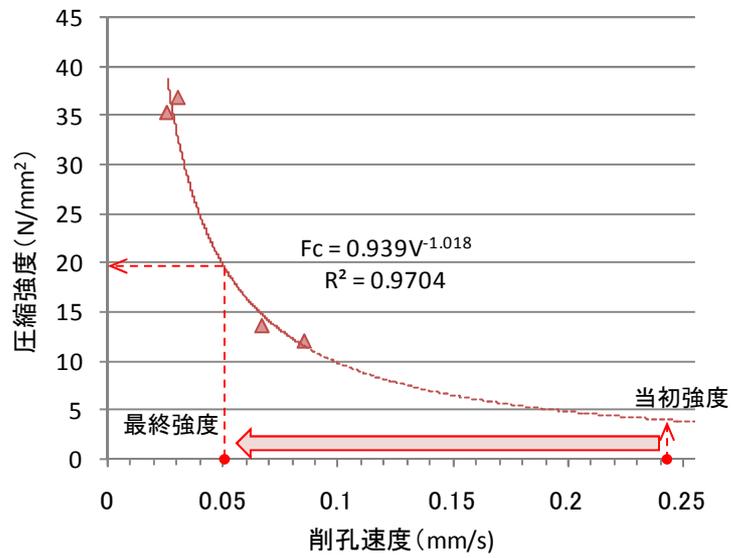


図 3-37 検量線 (セメントペースト)

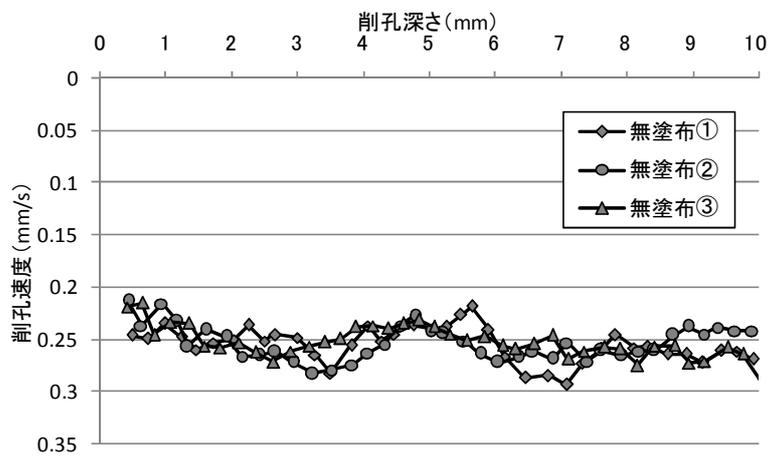
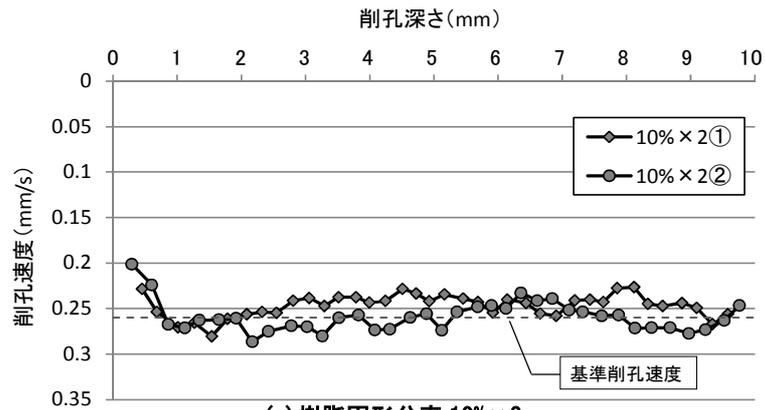
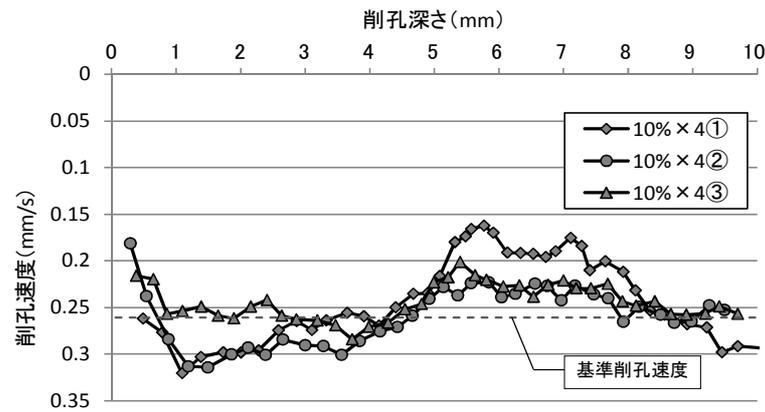


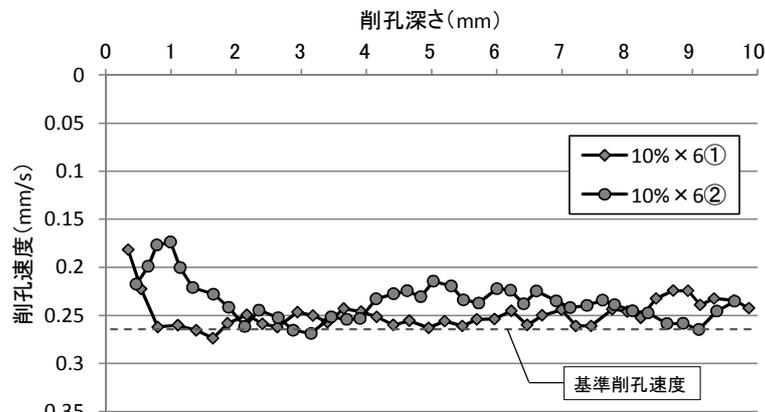
図 3-38 C90[400°C]への削孔試験結果 (無塗布)



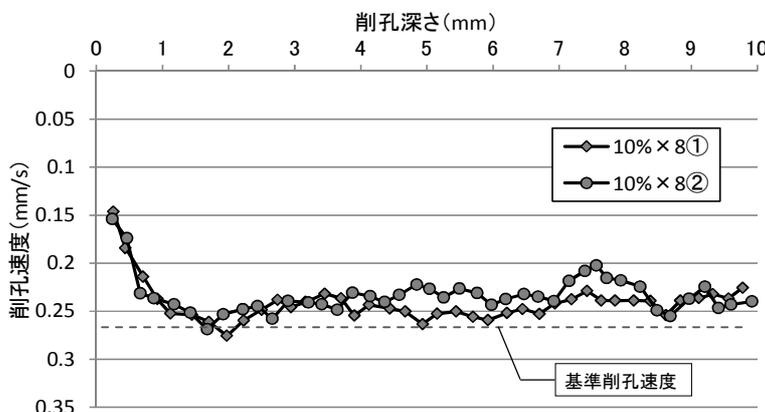
(a) 樹脂固形分率 10% × 2



(b) 樹脂固形分率 10% × 4



(c) 樹脂固形分率 10% × 6



(d) 樹脂固形分率 10% × 8

図 3-39 C90[400℃]への削孔試験結果 (樹脂固形分率 10%) 【a~d】

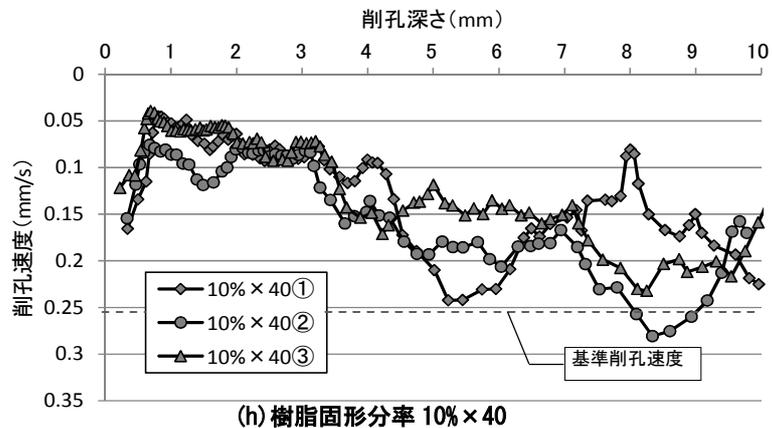
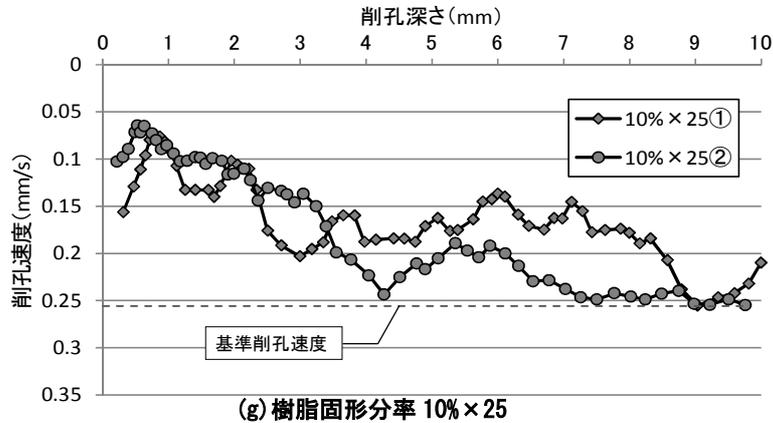
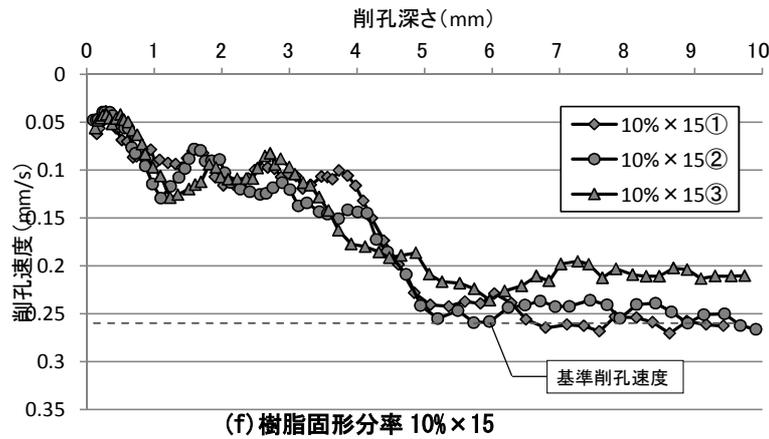
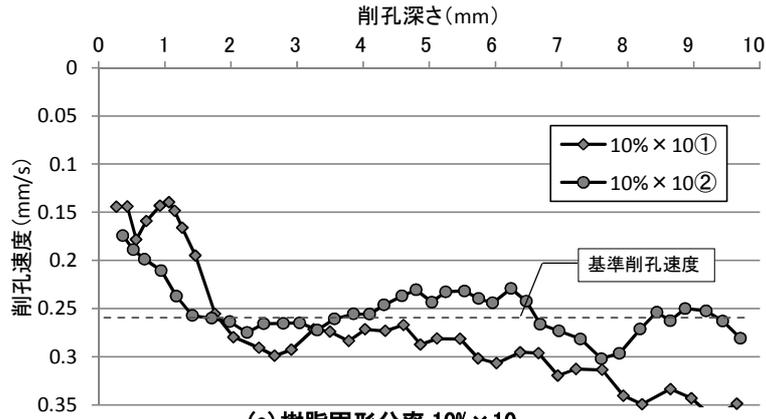


図 3-39 C90[400°C]への削孔試験結果（樹脂固形分率 10%）【e~h】

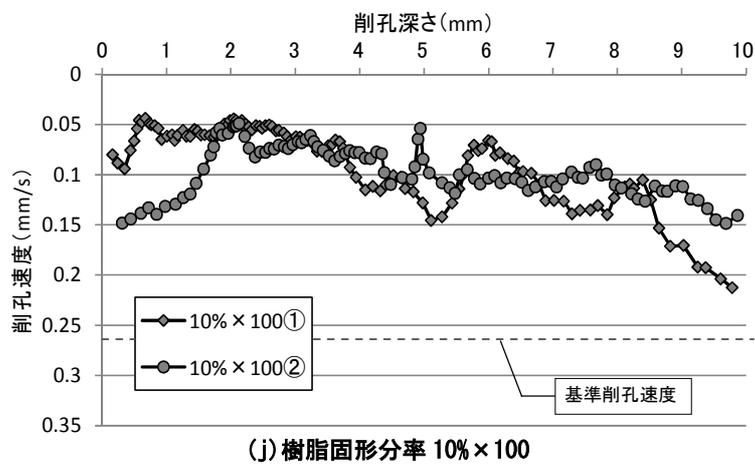
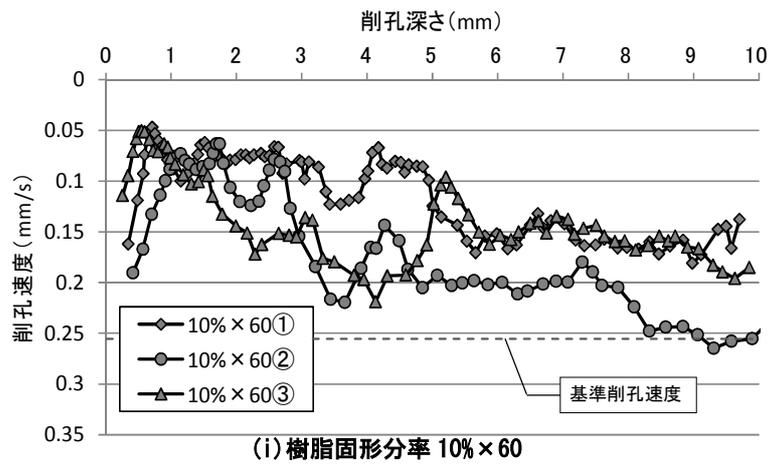


図 3-39 C90[400°C]への削孔試験結果（樹脂固形分率 10%）【i～j】

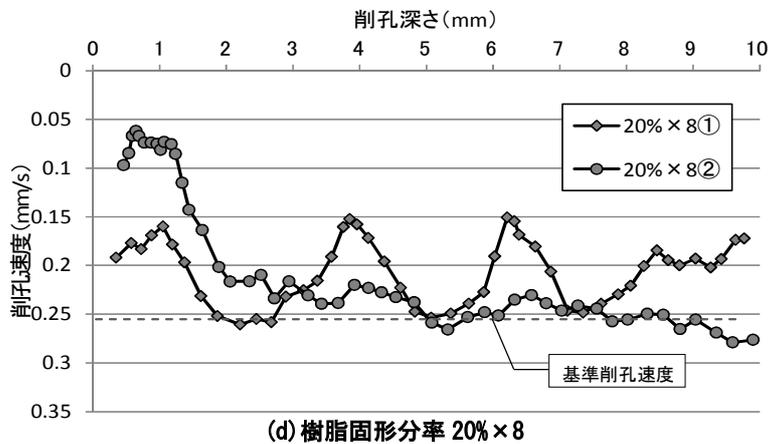
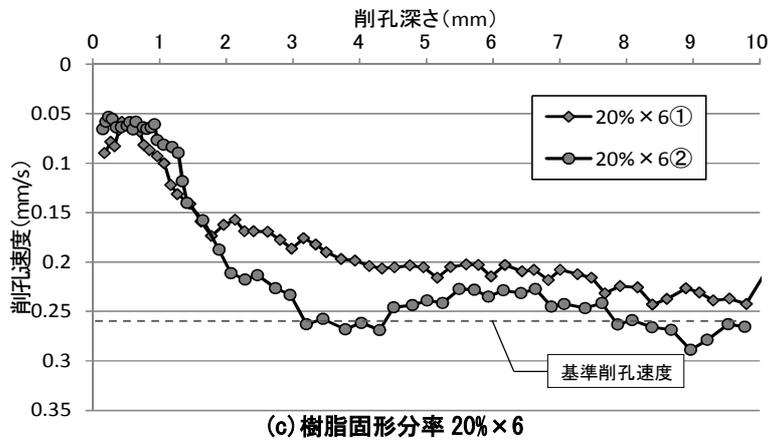
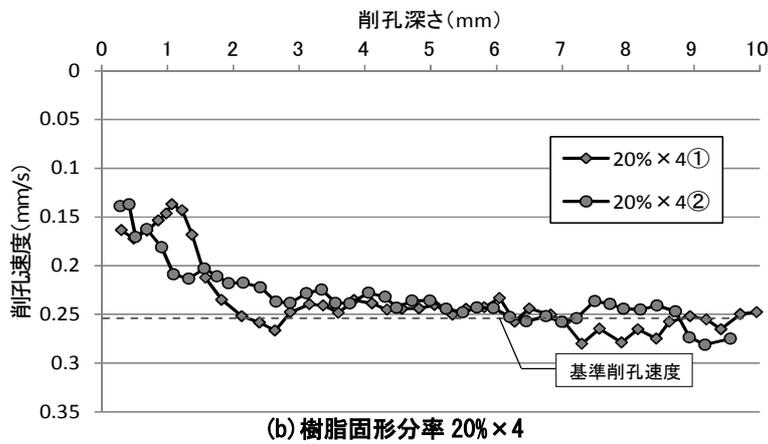
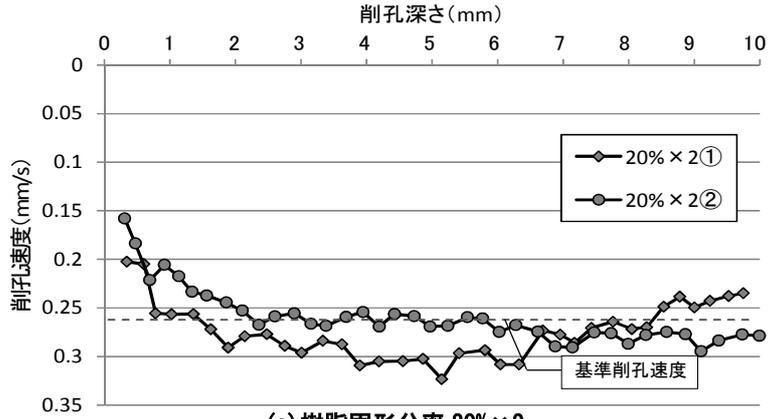


図 3-40 C90[400°C]への削孔試験結果（樹脂固形分率 20%）【a~d】

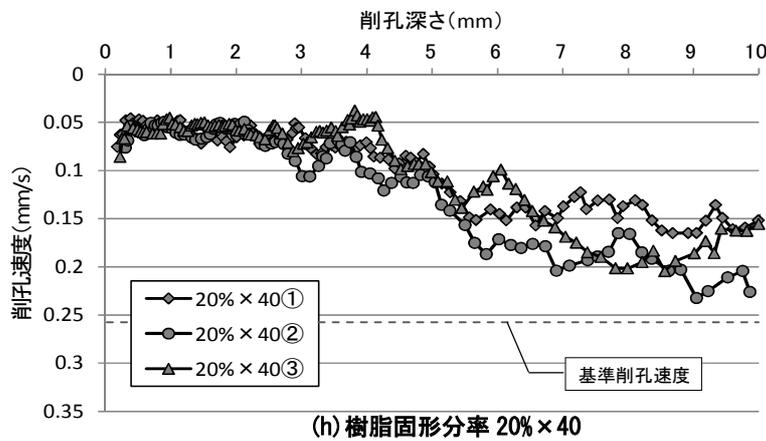
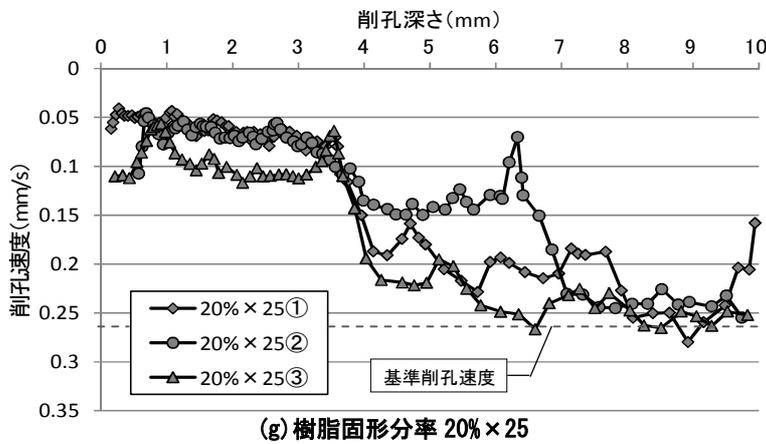
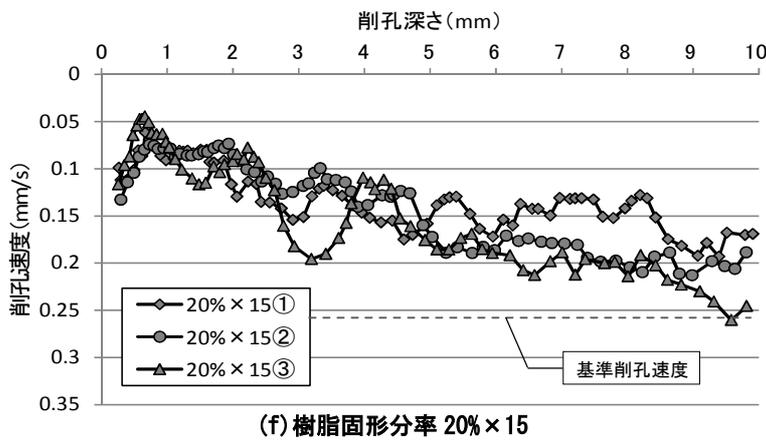
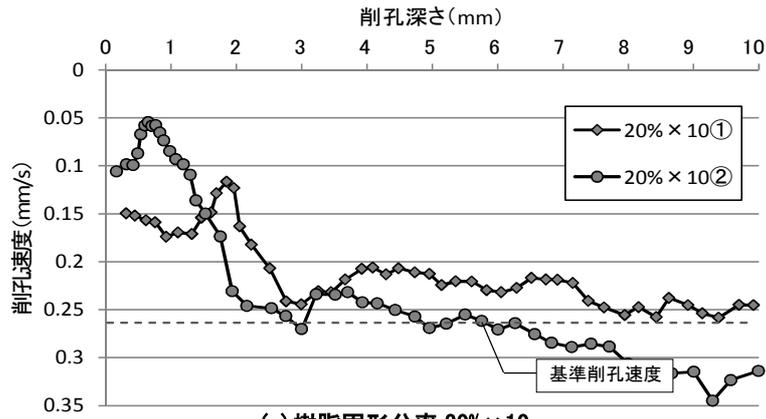
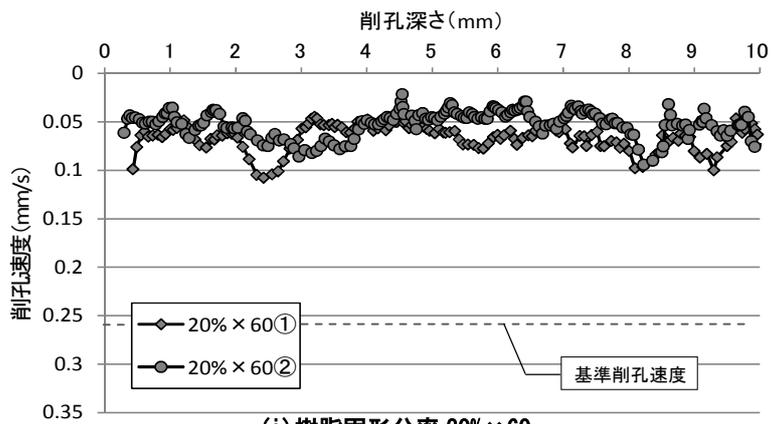
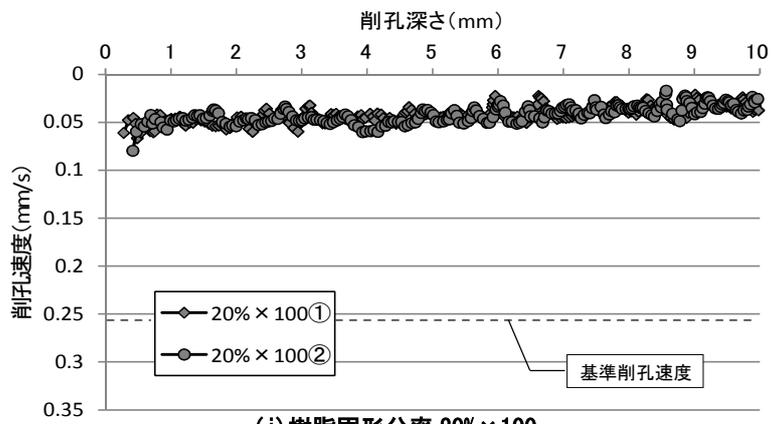


