

タイル剥落防止工法の耐震性能（その1）

静的水平力載荷実験による検討

小川 晴果 三谷 一房 津田 和明
甚野 学 川口 徹 江戸 宏彰

Seismic Test on Methods of Preventing Tilework Fall-off (Part 1)

Evaluation by Static Horizontal Loading Tests

Haruka Ogawa Hitofusa Mitani Kazuaki Tsuda
Manabu Jinno Toru Kawaguchi Hiroaki Eto

Abstract

Ceramic tiling is one of the most durable and commonly used finishing materials on exterior walls of buildings in Japan. However, when fall-off occurs as a result of earthquakes or other causes (e.g. thermal and moisture movements), it poses considerable danger to pedestrians. Recently many new methods have been developed to prevent tilework fall-off. However, standard testing procedures have thus far not tried to determine the seismic resistance capacity of these methods. In this study, seismic tests were conducted using true-to-scale specimens of tile-covered walls in order to accurately determine the seismic resistance capacity of these methods. It has been concluded that, particularly, above a 1st-story deformation angle of 1/250, a cyclic load leads to a loss of bonding strength. The seismic test also revealed differences in the performances of tiling methods, especially above a deformation ratio 1/250. The method utilizing a three-dimensional knitted fabric covers cracks in concrete walls remarkably well and resists cracking and delamination.

概 要

陶磁器質タイル張り仕上げは、耐久性に優れることから、外壁仕上げとして一般的に用いられている。しかし、万が一剥落した場合には、人命に与える危険性が非常に高い。近年、外壁タイルの剥落防止を目的とした多くの新しい工法が提案されてきているが、これらの新工法の耐震性については、いまだ統一的な評価がなされていないのが現状である。本報告では、4種類のタイル剥落防止工法を取り上げ、実仕様の小試験体を製作し、地震時を想定した水平加力実験によってこれらの工法の耐震安全性について検討している。その結果は次の通りである。層間変形角の増加に伴いタイルのひび割れ率及び剥離率は共に増加し、層間変形角1/250以降では工法間の剥離率に明確な差が認められる。又、ひび割れ隠蔽率及びひび割れ・剥離抵抗指数は共にインターネット工法が最も高い。

1. はじめに

近年、地球環境保護の観点から建物の長寿命化が求められる傾向にある。陶磁器質タイル張り仕上げはその典型的なものであり、鉄筋コンクリート（RC）躯体とほぼ同等の耐用年数が期待できる。しかし、陶磁器質タイルのほとんどが、現場でセメントモルタルを用いた手張り工法で施工されており、万が一、タイルが剥離・剥落した場合には、人命に与える危険性が高いことが重大な問題となっている。さらに、先の兵庫県南部地震後、非構造部材に対する耐震性が厳しく問われており、タイル張り仕上げの剥離・剥落に対する安全性が再度見直されている。このような状況のもと外壁タイルの剥落防止を目的

とした多くの新しい工法が提案されているが¹⁾、これらの新工法の耐震性については、いまだ統一的な評価がなされていないのが現状である。

本報告では、5種類のタイル張り工法（在来工法1種、剥落防止工法4種）について実仕様の縮小試験体を製作し、地震時を想定した静的水平力載荷実験によって、これらの工法の耐震安全性を検討している。

2. 実験計画

2.1 試験体の作製

タイル張り仕上げを施工したRC試験体の形状寸法及び配筋状況をFig.1及びTable 1に示す。RC試験体は側柱を有するI型耐震壁であり、中層建物の一般的な耐震壁を

対象としている。使用したコンクリート及び鉄筋の材料試験結果をTable 2及びTable 3に示す。

コンクリート打設後28日間養生した後、RC試験体の壁部（寸法900×1480mm）の両面に吸水調整材（EVA系ポリマーセメント10倍液）を塗布した後、現場調査による下地モルタル（普通ポルトランドセメント：川砂=1:2.5 by vol.）を厚さ10mmで塗布した。但し、ループボンド工法では、予めセパレータ部のPコン（縦横約600@）を除去し、そこにループボンドを挿入した後、それらのパイル部分に下地モルタルが十分含浸するように塗布した。インターネット及びベースネット工法では、下地モルタル塗布後7日間養生した後、既調査のポリマーセメントモルタルで立体繊維材料の張付けを行い、翌日、ステンレスアンカーピンを縦横約500@で施工した。下地モルタル塗りから14日間養生期間を置いた後、現場調査モルタル（普通ポルトランドセメント：珪砂5号=1:1 by vol.）を用いて45二丁タイルユニットをマスク張り工法で張付け、翌日目地詰め

