論文　従来工法で張り付けられた外装タイルの剥離メカニズムに関する研究

中村　雄一[*1]・寺西　浩司[*2]・佐々木　仁[*3]・添田　智美[*4]

要旨：本研究では，下地モルタルを用いる従来工法で張り付けたタイルのひずみ追従性試験とその FEM 解析を行い，タイルの剥離メカニズムについて検討を行った。また，FEM 解析を行うにあたって，タイル張付け面の各材料間の接着特性値を必要としたため，その値を調べるための実験も行った。その結果，(1) 従来工法で張り付けられたタイルの剥離は，最終的に，タイル張付け面を構成する材料間での界面の引張破壊により脆性的に生じる可能性が高い，(2) 下地モルタルの厚みや界面の引張接着強度などの組合せにより，剥離時のコンクリートひずみや，どの界面で剥離するかなどの事項が決定される，などの知見を得た。

キーワード：後張り工法，ディファレンシャルムーブメント，剥落，接着力，FEM，ひずみ追従性試験

1. はじめに

外装タイルの剥落防止設計法を確立するためには，まず，タイルの剥離メカニズムを解明する必要がある。また，そのためには，FEM 解析によりタイルの剥離過程を詳細に調べることが有効であると考えられる。しかし，タイルの剥離挙動に関する FEM 解析は，河辺ら [1)]，高田ら [2)]などの研究以外にほとんど行われていない。このような背景から，筆者らは，外装タイルの複雑な変形・剥離メカニズムの解明を目的として，これまでに，先付けタイルや直張りタイル（下地モルタルを用いずに，コンクリート面に直接張り付けられたタイル）の変形挙動に関する FEM 解析を行ってきた [3), 4)]。一方，近年は，タイルの剥落防止の観点から，下地モルタルを用いる従来の張付け工法が見直されてきている。そこで，本研究では，新たに，従来工法で張り付けられた外装タイルを対象として，その剥離過程を FEM 解析により追跡し，剥離メカニズムについて検討した。また，下地モルタルの厚さおよび界面の接着強度がタイルの剥離挙動に及ぼす影響を調べるためのパラメータスタディを行った。

なお，FEM 解析では，タイルの剥離挙動を再現するために，界面のすべりおよび剥離を再現する joint 要素を導入した。そこで，本研究では，まず，joint 要素の入力値の取得を目的として，タイル張付け面を構成する各材料間の界面における接着特性値を調べるための実験を行った。次に，FEM 解析の結果を検証するための解析対象を得ることを目的として，従来工法で張り付けられたタイルのひずみ追従性試験を行った。そして，以上を踏まえて FEM 解析を行った。

2. 実験・解析要因とその水準

表−1 に，後出 3〜5 章の実験・解析に共通する要因とその水準を示す。本研究では，コンクリート表面処理方法を無処理（ON）および超高圧水洗浄（OW）の 2 種類とし，下地モルタルの厚さを 3 および 10mm に変化させた。

3. 界面の接着特性値を調べるための実験

3.1 実験概要

通常，タイル−張付けモルタル間の界面でタイルが剥離することは少ないため，本研究では，**図-1** に示す mf-c 界面（記号 Mc）および mb-mf 界面（記号 Mm）を対象として実験を行った。また，界面の接着特性を**図-2** に示すように仮定し，すべり方向および引張方向の接着強度および剛性を把握するための試験をそれぞれ行った。

表-1　実験・解析要因とその水準

実験要因	水準
コンクリートの表面処理方法	無処理（ON），超高圧水洗浄（OW）
下地モルタルの厚さ（mm）	3，10

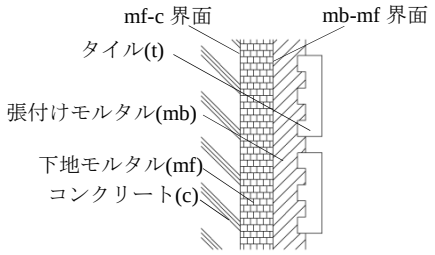


図-1　本実験の対象界面

*1 名城大学大学院　理工学研究科建築学専攻　(学生会員)
*2 名城大学　理工学部建築学科　教授　博士（工学）　(正会員)
*3 フジタ　技術センター　建築研究部長　博士（工学）　(正会員)
*4 フジタ　技術センター　建築研究部　主任研究員　(会員外)

