

広大科研

19

17560509

0100453555

---

# 建築外装仕上材の剥離発生メカニズムの解明と 剥離防止技術の確立に関する研究

---

研究課題番号 17560509

平成17年度～平成18年度 科学研究費補助金  
(基盤研究(C)) 研究成果報告書

平成19年3月

研究代表者 大久保 孝昭  
広島大学大学院工学研究科・教授

広島大学図書

0100453555



科学研究費補助金 研究成果報告書

## 建築外装仕上材の剥離発生メカニズムの解明と

### 剥離防止技術の確立に関する研究

研究種目 基盤研究 (C)  
研究課題番号 17560509  
研究期間 平成17年度～平成18年度

平成19年3月

広島大学大学院 工学研究科

社会環境システム専攻・建築構造学講座

研究代表者 大久保 孝昭(広島大学大学院工学研究科 教授)

研究分担者 松本 慎也 (広島大学大学院工学研究科 助手)



## 目次

I. 研究課題	-1-
1. 科学研究助成金概要	
2. 本研究に基づく研究発表および解説	
II. 研究成果	
A. 温冷・乾湿ムーブメントによる剥離メカニズム	-2-
1. 数値解析による検討	
1.1 本解析手法の概要	
1.2 熱伝導解析の理論	
1.3 熱応力解析の理論	
1.4 解析対象	
1.5 解析結果	
2. モデル試験体による実験検討	-15-
2.1 近年の温冷・乾湿ムーブメントによる仕上げ材剥離事故	
2.2 実験方法	
2.3 実験結果および考察	
B. 施工条件に起因した剥離発生メカニズム	-
36-	
3. モデル試験体による実験検討	
3.1 実験方法	
3.2 実験結果および考察	
III. 剥離防止技術に関する総括	-53-

## I. 研究課題

### 1. 科学研究助成金概要

#### 研究課題名

建築外装仕上材の剥離発生メカニズムの解明と剥離防止技術の確立に関する研究

	直接経費	間接経費	合計
平成17年度	2,500千円	0	2,500千円
平成18年度	800千円	0	800千円
合計	3,300千円	0	3,300千円

#### 研究概要

鉄筋コンクリート系の建築物を構成する部材のほとんどは躯体材料と仕上材料との積層材料であると言える。例えば柱・梁・壁等の鉄筋コンクリート部材ではコンクリート躯体にモルタル、タイルおよび塗装材などの仕上げ材が積層されている。屋根スラブには躯体コンクリートにシートやアスファルト等の防水材料が積層されている。これら積層部材内部の一体性を確保することは、建築物が耐用期間中にわたって所要の性能を発揮するための重要な要因である。

積層建築部材の剥離・剥落を未然に防止するためには、剥離発生メカニズムを明確にするとともに、設計・施工段階において耐用期間中の剥離力を想定し、それに応じた対策が必要である。

本研究は鉄筋コンクリート建築物を対象とし、積層部材内部における剥離発生メカニズムを解明し、効果的な剥離防止技術を実験および数値解析の両面から検証して提案するために実施した。

#### 2. 本研究に基づく研究発表および解説等

- 1) 森田 翔、大久保孝昭、松本慎也、長谷川拓哉、古賀純子、根本かおり：“建築部材の目的指向型耐久設計に関する研究 その12 RC 外壁仕上材の剥離剥落防止設計データ” 日本建築学会大会講演梗概集 2005年8月
- 2) 松本慎也、大久保孝昭、森田翔、神田憲二、根本かおり：“劣化環境下における建築外装仕上げ材の剥離応力解析に関する研究”、日本建築学会中国支部研究報告集 pp37-40, 2006年3月
- 3) 大久保孝昭、松本慎也、森田翔、坂下明：“木造住宅におけるラスモルタルの剥離およびひび割れ制御に関する研究”、第8回日本・韓国建築材料施工 Joint Symposium 論文集 pp301-306、2006年8月
- 4) 森田 翔、坂下 明、神野 貴紀、大久保 孝昭、松本 慎也：“建築湿式仕上材を対象とした目的指向型耐久設計の確立に関する研究 その1 研究概要とモルタルの収縮特性に対する基礎実験”、日本建築学会中国支部研究報告集 pp13-16 2007年3月
- 5) 神野 貴紀、森田 翔、坂下 明、大久保 孝昭、松本 慎也：“建築湿式仕上材を対象とした目的指向型耐久設計の確立に関する研究 その3 剥離防止に関する基礎実験”、日本建築学会中国支部研究報告集 pp21-24 2007年3月
- 6) 大久保孝昭，“建築材料を長い目で見ることの重要性”，日本建築仕上材工業会会報 No.106, pp2-3, 2007年1月
- 7) コンクリートと左官モルタルの接着一体性に及ぼす初期養生の影響、根本かおり、眞方山美穂、大久保孝昭、松本慎也 日本建築学会構造系論文集 No613 pp7-14,2007.3

## A. 温冷・乾湿ムーブメントによる剥離メカニズム

### 1. 数値解析による検討

#### 1.1 本解析手法の概要

本解析手法の解析の流れを図 1.1 に示す。解析では、まず時刻  $t=0$  における各要素の初期温度分布を設定する。そして熱伝導解析を行うことで、ある時刻における要素に生じる温度分布を解析する。そして、その温度分布での熱ひずみに対する等価節点荷重を計算し熱応力解析を行うことで温度変化によって各要素に生じる応力、ひずみを計算し、時間を微小増分することで逐次解を求める。このとき、熱伝導解析および熱応力解析には、表 1.1 に示す解析手法を用いる。

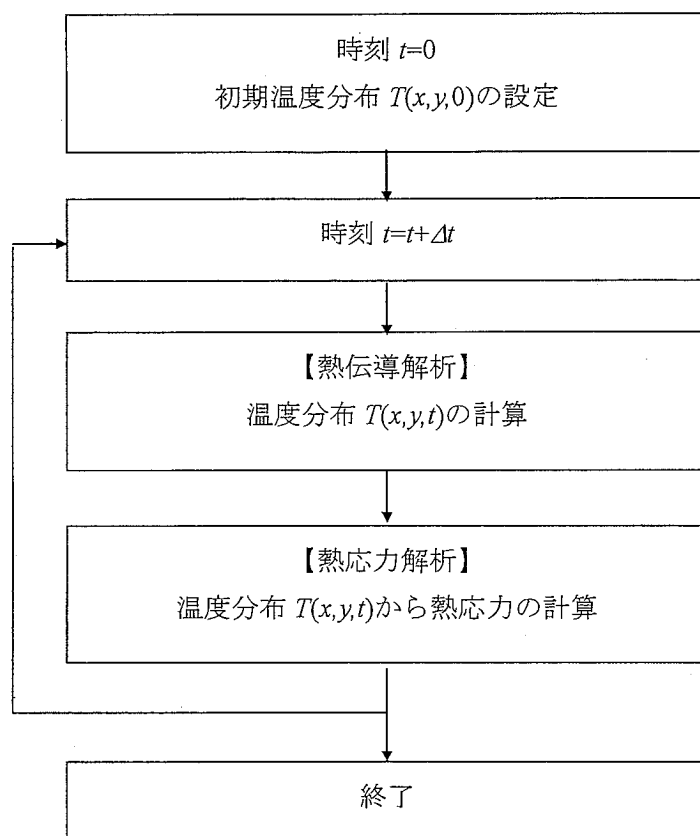


図 1.1 解析の流れ

表 1.1 解析手法

熱伝導解析	ガラーキン法に基づく有限要素法 四節点アイソパラメトリック要素
熱応力解析	変位型有限要素法による面内変形解析 ・Wilson らの非適合四辺形要素

## 1.2 熱伝導解析の理論

まず、図 1.2 に示すように、物体を四角形要素に分割し、物体内の 1 つの要素における位置  $x, y$ 、時刻  $t$  での温度を  $T(x, y, t)$  と仮定することを考える。このとき、物体内部の離散化には四節点アイソパラメトリック要素を用い、要素形状を(1)式のように定式化する。

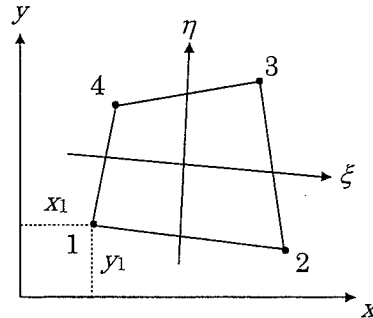


図 1.2 2次元熱伝導問題

$$x = \sum_i^4 N_i x_i, \quad y = \sum_i^4 N_i y_i \quad (1)$$

ここに、 $N_i$  は次式で与えられる。

$$N_1 = \frac{1}{4}(1 + \xi_i \xi)(1 + \eta_i \eta) \quad (2)$$

$\xi_i, \eta_i$  は四つの頂点 1, 2, 3, 4 でそれぞれ  $(-1, -1)$ ,  $(1, -1)$ ,  $(1, 1)$ ,  $(-1, 1)$  の座標値をとる局所座標である。

この要素内に生じる温度分布  $T(x, y, t)$  を要素形状関数  $N_i$  および節点温度  $T_i$  を用いて次のように仮定する。

$$T(x, y, t) = \sum_i^4 N_i T_i \quad (3)$$

上式をマトリックス表記すると、

$$T(x, y, t) = [N] \{\phi\} \quad (4)$$

ここに、

$$[N] = [N_1 \quad N_2 \quad N_3 \quad N_4] \quad (5)$$

$$\{\phi\}^T = [T_1 \quad T_2 \quad T_3 \quad T_4] \quad (6)$$

規定温度のみ境界で与えられた場合の 2 次元非定常熱伝導問題に対する要素の有限要素式は次式で表される。

$$[k] \{\phi\} + [c] \left\{ \frac{\partial \phi}{\partial t} \right\} = \{0\} \quad (7)$$

ここに,

$$[k] = \iint \lambda \left( \frac{\partial [N]^T}{\partial x} \frac{\partial [N]}{\partial x} + \frac{\partial [N]^T}{\partial y} \frac{\partial [N]}{\partial y} \right) dx dy \quad (8)$$

$$[c] = \iint \rho c [N]^T [N] dx dy \quad (9)$$

ただし,  $\rho$ は密度,  $c$ は比熱である。

ここで, (8)式, (9)式を計算するためには, 式中に含まれる形状関数  $N_i$  の  $x, y$  に関する微分形  $\frac{\partial N_i}{\partial x}$ ,  $\frac{\partial N_i}{\partial y}$  を計算する必要がある。局所座標系  $\xi, \eta$  とこれに対応する全体座標系  $x, y$  に関しては次の偏微分の公式がある。

$$\begin{aligned} \frac{\partial N_i}{\partial \xi} &= \frac{\partial N_i}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial \xi} + \frac{\partial N_i}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial \xi} \\ \frac{\partial N_i}{\partial \eta} &= \frac{\partial N_i}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial \eta} + \frac{\partial N_i}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial \eta} \end{aligned} \quad (10)$$

この式をマトリックス表示するとつぎのようになる。

$$\begin{Bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial \xi} \\ \frac{\partial N_i}{\partial \eta} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial \xi} & \frac{\partial y}{\partial \xi} \\ \frac{\partial x}{\partial \eta} & \frac{\partial y}{\partial \eta} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial x} \\ \frac{\partial N_i}{\partial y} \end{Bmatrix} = [J] \begin{Bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial x} \\ \frac{\partial N_i}{\partial y} \end{Bmatrix} \quad (11)$$

上式の最左辺は関数  $N_i$  が(2)式に示されるように局所座標系で表されているので, この微分形は容易に求められる。また,  $x, y$  は曲線座標を定める(1)式で表されるので, マトリックス  $[J]$  は局所座標によって陽に表される。マトリックス  $[J]$  はヤコビアンマトリックス (Jacobian matrix) として知られている。

全体座標による微分形は, (11)式を解いて得られ,  $[J]$  の逆マトリックスを用いて次のように表される。

$$\begin{Bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial x} \\ \frac{\partial N_i}{\partial y} \end{Bmatrix} = [J]^{-1} \begin{Bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial \xi} \\ \frac{\partial N_i}{\partial \eta} \end{Bmatrix} \quad (12)$$

要素の形状を定める(1)式を用いると, (11)式の  $[J]$  は次式で表される。

$$[J]_{2 \times 2} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^4 \frac{\partial N_i}{\partial \xi} x_i & \sum_{i=1}^4 \frac{\partial N_i}{\partial \xi} y_i \\ \sum_{i=1}^4 \frac{\partial N_i}{\partial \eta} x_i & \sum_{i=1}^4 \frac{\partial N_i}{\partial \eta} y_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial [N]}{\partial \xi} \\ \frac{\partial [N]}{\partial \eta} \end{bmatrix} [\{x\} \quad \{y\}] \quad (13)$$

ここに、 $\{x\}$ 、 $\{y\}$ は節点座標値ベクトルであり、次式で表される既知量である。

$$\begin{aligned} \{x\}^T &= [x_1 \quad x_2 \quad x_3 \quad x_4] \\ \{y\}^T &= [y_1 \quad y_2 \quad y_3 \quad y_4] \end{aligned} \quad (14)$$

また、(13)式中の形状関数  $N_i$  の局所座標  $\xi, \eta$  に関する偏微分形の具体的な形を示せば、次のようになる。

$$\frac{\partial N_i}{\partial \xi} = \frac{1}{4} \xi_i (1 + \eta_i \eta) \quad (15)$$

$$\frac{\partial N_i}{\partial \eta} = \frac{1}{4} \eta_i (1 + \xi_i \xi) \quad (16)$$

したがって、 $[J]$ は $\xi, \eta$ の関数として陽に表されたことになる。また、その逆マトリックス  $[J]^{-1}$

も $\xi, \eta$ の関数として表され、 $\frac{\partial N_i}{\partial x}$ 、 $\frac{\partial N_i}{\partial y}$ は次のように $\xi, \eta$ によって表現できることになる。

$$\frac{\partial N_i}{\partial x} = [N_x(\xi, \eta)], \quad \frac{\partial N_i}{\partial y} = [N_y(\xi, \eta)] \quad (17)$$

よって、(8)式、(9)式を計算する場合には、次式を用いればよい。

$$[k] = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \lambda \left( [N_x]^T [N_x] + [N_y]^T [N_y] \right) \det[J] d\xi d\eta \quad (18)$$

$$[c] = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \rho c [N]^T [N] \det[J] d\xi d\eta \quad (19)$$

差分式を用いて(7)式を時間に関して離散化すると次式となる。

$$\left( [k] + \frac{1}{\Delta t} [c] \right) \{\phi(t + \Delta t)\} = \left( \frac{1}{\Delta t} [c] \right) \{\phi(t)\} \quad (20)$$

(20)式の右辺の $\{\phi(t)\}$ は既知であるとすれば、(20)式を用いることにより逐次解くことができる。

### 1.3 熱応力解析の理論

温度変化により生じる物体内の熱膨張は、拘束を受ける物体内に応力を発生させる。これは熱応力と呼ばれ、本解析では、分布荷重や物体力を等価節点荷重に変換して扱うのと同様の手法を用いて、熱膨張による熱ひずみを等価節点荷重に変換して扱う。このとき、熱ひずみによる等価節点荷重 $\{p_0\}$ は次式のように求められる。



$$\{p_0\} = \int_V [B]^T [D] \{\varepsilon_0\} dV \quad (21)$$

ここに、 $\{\varepsilon_0\}$ は熱ひずみ、 $[B]$ はひずみ-変位マトリックス、 $[D]$ は応力-ひずみマトリックスであり、平面応力問題の場合には(22)式を、平面ひずみ問題の場合には(23)式を用いる。

$$[D] = \frac{E}{1-\nu^2} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & (1-\nu)/2 \end{bmatrix} \quad (22)$$

$$[D] = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1 & \nu/(1-\nu) & 0 \\ \nu/(1-\nu) & 1 & 0 \\ 0 & 0 & (1-2\nu)/(2(1-\nu)) \end{bmatrix} \quad (23)$$

ここに、 $E$ はヤング係数、 $\nu$ はポアソン比である。

熱膨張係数はどの方向にも等しい等方性材料と仮定し、熱ひずみ $\{\varepsilon_0\}$ を平面応力問題および平面ひずみ問題ではそれぞれ次式によって計算するものとする。

$$\begin{array}{cc} \text{平面応力問題} & \text{平面ひずみ問題} \\ \{\varepsilon_0\} = \alpha \cdot \Delta T \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{Bmatrix}, & \{\varepsilon_0\} = (1+\nu)\alpha \cdot \Delta T \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{Bmatrix} \end{array} \quad (24)$$

ここに、 $\alpha$ は材料の熱膨張係数であり、 $\Delta T$ は温度増分である。

#### 1.4 解析対象

本解析では、以下に示す2つの外装仕上材を解析対象とし、非定常熱伝導解析および熱応力解析を実施することで、劣化環境負荷によってモルタル界面に生じる剥離応力を解析する。

##### 解析対象1

数値検証に用いた解析対象は、実験に用いたタイル張り壁面の耐久性能試験のモデルであり、以下にその概要を示す。

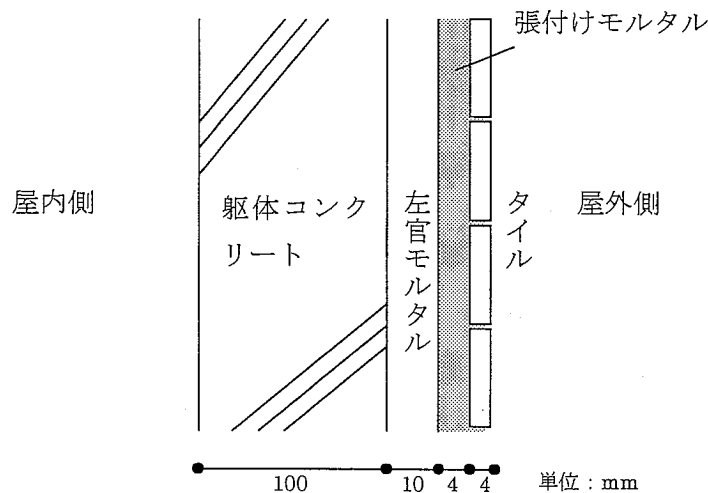


図 1.3 解析モデル 1

解析対象は図 1.3 に示すような厚さ 100mm の躯体コンクリート部分にモザイクタイル張りを施したタイル張り壁面である。この実験では、左官モルタル部分の種類、厚さおよび給水調整方法がタイル張り壁面の耐久性に及ぼす影響を検討するために、大型の人工気象環境制御装置内に試験体を配置し、屋内側と屋外側の環境条件を変化させた実験を行っており、実験によって計測された試験体各部のひずみおよび温度を解析値と比較する。

## 解析対象 2

数値検証に用いた解析モデルは、実験に用いたタイル張り壁面の耐久性能試験のモデルであり、以下にその概要を示す。

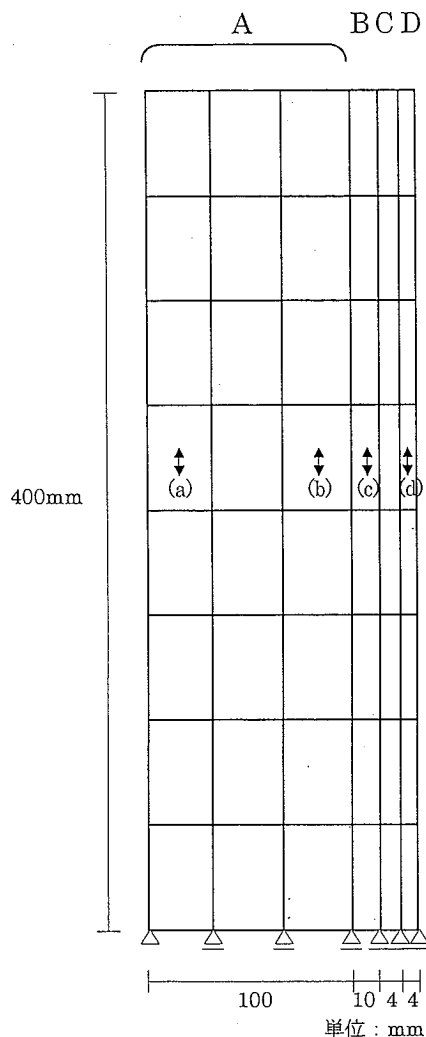
試験体寸法(mm)	コンクリート基盤: 300×300×100 モルタル仕上げ: 300×260×10
コンクリート基盤	調合は表-2に示すとおり。脱型後は20°C水中で28日間養生し、左官モルタル施工前7日間気中で養生。
モルタル施工下地の処理	せき板(塗装合板)を脱型したコンクリート面に水湿しを施す。
左官モルタル	表-3に示すポリマーセメントモルタルを一層塗りで金ごて仕上げ。施工後は20°C, 65±5%Rhの気中で14日間養生。
形状	

図 1.4 解析モデル 2

## 1.5 解析結果

### 1.5.1 解析対象 1 に対する解析結果

1. 4 節に示した解析対象 1 のタイル張り壁面試験体を、図 1.5 に示すような節点数 63、要素数 48 の要素に分割することで数値解析のモデル化を行った。解析に用いた材料定数は図中に示す通りであり、実験値と解析値の比較は試験体中央部（図中に示す(a)~(d)）の 4 箇所の矢印の方向のひずみの値を用いて行うものとする。解析は平面ひずみ問題とし、解析における境界条件は、試験体底面を単純支持条件とした。



材料 A 躯体コンクリート

ヤング係数  $E=21.6 \times 10^6 \text{ kN/m}^2$  , ポアソン比  $\nu=0.15$   
 線膨張係数  $\alpha=9.6 \times 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$  , 熱伝導率  $\lambda=1.51 \text{ W/(m}^\circ\text{C)}$   
 密度  $\rho=2300 \text{ kg/m}^3$  , 比熱  $c=837 \text{ J/(kg}^\circ\text{C)}$

材料 B 左官モルタル

ヤング係数  $E=12.5 \times 10^6 \text{ kN/m}^2$  , ポアソン比  $\nu=0.15$   
 線膨張係数  $\alpha=10.0 \times 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$  , 熱伝導率  $\lambda=0.39 \text{ W/(m}^\circ\text{C)}$   
 密度  $\rho=700 \text{ kg/m}^3$  , 比熱  $c=1000 \text{ J/(kg}^\circ\text{C)}$

材料 C 張付モルタル

ヤング係数  $E=13.5 \times 10^6 \text{ kN/m}^2$  , ポアソン比  $\nu=0.15$   
 線膨張係数  $\alpha=12.8 \times 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$  , 熱伝導率  $\lambda=0.39 \text{ W/(m}^\circ\text{C)}$   
 密度  $\rho=700 \text{ kg/m}^3$  , 比熱  $c=1000 \text{ J/(kg}^\circ\text{C)}$

材料 D タイル

ヤング係数  $E=24.5 \times 10^6 \text{ kN/m}^2$  , ポアソン比  $\nu=0.15$   
 線膨張係数  $\alpha=4.5 \times 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$  , 熱伝導率  $\lambda=2.60 \text{ W/(m}^\circ\text{C)}$   
 密度  $\rho=1000 \text{ kg/m}^3$  , 比熱  $c=1500 \text{ J/(kg}^\circ\text{C)}$

図 1.5 解析モデル 1

また、解析では時間増分間隔は  $\Delta t=1800\text{sec}$  とし、実験によって試験体の屋外タイル面で測定されたタイルの表面温度を既知量として与え、温冷繰返し試験に対する数値解析を行った。

解析によって得られた試験体の温度変化を図 1.6 に示す。また、コンクリート屋内側での解析値と実験値の比較を図 1.7 に示す。

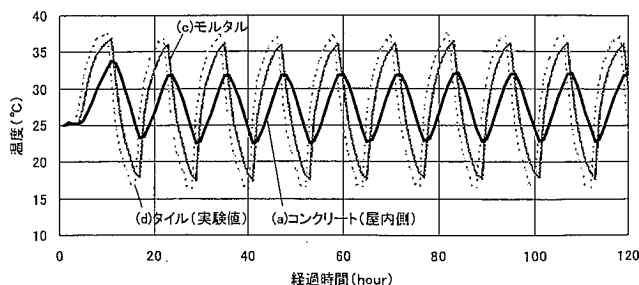


図 1.6 試験体の温度 (解析値)

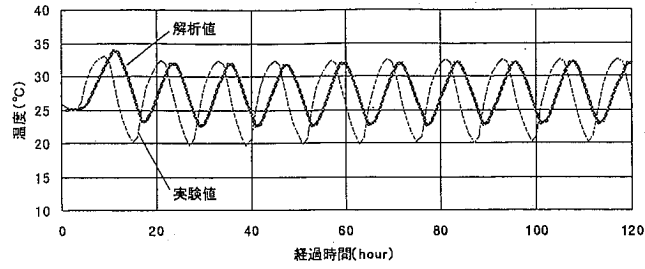


図 1.7 解析値と実験値の温度の比較（コンクリート屋内側）

モルタル部分（図 1.5 に示す(c)の位置）での解析値と実験値のひずみの値を図 1.8 に示す。同様にコンクリート屋内側部分（図 1.5 に示す(a)の位置）でのひずみの値を図 1.9 に示す。

