

タイル剥落防止工法の耐震性能（その2）

水平一方向振動加振実験による検討

三 谷 一 房 小 川 晴 果 津 田 和 明
勝 俣 英 雄 川 口 徹

Seismic Test on Methods of Preventing Tilework Fall-off (Part 2)

Evaluation by Horizontal Uni-axial Vibration Tests

Hitofusa Mitani Haruka Ogawa Kazuaki Tsuda
Hideo Katsumata Toru Kawaguchi

Abstract

It is important to know the seismic resistance capacity of ceramic tiles commonly used as external coverings of buildings. This is because fall-off of tiles during earthquakes poses a considerable danger to pedestrians. However, few dynamic seismic tests have been conducted on non-structural members such as ceramic tiles. In this study, a three-dimensional shaking table test was conducted in order to determine the seismic resistance capacity of wet construction methods for fixing ceramic tiles. This paper presents the test results of an earthquake response evaluation of a reinforced concrete wall subjected to horizontal uni-axial vibration. It is concluded that ceramic tiles applied by the standard method gradually fall off when the applied rotation angle increases. The tiling method utilizing a three-dimensional fabric and anchor pins maintains its adherence to the concrete substrate during the final input earthquake motion.

概 要

建築物の外装仕上げとして代表的な陶磁器質タイル張り仕上げに関しては、地震時にタイルが剥落した場合、人命に与える危険性が非常に高いことから、その耐震安全性の確保が重要な課題である。従来、非構造部材に対する静的な耐震実験に比べ、動的な耐震実験の報告例は非常に少なく、タイル張り仕上げに関しては全く見受けられない。本報告では、鉄筋コンクリート造耐震壁に施工されたタイル張り仕上げを試験体とし、水平一方向加振による振動台実験によってその耐震性を検討した。その結果は次の通りである。剥落防止対策のない在来工法では、耐震壁に生じた部材角の増大とともに、ひび割れ、剥離が増大し、耐震壁の破壊時には90%のタイルが剥落した。一方、剥落防止対策を講じたインターネット工法では、耐震壁の破壊時にもタイルの剥落は全く生じず、在来工法に比べ耐震安全性に優れた工法であることが確認できた。

1. はじめに

陶磁器質タイル張り仕上げは、耐久性に優れることから、建築物の外装仕上げとして一般的に用いられている。しかし万が一、タイルが剥落した場合には、人命に与える危険性が非常に高いことが重大な問題となっている。さらに芸予地震（2001年3月）では、構造部材よりも非構造部材の被害報告が相対的に顕著であったことから、タイル張り仕上げをはじめとする非構造部材の耐震安全性への関心が今後ますます高まると考えられる。

一般的に地震時において非構造部材に作用する荷重としては、非構造部材の振動応答による慣性力と構造体の層間変位による強制力とがある。後者については非構造部材の静的な耐震実験として比較的多く報告され、それらは日本建築学会編「非構造部材の耐震設計指針・同解説および耐震設計・施工要領」¹⁾に引用されている。

これまでタイル張り仕上げに関しては、馬場らの実大鉄筋コンクリート(RC)造建物を用いた静的水平力載荷実験²⁾³⁾、熊谷の1/2縮小RC造耐震壁を用いた静的水平力載荷実験⁴⁾が報告されており、これらは各種の在来タイル張り工法を実験因子としてその耐震性を検討している。また筆者らは前報⁵⁾で、縮小RC造耐震壁を用い、タイル剥落防止工法を実験因子とした静的水平力載荷実験を行い、その耐震性評価を行っている。しかしながら非構造部材に関する動的な耐震実験は、これまで乾式石張り仕上げやシステム天井など極めて僅かな例⁶⁾に見られるのみであり、タイル張り仕上げに関しては全く見受けられない。

このような背景から本報告では、ボックス型のRC造耐震壁に施工されたタイル張り仕上げを対象とし、三次元振動台を用いて水平一方向振動加振実験を行い、その耐震性能について検討した。