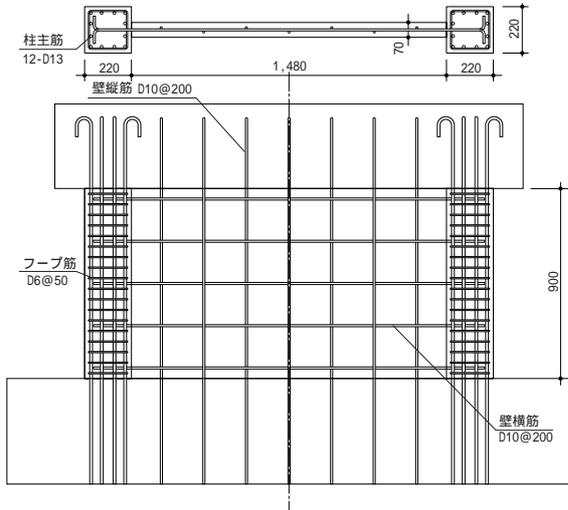


Fig.1 RC試験体の形状寸法及び配筋概要
Shapes and Bar Arrangement of RC Skeletons

を行い、更に14日間養生した。なお、タイル張り施工を行ったコンクリート部分の型枠には、モルタルの接着強度を低減し浮きを発生しやすくする目的で、樹脂加工合板を用い表面を平滑な状態とした。タイル張り仕上げ層の仕様及び試験体への割付をFig.2に示す。

2.2 加力方法

加力装置をFig.3に示す。水平力の荷重は、RC試験体の基礎を加力フレームの下部にPC鋼棒で固定し、加力梁端部を油圧ジャッキによって押すことにより片持ち梁型で行った。最初に所定の軸方向力を与え、これを保持しながら、水平力を正負交番で荷重した。水平力の荷重は、Fig.4に示すように、層間変形角（R：水平変位をそ

Table 1 RC試験体の諸元
Characteristics of RC Skeleton

シアスパン比 M/QL ¹	壁板			側柱			軸応力度 ² σ ₀ (N/mm ²)
	形状 L×t (cm)	縦筋 P _{wv} (%)	横筋 P _{wh} (%)	形状 B _c ×D _c (cm)	主筋 P _{cg} (%)	帯筋 P _{cw} (%)	
0.65	170×7	D10@200 (0.51)	D10@200 (0.51)	22×22	12-D13 (3.15)	2-D6@50 (0.58)	2.94

注：*1:Lは側柱芯間距離 *2:柱1本当たりの軸応力度

Table 2 コンクリートの材料試験結果
Mechanical Properties of Concrete

部位	ヤング係数 E _c (GPa)	圧縮強度 σ _b (N/mm ²)	引張強度 σ _t (N/mm ²)
基礎	30.0	30.9	3.01
壁、柱	24.0	25.2	2.50
加力梁	29.0	37.6	3.17

Table 3 鉄筋の材料試験結果
Mechanical Properties of Reinforcement

呼び名	ヤング係数 E _s (GPa)	降伏強度 σ _y (N/mm ²)	引張強度 σ _b (N/mm ²)	伸び率 (%)	使用部位
D6	188	340	465	25.0	側柱帯筋
D10	186	355	515	18.7	壁筋
D13	193	342	507	20.6	側柱主筋 加力梁助筋 基礎助筋
D25	191	382	574	24.1	加力梁主筋 基礎主筋

