

論文 風環境下における吹付け補修材料の評価

伊藤 正憲^{*1}・魚本 健人^{*2}

要旨：本研究は、劣化したコンクリート構造物に対して施工する吹付け補修材料に関するものである。実験では、実現場の環境を想定し、吹付け直後から風を吹かせるなどして乾燥状態とし強度、接着性および耐中性化抵抗性などの基本物性の変化について細孔空隙に着目して検討を行った。また、膨張材等の収縮補償材料が乾燥環境下で機能するか否かについても検討した。その結果、乾燥環境下では、圧縮強度、接着強度が低下し、中性化の進行も早い。特に、風環境下では影響が大きく、これらにはある大きさ以上の細孔空隙量が影響を及ぼしていること、また、乾燥環境下でも収縮補償材料はある程度機能することなどを確認した。

キーワード：補修，風環境，ポリマーセメントモルタル，細孔構造，強度，ひずみ

1. はじめに

断面修復材に要求される性能は、圧縮強度や接着強度などの力学的性能、ひび割れ抵抗性、はく落抵抗性、美観・景観などである。ひび割れ抵抗性は寸法の安定性と言い換えることもでき、具体的には自己収縮、乾燥収縮などで評価される。また、補修した後は耐久性の観点から劣化因子に対する高い遮断性能も要求される。このような要求性能を満足するため、一般的には断面修復材としてポリマーセメントモルタル(以下、PCM)が使用される。PCMには初期にセメントの水和反応を期待し、ある程度時間が経過した後は乾燥によるポリマーの被膜化を期待している。これにより優れた接着性と塩分などの劣化因子に対する高い遮断性能が発揮されると考えられている。しかし、これらの優れた性能は、材料の特性を理解したうえで、適切な養生、特に、初期の養生が適切に行われて初めて得られるものであり、実際の補修工事では、適切な養生を確実に行うことが難しい場合も多い。例えば、地下鉄坑内での補修では列車運行に支障を来す可能性があるため、シート等を使用した養生を行うことは難しい。

このような状況の中、コンクリートを対象と

し温度や相対湿度等の環境要因に着目して検討した研究は比較的多い^{1,2)}。しかし、初期の水分の蒸発に大きな影響を及ぼす風に着目し、PCMの基本的な物性がどの程度影響を受けるかについて検討した研究は十分とは言えない³⁾。

そこで、本研究では、湿式吹付け工法で施工した断面修復材を対象とし、吹付け直後から乾燥状態に曝された場合の圧縮強度、接着性、中性化抵抗性に及ぼす影響について細孔空隙構造に着目して評価し、さらに数回の層状に分けて施工された場合の影響や、膨張材や収縮低減剤などの収縮補償材料が、乾燥環境下で期待した効果を発揮しているか否かについて検討した。

2. 実験概要

2.1 使用材料

表-1に使用材料を、表-2に配合表を示す。対象としたNo.2~5のPCMは、各試験結果の評価を適切に行うため事前に壁面に20mm厚で吹付け可能な配合を選定したものであり、それぞれ試験体の作製時に所要の材料を計量し粉体混合して使用したものである。さらに比較対象としてポリマー無しの普通モルタル(N)、および市販のプレミックス材料(RM)も1種類使用し、比

*1 東急建設(株) 技術研究所土木研究室 工修 (正会員)

*2 東京大学 生産技術研究所 都市基盤安全工学国際研究センター 教授 工博 (正会員)

較対象として検討した。RM 以外は、モルタルミキサを使用し5分間練り混ぜ、市販材料であるRMはハンドミキサで2.5分間練り混ぜた。

2.2 試験体作製

普通モルタルはコテを使用した左官工法により、それ以外のPCMは吹付け工法(吐出量約 $0.1\text{m}^3/\text{h}$ 、ノズル径8mm)で行った。なお、一部の試験体作製時には、直接型枠内に吹付けることができなかつたため、別容器に材料を吹付けた後、左官工法で試験体を作製した。