2. 実験計画

2.1 試験体の作製

2.1.1 RC試験体 タイル張り仕上げを施工したRC試験体の形状寸法をFig. 1に示す。RC試験体はスパン1200mm、壁厚60mmのボックス型の耐震壁であり、破壊モードは曲げ降伏後にせん断すべり破壊を生じるように計画されている。RC試験体のトップスラブ部上下には鋼板による付加マスを設置し、トップスラブ部の重量と合わせて、壁部分には1.14N/mm²の軸方向応力度を作用させた。これは一般建物の1/4～1/5程度であるが、壁コンクリートと配筋の状況は実建物を模擬している。Table 1にRC試験体の諸元を、Table 2に壁部のコンクリート及び鉄筋の材料試験結果を示す。なおRC試験体の型枠には樹脂加工合板を用いコンクリート表面を平滑な状態とした。

2.1.2 タイル張り仕上げ コンクリート打設後28日間養生した後、ウェブ壁(加振方向が面内となる壁)に、Fig. 2に示す剥落防止対策のない在来工法と剥落防止対策を講じたインターネット工法(立体繊維材料とアンカーピンを併用)によってタイル張りを施工した。

まず経年変化によるコンクリート下地との付着力低減を想定して吸水調整材を塗布せずに、厚さ10mmの現場調合による下地モルタル(普通ポルトランドセメント:珪砂5号=1:2.83 by wt., 水セメント比60%)を施工した。なお在来工法では比較として、エチレン酢酸ビニル(EVA)系の吸水調整材(固形分4.5%, 5倍液希釈)を塗布した仕様(以下、参考在来工法という)も作製した。

インターネット工法では、下地モルタル塗布後7日間養生した後、指定の既調合モルタルで立体繊維材料の張付けを行い、翌日、ステンレス製のアンカーピン(直径6.0mm、長さ40mm)を縦ピッチ460mm、横ピッチ400mmで4ヶ所に施工した。コンクリートへのアンカーピンの埋込み長さは、25mm程度である。

タイルは下地モルタル塗りから14日間養生期間をおいた後、現場調合モルタル(普通ポルトランドセメント:珪砂5号=1:0.7 by wt., 水セメント比30%, セメントに対する繊維材料添加率0.09% by wt., 下地には予めEVA系吸水調整材を塗布)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、翌日目地詰めを行い、更に14日間養生をした。タイル張り仕上げで使用した各モルタルの基礎物性をTable 3に示す。

2.2 加振方法

2.2.1 振動台の概要 使用した三次元振動台は水平最大速度が200kineで、兵庫県南部地震の揺れを2倍に増幅させて再現することが可能である。また本振動台の特長は、試験体の構造特性が加振中に変化する場合でも入力波の再現性を向上させることができる点にある。

2.2.2 入力地震動 加振は水平一方向とし、基準入力地震動(模擬地震波)の加速度振幅を徐々に増大させて入力した。目標とする最大入力加速度は、300, 750, 1300, 1500, 2000, 2200, 2400, 2600galとした。基準入力地震動は、基本的には試験体の弾性から破壊に至るまでの固有振動数変動領域において応答加速度が一定となるように作成した。

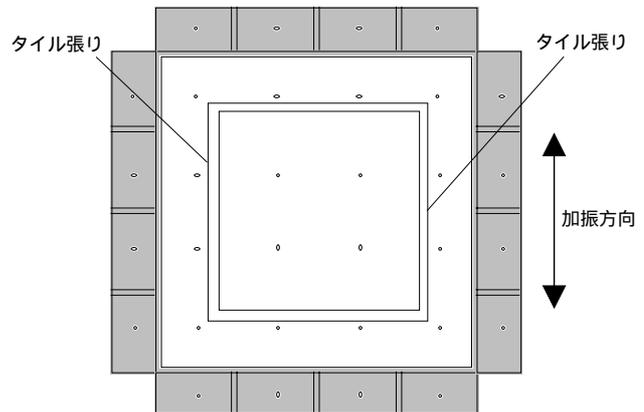
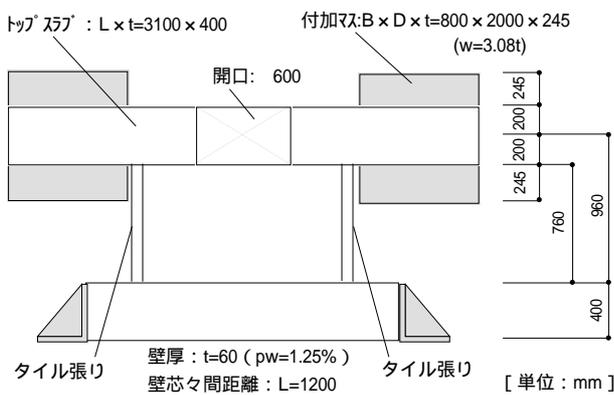