図 3-40 C90[400°C]への削孔試験結果（樹脂固形分率 20%）【e~h】



(i) 樹脂固形分率 20% × 60



(j) 樹脂固形分率 20% × 100

図 3-40 C90[400°C]への削孔試験結果 (樹脂固形分率 20%) 【i~j】

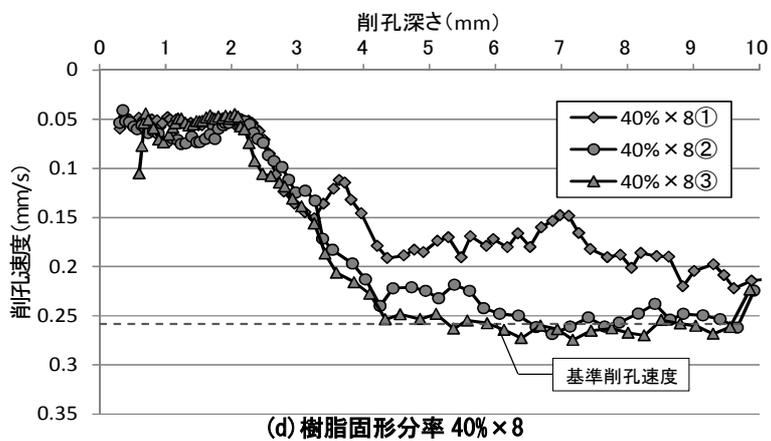
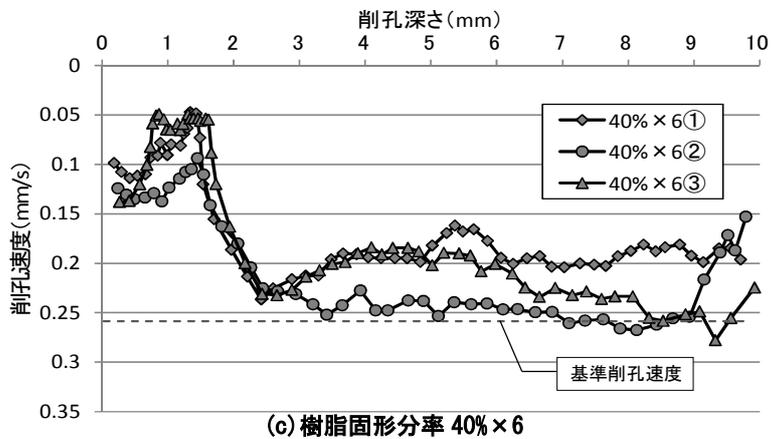
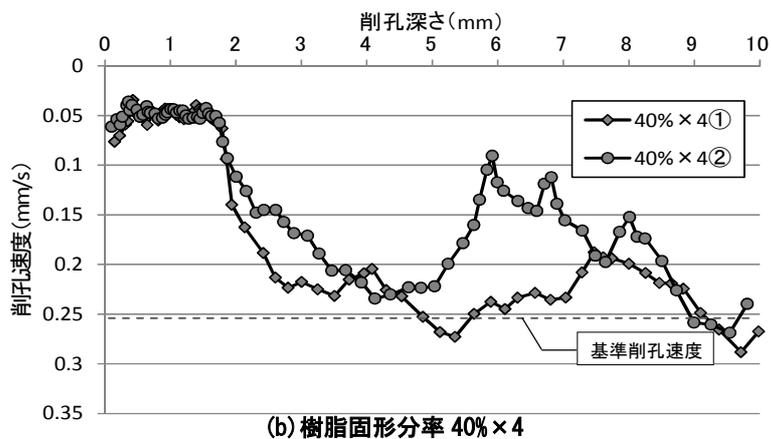
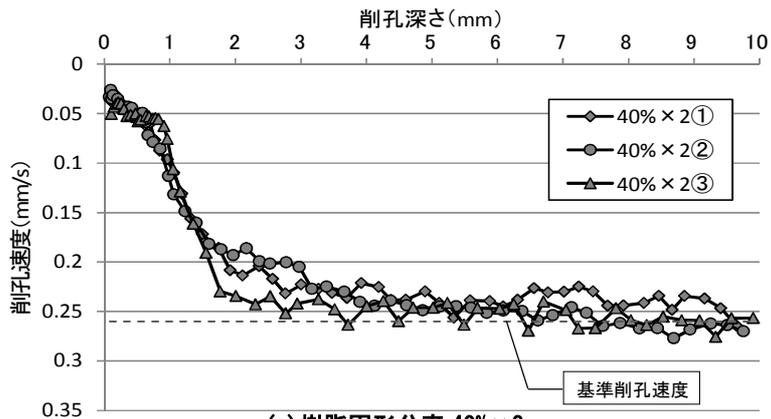


図 3-41 C90[400°C]への削孔試験結果（樹脂固形分率 40%）【a~d】

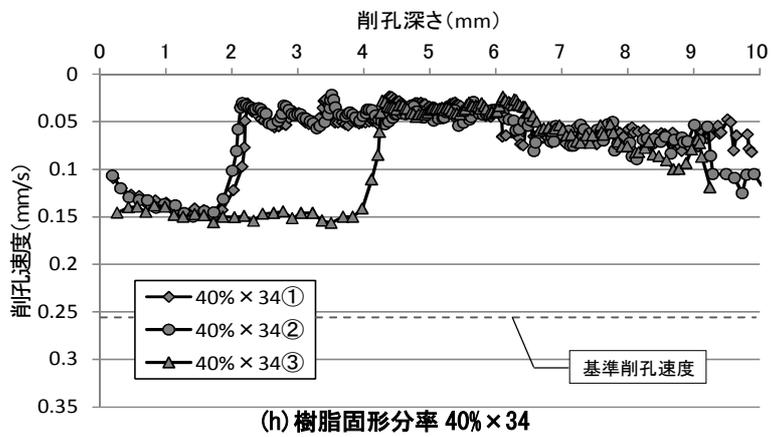
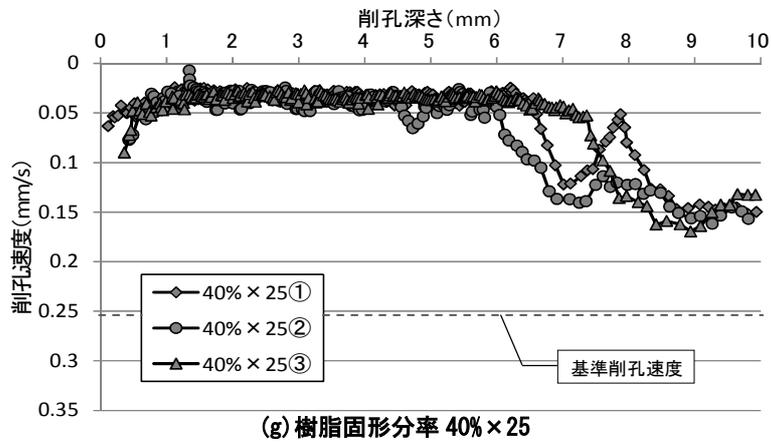
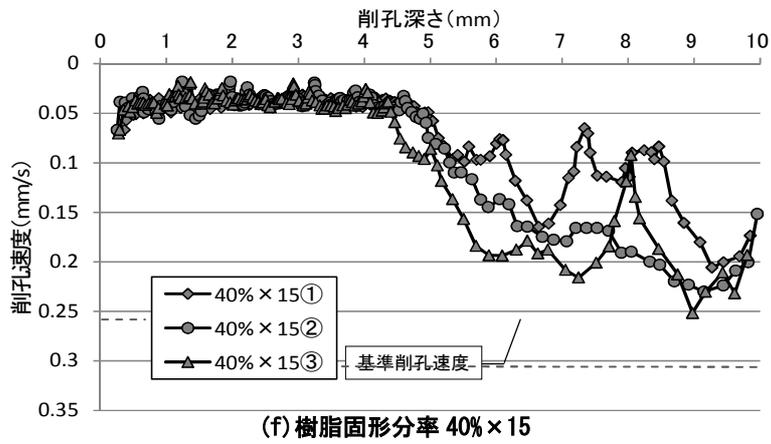
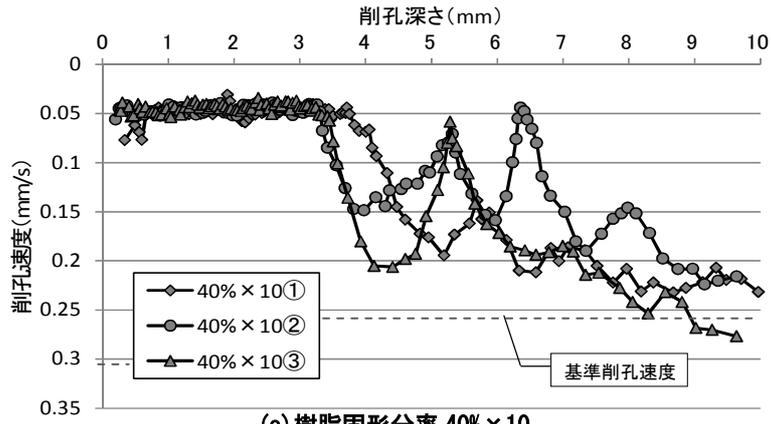
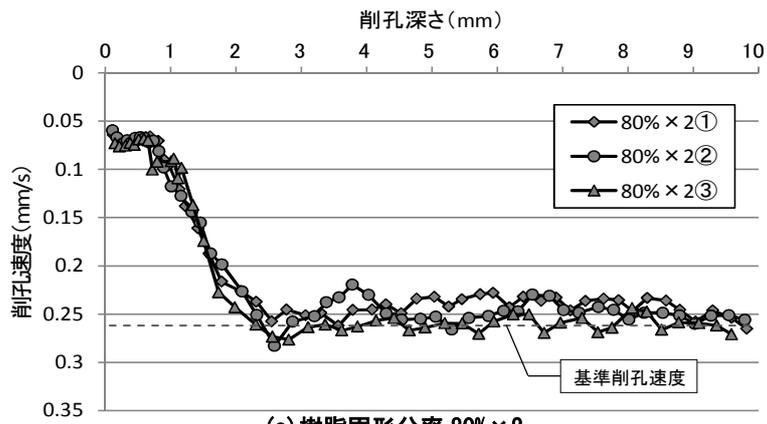
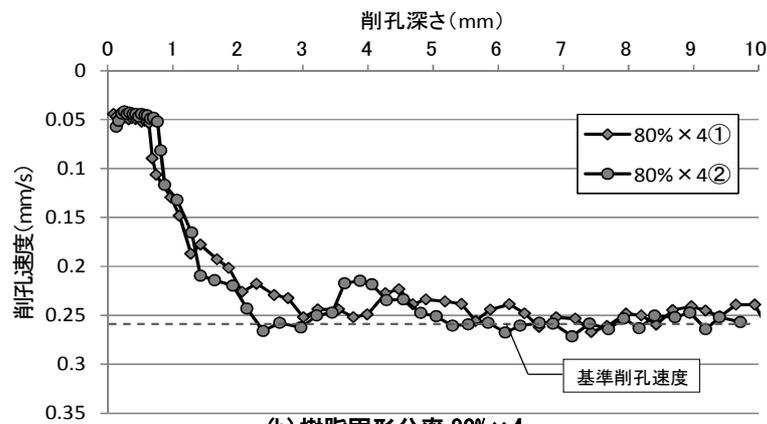


図 3-41 C90[400°C]への削孔試験結果（樹脂固形分率 40%）【e~h】



(a) 樹脂固形分率 80% × 2



(b) 樹脂固形分率 80% × 4

図 3-42 C90[400°C]への削孔試験結果 (樹脂固形分率 80%) 【a~b】

c) 含浸深さ評価方法の比較（撥水断面観察法と削孔試験法の比較）

断面の撥水による高含浸性強化剤の含浸深さの測定結果（以下、撥水発現深さと呼ぶ）と、削孔速度の比較を行った。図 3-43~46 は、削孔試験結果に各塗布回数時の撥水発現深さを表示したものである。同図より、樹脂固形分率 10%においては、領域 C で撥水発現深さが測定されているが、樹脂固形分率 20%および樹脂固形分率 40%では、領域 B と領域 C の境界付近で撥水発現深さが測定されている。また樹脂固形分率 80%では、領域 B の中間付近で撥水発現深さが測定されている。

この撥水発現深さとそれに対する削孔速度の関係を図 3-47 に示す。樹脂固形分率 80%を除く他の調合においては、供試体の表面から 4mm の深さでは、樹脂固形分率 10%は削孔速度 10mm/s 前後、樹脂固形分率 20%は削孔速度 0.22mm/s 前後、樹脂固形分率 40%は 0.2mm/s 前後であり、調合による違いはあるが、それぞれがほぼ一定の値を示した。約 4~6mm 付近で少々ばらつきが生じるが、深くなるにつれて削孔速度は遅くなり、約 6mm 以深になると、どの調合においても削孔速度が 0.18mm/s 前後で一定となった。また、樹脂固形分率 80%は 0.17~0.18mm/s の削孔速度であった。

このように、供試体表面から約 4mm までは、撥水発現深さでの削孔速度は比較的速く、一定値である。しかし、約 4mm 以深では、撥水発現深さにおける削孔速度は遅くなり、供試体表面から約 4mm までの撥水発現深さの場合よりも強度が向上している部分、すなわち、より樹脂固形分が多く含浸していると考えられる部分で撥水発現深さが決まっている。ここで、撥水発現深さは撥水作用を有する助剤の影響によって撥水している深さを測定しており、厳密には樹脂固形分の含浸している深さを示していない可能性がある。以上のことから撥水を示す部分と撥水を示さない部分の境界により測定される撥水発現深さからは、必ずしも高含浸性強化剤の正確な含浸深さを示していないと考えられる。

このような撥水発現深さの性質と削孔試験結果から考えられる事項として、供試体に対して高含浸性強化剤の塗布を重ねるうちに、供試体内部に満たされた高含浸性強化剤中で助剤が分離し、比較的表面にたまることで樹脂の含浸している部分まで撥水しなかったこと。また、塗布回数が多い場合に撥水含浸深さとして測定される地点は、削孔試験結果によれば、塗布回数が少ない時は領域 C の部分で、塗布を重ねる毎に徐々に強度が上昇している部分であることから、樹脂は塗布回数を重ねる度に少量ずつ内部へ含浸するが、助剤は含浸しにくいということ等が考えられる。これらの原因は現時点では十分に確認ができていないため今後の課題として取り組む必要がある。

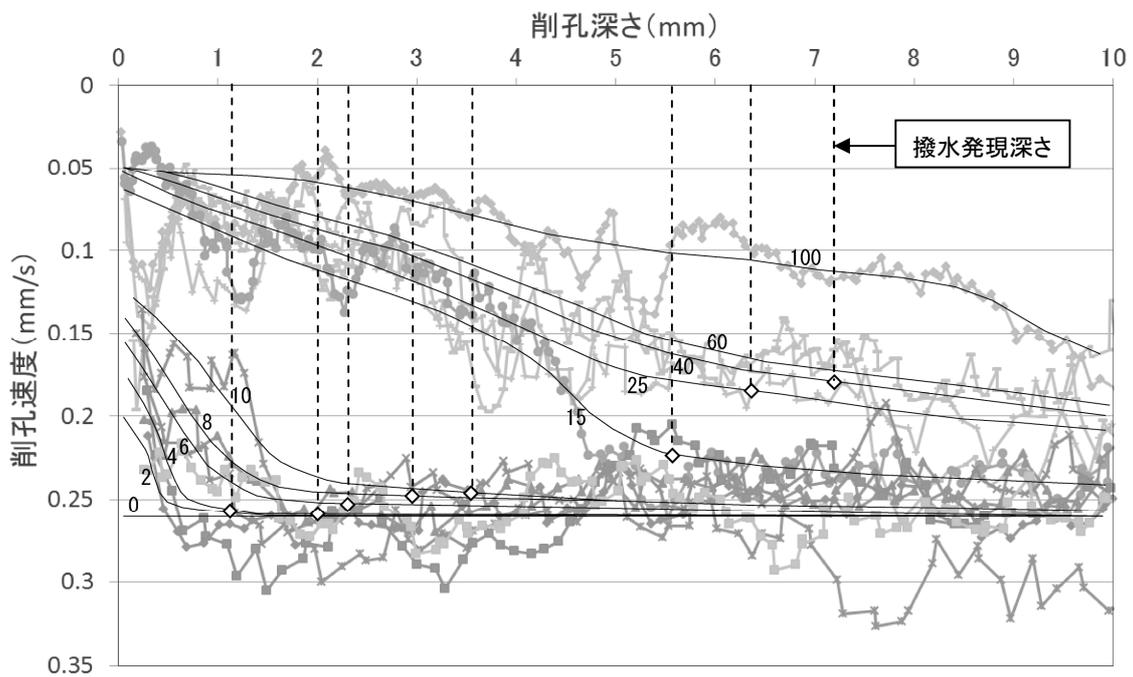


図 3-43 削孔試験結果と撥水発現深さの関係
(樹脂固形分率 10%)

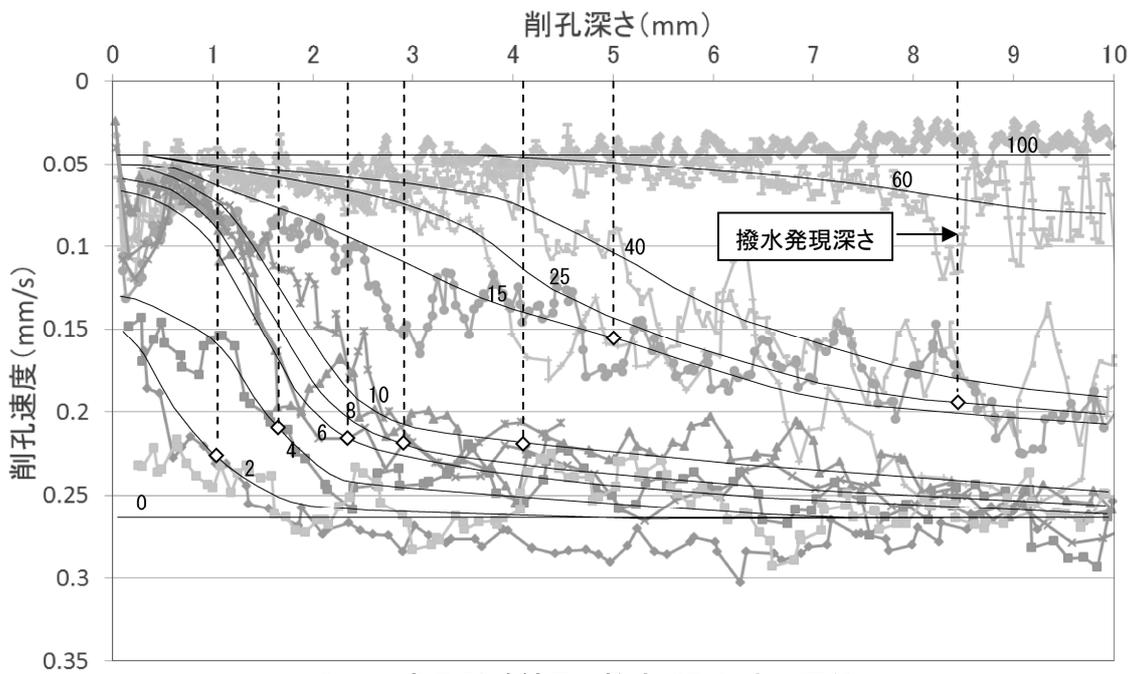


図 3-44 削孔試験結果と撥水発現深さの関係
(樹脂固形分率 20%)

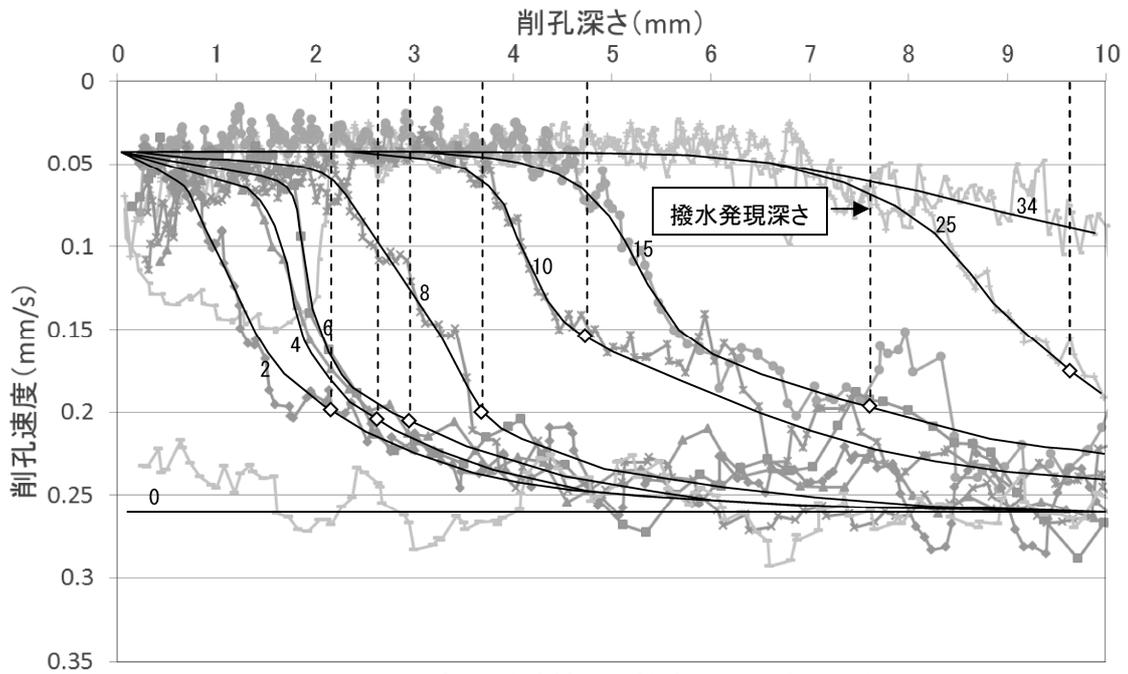


図 3-45 削孔試験結果と撥水発現深さの関係
(樹脂固形分率 40%)

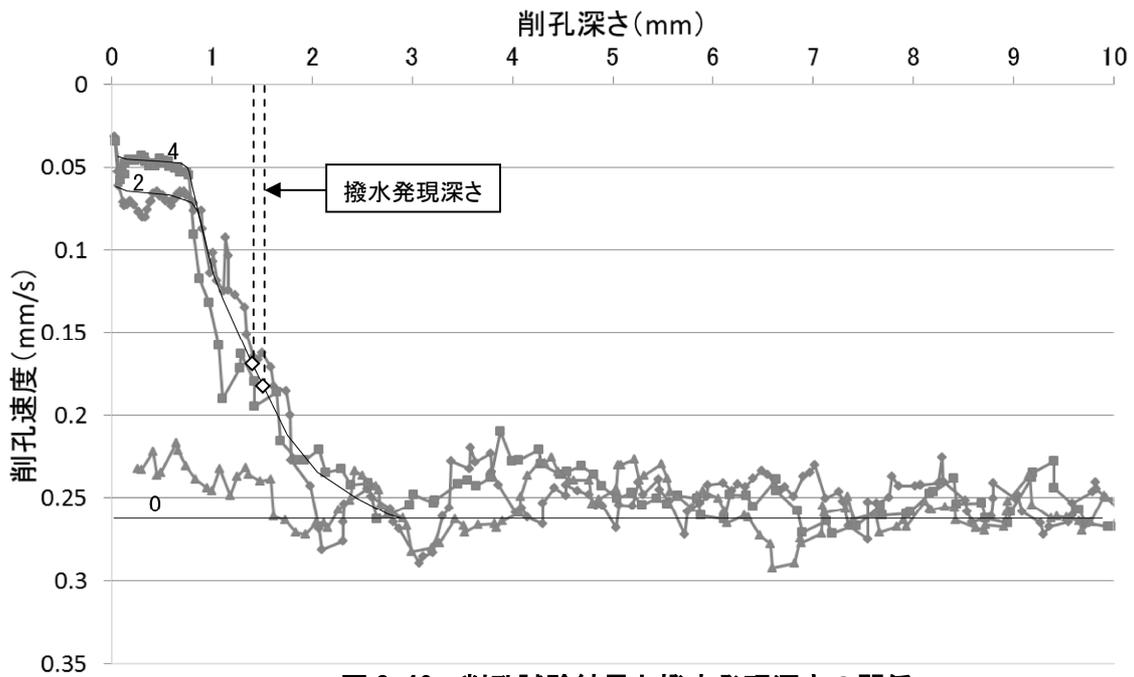


図 3-46 削孔試験結果と撥水発現深さの関係
(樹脂固形分率 80%)