2.3 養生条件

表-3に設定した養生条件を示す。なお、いずれの試験も室温 20°C 、相対湿度 $60\pm 5\%$ の恒温恒湿室内で実施した。写真-1に風環境の状況を示す。

2.4 試験項目および方法

(1) 水分蒸発量試験

$130\times 130\times 20\text{mm}$ のガラス・アクリル製型枠を使用し、底面と側面からの水分の逸脱がないようにして吹付け直後からの質量変化を測定した。

(2) 細孔径分布

$180\times 180\times 20\text{mm}$ のガラス・アクリル製型枠に吹付けたものを材齢28日まで各養生条件に曝露し、表面0~5mm、5~10mmおよび10~20mmの3層から試料を採取した。試料は2.5~5mmに粗粉碎し、アセトンで水和を停止した後、D-乾燥してから空隙径分布を測定した。

(3) 圧縮強度

一般的なPCMの圧縮強度はJIS A 1171に準拠し $40\times 40\times 160\text{mm}$ の試験体で評価される。しかし、この大きさの試験体では風環境等の影響を適切に評価できないと考え、また、一般的な吹付け工法の標準施工厚さを参考にして本研究では $20\times 20\times 80\text{mm}$ の試験体(厚さ20mmの断面を想定)を対象として圧縮強度試験を実施した。

(4) 接着強度

各種の養生条件がPCMの接着強度に及ぼす影響を確認するため、JIS A 1171に準拠し材齢28日において建研式接着力試験器を使用して接着強度試験を実施した。

表-1 使用材料

種類	記号	諸元
セメント	C	普通ポルトランドセメント, 密度 $3.15\text{g}/\text{cm}^3$
ケイ砂	S	F.M=1.71, 密度 $2.60\text{g}/\text{cm}^3$
ポリマー	P	酢酸ビニル・エポキシ・アクリル共重合樹脂
膨張材	E	エトリンガイト-石灰複合系, 密度 $3.10\text{g}/\text{cm}^3$
収縮低減剤	SRA	低級アルコールアルキレンオキッド付加物
混和剤	SP	ポリカルボン酸系粉末高性能減水剤
消泡剤	DA	ポリエーテル系粉末型消泡剤

表-2 配合表

No	記号	W/B (%)	P/B (%)	単位量(kg/m^3)						
				W	C	E	P	S	SRA	
①	N		0				0	1227		
②	P5				614	0			1147	0
③	P5E	38		233	574	40		31	1147	
④	P5S		5		614	0			1132	6.1
⑤	P5ES				574	40			1131	
⑥	RM	一材型ポリマーセメントモルタル(水粉対比:16.8%)								

* : B=C+E, SP=B \times 0.08%, DA=B \times 0.2%, 空気量10%

表-3 養生条件

環境	条件
封緘	ビニール袋内で養生
気乾	周辺に囲いを建て無風状態とした水の水みの蒸発速度: $0.017\text{kg}/\text{m}^2/\text{h}$
風	風速 $2\text{m}/\text{s}$ (地下鉄坑内で実測した列車通過時の風速測定結果および東京都の平均風速を参考に設定) 水の水みの蒸発速度: $0.16\text{kg}/\text{m}^2/\text{h}$
シート	2日間シートで覆い、その後、風環境
膜養生	EVA系エマルジョン養生剤を散布し、風環境



写真-1 風環境の状況

(5) 中性化

一般的に断面修復工事において復旧する厚さが一度に吹付け可能な厚さを超えている場合、数回に分けて吹付け施工されることがある。この場合、施工上の段取りから前の層を吹付け、次の層を吹くまでの間に数時間から数日間の時間があく場合がある。当然、耐久性の観点から継ぎ目を作らずに断面修復することが理想であるが、実際の現場では難しく、この間に風などの乾燥の影響を受けることも考えられる。図-1に試験体の作製状況を示す。試験体は20mm

厚で1層吹付けた後、2日間各環境に曝露し、その後、湿潤処理してから2層目の吹付け、さらに2日間各環境に曝露した後、同様に3層目を吹付けた。その後、材齢21日(1層目吹付けからの材齢)で直径55mmのコアを採取し、材齢28日から1ヶ月間中性化させてからフェノールフタレイン塗布により各層間の状態を評価した。