Fig. 1 RC試験体の形状寸法
Shapes of RC Skeleton

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

シアスパン比* M/Qd	形状 L x t (cm)	縦筋 P _{wv} (%)	横筋 P _{wh} (%)	軸方向応力度 (N/mm ²)
0.8	120 x 6	D6 @85ダブル (1.25)	D6 @85ダブル (1.25)	1.14

*トップスラブ部の回転慣性の影響無視

Table 2 壁部のコンクリート及び鉄筋の材料試験結果
Mechanical Properties of Concrete and Reinforcement

材料	強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (x 10 ⁴ N/mm ²)
コンクリート	圧縮: $\sigma_b = 33.8$	$E_c = 2.41$
鉄筋 (D6)	降伏: $\sigma_y = 369$	$E_s = 19.8$

2.3 測定項目及び方法

RC 試験体については、トップスラブ部及び基礎部の加速度を加速度計で、基礎部上端とトップスラブ部下端間の相対水平変位を変位計で、また鉄筋のひずみをひずみゲージで測定した。

タイル張り仕上げについては、壁中央部と端部、およびコンクリート壁裏面側の同一位置にそれぞれ加速度計を取付け、加振方向の加速度を測定した。各加振中は試験体の様子をビデオカメラで撮影した。

さらに各加振後には、RC 試験体のひび割れおよび破壊範囲を、またタイル張り仕上げのひび割れおよび剥落範囲を目視観察により記録した。さらにタイル張り仕上げの剥離については、テストハンマーによる打診でチェックし記録した。

タイル張り仕上げの剥落率および剥離率* は、壁面をタイルの割付けに従ったメッシュに分割し、以下のように定義した。すなわちタイル張り仕上げの落下は剥落と表現し、落下はしていないがテストハンマーによる打診により浮きと判断された部分は剥離と表現している。また剥離率*は、剥落を生じたメッシュ数も含んでいる。

$$\text{剥落率} = \frac{\text{剥落を生じたメッシュの数}}{\text{メッシュの総数}} \times 100\%$$

$$\text{剥離率*} = \frac{(\text{メッシュの総数} - \text{非剥離のメッシュの数})}{\text{メッシュの総数}} \times 100\%$$

3. 実験結果および考察

3.1 破壊経過

3.1.1 RC試験体 振動台実験の状況をPhoto 1に、またRC試験体の最大応答値一覧と各加振後における目視観察によるRC試験体及びタイル張り仕上げの状態をTable 5に示す。

鉄筋の最大応答ひずみ度から、750gal入力時においてフランジ壁脚部に曲げひび割れとウェブ壁にせん断ひび割れが生じ、2000gal入力時にはフランジ壁脚部で鉄筋が引張降伏したと判断される。コンクリート壁のせん断ひび割れは2200gal入力終了後に初めて目視で確認できた。最終的には2600(2)gal入力時に、計画通りウェブ壁脚部においてせん断すべり破壊に至った。フランジ壁は、ウェブ壁との交差部以外は比較的損傷しておらず、実験終了後においても軸力を保持し、RC 試験体は自立していた。

3.1.2 タイル張り仕上げ

A. 加振前

経年変化による下地モルタルの付着力低減を想定して吸水調整材を塗布しなかったため、加振前の剥離率*は、在来工法が23.3%、インターネット工法が50.0%で、塗布した参考在来工法が0%であった。