(1) 試験体

表-2 および 3 に，試験体に使用した材料とその力学特性を示す。本実験では，下地モルタルに既製調合モルタルを使用し，張付けモルタルに現場調合モルタルを使用した。

図-3 および 4 の(a)および(b)に，すべり試験体および引張試験体の概要を示す。試験体の製作にあたって，超高圧水洗浄のケースでは，まず，吐出圧 150MPa の超高圧水でコンクリート表面を目荒らしした。そして，吸水調整材を塗布したうえで，下地モルタルを塗り，Mm のケースでは，さらに張付けモルタル（塗厚 4mm）を塗り付けた。また，すべり試験では，1 個の試験体の相対する 2 面を 2 回分の試験に使用し，引張試験では，長柱状とした試験体の 1 側面を 10 に区画して試験に供した。なお，本実験では，タイルは試験体に張り付けなかった。

(2) 試験方法

図-3 の(c)および(d)ならびに図-4(c)に，すべりおよび引張試験装置の概要を示す。すべり試験では，まず，試験体を鋼製の厚板上にボルトで固定した。次に，試験部分のモルタル表面に鋼製のアタッチメントを接着剤で接着し，その裏面に接するように押さえ用のコンクリートブロックを固定した。その際，アタッチメントと押さえ用コンクリートブロックの間には，摩擦を低減するために，テフロンシートを挟み込んだ。そして，建研式接着力試験器でアタッチメントを引き上げた。一方，引張試験は建研式により行った。いずれの試験においても，センターホール型ロードセルおよび変位計により，力と変

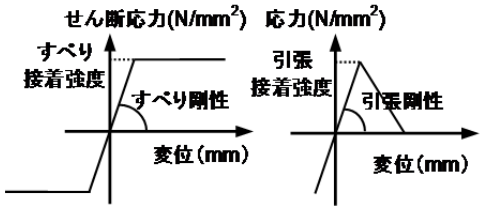


図-2　本実験で仮定した接着特性

表-2　使用材料

種類	仕様
コンクリート	W/C55%，空気量 4.5%，s/a44.1%
下地モルタル	既製調合モルタル　JIS A 6919(CM-2)(軽量骨材混入タイプ)
張付けモルタル	現場調合モルタル(W/C32%，S/C50%，M/C*0.2%，フロー値 173)
吸水調整材	エチレン酢酸ビニル系(5 倍希釈液)コンクリート表面に 1 回塗り

*セメントに対するメチルセルロースの質量比。

表-3　材料の力学特性

材料	圧縮強度 (N/mm²)	ヤング係数 (kN/mm²)	ポアソン比	引張強度 (N/mm²)
コンクリート	36.5	26.6	0.17	3.52
下地モルタル	22.9	11.0	0.21	1.93
張付けモルタル	60.0	18.2	0.18	2.65

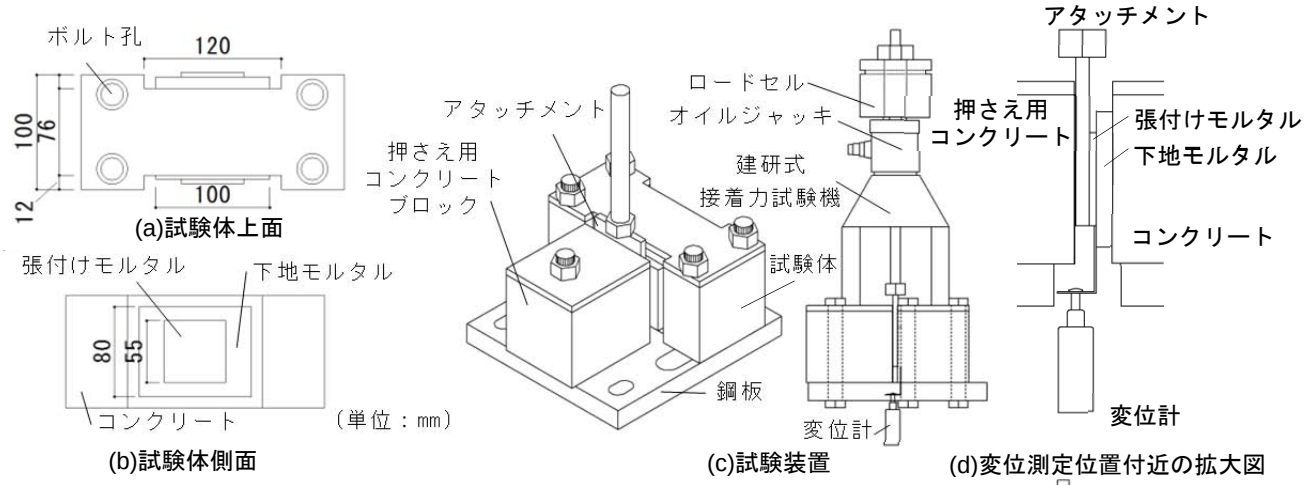


図-3　すべり試験の概要(Mm の場合)