(6) 平板による体積変化試験

部分断面修復を想定し図-2に示すような方法で試験体を作製し、既往の文献⁴⁾を参考として吹付け直後からの体積変化を確認した。計測に使用したゲージは弾性係数1.5MPa埋め込み型のものであり、表面部(-5mm)と内部(-15mm)の2箇所を設置した。なお、同じゲージを使用して自己収縮および自己膨張試験もあわせて実施した。

3. 結果および考察

3.1 水分蒸発量

図-3に経過時間と水分蒸発量の関係を示す。N、P5ともに封緘養生した場合には質量の変化はなかった。一方、気乾および風環境では早期に水分が逸散し、中でも風環境の方が質量変化、即ち水分の蒸発量が多かった。NとP5を比較した場合には、風環境でP5の蒸発量が少なく、ポリマー添加の効果が若干現れていた。なお、養生剤散布による初期水分蒸発の抑制効果は認められなかった。

3.2 細孔径分布

図-4に各養生条件における材齢28日の細孔径分布(0~5mmと10~20mmのみ)を示す。封緘養生した場合、Nに比べてP5は0.02μm以下の小さい径の細孔が増大していた。これは一般的に言われているポリマー添加の影響であると考えられる⁵⁾。気乾の条件では、NおよびP5ともに封緘よりも大径側にシフトし、総細孔量も増加していた。これは、前述の水分蒸発量の試験結果でも明らかなように極短時間に水分が蒸発し、セメントの水和が阻害され比較的粗大な空隙が残存したものと考えられる。一方、風環境下では、P5は気乾と大きな差は無く、水分蒸発

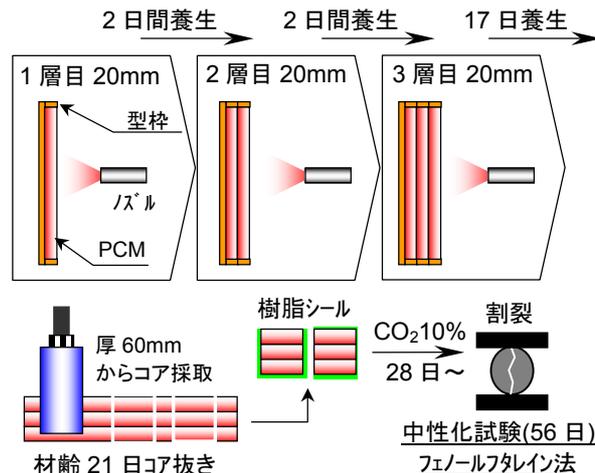


図-1 中性化試験概要

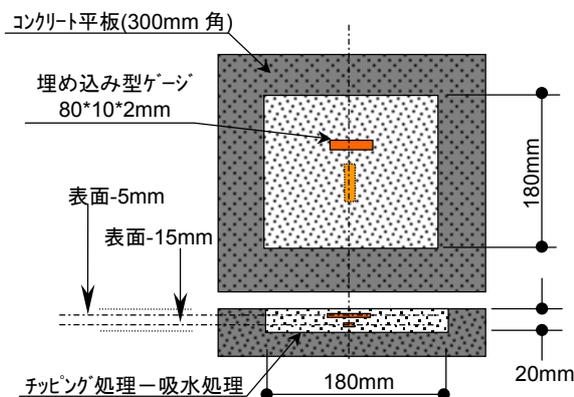


図-2 体積変化試験

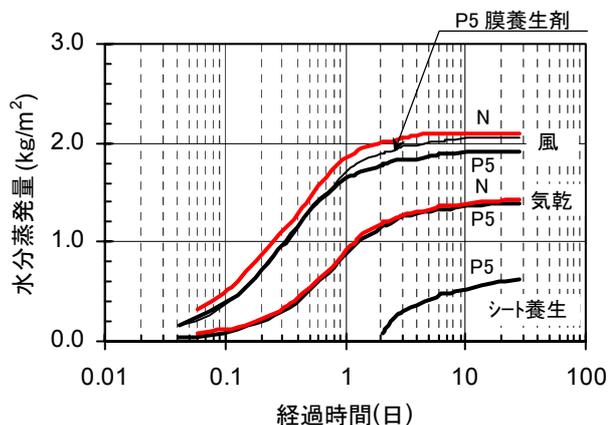


図-3 経過時間と水分蒸発量の関係

量に差があったことを考慮すると細孔径分布にはそれほど大きな影響は認められなかった。しかし、Nは風の影響を最も受け、断面厚20mm全てにおいて細孔空隙が粗になり、総細孔量も増加する傾向にあった。このように吹付け直後から乾燥状態に曝された場合、モルタルの空隙構造は粗になるが、ポリマーを添加することである程度は抑制できることがわかった。

