

断熱材下地へのタイル直張り工法の適用に関する研究

Study on Application of Tile Facing to Thermal Insulation Material Substrate

高松 誠*1
Makoto Takamatsu

要旨

外断熱建物のタイル施工では、断熱材に張付けモルタルを使用して直張りを行う工法が実用化されている。しかし、接着性能について十分な究明が行われていない。本研究では、断熱材にタイルを直張りした際の接着性能を検証することを目的に、暴露実験を行った。実験では、タイルの接着性能のほか、日射によるタイル面の変形性能についても解析を行った。その結果、タイル面に発生する界面応力は、断熱材が弾性体として作用することで緩和され、また、変形追従性にも優れることから、十分なタイルの剥離防止性能を有することが明らかとなった。なお、本研究は建設会社、材料メーカーなど10社による共同研究である。

キーワード：外断熱 タイル直張り 暴露試験 剥離防止 界面せん断応力

1. はじめに

建築物に対する省エネルギー対策の社会的要求が高まる中、外断熱工法が注目されている。最近では、次世代省エネルギー基準における地域区分がIVに位置する建物においても採用されるケースがある中、意匠として根強い要求のある外壁へのタイル張り工法は、外断熱建物においても採用されている。

外断熱建物におけるタイル張りの場合、被着体がコンクリートと比べて強度の低い断熱材となるため、タイルの引張接着強度は必ずしも JASS19¹⁾の $0.4\text{N}/\text{mm}^2$ 以上を満足しない場合が想定され、剥離・剥落の問題が懸念される。

一方、張付けモルタルでタイルを直張りした外断熱建物を調査した際、3年後の引張接着強度は $0.4\text{N}/\text{mm}^2$ 以下であったものの、浮き・剥離などの現象は見られなかった。また、暴露1年の試験体では、使用した断熱材の引張強度(約 $0.5\text{N}/\text{mm}^2$)以上を有していた。さらに、既往の研究^{2),3)}では、剥離原因の外力に対し、接着層に弾性体がある場合、発生応力の低減に有効であるとも報告されており、断熱材へのタイル張りの場合、剥離抑制機能として断熱材が作用することが考えられる。しかし、接着性能に関する研究例は少なく、不明な点が多い。

そこで、本研究では、張付けモルタルによる断熱材下地へのタイル直張り工法(以下、本工法と称す)の接着性能を検証するため、実大試験体による暴露実験を行った。

本報告では、暴露実験による計測結果と日射によるタイル面の挙動に関する解析結果について報告する。

なお、本報告は、2009年度日本建築学会大会(東北)学術講演会にて報告された「断熱材下地へのタイル直張り工法の適用に関する研究(その1~その5)」に加筆、修正したものである。

2. 実験概要

2.1 試験体の概要

試験体の下地構成を表1に、試験体の形状を図1に示す。

断熱材は、炭酸カルシウムを主成分とした不燃性を有する炭酸カルシウム発泡体(900×900、厚20mm)を使用した。

試験体は、型枠に断熱材を5,640×1,140mmで水平に敷設後、厚さ120mmにコンクリートを打設したものを2体作製し、一方には断熱材ジョイント部にメッシュ補強(巾200mm、補強モルタル貼り厚3mm)を施した。また、タイル張り面を横6×縦3に区画割り(1区画:900×300mm)し、タイル張り以外の面は、日射を遮断するため断熱材及び合板で被覆した。なお、コンクリート打設は平成19年4月20日に行った。

表1 試験体の下地構成

項目	内容
コンクリート	Fe24, W/C57%, ステンブ 18cm, 厚 120 mm
鉄筋	溶接金網 6.0mm@150
断熱材	炭酸カルシウム発泡体, 厚 20 mm
大きさ	5,640×1,140 mm
数量	2体
メッシュ	ファイバーグラスネット, 巾 200 mm
メッシュ補強モルタル	アクリル樹脂モルタル, 厚 3 mm

*1 技術研究所 文化財保存技術研究部門

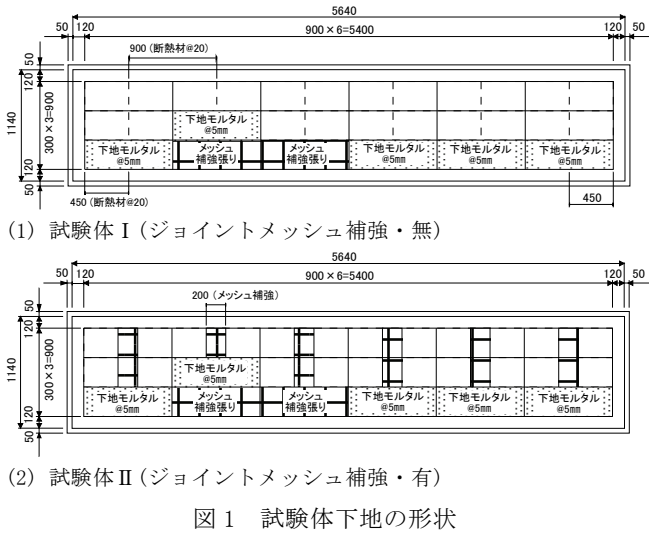
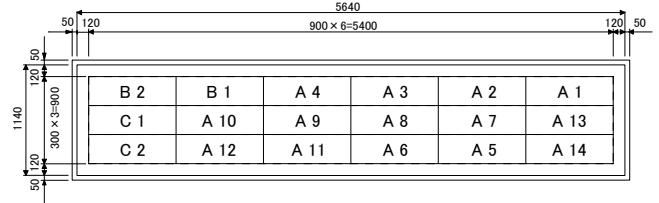


表3 タイル張り使用材料

項目	内容
タイル	50 二丁磁器質モザイクタイル(暗黒色)
張付けモルタル	セメント系既調合張付け材 (樹脂入り、樹脂無し)
タイル張り接着剤	一液変成シリコン系弾性接着剤
下地調整モルタル	セメント系下地調整材, 厚 5 mm
吸水調整材	エチレン酢酸ビニル共重合エマルジョン(5倍液)
目地材	モルタル目地: セメント系既調合目地材 伸縮目地: 一液変成シリコン系



2.2 タイル張付け工法の概要

表2にタイル張り仕様(18種類)を、表3にタイル張り使用材料を、図2に試験体へのタイル張り工法の配置を示す。

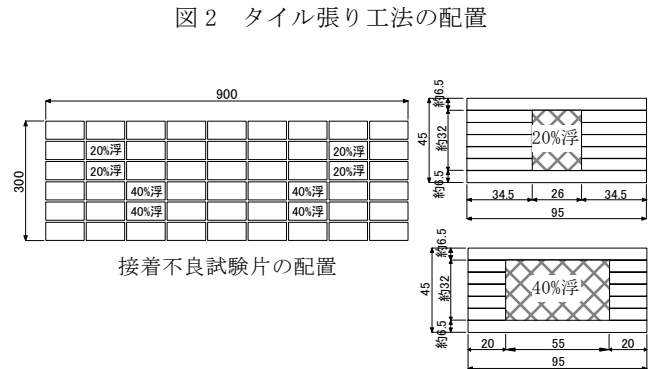
タイル張付け工法は、(A)モザイクタイル張り、(B)改良圧着張り、(C)接着剤張りの3工法とした。また、実験水準は、張付けモルタルの種類、塗厚、吸水調整材の有無、下地調整モルタルの有無、オープンタイム、メッシュ補強の有無とした。さらに、接着面積による強度影響を確認するため、図3に示すように、張付けモルタルの接着率が100%全面(以下、健全部と称す)のタイル片に対し、80%接着(20%浮)、60%接着(40%浮)のタイル片を、1区画に4箇所ずつ配置した(以下、不良部と称す)。

目地は、区画内は全てモルタル目地とし、区画間の横目地は伸縮(シーリング)目地、縦目地はモルタル目地とした。

表2 タイル張り仕様

区画	工法	張付けモルタル	塗り厚(mm)	吸水調整材	下地調整モルタル	下地メッシュ	オープンタイム(min)
A1	モザイク	PCM	4	有	無	無	3
A2							10
A3		CM	2	無	無	有	3
A4							15
A5		PCM	4	有	有	無	3
A6							10
A7		PCM	2	無	無	有	3
A8							10
A9		PCM	4	無	有	有	3
A10							3
A11		PCM	2	有	有	有	3
A12							10
A13		PCM	4	無	有	有	3
A14							10
B1	改良圧着	-	5	有	無	有	3
B2							10
C1	接着剤	-	-	-	有	有	3
C2							10