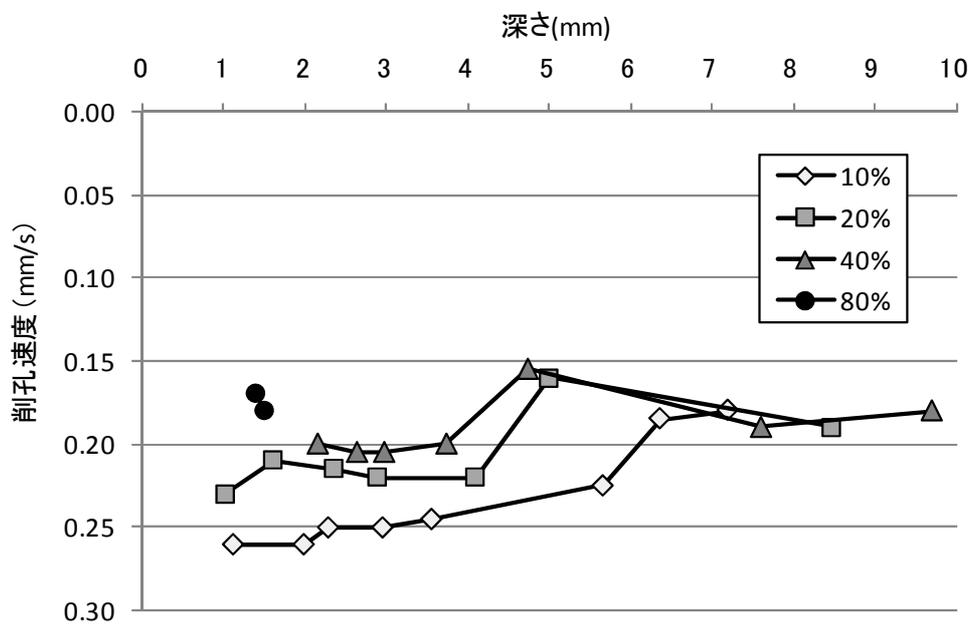


図 3-47 撥水発現深さでの削孔速度

2) 煉瓦への塗布 (参考)

①概説

これまで主にセメントペーストを供試体として扱ってきたが、他の多孔質体への改質効果の評価を行うために、焼成温度 700℃の煉瓦を供試体として高含浸性強化剤の塗布を行い、削孔試験により評価を行った。

②高含浸性強化剤の調合

表 3-24 に高含浸性強化剤の成分とその機能を示す。図 3-48 に樹脂固形分と添加剤の調合比率を示す。また吸水性防止のために助剤(1)を樹脂固形分の 5% wt 添加した。

表 3-24 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		浸透性の制御
助剤(1)		防汚・給水防止性の付与

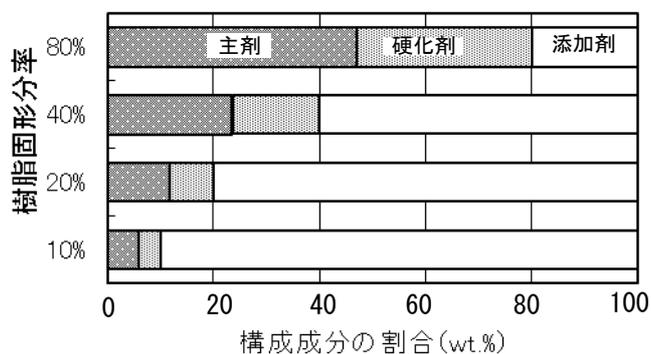


図 3-48 成分の調合比

③供試体

供試体は焼成温度 700℃の煉瓦を使用した。供試体の形状は 30×30×50(mm)とし、煉瓦塊から切り出して作成した。塗布は切断面に対して行った。

④実験の条件

表 3-25 に実験の要因と塗布回数(回)の関係を示す。樹脂固形分率 10, 20, 40, 80%について、刷毛を用いて、表中の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合に、含浸が不可能となる回数が生じたため、実際にはそれ以下の回数で行った。

表 3-25 要因と水準

被塗布供試体	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
煉瓦 [700℃焼成]	10	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	100
	20	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	80
	40	○	○	○	○	○	○	×	×	×	×	18
	80	○	×	×	×	×	×	×	×	×	×	2

⑤試験方法

小径ドリル削孔試験装置を用いて供試体を削孔し、削孔速度により深さ方向の強度分布を推定した。表 3-26 に試験機の条件を示す。供試体は 20×40×80 (mm) のセメントペースト角柱体を用いた。削孔試験は、1 秒毎のビット先端位置を削孔深さとして測定した。最大削孔深さは 10 (mm) とした。削孔時には水流により先端ビットの磨耗抑制および削粉排出し、湿式の測定を行なった。

表 3-26 試験機の条件

試験装置	3号機
バネ強さ	5.88[N]×2本
ビット径	2.95[mm]
ビット偏芯	0.3[mm]
回転数	1500[rpm]
削孔水	水道水
水圧:水平到達距離* (吐出水量)	150[cm] (221[g/min])

*: φ1のパイプ先端から水平吐出させた水がパイプ高さより90cm下がった時の水平距離

⑥実験の結果と考察

煉瓦に対しては樹脂固形分率 10%では 100 回以上の塗布が可能であった。樹脂固形分率 20%では 80 回、樹脂固形分率 40%では塗布回数 18 回、樹脂固形分率 80%では 2 回が最大塗布回数であった。

図 3-49~52 に削孔試験の結果を示す。高含浸性強化剤が含浸せずに強度の発現していない部分である煉瓦の素の削孔速度が遅い部分では 0.2mm/s 前後、速い部分では 0.35mm/s 前後の値であった。これは、被塗布供試体を煉瓦塊から切り出して作成しているため、同じ煉瓦であっても異方性や切り出す位置の焼成時の温度状態によりばらつきが生じたことが原因であると考えられる。また同じ焼成温度の煉瓦であっても焼成窯中での位置によって温度状態によるばらつきが生じることが考えられる。このため、高含浸性強化剤の調合や塗布回数による、正確な比較を行うことは困難であった。しかし同じ調合の下で比較を行うと、供試体の表面より削孔強度は改善され、塗布回数を増やすとともに強化部分は内部へと進行していき、塗布を行ったセメントペーストへの削孔試験結果と同様に含浸強化されていくことがわかる。このことから無塗布削孔速度にばらつきがあるため、高含浸性強化剤による強度の上昇値を設定することはできないが、強化部分に関しては塗布回数とともに内部へ進行していくので、セメントペーストに対する評価方法と同様に、任意の深さの強度を高含浸性強化剤の塗布により改善することは可能であると考えられる。

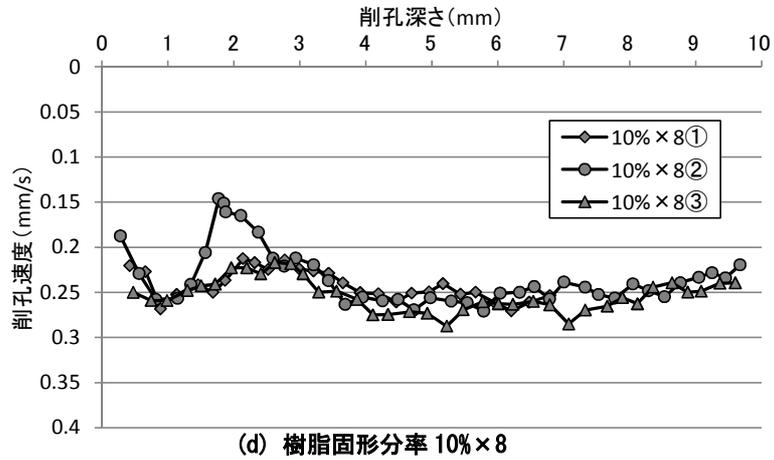
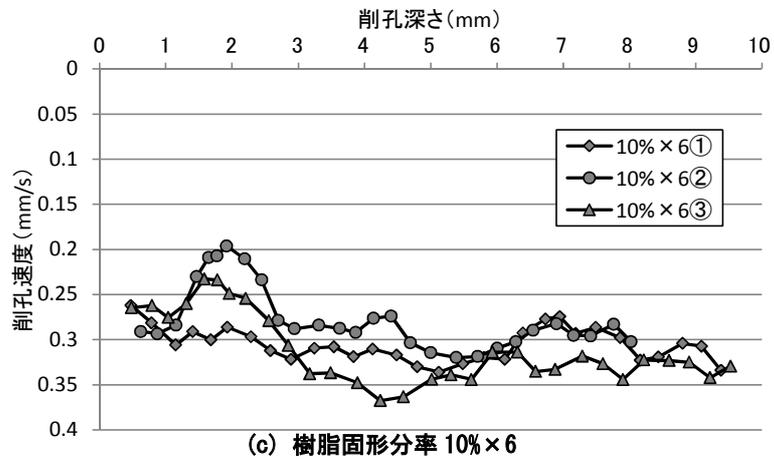
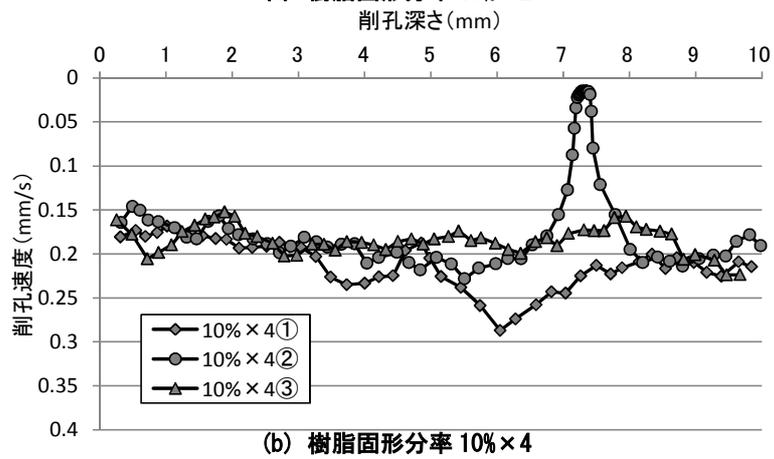
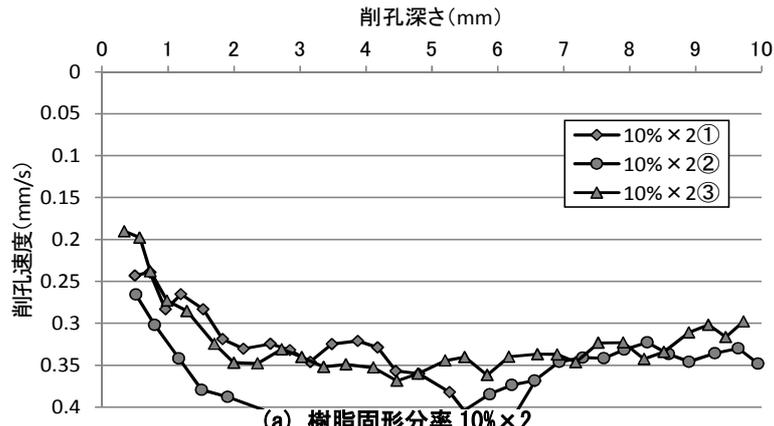
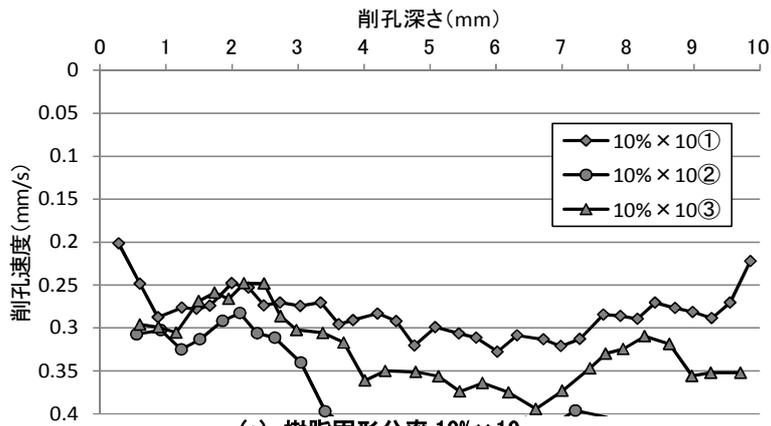
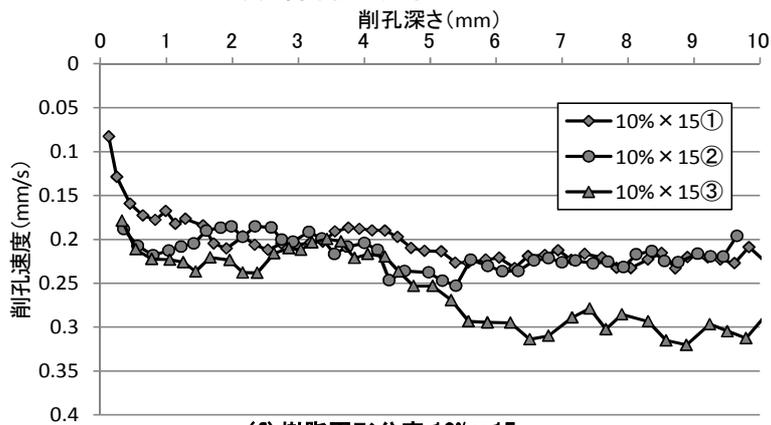


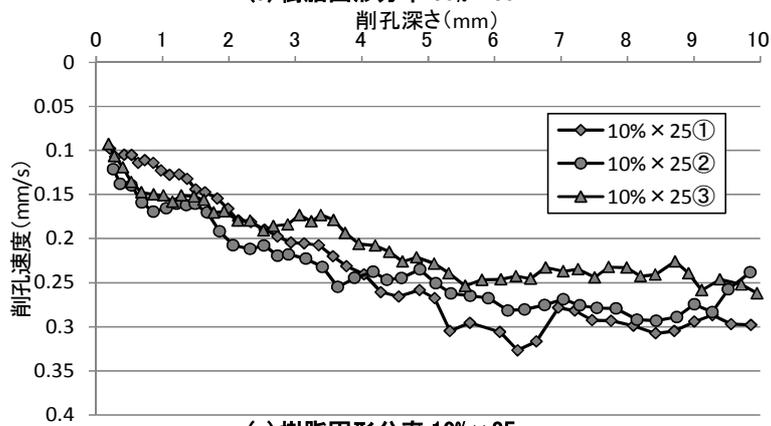
図 3-49 煉瓦 [700°C] への削孔試験結果 (樹脂固形分率 10%)



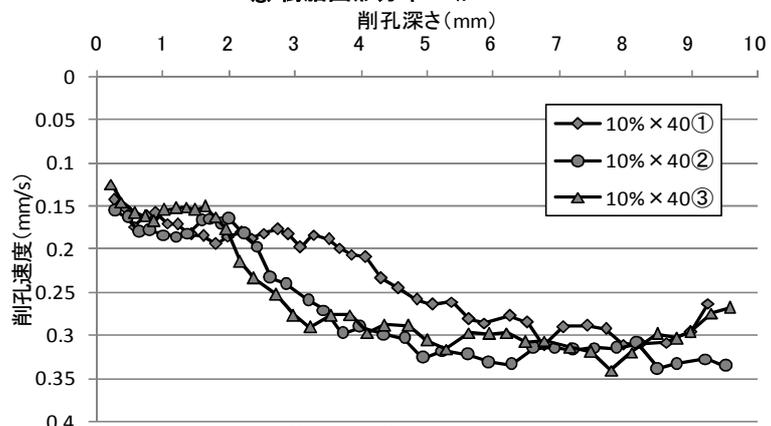
(e) 樹脂固形分率 10% × 10



(f) 樹脂固形分率 10% × 15

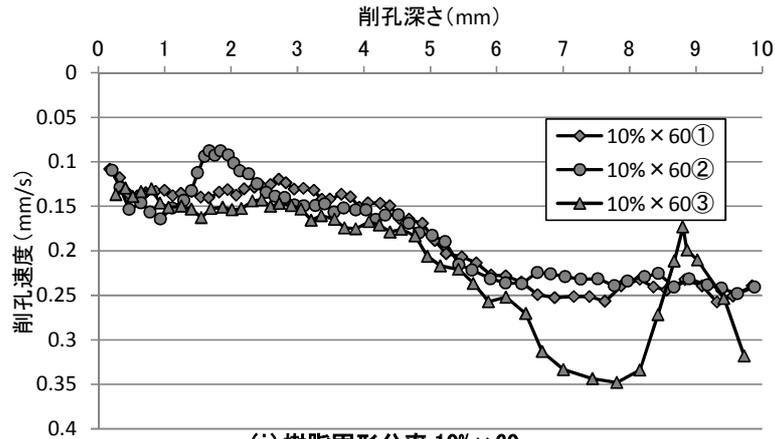


(g) 樹脂固形分率 10% × 25

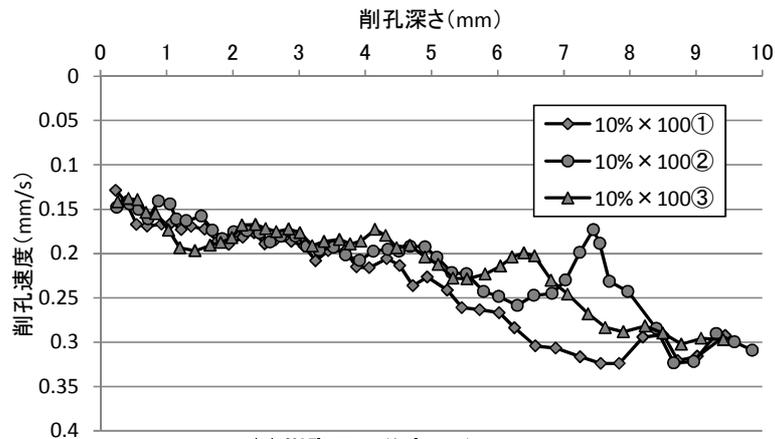


(h) 樹脂固形分率 10% × 40

図 3-49 煉瓦 [700°C] への削孔試験結果 (樹脂固形分率 10%)

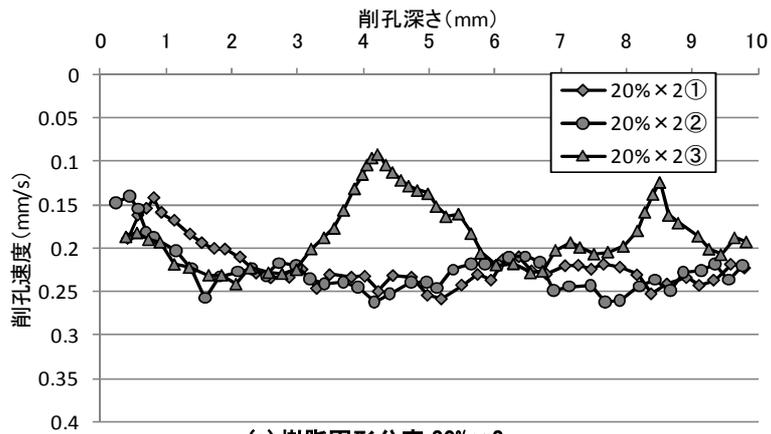


(i) 樹脂固形分率 10% × 60

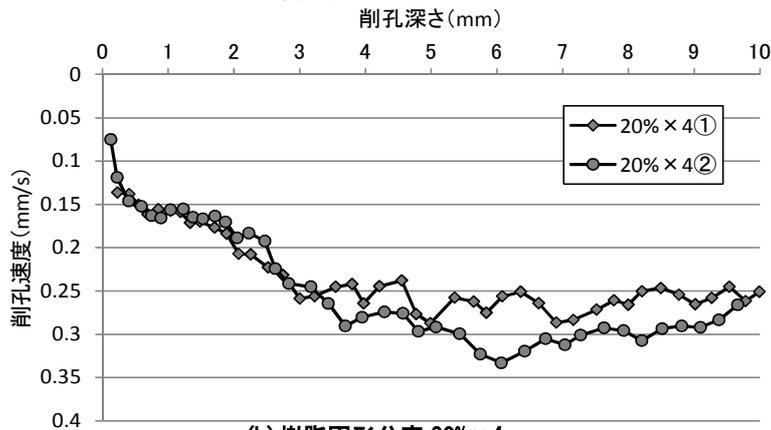


(j) 樹脂固形分率 10% × 100

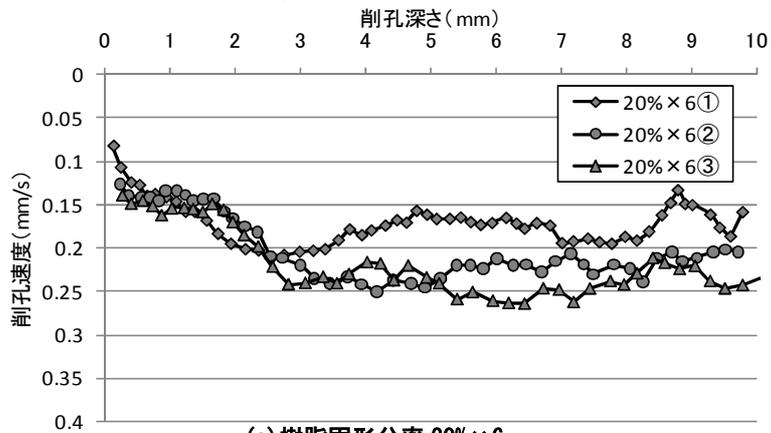
図 3-49 煉瓦 [700°C] への削孔試験結果 (樹脂固形分率 10%)



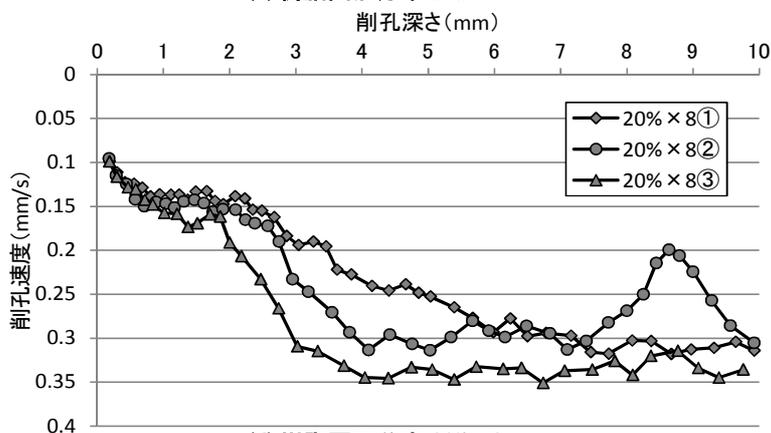
(a) 樹脂固形分率 20% × 2



(b) 樹脂固形分率 20% × 4

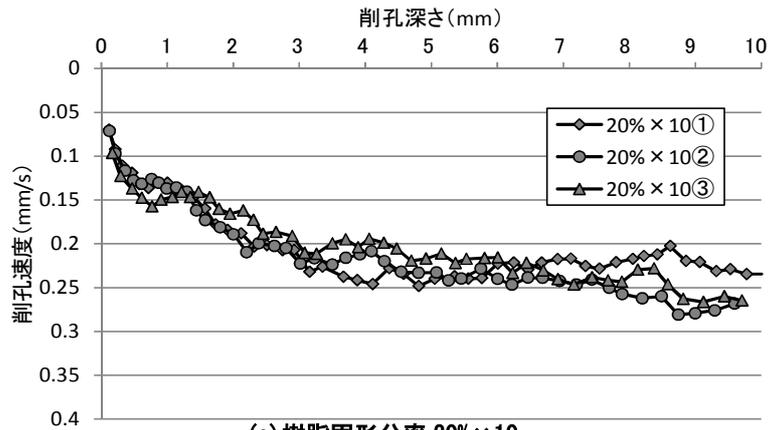


(c) 樹脂固形分率 20% × 6

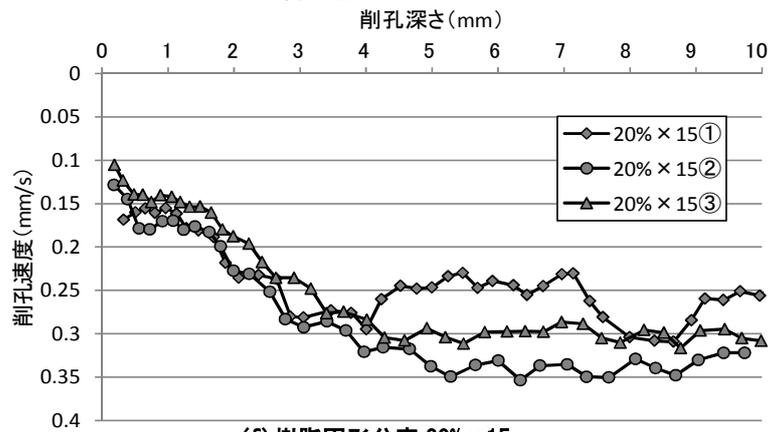


(d) 樹脂固形分率 20% × 8

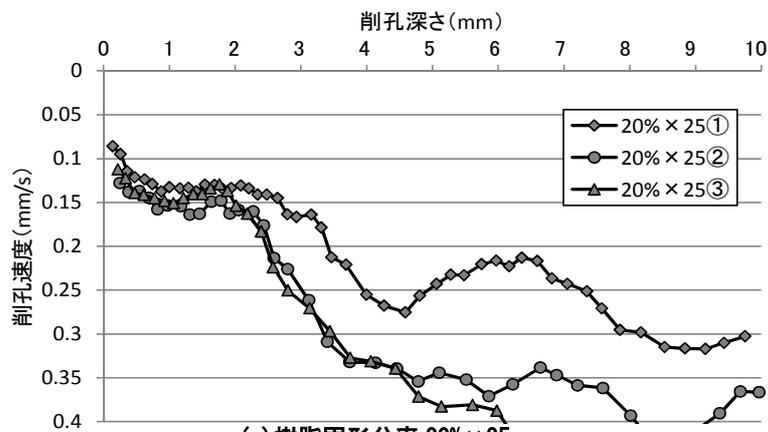
図 3-50 煉瓦 [700°C] への削孔試験結果 (樹脂固形分率 20%) 【a~d】