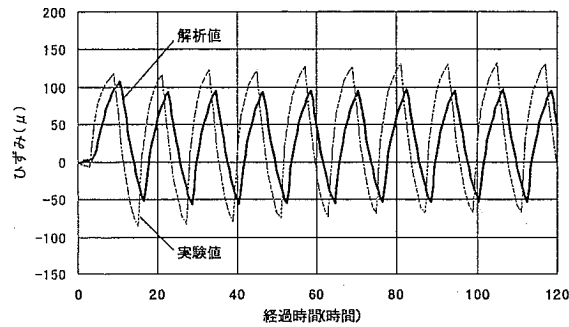


図 1.8 モルタル部分でのひずみの比較

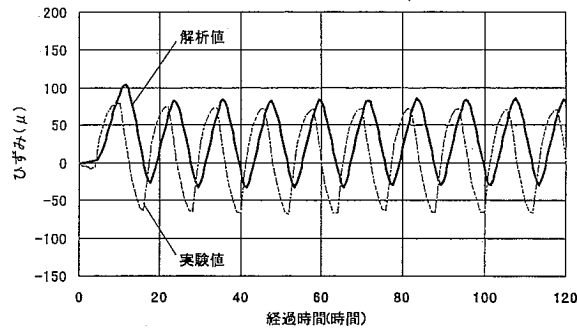


図 1.9 コンクリート屋内側でのひずみの比較

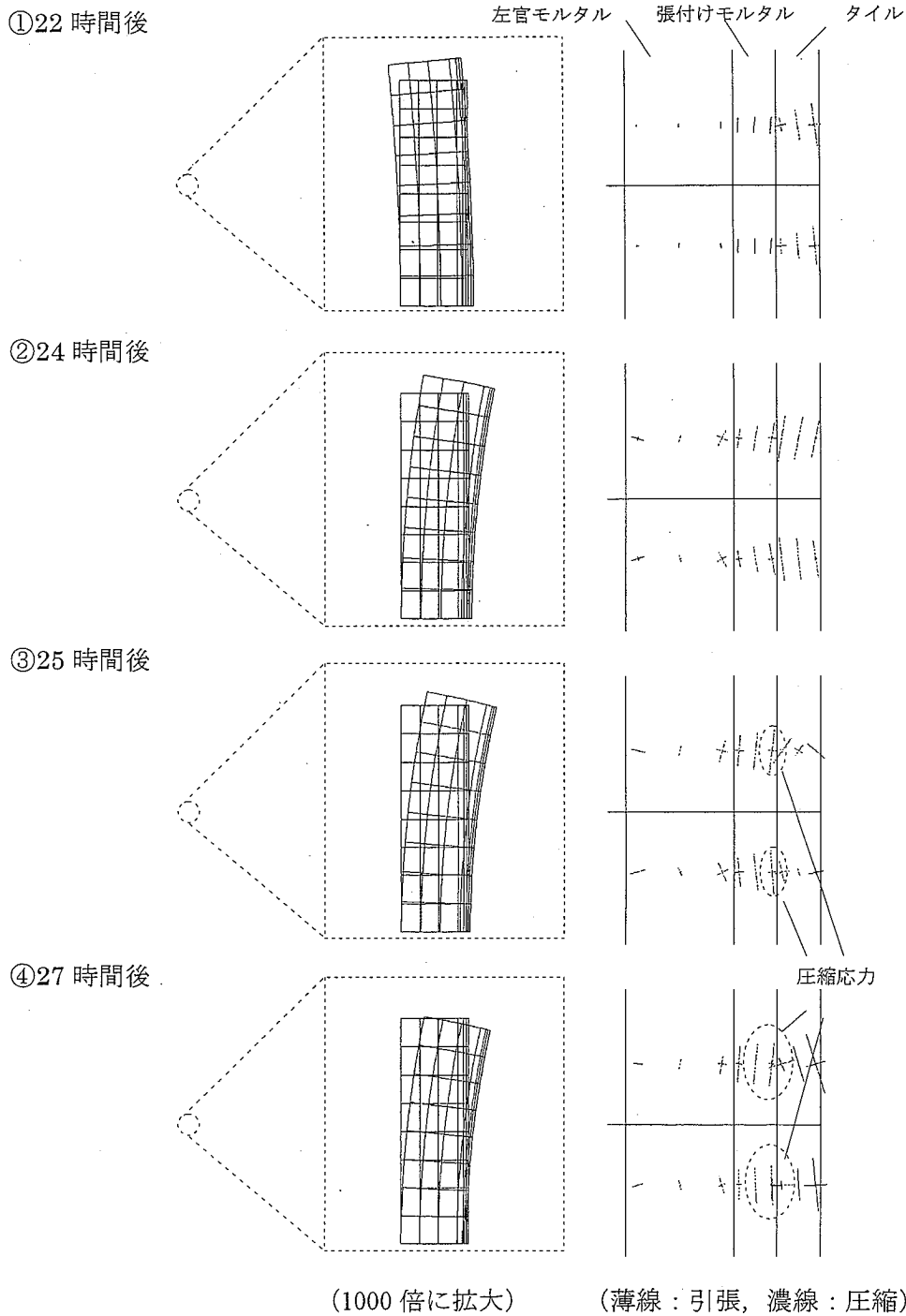


図 1.10 変形図，主応力図

解析によって求められた試験体の代表的な 4 つの変形状態を図 1.10 (左側) に示す (変形は 1000 倍に拡大して表示している)。また，この変形状態に対応する時点での各部に生じる主応力の値を同図 (右側) に示す (図は試験体中央部分の拡大図である)。図より，タイルとモルタルの間に生じる主応力成分の大きさと方向が時間とともに変化する様子が確認できるが，このとき最大の主応力は，タイルと張付けモルタルとの間に生じることが確認された。

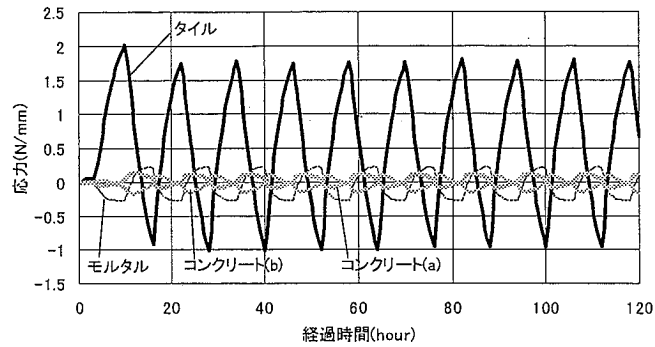


図 1.11 試験体の応力（解析値）

図 1.11 は、試験体中央部の位置(a)～(d)での鉛直方向（図 1.5 中に示す矢印方向）における応力の値を示す（プラスは引張り応力、マイナスは圧縮応力を表す）。図より、タイル部分に生じる応力が最も大きいことがわかる。また、タイル部分に生じる応力が増加するときには、モルタル部分に生じる応力は逆方向に増加しており、タイルとモルタルとの間には、大きな剥離応力が生じていることがわかる。

#### 1.5.2 解析対象 2 に対する解析結果

1. 4 節に示した解析対象 2 のタイル張り壁面試験体を、図 1.12 に示すように断面方向に要素数 330 の有限要素に分割して、実験と同一の屋外環境に対する熱伝導解析を行った。このとき外部から試験体への熱の流入は、屋外環境においてモルタル表面で計測された実験値を用いることとした。このとき簡単のため、解析では屋内側のコンクリート面から屋内環境側に対する熱伝達、熱放射の影響は簡単のため解析では考慮しないものとする。モルタルおよびコンクリートの材料定数は既往の実験結果を参考に、表 1.2 に示すような値を用いて解析を行った。

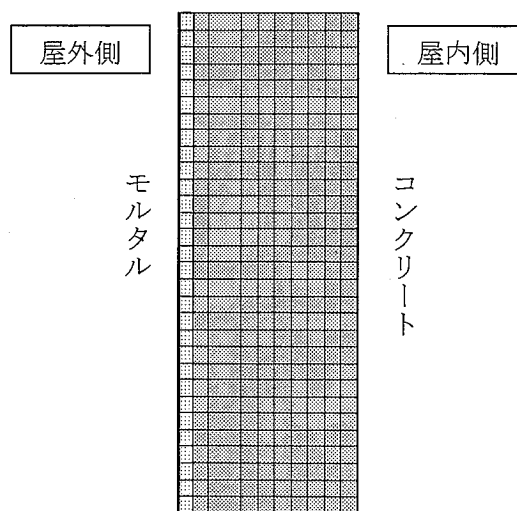


図 1.12 解析モデル 2

表 1.2 材料定数

	モルタル	コンクリート
熱伝導率 $\lambda$ W/(m°C)	1.28	1.51
密度 $\rho$ kg/m <sup>3</sup>	2000	2300
比熱 $c$ J/(kg°C)	837	837

また、解析に用いたモルタル及びコンクリートの材料定数は表 1.3 に示す通りである。

表 1.3 材料定数

	モルタル	コンクリート
ヤング係数 $E$ kN/m <sup>2</sup>	$25.0 \times 10^6$	$43.2 \times 10^6$
ポアソン比 $\nu$	0.15	0.15
線膨張係数 $\alpha$ 1/°C	$9.5 \times 10^{-6}$	$9.6 \times 10^{-6}$

図 1.13 に試験体の外気環境を変化させたときの試験体開始より 5 サイクルまでの試験体温度の経時変化を示す。図中、実線・破線が実験値を示し、マーカーが解析値を示している。また、図中の丸数字は測定位置を表している。また、図 1.14 は照射・散水繰り返し中の試験体内部の温度分布である。図中、実線・破線が実験値を示し、マーカーが解析値である。

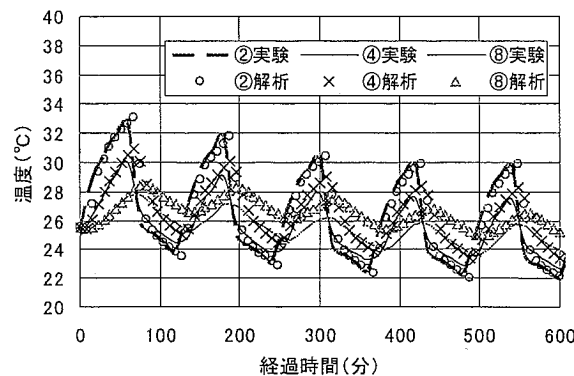


図 1.13 試験体温度の経時変化

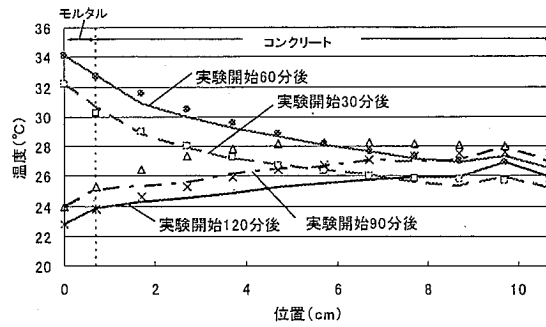
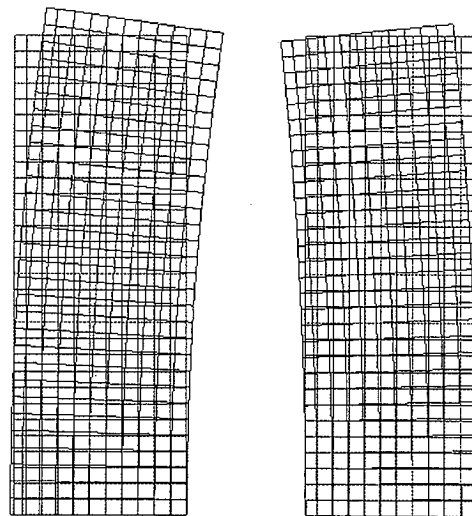


図 1.14 試験体温度の経時変化

図 1.13, 図 1.14 より, 屋内側のコンクリート表面付近における温度解析値は実験値と若干ことなるものの, 本解析は実験結果の温度変化と概ね良好に対応していることがわかる。

また, 図 1.15 に試験体の代表的な変形状態を示す。図より, 外気温上昇時には, モルタル側が膨張し, 図 1.15 の左側のように変形し, 外気温低下時には図 1.15 の右側のように変形していることがわかる。また, これらの変形時(外気温上昇時及び低下時)におけるモルタル中央部の主応力状態を図 1.16 に拡大して示す。図より, 外気温上昇時にはモルタルとコンクリートの境界に付近の主応力の向きを見ると, 外気温上昇時にはモルタルとコンクリートの境界に直交する方向に圧縮応力が作用するのに対し, 外気温低下時にはモルタルとコンクリートの境界に直交する方向に引張応力が作用することがわかる。すなわち, 本解析結果は左官モルタルとコンクリートとの層間に生じる応力は, 外気温が急激に低下するときに引張応力となる傾向にあり, より剥離が発生しやすい状況であることがわかる。



外気温上昇時

外気温低下時

図 1.15 変形図 (1000 倍に拡大表示)



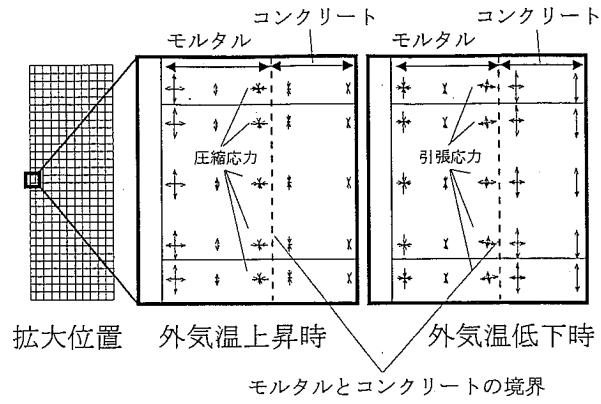


図 1.16 モルタルとコンクリート界面近傍の主応力図 (試験体中央部のみ表示)

## 2. モデル試験体による実験検討

### 2.1 近年の温冷・乾湿ムーブメントによる仕上げ材剥離事故



2005年6月に東京都内で陶磁器質タイル張り仕上げの斜め外壁が落下し、人的被害をおよぼしたことが社会的問題となった。斜線制限による制約あるいは意匠的な要求から斜め外壁が採用される場合がある。しかし、斜め外壁に対する公的な標準仕様はないのが現状である。さらには、斜め外壁における剥離・剥落に対する要因も明確にされていない。

今回の事故を受け、築30年を経過した公共建築においても、外壁などの落下事故が相次いで発生していることが明るみに出た。これらの多くは耐久性の低下がもたらした事故である。築30年程度の建物は、日本の建設ラッシュ

期に建設されていることからその数も多く、行政や建築業界からも早期に補修・改修をする必要があると考えられている。今後も剥離・剥落の問題は、人命の安全性はもちろん、美観や躯体保護性能、さらには長期的な構造性能を考えると深刻な問題であり、施工時の品質管理と事前の防止策がより一層要求される。

## 2.2 実験方法

### 2.2.1 温冷乾湿ムーブメントに関する実験

斜め外壁は一般の垂直外壁に比べて日射量が多くなり、大きな熱応力が作用することや、受ける雨の量が多くなり浸水の可能性が高くなると考えられている。また、仕上層の外部環境変化に伴う伸縮は、同一壁面内であっても、例えば開口部周辺の壁面と柱・梁近傍の壁面とでは、躯体から受ける拘束の大きさが異なるため、結果として生じる相対ムーブメントは異なる。そこで本実験では、以下の3つの項目について検討した。

- (a) 仕上げ材表面色の違いによる影響
- (b) 仕上げ材の横方向拘束の有無による影響
- (c) 水浸入の有無による影響実験概要

### 2.2.2 試験体

#### 1) 調合および使用材料

コンクリート躯体の調合を表2.1に示す。セメントは普通ポルトランドセメント、細骨材は広島県賀茂郡黒瀬産の砕砂を用い、粗骨材は寸法5~15mmの石英斑岩砕石を用いた。また、コンクリート用混和材料としてAE減水剤を用いた。

モルタルの調合を表2.2に示す。モルタルについても同様の砂、セメントを用いた。モルタルはポリマーセメントモルタルとし、水量は施工性をみながら適宜調整した。

表2.1 コンクリートの調合

粗骨材の最大寸法 mm	スランブ cm	水セメント比 %	空気量 %	細骨材率 %	単位量(kg/m <sup>3</sup> )				
					水	セメント	細骨材	粗骨材	AE減衰剤
15	15	45	-	-	174	385	712	993	1

表 2.2 モルタルの調合

	セメント	砂	水	ポリマー
セメント一kgあたり(kg)	25	80	17	0.24
重量(kg)	1.7	5.44	1.16	0.017

\*モルタルの硬さを見ながら水分を調節したため、水+ポリマー混合液を100gほど残す

## 2) 試験体形状

実験に供した試験体の形状および寸法を図 2.1 に示す。試験体は 100mm×100 mm×30 mm のコンクリート躯体の中央に 40mm×40mm×10mm のモルタルを塗って作製した(図 2.1(a))。この実験では、日射による壁面の温度上昇が剥離剥落におよぼす影響を検討するため、モルタルの表面をコンクリート用合成樹脂エマルジョンペイントで黒色、灰色、白色に塗った(図 2.1(b)~(d))。一般的に濃色ほど温度上昇が大きいと考えられるため、試験体表面の色を変えることで受ける日射量の違いを想定した。また、部材の位置による拘束の影響を検討するため、拘束を受ける部位について、モルタル部分を外側から小型のアンクルで拘束した。なお、締め付けはトルクトレンチにより一定締め付けとなるようにした(図 2.1(e))。また、水浸入がおよぼす影響を検討するため、水浸入のない状態を躯体コンクリートとモルタルの界面をシーリング剤でコーティングすることで想定した(図 2.1(f))。試験体の仕様一覧を表 2.3 に示す。表中ダミー試験体は色の違いによる温度分布を計測するために作製した。また、コンクリートとモルタルの界面への水浸入を確認するための試験体を 2 体作製した。

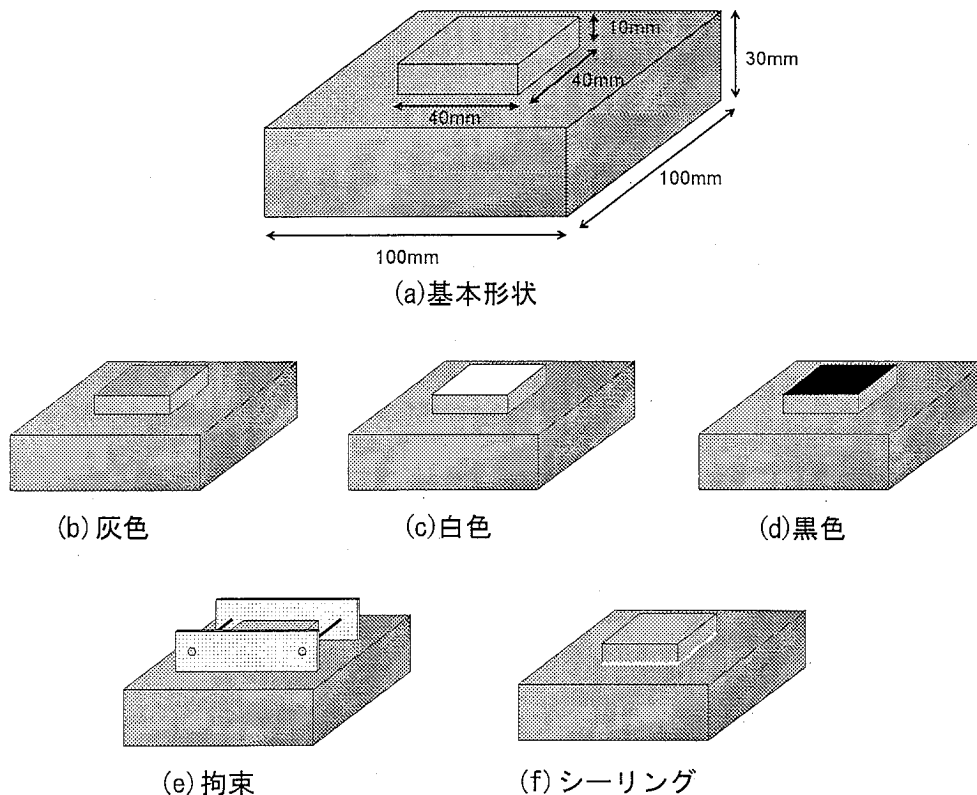


図 2.1 試験体形状

表 2.3 試験体仕様一覧

表面色	拘束	水進入の有無	ダミー試験体	水浸入確認	初期値	促進劣化に対する初期値	劣化後	合計
白	あり・なし	あり	1	2	9	9	3×2=6	47
灰	あり・なし	あり	1				3×2=6	
黒	あり・なし	あり・なし	1				3×4=12	

\* ダミー試験体は試験体の温度分布計測のため作製

\* 水浸入確認は実際水浸入をしているか確認するために作製

### 3) 試験体の作製方法

コンクリート試験体の調合は表 2.3 に示したとおりである。試験体は全部で 47 体作製した。コンクリートの打込み後、材齢 28 日目にモルタルを施工した。

コンクリートは打ち込み後、数時間後に試験体表面を木ゴテにより目荒らしした。翌日、試験体に散水を行い、その後シートをかぶせ実験棟内で養生した。

モルタルの施工は表 2.2 の調合にしたがって行い、施工性を見ながら適度な水量に調節した。コンクリート表面に吸水調整剤(3 倍希釈)を塗布し、一回目のモルタルを塗った後、約 5~10 分時間を置き、2 回目のモルタルを塗った。

#### 2.2.3 温冷・乾湿繰返しの方法

本実験では、夏期において直達日射で高温に熱された外壁に夕立による降雨が作用する際の急激なモルタル表面の温度低下ならびに湿潤・乾燥の繰返しがおよぼす影響を検討した。赤外線ランプによる照射は夕射を想定し、散水は夕立を想定した。これらの環境を再現するために用いた試験装置の形状および寸法を図 2.2 に示す。短期間に日射・散水の影響を知るために図 2.3 に示すような環境下で促進劣化試験を行った。赤外線ランプで 90 分間試験体を照射し、その後散水を約 5 分間行った。散水の 5 分間を含め計 90 分間試験体を実験室内に置き、試験体を冷却した。この 3 時間を 1 サイクルとし 104 サイクル繰返し、試験体を劣化させた。なお、散水は一日のうち 3 サイクルについて行った。

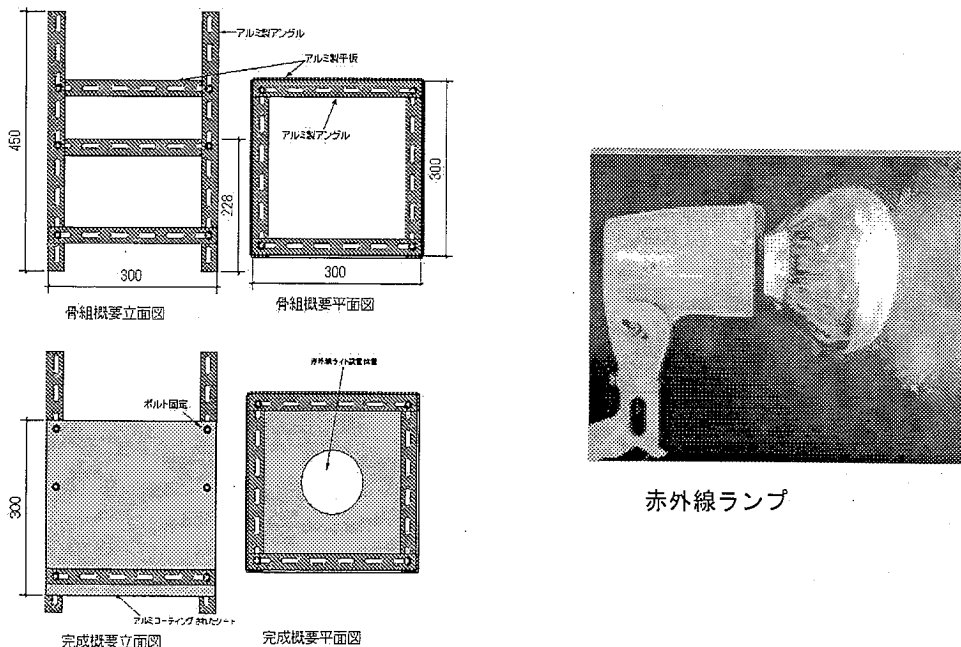


図 2.2 試験装置の形状および寸法

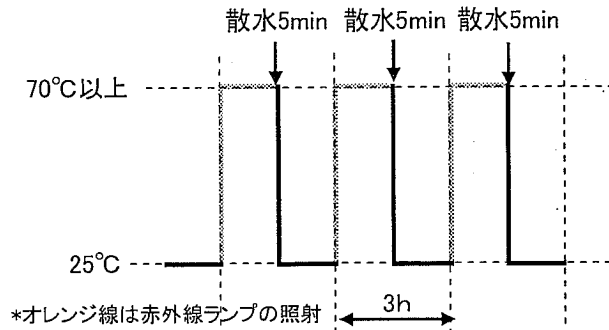


図 2.3 日射・散水繰り返し環境

## 2.2.4 測定項目

### 1) 直接引張試験

本実験では、コンクリート躯体と仕上材との接着一体性の評価方法は、図 2.4 に示すように、仕上材を躯体コンクリートの面外方向に直接引張って引張強度を求める方法、すなわち建研式引張試験と呼ばれる試験方法で測定した。測定までの過程を表 2.4 に示す。測定は初期性能を知るためモルタル材齢 21 日目および 38 日目に行い、劣化後の性能については乾湿繰り返し試験終了後(材齢 38 日目)に測定した。