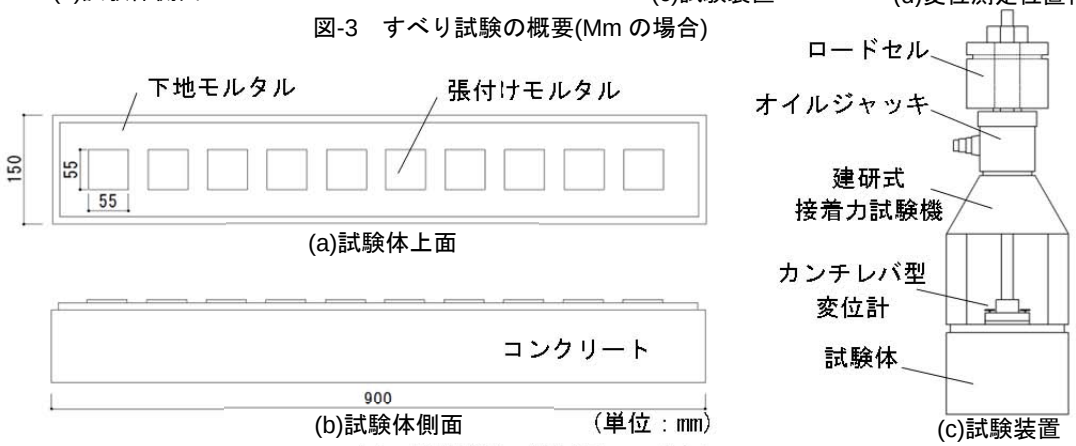


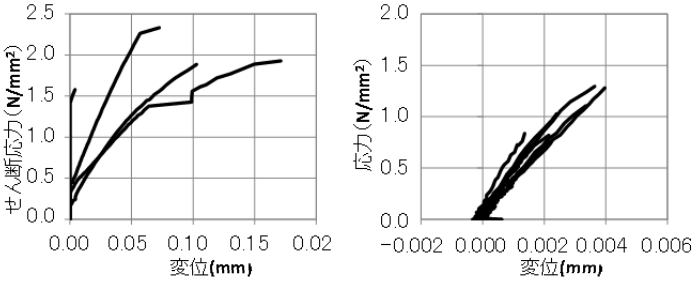
図-4　引張試験の概要(Mm の場合)

位の関係を経時的に測定した。なお，1 ケースにつき，すべり試験は 5 回，引張試験は 10 回行った。

3.2 実験結果

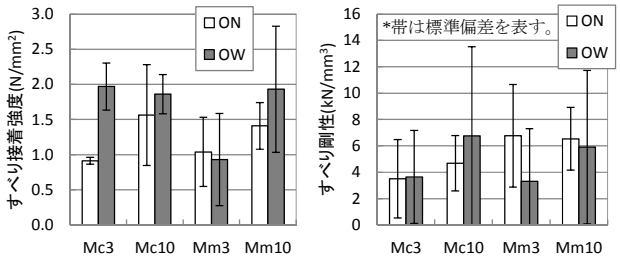
図-5 に，すべり試験および引張試験で得られた応力と変位の関係の一例を示す。図中には，一つのケースに対する全ての試験結果を示してある。**図-5(a)**からわかるように，すべり試験では，試験結果が，せん断応力 0.2～0.4N/mm^2 付近の位置に屈折点を有するような，初期勾配の大きい bi-liner 型に近い曲線となることが多かった。ここで，この曲線に第 2 勾配が生じたのは，試験途中に，試験体と試験体固定用の鋼板の間に微妙な浮きが生じることで試験体がかすかに傾き，アタッチメントの引上げ方向と純せん断方向にずれが生じ，張付けモルタルに引張方向の剥離が生じたためであると考えられる。このことを踏まえ，界面のすべり方向の剛性を算出する際には，初期勾配に着目して値を求めた。一方，引張試験では，すべり試験と比較してばらつきが小さい結果となった。界面の引張方向の剛性は，**図-5(b)**に示した関係曲線における，引張接着強度の 1/3 時の応力を変位で除した値とした。