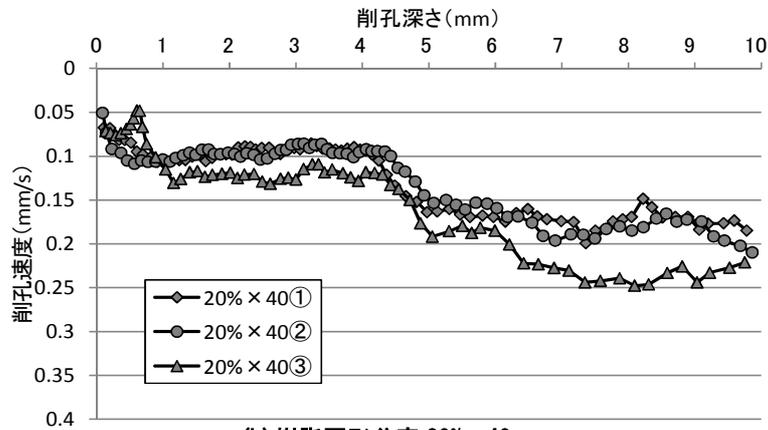
(e) 樹脂固形分率 20% × 10



(f) 樹脂固形分率 20% × 15

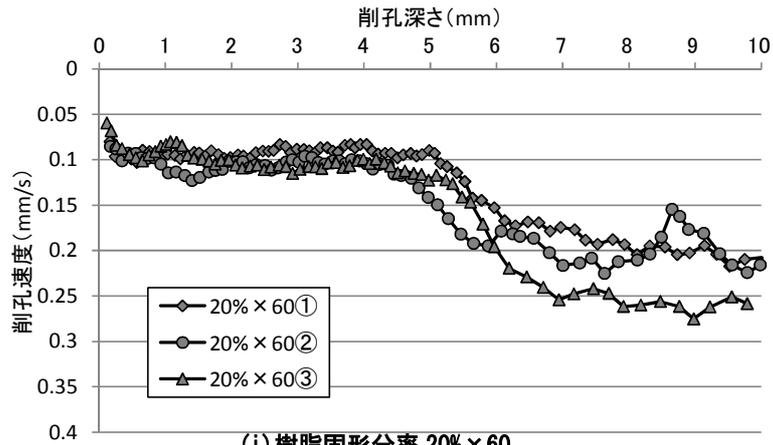


(g) 樹脂固形分率 20% × 25

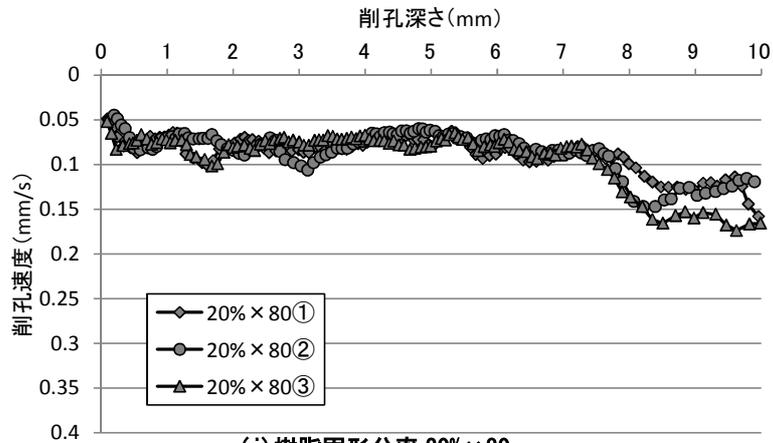


(h) 樹脂固形分率 20% × 40

図 3-50 煉瓦 [700°C] への削孔試験結果 (樹脂固形分率 20%) 【e~h】



(i) 樹脂固形分率 20% × 60



(j) 樹脂固形分率 20% × 80

図 3-50 煉瓦 [700°C] への削孔試験結果 (樹脂固形分率 20%) 【i~j】

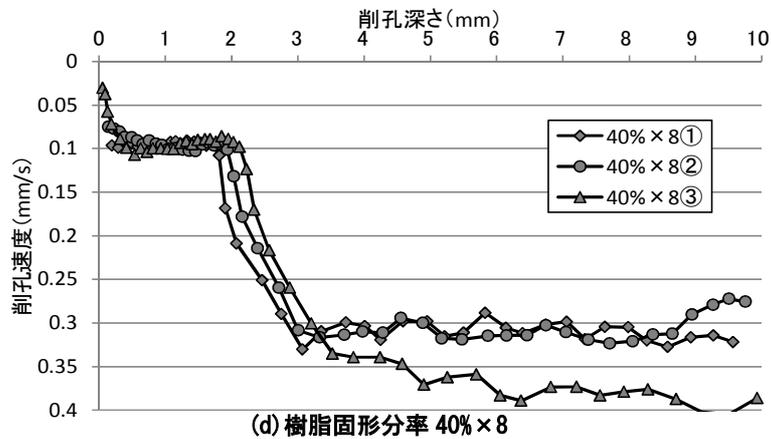
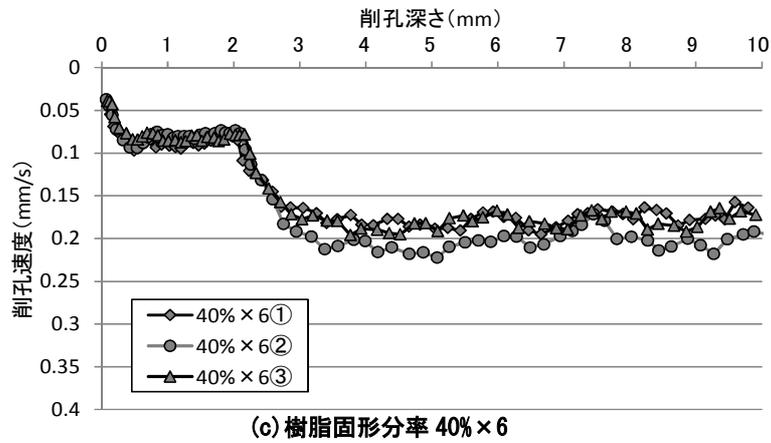
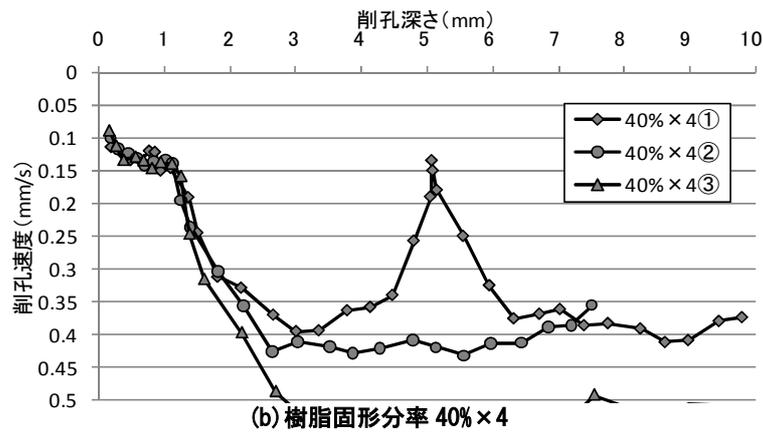
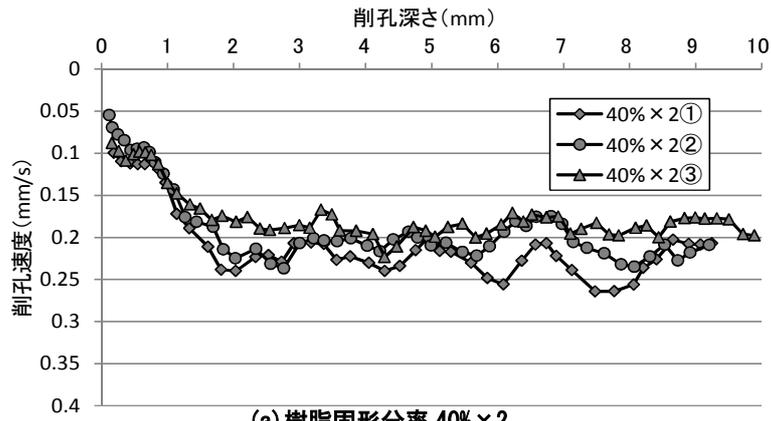


図 3-51 煉瓦[700°C]への削孔試験結果（樹脂固形分率 40%）【a~d】

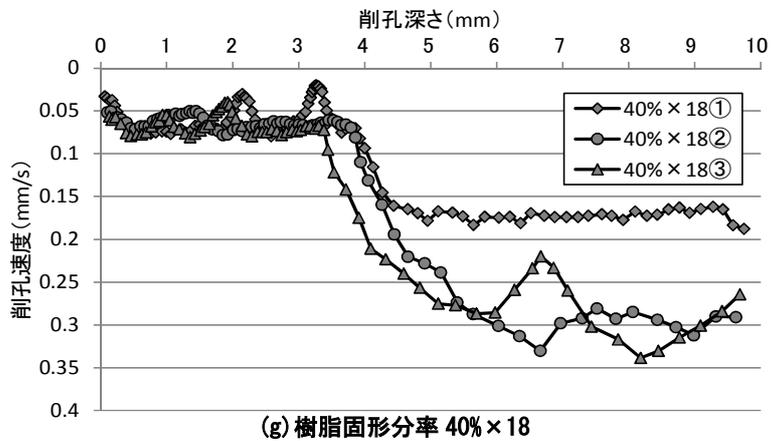
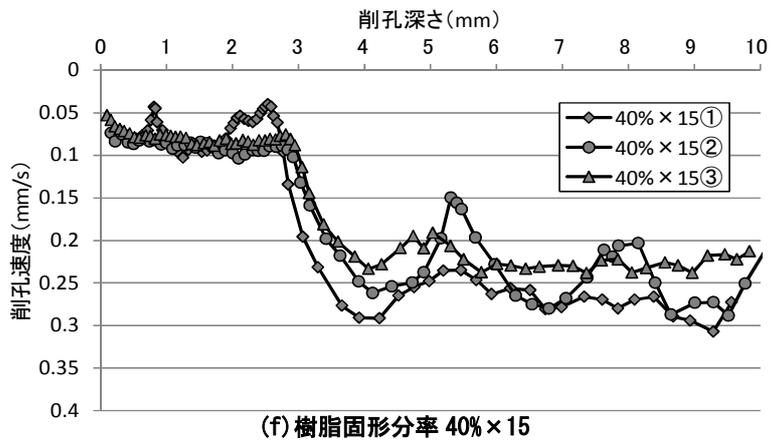
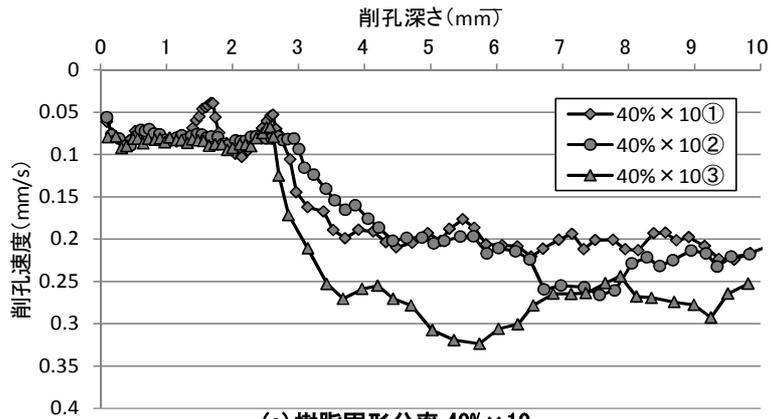


図 3-51 煉瓦[700°C]への削孔試験結果 (樹脂固形分率 40%)【e~g】

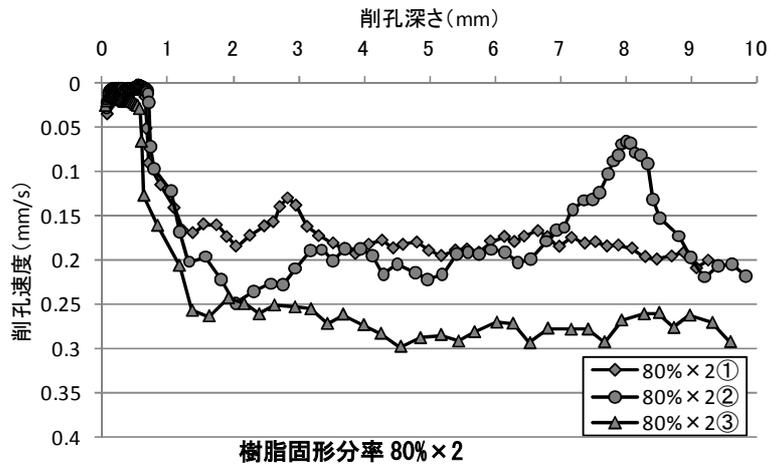


図 3-52 煉瓦 [700°C] への削孔試験結果 (樹脂固形分率

3.2 曲げ強度向上性付与の評価

3.2.1 概説

高含浸性強化剤を塗布した面について、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。

3.2.2 試験方法

供試体は $40 \times 40 \times 160$ (mm) のセメントペースト角柱体、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 3-53 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荷重による曲げ試験を行った。

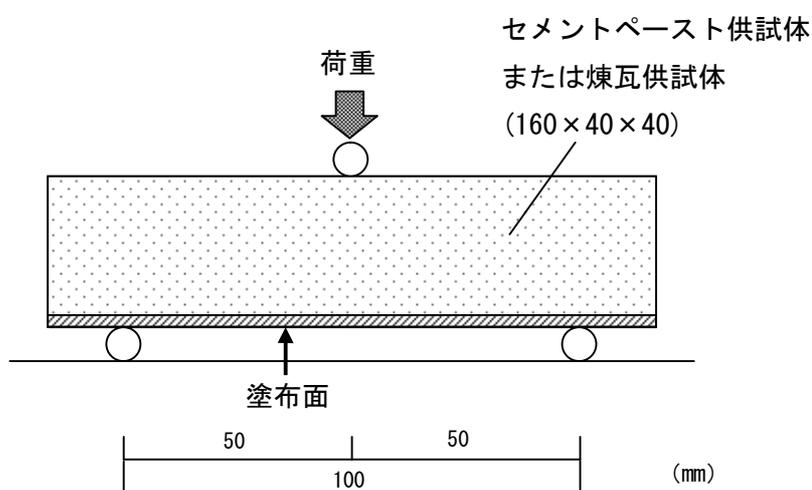


図 3-53 曲げ試験方法

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 3-27 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、各調合ごと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 3-27 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 3-54 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。

以上のことより、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。

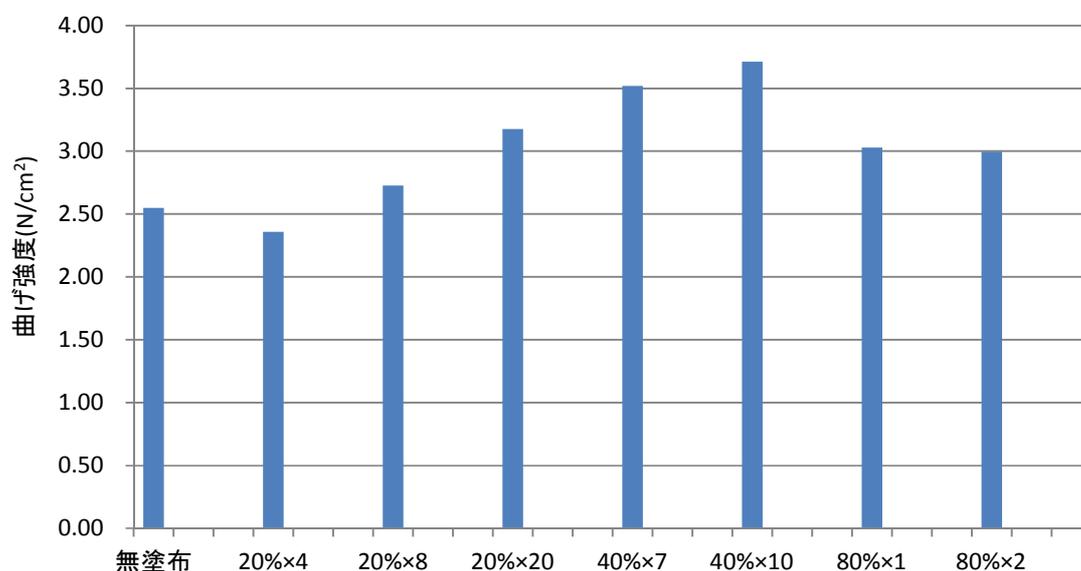


図 3-54 曲げ試験結果

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 3-28 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 3-28 要因と水準

要因	水準
塗布回数(回)	0, 55
焼成温度(℃)	700(吸水率: 15.3%), 1100(吸水率: 10.5)

c) 実験の結果と考察

図 3-55 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 3-56 に含浸深さを、図 3-57 に破断面の含浸状況を示す。図 3-56 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 3-58 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。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。また、空隙の多い低強度の材料の方が、含浸強化の効果が大いという結果であった。

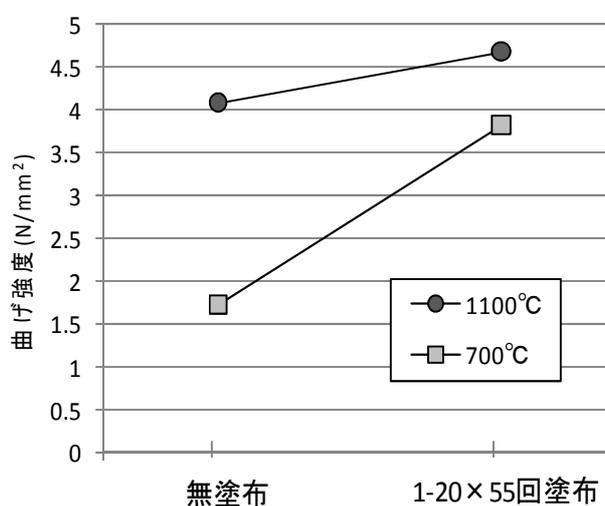


図 3-55 曲げ強度試験結果

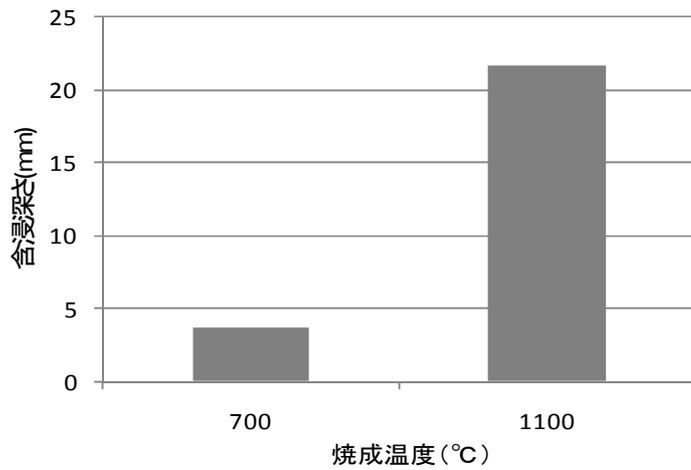


図 3-56 含浸深さの計測結果

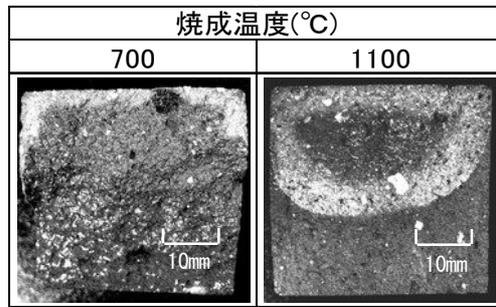


図 3-57 断面の撥水状況

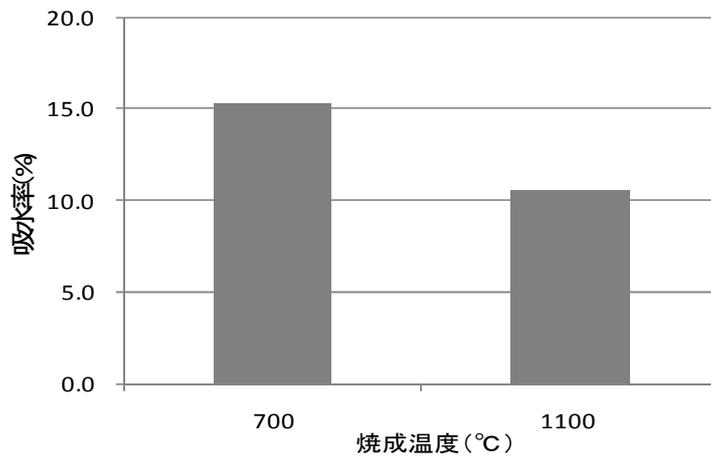


図 3-58 無塗布供試体の給水率

3.3 吸水防止性の評価

3.3.1 概説

多孔質材表層の劣化の進行を抑制するには、凍害の原因や、各種塩類等の劣化因子の媒介となる水の進入を抑えることが必要である。本試験では各調合と塗布回数について吸水試験を行い、吸水防止性能の評価を行った。また助剤(1)の混合による撥水作用の確認および助剤(2)の混合が吸水性に与える影響の確認も行った。

3.3.2 要因と水準

表 3-29 に要因と水準を示す。助剤を含まない高含浸性強化剤に加えて、助剤(1)および助剤(2)を混合した調合についても試験を行った。表中の記号を用いて各調合を[A-X-Y×T]のように表記する。

表 3-29 要因と水準

要因	助剤 [A]	樹脂固形分率 (wt.) [X]	助剤(2)の 混合率*1 (wt.) [Y]	塗布回数 [T]	助剤(1)の 混合率*2 (wt.)
水準	1 (助剤無し)	80	-	2, 1	-
		40	-	14, 7	-
		20	-	55, 20	-
	2 (助剤(1))	80	-	2, 1	5
		40	-	14, 7	5
		20	-	55, 20	5
	3 (助剤(2))	80	10	14, 7	-
			40	2, 1	-
		20	10	55, 20	-
			30	55, 20	-
			50	55, 20	-
	無塗布				

[注] *1: 主剤に対する質量百分率
*2: 樹脂固形分に対する質量百分率

3.3.3 試験方法

供試体は W/C が 0.9 のセメントペースト (80×40×40[mm]) で、高含浸性強化剤の調合および塗布回数毎に 3 本ずつ用いた。高含浸性強化剤を刷毛を使用し、規定の回数まで繰り返し塗布し、樹脂が硬化するまで 10 日間の養生を行った。養生終了後、高含浸性強化剤を塗布した試験面とその裏面を除いた 4 面にパラフィンによりシールを行った。また無塗布供試体についても試験面とその裏面を除いた 4 面を同様にシールした。気中で乾燥し、その質量を乾燥時の重量とした。次に図 3-59 に示すように、試験面を下面とし、かつ下部 2cm を常に浸水させた。24 時間後に供試体を水中から取り出し、手早く浸水部分の水分を拭き取り、ただちに質量を測定し、その値を吸水時の重量とした。

吸水量および吸水比は次式によって算出した。ただし、吸水時の質量および乾燥時の質量はそれぞれ 3 個の平均値とした。

$$\text{吸水量(g)} = \text{吸水時の重量(g)} - \text{乾燥時の重量(g)}$$

$$\text{吸水比} = \frac{\text{含浸強化剤を塗布した供試体の吸水量(g)}}{\text{含浸強化剤を塗布しない供試体の吸水量(g)}}$$