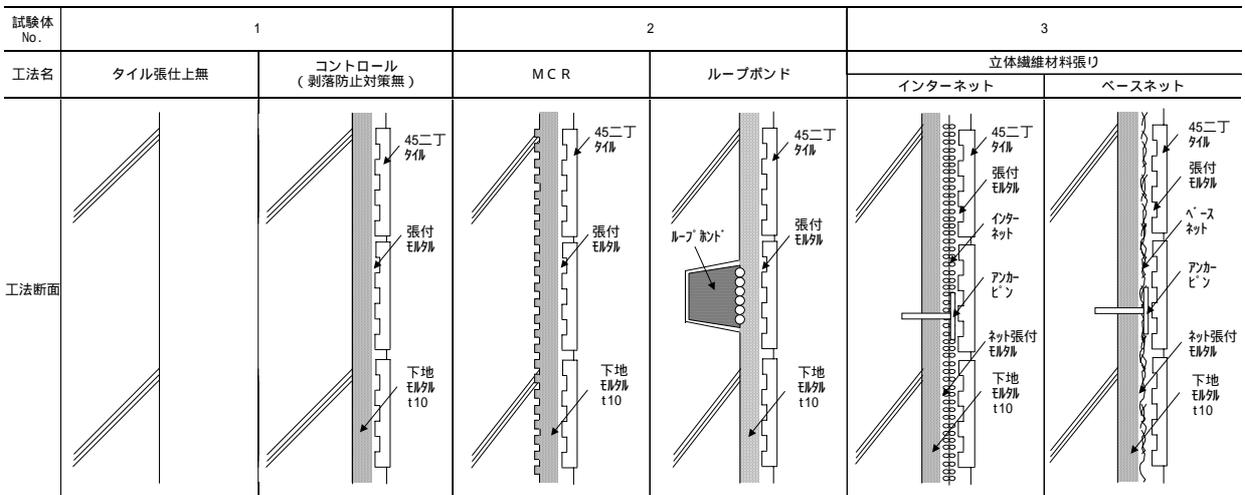


Fig.2 タイル張り工法の種類
Types of Tiling Methods

の測定高さで除した値）で1/1000, 1/500, 1/250で2回ずつ繰返した後、正方向で破壊させた。

2.3 測定項目及び方法

RC試験体については、軸方向力と水平力をロードセルで、各部変位を高感度変位計で、鉄筋のひずみをひずみゲージで測定した。又、コンクリートのひび割れ状況を目視観察し記録した。タイル張り仕上げ層については、その表面のひずみをひずみゲージで測定した。タイル張り仕上げ層のひび割れを目視観察により記録するとともに、その浮きについては、熟練タイル工がテストハンマーによる打診でチェックし記録した。また、加力試験終了（破壊）後、浮きを生じなかったタイルについて、その周辺にコンクリートに達するまで切込みを入れ、建研式引張試験機を用いて接着強度を求めた。得られた結果に基づき、タイルのひび割れ率及び剥離率とRC試験体の層間変形角、RC試験体のひび割れ率及びタイルの接着強度の関係について検討した。なお、ひび割れ率及び剥離率は、既往の研究²⁾に準じ壁の表面をメッシュに分割（タイルの割付を適用）し、以下のように定義した。ただし、タイル目地部のひび割れは考慮しなかった。

$$\begin{aligned} \text{ひび割れ率} &= \text{ひび割れを生じたメッシュの数} / \text{メッシュの総数} \\ \text{剥離率} &= \text{剥離を生じたメッシュの数} / \text{メッシュの総数} \end{aligned}$$

3. RC試験体の破壊性状及びタイル仕上げのひび割れ・剥離性状

3.1 RC試験体の破壊性状

RC試験体の破壊性状は3体とも同じである。No.1試験体のせん断力と水平変位の関係をFig.5に示す。側柱脚部の曲げひび割れ（Q = 250kN）、側板引張下部の曲げせん断ひび割れ（Q = 250kN）、壁板中央のせん断ひび割れ（Q = 500kN）を順次生じ、最終的には、側柱を巻込みながら壁板のコンクリートがせん断破壊（Qmax = 900kN）している。その時の層間変形角Rは、1/222であり、側柱主筋は引張降伏していない。壁板のコンクリート部分のひび割れはR=1/3333で発生している。その後、ひび割れは変形の増大に伴い進展し、R=1/500到達時には壁板のほぼ全域に発生している。それ以降は、ひび割れの増加はほとんど認められないままRC試験体のせん断破壊に至っている。

3.2 タイル仕上げのひび割れ及び剥離分布

Fig.6に一例として、R=1/250（負方向加力の2回目）終了時におけるRC試験体のひび割れ分布及び各工法によるタイル仕上げのひび割れ・剥離分布を示す。

各工法ともR=1/1000（正方向加力の1回目）に至る前（コントロール：1/2000, MCR工法：1/3333, ループボンド工法：1/1666, インターネット工法：1/2500, ベースネット工法：1/2000）において既に、RC試験体のせん断ひび割れの影響を受け、タイル仕上げ面にもひび割れが