図-6 に，すべりおよび引張方向の接着強度および剛性を示す（界面を表す記号の後に下地モルタルの厚さの数値を付して実験ケース記号を示す）。なお，すべり試験の Mc3，引張試験の Mc3 および Mc10 のケースでは，ほとんどの場合に界面ではなく，下地モルタルが破壊した。したがって，これらのケースにおける界面の実際の接着強度は，得られた試験値よりも高い可能性があり，FEM 解析を行う際に，このような試験値を入力値とすると，下地モルタル破壊と界面破壊が同時に生じる結果となることが予想される。しかしながら，タイルが剥離する時期に大きな違いは生じないと考えられるため，本研究の範囲では，試験値をそのまま接着強度と見なした。

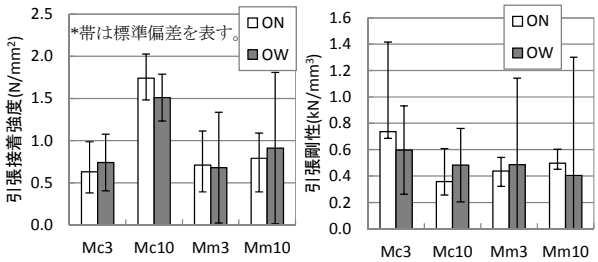


(a)すべり試験結果　(b)引張試験結果

図-5　応力と変位の関係(Mm10･OW)

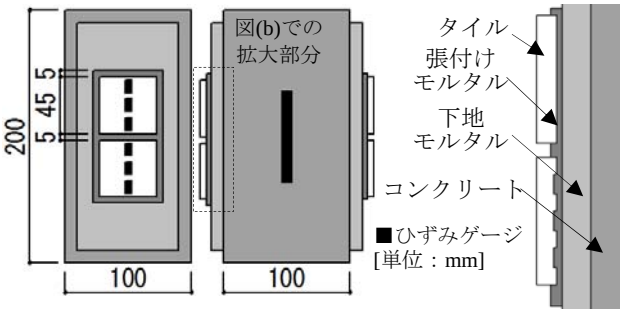


(a)すべり試験結果



(b)引張試験結果

図-6　接着強度および剛性



(a)正面および側面　(b)断面(拡大図)

図-7　試験体の概要

4. ひずみ追従性試験

4.1 実験概要

(1) 試験体

図-7 に試験体の概要を示す。試験体は 1 ケースにつき 3 個とした。試験体の製作にあたっては，まず，寸法 100×100×200mm のコンクリートの角柱を作製した。次に，ケース OW の場合にコンクリートの表面処理を行い，その後，吸水調整材を塗布して所定の厚さの下地モルタルを塗り付けた。そして，最後に，試験体の相対する 2 面に，50 角磁器質タイル（厚さ 7mm，裏あし高さ 1mm）2 枚を，裏あし方向が 1 枚は縦（v），もう 1 枚は横（h）となるように張付けモルタルでそれぞれ接着した。なお，コンクリート，下地モルタル，張付けモルタルなどの材料および調合は 3 章の実験と同様とした。

(2) 試験方法

本実験では，圧縮試験機により，毎秒 0.068N/mm^2 の単調圧縮載荷した。また，その際に，**図-7** 中に示したひずみゲージにより，コンクリートおよびタイル表面のひずみを測定した。

4.2 実験結果とその考察

(1) タイルとコンクリートのひずみの関係

図-8 に，タイルとコンクリートのひずみの関係の一例を示す（収縮を正の値で表示する）。同図からわかるように，タイルひずみは，上部および下部よりも中央部の方が大きくなっている。また，試験結果に，タイルの裏あし方向による違いは見られなかった。既報 [4)]で報告した直張りタイルの場合，リターダ工法（コンクリート型枠面に硬化遅延剤を塗布し，脱型後に脆弱部を除去して目

荒らしする工法）以外のケースでは，タイル中央部の関係曲線に，**図-9**（a）に示すような明確なピークが必ず見られたが，本実験の従来工法の場合は，**図-9**（b）に示すような，関係曲線のピークが曖昧なケースも見られた。