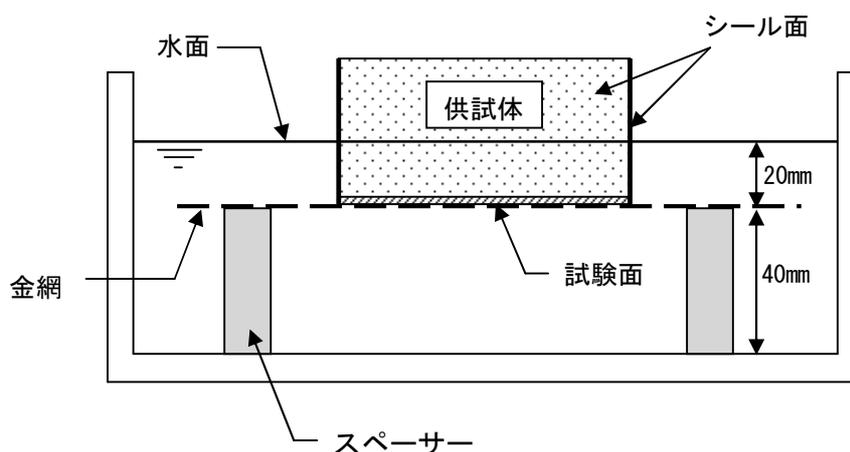


図 3-59 試験方法

3.3.4 実験の結果と考察

図3-60に吸水比の測定結果を示す。助剤を混合しなかった調合については樹脂固形分率が小さく、塗布回数が多いほど吸水比は小さいことがわかる。これは樹脂固形分率が小さく、塗布回数が多いほど含浸しやすくなり、被塗布供試体の表層の空隙を樹脂固形分が充填することで表層が緻密になり水が浸入しにくくなったためである。樹脂固形分率の高い調合においては供試体の表面で膜状になったが、樹脂が固化する際にひび割れが生じ、供試体内部への含浸量が僅かであったため、ここから水が内部に侵入していったと考えられる。

助剤(1)を混合した調合では、樹脂固形分率40および20%ではほとんど吸水は見られなかった。樹脂固形分率80%の塗布回数2回では、含浸深さが充分でなかったためか吸水が見られたが、助剤(1)を添加しない調合と比較すると吸水は半分以下である。このことから供試体にしっかりと含浸すれば、助剤(1)の混合による吸水抑制作用は十分に期待できると考えられる。

助剤(2)を混合した調合では、助剤を混合しない調合と比較して吸水量が多いことがわかる。また助剤(2)の混合量が多い程、吸水量が大きくなる。これは、助剤(2)は親水性であり、水中に溶脱するため、溶脱した助剤(2)が存在していた部分が空隙となり吸水しやすくなったと考えられる。

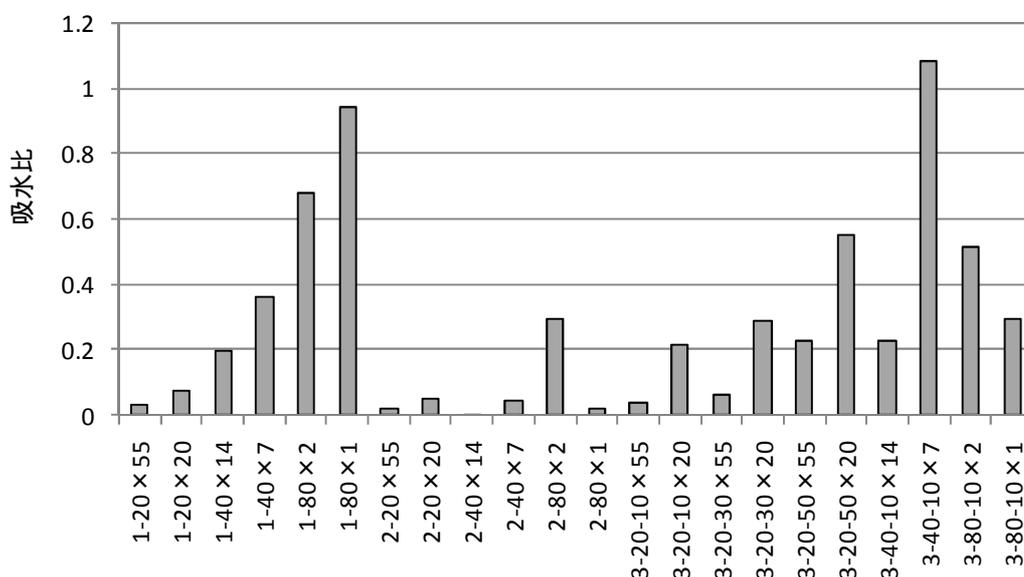


図3-60 吸水比の測定結果

3.4 水蒸気透過性の評価

3.4.1 概説

多孔質材料内部の水蒸気が熱膨張した際の膨張圧による応力が働くのを抑制するために、水蒸気透過性を有することが望ましい。そこで本試験では水蒸気透過性を測定し、助剤(2)による水蒸気透過性の効果の確認を行った。

3.4.2 要因と水準

表 3-30 に本試験で使用する要因と水準を示す。表中の記号を用いて各調合を[A-X-Y×T]のように表記する。

表 3-30 要因と水準

要因	助剤 [A]	樹脂固形分率 (wt.) [X]	助剤(2)の 混合率*1 (wt.) [Y]	塗布回数 [T]	
水準	1 (助剤無し)	80	-	2, 1	
		40	-	14, 7	
		20	-	55, 20	
	3 (助剤(2))	80	80	10	14, 7
			40	10	2, 1
		20	10	55, 20	
			30	55, 20	
			50	55, 20	
	無塗布				

[注] *1: 主剤に対する質量百分率

3.4.3 試験方法

供試体は W/C が 0.9 のセメントペースト (80×40×40[mm]) で、高含浸性強化剤の調合および塗布回数毎に 3 本ずつ用いて、平均値を水蒸気透過率とした。

供試体へ高含浸性強化剤の塗布後、10 日間の養生により樹脂を硬化させた。その後、供試体を水中に浸漬させ、吸水を行った。助剤(2)の水中への溶脱を行うために水中への浸漬期間は 28 日とした。吸水後、直ちに供試体を取り出し、供試体表面を乾いた布でふき取り、高含浸性強化剤を塗布した試験面以外をパラフィンでシールした。このときの質量を吸水直後の質量として計測した。次に温度 20±1℃、相対湿度 60±5%の恒温恒湿槽に試験面を上にして静置し、24 時間毎に供試体の質量を測定した。次式により水蒸気透過率を算出した。

$$\text{水蒸気透過率 (\%)} = \frac{\text{吸水直後の質量 (g)} - \text{水蒸気透過後の質量 (g)}}{\text{吸水直後の質量 (g)}}$$

3.4.4 実験の結果と考察

図 3-61 に助剤無しの調合について樹脂固形分率と塗布回数による評価を、図 3-62, 63, 64 にそれぞれ樹脂固形分率 80, 40, 20%への助剤(2)の添加量および塗布回数の違いによる評価を示す。図 3-61 より全ての調合において塗布回数が多い程、水蒸気の透過率は小さいことがわかる。これは表層の空隙に樹脂が充填されているため、水蒸気が透過しにくくなったと考えられる。

図 3-62 より樹脂固形分率 80%では助剤(2)の混合による優位性は見られなかった。また図 3-63 より樹脂固形分率 40%の塗布回数 7 回においても同様に優位性は見られなかった。それに対して樹脂固形分率 40%の塗布回数 14 回では助剤(2)を混合した調合の方が混合しなかった調合よりも水蒸気透過率が大きいという結果が得られた。図 3-64 からも樹脂固形分率 20%においても同様に助剤(2)を混合した調合は混合しない調合よりも水蒸気透過率が大きいことがわかる。

助剤(2)は硬化した樹脂内部に取り込まれていても、樹脂が水に触れることで、助剤(2)のみ溶脱する性質がある。この溶脱によって樹脂中の助剤(2)の存在していた個所は空隙となり、これが水蒸気を透過させやすくしたと考えられる。ただし、樹脂固形分率 80%および樹脂固形分率 40%の塗布回数 7 回では、含浸深さが小さく、被塗布供試体の表層の空隙を樹脂が密に充填されておらず、元々の水蒸気透過性が大きく、助剤(2)による影響は見られなかったと考えられる。

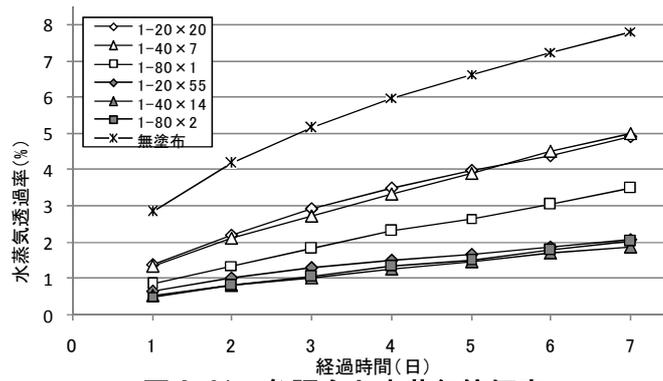


図 3-61 各調合と水蒸気等価率

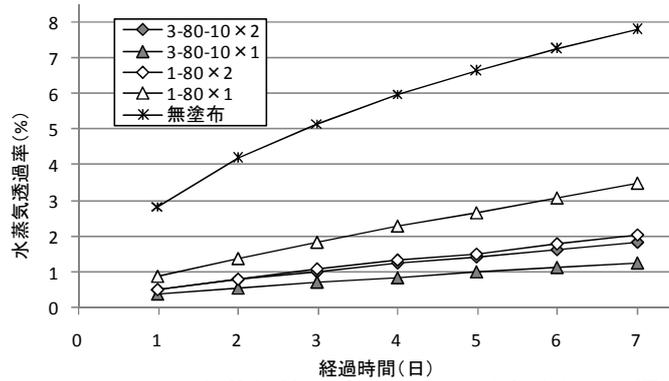


図 3-62 水蒸気等価率に与える助剤(2)の影響
(樹脂固形分率 80%)

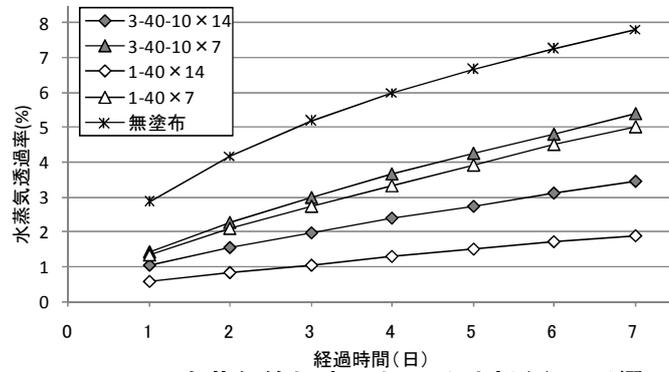


図 3-63 水蒸気等価率に与える助剤(2)の影響
(樹脂固形分率 40%)

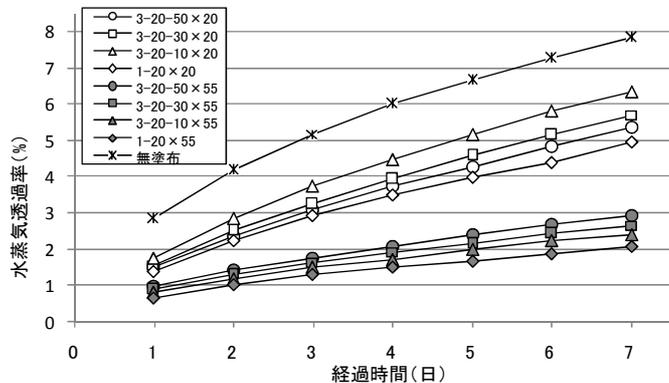


図 3-64 水蒸気透過率に与える助剤(2)の影響
(樹脂固形分率 20%)

3.5 塩害および凍害に対する耐久性試験

3.5.1 概説

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。

3.5.2 試験方法

凍結融解工程前に毛細管吸水させるため、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、既定のサイクルに達した場合のスケーリング状況の写真を収め、劣化状況の確認と重量損失の計測を行う。

計測時には超音波洗浄機を使用して剥離した表層のセメント分を綺麗に落とし、吸水した状態で重量損失量を計測する。またスケーリング量は翌日、絶乾状態にて計測する。

試験条件としては、**図 3-65** に示すように、試験溶液には塩化ナトリウム水溶液(水:97%、塩化ナトリウム:3%)を使用して、高含浸性強化剤を塗布した面(試験面)を下に向けて試験容器に10mmのスペーサーを挟み、試験容器を15mmの高さまで満たすようにする。

また、**図 3-66** に示すように、AM7:00に下面吸水および凍結融解を開始し、凍結融解作用時の1日(2サイクル)における温度サイクルは6~7、18~19時(各1時間)に20℃で、11~14、23~2時(各3時間)に-20℃に変動するように設定する。

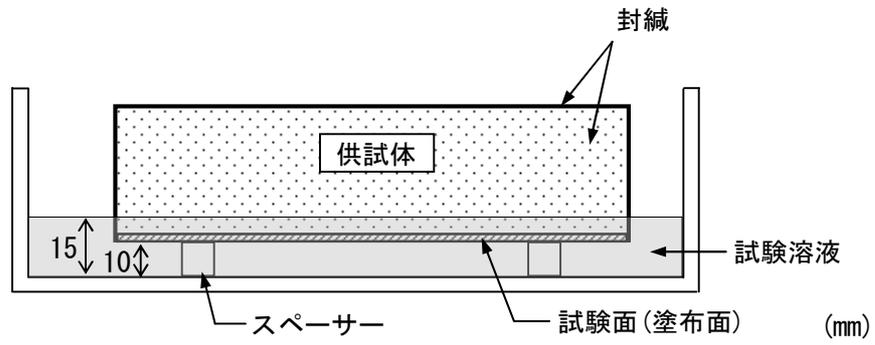
nサイクル終了時のスケーリング量 m_n は次式で算出する。

$$m_n = \sum \mu_s / (A \times 10^6) \text{ [g/m}^2\text{]}$$

μ_s : nサイクル後のスケーリング量(合計はn番目までの測定値の累計)

A : 試験面の面積

28サイクル後のスケーリング量はスケーリング抵抗性を求めるのに使用する。尚、基準値については RILEM(国際材料構造試験研究機関連合)基準値に準じて1500(g/m²)と設定した。



- 封緘面 (エポキシ樹脂)
- 試験溶液 (水 : 97%, 塩化ナトリウム 3%)
- 10mm スペーサー

図 3-65 凍結融解試験状況

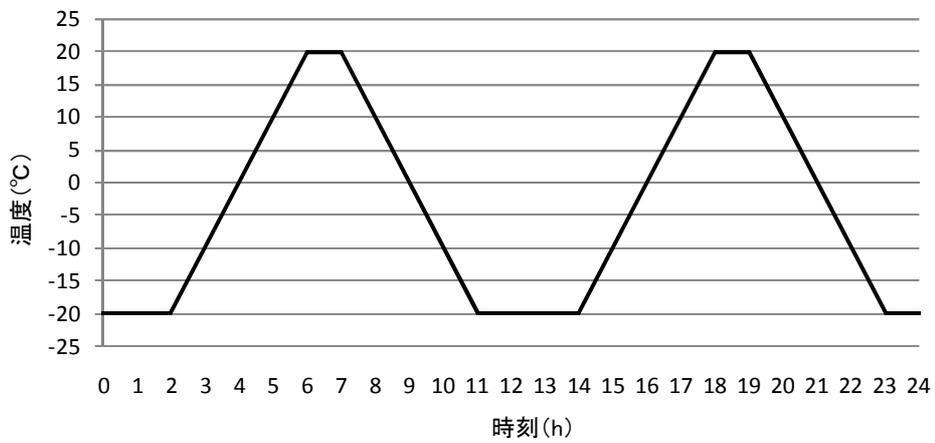


図 3-66 凍結融解サイクル

3.5.3 セメントペーストでの評価

①概説

コンクリートへの塗布評価試験に先駆けて、高含浸性強化剤の塩害および凍害に対する耐久性の評価を行うためにセメントペーストへの塗布により評価を行った。また、比較のために一般的に使用されているシラン系撥水剤を塗布した供試体についても同時に試験を行った。

②実験の条件

供試体は W/C が 0.9 のセメントペースト（40×40×160 mm）で、各水準に 3 本ずつ用いた。高含浸性強化剤の調合は樹脂固形分率 20%で、撥水効果の付与のために助剤（1）を樹脂固形分の質量に対して 5%を添加した。また、市販されている撥水剤との比較をするために、シラン系撥水剤を使用した。

表 3-31 に本試験で使用した要因と水準を示す。

表 3-31 要因と水準

要因	塗布薬剤	塗布量
水準	高含浸性強化剤 (樹脂固形分率20%)	塗布5回分 塗布20回分
	シラン系撥水剤	カタログ規定値
	—	無

③実験の結果と考察

図 3-67 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含浸剤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 サイクル後に高含浸性強化剤の 5 回塗布およびシラン系含浸剤を塗布した供試体でスケーリングが発生し、高含浸性強化剤を 20 回塗布した供試体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高含浸性強化剤を 5 回塗布した供試体のスケーリング量は無塗布供試体とほぼ同量であり、シラン系含浸剤を塗布した供試体は無塗布供試体よりスケーリング量が多いという結果であった。高含浸性強化剤を 20 回塗布した供試体は 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 3-69 に測定を行ったサイクル毎の供試体の様子を示す。

図 3-68 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、無塗布供試体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シラン系含浸剤を塗布した供試体は約 6%、高含浸性強化剤を 5 回塗布した供試体は約 3%の吸水率であり、高含浸性強化剤を 20 回塗布した供試体は吸水がほとんど無かった。凍結融解を開始して 6~14 サイクル中にシラン系含浸剤および高含浸性強化剤を 5 回塗布した供試体は吸水率が 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ものと考えられる。これに対して、高含浸性強化剤を 20 回塗布した供試体は 56 サイクル経過後の吸水率は 6%であった。

シラン系含浸剤および高含浸性強化剤には撥水作用があるが、スケーリング量に大きな差が表れた。これは今回使用した被塗布供試体は W/C が 90%であり、試験面に微細なひび割れが生じていたため、シラン系含浸剤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。

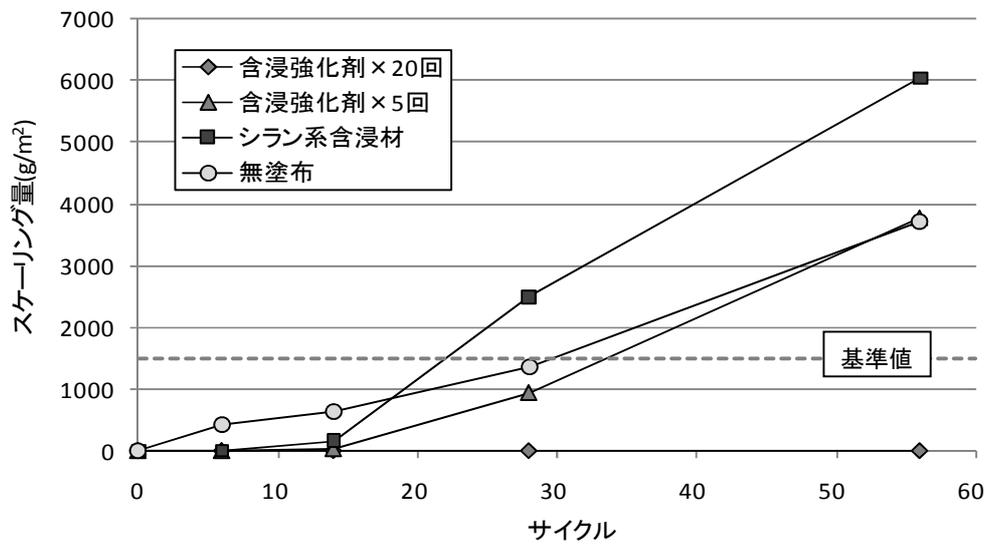


図 3-67 スケーリング量の推移

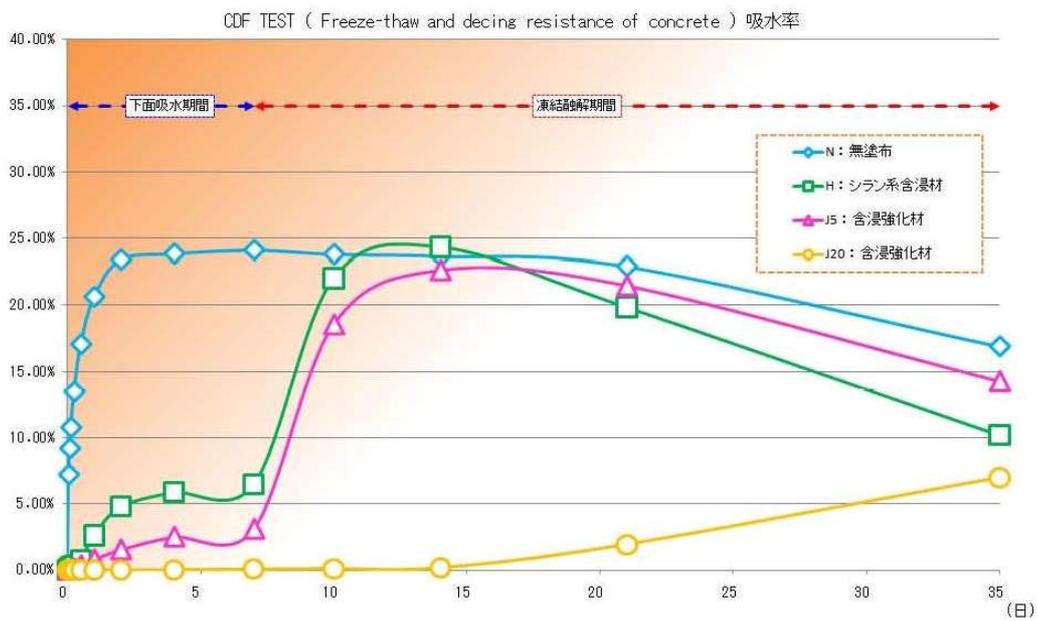


図 3-68 給水率の推移

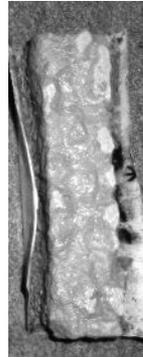
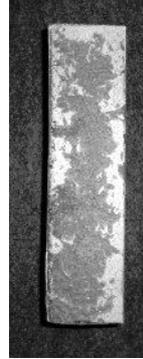
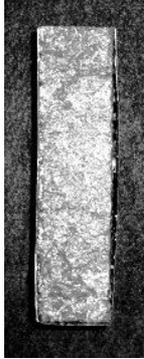
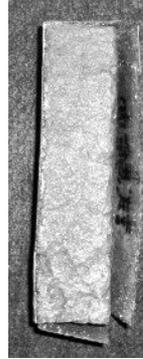
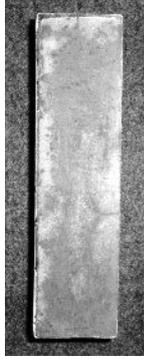
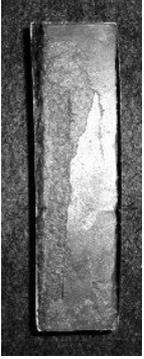
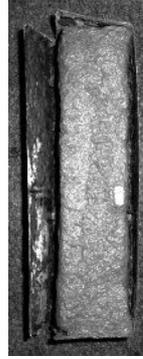
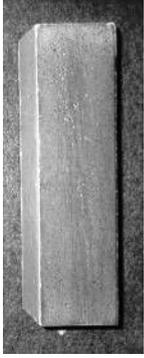
サイクル	6	14	28	56
無塗布				
シラン系 含浸材				
含浸強化剤 5回塗布				
含浸強化剤 20回塗布				

図 3-69 各サイクルの供試体の様子

3.5.4 コンクリートでの評価

① 概説

塩類を含む水による凍結融解を繰り返し行う C D F 試験により、高含浸性強化剤を塗布したコンクリートの耐凍害性能の評価を行った。

② 実験の条件

a) 被塗布供試体

本試験では被塗布供試体としてコンクリート（100×100×100mm）を使用した。コンクリート供試体の作成に使用した材料は、普通ポルトランドセメント（密度：3.15 g/cm³）、川砂（密度：2.60 g/cm³、粗粒率：2.80）、砂利（密度：2.62 g/cm³、実積率：62.0、最大寸法：25 mm）、水道水、高性能 AE 減水剤、AE 剤である。コンクリートの調合を表 3-32 に示す。

表 3-32 コンクリートの調合

スランプ (cm)	空気量 (%)	水セメント 比 W/C	細骨材率 s/a (%)	単用量(kg/m ³)			
				セメント C	水 W	細骨材 S	粗骨材 G
18	4.5	59	47.3	295	174	845	948

b) 塗布量

表 3-33 に各供試体名と塗布結果を示す。目標とする塗布量を設定し、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、比較のために無塗布供試体も使用した。