認められる。その後、正負方向加力の繰返し及び層間変形角の増大に伴い、さらにひび割れは漸増し、R=1/250

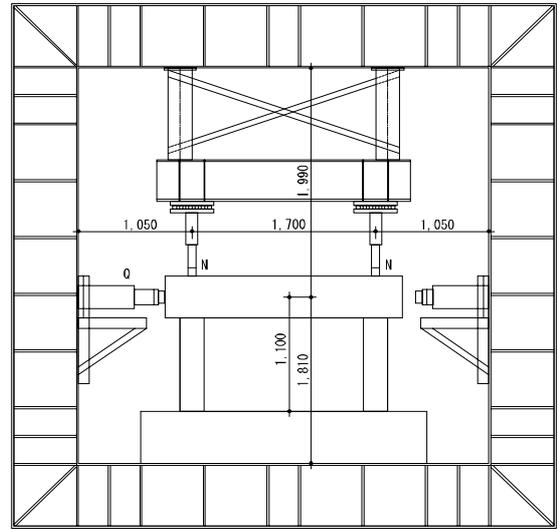


Fig.3 加力装置 Loading Apparatus

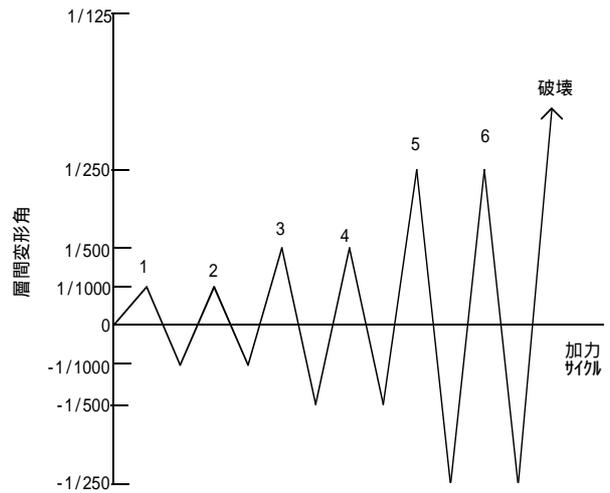


Fig.4 载荷履歴 Loading Step

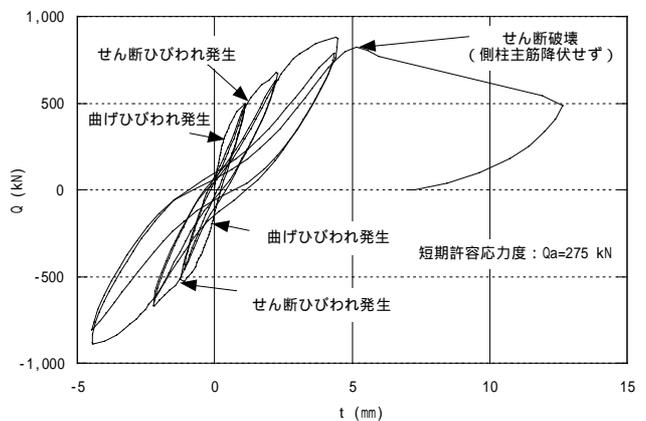


Fig.5 せん断力と水平変位の関係 Shear Force-Deformation Curves

の繰返し加力終了時には、それぞれFig.6に示すひび割れ分布を呈する。又、ひび割れは、タイル自体の表面及び目地の両方に混在して発生している。

剥離は、発生したひび割れ近傍において徐々に確認され始め、 $R=1/250$ の繰返し加力終了時には、それぞれFig.6に示す剥離分布(網掛け部)を呈した。ただしコントロールでは、ひび割れ近傍以外にも加力初期において広範囲に剥離が認められる。

なお、いずれの工法においてもRC試験体の破壊に至るまでタイル仕上げの剥落は認められない。

3.3 タイル表面の発生ひずみ

Fig.7に層間変形角とタイル仕上げ面の中央近傍に位置するタイル表面の発生ひずみの関係を示す。

本実験では、45二丁タイルを横張りで施工したため、その長辺方向のひずみを横ひずみ、短辺方向のひずみを縦ひずみとして計測している。 $R=1/500$ までの横ひずみの挙動は、概ね直線的な履歴を示し、最大で $100 \sim 200 \times 10^{-6}$ 程度の圧縮ひずみを示している。しかしながらその後の $R=1/250$ の繰返し加力によって、横ひずみの挙動はループ状の履歴を示す傾向にあり、この時、最大圧縮ひずみで $200 \sim 300 \times 10^{-6}$ 程度を示している。これらの傾向は、層間変形角の増大に伴いタイル仕上げに発生したひび割れや剥離によって、タイル表面の発生ひずみが緩和される傾向にあるためと考えられる。なおいずれの場合も、横ひずみが縦ひずみより大きい値を示したのは、タイル形状の影響によるものと考えられる。