3.3 圧縮強度

図-5に材齢7日および28日の圧縮強度を示す。この試験は、断面厚20mm角のモルタルバーを対象に試験したものであるが、前述の細孔径の結果から判断すると全ての部分で設定した乾燥環境の影響を受けていると考えられる。材齢28日の圧縮強度は、NおよびP5ともに封緘よりも気乾、さらに風環境下に曝露された場合、強度発現性が低くなる傾向にあった。一方、材齢2日までシート養生(封緘)とし、その後、風環境下に置いた場合には、材齢7日までの強度発現性は封緘に近い、しかし、その後の強度増進は封緘より小さく、この条件でも風による水分逸散の影響が認められた。

一方、吹付け直後に膜養生剤を散布した場合は、何もせず風の影響を受けた場合とそれほど大きな差は無かった。従って、今回使用した膜養生剤には有効な効果は認められなかった。

ここで、空隙容積と圧縮強度の関係式は、脆性多孔材料の強度と空隙率の関係について Ryshkewitch の式が一般的に認められている^{6,7)}。

$$\sigma = \sigma_0 \exp(-bp) \quad (1)$$

ここで、 σ : 圧縮強度、 σ_0 : 空隙がゼロの時の圧縮強度、 p : 空隙率、 b : 実験定数

この式(1)を用いて p (空隙量)を $0.01 \mu\text{m}$ 以上の直径の空隙容積として実験結果を回帰した。その結果を図-6に示す。図中に示すように指数近似した結果、各条件下に曝露された時の N および P5 の圧縮強度と $0.01 \mu\text{m}$ 以上の細孔空隙には高い相関関係が認められた。

3.4 接着強度

図-7に水分蒸発速度と接着強度試験の結果を示す。NおよびP5ともに水分蒸発速度が速くなるに従い接着強度は低下する傾向にあった。しかし、その傾向はNとP5とでは異なり、P5の方が水分蒸発の影響を受けておらず、同等の水分蒸発速度であってもP5の方が接着強度が低下しないという結果となった。これはポリマー添加の効果であると考えられる。