* 張付けモルタル: PCM(樹脂入り)、CM(樹脂無し)
* 改良圧着 : 塗り厚5mm(しごき1mm+マスク4mm)



2.3 暴露試験の概要

試験体の製作と暴露実験は、つくば市の鴻池組技術研究所の敷地内で行った。暴露試験状況を写真1に示す。

試験体は、コンクリート打設1週後に脱型、直ちに正北面・角度水平85度で設置し、その約2週間後(5月9日)にタイル張りを行った。さらに、タイル施工後の材齢約1ヶ月(34日)で、試験体の方向を正南面・角度水平30度にかえ、翌年3月末まで暴露を続けた。

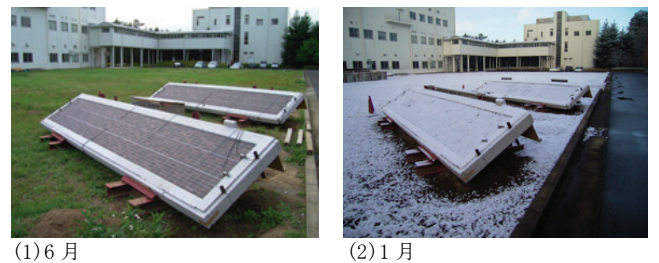


写真1 暴露試験状況

2.4 温度・歪・変位計測の概要

表4に計測概要を、図4(1)・(2)に暴露試験体Ⅰの計測位置を、写真2、写真3に計測状況を示す。

表 4 温度・歪・変位計測の概要

項目	内容
計測点	試験体Ⅰ 上段：中央、1/3・1/6 スパン、両端部 中段：中央、1/3・1/6 スパン、両端部 下段：中央 試験体Ⅱ 上段：中央、1/3・1/6 スパン、両端部 中段：中央、1/3・1/6 スパン、両端部 下段：中央
計測項目	中央：温度(タイル表面、部材界面、コンクリート裏側) タイル表面歪(単辺・長辺方向) 1/3、1/6 スパン：タイル表面歪(長辺方向のみ) 両端部：全体変位(長辺方向) その他：日射量(水平・傾斜)
記録装置	データロガー、スイッチボックス
計測センサー 計測点数	温度：T 熱電対 10 点×2 体 歪：歪みゲージ(6 mm) 10 点×2 体 変位：亀裂変位計 2 セット(4 点)×2 体 日射量：日射計 2 点

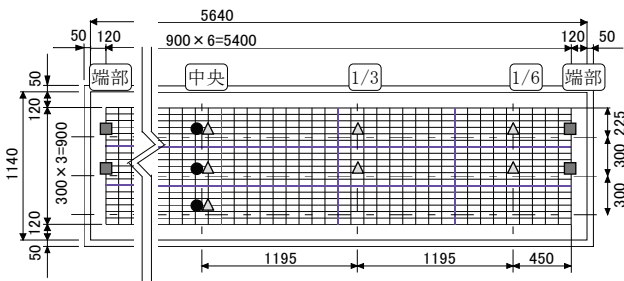


図 4(1) 計測位置(平面)

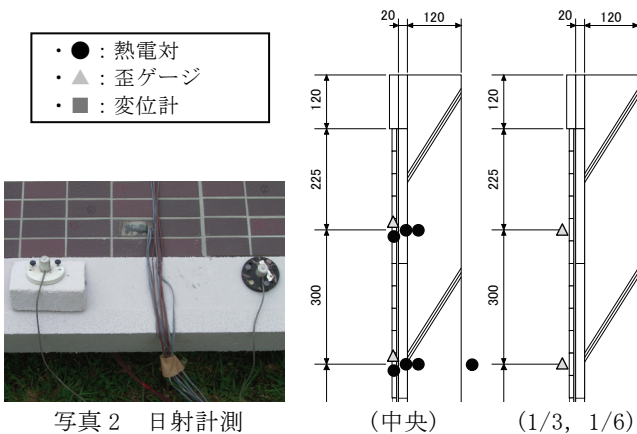


図 4(2) 計測位置(断面)

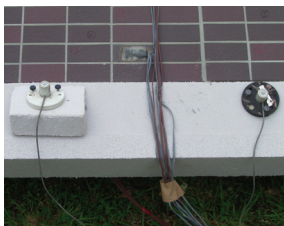


写真 2 日射計測

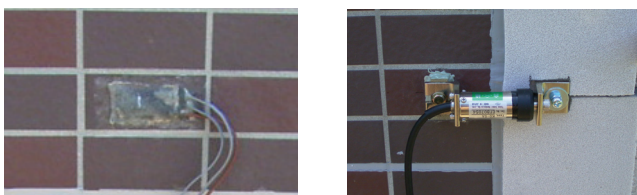


写真 3 計測状況(左：温度・歪、右：変位)

温度は、T型熱電対を用い、試験体中央のタイル表面、タイル-断熱材-コンクリートの各界面およびコンクリート

裏側の雰囲気温度を計測した。タイルの表面歪は、ゲージ長さ6mmの箔ゲージを用い、試験体中央及びスパンの約1/3、1/6に位置するタイル面を計測した。さらに、試験体の両端部では、躯体コンクリートとタイル間の変位、すなわち試験体長辺方向におけるタイル全長の相対変位を、変位計(精度1/400mm)を用いて計測を行った。

計測は、暴露期間中、連続計測である。

なお、タイルの表面温度は、熱電対と同じ位置に取付けた歪ゲージの防水処理(ブチルテープの被覆)の影響をキャンセルする必要があったため、別に補正値を求め、補正後の温度をタイル表面温度とした。また、タイルの表面歪についても、熱影響による歪ゲージの温度特性をキャンセルするため、使用タイルの線膨張係数(0.536×10⁻⁵/°C)より求めた換算式により、実測値の補正を行った。

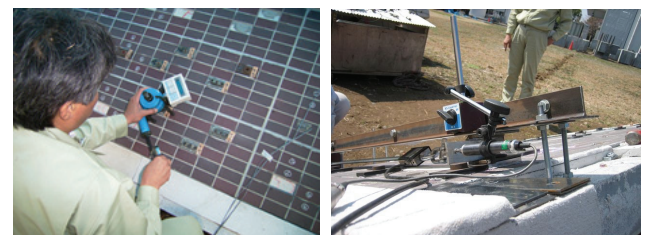
2.5 接着性能試験

表 5 にタイルの接着性能試験の実施項目を、写真 4 に接着性能試験の状況を示す。

引張接着強度試験は、タイル施工後の材齢約 1 ヶ月(34 日)、試験体の方向を正南面としたあとの夏期暴露後の材齢 6 ヶ月(176 日)、冬期暴露後の材齢 10 ヶ月(322 日)の 3 回行った。また、材齢 13 ヶ月(399 日)には変形追従性能を確認するため、引張接着強度と引張変位量の計測を行い、せん断接着強度試験は材齢 10 ヶ月にそれぞれ行った。

表 5 接着性能試験 実施項目

分類	試験項目
破壊試験	・引張接着強度試験 ・せん断接着強度試験
非破壊試験	・テストハンマーによる打音検査 ・剥離検知(弾性波法) ・赤外線サーモグラフィー



(1) 引張接着強度試験

(2) せん断接着強度試験



(3) 剥離検知器検査

(4) 赤外線サーモグラフィー

写真 4 接着性能試験の状況

一方、非破壊による試験では、テストハンマーによる打音検査、弾性波法による剥離検知^{4)、5)}、赤外線サーモグラフィ撮影を行った。しかし、タイル接着の健全性を確認できる有効なデータ（本報告では、測定結果を省略）は得られなかったため、さらに有効な非破壊検査法について検討する必要があるものと判断された。

2.6 耐凍害性能試験

本工法の耐凍害性を検証するため、試験装置を使用した凍結融解試験、さらに、強制的にタイル裏面に含水させる耐凍害性試験を行った。

2.6.1 凍結融解試験

試験体の概要を図5に、試験体の仕様を表6に示す。

タイル張付け材は、暴露試験体と同様の3種類とした。

試験体は健全部と、タイル裏面のの上辺中央部に脱脂綿を挟んだものと、その脱脂綿に含水させる2種類の不良部を作製し、凍結融解試験後に引張接着強度を測定した。凍結融解試験は、JIS A 1435「建築用外壁材料の耐凍害性試験方法(凍結融解法)」3.3 気中凍結水中融解法を参考に、表7に示す方法で行った。