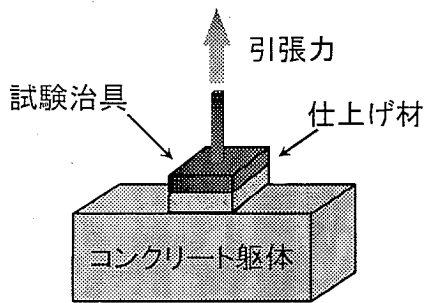


図 2.4 直接引張試験

表 2.4 試験までの工程

	初期値	劣化後
コンクリート材齢28日目	モルタル施工	
モルタル材齢 21 日目まで	20°C65%養生	初期値引張試験
22日～36日目	20°C65%養生	乾湿繰り返し
38日目	引張試験	

### 2) 表面温度測定

室内環境と室外環境を再現できる装置を用いて、図 2.5 に示すような環境を表面色を黒・灰・白と変えた各試験体に与え、試験体の温度分布を測定した。図 2.6 に試験体の写真を示す。温度測定は図 2.7 に示すように、モルタル表面、モルタル内部、モルタルとコンクリートの界面、コンクリート内部、コンクリート底面の 5 箇所に熱電対を埋め込み温度測定を行った。

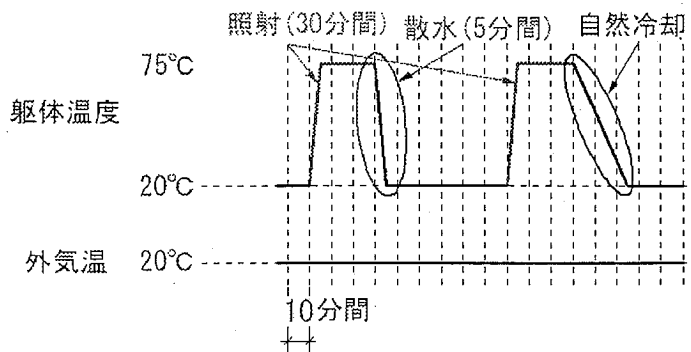


図 2.5 日射散水繰り返し環境

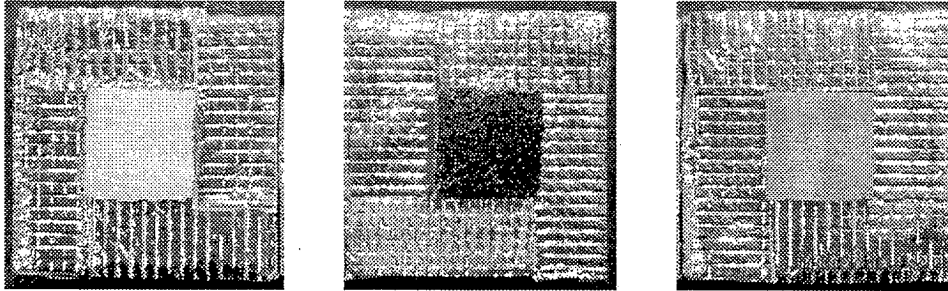


図 2.6 試験体写真

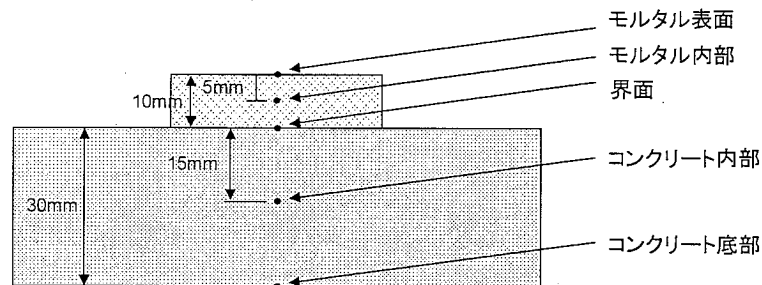


図 2.7 温度測定箇所

### 3) 水浸入確認試験

散水後の界面への水浸入の状況を確認するためシーリングした試験体とシーリング無しの試験体それぞれに 1 分間および 3 分間の散水し、直後に引張試験を行い、目視により界面への水浸入の有無を観察した。

## 2.3 実験結果および考察

### 2.3.1 直接引張試験結果

各仕様におけるモルタルとコンクリートとの接着一体性の評価を直接引張試験により行った。性能は初期値と劣化後の引張強度を比較することで、劣化外力に対する抵抗性を評価した。引張試験の結果は最大値および最小値を同時に示し、結果のばらつきを示した。

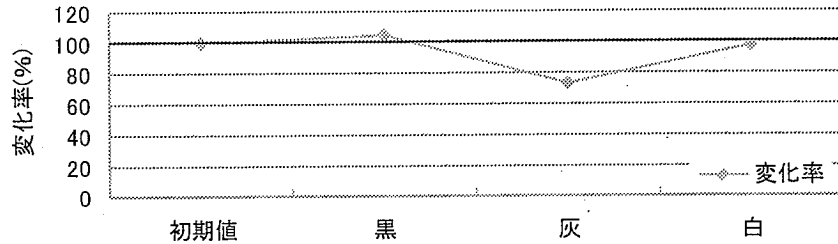
#### (1) 表面色がおよぼす影響

図 2.8 に壁面の表面色がおよぼす影響を示す。同図より劣化後の強度は黒色 > 白色 > 灰色という順に高くなっている。日射による壁面温度の上昇は、一般的に黒色 > 灰色 > 白色の順に高くなる。著しい温度上昇はモルタルとコンクリートの相対ムーブメントを増大させ、その結果、接着強度が低下すると考えられる。黒色は最も高い引張強度を示したが、試験結果のばらつきが大きい。一方、最も温度上昇を抑えられる白色については最もばらつきが小さい結果となった。今回の実験では灰色が最も強度が低く、ばらつきも大きい結果となった。

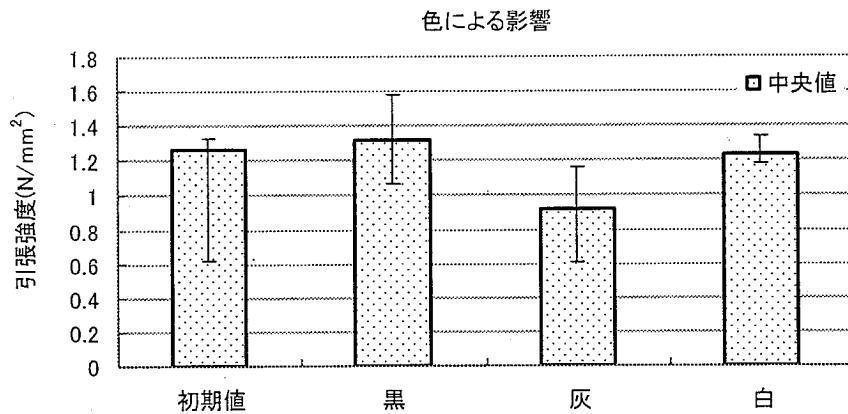
(a) 引張強度中央値および破断形式

	初期値	劣化後		
		黒	灰	白
中央値	1.26	1.32	0.93	1.23
破断形式	界面破断	界面破断	界面破断	界面破断

(N/mm<sup>2</sup>)



(b) 初期値からの変化率



(c) 中央値とばらつき(最大値および最小値)

図 5.5-1 表面色がおよぼす影響

(2) 拘束がおよぼす影響①【表面色：黒，灰，白】

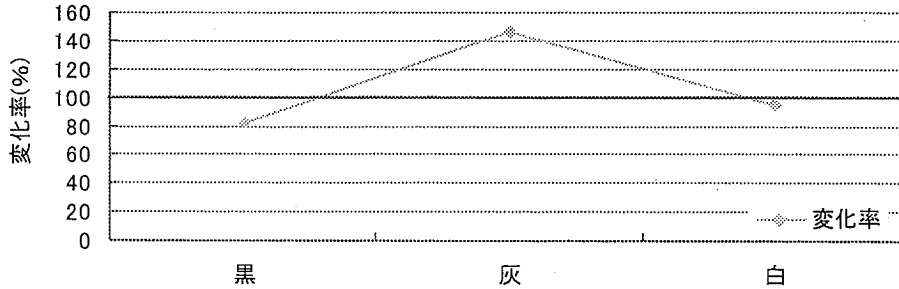
図 2.9 に表面色が黒色，灰色，白色におけるモルタルの拘束の有無が引張強度におよぼす影響を示す。黒色，白色については拘束により強度が低下し，灰色は高くなる結果となった。灰色で強度は高くなったが，全体を通して拘束することにより強度のばらつきが大きくなっていること，また，いずれの色においても最小値は  $1\text{N/mm}^2$  以下と小さな強度となっていることから，拘束の有無は接着一体性に大きな影響をおよぼすと言える。

特に黒色については，ばらつきが大きく強度も小さい。黒色は温度変化が最も大きく，モルタルに生じる温冷・乾湿ムーブメントは大きい。このムーブメントを拘束することにより，界面に相対ムーブメントが生じ接着強度を低下させていると考えられる。実際の壁面は壁や梁によって拘束されているケースが多く，ばらつき，強度の大きさから白色>灰色>黒色という順に接着一体性は高くなると考えられる。

(a) 引張強度中央値および破断形式

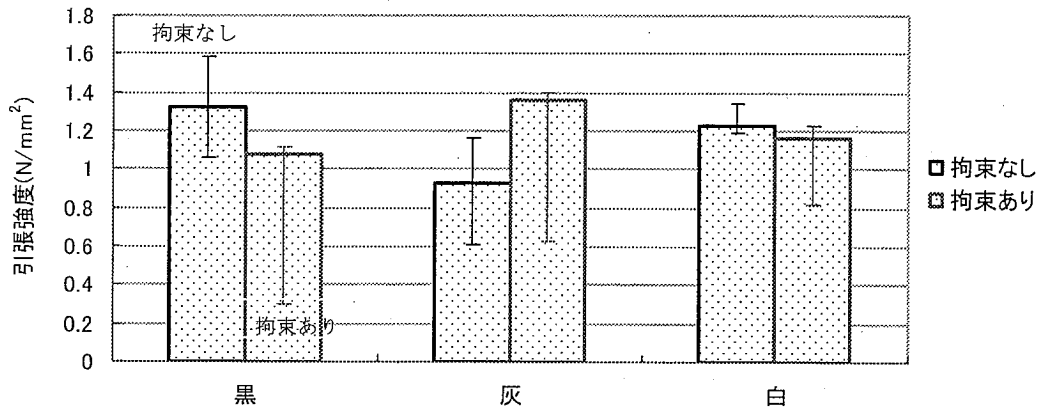
	黒	灰	白
拘束なし	1.32	0.93	1.23
	界面破断	界面破断	界面破断
拘束あり	1.08	1.36	1.16
	界面破断	界面破断	界面破断

(N/mm<sup>2</sup>)



(b) 初期値からの変化率

拘束の有無による影響【劣化後比較】



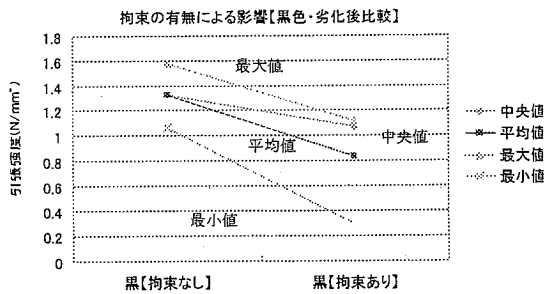
(c) 中央値とばらつき(最大値および最小値)

図 5.5-2 拘束および表面色がおよぼす影響

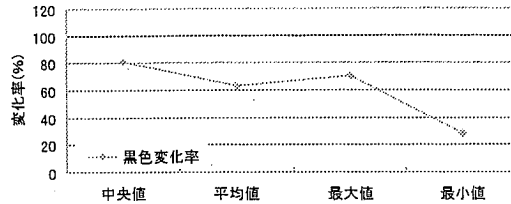
(3) 拘束がおよぼす影響②【表面色：黒，灰，白】

図 2.10 に表面色が黒色，灰色，白色の各試験体におけるモルタルの拘束がおよぼす影響を示す。表面が黒色の試験体では，中央値，平均値，最大値，最小値すべてにおいて拘束により大きく強度が低下した。特に最小値同士を比較した場合，強度は 30%まで低下していることがわかる。灰色では，すべての試験体で上昇傾向にある。これは，拘束なしにおける強度が低かったことが影響している。図 2.10(c)のばらつきを考慮すると劣化後に強度が低下する可能性は高いと考えられる。白色の試験体についてはすべて強度は低下している。しかし，黒色と比較するとその低下の割合は小さかった。以上より，拘束の有無や表面色は劣化による接着性の低下に影響を与えていることがわかった。

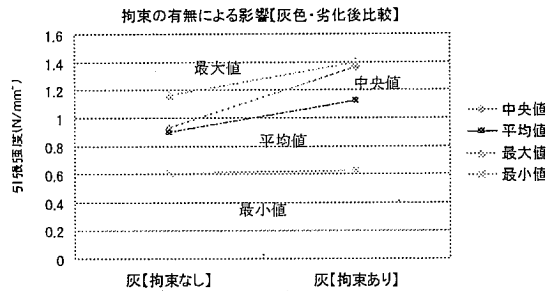




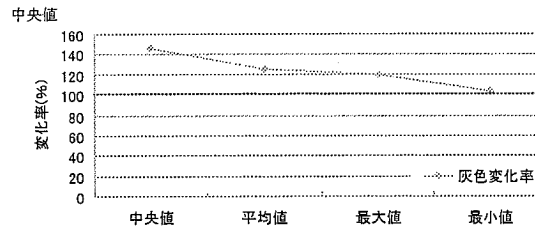
(a-1) 黒色



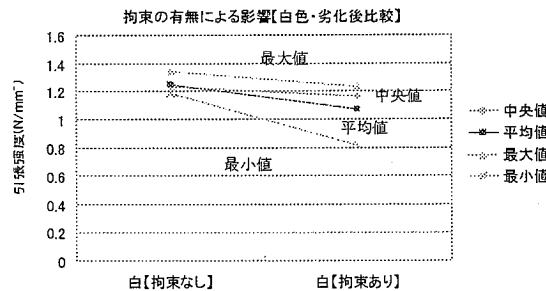
(a-2) 黒色変化率



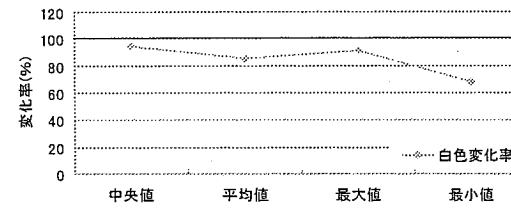
(b-1) 灰色



(b-2) 灰色変化率



(c-1) 白色



(c-2) 白色変化率

図 2.10 拘束がおよぼす影響

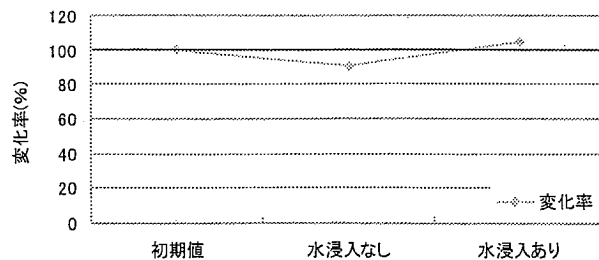
(4) 躯体コンクリートとモルタルの界面に水浸入がおよぼす影響

図 2.11 に躯体コンクリートとモルタルの界面への水浸入の有無がおよぼす影響を示す。同図より、最大値の比較では、水浸入があることにより若干の強度が低下しているものの、その他についてはほとんど大きな影響はなかった。

(a) 引張強度中央値および破断形式

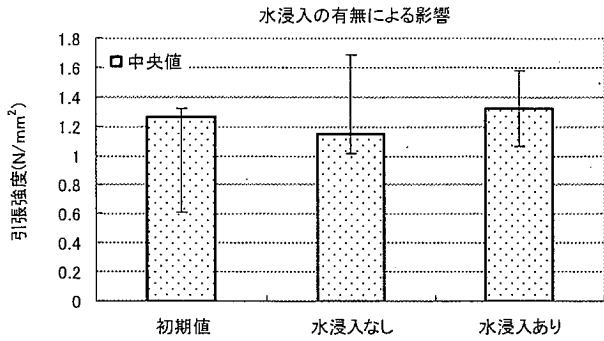
	初期値	劣化後	
		水浸入なし	水浸入あり
中央値	1.2625	1.15	1.321875
破断形式	界面破断	界面破断	界面破断

(N/mm<sup>2</sup>)

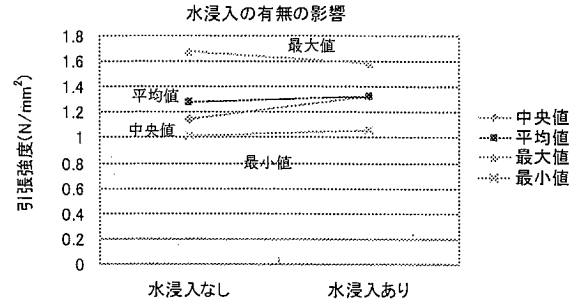


(b) 初期値からの変化率

図 2.11 水浸入がおよぼす影響



(c) 中央値とばらつき(最大値および最小値)



(d) 水浸入の影響

図 2.11 水浸入がおよぼす影響(続き)

(5) 躯体コンクリートとモルタルの界面への水浸入がおよぼす影響【拘束あり】

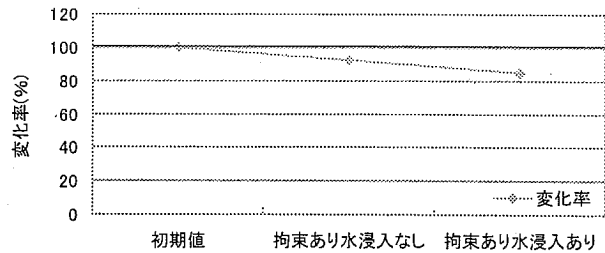
図 2.12 に躯体コンクリートとモルタルの界面への水浸入がおよぼす影響を示す。ここではモルタルが拘束を受ける条件で比較した。

「拘束あり水浸入なし」は中央値より上に大きくばらつき、「拘束あり水浸入あり」では中央値より下に大きくばらついていることから、水浸入の強度への影響が大きいことがわかる。前述、「拘束なし」で比較した際に大きな影響がみられなかったことを考慮すると、水浸入の有無は拘束条件下で大きく影響するといえる。これは水浸入によるモルタル膨張を拘束することにより、界面への相対ムーブメントが大きくなることが影響していると考えられる。

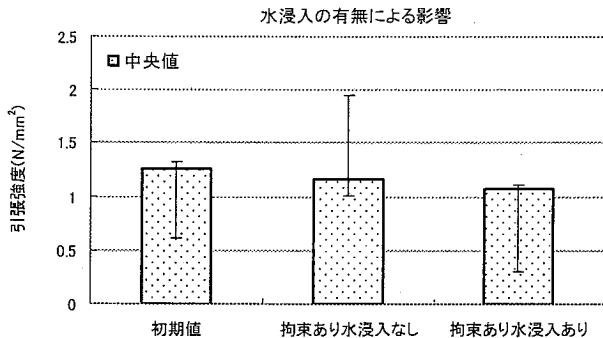
(a) 引張強度中央値および破断形式

	初期値	劣化後	
		水浸入なし	水浸入あり
中央値	1.2625	1.16875	1.075
破断形式	界面破断	界面破断	界面破断

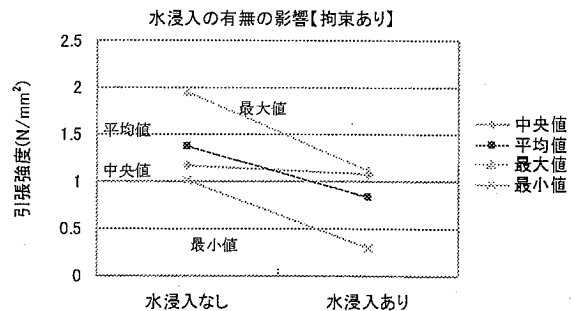
(N/mm<sup>2</sup>)



(b) 初期値からの変化率



(c) 中央値とばらつき(最大値および最小値)



(d) 水浸入の影響【拘束あり】

図 2.12 水浸入がおよぼす影響【拘束あり】

(6) 拘束がおよぼす影響③【水浸入なし】

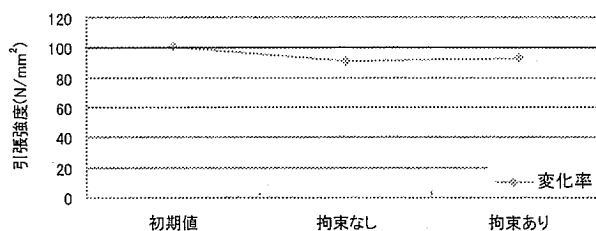
図 2.13 に躯体コンクリートとモルタルの界面への水浸入がない場合の拘束がおよぼす影響を示す。同図より、最大値で比較した時のみ強度が低下しているものの、その他で比較した場合には、「拘束あり」「拘束なし」による影響はほとんどでなかった。しかし、今回の結果から、「拘束なし」において強度が小さいほうにばらつきが出ていることも予想できるため、水浸入がない場合での拘束の影響を無視できない。今後さらに検討する必要がある。

これまで拘束により強度のばらつきが出ることを示してきたが、水浸入がない場合にはあまりばらつかない結果となった。今回の実験からは、拘束と水浸入が同時にあることが強度の低下およびばらつきに影響を与えており、それぞれ単独で比較した場合には大きな影響は出ない結果となった。

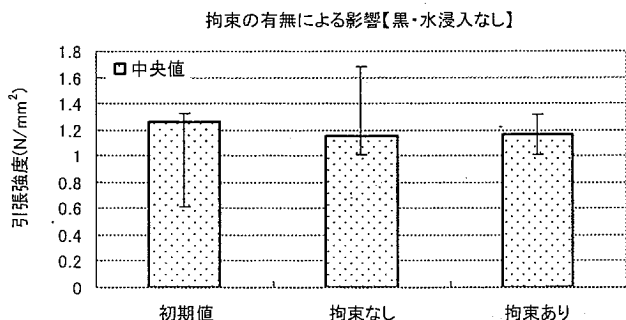
(a) 引張強度中央値および破断形式

	初期値	劣化後	
		拘束なし	拘束あり
中央値	1.2625	1.15	1.16875
破断形式	界面破断	界面破断	界面破断

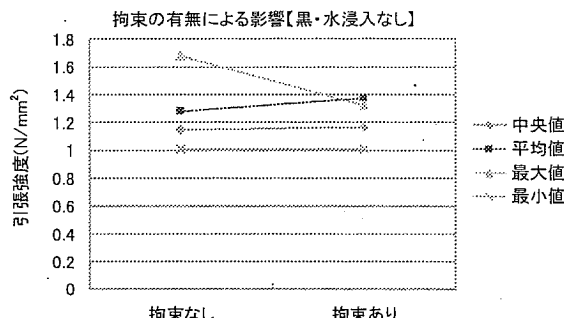
(N/mm<sup>2</sup>)



(b) 初期値からの変化率



(c) 中央値とばらつき(最大値および最小値)



(d) 拘束の影響【黒・水浸入なし】

図 2.13 拘束がおよぼす影響【水浸入なし】

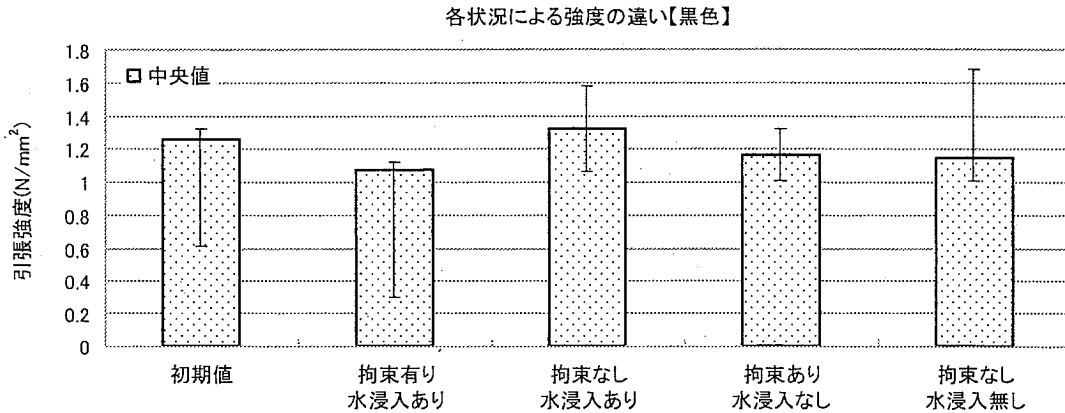
(7) 黒色における各条件下での引張強度の比較

図 2.14 に表面色が黒色の試験体における各条件下での引張強度を示す。同図より、拘束なし水浸入あり>拘束あり水浸入なし>拘束なし水浸入なし>拘束あり水浸入ありの順に強度が高い結果となった。今回の実験では、拘束と水浸入が同時に作用する場合に最も性能が低下することが明らかとなった。拘束がなく、水浸入のみの作用では大きな違いが現れなかった。拘束については、拘束がない場合の最大値が高い強度を示していることから拘束の影響も出ていると考えられる。実際の壁面においては、今回の実験で最も強度が低下した拘束あり水浸入ありのケースが多い。このことから、今後剥離剥落に対する技術データを蓄積する上で、これらを踏まえた試験方法を確立することが信頼性の高いデータ蓄積するためには必要不可欠である。