表 3-33 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 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

c) 測定サイクル

表 3-34 に示したサイクル時点で、スケーリング量の測定を行った。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こと、および H のスケーリング量が非常に大きかったことから、最適塗布回数の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 サイクルを追加設定し、スケーリング量の傾向を観察することにより、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 3-34 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

③実験の結果と考察

各供試体の含浸深さを図 3-70 に示す。同図より、各供試体の含浸深さは、供試体 H が 3.1mm、供試体 J3 は 6.1mm、供試体 J5 は 6.8mm、供試体 J10 は 11.9mm、供試体 J15 は 15.1mm であった。供試体の断面の撥水状況を図 3-71 に示す。

スケーリング量の推移を図 3-72 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リングの量は、N は 820.0g/m^2 と顕著であり、J3 は 36.7g/m^2 、J5 は 26.7g/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含浸材および高含浸性強化剤は耐凍・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 933.3g/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 440.0g/m^2 で、J5 が 360.0g/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 J3 へ 6.1mm、J5 へ 6.8mm 含浸したのに対してシラン系含浸材の H への含浸深さは 3.1mm だったため、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、シラン系含浸材が撥水により、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、この撥水性に加え接着により被塗布体を強化している可能性があり、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、シラン系含浸材よりも、高含浸性強化剤の方が耐凍・塩害性を有していると考えられる。

また本試験では、J3、J5 の双方のスケーリング量について、84 サイクル時点にて概ね同等であること。28 サイクル以降にて H のスケーリング量が、J3、J5 の双方のスケーリング量を上回ったこと。最終的な課題となる、最適塗布回数決定を行うこと等を踏まえて、供試体 H、J3、J5、J10 の 4 種類の供試体について、経過の観察を兼ねて試験の続行を行った。

コンクリート構造物における、各種経年劣化に対する寿命は、一般的に建設後 100 年とされ、本試験においては 98 サイクルが概ね該当する。98 サイクル時点におけるスケーリング量は、H が 1513.5g/m^2 で基準値を僅かに超えていたが、J3 は 596.7g/m^2 、J5 は 530.0g/m^2 、J10 は 170.0g/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。

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 4450.0g/m^2 で非常に多くのスケーリングが生じた。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 1310.0g/m^2 、J5 は 1216.7g/m^2 、J10 は 673.3g/m^2 で基準値を上回ることとはなかった。以上の結果より超長期の供用においては本試験で使用したシラン系含浸材は、耐凍・塩害性を有していないものと考えられる。高含浸性強化剤は超長期の供用においても耐凍・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・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・

塩害性を発揮するものと考えられる。

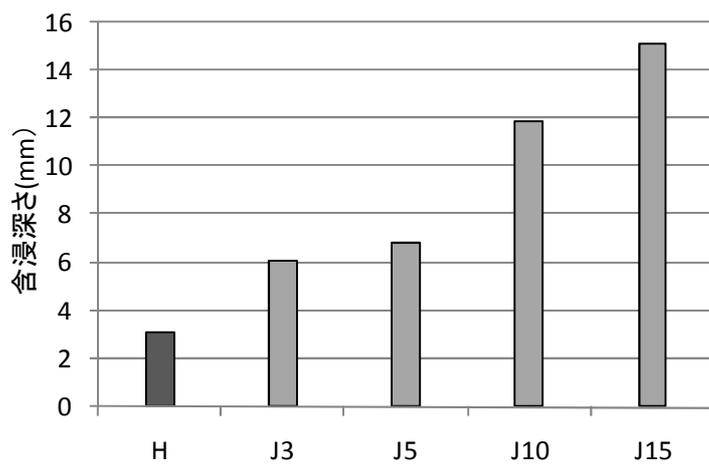


図 3-70 各供試体の含浸深さ

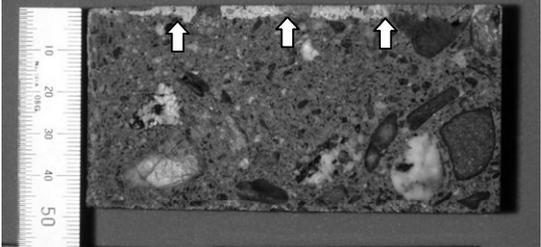
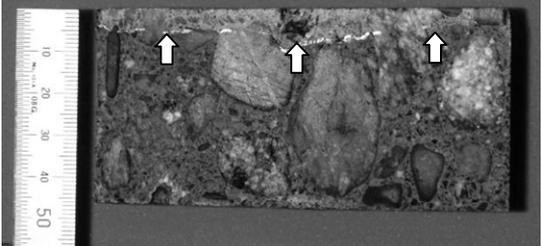
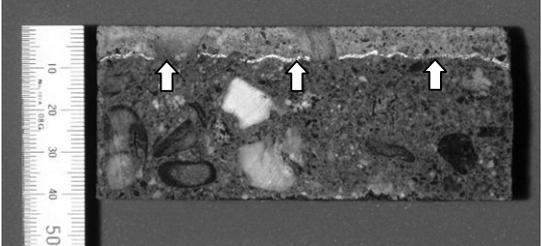
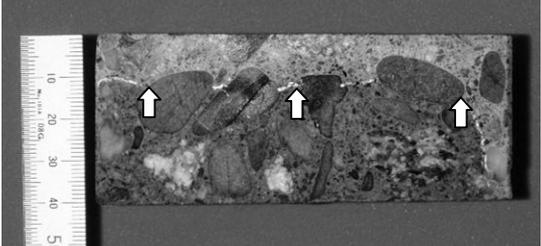
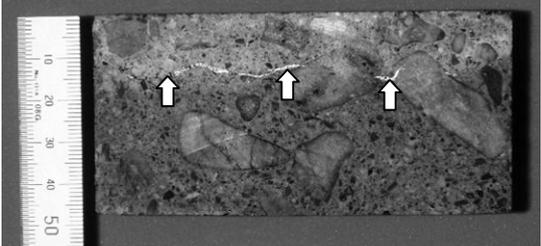
表記	含浸 深さ (mm)	写真
H	3.1	
J3	6.1	
J5	6.8	
J10	11.9	
J15	15.1	

図 3-71 供試体断面の撥水状況

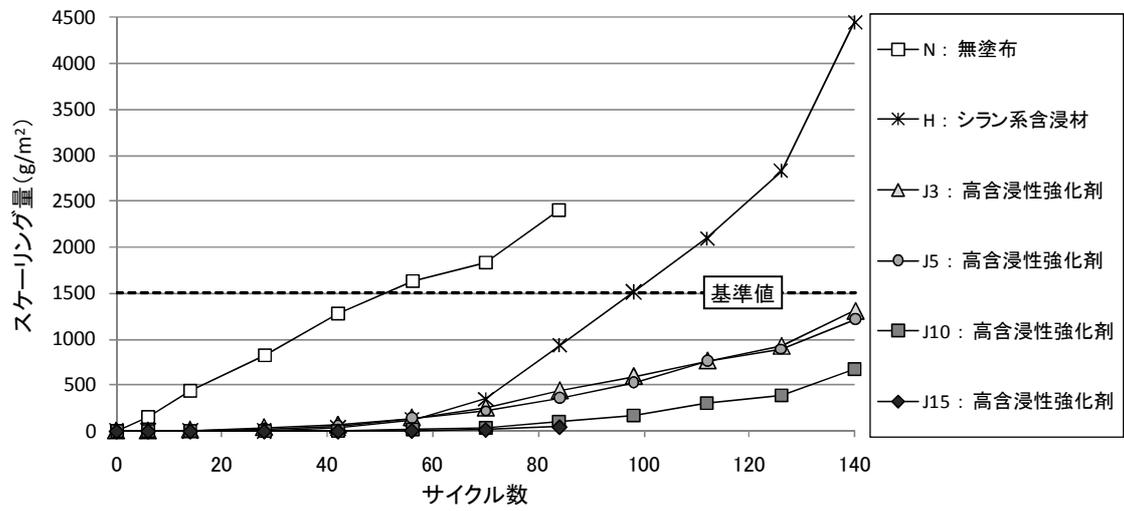


図 3-72 スケーリング量の推移

4. 総括

4.1 結論

本研究では劣化した多孔質体の表層の修復（改質）効果を薬剤の調合と塗布方法によって定量・定性的にコントロールすることを目的とした。その評価は小型ドリル削孔試験機による測定値を中心に行ったため、供試体として主にセメントペーストを使用した。高含浸性強化剤の塗布による改質効果は、樹脂固形分率や助剤の有無による調合と、供試体への塗布量を要因として水準をとり、比較を行った。以下に得られた知見を示す。

(1) 調合・塗布回数・含浸深さ・向上強度の関係

- a) 高含浸性強化剤を被塗布体に塗布を行った場合、強度は表面から改善され始め、塗布回数を増やすとともに強度の改善深さも内部へ進行していった。塗布可能回数は高含浸性強化剤の調合（樹脂固形分率）により異なり、本試験での W/C が 0.9 のセメントペーストに対しては樹脂固形分率 10%および樹脂固形分率 20%では 100 回以上でも塗布が可能であり、樹脂固形分率 40%では塗布回数 34 回、樹脂固形分率 80%では塗布回数 2 回が限度であった。**表 4-1** に本試験での樹脂固形分率と最大塗布回数の結果を示す。

表 4-1 樹脂固形分率と最大塗布回数

樹脂固形分率 (wt.%)	最大塗布回数 (回)
10	100*
20	100*
40	34
80	2

* :これ以上の塗布も可能であったが、
本試験ではここまでとした。

- b) 高含浸性強化剤の調合（樹脂固形分率）により塗布回数に対する含浸深さの関係は変化したが、本試験で使用した W/C が 0.9 のセメントペーストにおいてはその関係をほぼ把握できた。したがって任意の深さを、任意の強度まで改質するための調合と塗布回数を定めることができた。被塗布体の種類や状態などによる差はあるが、本試験で行ったように調合、塗布量および削孔試験による強度改善深さの評価を行うことで、目標とする深さと、強度の発現を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。**図 4-1** に塗布方法の選定フローを、**図 4-2** に例として参考にする類似材料の塗布回数と向上強度の関係を示す。

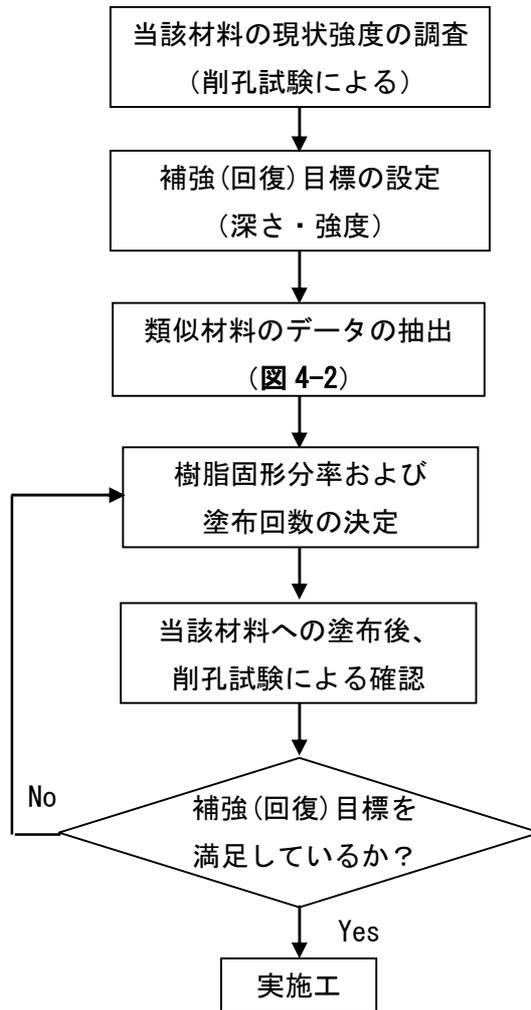


図 4-1 塗布方法の選定フロー

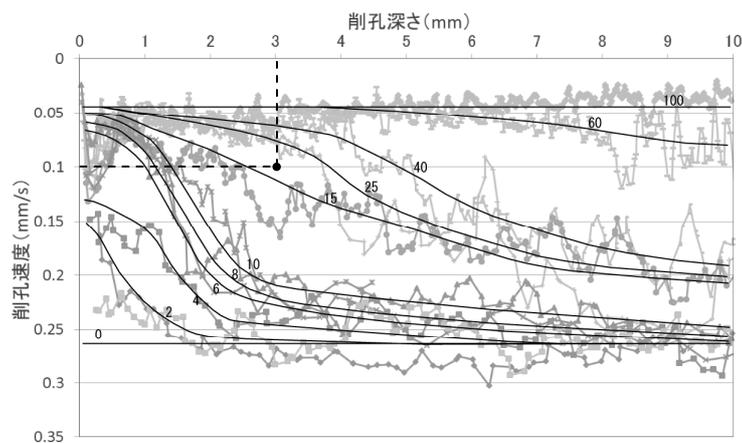


図 4-2 類似材料からデータの抽出例

- c) 本試験においては、W/C が 0.9 のセメントペーストに対して塗布を行った結果、約 8mm の深さまでの強度改善であれば樹脂固形分率 40%が、さらに深い位置での強度改善を期待する場合は、樹脂固形分率 20%の調合が適している。ただし、これは W/C が 0.9 のセメントペーストの場合であるため、供試体の種類や状態によって今回同様に調合、塗布回数や削孔試験により評価を行うことで調合と塗布回数を選定することが可能になると考えられる。

(2) 曲げ強度の向上性

高含浸性強化剤の塗布を行った塗布面を曲げ試験時の下端面とし、一点載荷の曲げ試験を行った結果、塗布を行わない供試体に対して被塗布供試体では曲げ強度の向上が見られた。引張り応力が最大となる試験時の下端面における樹脂固形分が多いほど、曲げに対する耐力は大きくなると考えられる。よって塗布回数が多く、樹脂固形分が多くなるほど強度は向上した。また、樹脂固形分率が高いほど少ない塗布回数でも含浸する樹脂固形分量は多いため、強度の向上は大きかった。ただし、樹脂固形分率 80%では一定の強度の向上は見られたが、樹脂固形分のほとんどが塗布表面に留まり、塗布回数を増やすことができないため、それ以上の強度の向上はほとんどなかった。

(3) 吸水防止性

吸水防止性を向上させる助剤を含まない高含浸性強化剤でも、ある程度の吸水防止効果が確認された。その場合、樹脂固形分率が低く、塗布回数が多いほど吸水量は少なくなった。これは、樹脂固形分率が低いほど内部まで含浸し、塗布回数が多いほど空隙を充填するため、供試体内部への水の浸入を抑制したと考えられる。樹脂固形分率の高い調合においては、少ない塗布回数時に供試体表面で膜状となったが、固化する際にひび割れが生じ、ここから水が供試体内部に侵入したため吸水量が多くなった。

助剤(1)を含む調合においては、一部においてひび割れによる吸水があったが、ほとんどの調合において概ね吸水抑止効果があった。

助剤(2)を含む調合においては、助剤(2)が親水性であるため、助剤(2)を添加しない調合と比較して吸水量が多かった。

(4) 水蒸気透過性

塗布回数が多いほど水蒸気の透過率は低く、空隙の充填により水蒸気の透過が抑制されたと考えられる。

助剤(1)を含む調合では、助剤を含まない調合と比較すると僅かに水蒸気の透過率が高い傾向が見られたが、大きな影響は表れなかった。

(5) 塩害および凍害に対する耐久性

セメントペーストおよび、コンクリートを供試体として凍結融解試験（CDF 試験）を実施した。

a) セメントペーストを供試体とした場合

樹脂固形分率 20%の高含浸性強化剤を塗布した供試体においては、56 サイクル終了時にも、ほとんどスケーリングは生じていなかった。これは助剤(1)の撥水効果による水の浸入の抑制と、高含浸性強化剤の接着作用による強化が影響しているものと考えられる。

b) コンクリートを供試体とした場合

高含浸性強化剤の塗布を行った供試体では 84 サイクル終了時においてもスケーリングは生じておらず、建設後 100 年の経年劣化に概ね該当する 98 サイクルにおいては、シラン系含浸材を塗布した供試体のスケーリング量が、基準値である 1500g/m^2 を僅かに超える結果であったが、高含浸性強化剤を塗布した供試体においては塗布回数が最も少ない 3 回であってもスケーリング量は 596.7g/m^2 に留まり、塗布回数が多くなるほどスケーリング量は少なかった。今回の試験で最多サイクルである 140 サイクル終了時においても、高含浸性強化剤を 3 回、5 回、10 回塗布した供試体のスケーリング量は基準値を超えることはなく、その中で一番多くスケーリングが生じていた塗布回数 3 回でもスケーリング量は 1310.0g/m^2 であった。以上のことより今回供試体として使用したコンクリートの場合、高含浸性強化剤は 3 回塗布すれば長期の凍結繰り返し劣化に耐えうる改質が可能であるといえる。

第3部

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

—目次—

1 . 研究目的	．．．．． P. 1
2 . 対象とした建造物の概要	．．．．． P. 1
3 . 作業概要	．．．．． P. 2
4 . 組織	．．．．． P. 2
5 . 実施および予定日程	．．．．． P. 2
6 . 処理前強度試験および強化処理（漆喰・れんが・木材）2010.02.05 ~ 07	．．．．． P. 3
7 . 木材の強化強化および木材腐朽防止処理効果のモニター用サンプルの作成	．．．．． P. 19
8 . 処理効果の経年変化の評価（Wat Som）	．．．．． P. 21
9 . 意匠性の経年変化の評価	．．．．． P. 25
10 . 修復工事の実現に向けて	．．．．． P. 28

付録

タイ国Fine Art Departmentから受けた試験・施工許可証
施工実験実施関係者（2010年2月7日）

1. 研究目的

高温多湿な熱帯環境下にある歴史的建造物の劣化防止方法を確立することを目的とする。ここでは、タイ国の世界文化遺産であるアユタヤ遺跡の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ながら 最適な処理方法を開発する。

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, Pratu Chai Phra Nakon Sri, Ayutthaya District, 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(Fig. 1)は、アユタヤの南に位置する。そのクメール風のプラン(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。このプランは、アユタヤの中でも保存状態のよい化粧漆喰の装飾のひとつで、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(Fig. 2)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ン(仏塔)は宇宙の精神的中心を表し、その周りを小プラ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。



Fig. 1 Wat Som



Fig. 2 ① Wat Chai Watthanaram

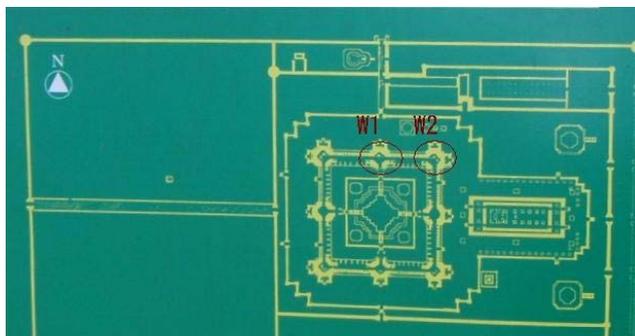


Fig. 2 ② Wat Chai Watthanaram Ground plan
(図中 W1 および W2 の stupa で作業を行った)

3 . 作業概要

(1) Wat Som

1) 1 回目に行った作業 (現状評価と強化処理)

・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。

・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。

2) 2 回目以降の作業 (処理した部分の経年評価)

・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10mmの深さまで連続した強度分布を測定し(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)、処理効果について短期および長期的な評価を行う。

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

(2) Wat Chai Watthanaram

1) 1 回目に行った作業 (現状評価と強化処理)

・漆喰の劣化防止処理(剥落防止・表層劣化防止)を行った。

・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)を行った。

2) 2 回目以降の作業 (処理した部分の経年評価)

・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する。

4 . 組織

Headquarter: SIRDC Center of Khon Kaen Univ.

(Director: Dr. Prinya Chindapasirt, Professor)

Thailand: The Fine Arts Department (Mr.Methadol Wichakana, Miss Pisa Santhadkarn)

Khon Kaen University(Dr. Prinya Chindapasirt, Professor)

Kasetsart University (Dr. Thanudkij Chareerat, lecturer)

Japan: Mie Univ. (Dr. Shigemitsu Hatanaka, Professor)

Meijyo Univ. Univ.(Dr. Tetsuya Hasegawa, visiting lecturer)

Preservation Science Co, Ltd (Mr. Takeo Sekiya, Mr. Kouzi Kaneko, Mr. Isao Hayashi)

5 . 実施日程

・2010年2月5日～7日： 処理前の強度試験および強化処理(漆喰・れんが・木材)を実施

・3月21日： 処理剤硬化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予定

・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

6. 処理前の強度試験および含浸強化処理（漆喰・れんが・木材）

実施期間：2010年2月5日～7日

(1) Wat Som

1) 処理前の強度試験

処理を行う予定の箇所において、既に表層が劣化している煉瓦と劣化していない煉瓦を選定し、各々表面から内部に向けて約10mmの深さまで連続した強度分布を測定した。

測定機器名：小径ドリル型表層強度測定器

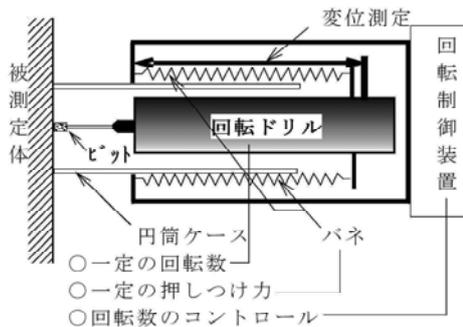


Fig. 3 測定器の原理

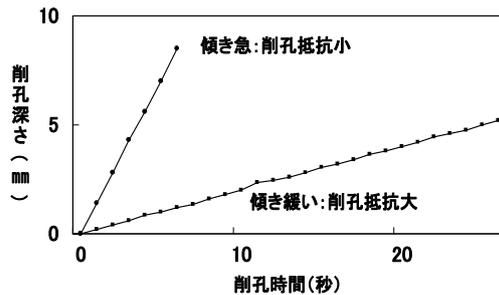


Fig. 4 測定結果の評価イメージ

測定器はFig. 3のように、先端のドリルビットによって被測定体を削孔する。このとき、押しつけ力とビットの回転数は一定である。その結果、Fig. 4のように硬い物の削孔速度は遅くなり、軟らかい物の削孔速度は速くなる。この原理により、被測定体の表面から任意の地点の強弱が評価できる。

2) 補修の対象とした劣化現象とその対策

a. 劣化現象 1

- ・現状：漆喰と煉瓦の界面が接着破壊し、漆喰層の全厚が剥離する可能性がある。(S1部)
- ・処理：漆喰層と煉瓦を接着させる
- ・使用材料：接着剤を使用するが、注入する位置は漆喰の内側で、紫外線の暴露が無いため、エポキシ樹脂を使用した。

b. 劣化現象 2

- ・現状：漆喰層の表層の仕上げレリーフ部分が、ベースになる漆喰層と付着破壊を起こしかけている。(S1部)
- ・処理：仕上げレリーフ部分とベースになる漆喰層の付着、および両者の強化処理
- ・使用材料：使用した薬剤の配合をTable.1に示す。ここで構成材料の主剤はイソシアネート系接着剤である。助剤(1)には吸水防止効果があり、助剤(2)には地衣菌類の定床防止効果がある。

Table.1 含浸強化・吸水防止に使用した薬剤の配合表

配合No.	添加剤	助剤(2)	主剤	硬化剤	助剤(1)	Total	Plastic solid rate
1	6.800	0.050	1.000	0.700	0.051	8.601	0.203

c.劣化現象3

・現状:漆喰層の剥離に伴い、露出した煉瓦の表層が経年とともに脆弱化し、ほとんどの部分で表層が剥落している。(S2部)

・処理:表層の脆弱部分の強化、および強化された脆弱部と健全部の一体化
(強化剤および吸水防止剤を煉瓦内部の健全部の奥深くまで浸透させる。)

・使用材料: 使用した強化剤は、前項で使用した配合No.1である。

3) 処理前の強度試験および強化処理の位置

処理前の強度試験および強化処理の位置をFig. 5に示す。



Fig. 5 処理前強度試験および強化処理の位置

4) 処理前の強度試験および強化処理の手順

a. 処理前の強度試験

評価する煉瓦をFig. 6に示す。R1部は表面が塩類風しておりR2部は表面が健全である。試験はこの2カ所で行った。試験状況をFig. 7に、試験後の煉瓦表面をFig. 8に示す。削孔試験の結果をFig. 9に示す。