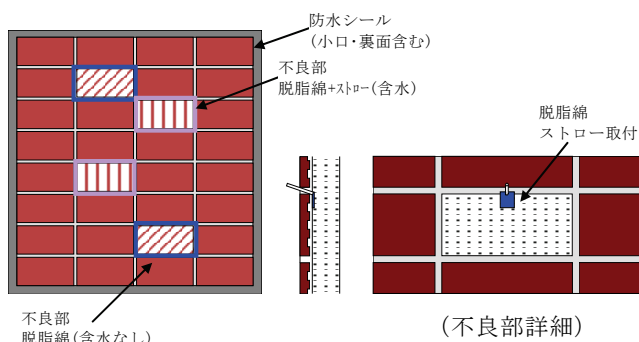


図5 凍結融解試験体の概要

表6 凍結融解試験体の仕様

項目	内容
タイル張付け材	・セメント系既調合張付け材(樹脂有・無) ・一液変成シリコン系弾性接着剤
不良部	・1 cm角の脱脂綿+含水ストロー取付 ・1 cm角の脱脂綿
試験体寸法	・400×400(タイル面以外はシール防水)
断熱材	・炭酸カルシウム発泡板 t=20 mm
タイル	・50 二丁磁器質モザイクタイル
塗り厚	・モルタル：4 mm、接着剤：3 mmくし目
目地	・セメント系既調合目地材
工程	・タイル張り：11/7、目地詰め：11/14 ・養生：室内20℃、60%R.H.、28日間 ・引張接着強度試験：2008/1/21(一部、1/28)

2.6.2 暴露試験体による耐凍害性試験

屋外暴露環境下の凍害影響を確認するため、暴露試験体において、引張接着試験後のタイル復旧時に、前項と同様

表7 凍結融解試験条件 (JIS A 1435-1991)

項目	内容
試験条件	・冷却時の温度 $-20 \pm 2^\circ\text{C}$ ・融解時の最高温度 $10 \pm 2^\circ\text{C}$ (融解水 10°C) ・試験体は凍結融解試験に先立ち、48時間水中に浸漬 ・試験開始：室温(20°C) ・凍結融解1サイクル 4時間 (気中凍結3時間、水中融解1時間) ・サイクル数：200サイクル(約34日)
試験期間	・開始12/6 ~ 終了1/9
試験装置	・多目的凍結融解試験装置

の不良部(タイル裏面への脱脂綿を挟み込み・含水あり)を作製し、所定の暴露期間が経過後、引張接着強度の測定を行った。試験は、タイル張付けと目地詰め(11月7日施工)後、約5ヶ月経過してから行った。なお、この期間の外気温は、 -0.5°C を下回った日数は65日、 -2.0°C では43日、 -5.0°C では8日であった。

3. 実験結果と考察

3.1 温度、歪、変位計測

3.1.1 温度

試験体Iと試験体IIでは、計測された温度に大きな差はなかったため、代表値として、図6に試験体Iの上段位置の計測値のうち、最高・最低温度を記録した8月、2月のそれぞれ3週間の結果を、図7に8月15日と2月18日の日内温度変化を示す。

8月では、タイル表面の日中の最高温度は $60 \sim 75^\circ\text{C}$ となり、各界面の温度は順次コンクリート版裏側の雰囲気温度に漸近している。特に断熱材の表裏で温度が急激に変化していることがわかる。2月では、タイルの表面温度が 40°C

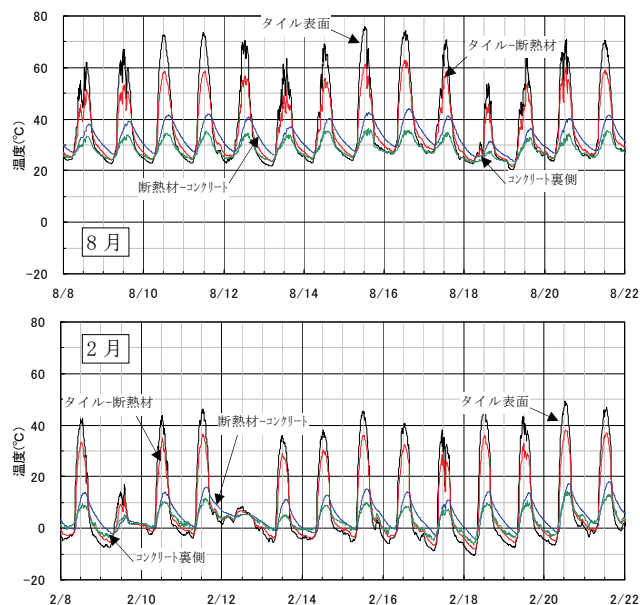


図6 温度計測結果 (試験体I・上段)

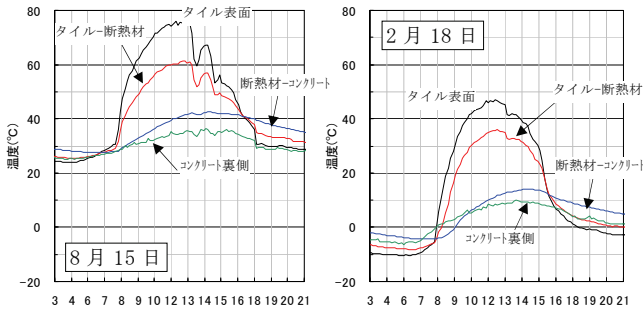


図7 日内温度変化(試験体I・上段)

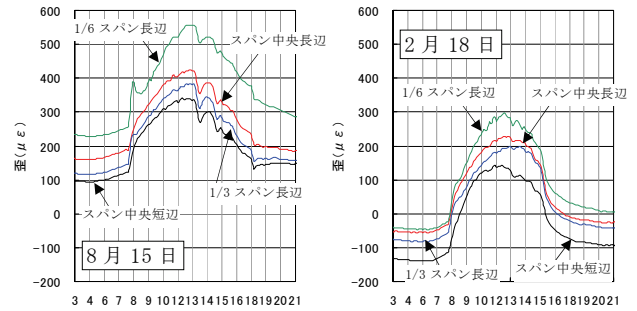


図9 日内タイル表面歪変化(試験体I)

を超える日が記録される中、凍結融解を受ける氷点下 5～10℃まで下がる日も数日観測された。また、日内の温度変動をみると、8月15日の温度差は最大で 51.9℃、2月18日では 57.5℃となり、温度変動が顕著である。特に冬期の方が、夏期より約 5℃大きく変動している。

3.1.2 タイル表面の歪

代表値として、試験体 I について前項と同じ計測期間の結果を図 8 に、8月15日と2月18日の日内のタイル表面歪の変化を図 9 に示す。なお、図中の+値は膨張側を表す。

8月の日中において、タイル長辺方向の最大歪は 300～400 μ を超える一方、夜間では 100～200 μ 前後までしか下がらず、タイル面に膨張側の歪が残留している。2月では日中の最大歪は 200 μ を超える日もあるが、夜間は、一部を除いて、収縮側へと移行し、短辺方向では日中においても収縮側に歪が残留している。また、歪の日変動をみると、長辺方向は8月15日が約 260～355 μ、2月18日は約 250～380 μ、短辺方向は順に約 220～260 μ、約 260～330 μ を示し、ともに日内で歪は大きく変動し、特に2月の冬期の方が変動幅は大きい傾向にある。

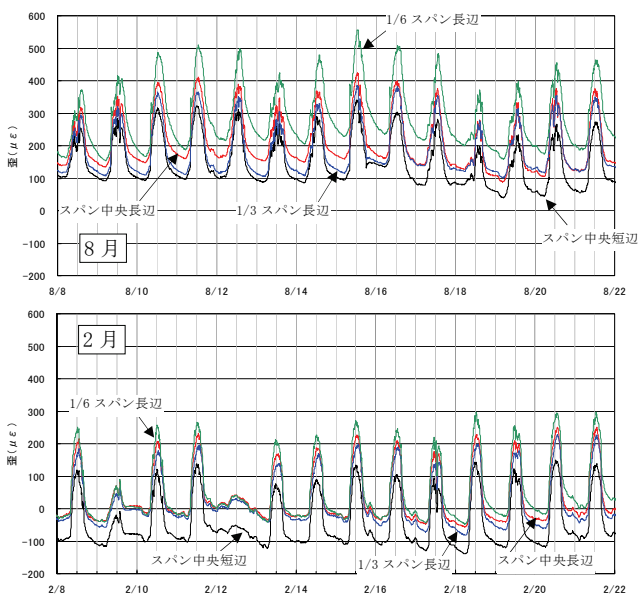


図8 タイル表面歪計測結果(試験体I)