B. 在来工法

在来工法および参考在来工法における2200gal, 2400gal, 2600(2)gal入力終了後の剥落, 剥離およびひび割れ状態をFig. 3に示す。

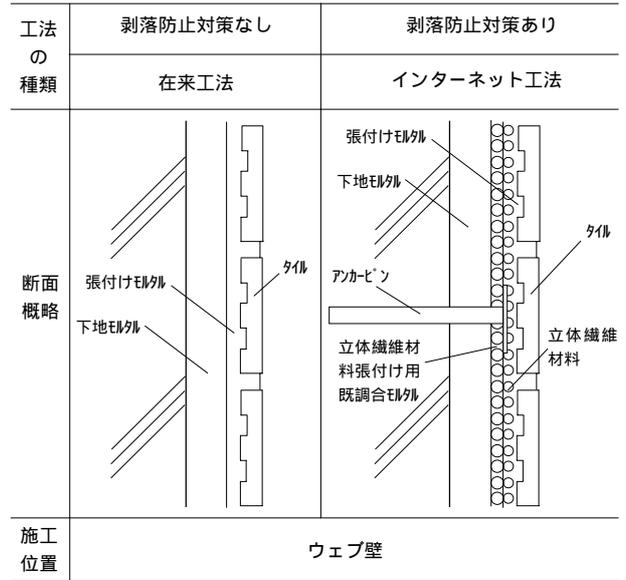


Fig. 2 タイル張り工法の種類
Types of Tiling Method

Table 3 各モルタルの基礎物性
Properties of Applied Mortars

モルタルの種類	70-値 (mm)	単位容積 質量(kg/l)	練上り温度 ()	曲げ強さ* (N/mm ²)	圧縮強さ* (N/mm ²)	曲げヤング率* (×10 ⁴ N/mm ²)
下地モルタル	157	2.21	27.5	5.04	23.07	2.30
立体繊維材料張付け用既調合モルタル	169	1.64	23.1	5.89	20.35	0.90
張付けモルタル	155	2.15	25.0	6.59	61.00	3.26

*28日間の気中養生



Photo 1 振動台実験の状況
Appearance of Shaking Table Test

在来工法では、300～1300gal入力終了後までは目視観察および打診による変化は認められなかった。1500gal入力終了後、下方左端部で剥離が若干発生・拡大し、2000gal入力後、初めて目地部にひび割れを目視確認した。2200gal入力時に初めて下方部の剥落が生じた。2400galおよび2600(1)gal入力時にはさらに剥落が進行した。いずれもコンクリートと下地モルタルとの界面剥離である。

参考在来工法では、1500gal入力終了後に下方右端部の剥離を確認した。2000gal入力終了後、先の剥離が拡大するとともに、一部にひび割れを確認した。2200galおよび2400gal入力終了後、それぞれさらに剥離およびひび割れの拡大が確認された。2600(1)gal入力時に上方部が一部

剥落し、2600(2)gal入力時に下方部が剥落した。剥落しなかった部分も多くは剥離しており、ひび割れも多数生じた。Photo 2にRC試験体破壊後の状態を示す。

C. インターネット工法

Fig. 4に2200gal, 2400gal, 2600(2)gal入力終了後の剥落, 剥離およびひび割れ状態をそれぞれ示す。

300 ~ 1300gal入力終了後までは目視観察および打診による変化は認められなかった。1500 ~ 2400gal入力終了後、徐々に剥離の拡大が確認された。この時点で下地モルタルとコンクリート壁との間には極く僅かな間隙が目視確認されており、タイル張り仕上げ層はアンカーピンのみでコンクリート壁と接合されていた。最終的には2600(2)gal入力時も剥落はなく、目地部に若干のひび割れを生じたものの、タイル張り仕上げ層は一体となってアンカーピンによりコンクリート壁と接合されていた。

Photo 3にRC試験体破壊後の状態を示す。

3.2 タイル張り仕上げの剥落率および剥離率*

いずれの工法とも、ウェブ壁の最大部材角(R)約2/1000以降、剥離率*が増加し始め、その後は部材角の増大とともに剥離率*も増加した(Fig. 11参照)。在来工法では、最大部材角約4/1000以降、剥離率*の大部分を剥落が占め、RC試験体破壊時の剥落率は90%であった。なお参考在来工法では、最大部材角約6/1000で初めて剥落し、この時の剥落率は約7%であったが、破壊時の剥落率は約57%に達した。一方インターネット工法では、剥離率*が100%の状態に至っても、立体繊維材料による面内方向の一体化とアンカーピンによる接合によって仕上げ層の剥落は破壊時においても全く生じず、剥落防止効果が非常に高かった。

