

外壁タイル張りの耐震性の検討

熊谷 敏男
(横浜支店)
手塚 武仁
(技術研究所)
首藤 恵治
(関東支店)

§ 1. はじめに

建物の外壁に張り付けられた陶磁器質タイルの地震被害の実態調査は、宮城県沖地震(昭和53年6月)や日本海中部地震(昭和58年5月)等について行なわれている^{1)~3)}。その結果、外壁の部位としては開口隅部・水平打継部・短柱部等でタイルの剝落が多く発生しており、伸縮目地を適切に配置した場合および先付け工法でタイルを施工した場合は、剝落防止に有効であることが確かめられている¹⁾³⁾。

実大規模のタイル張り壁の耐震性については、馬場・伊藤・坂本等によってタイル張り工法を可変要因とした実験的な検討がなされ、種々の有用な知見が得られている⁴⁾⁵⁾。

本検討では、施工上の要因を考慮したタイル張り有開口壁の耐震実験を実施し、震度V~VI程度の地震でも危険な剝落が生じないタイル張りの構・工法の確立を目的としている。

§ 1. 実大静的耐震実験

2.1 実験概要

実験に用いた供試体は、一般的な5層程度の建物の1階部分を想定した1/2縮小モデルであり、有開口耐震壁の外側に外装仕上げ材としてタイルを張り付けたものである。

実験要因として、タイルは実物大の3種類のタイルを用い、張付け工法としては先付け工法および手張り工法(圧着張り工法、改良積上張り工法)の3種類を選定し、さらに伸縮目地の有無も加えることとした。建物上層の影響を考え柱上部より軸力を加え、その軸力を保ったまま水平繰返し加力を行なった。なお、水平繰返しは部材角制御とした。測定項目は、加える水平荷重と供試体各部の変形、躯体およびタイルの亀裂とタイル表面のテス

トハンマーでの打音判定による剝離とである。

また、水平繰返し加力がタイルの接着性状に及ぼす影響を調べることを目的として、タイルの接着強度試験を加力前および加力後で実施した。

2.2 実験方法

地震時以外の平常時故障の被害調査の分析結果⁶⁾によると、張付け工法では圧着張り工法および積上張り工法によるものが86%を占め、またタイルの種類ではモザイク、小口平および二丁掛タイルが85%となっている。

また、宮城県沖地震等の調査によると、タイル張りの地震による被害は、開口隅角部に発生する確率が多くなっている。しかし、伸縮目地が適切に設けられている壁体では、地震時に剝離・剝落が生じにくいという結果が得られている。

本実験では上記の調査結果等も考慮し、地震時被害の発生確率の高いタイル張り開口壁を対象に、平常時の被害も考慮に入れて、“張付け工法の種類”“タイルの種類”“伸縮目地の有無”を実験要因として取上げL9(3⁴)の直交表に割り付け、これに従って供試体を9体製作し実験に供した。実験要因の各供試体への割付けは、表-1に示すとおりである。

供試体は、図-1に示す有開口壁とした。本供試体はPC版($F_c=210\text{kgf/cm}^2$)として製作したが、通常の建物の施工条件に合わせるため下部梁上面でコンクリートに打継ぎを設けている。先付け工法以外の供試体のタイルは、下地モルタル(1:2.5モルタル)を塗り付けてからタイル張りを行なった。

本供試体の水平加力実験は、図-2に示すように自己釣合型鋼製反力フレームを用いて行なった。供試体柱脚部は、PC鋼棒により反力フレームに固定した。

水平加力は、供試体頂部の梁芯・壁芯位置に取り付けたオイルジャッキで行なった。図-3に示した6回の繰返し加力とし、部材角の最大で1/600まで変形させた。また、水平加力中は上層階の長期荷重の影響を考慮し、柱