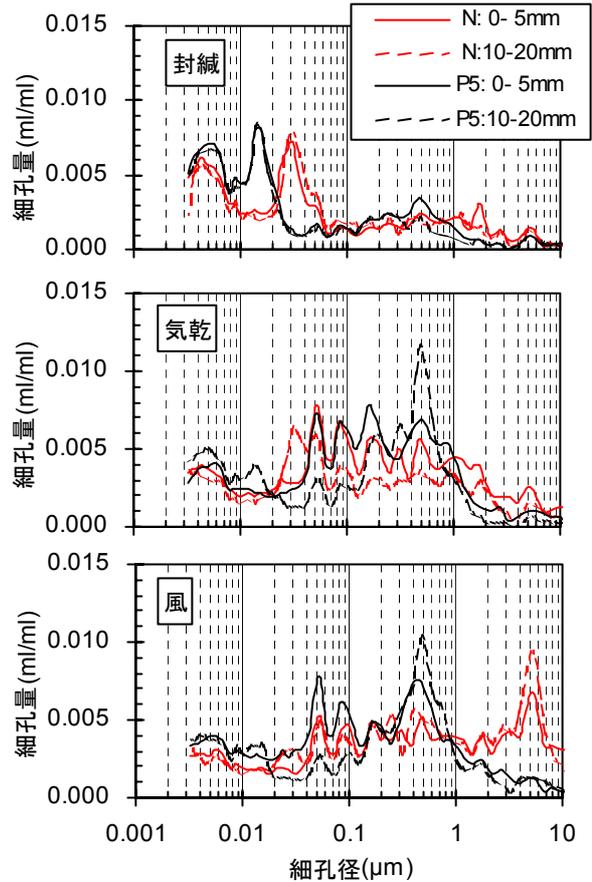


図-4 細孔径分布

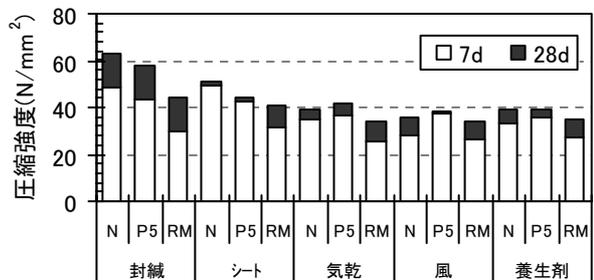


図-5 圧縮強度試験結果

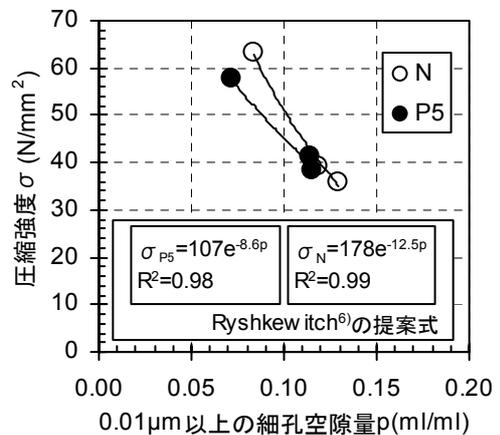


図-6 細孔空隙と圧縮強度の関係

3.5 中性化

(1) 仕上げ面からの中性化

図-8 に水分蒸発速度と中性化深さの関係を示す。N は水分蒸発速度が速くなるに従い中性化深さが大きくなる傾向にあった。一方、PCM は気乾での蒸発速度までは N と同等であり、中性化深さも同等であったが、さらに蒸発速度が速くなる風環境では中性化の進行が抑制されていた。これは被膜化したポリマーの効果で中性化の進行が抑制されたものと考えられる。

図-9 に $0.04\ \mu\text{m}$ 以上の細孔空隙量と中性化速度係数の関係を示す⁸⁾。N および P5 とともに $0.04\ \mu\text{m}$ 以上の細孔空隙が中性化の進行に大きな影響を与えていると考えられた。

(2) 重ね吹きした場合の層間での中性化

図-10、写真-2 にコア試験体側面での中性化深さを示す。この状況は、母材との界面に発生したひび割れ部からの CO_2 の侵入を想定したものである。風環境下では各吹付け層間での中性化が他の部分より早く進行しており、既往の研究で示されているモルタルの打継ぎ部での中性化の進行と同じような傾向となった⁹⁾。これは1層目および2層目を吹付けた場合に特に仕上げを行わず、そのまま各条件下に曝したことにより物理的な凹凸を残して硬化し、これに次の層が重なり部分的な空隙が発生したこと、および前述のように風の影響により層間部周辺の空隙構造が粗大になったことなどが影響しているものと考えられた。なお、風環境下で確認された層間での中性化の進行状況は、封緘および気乾養生した試験体では明確には確認できなかった。

3.6 風環境下における体積変化

図-11 に自己収縮および自己膨張試験の結果を示す。なお、ひずみは各材料について凝結時間を事前に測定し、始発時間をゼロとして図示している。P5 の自己収縮ひずみは N よりも若干大きくなった。これは細孔空隙構造の変化と関係があると考えられる。即ち、P5 は空隙の小径化に伴う毛細管張力の増大により自己収縮ひずみが若干大きくなったと考えられる。