本実験では加振前における下地モルタルの付着力低減の程度を、両工法間で統一できなかったため、部材角と

剥離率*の関係を工法間で直接比較することが困難であった。しかし動的外力を受けた際のタイル張り仕上げの剥落, 剥離およびひび割れ現象を確認できた意義は、タイル張り仕上げの耐震性評価という点では非常に大きいと考えられる。

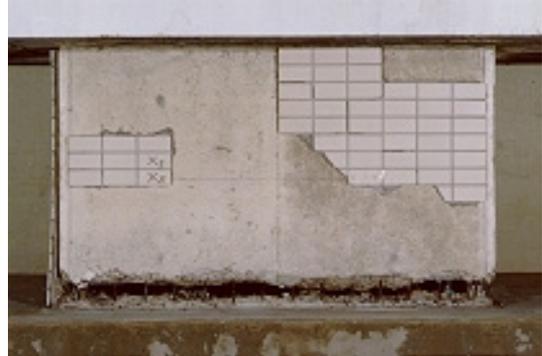


Photo 2 破壊後の在来工法によるタイル張り Appearance of Tiling Utilizing the Standard Method



Photo 3 破壊後のインターネット工法によるタイル張り Appearance of Tiling Utilizing a Fabric and Anchor Pins

Table 4 RC試験体の最大応答値と目視観察の結果
Maximum Values of Earthquake Response of RC Skeleton and Appearance of Tiling

入力波	最大入力 加速度 (gal)	せん断力		水平変位		鉄筋のひずみ度 (正方向)		RC試験体の 状態	タイル張り仕上げの状態		
		Q (kN)	(N/mm ²)	(mm)	R (×10 ⁻³)	縦筋 (×10 ⁻⁵)	横筋 (×10 ⁻⁵)		ウェブ壁		
									剥落防止対策なし		剥落防止対策あり
300gal	335	149	1.04	0.13	0.17	166	17				
750gal	1035	374	2.60	0.40	0.53	1001	416				
1300gal	1109	465	3.23	0.97	1.28	1191	576				
1500gal	1629	640	4.44	1.55	2.04	1593	1294		下方左端部から剥離発生・拡大	下方右端部より剥離発生・拡大	剥離発生・拡大
2000gal	1807	691	4.80	2.43	3.20	2200	1495	フラスコ壁縦筋引張降伏	ひび割れを目視確認	剥離拡大、ひび割れを目視確認	剥離拡大
2200gal	1821	769	5.34	2.99	3.93	2450	1680	せん断ひび割れ目視確認	加振中に下部剥落(剥離率: 47.8%)	剥離拡大、ひび割れ増大	剥離発生・拡大
2400gal	2210	924	6.42	3.86	5.08	2680	1848		加振中に上部剥落(剥離率: 73.3%)	剥離拡大、ひび割れ増大	全面剥離(アンカーピンのみで接合)
2600(1)gal	2720	1032	7.17	4.61	6.07	2740	2230		加振中に上部剥落(剥離率: 90.0%)	加振中に上部剥落(剥離率: 6.7%)、剥離拡大、ひび割れ増大	
2600(2)gal	3050	1011	7.02	>15	>19.7	4920	2440	せん断すべり破壊		加振中に下部剥落(剥離率: 56.7%)	ひび割れを目視確認

3.3 タイル張り仕上げの応答加速度

3.3.1 非剥落時 代表例としてFig. 5およびFig. 6に、2400gal入力時の在来工法におけるタイル表面(中央部)の応答加速度およびそのコンクリート壁裏面側で測定したRC試験体の応答加速度の時刻歴波形を示す。またFig. 7に、それらの加速度応答スペクトルを示す。同様にFig. 8~Fig. 10に、インターネット工法におけるそれらを示す。