芯位置に軸応力で 56kgf/cm^2 の鉛直力を保持した状態にした。なお、供試体はタイル張り後2〜3ヵ月で水平加力実験に供した。

各水平加力ピーク時に、タイル張り仕上げ面の亀裂および浮上がり(剝離)を調べ記録した。また、加力前後にタイルの接着強度を測定し、加力による影響を調べた。

§ 3. 耐震実験結果および考察

3.1 供試体の変形状

タイル張りした有開口供試体の変形状の一例は、図-4に示すとおりである。図-4にはNo.1の変位・荷重曲線を示したが、他の供試体の変形状も類似の性状を示している。

本RC壁躯体の復元力特性は、Degrading-Linear型で近似でき、亀裂の発生により次第に剛性が低下している。亀裂発生荷重は、既往の算定式によりおおよそ推定が可能であり、躯体の亀裂発生変形角は $1/5000 \sim 1/4000$ であった。

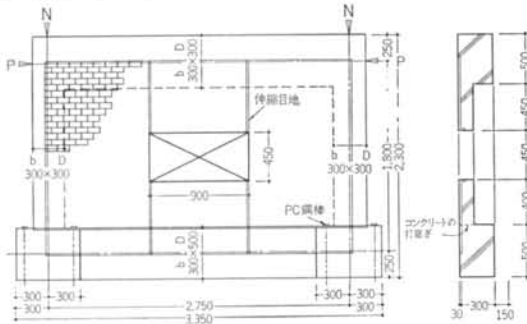


図-1 供試体の形状

3.2 亀裂の発生傾向

荷重サイクルを増していった場合のタイル張り壁面の亀裂の進展状況は、図-5に示すとおりである。亀裂は

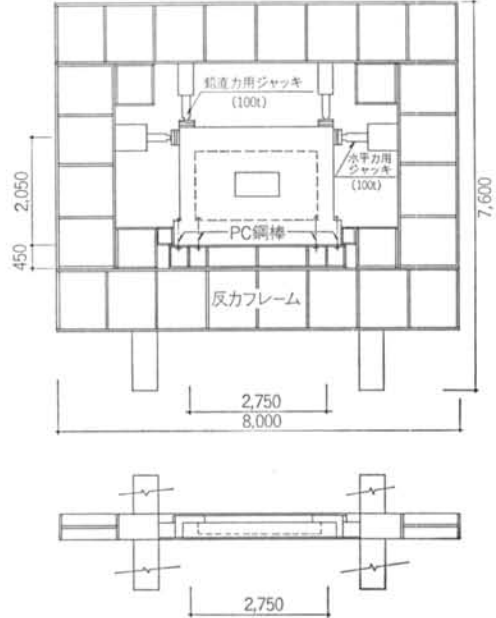


図-2 加力装置の概要

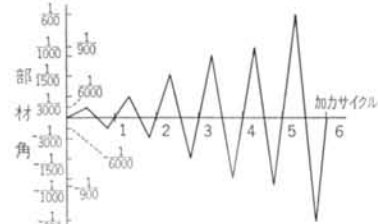


図-3 載荷履歴

因子列 No.	A. 張付け工法の種類 1				B. タイルの種類 2	C. 伸縮目地の有無 3
	A 1	B 2	C 3	e 4		
1	1	1	1	1	1 モザイクタイル	1 目地有り(タイル表層のみ)
2	1	2	2	2	2 45二丁掛	2 目地有り(躯体まで)
3	1	3	3	3	3 小口平	3 目地無し
4	2	1	2	3	1 モザイクタイル	2 目地有り(躯体まで)
5	2	2	3	1	2 45二丁掛	3 目地無し
6	2	3	1	2	3 小口平	1 目地有り(タイル表層のみ)
7	3	1	3	3	1 モザイクタイル	3 目地無し
8	3	2	1	3	2 45二丁掛	1 目地有り(タイル表層のみ)
9	3	3	2	1	3 小口平	2 目地有り(躯体まで)

*1) この供試体のみタイルを直接躯体コンクリートに張り付けている

注) 張付けモルタルの割合は圧着張り工法の場合1:1モルタル, 改良積上張り工法の場合1:2モルタル

表-1 タイル張り壁の実験要因の割付け

1～2サイクル目の部材角1/6000～1/3000前後より入り始め、6サイクルの1/600まではほぼ直線的に亀裂が増加している。

タイル張り壁面に生じる亀裂は、タイル目地もしくはタイルに入るが、それらの割合をタイル目地への亀裂集中度として表わし、加力サイクルとの関係で示すと図-6のとおりである。加力サイクルが進むにつれて、全体