(a) 引張強度中央値および破断形式

	初期値	劣化後			
		拘束あり 水浸入あり	拘束なし 水浸入あり	拘束あり 水浸入なし	拘束なし 水浸入なし
中央値	1.2625	1.075	1.321875	1.16875	1.15
破断形式	界面破断	界面破断	界面破断	界面破断	モルタル破断

(N/mm<sup>2</sup>)



(b) 中央値とばらつき(最大値および最小値)

図 2.14 各条件下での引張強度の比較【黒色】

### 2.3.2 温度分布の測定結果

色の違いによる温度分布の測定結果を以下に示す。図中「ダミー」とは、試験体を固定するために用いたコンクリート版の表面温度を示す。

#### (1) 各色の温度分布

図 2.15(a)~(c)に各色の温度分布を示す。黒>灰>白という順に全体的に温度が高く、それぞれの計測位置における温度差も大きいことがわかる。なお、日射時に温度が上下しているのは、装置内の温度が 75℃以上になると照射ランプが停止するためである。

#### (2) 各色における表面温度の分布

図 2.16 に表面温度の分布を示す。同図より黒>灰>白という順に温度は高く、黒色で 95℃以上、灰色で 80℃、白色でも 60℃前後まで達している。

#### (3) 各色におけるモルタル内部の温度分布

図 2.17 にモルタル内部の温度分布を示す。灰色については熱電対が実験中に壊れたため計測できなかった。モルタル内部であっても黒色と白色とでは最大 30℃近くの温度差があった。

#### (4) 各色におけるコンクリートとモルタルの界面の温度分布

図 2.18 にコンクリートとモルタルの界面の温度分布を示す。黒色と灰色で 10℃の温度差、灰色と白色で 5℃程度の温度差があった。界面でのコンクリートとモルタルのムーブメントが剥離剥落に影響をおよぼすため、界面での色による温度差の違いを明らかにすることは色による影響を検討する上で貴重な基礎データとなる。

#### (5) 各色におけるコンクリート内部の温度分布

図 2.19 にコンクリート内部の温度分布を示す。コンクリート内部では表面の色に関わらず、すべての試験体で 40℃前後の温度分布となった。コンクリート内部の温度は試験体の躯体コンクリートの約 15mm 程度の位置に埋め込んだ熱電対が計測した温度である。今回の実験では、仕上モルタルを 10mm の厚さで塗っていることから、実際の建築物の外壁にモルタル仕上げを行っている場合、躯体コンクリートの温度は 40℃以上あがる可能性は低いことが推察される。

#### (6) 各色におけるコンクリート底面の温度分布

図 2.20 にコンクリート底部の温度分布を示す。黒色はコンクリート内部とほぼ同じ温度分布となった。灰色、白色ではややコンクリート内部と比較し低い温度を示したが、ほぼ違いはないといえる。

#### (7) 散水時の試験体温度の経時変化

図 2.21 に散水および自然冷却時の試験体温度の経時変化を示す。同図より、全ての色において、散水により急激に温度は低下していることがわかる。自然冷却では、モルタル表面温度は日射終了と同時に急激に低下するが、モルタル内部より深い位置においては緩やかに温度は低下している。コンクリートの内部は 5 分経過した時点ではほとんど温度の低下は見られなかった。

#### (8) モルタル内部とコンクリート内部の温度差

図 2.22 にモルタル内部とコンクリート内部の温度差を示す。モルタル内部とコンクリート内部の温度差が大きいほど相対ムーブメントは大きくなる。日射時に最も温度差が大きくなることから、温度上昇時に最も過酷な相対ムーブメントが生じていると考えられる。そして温度が一定になると、温度勾配はほとんどなくなり、相対ムーブメントは一定に保たれることがわかる。なお、散水後の日射では水分を含みさらに膨張することから温度差以上に界面には大きな相対ムーブメントが生じていると予想される。散水による温度低下時にもムーブメントは発生しているが、その大きさは日射によるムーブメントより小さい。しかし、膨張と収縮で動きが異なるため、単純にムーブメントの大きさだけで比較することは難しく、今後さらなる検討が必要である。

#### (9) 日射 30 分後の温度分布

図 2.23 に日射 30 分後、試験体の温度が最高点に達した時点での各位置で計測した温度を示す。図中、灰色のモルタル内部は計測できなかったため、黒色と灰色のモルタル内部の平均温度をプロットした。同図より、モルタル表面で最も色による温度差があった。温度計測点が照射ランプから遠くなるほど温度差は小さく、コンクリートではほとんど温度差がなかった。このことは、温度勾配は色により異なり、その結果コンクリートとモルタルの相対ムーブメントが異なることを意味する。温度勾配は大きいほど生じる相対ムーブメントは大きいため、今回の結果から濃色ほど相対ムーブメントは大きくなることがわかる。

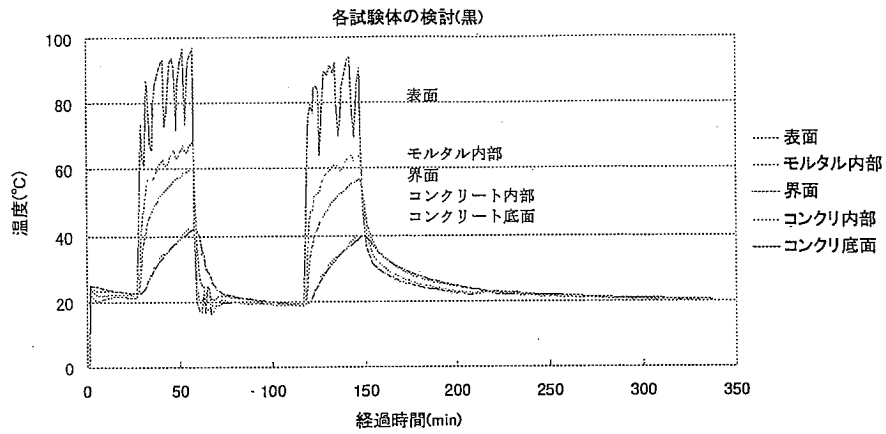
#### (10) 散水および自然冷却時の試験体温度分布

図 2.24 (a)に散水終了時の試験体温度分布を示す。また、図 2.24 (b)には自然冷却時の試験体温度分布を示す。それぞれの試験体の温度分布は日射終了 5 分後の温度分布を示す。図 2.24(a)より、散

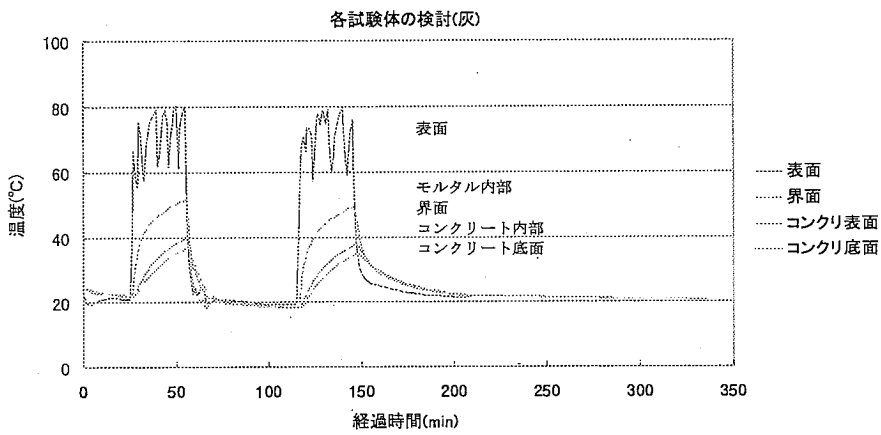
水終了時では界面より深い位置での温度がモルタルの表面や内部に比べて高い。これは、表面ほど散水による冷却効果を受けやすく、深い位置ほど熱伝導が遅いためである。一方図 2.24(b)より、自然冷却においては日射終了 5 分後では位置による温度差はほとんどないことがわかる。このことから散水により温度勾配は大きくなり、その結果モルタルとコンクリートの相対ムーブメントは大きくなることがわかる。急激な壁面の冷却は剥離応力につながることを推察される。また、温度上昇時と温度勾配は逆になっていることから変形パターンも異なることが推察される。

#### (1 1) 散水冷却と自然冷却の試験体温度分布の比較

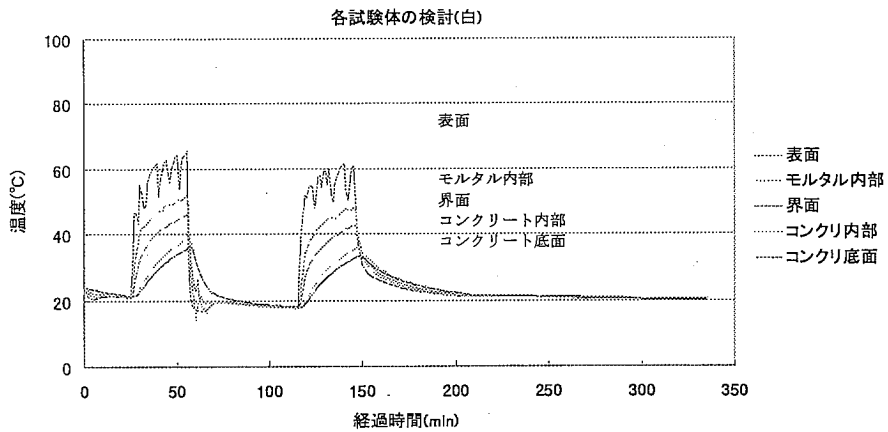
図 2.25 に散水冷却と自然冷却の試験体温度分布の比較を示す。それぞれ冷却開始 5 分後の温度分布を示す。同図より、界面より浅い位置においては散水による温度低下の影響を大きく受けていることがわかる。コンクリートについては冷却開始 5 分後の時点では日射による温度が躯体に蓄積されている状態だった。



(a) 黒色



(b) 灰色



(c) 白色

図 2.15 各色の温度分

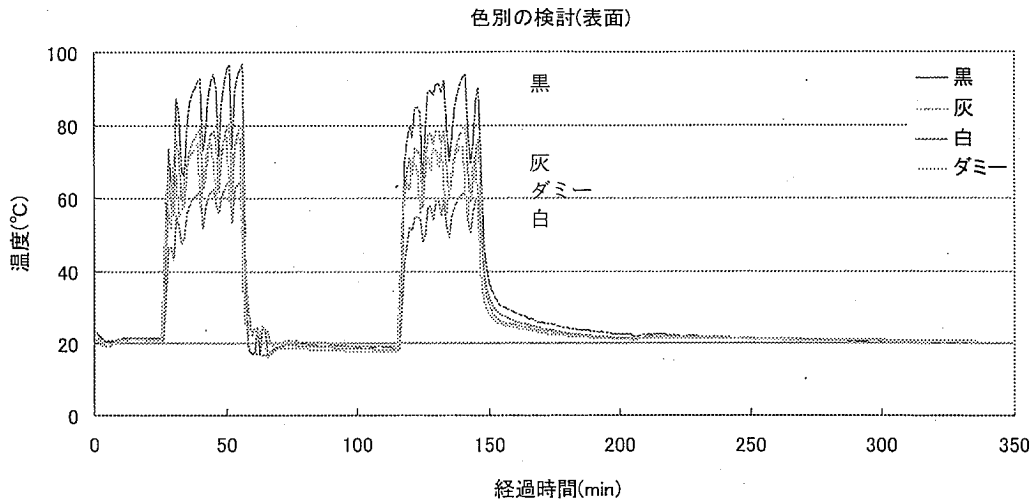


図 2.16 各色における表面温度の分布

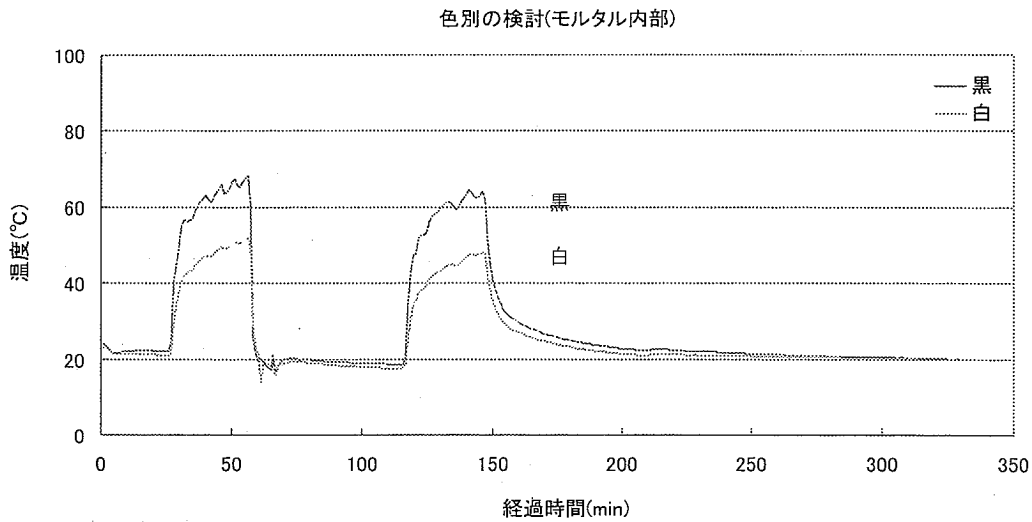


図 2.17 各色におけるモルタル内部の温度分布

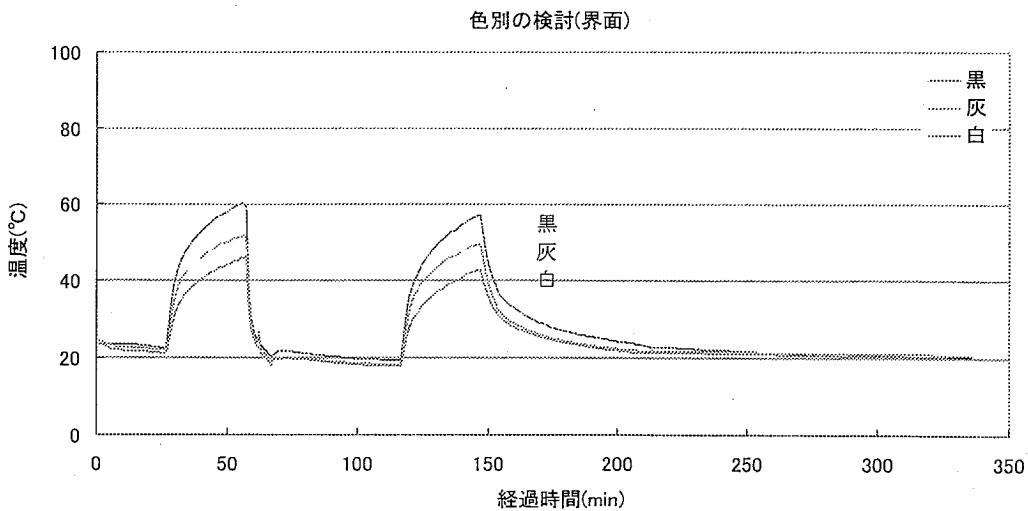


図 2.18 各色におけるコンクリートとモルタルの界面の温度分布



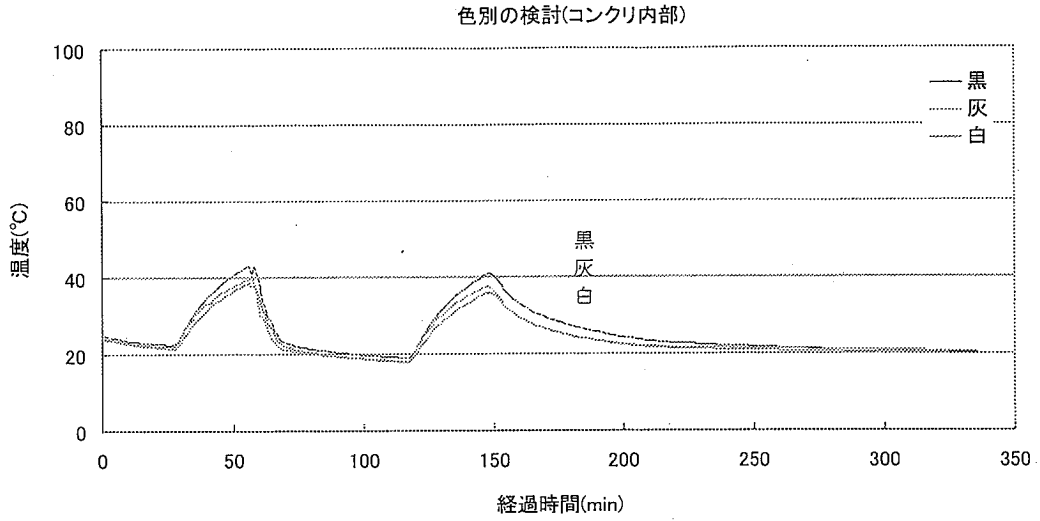


図 2.19 各色におけるコンクリート内部の温度分布

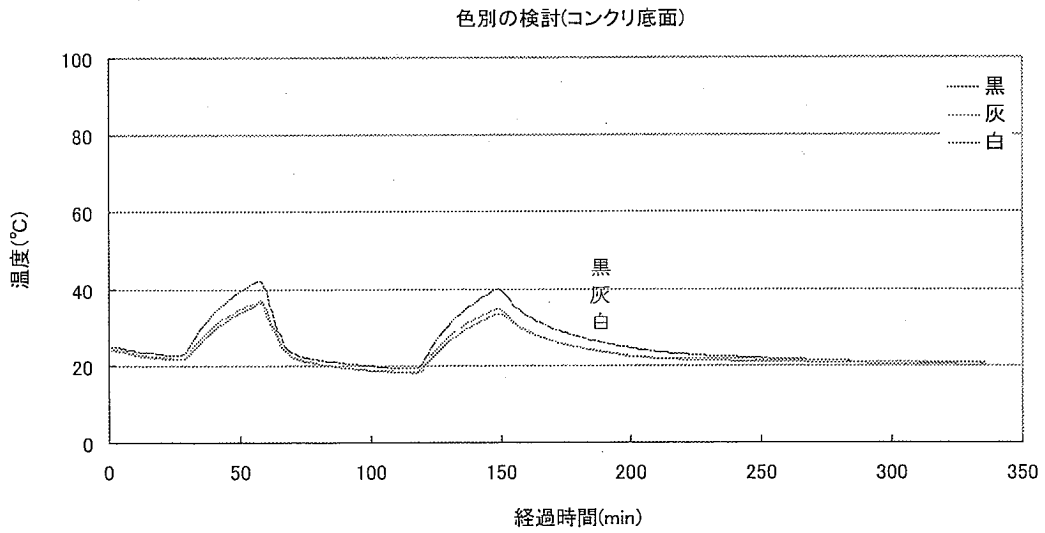
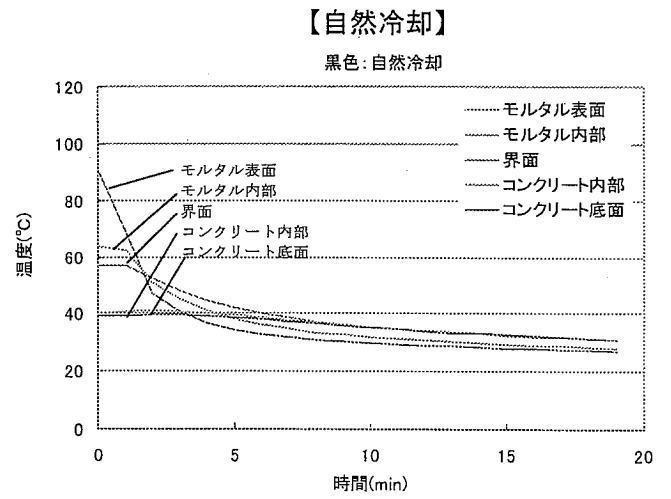
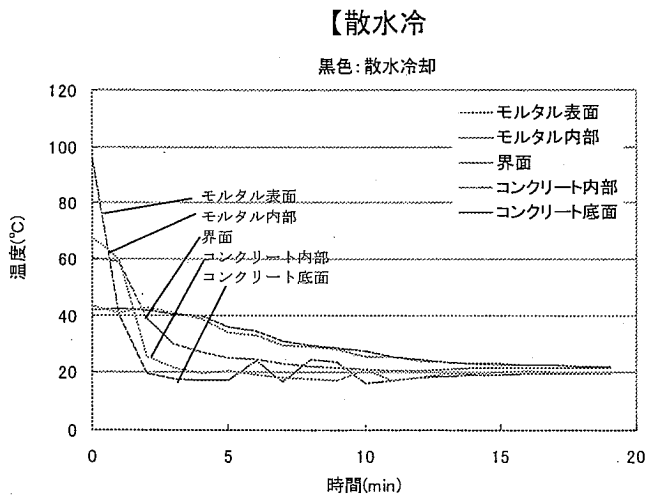
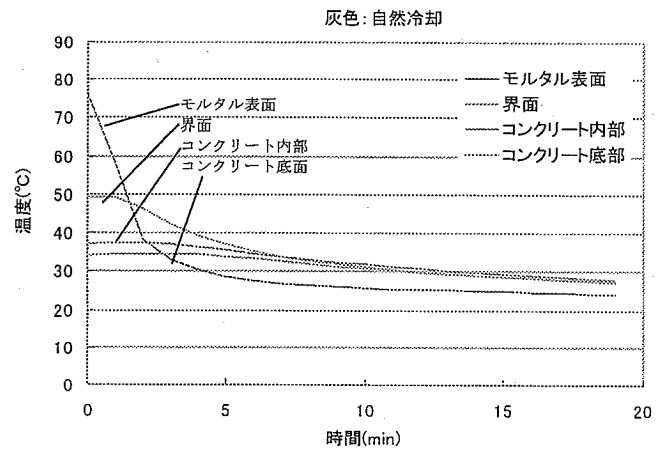
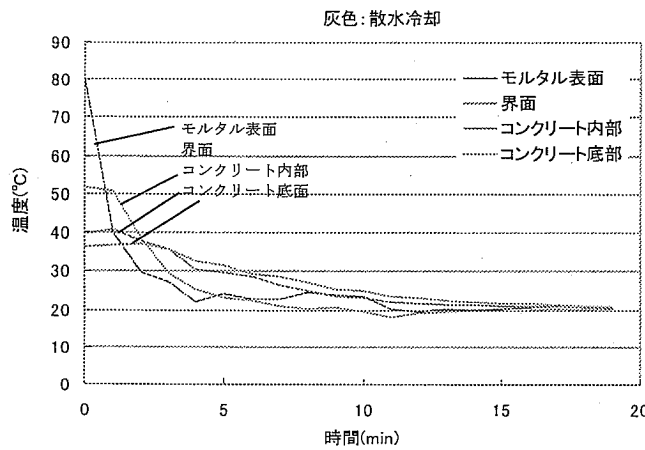


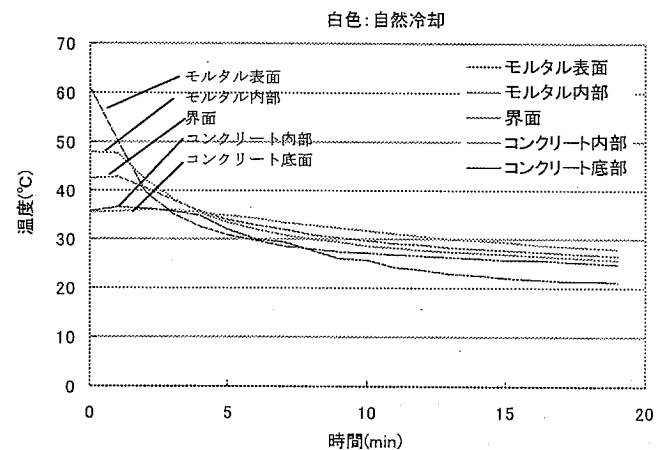
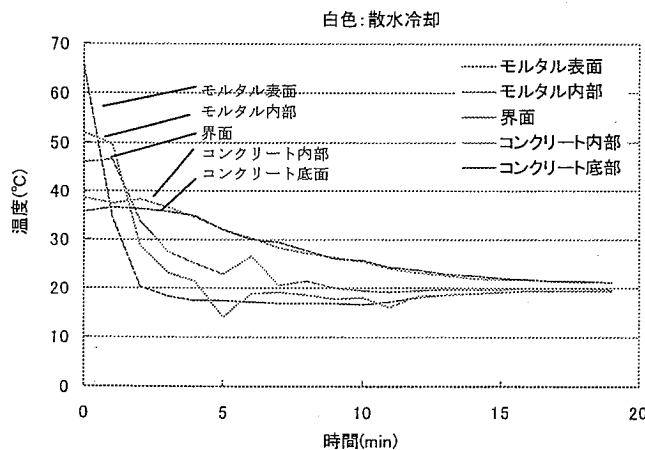
図 2.20 各色におけるコンクリート底面の温度分布