全ての応答加速度の測定結果(壁中央部およびアンカーピン近傍部を含む)から、タイル表面とそのコンクリート壁裏面側の加速度応答スペクトルは、加速度を取付けたタイルが剥落しない限り、ほぼ一致していることがわかった。

例えば在来工法では、2200gal入力終了後に、Fig. 3に示す様に加速度計を取付けたタイル部の剥離が打診により確認され、さらにこの時、近傍のタイルも剥落した。しかしながらこの時点では、タイルとRC試験体の加速度波形の応答スペクトルに差異はなく、この様な状態においてもタイル張り仕上げはコンクリート壁と一体となって挙動していたと言える。またインターネット工法では、2400gal入力から得た加速度応答スペクトルを示すFig. 10において、タイル張り仕上げ全体が完全にコンクリート壁から界面剥離し、アンカーピンのみでコンクリート壁と接合した状態にあったが、両者の応答には差異はなかった。したがってタイル張り仕上げはコンクリ

ト壁と一体となって挙動したと考えられる。

3.3.2 剥落時 Fig. 5において、在来工法の加速度振幅が約9秒後に急激に増大している。これは加速度計を取付けたタイルが剥落したためである。したがってFig. 7に示す様に、タイルとRC試験体の加速度波形の応答スペクトルには明らかに差異が認められる。

3.4 静的水平力載荷実験との比較

部材角と剥離率* の関係について、静的水平力載荷実験による前報⁵⁾の在来工法と、本報で検討した付着劣化がない参考在来工法の比較をFig. 11に示す。なお静的水平力載荷実験では、RC造耐震壁を同一部材角で正負交番で2回づつ加力したため、同一部材角に対し、剥離率* は4点づつプロットした。

静的水平力載荷実験での各部材角における剥離率* と比較し、水平一方向振動加振実験での剥離率* はいずれも小さかった。また静的水平力載荷実験では、部材角1/1000で既に剥離が発生したのに対し、水平一方向振動加振実験では部材角約2/1000で初めて剥離が発生した。これらの理由として、前者では部材角の増大とともに、耐震壁全域でせん断ひび割れを順次生じ、最終的には破壊モードが側柱を巻き込みながらのせん断破壊であるのに対し、後者では耐震壁の曲げ降伏後に、ウェブ壁脚部におけるせん断すべり破壊であることから、壁体部分の変形・ひび割れ状況の違いによるものと考えられる。

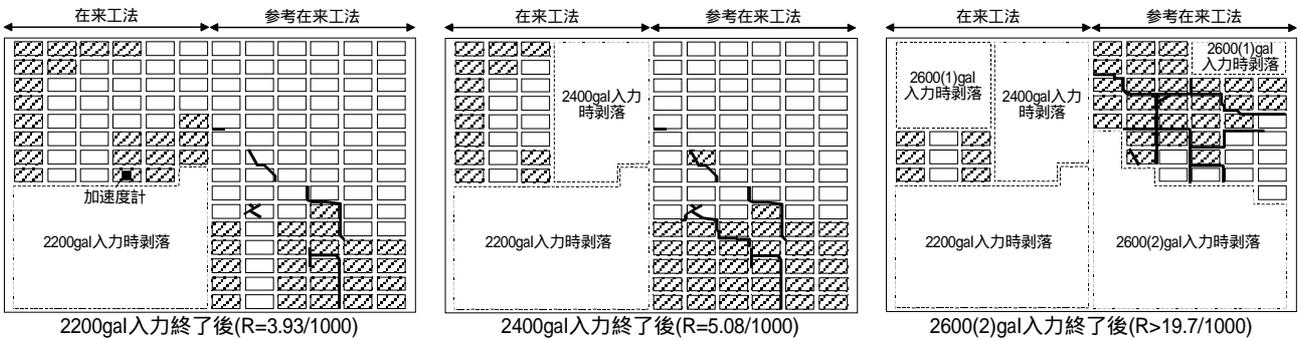


Fig. 3 在来工法および参考在来工法の剥落、剥離およびひび割れ状態 (▨ 剥離部分)
Appearance of Tiling Utilizing the Standard Method after Each Vibration Test