3.4 耐震実験後の引張接着強度

Table 4に耐震実験後に浮きを生じなかったタイルの引張接着強度試験の結果を示す。

いずれの工法においても建築工事共通仕様書³⁾による後張りタイルの引張接着強度の基準値 $0.4N/mm^2$ 以上の接

着強度を示している。特にインターネット工法の接着強度が最も大きく、かつそのばらつきも最も小さく、耐震実験後においても安定した接着性を示している。一方、コントロールでは接着強度のばらつきが他の工法に比べて大きい。

3.5 層間変形角とひび割れ率・剥離率の関係

Fig.8にRC試験体の層間変形角とひび割れ率の関係を、Fig.9にRC試験体の層間変形角とタイルの剥離率の関係を示す。

RC試験体のひび割れは、層間変形角の増大に伴い増加するが、 $1/1000$ 及び $1/500$ のサイクル終了時までにはその大部分が発生し破壊時のひび割れ率の 96.4% を占める。又、ひび割れの発生はいずれの層間変形角においても正方向の初サイクルに著しい。

一方、タイルのひび割れ率及び剥離率も層間変形角の増大に伴い増加し、いずれの層間変形角においても正負初サイクル時での発生が著しい。又これらの増加の傾向はタイル張り工法の種類によって異なる。即ち、層間変形角 $1/1000$ では工法間に大きな差異は認められないものの、 $1/500$ 以降ではその差異が現れ始め、特にコントロールのひび割れ率及び剥離率が他の剥落防止工法と比較し大きく増加している。

剥落防止工法間では、いずれの層間変形角においてもひび割れ率の差は約 10% の範囲にありほとんど差異が認められない。しかし剥離率については、 $1/500$ 以前では層間変形角の増加が工法間の剥離率に及ぼす影響は小さいが、 $1/250$ では正負各繰返し載荷が工法間の剥離率の違いに及ぼす影響が明確になっている。

ベースネット工法、MCR工法及びループボンド工法では、 $1/250$ の初サイクルから破壊時に至るまでにその傾きに違いはあるものの、連続的に剥離率は増加しているが、インターネット工法では、 $1/250$ の正負初サイクル

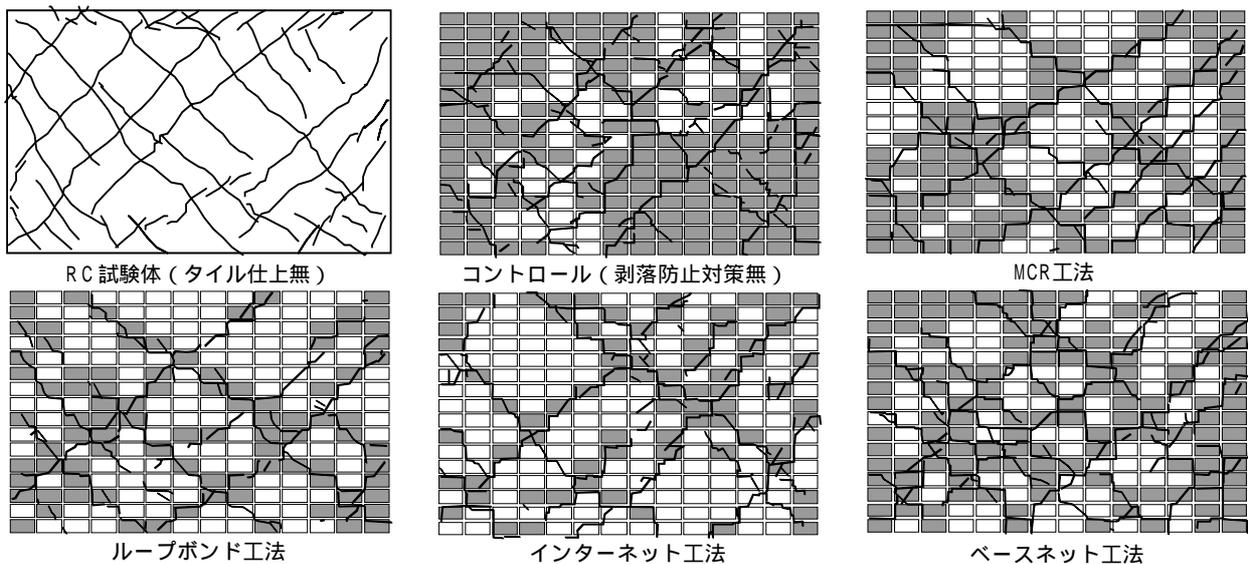


Fig.6 RC試験体のひび割れ分布及びタイル仕上げ面のひび割れ及び剥離分布
Crack and Delamination Pattern of RC Skeleton and Tilings (Story Deformation Angle 1/250)