(a) 黒色



(b) 灰色



(c) 白色

図 2.21 散水および自然冷却時の試験体温度の経時変化

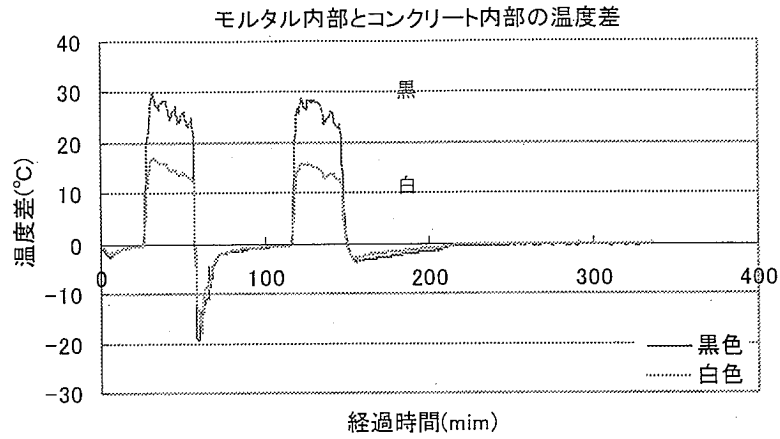


図 2.22 モルタル内部とコンクリート内部の温度差

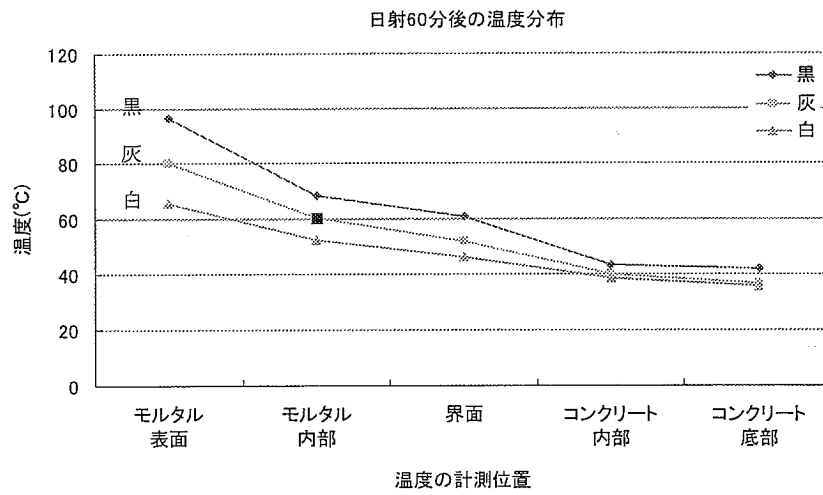
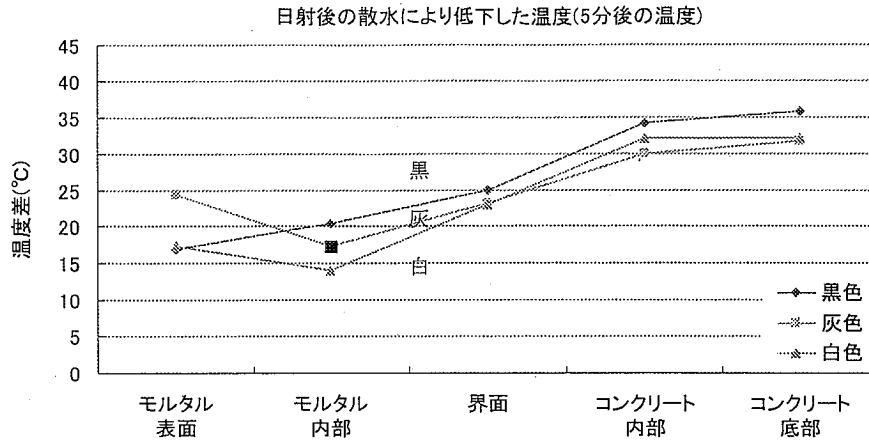
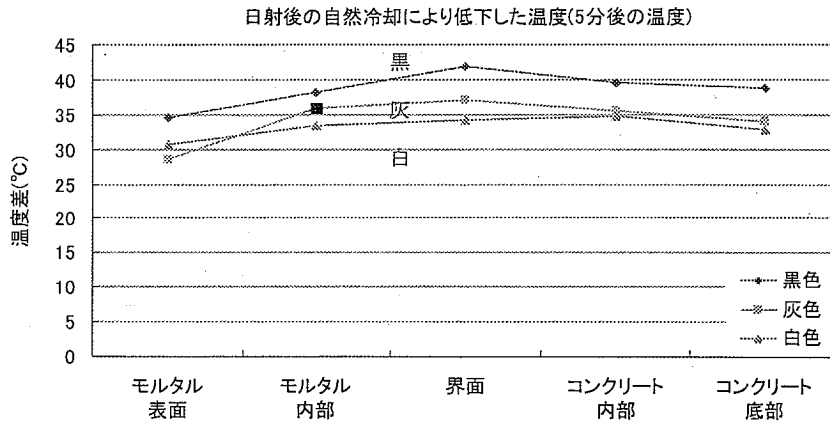


図 2.23 モルタル内部とコンクリート内部の温度分布

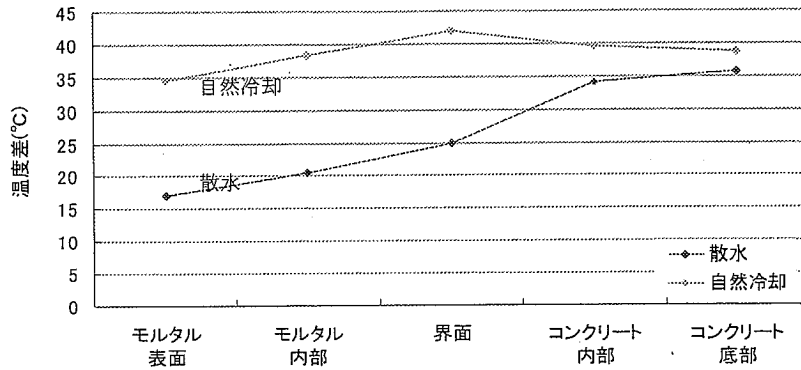


(a) 散水により低下した温度

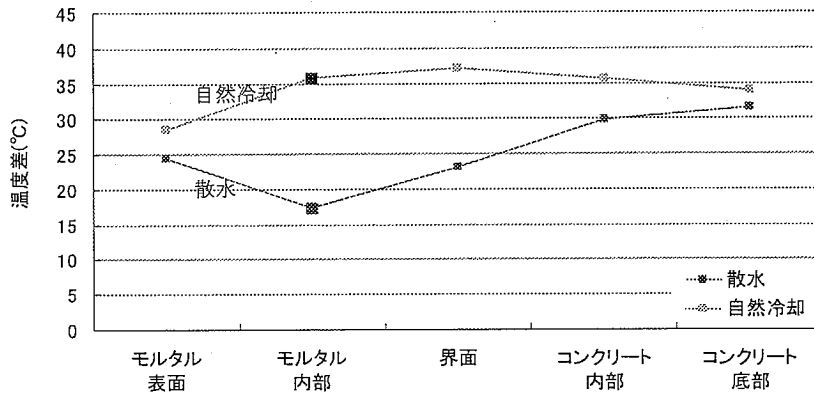


(b) 自然冷却により低下した温度

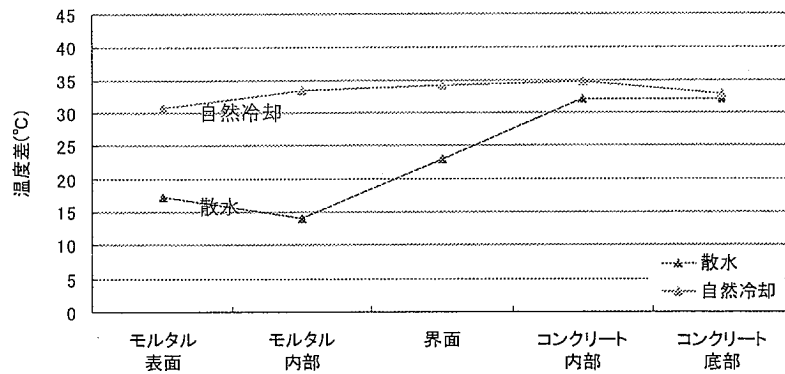
図 2.24 散水および自然冷却時の試験体温度分布



(a) 黒色



(b) 灰色



(c) 白色

図 2.25 散水冷却と自然冷却の試験体温度分布の比較

12) 水浸入の有無の確認実験結果

散水 1 分後の界面状況, 散水 3 分後の界面状況を図 2.26 に示す。同図より, 散水 1 分後の界面状況はモルタルとコンクリートの中にシーリングした試験体は水浸入がないことが確認できる。一方, シーリングを行わなかった試験体は外側から水が浸入していることがわかる。散水 3 分後を見ると, シーリングした試験体にもやや水が浸入しているものの, シーリングを行わなかった試験体とは大きな違いが明確となった。以上の結果から, 水浸入のない状況をシーリングによりある程度再現できることが確認された。

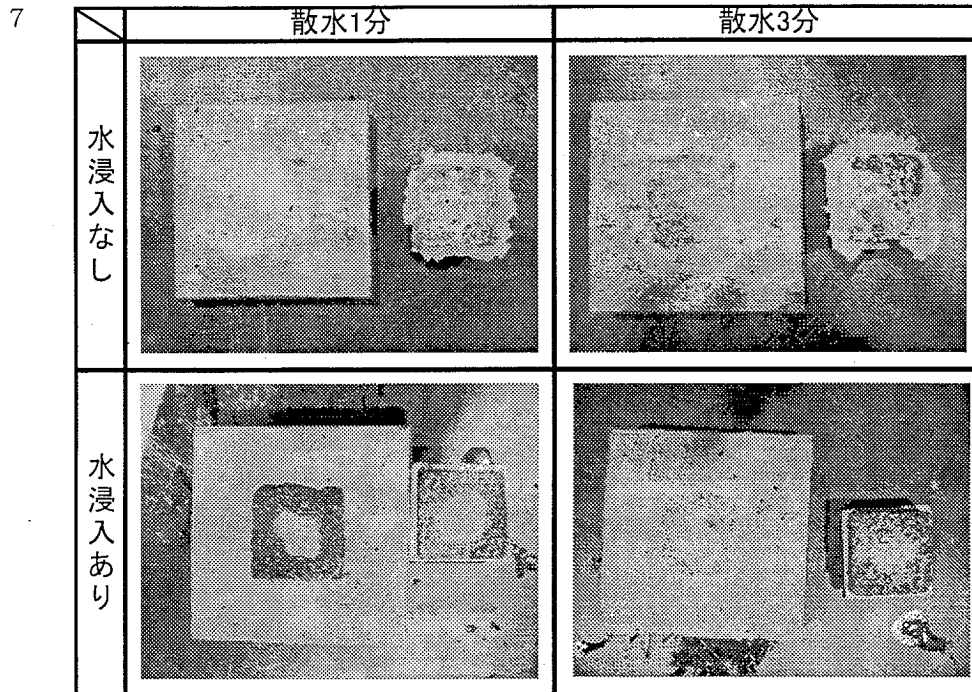


図 2.26 水浸入の有無

## B. 施工条件に起因した剥離発生メカニズム

### 3. モデル試験体による実験検討

#### 3.1 実験方法

##### 3.1.1 試験体

##### 1) 調合および使用材料

コンクリート躯体の調合、スランプ、および Air を表 3.1 に示す。実験に用いた材料およびモルタルの調合は前節の実験と同様である。

表 3.1 コンクリートの調合

粗骨材の 最大寸法 mm	スランプ cm	水セメント比 %	空気量 %	細骨材率 %	単位量(kg/m <sup>3</sup> )				
					水	セメント	細骨材	粗骨材	AE減衰剤
15	4	45	3.8	-	174	385	1047	993	1

##### 2) 試験体形状および試験体種類

試験体の形状および寸法は前述の実験と同様である。ここでは養生環境に応じた適切な養生期間を検討するために以下の条件で試験体を作製した。コンクリートの養生期間は基準の 28 日に対して 3 日, 7 日, 10 日, 14 日について検討した。また, 仕上モルタルの養生環境については, それぞれの養生期間に対して, 夏場を想定した 30°C, 冬場を想定した 10°C, 中間期を想定した 20°C で試験体を養生した。試験体の仕様および個数を表 3.2 に示す。試験体はそれぞれの条件に対して 3 体ずつ作製した。表中, ばらつきを検討は, 引張試験結果のばらつきを検討するために作製したものである。

表 3.2 試験体仕様一覧

養生時の環境と養生期間が及ぼす影響 促進劣化: 日射散水繰り返し

養生時の気温	コンクリート材齢	ばらつき の検討	初期値 (材齢21日目)	促進劣化試験に 対する初期値	劣化後	
10°C	3, 7, 10, 14, 28日	初期値7+劣化後7	3×5=15	3×5=15	3×5=15	計45 計59 計45 } 計149
20°C	3, 7, 10, 14, 28日		3×5=15	3×5=15	3×5=15	
30°C	3, 7, 10, 14, 28日		3×5=15	3×5=15	3×5=15	

#### 3) 試験体の作製方法

施工方法についても前述の実験と同様である。試験体は全部で 160 体作製した。なお, 施工の際コンクリート面に塗布した吸水調整剤は 3 倍希釈とした。今回の実験では, コンクリートの養生期間によってモルタルの施工日が異なるため, モルタルの品質を各養生期間で近いものになるよう心がけた。

#### 4) 促進劣化装置

2.2.3 節に示す温冷・乾湿繰り返し試験と実験と同様の方法とした。

#### 5) 直接引張試験

接着一体性の評価方法も前述同様である。今回の実験では実験結果をまとめる際, 初期値をモルタルの材齢 21 日目と劣化させずに養生し続けたもの(材齢 38 日)のうち, 高い値を採用した。

## 3.2 実験結果および考察

### 3.2.1 直接引張試験結果

#### (1) 養生3日目の引張強度

図3.1に養生期間3日目の引張強度および劣化後の初期値からの変化率を示す。同図より、コンクリート躯体表面の脆弱な材齢3日目では、養生環境に関わらず劣化により性能が低下することがわかる。強度発現が遅いとされる低温環境下の10℃においては、劣化後の強度は初期値の75%程度になっている。特にモルタルの品質が安定していないことがわかる。また、初期値については10℃、20℃では強度のばらつきが大きく、劣化後については10℃、30℃において比較的ばらつきの大きい結果となっている。劣化後の20℃でのばらつきは最も小さく、初期値こそばらつきがあったものの劣化後に大きな性能の低下は見られなかった。材例3日目における性能は20℃>30℃>10℃となった。

#### (2) 養生7日目の引張強度

図3.2に養生期間7日目の引張強度および劣化後の初期値からの変化率を示す。同図より、材齢7日目における強度は、初期値においては10℃>20℃>30℃、劣化後では30℃>20℃>10℃という順に高い。20℃、30℃環境下では劣化後の強度は初期値と比較し、それぞれ140%、160%と上昇している。初期値、劣化後ともに強度に非常に大きなばらつきが出た。特に10℃環境下での初期値、劣化後および30℃環境下での初期値においては大きなばらつきとなった。材齢7日目においては強度やばらつきから判断すると20℃環境下が最もよい結果と考えられる。

#### (3) 養生10日目の引張強度

図3.3に養生期間10日目の引張強度および劣化後の初期値からの変化率を示す。同図より、材齢10日目における強度は、初期値においては20℃>30℃>10℃、劣化後では10℃>20℃>30℃という順に高い。10℃環境下での劣化後の強度は初期値に比べ160%と非常に高い結果となった。そのほかの環境下においてもほとんど劣化後による性能の低下は見られなかった。初期値、劣化後ともに強度のばらつきは材齢3日目、7日目に比べ小さくなっている。養生期間が長くなることにより品質が安定してきたと考えられる。30℃については初期値でばらつきが大きかったものの劣化後においては最もばらつきが小さい結果となっている。全体を通して、10℃環境下での性能が初期値こそ低い最もよい結果と言える。

#### (3) 養生14日目の引張強度

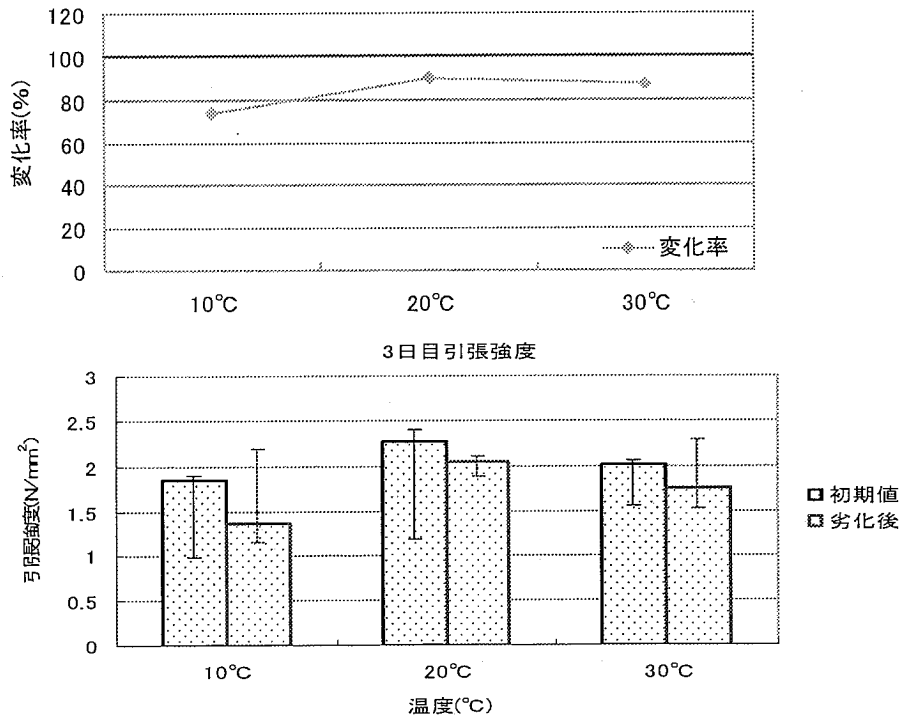
図3.4に養生期間14日目の引張強度および劣化後の初期値からの変化率を示す。同図より、材齢14日目における強度は、初期値においては10℃>30℃>20℃、劣化後では10℃>30℃>20℃という順に高い。10℃環境下での劣化後の強度は初期値に比べ140%と最も高い結果となった。強度の高さ、ばらつきからも最もよい結果と言える。その他の環境下においてもほとんど劣化後による性能の低下は見られなかった。30℃環境下では、初期値のばらつきは非常に小さいが、劣化後のばらつきは非常に大きい。材齢10日目とは逆の結果となった。材齢14日目では引張試験の際、モルタルから破壊したものが多く、それがばらつきに影響をおよぼしたと考えられる。このことから強度こそほとんど変化はなかったものの促進劣化によりモルタルの品質は低下したと考えられる。20℃環境下では、中央値が最小値と近いことを考慮すると30℃より優れた性能であると考えられる。

#### (4) 養生28日目の引張強度

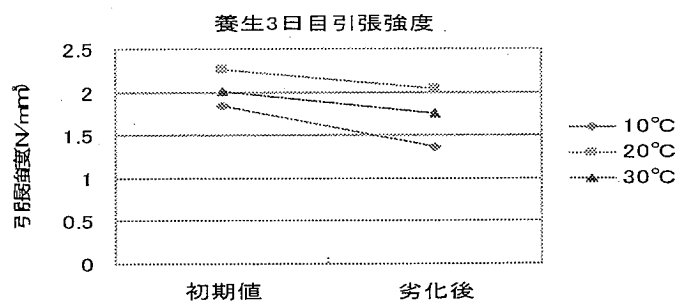
図3.5に養生期間28日目の引張強度および劣化後の初期値からの変化率を示す。同図より、材齢28日目における強度は、初期値においては30℃>20℃>10℃、劣化後では20℃>10℃>30℃とい



う順に高い。10°Cおよび 20°C環境下では劣化後の強度は初期値に比べやや高くなっている。30°C環境下では 80%程度に強度は低下し、最も劣化による影響を受けた。劣化後の中央値は各環境下ではほぼ 2N/mm<sup>2</sup> 程度となった。30°C環境下でのばらつきは、材齢 14 日目に比べ劣化後のばらつきが小さくなった。なお、20°Cでばらつきが大きいのは、試験体の数が他と比べ多かったためである。



(c) 中央値とばらつき(最大値および最小値)



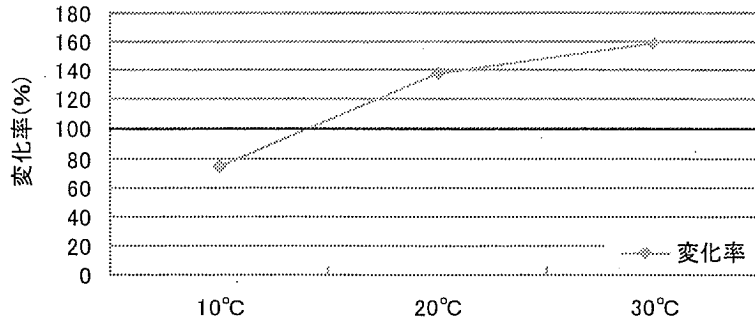
(d) 初期値と劣化後の比較

図 3.1 養生期間 3 日目引張強度

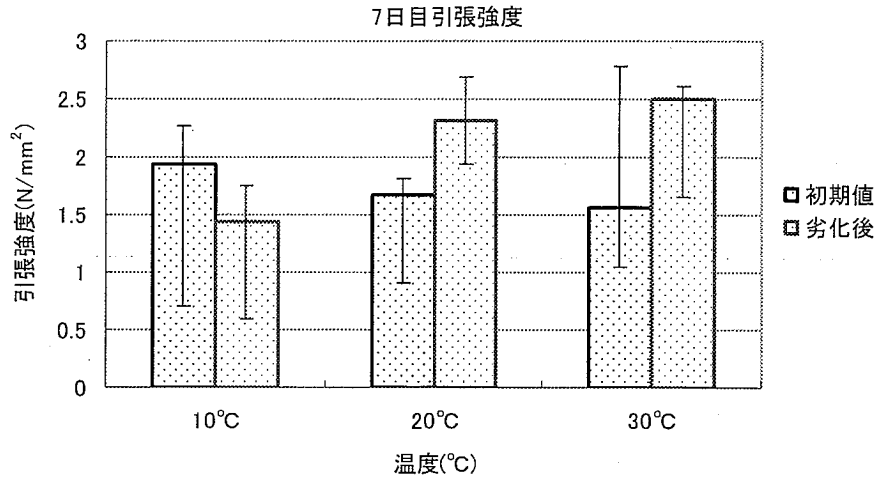
(a) 引張強度中央値および破断形式

	10°C	20°C	30°C
初期値	1.9375	1.66875	1.56875
	界面破壊	界面破壊	界面破壊
劣化後	1.44375	2.30625	2.5
	モルタル破壊	界面破壊	界面破壊

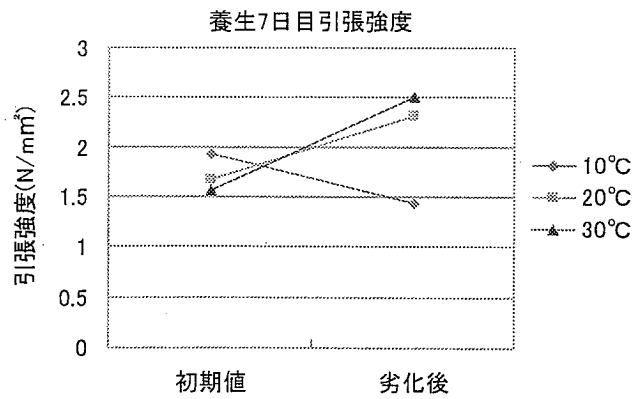
(N/mm<sup>2</sup>)



(b) 初期値からの変化率



(c) 中央値とばらつき(最大値および最小値)