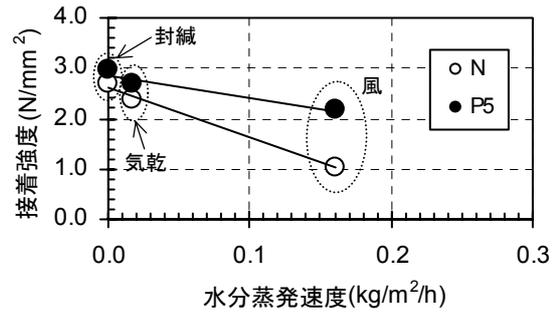


図-7 水分蒸発速度と接着強度の関係

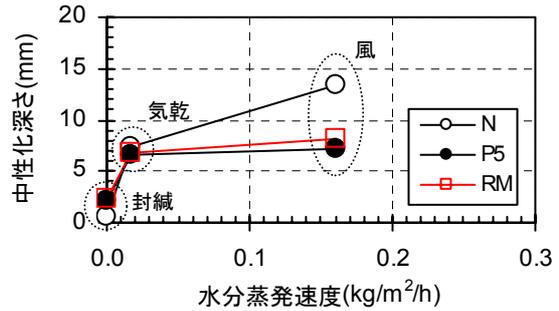


図-8 水分蒸発速度と中性化深さの関係

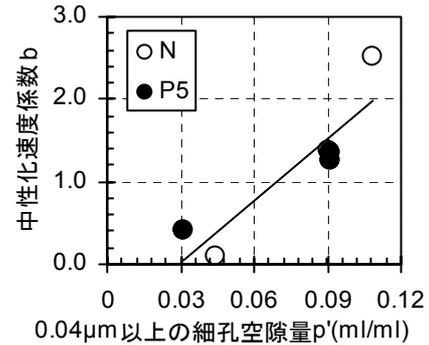


図-9 細孔空隙と中性化速度係数の関係

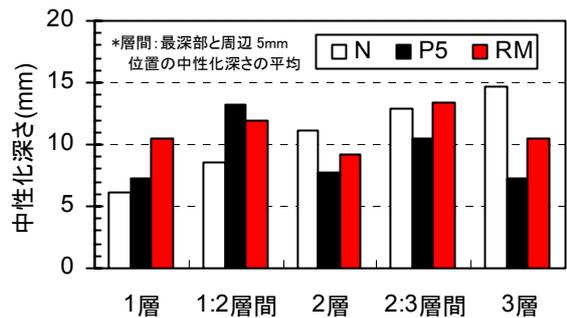


図-10 各層間での中性化深さ

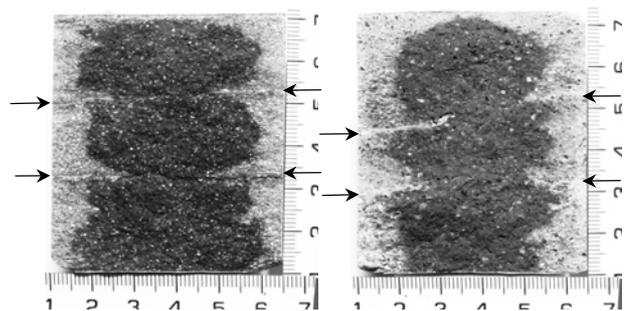


写真-2 層間での中性化進行状況(左:P5, 右:RM)

一方、P5E、P5ES は初期から膨張材の効果である膨張側のひずみが確認できた。

図-12 に部分断面修復を想定し、吹付け直後から風環境下に曝された場合の表面部および内部に発生したひずみの状況を示す。なお、この図では吹付け直後からのデータをそのまま図示した。いずれも風環境に置かれた直後は収縮側のひずみが生じ、その後、膨張側に転じ、さらに収縮側に移行していた。また、N は水分の逸散等の影響により収縮側に移行した後のひずみ勾配が大きくなり、最終的(約 40 日)に表面と内部で 250×10^{-6} 以上のひずみ差が生じていた。しかし、ポリマーを添加することで初期に生じるひずみ勾配が緩やかとなり、さらに膨張材と収縮低減剤を併用することにより表面部と内部のひずみ差も小さくなり N の約 1/3 の 80×10^{-6} 程度に抑制され、表面と内部のひずみ分布の差の少ない安定した状態となることが確認できた。

4. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

- 1) 乾燥環境下では N および PCM から早期に水分が蒸発し、特に、風環境下では蒸発量が多くなるが、ポリマー混入により若干の蒸発抑制効果が認められた。
- 2) 封緘養生した場合、PCM の細孔構造は N よりも密となるが、乾燥環境下では若干粗な空隙が残存する。
- 3) 乾燥環境下では、PCM の圧縮強度、接着強度が低下し、中性化の進行も早い。特に、風環境下では影響が大きく、これらにはある大きさ以上の細孔空隙量が影響を及ぼす。
- 4) 層状に吹付けた場合、層間に物理的な凹凸による空隙が発生している可能性があり、層間部の中性化が他の部分よりも進行する。
- 5) 風環境下においても膨張材、収縮低減剤の効果はある程度期待することができ、厚さ 20mm 程度の部分断面修復を想定した場合、表面と内部のひずみ差を小さくできる。

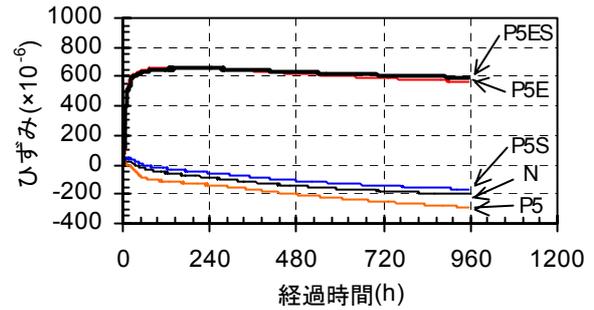


図-11 自己収縮および自己膨張試験

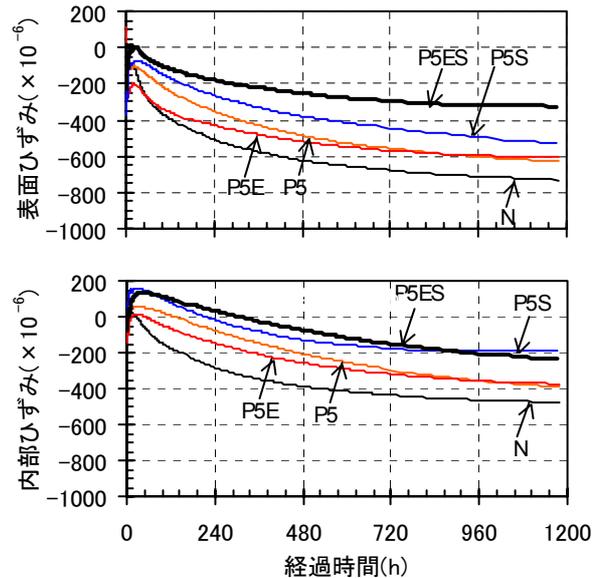


図-12 風環境下の PCM に発生したひずみ

参考文献

- 1) 庄谷征美ほか：風作用下におけるコンクリートの収縮特性に関する研究，セメント・コンクリート論文集，Vol.32，pp.361-364，1978
- 2) 若杉三紀夫ほか：再乳化形粉末樹脂を用いたポリマーセメントモルタルの付着性状，セメント・コンクリート論文集，Vol.51，pp.900-905，1997
- 3) 松田忠広ほか：ドライアウトによるモルタルの接着強度の低下に関する研究，セメント・コンクリート論文集，No.56，pp.134-139，2002
- 4) 堀田智明，名和豊春：セメント系材料の自己収縮に関する研究，共和技法 517，2001
- 5) Satish Chandra, Yoshihiko Ohama：POLYMERS in CONCRETE, p.125
- 6) Ryshkewitch, E.: Compression Strength of Porous Sintered Alumina and Zirconia, Jour. of the Amer. Ceramic Society, Vol.36, No.2, 1953
- 7) 青木茂ほか：高強度連壁コンクリートの非排水三軸加圧下における強度性状，土木学会論文集，No.571，pp.105-117，1997.8
- 8) 郭度連ほか：中性化に影響を及ぼす細孔径の評価，第 56 回セメント技術大会講演要旨，pp.190-191，2002
- 9) 申英珠ほか：モルタルの打継ぎ部分の中性化と細孔構造との関係：セメント・コンクリート論文集，Vol.53，pp.738-743，1999