時に剥離を生じたのみで、繰返し時の新たな剥離は生じていない。インターネット工法では層間変形角の増大に伴うタイルの剥離がひび割れ近傍にしか発生しないのに対して、その他の工法では、ひび割れ近傍以外の箇所（ひび割れ間隔内及び壁端部）においても、ひび割れを伴わない面的な剥離を徐々に生じたことが、その理由と考えられる。

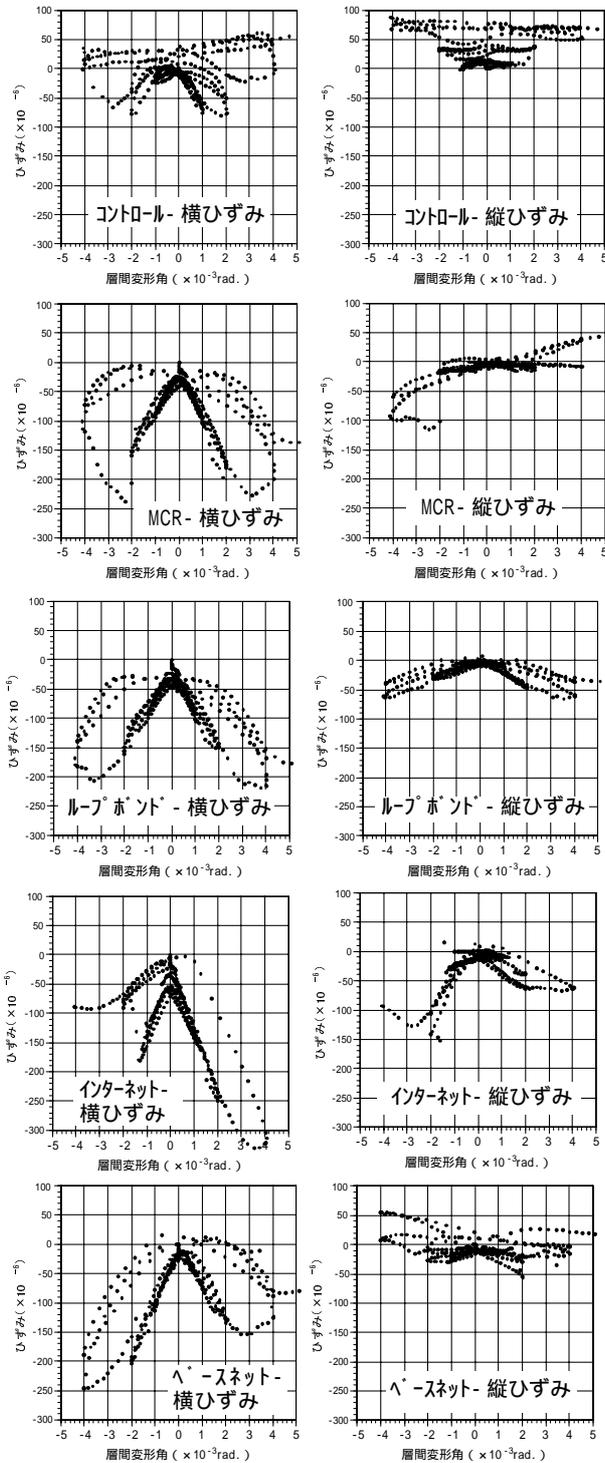


Fig.7 層間変形角とタイル表面のひずみの関係
Story Deformation Angle vs. Tile Surface Strain

3.6 RC試験体のひび割れ率とタイルのひび割れ率及び剥離率の関係

前述の様にRC試験体のひび割れによってタイルにひび割れを生じるが、工法によりRC試験体のひび割れに対する隠蔽効果が異なる。そこで既往の研究⁴⁾に準じ算出した各層間変形角におけるひび割れ隠蔽率の平均値と破壊時のそれをTable 5に示す。立体繊維材料を用いた工法のひび割れ隠蔽率が比較的高く、破壊時におけるその大小関係は、インターネット工法>ベースネット工法>MCR工法>ループボンド工法>コントロールの順である。