(d) 初期値と劣化後の比較

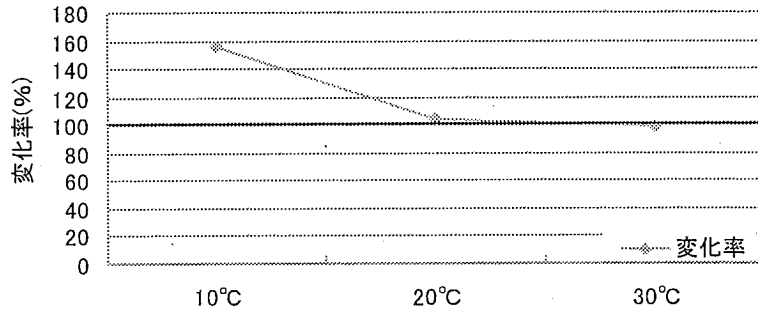
図 3.2 養生期間 7 日目引張強度

(a) 引張強度中央値および破断形式

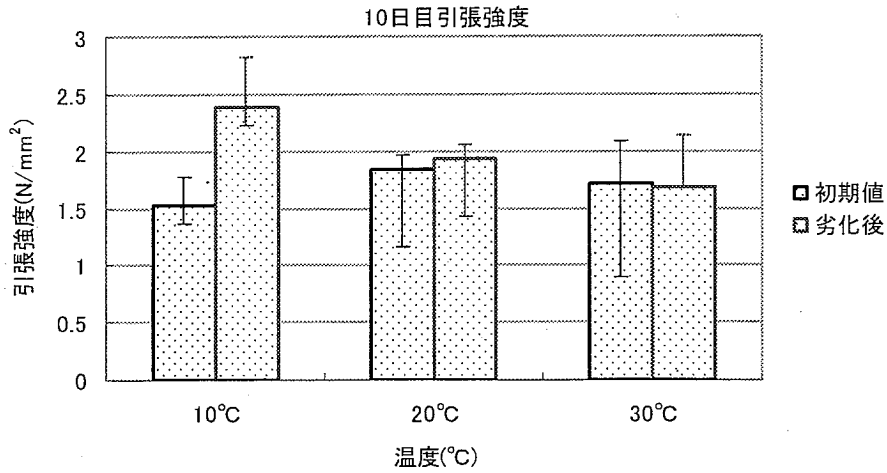
	10°C	20°C	30°C
初期値	1.53125	1.84375	1.70625
	界面破壊	界面破壊	界面破壊
劣化後	2.3875	1.93125	1.68125
	界面破壊	モルタル破壊	界面破壊

(N/mm<sup>2</sup>)

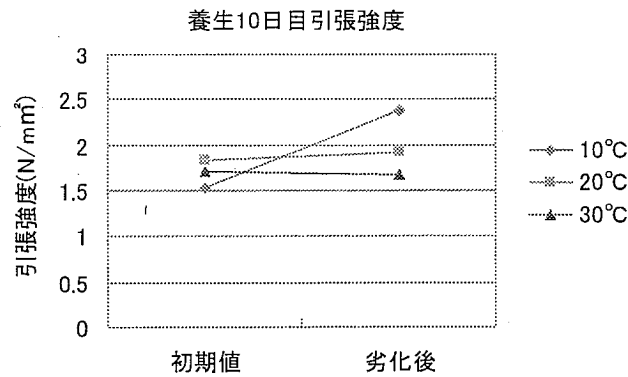
はモルタル材齢21日目の値を採用している



(b) 初期値からの変化率



(c) 中央値とばらつき(最大値および最小値)



(d) 初期値と劣化後の比較

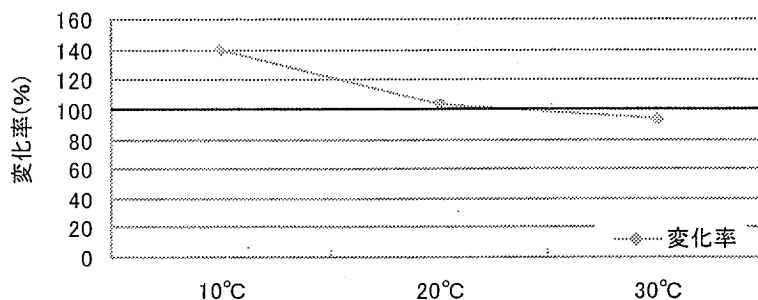
図 3.3 養生期間 10 日目引張強度

(a) 引張強度中央値および破断形式

	10°C	20°C	30°C
初期値	1.55	1.25	1.496875
	界面破壊	モルタル破壊	界面破壊
劣化後	2.1625	1.2875	1.40625
	界面破壊	界面破壊	モルタル破壊

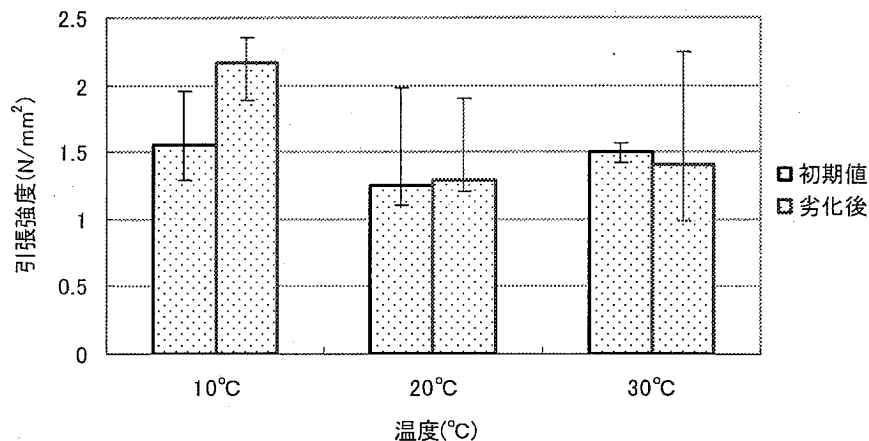
(N/mm<sup>2</sup>)

■ はモルタル材齢21日目の値を採用している



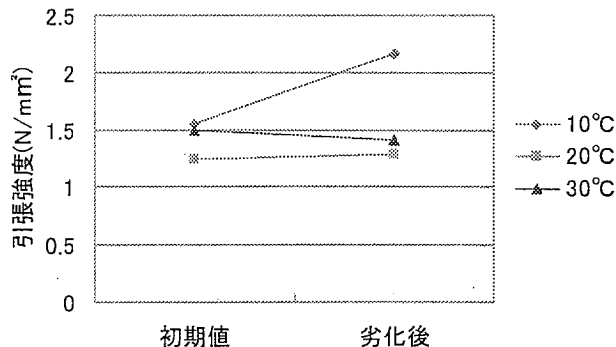
(b) 初期値からの変化率

14日目引張強度



(c) 中央値とばらつき(最大値および最小値)

養生14日目引張強度



(d) 初期値と劣化後の比較

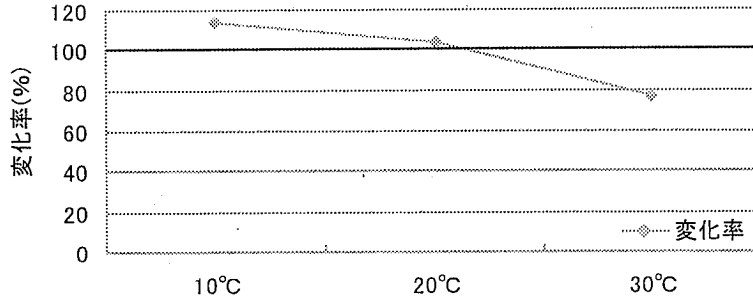
図 3.4 養生期間 14 日目引張強度

(a) 引張強度中央値および破断形式

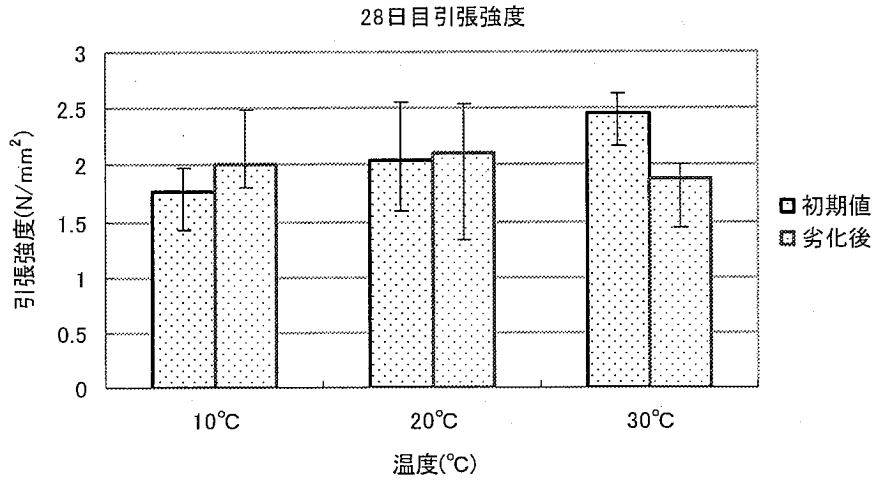
	10°C	20°C	30°C
初期値	1.7625	2.034375	2.45625
	界面破壊	界面破壊	界面破壊
劣化後	2	2.109375	1.88125
	界面破壊	界面破壊	界面破壊

(N/mm<sup>2</sup>)

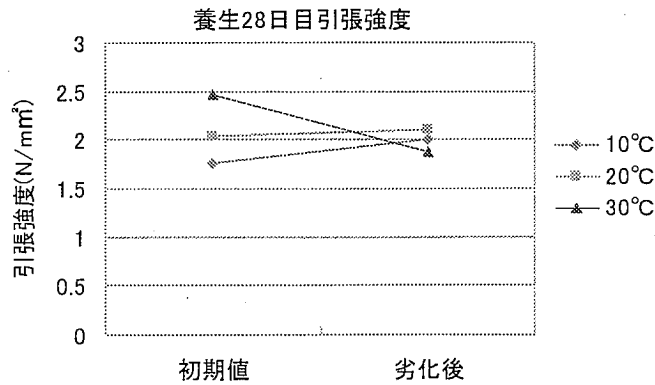
はモルタル材齢21日目の値を採用している



(b) 初期値からの変化率



(c) 中央値とばらつき(最大値および最小値)



(d) 初期値と劣化後の比較

図 3.5 養生期間 10 日目引張強度

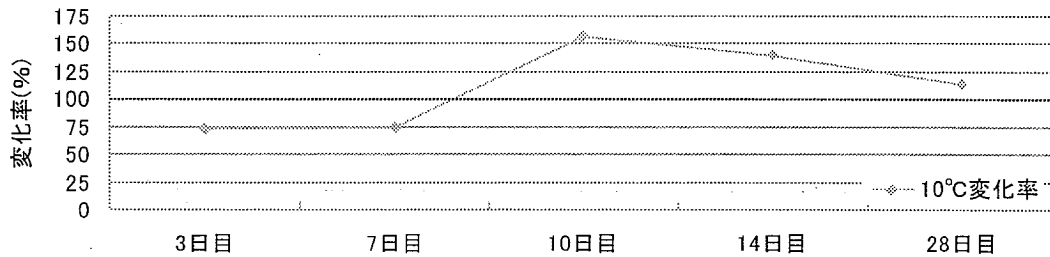
(5) 10℃における養生期間と引張強度の関係

図 3.6 に 10℃環境下における養生期間と引張強度の関係および劣化後の初期値からの変化率を示す。同図より、材齢 7 日目までは劣化により大きく強度を低下させるが、材齢 10 日目以降、劣化後の強度はいずれも 2N/mm<sup>2</sup> 以上で、初期値と比べても高くなっているとともに、劣化後のばらつきも小さくなっている。初期値に着目すると材齢 3 日目で既に強度は材齢 28 日目と比べても遜色のないものの、材齢 7 日目まではばらつきが大きく、劣化後のばらつきも大きい。材齢 3 日目、7 日目のばらつきはモルタルの強度発現不足に伴うモルタル破断の試験体が存在したことが原因として考えられる。今回の実験では、10℃環境下においては、温冷・乾湿繰り返しという劣化外力を想定した場合、10 日間の養生期間でもよいという結果になった。

(a) 引張強度中央値および破断形式

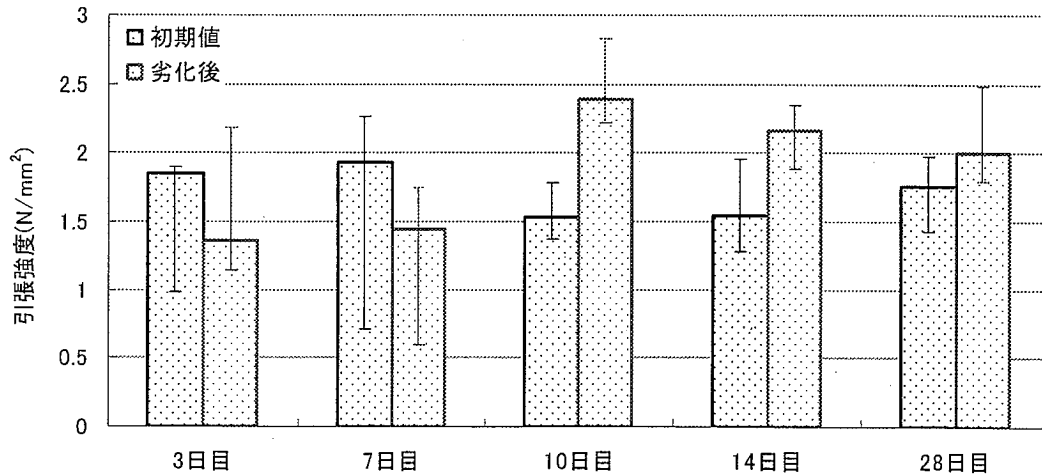
	3日目	7日目	10日目	14日目	28日目
初期値	1.85	1.9375	1.53125	1.55	1.7625
	界面破壊	界面破壊	界面破壊	界面破壊	界面破壊
劣化後	1.3625	1.44375	2.3875	2.1625	2
	界面破壊	モルタル破断	界面破壊	界面破壊	界面破壊

■ はモルタル材齢21日目の値を採用している (N/mm<sup>2</sup>)



(b) 初期値からの変化率

10℃における養生期間と引張強度の関係



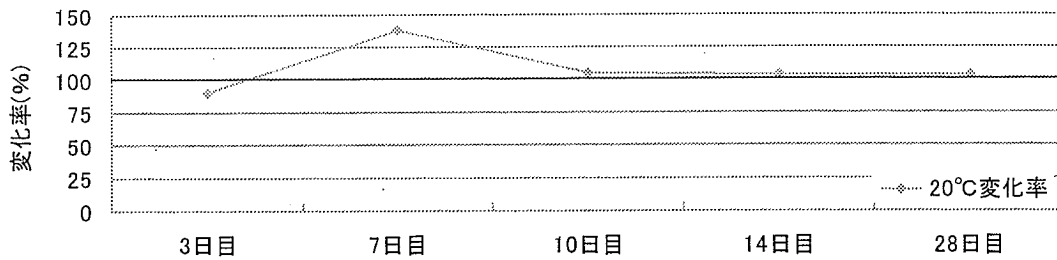
(c) 中央値とばらつき(最大値および最小値)

図 3.6 10℃における養生期間と引張強度の関係

(6) 20℃における養生期間と引張強度の関係

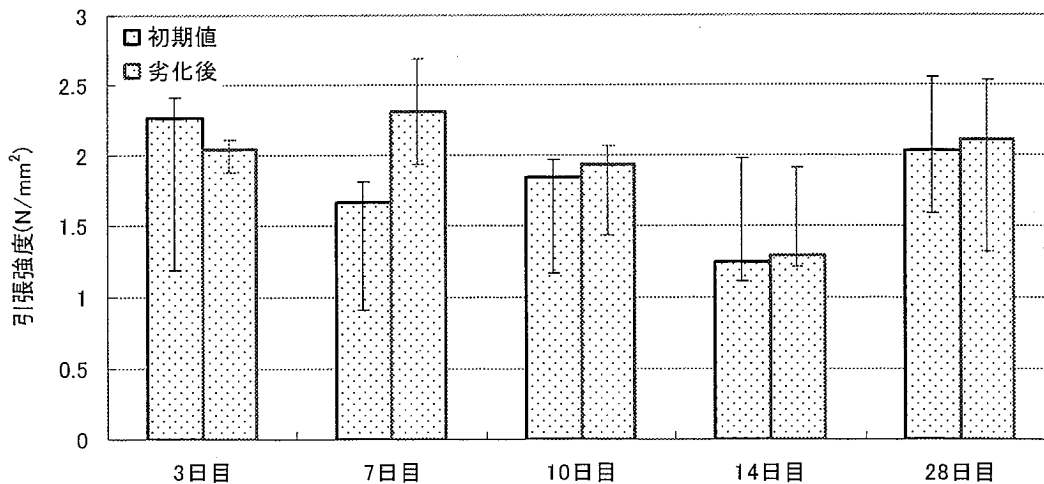
図 3.7 に 20℃環境下における養生期間と引張強度の関係および劣化後の初期値からの変化率を示す。同図より、20℃環境下では劣化を受けにくいことがわかる。材齢 14 日目では、初期値、劣化後の強度は相対的に若干低い結果となっている。これは施工時のモルタルが他よりもやや軟らかかつ

たこと、モルタルの1回塗りから2回塗りまでの間にモルタルがやや濁き気味だったことが影響した可能性がある。モルタルの強度は養生期間に加え、施工段階での状況も大きく影響し、品質管理が重要であることがわかる。今回の実験では、この材齢14日目を除いて評価すると、20℃環境下では養生期間に関わらず劣化に対する抵抗性は高く、材齢3日で施工してもよいという結果となった。但し、養生期間の長さに関わらず、他の環境下と比較し初期値におけるばらつきが大きいので注意が必要である。なお、材齢28日目については、初期値および劣化後でそれぞれ10体の試験体を作製したため、ばらつきが大きかったものと考えられる。



(b) 初期値からの変化率

20℃における養生期間と引張強度の関係



(c) 中央値とばらつき(最大値および最小値)

図 3.7 20℃における養生期間と引張強度の関係

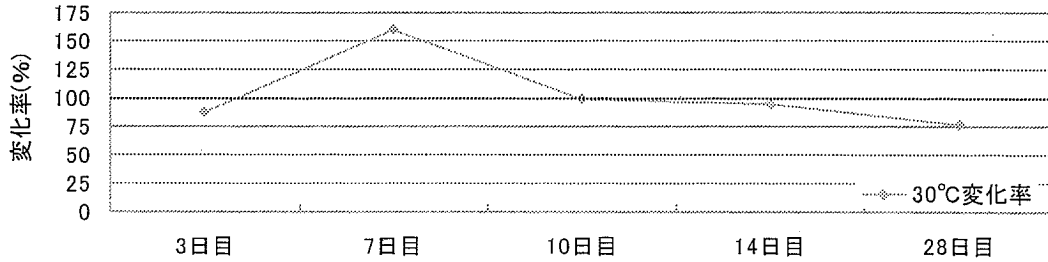
### (7) 30℃における養生期間と引張強度の関係

図 3.8 に 30℃環境下における養生期間と引張強度の関係および劣化後の初期値からの変化率を示す。同図より、材齢7日目、10日目で初期値のばらつきが非常に大きい。初期の品質を安定したものとするためには14日以上養生が必要である。また、材齢7日目以外、全ての材齢において劣化後の強度は低下傾向にある。なお、材齢3日目、7日目、14日目の劣化後におけるばらつきは、モルタル破壊した試験体が存在することが原因の一つとして考えられる。30℃環境下においては、温冷・乾湿繰り返しによる劣化を受けやすいと考えられる。30℃では、他の環境と比べモルタルの組織生成が早く、モルタル内部の空隙も大きくなる。空隙の多いモルタルに散水を行うことで促進劣化によるムーブメントが大きくなり、接着一体性に影響を与えたと推察される。

(a) 引張強度中央値および破断形式

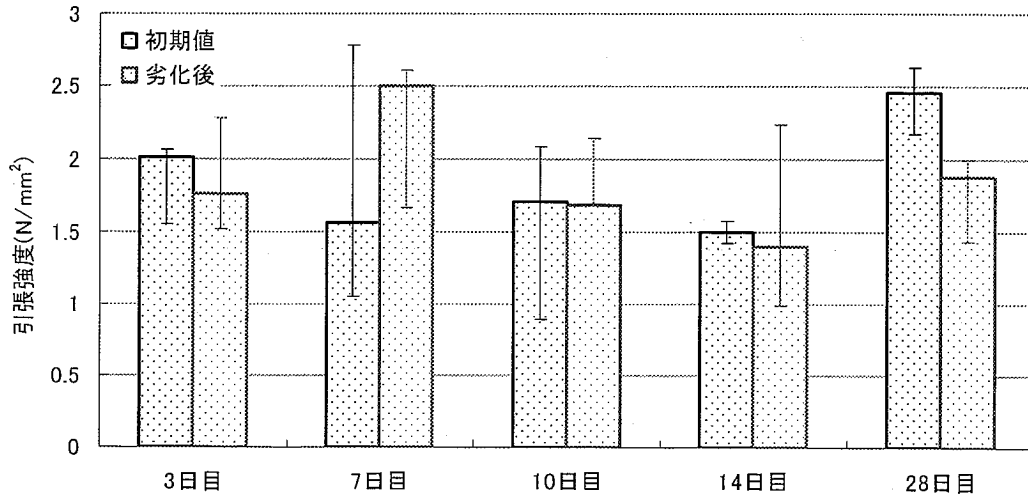
	3日目	7日目	10日目	14日目	28日目
初期値	2.00625	1.56875	1.70625	1.496875	2.45625
	界面破壊	界面破壊	界面破壊	界面破壊	界面破壊
劣化後	1.75625	2.5	1.68125	1.40625	1.88125
	モルタル破壊	界面破壊	界面破壊	モルタル破壊	界面破壊

■ はモルタル材齢21日目の値を採用している (N/mm<sup>2</sup>)



(b) 初期値からの変化率

30°Cにおける養生期間と引張強度の関係



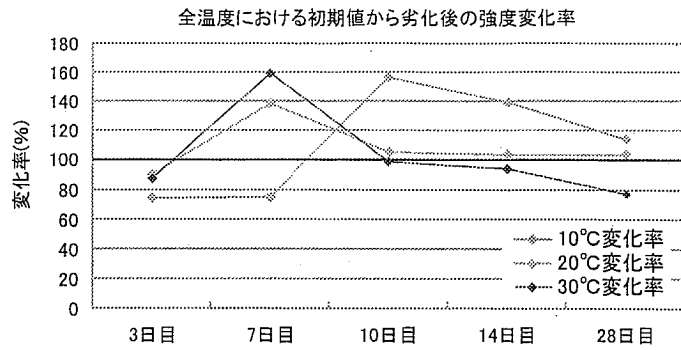
(c) 中央値とばらつき(最大値および最小値)

図 3.8 30°Cにおける養生期間と引張強度の関係

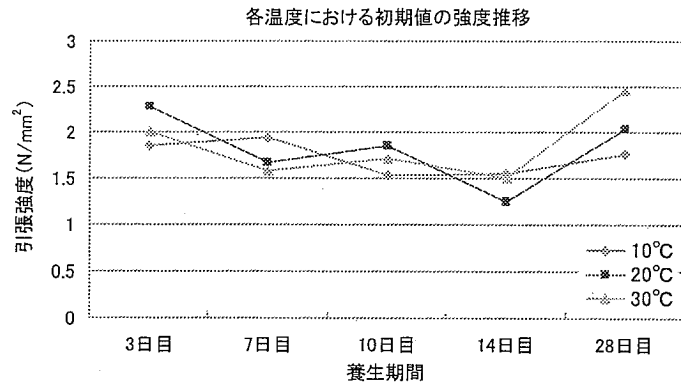
(8) 各温度における初期値および劣化後の強度の推移

図 3.9 に各温度における初期値および劣化後の強度の推移を比較したものを示す。同図より、各環境下での強度の推移を比較すると、劣化後の性能について 10°C環境下では材齢 10 日目以降の強度は増加傾向で、引張強度で比較しても他の環境下よりも高い。20°C環境下では 30°Cと比較し劣化後の強度はほとんど変わらないものの劣化による強度の低下が小さく、温冷・乾湿繰り返しに対して強いことがわかる。30°C環境下では他と比較しても劣化後の性能が低下しやすいことがいえる。

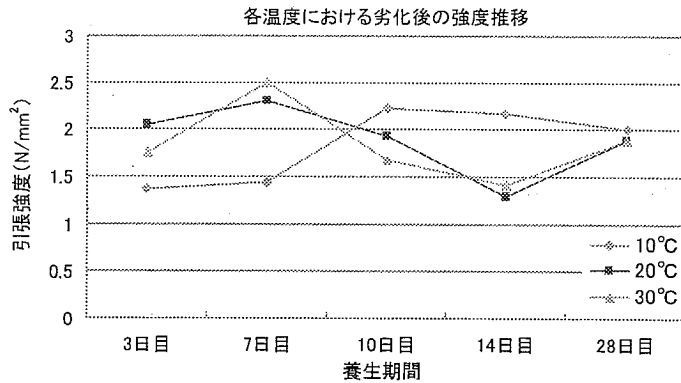




(a) 強度変化率



(b) 初期値



(c) 劣化後

図 3.9 各温度における初期値および劣化後の強度の推移

(9) 各材齢における 20°C を基準とした強度の割合

図 3.10 に各材齢における 20°C を基準とした時の 10°C, 30°C の強度の割合を示す。材齢 3 日目では初期値, 劣化後ともに 20°C 環境下が最もよい結果となった。材齢 10 日目以降, 10°C 環境下での劣化後の強度は 20°C よりも優れた性能となっている。また, 30°C 環境下では, 14 日目以降初期値については 20°C よりも高い強度を示した。30°C は劣化を受けやすいという結果からも, 少しでも初期値は高いほうがよい。よって, 今回の実験で 20°C を標準的な強度と仮定すれば, 30°C 環境下では 14 日以上養生期間を確保することが好ましいといえる。