(2) ひずみ伝達率および破壊ポイント

図-10 および **11** に，**図-9** に示したひずみ伝達率および破壊ポイントによりタイルの変形追従性および剥離抵抗性を評価した結果を示す（**図-11** 中の解析結果については 5.2 節で後述する）。また，図中には，既報[4)]で得られた直張り工法に対する結果も併せて示してある。

(a) ひずみ伝達率

図-10 によると，OW のケースでは，下地モルタルが厚い方が，ひずみ伝達率が小さく，タイルの変形追従性が低くなっている。また，リターダ工法以外の直張り工法のケースと比べると，本実験の従来工法の方が，ひずみ伝達率が全体として小さくなっている。これらのことは，コンクリートによるタイルの拘束ひずみを下地モルタルが緩和する役割を担っていることを示している。また，表面処理方法がひずみ伝達率に及ぼす影響については，下地モルタルの厚さが 3mm と 10mm の場合で結果の傾向が異なっており，本実験の範囲では，明確な傾向を把握するまでには至らなかった。

(b) 破壊ポイント

図-11 からわかるように，従来工法の場合，破壊ポイントに大きなばらつきが見られた。この原因としては，下地モルタルの微妙な施工精度の差などが試験結果に敏感に反映されたことなどが考えられる。また，本実験の要因であるコンクリートの表面処理方法，下地モルタルの厚さや，タイルの裏あし方向による破壊ポイントの差に一定した傾向は見られなかった。さらに，直張り工法の場合と比較すると，従来工法の方が，どちらかというと破壊ポイントが高くなるケースが多いように見えるものの，全体としては，張付け工法による差異も明確ではなかった。

5. ひずみ追従性試験を対象とした FEM 解析

5.1 解析概要

石川ら[5)]が作成した材料非線形解析プログラムを用いて，既報[3), 4)]と同様の方法により 3 次元 FEM 解析を行った。本解析では，前章に示したひずみ追従性試験を対象とし，対称性を考慮して試験体を 4 分割した部分を，**図-12**（a）に示すようにモデル化した。また，**図-12**（b）に示すように，mf-c 界面および mb-mf 界面に，界面のすべり・剥離を表現するための joint 要素を挿入した。joint 要素には，3 章で得られたすべり・引張方向の接着強度および剛性の試験値として，**図-6** に示した値を入力した。また，引張方向の破壊エネルギーとしては，引張接着強度とそれに対応する変位の積の 1/2 と値を設定した。ソリッド要素には**表-3** の値を入力した。

なお，本解析では，コンクリート角柱の上端面に下向きの強制変位を徐々に与えていった。

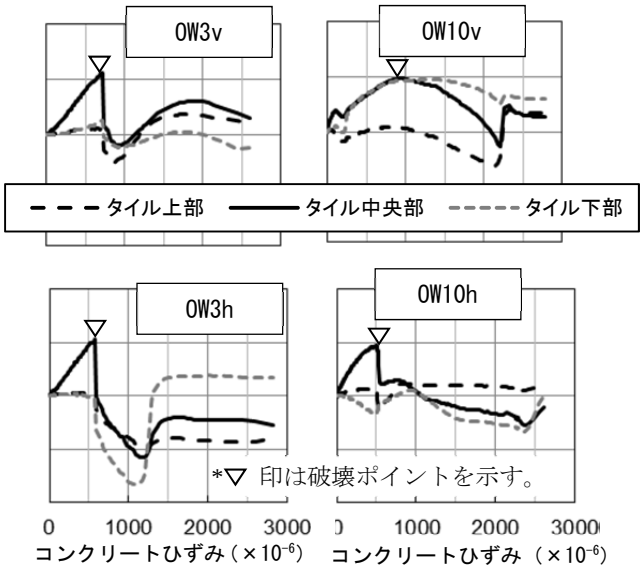
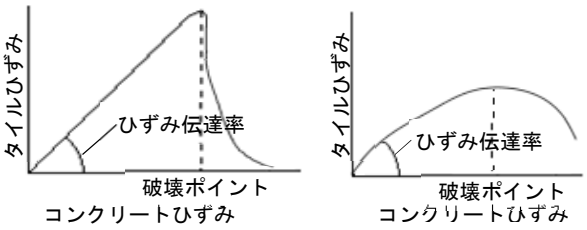


図-8　タイルとコンクリートのひずみの関係(実験結果)