Table 4 タイルの接着強度試験の結果 (n=3)
Result of Bond Strength Test of Tiling

工法名	平均接着強度 (N/mm ²)	n-1	主な破断状況
コントロール	1.19	0.764	下地タイルとRC躯体の界面
MCR	1.41	0.351	下地タイルとRC躯体の界面
ループボンド	1.17	0.129	タイル裏足と張付けタイルの界面
インターネット	1.74	0.053	下地タイルとRC躯体の界面
ベースネット	0.80	0.332	タイル裏足と張付けタイルの界面

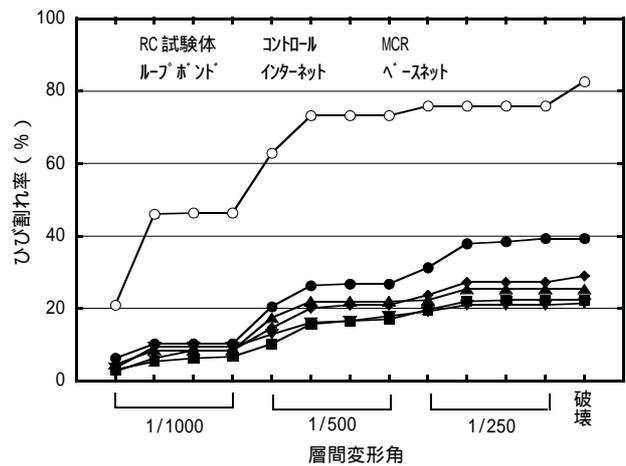


Fig.8 層間変形角とひび割れ率の関係
Story Deformation Angle vs. Crack Rate of RC Skeleton and Tiling

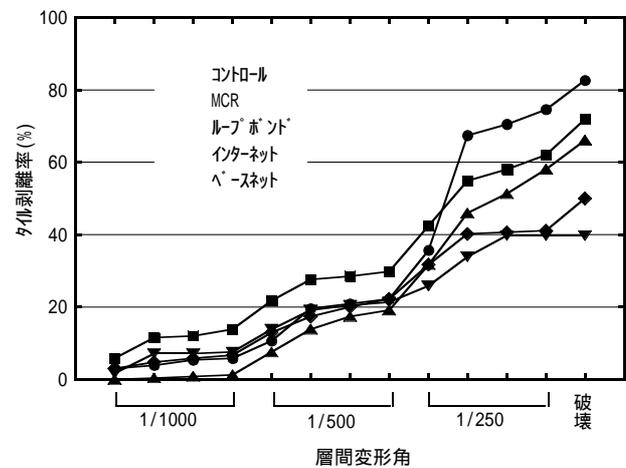


Fig.9 層間変形角とタイルの剥離率の関係
Story Deformation Angle vs. Delamination Rate of Tiling

Table 5 タイルのRC試験体のひび割れ隠蔽率
RC Skeleton Crack Covering Rate of Tiling

工法の種類 ひび割れ隠蔽率(%)	コントロール	MCR	ループボンド	インターネット	べースネット
平均値	63.1	72.7	73.4	76.8	78.6
破壊時	52.4	69.2	64.9	74.1	73.0

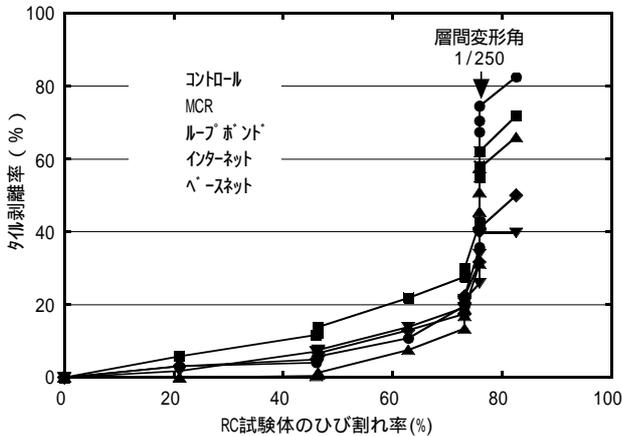


Fig.10 RC試験体のひび割れ率とタイルの剥離率の関係
Crack Ratio of RC Skeleton vs.
Delamination Rate of Tiling