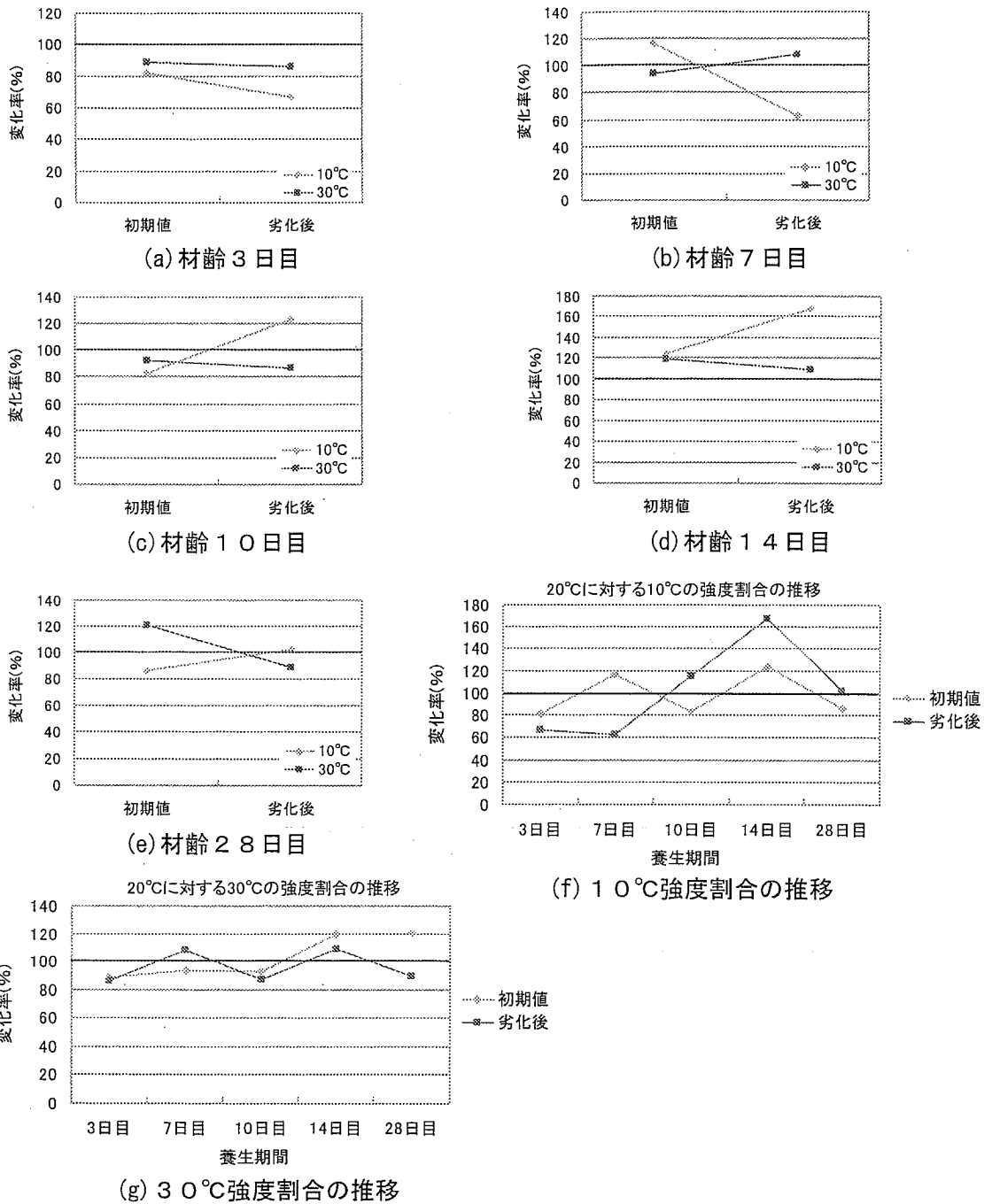
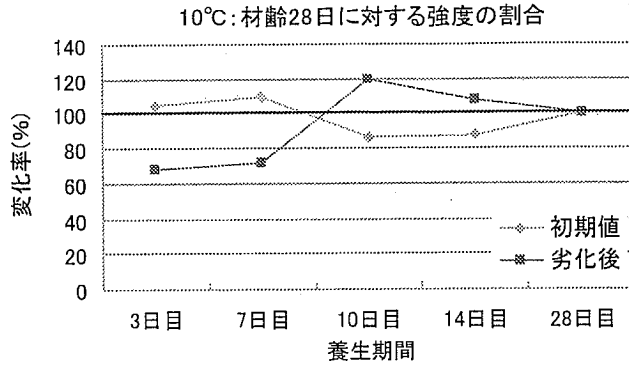


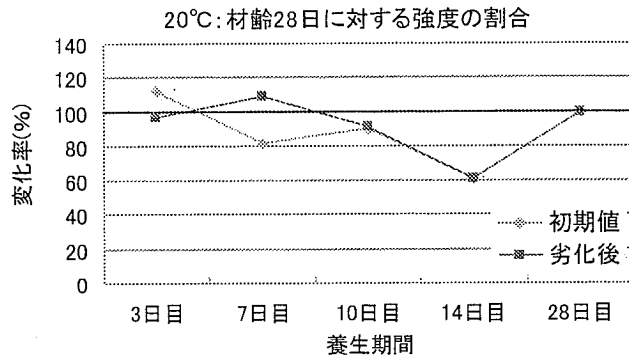
図 3.10 各材齢における20°Cを基準とした強度の割合

(10) 材齢 28 日目を基準とした各材齢での強度の割合

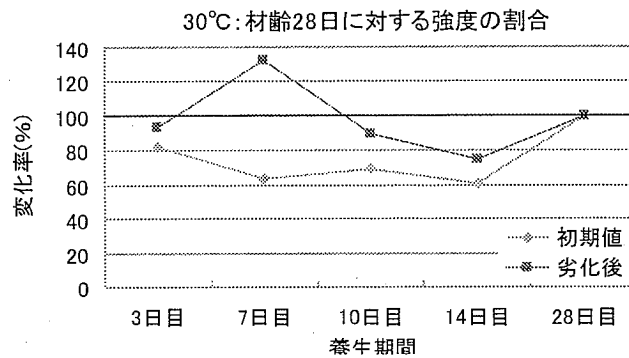
図 3.11 に材齢 28 日目を基準とした各養生期間の強度の割合を示す。同図より、10°C環境下では、材齢 10 日目以降劣化後の強度は材齢 28 日目と大きな違いはない。このことから 10 日の養生期間で劣化に対する抵抗性は十分に確保できるといえる。20°C環境下では材齢 14 日目を除くとほとんど違いが出なかった。前述の材齢 14 日目の施工不良の可能性を考慮すると材齢 3 日目と材齢 28 日目の違いは見られなかった。30°C環境下では、初期値が材齢 14 日目から 28 日目に強度が増加していると考えられる。劣化後については初期値ほど大きな差は認められなかった。



(a) 10°C



(b) 20°C



(c) 30°C

図 3.11 材齢 28 日目を基準とした各材齢での強度の割合

### (1.1) 養生期間とばらつきの関係

図 3.12, 図 3.13 に各養生環境における養生期間の長さとはばらつきとの関係を示す。図 3.12 では初期値, 図 3.13 では劣化後について示した。図 3.12 より, 10°Cは材齢 10 日目以降にはばらつきが小さくなっている。これは, 低温環境下では常温に比べ強度発現が遅いことから, 安定した品質を保つためには 10 日以上養生期間が必要であることを意味する。20°Cは相対的には材齢 3 日目でばらつきが大きいものの, 養生期間に関わらず, 安定した初期性能を示している。30°Cでは, 材齢 3 日目でばらつきの少ない結果を示しているが, 材齢 7 日目, 10 日目で大きくばらついているため, 14 日以上養生期間を確保することが好ましい。高温環境下では, モルタルの強度発現は早い, 必ずしも品質が安定することとつながるとは限らないといえる。図 3.13 より, 劣化後のばらつきをみると, 10°Cは初期値同様材齢 10 日目以降ではばらつきが小さくなっている。20°Cは, 初期値とは反対に材齢 3 日目のばらつきが最も小さい。全体的に材齢にかかわらず安定していることがわかる。

なお、材齢 28 日目でばらつきが多いのは試験体の母数が他の養生期間に比べて多いためである。30℃では、初期値で最もばらつきが小さかった材齢 14 日目で最もばらついた。全体的に養生期間が長くなるにつれて品質が安定する傾向は見られなかった。30℃については改めて検討する必要があると考える。

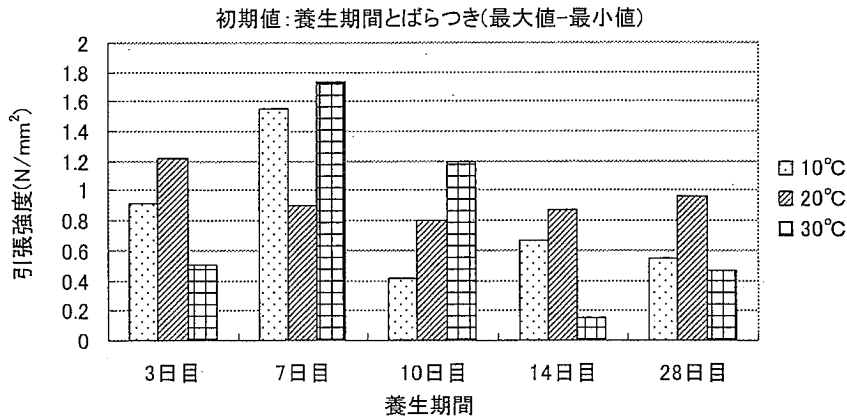


図 3.12 養生期間とばらつき(初期値)

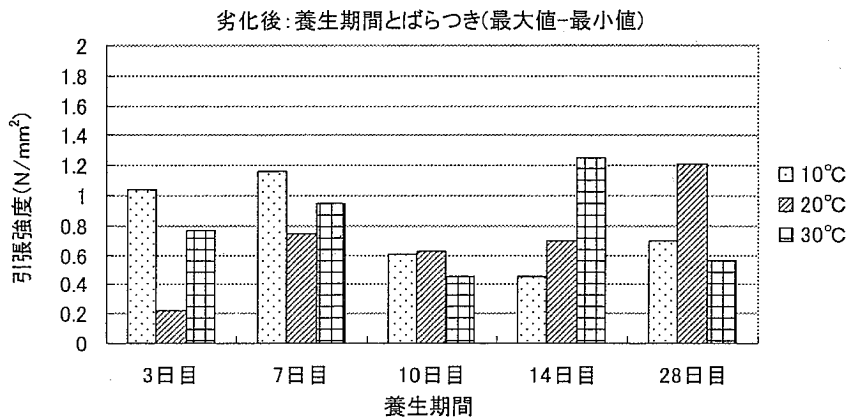


図 3.13 養生期間とばらつき(劣化後)

### 3.2.2 破断形式による検討

図 3.14～3.18 に各養生期間における材齢 21 日目のモルタル、材齢 38 日目のモルタル、促進劣化試験後(材齢 38 日)のモルタルの破断形式を示す。図中の「初期値」、「養生」は、それぞれモルタルの材齢 21 日目、38 日目で引張試験を行ったことを表す。「初期値」の材齢 3 日目については、初めはモルタルの材齢 14 日目で引張試験を行っている。モルタルの材齢 14 日目では強度の発現が十分ではなかったため全てモルタル破断だった。このことから材齢 21 日目で再度引張試験を実施した結果を示した。材齢 7 日目以降の試験体については、モルタルの材齢 21 日目で引張試験を行っている。ただし、材齢 7 日目については、全てモルタル破断を起こしたため、3 日後に再び引張試験を行った際の結果を示している。材齢 3 日目から 28 日目の「初期値」を比較すると材齢 3 日、7 日でモルタル破壊の割合が高い。コンクリートが弱材齢の際にモルタルを施工すると、モルタルの養生期間が 21 日では十分に強度を発揮することができなかった。材齢 3 日、7 日の「初期値」と「養生」を比較すると「養生」でのモルタル破壊の割合が低くなっていることから、モルタルは材齢 21 日目から 38 日目にかけても品質が高くなっていることがわかる。

全ての養生期間について「養生」と「促進劣化」を比較すると促進劣化後に引張試験を行った際にはモルタル破断の割合が高くなっている。促進劣化試験により、モルタルの組織が劣化し、モル

タル自身の強度が低下したことがわかる。

材齢 28 日目の場合、「初期値」「養生」「劣化後」すべてにおいて界面で破壊している。これはコンクリートの養生期間を十分確保することによって、モルタル自体の品質も高くなることを意味している。全体を通して、養生期間が長いほど界面での破壊が多くなる傾向がある。10℃環境下では材齢 10 日目以降、すべての条件で界面破壊となっている。10℃環境下では、養生期間が 10 日以上であればその後施工したモルタルは、モルタルの養生期間は 21 日で品質が安定することがわかる。

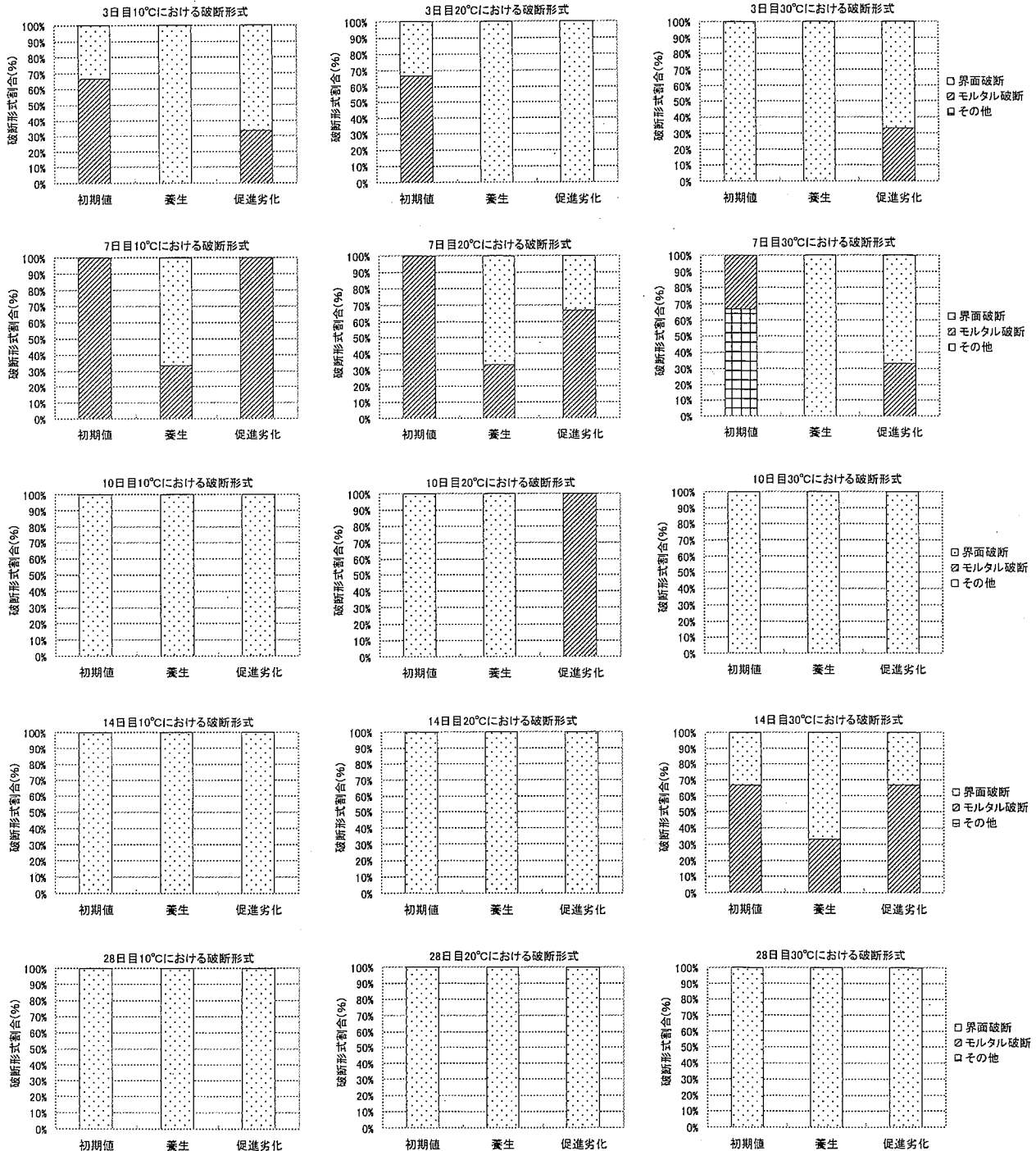


図 3.14 破断形式

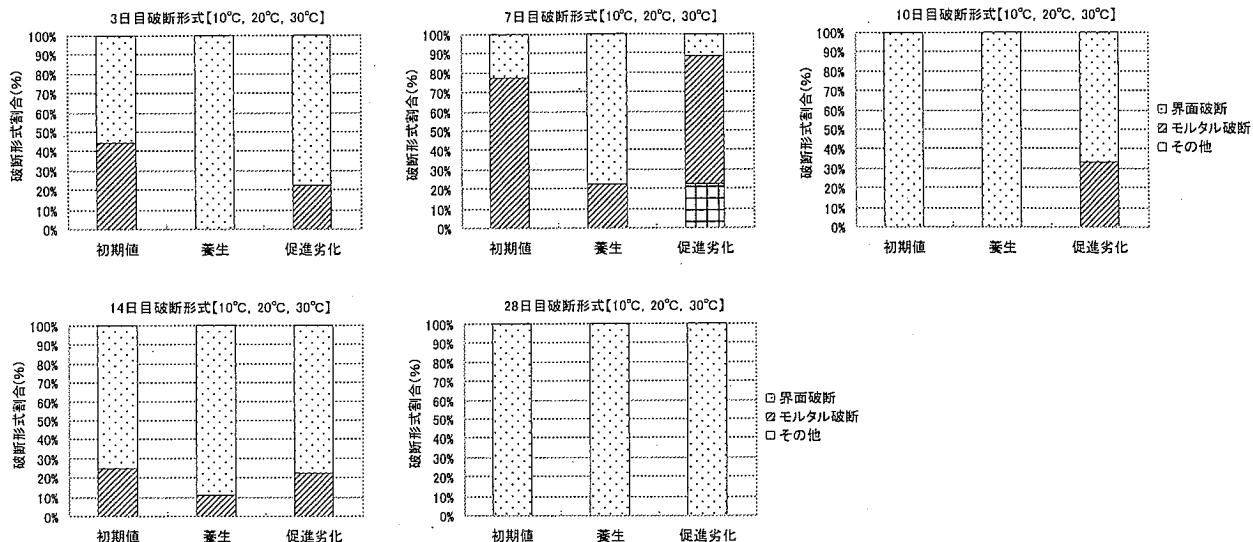


図 3.15 破断形式【養生期間】

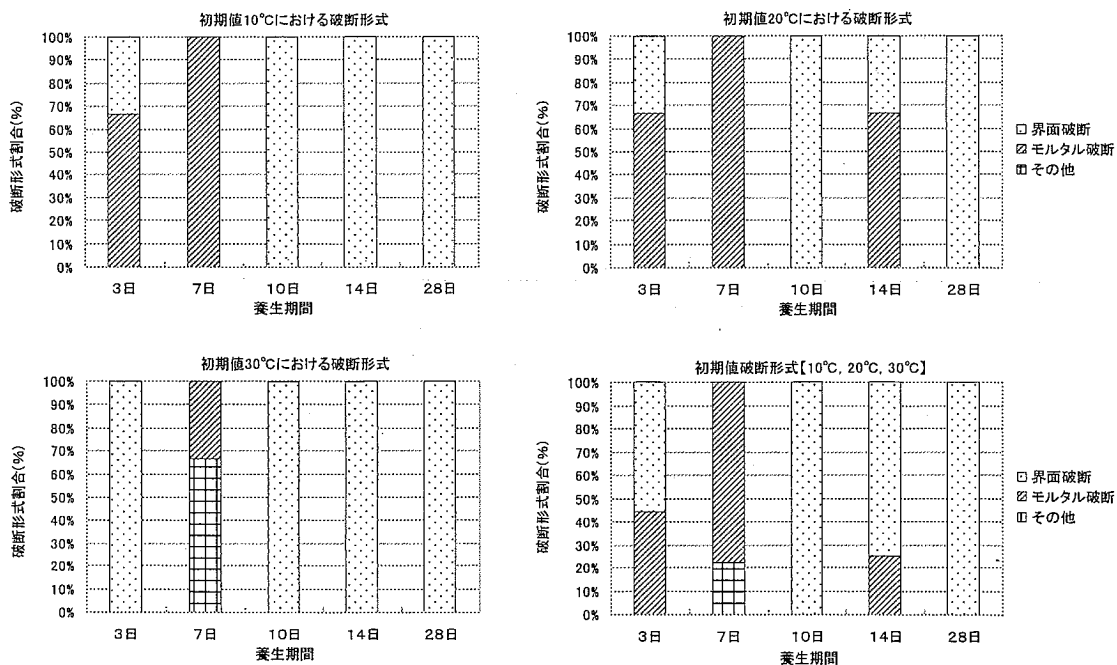


図 3.16 破断形式【初期値】

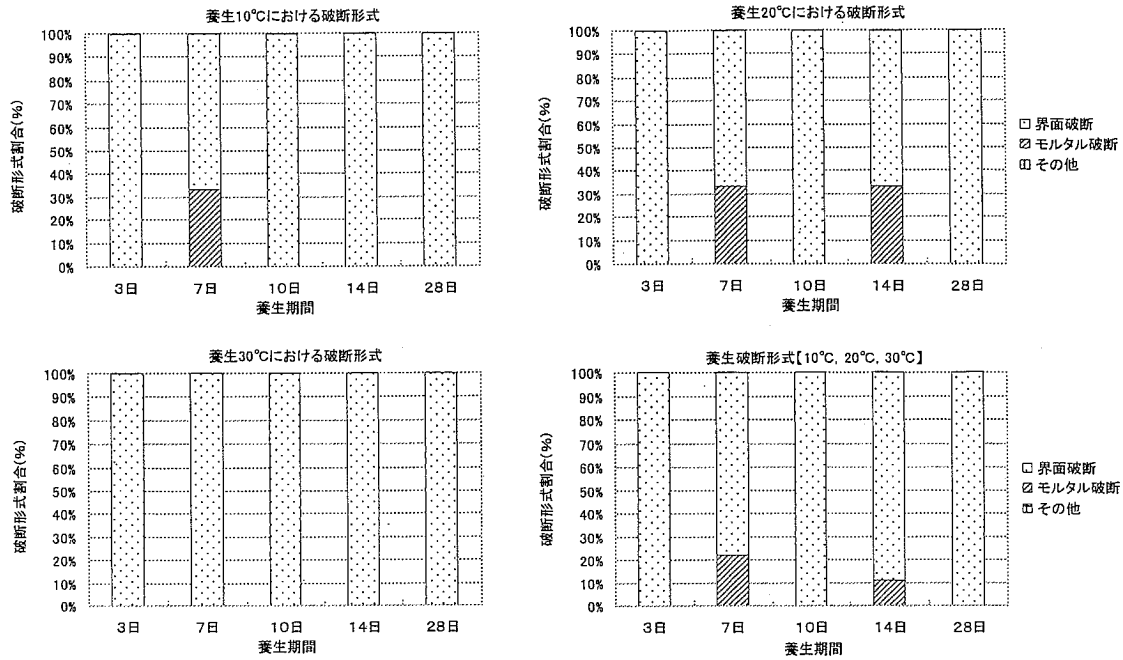


図 3.17 破断形式【養生】

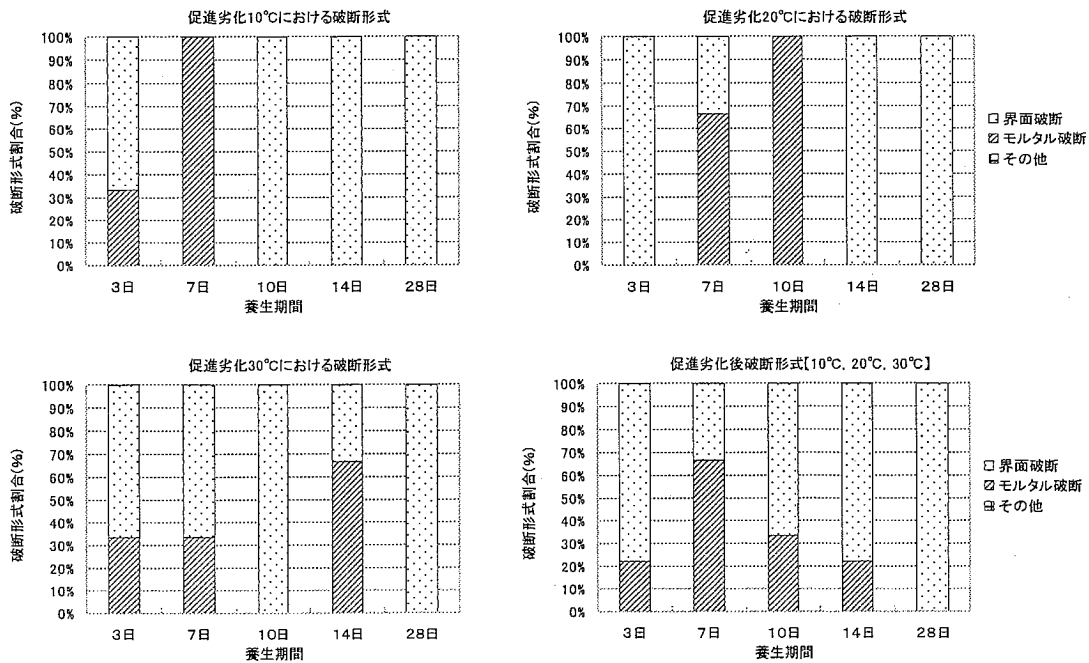


図 3.18 破断形式【促進劣化】

### Ⅲ. 剥離防止技術に関する総括

本研究では特に温冷・乾湿ムーブメントによる仕上げ材の剥離・剥落防止設計に関して検討を行った。本研究の開始直後に東京都内で斜め外壁の剥落事故が発生し通行人が怪我をする事態が発生したため、本研究では特に日射と降雨の影響を検討した。また、施工現場における仕上工事前の養生期間短縮の問題を受け、斜め外壁の仕上材剥落防止および養生期間が剥離におよぼす影響についても併せて検討した。