3.1.3 長辺方向全体の変位

図 10 に長辺方向の全体変位の計測結果を示す。

計測値は右上がりの勾配を示し、タイル面全体の相対的な伸びを表している。2月地点での伸び量は、試験体 I の上段が約 1.6 mm、中段が約 1.3 mm、試験体 II の上段が約 2.1 mm、中段が約 2.0 mm であり、相対的な伸びは上段及び試験体 II の方が僅かに大きい傾向である。一方、2月地点の変位の実測値は、材齢約 300 日におけるコンクリート版の乾燥収縮率約 250 μ (推定値⁶⁾) と概ね一致していることから、タイル面全体の伸びはほとんどないものと結論付けられる。これは、実測値が端部のタイル張付け面とコンクリート版(試験体)との変位のみを計測したものと考えられる。また、変位の日変動は 0.1～0.2mm 程度(変化率で示すと 18～35 μ 程度)であり、歪の計測値と比較するとかなり小さくなる。この理由として、タイル面の反り、目地材の伸縮などが影響したと思われる。

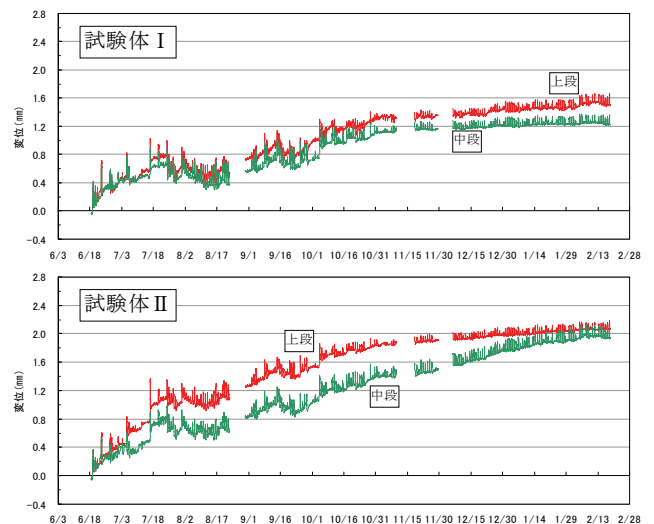


図10 試験体全体変位の計測結果

3.2 タイルの接着性能

3.2.1 引張接着強度試験

1) 材齢の比較

図 11 に材齢 1 ヶ月、6 ヶ月、10 ヶ月のタイルの引張接着

強度の測定結果を示す。

材齢1ヶ月の全体平均は、試験体Ⅰが0.36N/mm²、試験体Ⅱは0.34N/mm²、材齢6ヶ月では試験体Ⅰが0.43N/mm²、試験体Ⅱは0.46N/mm²、材齢10ヶ月では試験体Ⅰが0.46N/mm²、試験体Ⅱは0.43N/mm²である。全体の傾向として、材齢1ヶ月より6ヶ月の方が引張接着強度は高くなる傾向が見られるが、6ヶ月から10ヶ月での強度上昇は見られない。また、0.4N/mm²を下回る個数は、試験体Ⅰでは材齢1ヶ月が72%、6ヶ月は33%、10ヶ月では17%、試験体Ⅱでは1ヶ月が83%、6ヶ月は39%、10ヶ月では33%であった。

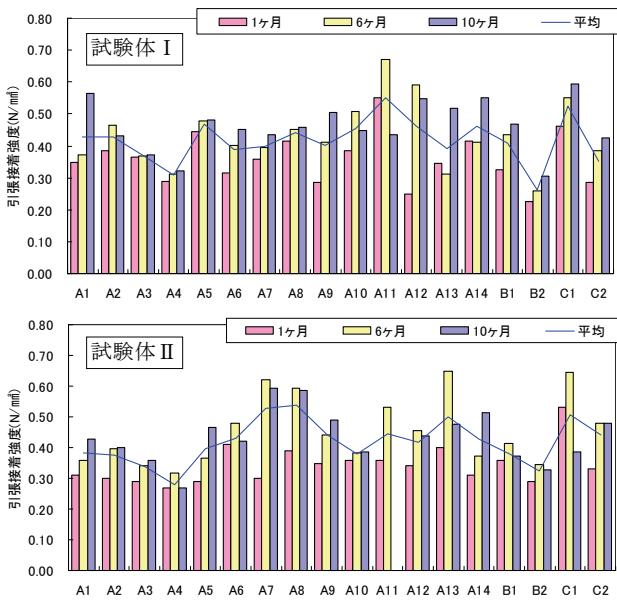


図11 材齢別の引張接着強度 (A:モザイク、B:改良圧着、C:接着剤)

2) 張付け工法の比較

張付け工法を比較した引張接着強度を図12に示す。吸水調整材があるモザイクと改良圧着の比較を①、張付け工法以外は全て同条件の比較を②、下地調整モルタルがあるモザイクと接着剤の比較を③に示す。

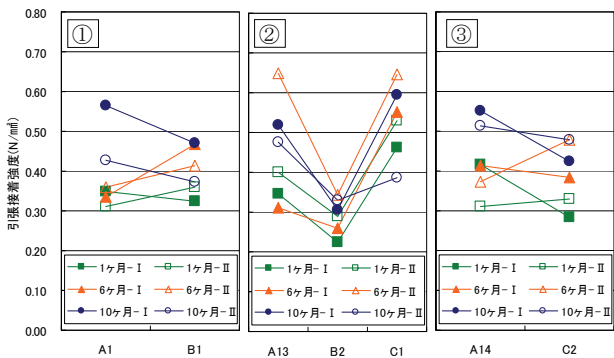


図12 工法別の引張接着強度の比較 (A:モザイク、B:改良圧着、C:接着剤)

モザイクと改良圧着では、吸水調整材がない場合、明らかに改良圧着(B2)の方が引張接着強度は低い傾向にあった。モザイク(A14)と接着剤(C2)を比較した場合、断熱材への直張りとして下地調整モルタルがある場合では、若干の傾向は異なるものの、引張接着強度は同等であるといえる。

3) 張付けモルタルの樹脂有無の比較

モザイクタイル張り工法において、張付けモルタルの樹脂の有無を比較した引張接着強度を図13に示す。吸水調整材がある場合の比較を①、下地調整モルタルがある場合の比較を②、塗り厚が薄い(2mm)場合の比較を③に示す。

吸水調整材がある場合、暴露10ヶ月後に樹脂入り(A1)の方が引張接着強度は高い傾向にあり、塗り厚が薄い場合では樹脂無し(A8)の方が僅かに高い傾向にある。

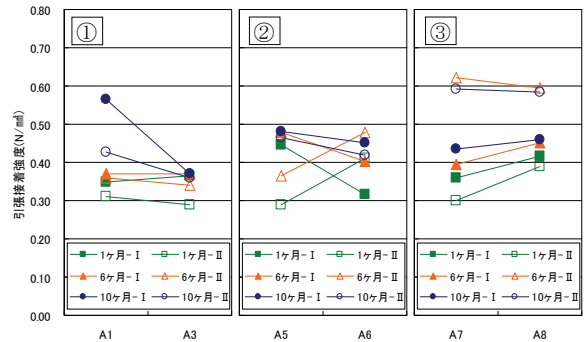


図13 張付けモルタルの樹脂有無別の引張接着強度 (各グラフとも、左側:樹脂入り、右側:樹脂無し)

4) 張付けモルタルの塗り厚の比較

モザイクタイル張り工法において、張付けモルタルの塗り厚を比較した引張接着強度を図14に示す。樹脂入りモルタルの比較を①、樹脂入りでオープンタイムが10分の比較を②、樹脂無しモルタルの比較を③に示す。

全体的に、塗り厚4mmより2mmの方が引張接着強度は大きい傾向が見られ、特に樹脂無し(A3:4mm、A8:2mm)の場合において明確に表れている。

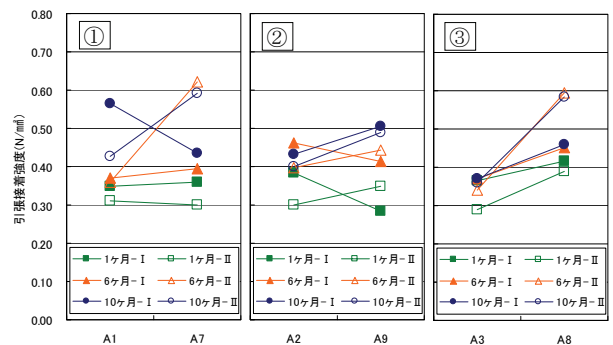


図14 張付けモルタルの塗り厚別の引張接着強度 (各グラフとも、左側:4mm、右側:2mm)