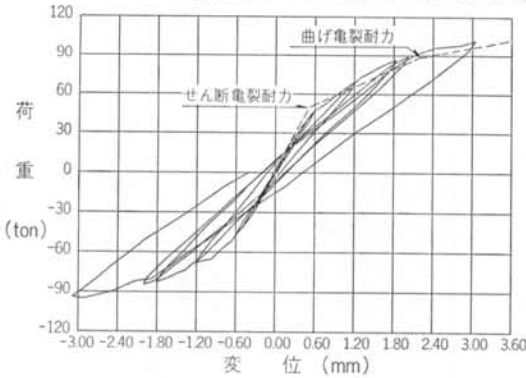


図-4 供試体の変形性状 (No. 1)

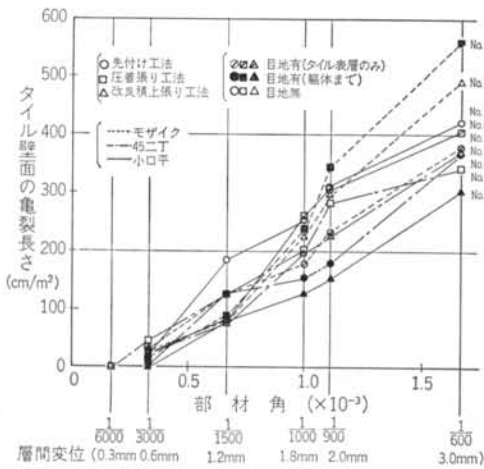


図-5 層間部材角とタイル壁面の亀裂長さ

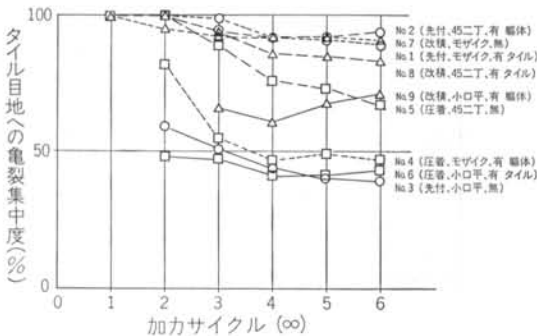


図-6 加力サイクルとタイル目地への亀裂集中度

的にタイル目地への亀裂集中度は低下する傾向(タイルへの亀裂集中度が増す)にある。3～6サイクルにおいて、亀裂集中度が80～95%のグループ、40～50%のグループおよびその中間のグループの3つに区分できる。また、タイルの接着強度との関係で示すと図-7のとおりであり、接着強度が大きくなるとタイル目地への亀裂集中度は、低くなる傾向が見られる。

下地コンクリートに亀裂が生じたときに、タイルが割れる場合とタイル目地が割れる場合とをイラスト的に示したのが図-8である。タイルの接着が良く裏足が有効に働いているタイルでは、下地挙動に追従するためタイルに割れが生じると考えられ、上記の傾向ともほぼ合致している。地震時のタイルの剝落を防ぐためには、図-8の左側の割れパターンの方が望ましいといえる。

3.3 浮上りりの発生傾向

タイルの浮上り率は、ほぼ層間変位と直線関係にあり、浮上りりの生じ始める層間変形角は約1/3000と、躯体の亀裂発生部材角より多少遅れて発生している。

タイルの浮上りりの発生状況は図-9に示すとおりである。浮上りりも亀裂長さと同様に部材角が大なるにつれて、ほぼ直線的に増加している。しかし、No. 9 (改良積上張り工法, 小口平, 目地有り(躯体まで))については、1/900以降より急に浮上りりが増大している。No. 9と他の改良積上張り工法のNo. 7とNo. 8と異なる点は、No. 7とNo. 8には下地モルタル層があるのに対して、No. 9