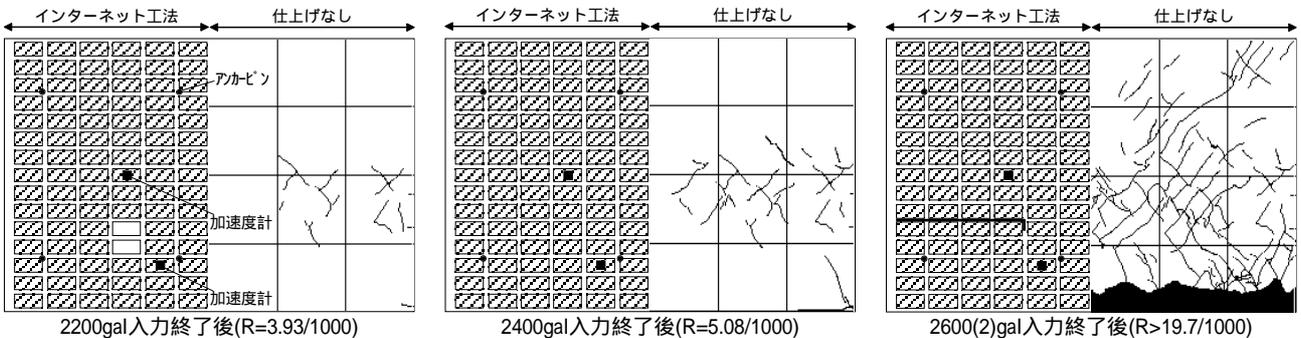


Fig. 4 インターネット工法の剥離およびひび割れ状態とコンクリート壁のひび割れ状態 (▨ 剥離部分)
Appearance of Tiling Utilizing a Fabric and Anchor Pins after Each Vibration Test