5) 吸水調整材の有無の比較

樹脂入り張付けモルタルにおいて、吸水調整材の有無を比較した引張接着強度を図15に示す。モザイク工法の比較を①、モザイク工法で下地調整モルタルありの比較を②、改良圧着工法の比較を③に示す。

モザイク工法では有意な差は見られないが、改良圧着では吸水調整材無し(B2)の方が引張接着強度は小さい傾向にある。

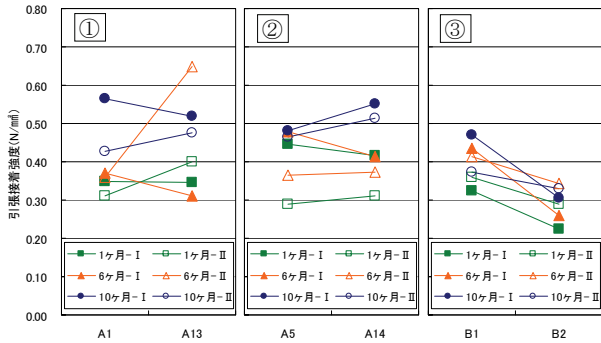


図15 張付けモルタルの吸水調整材有無別の引張接着強度 (各グラフとも、左側：吸水調整有り、右側：吸水調整無し)

6) オープンタイムの比較

モザイクタイル張り工法において、オープンタイムを比較した引張接着強度を図16に示す。樹脂入りモルタルの3分と10分の比較を①、樹脂無しモルタルの3分と15分の比較を②、樹脂入りモルタルで塗厚が薄い(2mm)場合の3分と10分の比較を③に示す。

樹脂入りの場合、3分と10分では引張接着強度に明確な差は見られないが、樹脂無しの3分と15分では、15分(A4)で強度低下が見られる。

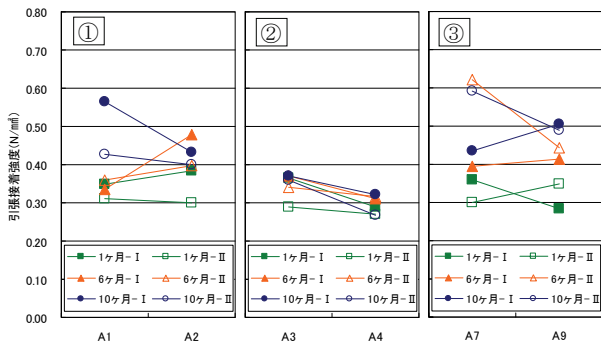


図16 オープンタイムを比較した引張接着強度 (左側：3分、右側：樹脂入り10分、樹脂無し15分)

7) 下地の比較

図17に接着剤の下地調整モルタル有無の比較を示す。

モルタル系張付け材では引張接着強度に差は見られなかったが、接着剤張りでは直張り(C1)は下地調整モルタルが

ある場合(C2)よりも引張接着強度は高い傾向にある。なお、下地メッシュ補強の有無では明確な差は見られなかった。

8) 健全と不良(浮き)の比較

図18にタイル張付け材の接着率が、100%全面接着の健全部と、80%接着(20%浮)、60%接着(40%浮)の不良部の引張接着強度の平均値を比較したものを示す。

60%接着では明らかに引張接着強度は小さくなる。一方、80%接着では試験体Iは健全部と同等であるが、試験体IIでは小さくなっている。

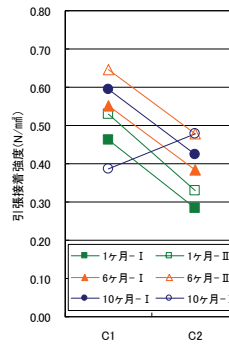


図17 下地調整モルタルの有無の比較(接着剤)

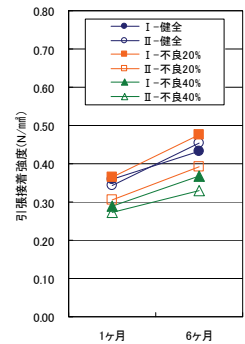


図18 健全部と不良部の比較

3.2.2 引張接着強度試験による変形追従性

図19に引張接着強度試験における荷重-変位曲線の例を示す。

荷重-変位曲線を見ると、載荷初期は荷重と変位量の関係は直線状であるが、徐々に変位量の増加が顕著となった。最大荷重は1.0~2.0kNの間にあり、最大荷重時の変位量は概ね1.0mm前後であった。最大荷重後も直ちにタイルは破断せず、変位量が1.5mm程度に至るまで荷重が緩やかに低下した。その後2~3mmの変位までは0.5kN程度の荷重が保持され、3~4.5mm程度で破断に至った。この破断状況はいずれも同様であり、断熱材下地にタイルを直張りする本工法においては、変形追従性を有しているものと判断された。

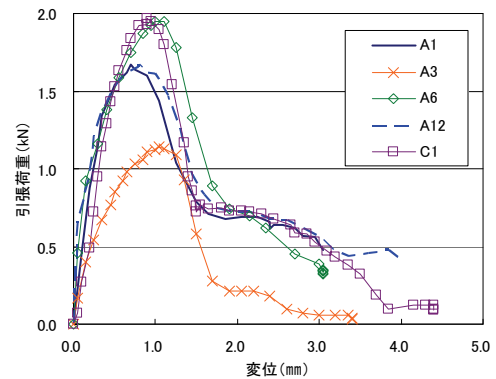


図19 引張接着強度試験 荷重-変位曲線 (試験体I)

3.2.3 セン断接着強度試験

図 20 にせん断接着強度試験における荷重-変位曲線の例を示す。

変位量は、最大荷重に達するまでせん断荷重の増加とともに増加した。一般的に、コンクリート躯体への直張り工法では、最大荷重直後にタイルは破断するものと考えられるが、本工法では最大荷重後もすぐに破断することなく、10 mm程度変形した時点でもある程度の荷重は保持され、変形追従性能を有していることが確認された。また、せん断接着強度は0.15~0.36N/mm²の範囲となったが、A1、A6及びA14では比較的強度は高い傾向を示した。最大荷重時の変位量は3~6 mm程度であった。

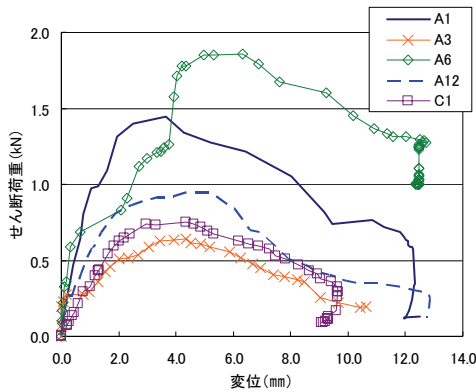


図 20 セン断接着強度試験 荷重-変位曲線 (試験体 I)

接着剤のデータを除いて、同時に確認した引張接着強度とせん断接着強度との関係を図 21 に示す。

せん断接着強度は引張接着強度の 50%程度で、±30%程度のばらつきがみられた。直張り工法において、引張接着強度とせん断接着強度とを同時に実施している既往の研究⁷⁾では、せん断接着強度は引張接着強度に対して 135%程度であったと報告されているが、本工法の結果ではそれと比べると小さい傾向であった。

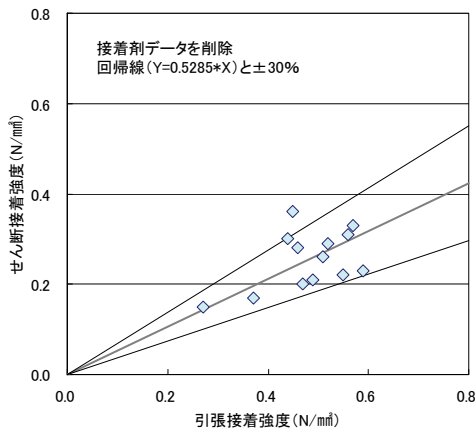


図 21 引張接着強度とせん断接着強度の関係

3.3 耐凍害性能

3.3.1 凍結融解試験結果

凍結融解試験後の引張接着強度試験結果を図 22 に、試験後の破断面を写真 5 に示す。結果は各 2 片の平均値である。

健全部は、試験体形状などが異なることから暴露試験体の結果と一律に比較できないが、同じ仕様の暴露試験体健全部の材齢 34 日の平均値と比較した場合、各張付け材とも 30%程小さくなった。目視観察においてはタイル面の浮きは観察されず、断熱材・モルタルの劣化は見られなかった。