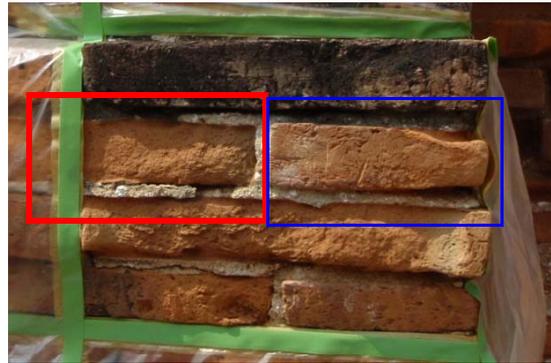


Fig. 6 試験前の煉瓦

表面が健全な煉瓦は、3回の削孔試験の全てにおいて下記のような傾向を示している。

- ・図中A部分から分かるように、表面は比較的に強度が高く、内部にいくに従って強度が低下している。
- ・表層の強度低下は表面から深さ1.8mmまで続き、それ以深で深さ10mmまでは一定の強度となっている。

一方、表面が若干剥離し、表層が脆弱となっている煉瓦は、2回の削孔試験において下記のような傾向を示している。

- ・図中B部分から分かるように、表層は低強度で、内部にいくに従って強度が増加（回復）している。
- ・深さ方向への強度回復は、表面から5～6mmまで続き、それ以深の10mmまでは一定の強度となっている。その強度は表面が健全な煉瓦の内部とほぼ同じである。



Fig. 7 強度試験



Fig. 8 処理後の煉瓦表面

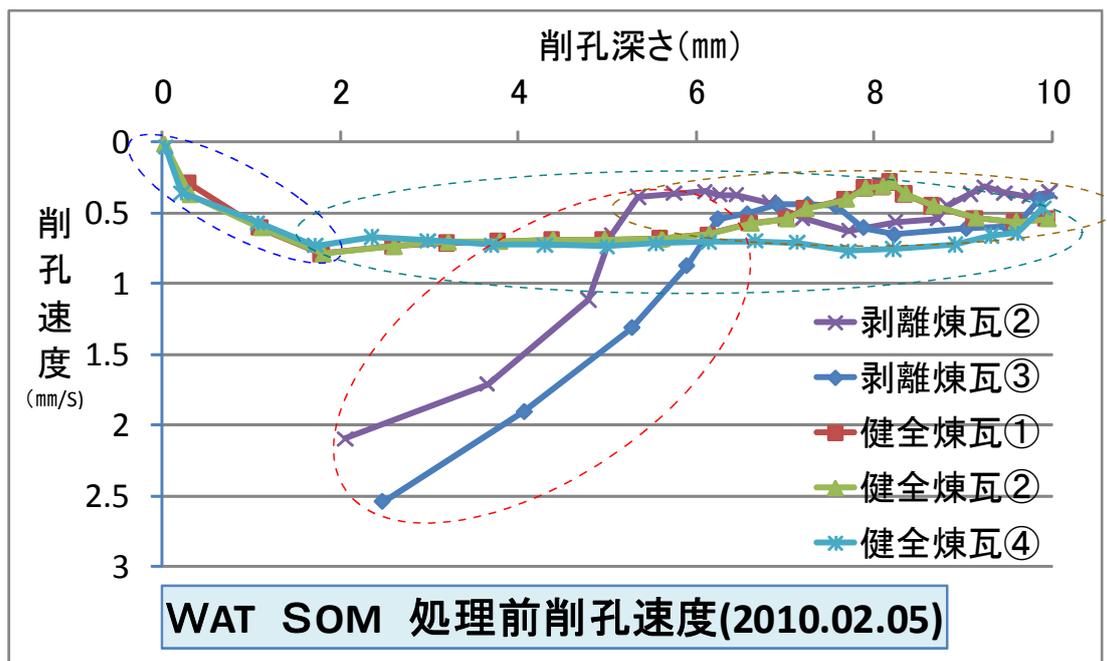


Fig. 9 削孔試験結果 (表面からの深さによる相対強度)

b. 漆喰層と煉瓦の界面の付着

煉瓦と表層の漆喰との付着状況を調べるため、先端が球になっているハンマーで漆喰を打診し、その音によって付着破壊をおこしているかどうかを評価した (Fig. 10)。

その結果、Fig. 5のS1部分の全てにおいて、煉瓦と漆喰が付着破壊していることが判明したため、S1部分の全てに接着剤を充填することを決定した。



Fig. 10 漆喰接着破壊状況調査

S1部分とS2部分について、表面に塗布する含浸強化剤がその周辺に付着しないように、透明なビニールシートにて周辺を覆った。(Fig. 11)



Fig. 11 施工範囲周辺養生

漆喰と煉瓦の隙間に接着剤を注入充填するために、漆喰を表面から煉瓦との界面に至るまで、 $\phi 3\text{mm}$ の小径ドリルで穿孔した。その孔に、Fig. 12 に示すような接着剤注入用の治具を、(接着剤の硬化後に撤去するため)再剥離が可能なシーリング剤で止めつけた。



Fig. 12 接着剤注入治具取り付け

漆喰と煉瓦の隙間に接着剤を注入したときに、漆喰のひび割れから接着剤が流出するのを防ぐ必要がある。そのため、漆喰表面の全てのひび割れを、再剥離が可能なシーリング材にてシールした(Fig. 13)。



Fig. 13 ひび割れシーリング

エポキシ樹脂接着剤は、注射器を使い手動で低圧注入した(Fig. 14)。

注入工程では、1回注入した後、約30分後に2回目の注入を行った。

注入総量は400g(1回目:200g、2回目:200g)である。ここで、正面の見付面積は約1500cm²なので単位面積当たりのエポキシの注入量は約2600g/m²である。この量は、平均して約2.6mmの厚みの空間を充填したことに相当する。



Fig. 14 接着剤手動低圧注入

使用した接着剤の残りをビーカーに入れて目視観察したところ、約3時間で硬化した。この確認後、ひび割れのシール材を全て撤去した(Fig. 15)。



Fig. 15 シーリング除去(接着剤硬化後確認後)

このひび割れシール材が漆喰の小さな隙間に入り込んでいる場合などは、撤去することが大変難しい。したがって、撤去しにくい部分は加熱器を使ってシール材を軟化させ、さらにもろくなるまで変質させてから、撤去を行った(Fig. 16)。この際、漆喰の表面温度が100℃にまで上昇しないように注意した。

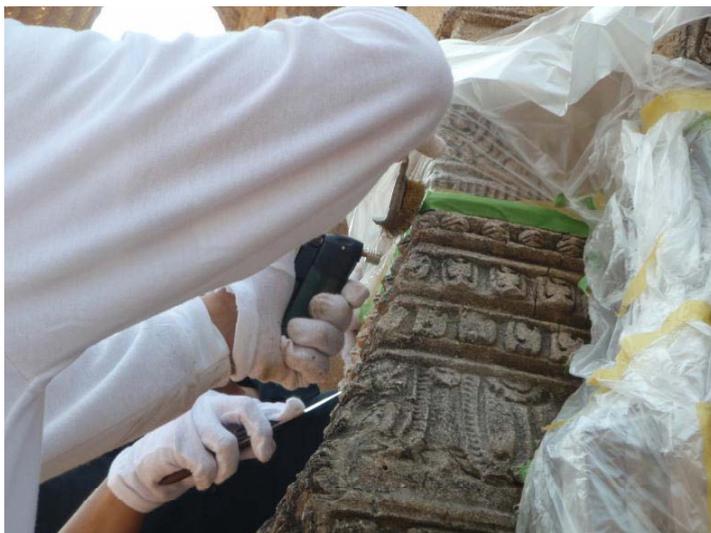


Fig. 16 加熱器によるシーリング完全除去

シール材を撤去する時に、脆弱な漆喰がシール材に付着してとれた部分があった。この部分については、仏塔の周辺にある土を骨材とし、この保存工事で使用する含浸強化材をバインダーにしたモルタルを作り、欠損部分の形状の復元を行った (Fig. 17)。



Fig. 17 欠損箇所復旧

c. 仕上げレリーフ漆喰層の強化処理

含浸強化剤はスプレーにて吹き付け塗布を行った (Fig. 18)。

1回目の塗布総量は226gであった、このときの総見付け面積は3300cm²であった。すなわち、単位面積当たり685g/m²の塗布量となった。



Fig. 18 含浸強化剤吹き付け (1回目)

ひび割れ等が発生しておりレリーフの剥落の可能性のある部分は、硬化時間を早めた含浸強化剤をひび割れに充填一体化させた (Fig. 19)。



Fig. 19 仕上げレリーフ部分とベースになる漆喰層の接着

含浸強化剤の1回目の塗布の2時間後に、2回目の塗布をスプレーにて一回目と同様に行った(Fig. 20)。2回目の塗布総量は79gであった。1回目と2回目を合わせた塗布量は924g/m²である。



Fig. 20 含浸強化剤吹き付け（2回目）

d. 煉瓦表層の塩類風化防止処理（脆弱部を含む表層の強化処理）

煉瓦の表層が脆弱になっている部分を強化するため、含浸強化剤の塗布を行った。漆喰部分と同じように塗布はスプレーにて行った(Fig. 21)。

1日目はインターバルを1時間として2回塗布した。この2回の合計塗布量は264gであった、これは総見付け面積630cm²に対して塗布されたものである。したがって、単位面積当たりの塗布量としては4190g/m²となった。



Fig. 21 強化剤吹き付け（1日目の1回目）

2日目は、1回の塗布を行った。この時の総塗布量は93gであった。したがって、3回合わせた単位面積当たりの塗布量は5600g/m²となった。

Fig. 22 に、含浸強化剤の吹き付け終了直後の状況を示す。若干、濡れ色になっているが、とくに光沢はなく、表面に薬剤の膜は出来ていない。他の使用実績から判断して、この濡れ色も、半年以内には消滅すると思われる。



Fig. 22 強化剤吹き付け終了直後の状況

Fig. 23 に、
処理後の
S1部と
S2部を示す。

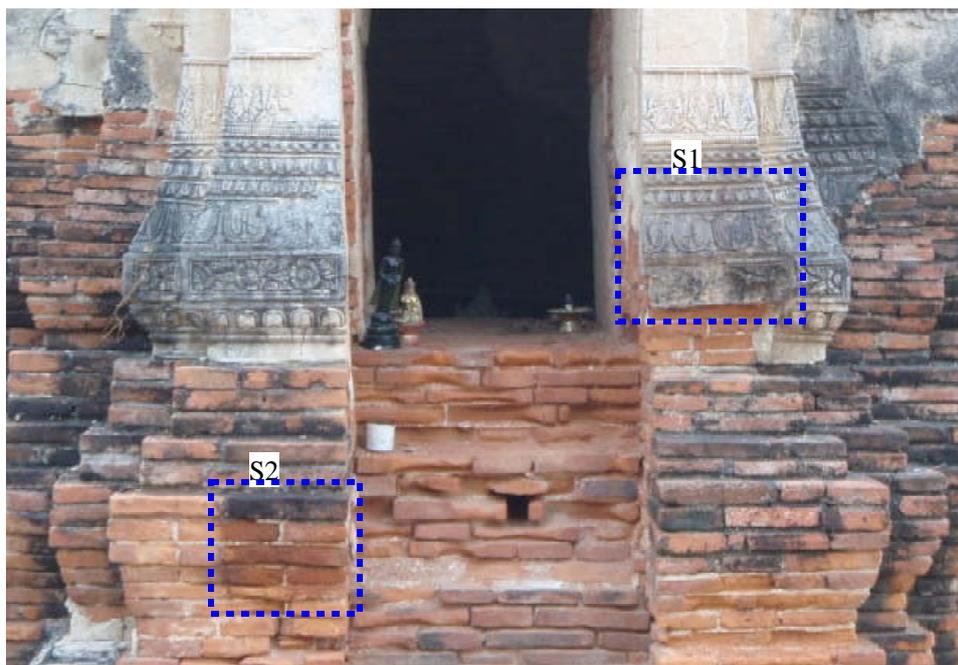


Fig. 23 漆喰の落下防止・煉瓦・漆喰の表層脆弱部強化直後の状況

e. 煉瓦および漆喰の処理部分に対する周辺からの水分供給防止処理

今回行った煉瓦および漆喰への処理の効果は、これらの材料の空隙率および薬剤の使用量から推定すれば、煉瓦は数mm～数cm、漆喰は漆喰の全厚＋その奥の被着体数mmに波及しており、その部分の劣化進行を著しく遅らせることができたものと推定される。

しかし、今回の処理は部分的にしか行っていないため、構造体全体で考えると、処理部の直上や周囲からは塩類を含んだ水が浸入することを許容している。従って、処理部分の内部側で塩類風化が発生する可能性がある。これを少しでも低減させるため、処理部分の直上の壁面からの水の浸入防止と処理部分の直下の煉瓦からの地下水の上昇を止める処理も行った。

1) 上部からの水(雨水等)の回り込み防止

処理部分の直上の壁面からの水の浸入防止を行うために、高性能な吸水防止剤を塗布した。この吸水防止剤は、長期間の屋外暴露を行っても変色は無く、吸水防止効果が持続することが確かめられている。これを塗布した範囲をFig. 24に示す。Fig. 24の赤枠部分は今回の強化処理を行った部分で、青枠部分が吸水防止剤を塗布した範囲である。

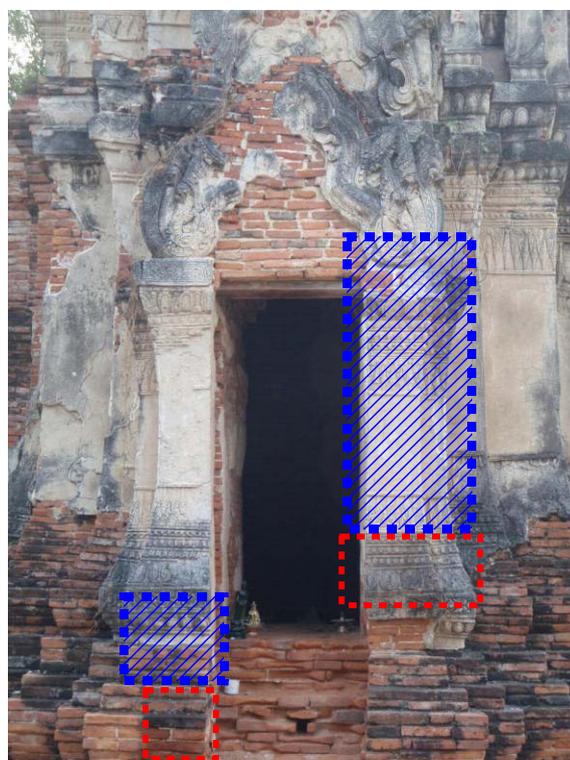


Fig. 24 強化処理を行った部分と吸水防止剤を塗布した範囲

2) 下部からの水（地下水等）の上昇・回り込み防止

下部の煉瓦からの地下水の上昇を止める処理工程では、Table2に示す配合の薬剤をFig. 25に示す位置から内部へ注入した。

Table. 2 水の上昇防止に使用した薬剤の配合表

配合No.	添加剤	助剤(2)	主剤	硬化剤	助剤(1)	Total	Plastic solid rate
3	0.150	5.700	1.000	0.700	0.051	7.601	0.974

ここで助剤(2)はシリコンコポリマーの一種で、硬化した主材の内部に未硬化のまま留まっており、下から上昇してきた水がこの硬化体に接触した瞬間に微量の助剤(2)が水の中に溶け出し、表面張力を低下させる等、水の性質を変化させることによって、水の上昇を抑制する

Fig. 25中の赤枠は強化処理済み部分を示し、矢印先端は注入孔位置を示す。

Fig. 26に注入作業の状況を示す。注入孔は目地に設け、薬剤はスポイトにて注入した、ここで、スポイト先端は煉瓦表面から約10cm内部に入った所まで差し込み、その位置から薬剤を注入した。注入時には、孔とスポイトの隙間から薬剤が逆流しないよう、スポイト周囲を綿でシールした。

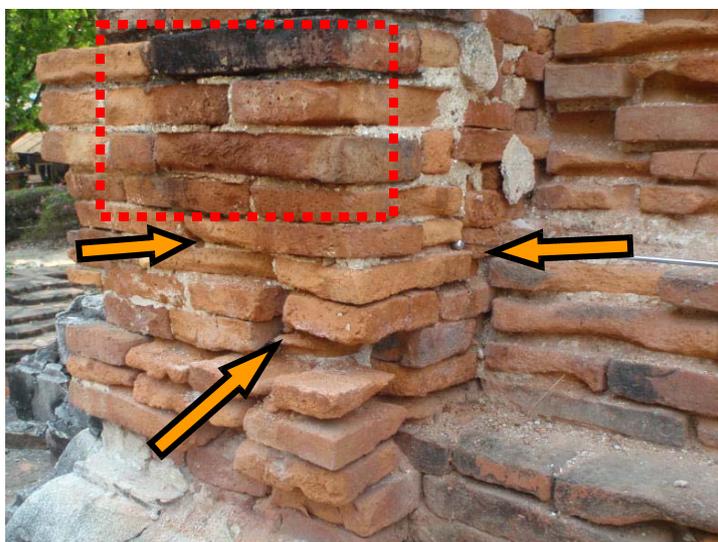


Fig. 25 水の上昇抑制処理注入位置



Fig. 26 水の上昇抑制処理注入状況

(2) Wat Chai Wattharam

1)補修の対象とした劣化現象とその対策

a. 劣化現象 1

・現状:仕上げレリーフ部分が漆喰層(基盤)と付着破壊を起こしかけている。仕上げレリーフ部分が脆弱化し、表層から順次薄層崩落しかけている。表面には当初は金箔が貼ってあったと思われるが、全ての金箔は無くなっており、金箔を漆喰に接着させていた接着剤も一部の凹部分にしかな残っていない。残っている接着剤は、表層の漆喰成分の溶出による微細な凸凹と粉塵の付着によって接着剤本来の黒色では無く、淡い青色となっていた。

・処理:仕上げレリーフ部分と漆喰層(基盤)の付着、および仕上げレリーフ部分と漆喰層の強化処理を行う。

・使用材料:強化に使用した薬剤は、Wat Somで使用した配合No.1(Table 1参照)である。

b. 劣化現象 2

・現状:木材が腐朽によって全体的に脆弱化している。腐朽の進行が早い部分では、腐朽部分が脱落し、断面が当初の半分程度しか残っていない。

・処理:脆弱化した木材を強度回復させるとともに、今後の腐朽進行速度を遅らせるため、木材の強化剤および腐朽防止剤を木材の内部深くまで含浸させる。

・使用材料:使用した薬剤の配合をTable 3に示す。ここで、構成材料の主剤はTable 1と同じくイソシアネート系接着剤である。助剤(1)は吸水防止効果があり、助剤(2)は地衣菌類の定床防止効果及び木材の腐朽防止効果がある。Table1の配合No.1に比べ、3倍の量になっている。

Table.3 使用薬剤の配合表

配合No.	添加剤	助剤(2)	主剤	硬化剤	助剤(1)	Total	Plastic solid rate
2	6.800	0.150	1.000	0.700	0.051	8.701	0.213

2) Wat Chai Watthanaramにおいて行った強化処理の位置

劣化現象1および2に対する処理を行った箇所をFig.28(劣化現象1)、 Fig.29(劣化現象2)、および Fig.30(劣化現象1)に示す。

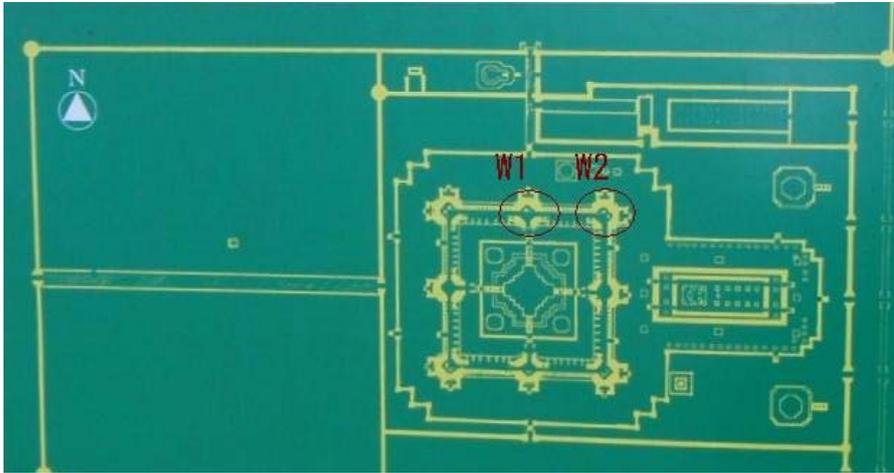


Fig. 27 Wat Chai Watthanaram Ground plan



Fig. 28 W1 Area W1A Part



Fig. 29 W1 Area W1B Part



Fig. 30 W2 Area W2A Part

3) 強化処理の手順

a. W1A Part

劣化現象1に対する保存処理を行った。表面に塗布する含浸強化剤がその周辺に付着しないように、透明なビニールシートにて周辺を覆った(Fig. 31)。

含浸強化剤の塗布はスプレーにて行った(Fig. 32)。塗布は、以下の要領でW1AとW2Aの2箇所を同時に行った。1回目は3回塗布を行い、約2時間インターバルをおいて2回目も3回塗布を行った。さらに翌日に3回目として2回塗布を行った。結果として8回の塗布で単位面積当たり $3,360\text{g}/\text{m}^2$ を塗布した。

Fig. 33に施工直後の状況を、Fig. 34に施工部分の拡大写真を示す。白い漆喰部分はやや濡れ色となっているが、約半年後にはこの色は無くなると思われる。黒い接着剤は鮮やかに浮かび上がってきた。



Fig. 31 施工範囲周辺養生



Fig. 32 含浸強化剤吹き付け (1回目)

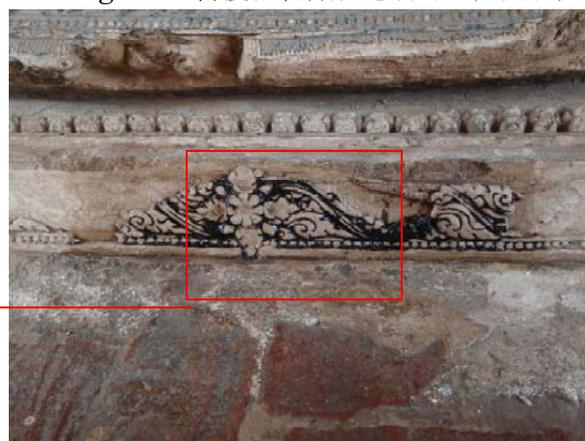


Fig. 33 含浸強化剤吹き付け終了



Fig. 34 含浸強化剤吹き付け終了部分拡大

b. W2A Part

W1A Partと同様に、劣化現象1に対する保存処理を行った。

施工範囲周辺の養生をFig.35に、含浸強化剤の吹き付け状況をFig.36に、含浸強化剤の吹き付け終了後の状況をFig.37に示す。W1A Partと同様のことが言える。



Fig. 35 施工範囲周辺養生



Fig. 36 含浸強化剤吹き付け（1回目）



Fig. 37 含浸強化剤吹き付け終了

c. W1B Part

脆弱化した木材の強度を回復させるとともに、今後の腐朽進行速度を遅らせるため、含浸強化剤(腐朽防止効果を高めた配合としてある)を木材内部の深くまで浸透させた。

含浸強化剤の塗布はスプレーにて行った。塗布はインターバルを2時間とって2回行った(Fig. 38)。2回の合計塗布量は888g/m²であった。



Fig. 38 含浸強化剤吹き付け (1回目)

木材の腐朽はかなり進行しているため、2回目以降もまだ含浸させることは可能であったが、足場の悪さ、観光客が近くを通っていることなどを考慮し、この時点で塗布を終了した。

含浸強化剤の吹き付け終了時の状況をFig. 39に示す。この時点では濡れ色が強く出ているが、煉瓦や漆喰の場合と同様に、約半年後には元の色に戻っているものと思われる。

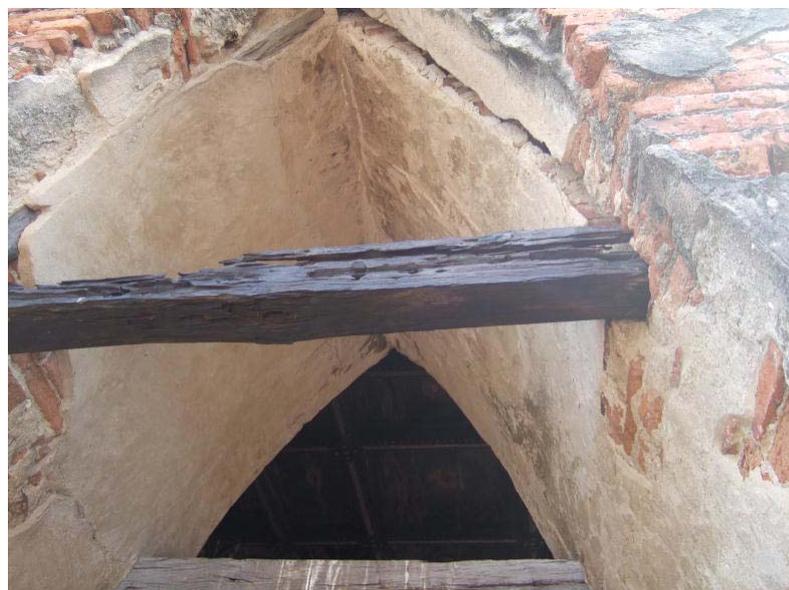


Fig. 39 含浸強化剤吹き付け終了

7. 木材の強化および腐朽防止処理効果のモニター用サンプルの作成

漆喰および煉瓦の強化処理効果を身近で観察することを目的に、強度の低いセメントペースト硬化体の上に上記と同様な処理を行った試験体を作成した。なお、このコントロール試験体として無処理のものも用意した。試験体寸法は40mm×40mm×160mmの直方体である。セメントペーストの水セメント比は90%とした。