(a)破壊ポイントが明確なケース　(b)破壊ポイントが不明確なケース

図-9　タイルの変形追従性および剥離抵抗性の評価指標

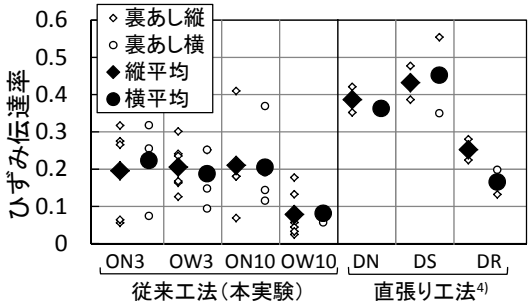


図-10　ひずみ伝達率

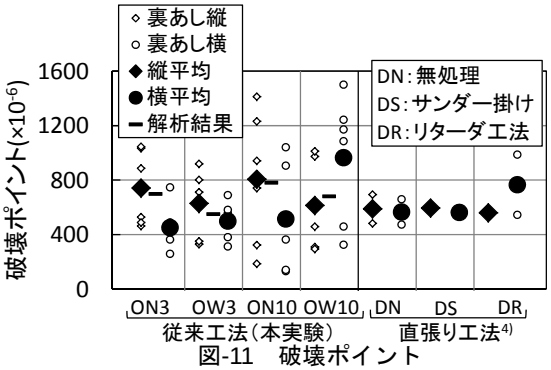


図-11　破壊ポイント

5.2 解析結果

(1) 解析結果と実験結果の比較

(a) タイルとコンクリートのひずみの関係

図-13 に，解析で得られたタイルとコンクリートのひずみの関係を示す。この結果を図-8 における同一ケースの実験結果と比較すると，関係曲線の初期勾配は，実験結果よりも解析結果の方が小さくなっており，それに伴って，タイルひずみの最大値も解析結果の方が小さくなっていることがわかる。ただし，タイルひずみが最大値以降に急激に減少するというような関係曲線の全体的な傾向の特徴は，解析により捉えられているものと判断される。

(b) 破壊ポイント

図-11 中に，解析結果から求めた破壊ポイントを示す。解析結果には，タイルの裏あし方向による違いがほとんど見られなかったため，図中には，縦張りと横張りの平均値を示してある。同図から，破壊ポイントの解析値と実験値が近い値になっていることがわかる。

(2) 変形・剥離挙動

(a) 変形状況

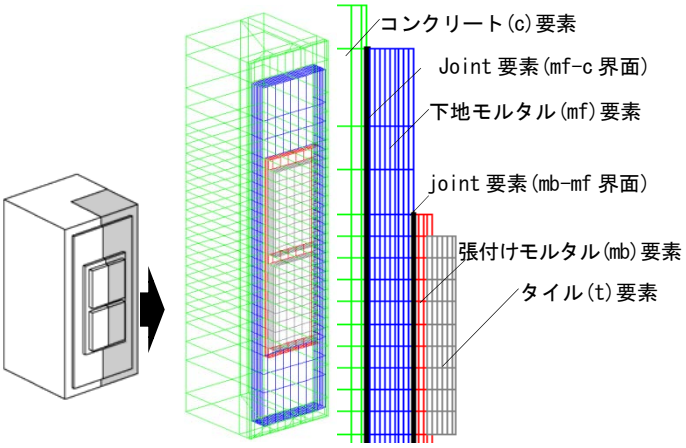
図-14 に試験体の変形状況を示す。コンクリートひずみが 800×10^{-6} 未満の場合は，個々のタイルごとに曲げ変形が生じており，800×10^{-6} になると，mb-mf 界面のほぼ全域が剥離している。なお，このような解析結果は，実際の場面において，一枚ずつのタイルではなく，一定面積のタイル面がまとめて剥離する機構を示しているものと考えられる。

図-15 に，mb-mf 界面における joint 要素のすべり・引張方向の変位の分布（すなわち，図-14 中に示した C.L. からの高さとの関係）を示す。すべり方向の変位は張付けモルタルの端部ほど大きくなっているのに対し，引張方向の変位は，引張接着強度時の変位を超えた時点（すなわち，引張破壊が生じた時点）では，下地モルタルの中央ほど大きくなっている。

(b) 界面の破壊の進展状況

図-16 に，すべり・引張接着強度に達した（以下，すべり・引張破壊したという）joint 要素の位置を時間を追って示す（試験体の上半分のみを表示）。同図から，初期には，張付け・下地モルタルの張付け面の端部から徐々に界面のすべり破壊が進展し，その後，ごく短期間のうちに mb-mf 界面に引張破壊が生じて張付けモルタルが剥離する様子が見て取れる。