不良部の試験結果は、健全部に対して、セメント系の場合には脱脂綿のみで 20%程度小さくなり、含水させたものではさらに 5%前後小さくなった。これに対し、接着剤の場合には、含水させたものは健全部に比べ 10%ほど小さいが、脱脂綿のみでは引張接着強度の低下は見られなかった。

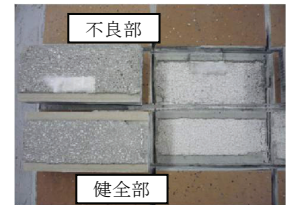
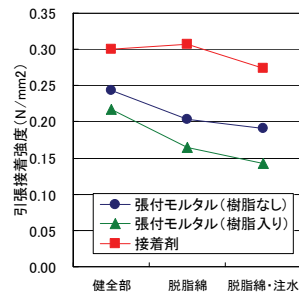


図 22 凍結融解試験結果 写真 5 凍結融解試験後のタイル破断面 (引張接着強度)

3.3.2 暴露試験体による耐凍害性試験結果

図 23 に試験体 II における耐凍害性試験前後の引張接着強度の測定結果を示す。

耐凍害性試験後の引張接着強度は、試験前の材齢 176 日 (6 ヶ月)の結果と比較すると、一部で低下した種類もあるが概ね同程度である。また、ほとんどが図 22 に示した凍結融解試験後の引張接着強度の平均値以上を示しており、本試験の範囲では、凍結融解による影響は見られなかった。

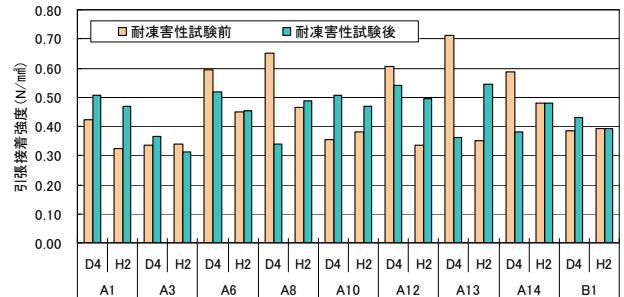


図 23 暴露試験体の耐凍害性試験前後の引張接着強度 (試験体 II、D4:健全部、H2:不良部)

4. タイル面の界面応力と熱変形の検討

4.1 界面せん断応力

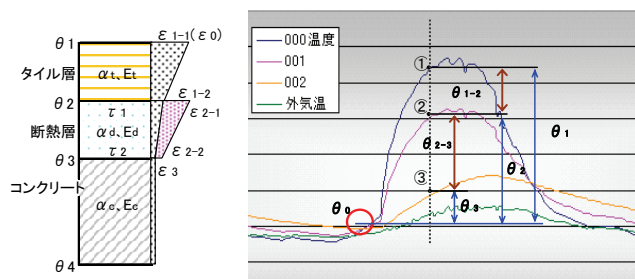
外壁タイルを剥離させる外力は、一般的に①地震時の慣性力(地震ムーブメント)、②日常における乾湿・温冷ムーブメント、凍結融解作用と言われている。

本工法のタイル接着層に作用する剥離外力を検討するため、実験により得られたデータを使用し、タイル(モルタルは一体とする)－断熱材の界面、断熱材とコンクリートの界面に作用するせん断応力の算定を行った。なお、通常のタイル接着面では、界面応力は温冷・乾湿ムーブメントの影響を考慮する必要があるが、本実験では、使用した磁器質タイルと断熱材は吸水性・透湿性が小さいため、乾湿ムーブメントは温冷ムーブメントよりも十分に小さいものと判断し、温度影響のみを考慮した。また、温度上昇下降の過程で、タイル面は凹凸の曲面変形(法線方向)を生じるが、ここでは単純な面内変形とした。

4.1.1 算定条件

図 24 に部材断面に発生するせん断応力の概念図と断面層間温度図を示す。

界面せん断応力は、既往の文献⁸⁾を参考に、タイルと張付けモルタルを一体と考え、タイル－断熱材－コンクリートの各界面に作用するせん断応力(τ)は、各部材の温冷伸縮による変位量(歪)の差が、弾性係数の小さい断熱材に作用するものと想定し、また、温度による応力は、日射の受熱による温度変動によって生じるものとし、日射を受ける直前の温度を基準温度とした。接着界面のせん断応力の算定式を式(1)、式(2)に示す。



(1) 断面応力概念図 (2) 断面層間温度
図 24 界面せん断応力の算定概念

①タイル層と断熱層との界面せん断応力

$$\tau_1 = (\varepsilon_{2-1} - \varepsilon_{1-2}) \times E_d \quad \text{式(1)}$$

②断熱層とコンクリート層の界面

$$\tau_2 = (\varepsilon_{2-2} - \varepsilon_3) \times E_d \quad \text{式(2)}$$

- ε_{1-2} : 張付けモルタル裏面の歪 = $\alpha_t \times \theta_2$
- ε_{2-1} : 断熱材上面の歪 = $\alpha_d \times \theta_2$
- ε_{2-2} : 断熱材下面の歪 = $\alpha_d \times \theta_3$
- ε_3 : コンクリートの歪 = $\alpha_c \times \theta_3$

- E_n : 材料の静弾性係数 (表 8)
- α_n : 材料の線膨張係数 (表 8)
- θ_i : 各面の計測温度－基準温度 (θ_0)
- $\theta_i - \theta_{i-1}$: 層間温度
- ※ 基準温度 : 日射を受ける直前の温度分布結合点の温度
- 基準歪 : 温度分布結合点における各計測歪

表 8 材料物性値

	単位	タイル	断熱材	コンクリート
線膨張係数	$*10^{-5}/^{\circ}\text{C}$	$\alpha_t=0.536$	$\alpha_d=2.871$	$\alpha_c=1.000$
静弾性係数	N/mm ²	$E_t=80000$	$E_d=20$	$E_c=21,000$

4.1.2 算定結果

代表値として、試験体 I の 8 月と 2 月のそれぞれ 2 週間の算定結果を図 25 に、また、8 月 15 日及び 2 月 18 日の日内の界面せん断応力の変化を図 26 に示す。なお、図中の τ_1 はタイル・モルタル－断熱材界面、 τ_2 は、断熱材－コンクリート界面のそれぞれのせん断応力を、上・中・下はタイル張り位置を示す。また、界面せん断応力度の値は、断熱材側が受ける拘束力が圧縮方向の場合を+とする。

界面せん断応力の最大値は、夏期、冬期ともタイル・モルタル－断熱材の界面で 0.015～0.020N/mm²である。既往の研究⁸⁾より、温度応力による最大せん断応力の推定値 0.61～0.71N/mm²に対し、本工法のタイル張り面の界面せん

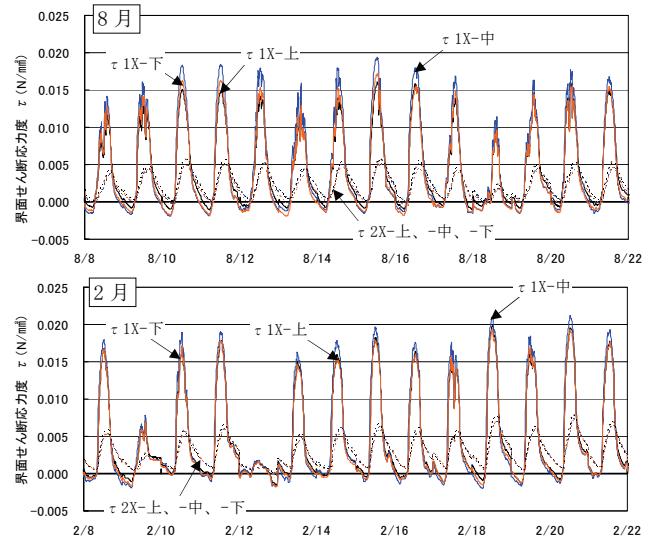


図 25 界面せん断応力の算定結果 (試験体 I)