Fig. 40は無布塗布サンプル、Fig. 41は処理済サンプルである。含浸強化剤は、配合No.1とし、単位面積当たりの塗布量は1,564g/m²であった。



Fig. 40は無布塗布サンプル



Fig. 41は含浸強化処理済サンプル

木材についても、強化および腐朽防止処理の効果を身近で観察できるようにサンプルを作成した。使用した木材は、日本の国指定重要文化財の仁王門の部品から切り出したものである。この仁王門は15世紀に建てられ、17世紀と18世紀に修理された。この部品はその修理時のものと思われる。Fig. 42、Fig. 43に、建物の断面図とサンプルの加工図を示す。

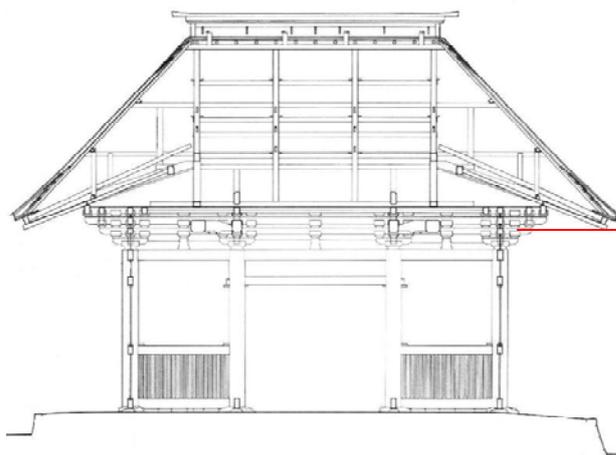


Fig. 42 仁王門の断面図

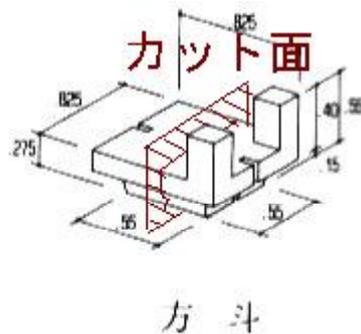


Fig. 43 サンプルの加工

Fig. 44に、切り出されたサンプルを示す、左側の明るい部分は未処理部分、右側の濡れ色部分が処理済部分である。処理に使用した薬剤は Table .2に示した配合2の薬剤とした。塗布回数は2回で、単位面積あたりの塗布量は $4,203\text{g}/\text{m}^2$ であった。



Fig. 44 サンプル (左側：無処理、右側処理済み)

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°C ~最低 -3°C)と特に寒い地域(最高 25°C ~最低 -30°C)で同時期に屋外暴露している。

8 . 処理効果の経年変化の評価 (Wat Som)

含浸強化剤の物理性能の評価は、前述の小径ドリル型表層強度測定器を用いて行った。試験体は、Wat Somの仏塔の煉瓦である。劣化した表層と健全な表層の強度分布の違いについては、既に6.1で説明した(ここでも一部再掲する)。本章では、劣化した表層に含浸強化剤を塗布した場合の処理効果の評価する。測定は既に処理前、処理後1ヶ月で行ったが、今後も継続し、処理後1年、処理後5年で行う予定である。

(1) 含浸強化剤の硬化直後 (処理後 1 ヶ月)

表層が劣化した煉瓦の処理前と処理後の強度試験結果の比較をFig. 45に示す。

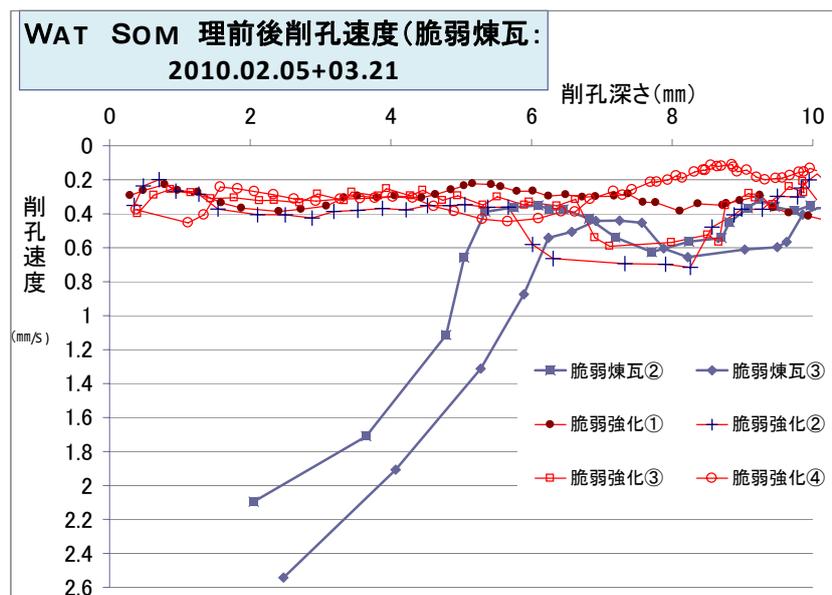


Fig. 45 表面が劣化した煉瓦の処理前と処理後の強度試験結果

図中の青線が処理前のデータ、赤線が今回の処理後のデータである。処理前は、表面から6mm以深が健全な部分と判断された。これに対し、処理後は表面から10mmまで、削孔速度がほぼ一定の値を示しており、その値は処理前の健全な部分よりやや小さく(抵抗が大き)くなっている。すなわち、含浸強化処理の効果は、脆弱な6mmまでの部分だけではなく、より深い位置の健全な部分にまで及んでいると判断される。

表層が健全な煉瓦の処理前(再掲)と処理後の強度試験結果の比較をFig. 46に示す。図中の黒線が処理前のデータ、赤線が今回の処理後のデータである。これによれば、全てのデータにおいて処理後の強度は処理前に比べ、表面から深さ10mmまで大きく(削孔速度が遅く)なっている。すなわち、含浸強化処理の効果は、たとえ健全な煉瓦でも、上記と同様、10mm以深にまで及んでいると判断される。

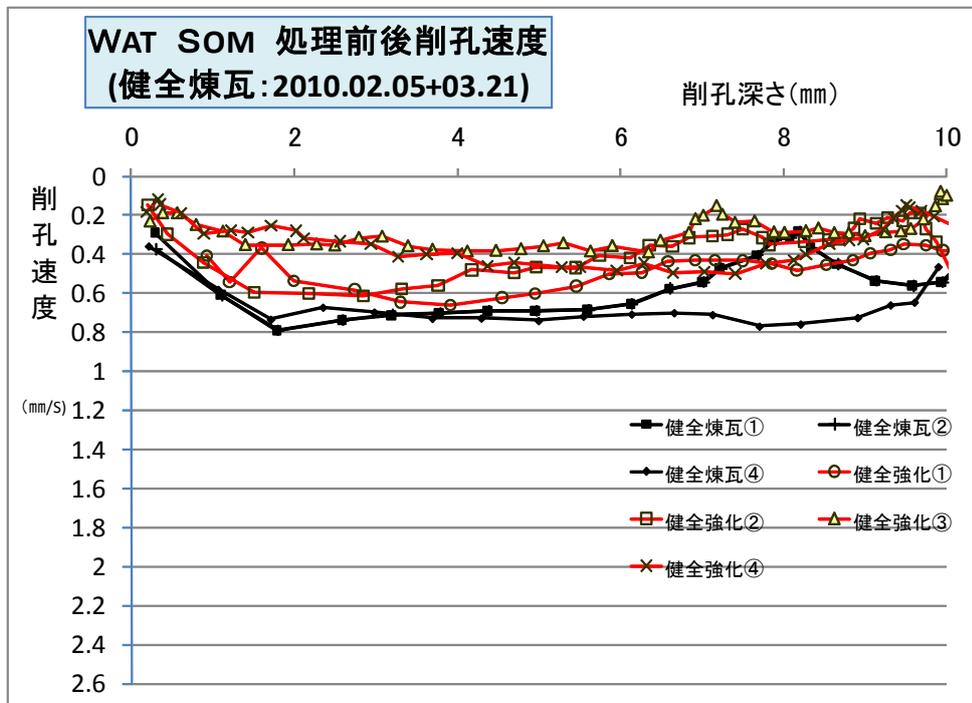


Fig. 46 健全な煉瓦の処理前と処理後の強度試験結果

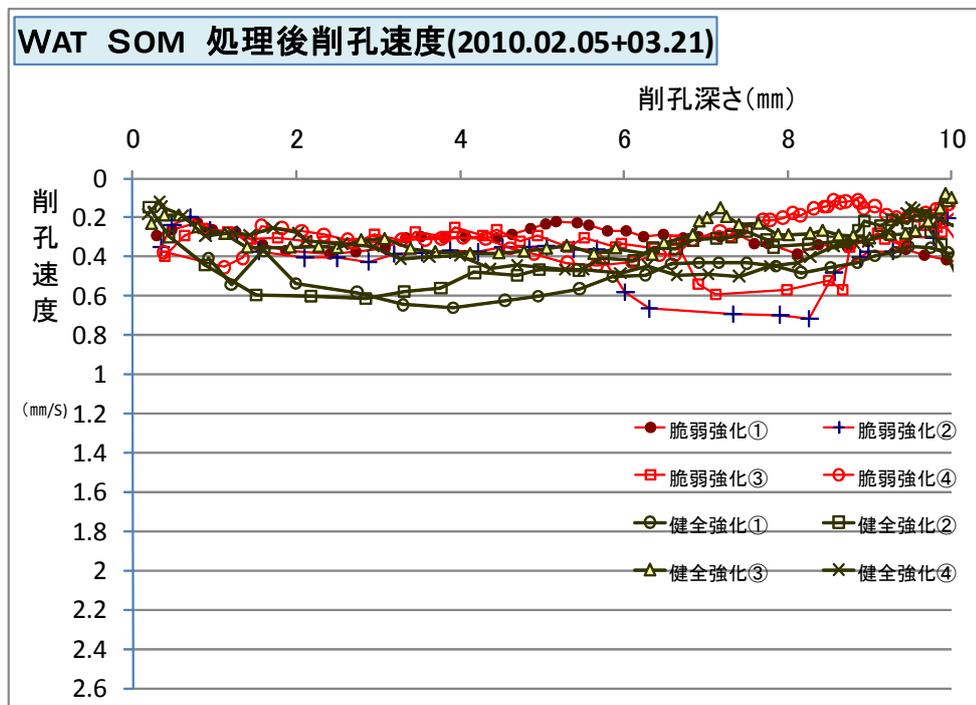


Fig. 47 表面が健全な煉瓦と脆弱な煉瓦の処理後の強度試験結果

表層が健全な煉瓦(再掲)と脆弱な煉瓦の処理後の強度試験結果の比較をFig. 47に示す。図中の黒線が健全な煉瓦の処理後のデータ、赤線が脆弱な煉瓦の処理後のデータである。図によれば、健全な煉瓦と脆弱な煉瓦の両者において、表面から深さ10mmまでの全ての値は0.2mm/sから0.6mm/sの間に入っており、強度は全て同程度になったと評価できる。さらに詳細に比較すれば、その差は少ないものの、脆弱な煉瓦の処理後の方が健全な煉瓦の処理後より若干削孔速度が小さく(強く)なっている。これは脆弱化した煉瓦の方が含浸強化剤を多く吸い込んだ結果と推定される。

(2) 処理後1年経過時 (2010年12月実施)

表面が劣化した煉瓦および健全な煉瓦の処理後1年経過後の試験結果をFig. 48, 49にそれぞれ示す。同図には、処理前、および処理後1ヶ月のデータも併せて示す。図によれば、処理後1年の時点では、高含浸性強化剤の効果には変化は見られず、良好な品質改善効果を保っていると判断できる。

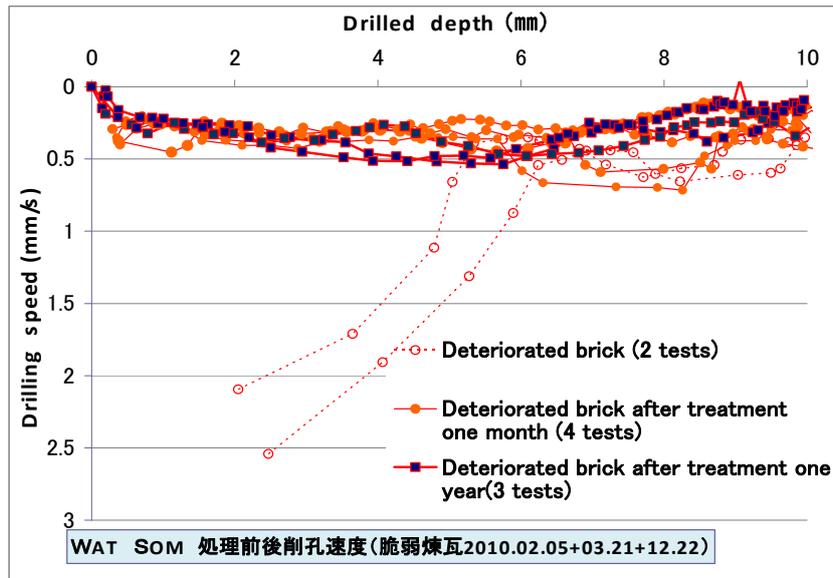


Fig. 48 表面が劣化した煉瓦の処理前、処理後1ヶ月および処理後1年の削孔試験結果

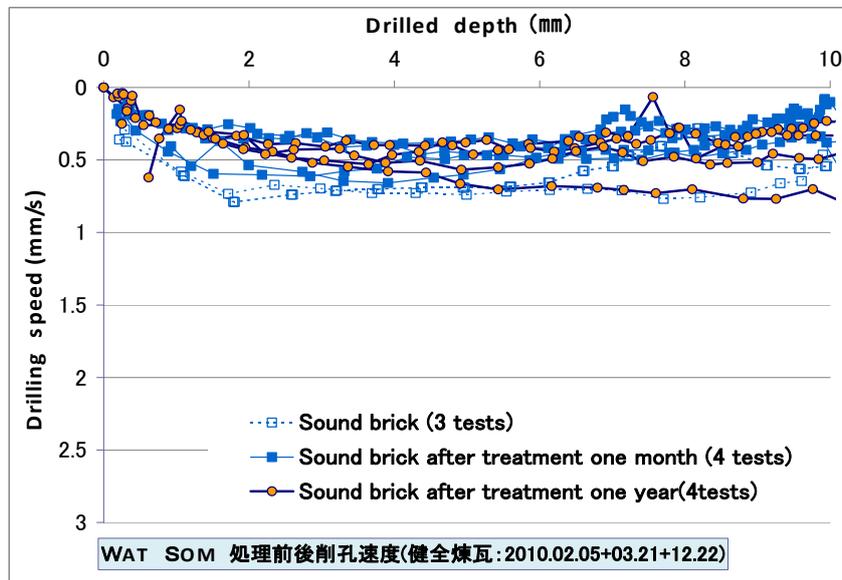


Fig. 49 表面が健全な煉瓦の処理前、処理後1ヶ月および処理後1年の削孔試験結果

(3) 処理後5年経過時

(2015年1月頃実施予定)

9. 意匠性の経年変化の評価

含浸強化剤の意匠性の評価は、目視にて行うこととし、色およびテクスチャーの変化を検討する。測定時期は処理前、処理後1ヶ月、処理後半年、処理後1年、処理後5年の予定である。

(1) Wat Som

S1およびS2部分の外観について、各時点での状況をFig.48～Fig.53に示す。

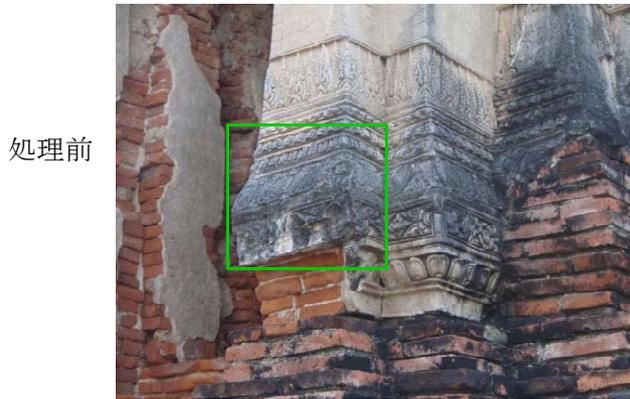


Fig. 48 S1部分施行前



Fig. 49 S2部分施行前



Fig. 50 S1部分施行直後



Fig. 51 S2部分施行直後



Fig. 52 S1部分施行後1ヶ月経過

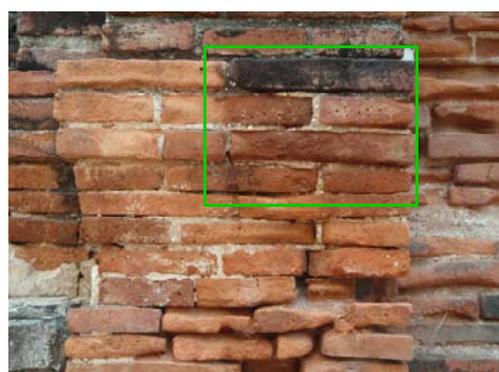


Fig. 53 S2部分施行後1ヶ月経過

1) 施工直後および1ヶ月後

S1部分の漆喰は、施工直後・1ヶ月後ともに施工前と比べてほとんど変化は見られない。S2部分の煉瓦は、施工直後・1ヶ月後ともに造膜・光沢は無いが、やや濡れ色になっている。

(2) Wat Chai Wattharam

W1およびW2部分の外観について、各時点での状況をFig.54～Fig.59に示す。

処理前



Fig. 54 W 1 部分施行前



Fig. 55 W 2 部分施行前

処理直後

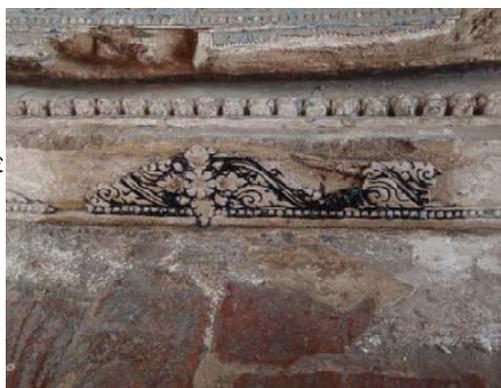


Fig. 56 W 1 部分施行直後



Fig. 57 W 2 部分施行直後

1ヶ月後



Fig. 58 W 1 部分施行後1ヶ月経過



Fig. 59 W 2 部分施行後1ヶ月経過

1) 施工直後および1ヶ月後

a. W1A, W2A (漆喰仕上げ)

W1部分・W2部分ともに、施工前に比べて施工直後は、漆喰の白い部分が若干濡れ色になっている。しかし、1ヶ月後は、その濡れ色が薄くなっていた。W1部分・W2部分ともに、レリーフの凹部は薄いグレーであったが、処理後はきれいな黒色で目立つようになった。この黒い部分は、当初に仏像全体を覆っていた金箔の接着剤と思われる。処理前は劣化による表層の乱反射と汚れでグレーに見えていたものが、処理によって汚れが取れ、薬液の表層コーティングで乱反射なくなり黒く見えるようになったと考えられる。

b. W1B (木製タイバー)

施工直後には、かなり濃い濡れ色で、表面に薬剤が浮き出ている。施工1ヵ月後には、濡れ色は薄くなっている。部分的に光沢が見られるが、この部分は、施工工事に足場が不備であったため、仕上げ処理ができていなかったものと思われる。

処理前



Fig.60 木製タイバー施工前

処理直後



Fig. 61 木製タイバー施工直後

かなり濃い濡れ色で、表面にも薬剤が浮き出ている。

1 ヶ月後



濡れ色は薄くなっている
部分にややテカリが見
える。(この部分は施行
時の足場不備のため、
仕上げ処理がしてなか
った部分と思われる)

Fig. 62 木製タイバー施行後1ヶ月経過

10 . 修復工事の実現に向けて

(1) Wat Som

仏塔全体にわたり、漆喰や煉瓦の保存処理を行うことが望ましい。それを行うには仏塔全体の劣化(数量も含む)調査を行い、補修・改修の計画原案を立案し、管理者・研究者・設計者がそれにかかるコストと効果を考慮し、補修・改修の実施計画を作成する必要がある。

劣化(数量も含む)調査から補修・改修の計画原案作成までのプロセスの例を以下に示す。

- 1) 塔全体の立体的な図面を作成する。(三次元計測または実測を行い、図面化する。なお、実測にあたっては足場が必要である)
- 2) 地面より低い部分の煉瓦の形状・性状を調査する。(掘削を行う必要がある)
- 3) 劣化状況の調査を行う。具体的には、漆喰の浮きの数量や状態、ひび割れの状態、れんがの劣化状況、植物の根等の状況調査を行う。(足場が必要である)
- 4) 各種の分析による煉瓦の劣化原因の推定を行う。
- 5) 上記全体のまとめ、劣化原因等の特定、今後の劣化進行予測などを行う。
- 6) 前項を考慮した補修・改修案を作成する。

2) Wat Chai Watthanaram

寺院全体の規模および各塔の劣化状況から判断すると、修復工事が特に急がれると思われる。例えば、Fig. 63, Fig64 に示す漆喰レリーフの保存工事は、早急に行うことが望ましい。

調査・診断プロセスは前述のWat Som とほぼ同じで、掘削調査のみ除いたものでよいと考えられる。
(以上)



Fig. 63 W 2 部の塔の外側

拡大



Fig. 64 左写真の部分拡大

ที่ วธ ๐๔๐๑/ ๓๔๕/๒



กรมศิลปากร

ถนนหน้าพระธาตุ กทม. ๑๐๒๐๐

๓ สิงหาคม ๒๕๔๙

เรื่อง การขออนุญาตใช้พื้นที่ในเขตโบราณสถาน

เรียน ดร. ปริญา จินดาประเสริฐ

ตามที่กรมศิลปากร ได้พิจารณาการขอเข้าใช้พื้นที่เพื่อการวิจัยของ ศูนย์วิจัยและพัฒนา
โครงสร้างมูลฐานอย่างยั่งยืน มหาวิทยาลัยขอนแก่นและ Prof.Dr Shigemitsu Hatanaka เกี่ยวกับ
โครงการวิจัยฯ ที่เกี่ยวข้องกับโบราณสถาน รายละเอียดทราบแล้วนั้น

กรมศิลปากรพิจารณาแล้วมีความเห็นว่าเป็นโครงการที่ มหาวิทยาลัยขอนแก่นเป็นผู้
รับผิดชอบโครงการโดยตรง กรมศิลปากรไม่สามารถร่วมลงนามในข้อตกลงดังกล่าวได้ แต่
กรมศิลปากรจะอนุญาตให้ใช้พื้นที่แก่คณะผู้วิจัยในการดำเนินงานตามโครงการ ซึ่งก่อนที่จะเข้า
ดำเนินงานตามโครงการในแต่ละช่วง ให้ผู้วิจัยแจ้งผู้แทนกรมศิลปากรในการเข้าใช้พื้นที่เพื่อปฏิบัติการ
วิจัยภาคสนาม โดยผู้ทำการวิจัยต้องแจ้งรายละเอียดของโครงการ ขั้นตอนและวิธีการทำงานรวมถึงวัสดุ
สารเคมีต่างๆที่นำมาใช้ในการทดลองให้กับผู้แทนกรมศิลปากรก่อนเข้าดำเนินการทุกครั้งเป็นการ
ล่วงหน้าไม่น้อยกว่า ๗ วันทำการ

จึงเรียนมาเพื่อโปรดทราบ

ขอแสดงความนับถือ

๕
(นายอาร์ภย์ สังกิตกุล)
อธิบดีกรมศิลปากร

สำนักงานเลขานุการกรม

กลุ่มนิติการ โทร. ๐ ๒๒๒๒ ๔๕๖๖

โทรสาร. ๐ ๒๒๒๖ ๑๗๕๑

施工実験実施関係者（2010年2月7日）