図-17 に，すべり・引張破壊した joint 要素の数とコンクリートひずみの関係を示す。ここで，図中には，試験体の上半分における中心部分の 1 列の要素（mf-c 界面は 14 要素，mb-mf 界面は 11 要素）に対する要素数を示してある。同図と図−13 との比較から，界面のすべり破壊



(a)全体　　(b)タイル周辺

図-12　解析モデル(下地モルタルの厚さ 10mm の場合)

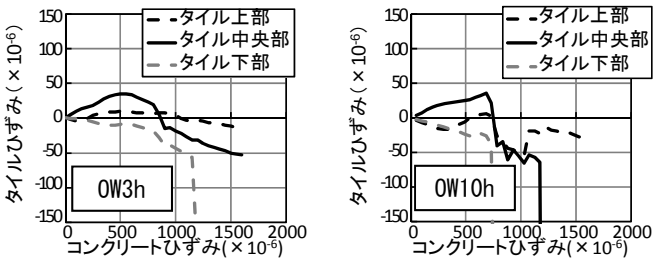


図-13　タイルとコンクリートのひずみの関係(解析結果)

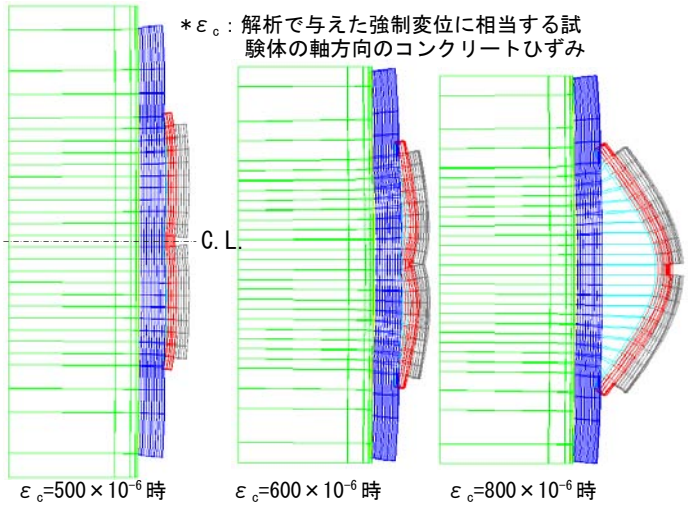
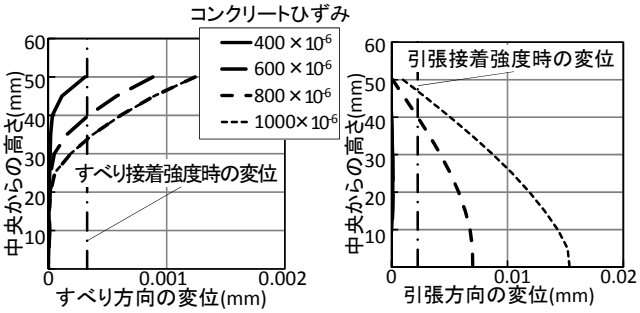


図-14　変形状況(OW10)



(a)すべり方向　　(b)引張方向

図-15　joint 要素の変位の高さ方向の分布(OW10)

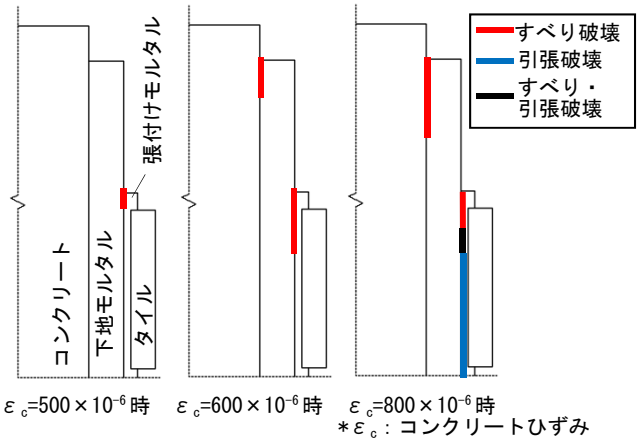


図-16　すべり・引張破壊した joint 要素の位置(OW10h)