その結果、斜め外壁の仕上材剥落防止については、一般的に日射吸収量の多い斜め外壁では、温度上昇をもたらす温冷ムーブメントが剥離作用を促進するため、日射による温度上昇を可能な限り制御することが安全性を確保する上で重要であることを定量的に明らかにした。また、モルタルとコンクリートの界面への水の浸入は、仕上モルタルのムーブメントを拘束した場合に大きな性能の低下につながるため、降雨による浸水の可能性が高い斜め外壁においては水浸入を防ぐための対策を施す必要があることを示した。

今後早急に、実際の壁面で最も多いと考えられる「モルタルの拘束」と「界面への水浸入」が同時に作用する条件を想定した接着一体性の評価方法を確立することが、今後より信頼性の高い技術データを蓄積していく上で重要であると考えられる。

養生期間がおよぼす影響については、養生環境が 10℃、20℃、30℃での適切な養生期間を提案した。すなわち、20℃環境下で施工を行う場合には養生期間は 3 日でも比較的高い品質を保つことができることを示した。

10℃環境下では 10 日以上養生期間を確保することで日射・散水に対する抵抗性を高く保つことができることを示した。

30℃環境下では日射・散水により劣化しやすい傾向が認められた。このことから夏期における施工では慎重な品質管理が必要であるといえる。暑中環境では養生期間を 14 日以上確保することで初期性能を安定させることができることから劣化による性能の低下を考慮すると 14 日以上の養生期間を確保することが望ましい。しかし、今回の研究の範囲では養生期間の長さや強度の関係を定量的に明確にできなかったため、今後更に検討が必要であると考えられる。

外気環境変化に伴うムーブメントの剥離剥落への影響については、温冷ムーブメントと凍結融解によるムーブメントを比較すると凍結融解によるムーブメントのほうが大きくなる傾向を示した。

特に解析結果からは、気温が急に低くなる時に、コンクリートとモルタル界面の面外方向に生じる剥離応力が大きくなることから、夕立や降雪開始時には剥離が発生しやすいことを明らかにした。

モルタル仕上げは環境変化が複合されたときに挙動が大きくなることも本研究で明らかにした。特に温冷繰返し後に凍結融解繰返しを受ける場合、試験体のひずみが急激に大きくなり、試験体内部には何らかの欠陥が生じていることが明白となった。

本研究で得られたこれらの結果は、目的指向型耐久設計を確立する上で、貴重な技術データであり、ひび割れ制御、剥離・剥落防止に大きく貢献できるものである。今後も様々な技術データを蓄



積していくことが必要であると考えている。

謝辞：本研究の遂行には、本学大学院生、博士課程前期2年 森田翔君はじめ研究室学生の協力を得た。記して謝意を表す。

参考文献：本研究では以下の研究論文を参考とした。各論文で参考とした内容を一覧にして示す。

日本建築学会学術講演梗概集 (2002~2003)

文献 著者,作成年	試験体	試験方法	試験結果	キー ワード
外装タイル張り仕上げの剥離防止設計に関する研究 名知,小野,2002年学術講演梗概集,日本建築学会	100×100×650mmのコンクリートにタイルの種類,割付枚数を変えて張り付ける。	軸ひずみ追従試験,2000kN 万能試験機を用いて,単調圧縮載荷し,タイルとコンクリートの表面ひずみを測定する。	タイル張り端部とタイル目地に近いほど,ひずみ伝達率は小さく,タイル寸法が小さいほど,破壊ポイントが大きくなる。目地の比率が高い(数が多い)タイルが追従性に優れる。	タイル張り,剥離防止設計,ディファレンシャルムーブメント,ひずみ追従性
コンクリートに接着された仕上げ材の変形追従性能に関する実験的研究 渡部,馬場,守,森田,川手,2002年学術講演梗概集,日本建築学会	100×100×300mmのコンクリートの2側面に同じ厚さのセメントモルタル塗り仕上げ,セラミックタイル仕上げ(幅100mm,長さ200mm)を,それぞれ材厚を変えて作成する。	一軸圧縮試験,材軸方向に対して単調増加の圧縮載荷し,仕上げ材の側面,(タイル仕上げはタイル表面も)材軸方向歪を測定する。	両仕上げとも,仕上げ材厚が厚いほど強制変形追従性能は小さくなる。	変形追従性,コンクリート,剥離,ディファレンシャルムーブメント
外装タイル張り仕上げの剥離防止設計に関する研究 井上,名知,小野,2003年学術講演梗概集,日本建築学会	100×100×400のコンクリート試験体の表面処理,タイルの種類,タイル張り下地をそれぞれ変えて,作成する。	引っ張り接着試験,40mm 治具を接着し,50kN 精密万能試験機を用いて,単調引っ張り載荷し,破壊荷重を求め,引っ張り接着強度を算出する。併せて,破壊状態も目視で観察する。	コンクリート下地の方がモルタル下地よりも引っ張り接着強度が大きく,コンクリート表面の目荒らしをしない場合でも,引っ張り接着強度,破壊状態ともに良好な結果が得られた。	外装タイル,剥離防止設計,引っ張り接着強度,接着界面剥離

日本建築学会学術講演梗概集 (2004)

文献 著者,作成年	試験体	試験方法	試験結果	キー ワード
建築部材の目的指向型耐久設計に関する研究(外壁仕上げ材の劣化抑制効果) 長谷川,大久保,古賀,野口,千歩,2004年学術講演梗概集,日本建築学会	仕上げ材の種類と厚さを変えた9条件の試験体を作製する。仕上げ材名は,薄塗E,厚塗E,複層RE-U(トップコートはウレタン系),複層RE-水系,アクリル樹脂塗料,アクリルシリコン塗料,ウレタン塗料,エマルジョン塗料,フッ素塗料。	基本性能試験,劣化試験の組み合わせとして,透湿試験,透気試験は紫外線劣化を与える。吸上げ吸水試験,促進中性化試験は乾湿繰り返しを行う。屋外暴露試験(2年)は地域差で,色差は紫外線劣化,屋外暴露を行って検討する。	仕上塗材の色差が変化した段階では,劣化抑制効果については変化がない。仕上げ塗材の選定には,周辺の立地条件の考慮が必要である。屋外における仕上げ塗材の中性化抑制効果の評価には,地域の特徴を考慮に入れる必要がある。	目的指向,耐久性,仕上げ塗材,中性化,劣化試験,屋外暴露試験
建築部材の目	躯体コンクリートに左	温冷繰り返し,散水繰り返し	珪砂モルタルは,厚みにかか	目的指向,耐久性,左

<p>的指向型耐久設計に関する研究(左官モルタルの接着一体性) 大久保, 長谷川, 古賀, 根本, 萩ノ谷, 2004年学術講演概集, 日本建築学会</p>	<p>官モルタル, 張付けモルタル, モザイクタイルを張付けたもの。 100×100×50mmのコンクリートに 40×40×厚みの左官モルタルを施工したものの。 左官モルタルの種類, 厚み, 下地条件, 下地モルタルの養生期間をそれぞれ変えて作成。</p>	<p>返し, 温冷乾湿繰り返しは 200 サイクル, 凍結融解繰り返しは 100 サイクル, の劣化試験を行い, それぞれの劣化前後で引っ張り強度を測定する。</p>	<p>わらず温冷繰り返しに対する抵抗性は高いと言える。凍結融解作用を受ける部材では, EVA・炭カル系軽量骨材使用の左官モルタルが軸歪み追従性が高い。下地に吸水調整材を塗布する方が水湿しよりも引っ張り強度が高い。</p>	<p>官モルタル, 接着一体性, 直接引っ張り強度, 一面せん断強度</p>
<p>拘束条件がタイル張り外装仕上げ層の温冷ムーブメントに及ぼす影響 根本, 大久保, 2004年学術講演概集, 日本建築学会</p>	<p>タイル張り壁面に拘束を与えるための肉厚部を両端に設けた躯体コンクリートに, 左官モルタルを塗り, タイルを張付ける。タイル張り壁面 1000×200×120(躯体コンクリート)+23(仕上げ層)mm</p>	<p>外部拘束, 周辺拘束の有無, それぞれの試験体に日射試験(日射時間 60分×2)を行い, 温冷ムーブメントを生じさせる。</p>	<p>左官モルタルとして珪砂モルタルを用いたタイル張り仕上げでは, 日射による環境変化を受けるときに周辺拘束による影響が拘束の近傍のみならず仕上げのやや離れた箇所にも及ぶことが明らかとなった。左官モルタルは日射による温度上昇により大きな伸び歪みを生じることがある。</p>	<p>タイル張り, 拘束力, 温冷ムーブメント, ひずみ</p>
<p>タイル張りの接着耐久性評価に関する研究 大久保, 小笠原, 丸一, 飯嶋, 2004年学術講演概集, 日本建築学会</p>	<p>100×100×400mmの下地コンクリートに吸水調整剤を塗布し, 3種類の張り付けモルタルをそれぞれ塗り, モザイクタイルを圧着する。(両面)</p>	<p>初期接着強さ試験, 建研式引っ張り試験機により接着強さを測定する。 接着耐久性試験, 温冷繰り返し試験, 凍結融解試験を 10, 40, 80 サイクル行う。 軸方向歪み追従性試験</p>	<p>常態(20℃, 60%R.H., 28日間)の条件では現場調査はタイル剥離・剥落抵抗性が既調査, 既調査ポリマー混入の張り付けモルタルより小さいと推測される。(若干であり, 通常の施工時と同等の強さは示した。) 耐久性試験ではサイクル中にセメントの水和反応が進行したことで, 張り付けモルタルの劣化現象が確認できなかった。</p>	<p>タイル張り, 接着耐久性, ひずみ, せん断, 剥離</p>
<p>温冷ムーブメントに起因するタイル張り層の剥離過程の AE(アコースティック・エミッション)法による研究 金, 松村, 宮内, 田中, 2004年学術講演概集, 日本建築学会</p>	<p>面内方向の変形により発生する AE の測定, 50×50×200mm のモルタル角柱の相対する 2 面にタイル張りを施す。面外方向, 同様の試験体に 1 面にタイル張りを施す。 熱冷繰り返し, モルタル角柱 1 面にタイル張りを施す。</p>	<p>面内方向, 圧縮試験, 油圧ジャッキによる 1 軸圧縮を行い, AE, ひずみを測定する。 面外方向, 曲げ試験, 油圧ジャッキによる 3 等分点載荷し, AE を測定する。 熱冷繰り返し試験, タイル表面 55℃90分加熱, 30℃30分冷却を繰り返し行う。</p>	<p>面内方向の変形と面外方向の変形では, タイル張り層の剥離の発生場所に違いがあることを示した。 タイル張り層は, 界面全体で部分的な剥離, 剥離が緩慢となり応力の集中するタイル張り層周辺部の界面剥離, 界面内部へ進行し剥落, という 3 つの過程を経る。熱冷ムーブメントにより面内, 面外変形が組み合わさった変形が生じる。</p>	<p>タイル張り, 剥離過程, 熱冷ムーブメント, AE 法</p>

<p>タイル直張り仕上げのひずみ追従性および引張接着強度に及ぼす薄塗りモルタルの影響 名知, 久住, 小笠原, 鳥山, 2004 年 学術講演概集, 日本建築学会</p>	<p>試験体は 100×100×650mm の下地コンクリートに二丁掛けタイル(10, 20mm), 目荒らし(サンダー掛け, 無処理), タイル張り下地(コンクリート, 薄塗りモルタル), 張付け材料(現場調合張付けモルタル, 弾性接着剤)の種類を変えて作製する。</p>	<p>ひずみ追従性試験後, 標準養生と熱冷繰返し養生を行った後, 引張接着試験を行う。</p>	<p>熱冷繰返し後の引張接着強度は, 標準養生後と比較すると, 現場調合モルタルでは若干低下し, 弾性接着剤では若干増加することがわかった。現場調合モルタルでタイル張りした場合, ひずみ追従性に影響を及ぼす要因は, タイル&gt;ランプ照射≒目荒らし&gt;薄塗りの順となり, その中で, 薄塗りモルタルの影響は, 相対的に小さかった。目荒らしを施さない仕様およびランプ照射面は, ひずみ追従性試験によって, タイル張り全面にわたる破壊が進展した。弾性接着剤でタイル張りした場合, タイル張り端部では, 破壊ポイントが確認され, ランプ照射面に厚いタイルを使用した仕様のひずみ追従性が低下した。しかし, 中央部のタイル張り層は破壊に至らず, 現場調合モルタルの結果と比較して, 優れたひずみ追従性が確認された。また, 目荒らしや薄塗りモルタルは, ひずみ追従性にはほとんど影響しなかった。引張接着強度は, ランプ照射面で 70%以上, 非照射面で 85%以上の強度残存率となり, 十分な引張接着強度が保持されていた。</p>	
<p>外断熱改修工法における躯体コンクリートと断熱材貼付けモルタルの付着強度 清水, 長谷川, 2005 年 学術講演概集, 日本建築学会</p>	<p>100×100×50mm のコンクリートで, コンクリートの品質(水セメント比), 水中養生後の乾燥時間, 施工(接着モルタル塗布時)温度の違いでそれぞれ作成。接着モルタル塗布後 1 週間で, 鋼板を接着</p>	<p>付着強度試験, JIS A 9615 に準じて行い, 付着面積は 70×70mm。剥離箇所も調査する。</p>	<p>コンクリートの水セメント比が大きく, 施工温度が低い時が最も付着強度が小さい。水セメント比が 70%では, 55%の試験体と比べて, 強度が約半分程度に小さい。また施工温度の影響が小さい。高含水では, 界面強度が弱いいため付着強度も小さいが, 乾燥してくると界面強度が強くなり, 付着強度は大きくなる</p>	<p>外断熱改修, 躯体コンクリート, 断熱材貼付けモルタル, 乾湿程度, 施工温度, 付着強度</p>

日本建築学会学術講演梗概集 (2005)

文献 著者, 作成年	試験体	試験方法	試験結果	キーワード
<p>仕上げ材がコンクリートの乾燥収縮に及ぼす影響に関する研究 成田, 今本, 石井, 2005 年 学術講演概集, 日本建築学会</p>	<p>300×300×180mm のコンクリート板の端面にアルミ箔テープでシールする。試験体内に歪みゲージ, 湿度センサーを設置する。スライス試験体は直径 100mm, 長さ 200mm を厚さ 20mm にスライスし</p>	<p>歪みゲージ, セラミック湿度センサーを取り付け, 収縮歪みと内部拘束歪みを計測する。スライス試験体に湿度センサーとパイゲージを取り付け, 非拘束収縮歪みを計測する。</p>	<p>タイル, 弾性複層塗材はコンクリートの乾燥収縮の進行を抑制する効果大きい。仕上げ材を施すことにより, 部材内部の湿度勾配による内部拘束ひずみが低減される。仕上げ材の適切な施工は, この点において, コンクリートのひび割れ抑制に有効と考えられる。</p>	<p>収縮ひずみ, 内部拘束ひずみ, 非拘束ひずみ, 内部相対湿度, 抵抗値</p>

	た試験体である。			
セメント系表面被覆材による RC 造の劣化防止に関する研究 谷口, 佐川, 桂, 2005 年学術講演概集, 日本建築学会	(中性化)100×100×400mm のコンクリート基盤を打設面と底面をシールし, 側面 2 面を試験面とする。セメント系表面被覆材を材令経過後すぐのもの, 中性化したものそれぞれに塗布する。 (凍害)100×130×100mm の基盤コンクリートの打設時の側面部分を試験面とし表面被覆材を塗布し, 外周を防水する。低温下での強度発現性, 表面被覆の種類を変え, 養生温度(20℃, 3℃, -3℃)でそれぞれ養生する。	(中性化試験)20℃60% 恒温恒湿室で 4 週間養生し, JIS A 1153 に準じて行い, 基盤コンクリート部分のみの中性化深さを測定する。細孔構造測定も行う。 (凍結融解試験)基盤を凍結融解させ, 測定はコンクリートの凍結融解抵抗性試験方法(CDF 試験)に準じて行う。 低温下での強度発現性, 圧縮強度, 曲げ強度, 付着強度を調べ, 方法は JIS A 1171 に準じて行う。	促進中性化試験では, セメント系表面被覆材を塗布することで, 基盤コンクリートの中性化の進行は抑制される。 CDF 試験では, ポリマーが混入されたセメント系表面被覆材は, コンクリートの表層の劣化に対する保護効果が認められる。 ポリマー混入の無い珪砂モルタルは低温下で, 圧縮, 曲げ強度は大きく低下する。養生途中で温度上昇しても強度回復の程度は小さい。付着強度は低温, 20℃養生ともほとんど発現しない。 ポリマーが混和された表面被覆材は低温下で圧縮, 曲げ強度は大きく低下したが, 養生途中で温度上昇により強度回復が認められる。付着強度は低温下での低下が認められる。	セメント系表面被覆材, 保護効果, 中性化, CDF 試験, 付着強度, 養生温度

日本建築学会学術講演梗概集 (2006)

文献 著者, 作成年	試験体	試験方法	試験結果	キー ワード
剥離防止性能が高いタイル先付け PC 工法の研究 岡田, 小笠原, 栗秋, 犬飼, 2006 年学術講演概集, 日本建築学会	コンクリートの試し練りによる計画調合の決定, 中流動コンクリートを先付けタイルを配列・固定した実物大壁型試験体への打設を行う。 1000 × 1200 × 160mm の先付け壁面に裏足ありのタイルを張り付けて, 中流動コンクリートを打設し, 作製する。	中流動コンクリートの充填性能は, 実物大壁型試験体へのコンクリートの打込みおよび振動締固めに要する時間をもって評価する。 実物大壁型試験体に用いたコンクリートの圧縮強度の値が設計基準強度(30N/mm <sup>2</sup> )以上であることを確認した後, 接着強度試験を行った。	良好な充填性を得るために, 中流動コンクリートを計画調合した。中流動コンクリートは, 現行コンクリートと比較して, きわめて大きな充填性能を有する。 PC 板に中流動コンクリートを適用することで, 先付けタイルの接着性能は向上すると考えられる。	タイル, PC, 充填性, 中流動コンクリート, 剥離, 接着性
剥離防止性能が高いタイル先付け PC 工法の研究 小笠原, 栗秋, 犬飼, 岡田, 2006 年学術講演概集, 日本建築学会	テーパー, 裏足の有無の各条件のタイルを用い, 先付け PC 工法で試験体を作製する。 目地の保持性能, 変形追従性能, タイル形状別の接着性能, 曲げ載荷後の接着性能を調べるため, それぞれ試験体を作製する。	(目地の保持性能)裏足が無く, テーパーの有無のタイルで検討。試験体を 20℃で 28 日間養生後, 建研式引張試験機で測定する。 (変形追従性)20℃28 日室内養生を経て, 熱冷繰返し(80℃80 分, 散水冷却 40 分)を 300 回行い, 圧縮試験器を用い, ひずみを測定する。 (タイル形状別)20℃28 日養生した後建研式接着力試験機を用いて接着力を測定する。 (曲げ載荷後)試験体を気中にて 28 日養生後曲げ載荷試験で組成変形させ, タイル剥落枚数, 接着強度を測定する。	目地の保有性能としては, テーパーがある場合, 無い場合に比べ, 約 74%の保持性能が向上することがわかった。 タイル裏面がコンクリートと接着していない場合でも目地拘束の効果により, 600 μ以上のコンクリート歪みまで追従できる。タイル厚さが厚く, かつテーパーを付与したタイルの方が変形追従性に優れている。 テーパー付きタイルを用いた先付け PC 板は, くさび状の目地が形成され, タイル保持性能が高く, 変形追従性に優れていることが確認された。 また, 目地を含めた接着性能に優れていることが確認され, 特に裏足形状を大きくしたことにより充填性が向上し, コンクリート打設時の空隙を軽減する効果が高いといえる。	タイル, PC, 剥離, 追従性, 接着性, 曲げ

文献 著者, 作成年	試験体	試験方法	試験結果	キーワード
モルタルの乾燥収縮に着目した外壁タイルの剥離メカニズムに関する研究 今井, 衣笠, 古賀, 2006 年学術講演概集, 日本建築学会	(そり)セメント砂比(1:1/1:0.5/1:0.25),モルタル厚(2.5, 5.0mm)とした。目地方向(縦長方向 L/横長方向 S),初期養生時の下地(P:ポリエチレンフィルム「無拘束下地」/G:ガラス板「拘束下地」)の組み合わせ各 3 体の計 72 体の試験体を作製。(追従性)鉄筋(D19)を中央に通した 100×100×400mm のコンクリートにタイルを張り付け, 28 日養生した試験体を作製する。セメント砂比(1:1/1:0.5/1:0.25),モルタル厚(2.5, 5.0, 10.0mm)の組み合わせで試験体を作製。	(そり)タイルにモルタルを塗りつけた試験体を乾燥・水中養生を繰り返し, 試験体のそり量の変化を測定し, モルタル側表面の収縮率を算出する。同時に型枠内面にテフロンシートおよびポリエチレンフィルムを敷き, 20℃RH60%室内でモルタルを充填した直後に表面をポリエチレンフィルムで封緘した状態で 24 時間後の硬化収縮量を, またその後上面のポリエチレンフィルムを取り外した状態で 28 日までの乾燥収縮量をコンパレータ法で測定する。 (追従性)試験体を 70℃で 20 時間強制乾燥した後, 引張試験機を用いて鉄筋を引張り, コンクリート表面とタイル表面のひずみを測定する。	タイルのそりにはモルタルの乾燥収縮の影響が大きい。そり量はセメント砂比, モルタル厚と弾性係数比のバランス(mm <sup>2</sup> =1 で最大)により変化する。タイルからの拘束により発生するモルタルのひび割れ発生により, 一定以上のそりは生じない。剥離応力に対してモルタルの乾燥収縮の影響が大きいことが確認された。	収縮, タイル, 剥離, そり, モルタル, パイメタル, せん断応力, ムーブメント
外壁タイルの付着性能に関する検討 佐々木, 稲葉, 閑田, 巴, 2006 年学術講演概集, 日本建築学会	(張り付けモルタルの材料物性試験)既製調合モルタルの調合を標準とし, 砂セメント比および樹脂量を実験要因として 5 種類の張り付モルタルを作製する。砂セメント比は 0.25, 0.50, 1.00, の 3 水準, 樹脂量はセメント重量の 0.4, 16% の 3 水準とする。(外壁タイルの温冷繰返し試験)モルタルは上述と同様。熱膨張試験体は 300×300mm とし, 厚さはモルタル 8mm, コンクリート 150mm としタイルを張り付ける。温度分布試験体は外壁を模擬している 880×880×150mm のコンクリートに 600×600mm でタイルを張り付ける。	(材料物性試験)弾性係数は JIS A 1149 に, 圧縮強度は JIS A 1108 に従い, 材齢 3, 7, 14, 28, 91 日に測定する。クリープは JIS 原案に従う。収縮ひずみは, ひずみ計を埋め込んだ角柱試験体を 20℃60%の環境下に静置し, 材齢 3, 7, 14, 28, 91 日に測定する。熱膨張係数は温度変化によるひずみから計算する。(温冷繰返し)熱膨張試験体中央にひずみゲージおよび熱電対を貼り付け, 温度変動時(10℃4 時間, 50℃4 時間の繰返し)の温度およびひずみを計測する。温度分布は温冷および日射・散水試験を行う。	熱膨張係数は, タイルが 4.5 μ/℃, モルタルが 15~17 μ/℃, タイル+モルタルが 8.0 μ/℃, コンクリートが 12.3 μ/℃であった。タイル表面側を日射・散水した場合, 最高温度はタイル表面が 65℃, 界面が 57℃, コンクリート内部平均が 46℃であった。タイル張りモルタルとコンクリートのひずみ差は, 壁体拘束率 0.5 の場合, 最大で 300 μ程度となる可能性がある。	張り付けモルタル, 圧縮強度, 弾性係数, クリープ, 乾燥収縮, 熱膨張係数, 温冷繰返し, ひずみ差