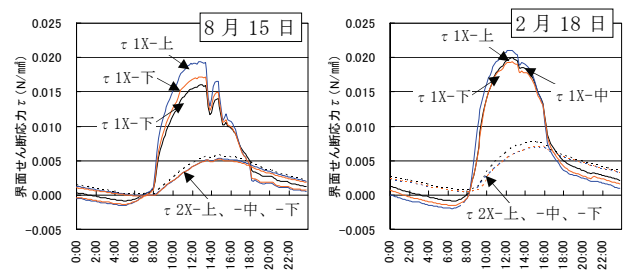


図 26 日内の界面せん断応力の変化 (試験体 I)

断応力は約 1/50～1/30 であり、かなり小さい値となる。また、日射による受熱を開始した時間からの温度上昇の過程において、夏期では 0.010N/mm²近傍まで、冬期では 0.015N/mm²近傍までそれぞれ急激な上昇を示している。

4.1.3 必要接着強度の考察

本工法のタイル接着層に作用する界面せん断応力は、単純に温冷ムーブメントのみを考慮した場合には、最大で約 0.025N/mm²程度となった。一方、せん断接着強度試験の結果より、最小値が 0.15N/mm²(平均 0.30N/mm²)であったことから、算定した界面せん断応力は最小値に対して約 6 倍(平均値では約 12 倍)となり、十分な接着耐力であると推定される。

また、前章「3.2.3 せん断接着強度試験」の引張接着強度とせん断接着強度の関係より、引張接着強度はせん断接着強度の約 2 倍であり、界面せん断応力の算定結果から引張接着応力を算定すると 2 倍の 0.05N/mm²が得られる。一方、今回の算定では温冷ムーブメントしか考慮していないが、実際には温冷ムーブメント以外の複合ムーブメントや界面応力の繰返し作用をふまえた安全率を考慮する必要がある。一例として、安全率を 2.0 とした場合、実験結果より本工法の必要接着強度は 0.10N/mm²となる。

4.2 日射熱によるタイル面の熱変形

本工法によるタイル張り面の挙動は、在来工法とは異なるため、前章「3.1 温度、歪、変位計測」において報告した計測結果では、タイル面の歪と全体変位の関係が不明である。そこで、追加実験を行い、日射によるタイル面の熱変形について検証を行った。

4.2.1 追加実験の概要

追加実験は、暴露試験体 I を使用し、表 9 に示す位置で行った。表 10 に計測項目を、図 27 に計測概要を、写真 6 に計測状況を示す。

タイルの反り量はタイルに変位計(精度 1/1000 mm)を、タイル歪はタイル表・裏面に歪ゲージ(6 mm)を、目地モルタルの挙動はクリップ型変位計(精度 1/1000 mm)をそれぞれ使用して計測した。計測は 4 日間(晴天、タイル表面温度は 21.7～64.5℃)行ったが、8/2 19 時～8/3 7 時の間は計測機故障のためデータが欠落した。なお、タイルの反り量は、タイルの両端部に対する中央部の面外変位量である。

表 9 計測位置とタイル張付け仕様

計測位置	タイル張付け仕様
A4 (上段)	吸水調整材塗布 - CM - 0. T. -15 - 塗厚 t4 mm
A9 (中段)	吸水調整材塗布 - PCM - 0. T. -10 - 塗厚 t2 mm

*PCM : 樹脂入り、N-PCM : 樹脂無し、O. T. : オプション(分)

表 10 計測項目

計測項目	使用機器
1 タイルの反り量	変位計
2 タイル表・裏面の歪	歪ゲージ
3 タイル間の目地幅の変位	クリップ型変位計
4 タイル表面温度	T型熱電対

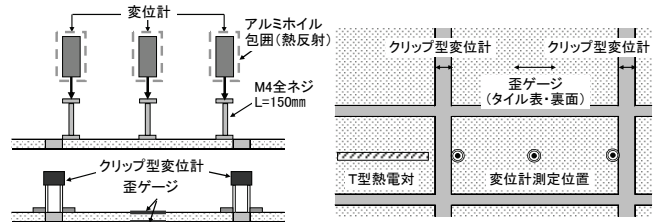


図 27 計測機器設置 概要図



写真 6 追加実験 計測状況

4.2.2 追加実験結果

1) タイル面外方向の反りとタイル表面歪の関係

図 28 にタイルの両端部に対する中央部の面外変位量(以下、反り量と称す)を、図 29 に反り量とタイル表面歪の関係をそれぞれ示す。

タイルの反り量は、上・中段とも計測開始時は正側(凸型)の変形を示したが、その後凹凸を繰り返しながら、負側(凹型)の変形へと転じる挙動を示した。また、タイルの表面歪が大きくなるとともに反り量も大きくなっている。

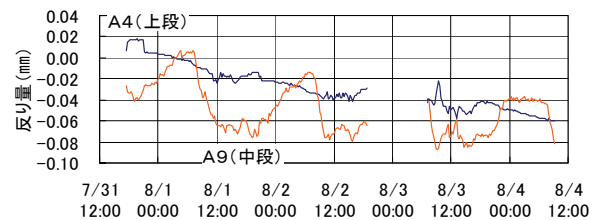


図 28 面外方向の反り量

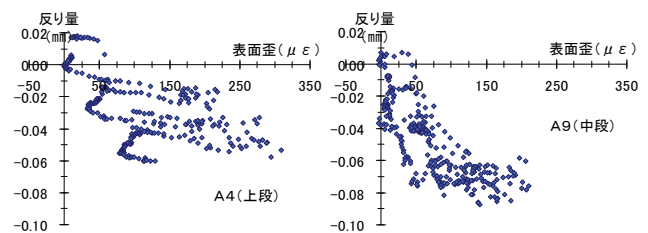


図 29 反り量とタイル表面歪の関係

2) 目地幅とタイルの歪と面外方向の反りの関係

図 30 にタイル表・裏面の歪差の変化を示す。歪差の値が+値は表面歪の方が大きい。日中に裏面の歪が大きく凹型の反りとなり、夜間は逆に表面歪が大きく凸型へと変形し、これが繰り返される。また、その変化は右上がりとなり、次第に表面側に歪が残留する。

また、図 31 に目地幅の変化を示す。目地幅は日中に狭く、夜間に広がる動きとなり、それが繰り返され、タイルの反り量と同様に目地幅も徐々に大きくなる。

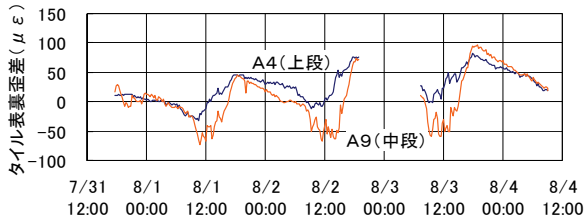


図 30 タイル表・裏面の歪差

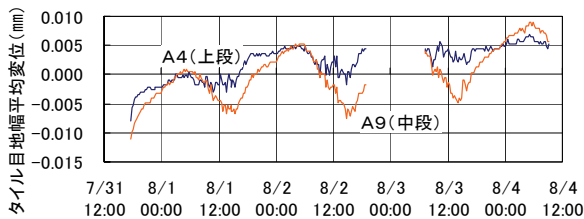


図 31 目地幅の変位

4.2.3 タイルの表面歪と面内変位の関係

タイルの表面歪と面内変位の関係を導き出すため、本工法のタイル面は、図 32 に示す円形の曲げ変形となるものと仮定し、追加実験計測値のタイル表裏面の歪差 ΔL より式 (3) を用いて反り量 ρ を算定し、実測値と比較した。図 33 に反り量の実測値と計算値の比較を示す。

$$\rho = r - r' = r \times (1 - \cos \theta)$$

$$= t \times \sqrt{1 + (\Delta L/t)^2} \times L / \Delta L \times \left(1 - 1 / \sqrt{1 + (\Delta L/t)^2} \right) \quad \text{式 (3)}$$

L : 表面の変形後の長さ $L = 47.5 \times (1 + \epsilon \times 10^{-6})$
 ΔL : 歪差から導かれる変形量の差 $\Delta L = 47.5 \times \epsilon \times 10^{-6} \times 47.5$ (50 二丁タイルの 1/2 長さ)
 凹型 $\epsilon = \epsilon_u$ (表歪), 凸型 $\epsilon = \epsilon_d$ (裏歪)
 $t = 4.0$ (タイル厚み)

実測値は凹凸を繰り返しながら凹型に曲げ変形が大きくなるのに対し、計算結果では凸型に漸増し、次第に乖離していく。これは、タイルを囲む目地の拘束の影響と考えられ、さらに実測値では目地の熱膨張も加わるため、実際には計算値よりも非線形状に大きく曲