の進展が，タイルひずみ－コンクリートひずみ曲線のピーク以降の緩やかな低下領域を形成するのに対し，界面の引張破壊は，曲線の急激な低下の誘因となっていることがわかる。なお，以上のことは，タイル張付け面における構成材料間の界面の剥離が，最終的に，引張破壊により生じることを示唆している。

5.3 パラメータスタディ

前節の考察により，界面の引張破壊が脆性的に生じることが明らかになった。そこで，ここでは，引張破壊した joint 要素が初めて発生した時点のコンクリートひずみ（以下，引張破壊ポイントという）を剥離抵抗性の指標としてパラメータスタディを行った。検討にあたっては OW10 を標準ケースとした。

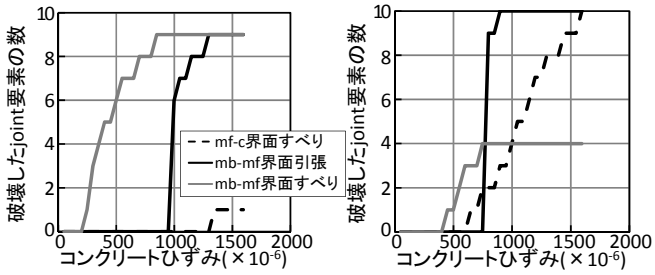
図-18 に，下地モルタルの厚さを変化させた場合の検討結果を示す。同図によると，引張破壊ポイントは，下地モルタルの厚さが増すほど大きくなる。また，下地モルタルの厚さが 15mm 以上になると，mb-mf 界面より先に mf-c 界面での引張破壊が生じる。次に，**図-19** に，mf-c 界面の引張接着強度を変化させた場合の検討結果を示す。同図から，mf-c 界面の引張接着強度が低くなると，mf-c 界面に先に引張破壊が生じることがわかる。

6. まとめ

本研究では，外装タイルの剥離メカニズムの解明を目的として，タイルの剥離挙動を調べるための FEM 解析を行った。その結果得られた知見を以下に示す。

(1) 従来工法で張り付けられたタイルの剥離は，最終的に，タイル張付け面を構成する材料間での界面の引張破壊により脆性的に生じる可能性が高い。

(2) 下地モルタルの厚みや界面の引張接着強度などの組合せにより，タイル剥離時のコンクリートひずみや，どの界面で剥離するかなどの事項が変化するという現象を，FEM 解析により再現できる。



(a)OW3h　　(b)OW10h

図-17　すべり・引張破壊した joint 要素の数とコンクリートひずみの関係

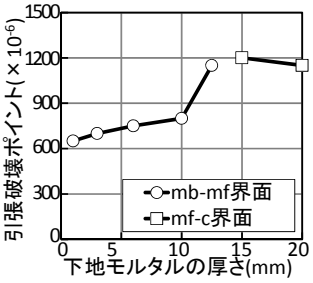


図-18　下地モルタルの厚さの影響

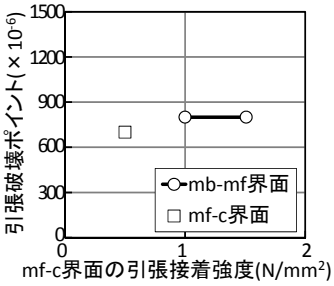


図-19　引張接着強度の影響

謝辞

本研究の実施に際し，名城大学理工学部社会基盤デザイン工学科・石川靖晃教授に解析プログラムを提供していただいた。ここに付記して感謝の意を表します。

参考文献

1) 河辺伸二，小笠原和博，綱本浩二：FEM によるタイルの応力解析について（深目地施工時のタイルの剥離の危険性），日本建築学会大会学術講演梗概集，A，pp.213-214，1992.8

2) 高田栄治ほか：建築物の外壁におけるディファレンシャルムーブメントに関する考察（その 1），日本建築学会大会学術講演梗概集，A-1，pp.19-20，1991.9

3) 日比野和樹，寺西浩司，永井伴英：先付けタイルの変形追従性および剥離抵抗性，コンクリート工学年次論文集，Vol.33，No.1，pp.1397-1402，2011.7

4) 渡会正典ほか：外装タイルの変形・剥離挙動の FEM 解析（その 3．解析対象を得るための実験および予備的な解析），日本建築学会大会学術講演梗概集，A-1，pp.881-882，2011.8

5) 田辺忠顕：初期応力を考慮した RC 構造物の非線形解析法とプログラム，情報堂，2004.3