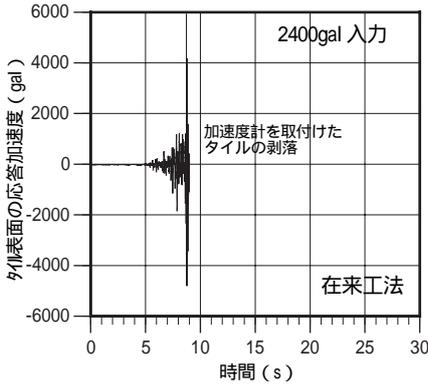


Fig. 5 タイル表面の時刻歴波形
Wave Profile of Tiling

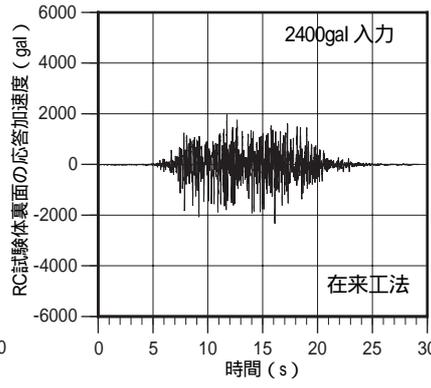


Fig. 6 RC試験体裏面の時刻歴波形
Wave Profile of RC Wall

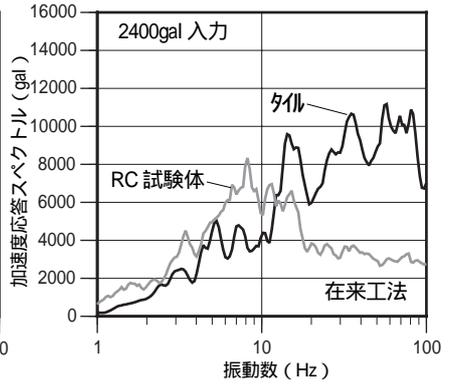


Fig. 7 加速度応答スペクトル
Accerlation Response Spectrum

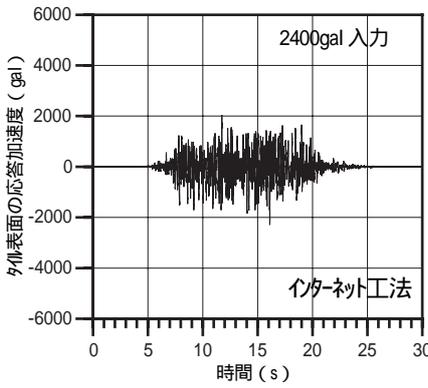


Fig. 8 タイル表面の時刻歴波形
Wave Profile of Tiling

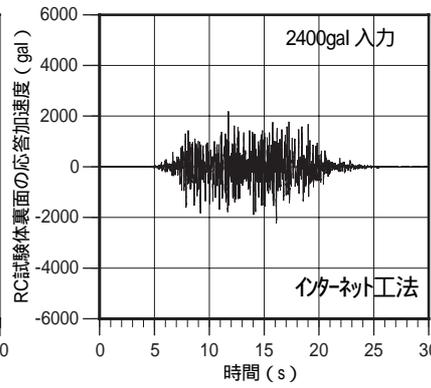


Fig. 9 RC試験体裏面の時刻歴波形
Wave Profile of RC Wall

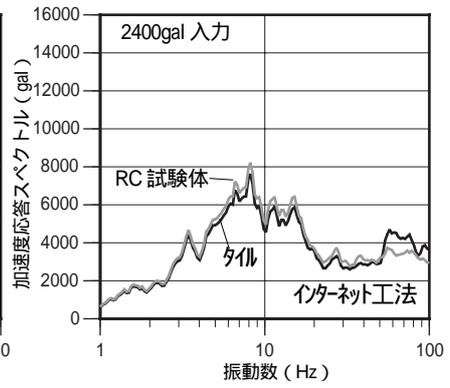


Fig. 10 加速度応答スペクトル
Accerlation Response Spectrum

4. まとめ

今回の実験結果を整理すると次のようになる。

- 1) 経年変化によるコンクリート下地との付着劣化を施した在来工法では、入力加速度の増大、すなわち部材角の増大とともに、剥離およびひび割れが拡大し、RC試験体の破壊時には剥落率が約90%に達した。また付着劣化のない参考在来工法の場合も、剥離およびひび割れが徐々に拡大し、破壊時の剥落率は約57%であった。
- 2) 付着劣化を施したインターネット工法では、入力加速度の増大、すなわち部材角の増大とともに、徐々に剥離は拡大したが、破壊時にも剥落は生じなかった。このことから、経年変化によりコンクリート下地と下地モルタルの界面に付着劣化を生じたとしても、インターネット工法は在来工法に比べ、剥落の可能性が非常に少なく、耐震安全性に優れた工法であることが確認できた。

参考文献

- 1) 日本建築学会編：非構造部材の耐震設計指針・同解説および耐震設計・施工要領，1985，丸善
- 2) 馬場明生，伊藤弘 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1，2），関東支部研究報告集，pp273～280，1977，日本建築学会
- 3) 馬場明生，伊藤弘：地震時における外装仕上材料・工法

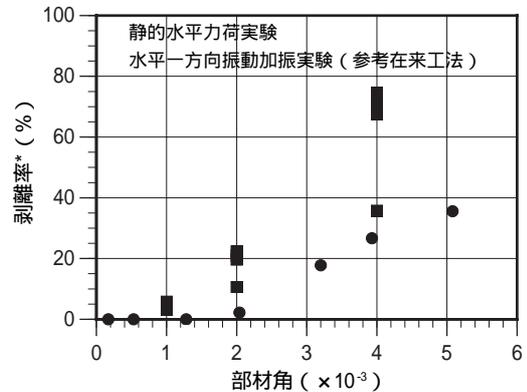


Fig. 11 在来工法における部材角と剥離率*の関係
Rotation Angle vs. Delamination Rate of Tiling
in case of the Standard Methods

- の安全性に関する実大実験（その3，4），関東支部研究報告集，pp329～336，1980，日本建築学会
- 4) 熊谷敏男：外壁タイル張り仕上げの剥離・剥落性状に関する研究，1994.5
- 5) 小川晴果 他：タイル剥落防止工法の耐震性能（その1），大林組技術研究所報，pp1～6，2001.1
- 6) 日本建築学会編：非構造部材の耐震設計指針・同解説および耐震設計・施工要領，pp157～161，273～290，1985，丸善