Fig.10にRC試験体のひび割れ率とタイルの剥離率の関係を示す。層間変形角1/500迄は、RC試験体のひび割れ率に比例してタイルの剥離率も増大するが、層間変形角1/250以後は急激にタイルの剥離率が増大する傾向があり、2直線(bi-linear)の性状を示す。

3.7 タイルのひび割れ率と剥離率の関係

Fig.11にタイルのひび割れ率と剥離率の関係を示す。ここで、それぞれのタイルの剥離率・ひび割れ率曲線下の面積の相対比の逆数をひび割れ・剥離抵抗指数として定義すると、インターネット工法(3.4) > MCR工法(3.1) > ループボンド工法(2.1) > ベースネット工法(1.7) > コントロール(1.0)の順となる。

3.8 タイルの接着強度とひび割れ率・剥離率の関係

Fig.12にタイルの接着強度と剥離率の関係を示す。タイルの接着強度は、ひび割れ率とは相関関係が認められないが、剥離率とは比較的高い相関関係(相関係数: 0.8411)が認められる。

3. まとめ

今回の実験結果を整理すると次の様になる。

1) 層間変形角の増大に伴いタイルのひび割れ率及び剥離率は共に増加し、層間変形角1/250以降では工法間の剥離率に明確な差異が認められる。

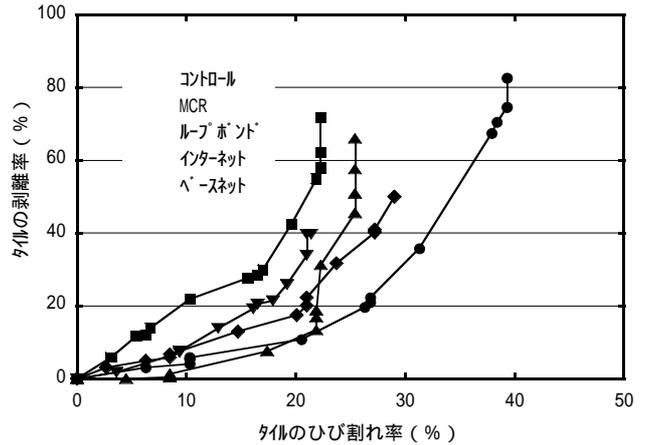


Fig.11 タイルのひび割れ率と剥離率の関係
Crack Rate of Tiling vs.
Delamination Rate of Tiling

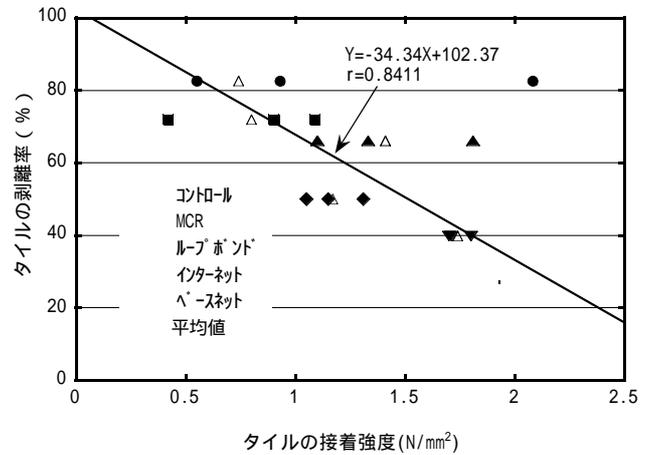


Fig.12 タイルの接着強度と剥離率の関係
Bond Strength of Tiling vs.
Delamination Rate of Tiling

- 2) ひび割れ隠蔽率及びひび割れ・剥離抵抗指数は共にインターネット工法が最も高い。
- 3) タイルの接着強度は、そのひび割れ率よりも剥離率と比較的高い相関関係にある。

参考文献

- 1) 建設大臣官房官庁営繕部監修：建築工事監理指針平成9年版(下巻) pp86~91, (1998.3)
- 2) 馬場明生他：地震時における外装仕上材料・工法の安全性に関する実大実験(その1~4), 日本建築学会関東支部研究報告集, pp273~336, (1977)
- 3) 建設大臣官房官庁営繕部監修：建築工事共通仕様書平成9年版, pp197~198, (1997.3)
- 4) 馬場 他：地震時における外装仕上材料・工法の安全性に関する実大実験, セメント・コンクリート, pp.18~26, (1978.6)