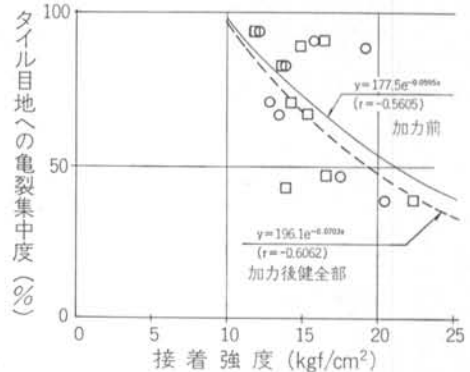


図-7 タイルの接着強度とタイル目地への亀裂集中度(600時)との関係

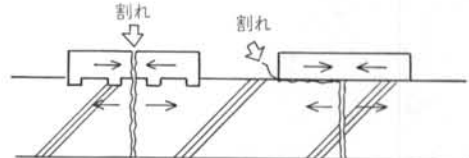


図-8 下地コンクリートに亀裂が生じた時の割れのパターン

は下地モルタル層がなく、タイルが張付けモルタルを介して、躯体コンクリートに直接張り付けられている点である。

3.4 亀裂と浮上がりとの関係

タイル張り壁面に生じた亀裂と浮上がりとの関係は、図-10に示すとおりである。今回の9体のタイル張り壁の亀裂と浮上がりとの関係を概念図で示すと、図-11のとおりである。

下地モルタル層のないNo.9を除くと、張付け工法別でほぼ3つのグループに分類できる。亀裂の進展とともに

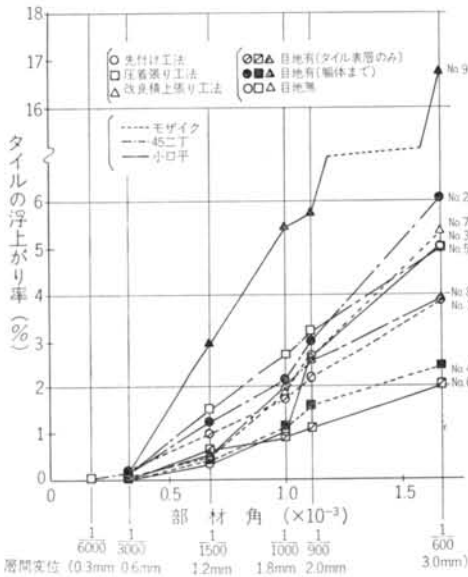


図-9 層間部材とタイル浮上がりとの関係

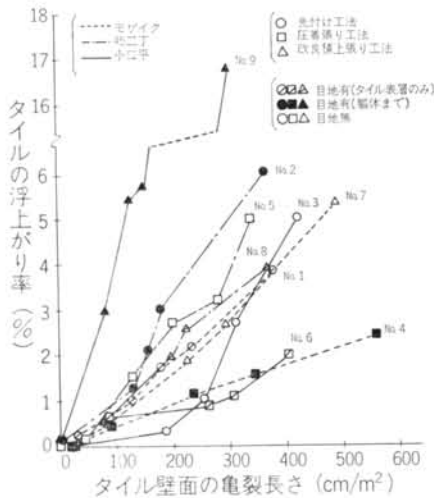


図-10 タイル壁面の亀裂長さとはタイルの浮上がり率との関係

浮上がりが直線的に増加するものとしては、改良積上張り工法と圧着張り工法とであり、前者の方が後者に比べ浮上がり傾向が大となっている。先付け工法は荷重サイクル初期において亀裂のみが進展するが、ある段階から