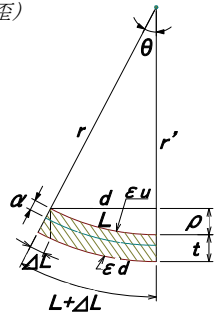


図 32 タイルの曲げ変形モード図 (1)

げ変形するものと考えられる。したがって、図 34 に示す通り、タイルの挙動は歪値と目地の変位量の両方を考慮する必要があるものと考えられる。

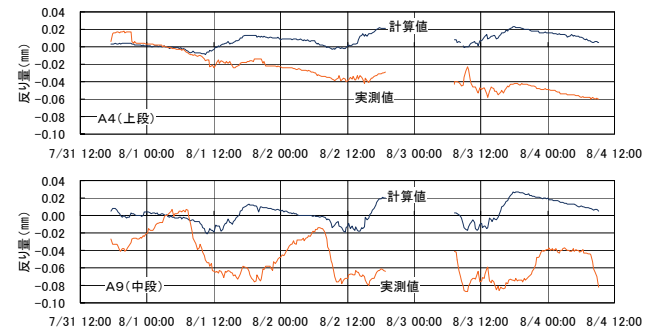


図 33 目地幅の変位

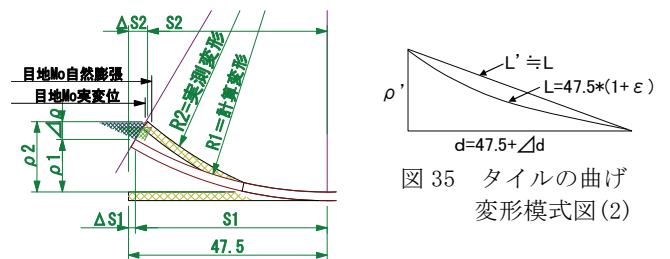


図 34 タイルの熱変形モデル

4.2.4 タイルの面内変位量と全体変位

タイル 1 枚分の面内変位量は、式 (4)、(5) を用い、反り量の計算値 (ρ) と実測値 (ρ' : 図 35 参照) からそれぞれ面内変位 (前者: Δd_{cal} 、後者: Δd_{act}) を求め、目地の変位量を合算し、変位計算値 (Δd_{cal} より)、変位換算値 (Δd_{act} より) をそれぞれ算定した。算定結果を図 36 に示す。

$$\Delta d_{cal} = 2 \times (r' + \alpha) \tan \theta \quad \text{式 (4)}$$

$$\alpha : \text{計算位置(タイル面からの深さ, ここでは 0)}$$

$$\Delta d_{act} = \sqrt{L'^2 - \rho'^2} - 47.5 \quad \text{式 (5)}$$

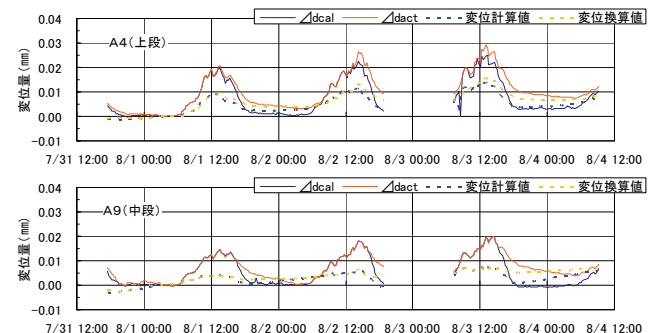


図 36 タイル (1 枚) の面内変位量算定結果

さらに、算定したタイル 1 枚分の面内変位量 (変位計算値、変位換算値) とタイル表面歪の相関関係式を求め、暴露試験の歪実測値より試験体の全体変位量を計算し、実測値との

比較を行った。結果を図 37 に示す。

日内の変動幅は、実測値がかなり小さいのに対し、タイル 54 枚分を加算した計算値はかなり大きくなることから、暴露試験体の端部に設置した変位計はその周辺部のみの挙動を測定したと思われる。

また、実測値の変位が増大した理由は、前章の「3.1 温度、歪、変位計測」で示したようにコンクリート版の乾燥収縮とすると、試験体全体の伸びはほとんどないものと考えられ、図 38 に示すようにタイル単体ごとに面外方向へ波打つような曲げ変形となることで面内方向の変位が緩和されるものと思われる。

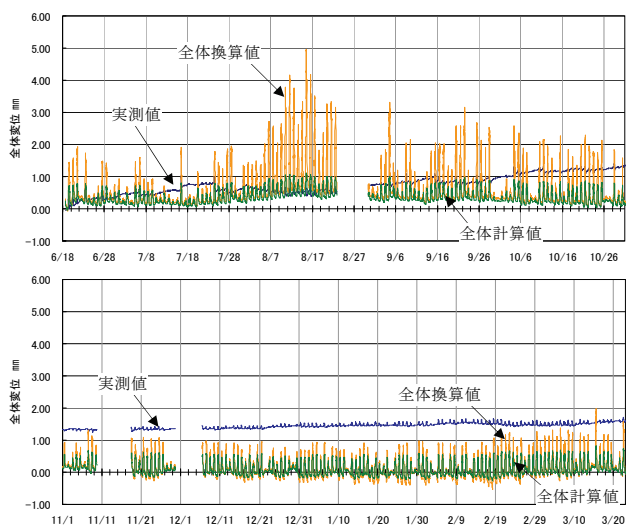


図 37 試験体全体変位の比較 (実測値と計算値)
(試験体 I 上段タイル)

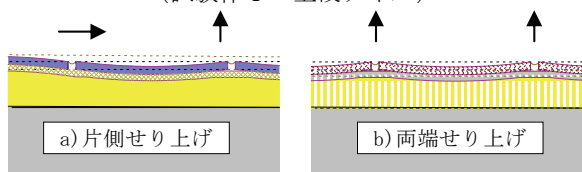


図 38 タイル曲げ変形の想定図

4. まとめ

不燃性を有する断熱材を下地材としたタイル直張り工法の接着性能について、実大試験体による暴露実験を行った結果、以下の結論を得た。

- 1) 断熱材下地へのタイル直張り工法では、引張接着強度は $0.40\text{N}/\text{mm}^2$ よりもわずかに小さいが、断熱材が弾性体とし

て日射による挙動を吸収することで発生する界面応力は緩和され、変形追従性にも優れていることから、十分なタイル接着性能を有する。

- 2) さらなる普及のためには、長期耐久性、品質管理方法の確立、および断熱材と躯体の接合方法などの課題について検討する必要がある。

注 1) 本研究は、大末建設、安藤建設、鴻池組、五洋建設、西武建設、東洋建設、三井住友建設、産宝高分子、高本コーポレーション、日本化成 (以上、10 社) による共同研究である。

注 2) 本研究に際し、広島大学大学院 大久保孝昭教授にご指導を頂きました。付記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説 JASS19 陶磁器質タイル張り工事、2005. 2
- 2) 高見錦一、鈴川衛：R C 造外断熱への弾性接着剤によるタイル張り、日本建築学会大会学術講演梗概集 A-1、pp. 943-944、2006. 9
- 3) 伊藤学、丸一俊雄、岡本直ほか：ポリマーセメントモルタルによる弾性タイル張付けモルタルの開発、日本建築学会大会学術講演梗概集 A-1、pp. 161-162、2002. 8
- 4) 金子稔、岩瀬昭雄、安田正雪ほか：弾性波法を用いたタイル剥離検知器の開発 その 1. タイル剥離検知器の概要と基礎的実験、日本建築学会大会学術講演梗概集 A-1、pp. 557-558、2001. 9
- 5) 荒金直樹、坂井孝、山本耕三ほか：弾性波法を用いたタイル剥離検知器の開発 その 2. 実建物における試験的適用、日本建築学会大会学術講演梗概集 A-1、pp. 559-560、2001. 9
- 6) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建築物の収縮ひび割れ制御設計・施工指針 (案)・同解説、pp. 53-60、2006. 2
- 7) 橋向秀治、本橋健司、久住明：外装タイル張り用有機系接着剤施工検査方法の検討、日本建築学会大会学術講演梗概集 A-1、pp. 121-122、2008. 9
- 8) 熊谷敏男、中村雅彦、入野一男：外壁タイル張り層の日射による温度分布と接着界面応力の究明、清水建設研究報告第 60 号、pp. 15-28、1994. 10