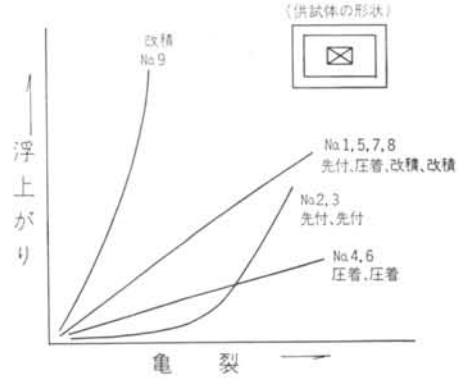
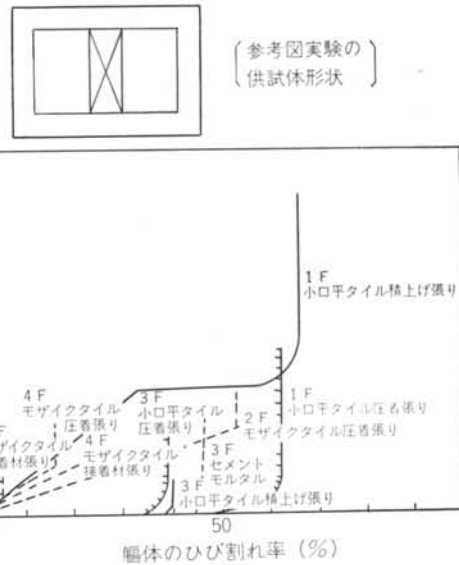
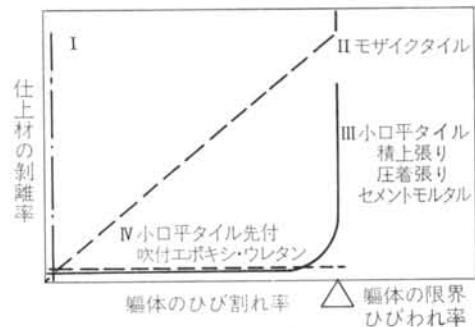


図-11 タイル張り壁面の亀裂と浮上がりとの関係概念図



参考図-1 躯体の亀裂率と仕上げ材の剥離率の関係



参考図-2 仕上げ材の剥離状況の類型化

浮上りが増加する傾向が見られる。

建設省建築研究所で実施した結果⁴⁾と比較すると(図-11の下の参考図-1および2),大きく傾向が異なっているのが先付け工法である。建築研究所の実験では,先付け工法は躯体が限界亀裂状態(メッシュ法による躯体の亀裂率で40~60%)になっても殆ど浮上りが生じていないのに対して注,本実験ではある程度の亀裂発生状態(150~250cm²/m²)から浮上りが急増している。両者の供試体の違いは,図-11と参考図-1および2に示すとおりであり,本実験では主に開口周りに亀裂が発生し,浮上りもそれに沿って生じている。

3.5 加力によるタイルの接着強度への影響

タイルの接着強度を加力前と加力後(健全部と被害周辺部)との対比で示すと図-12のとおりである。また,加力前の接着強度を1.0として加力後を,さらに加力後の健全部を1.0として被害周辺部を指数化して示すと,図-13のとおりである。

加力後の接着強度は,壁体の変形によってタイル張り層に応力が作用し,加力前の接着強度に比べて低下するはずであるが,約半数の供試体に増加が見られた。特に,手張り工法(圧着張り工法および改良積上張り工法)のものに多かった。これは,タイル張付けから加力前の接着強度測定までの期間が1~3ヵ月と若材角であり,かつ加力前と加力後の接着強度測定の間に2/3~2/3ヵ月

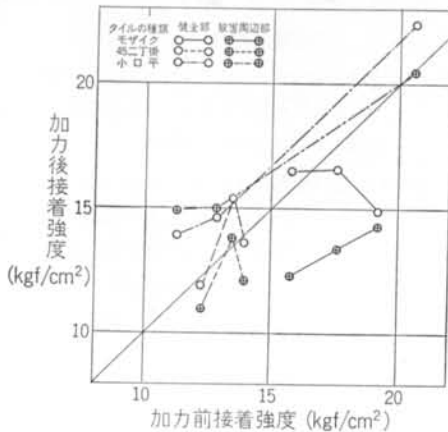


図-12 加力による接着強度の変化

注) 建築研究所の実験躯体の限界亀裂状態での亀裂率は40~60%である。本実験における同じ状態でのタイル張り面の亀裂長さは250~400cm²/m²となる。また,この値より部材角を推定すると(図-5参照)1/900~1/600であり,この程度の部材角で躯体が限界亀裂状態になるとは考えられない。

の時間経過が生じたため,モルタルおよびコンクリート強度の増進があったものと思われる。

このような背景はあるが,加力による接着強度の低下の生じ易さは,タイルの種類に大きく支配されている。すなわち,寸法の小さいモザイクタイルほど低下が大きく,次に45二丁掛が続き,小口平は殆ど低下していない。加力後の健全部と被害周辺部(亀裂近傍で浮上りが生じていない部分)との比較では,平均10%程度の低

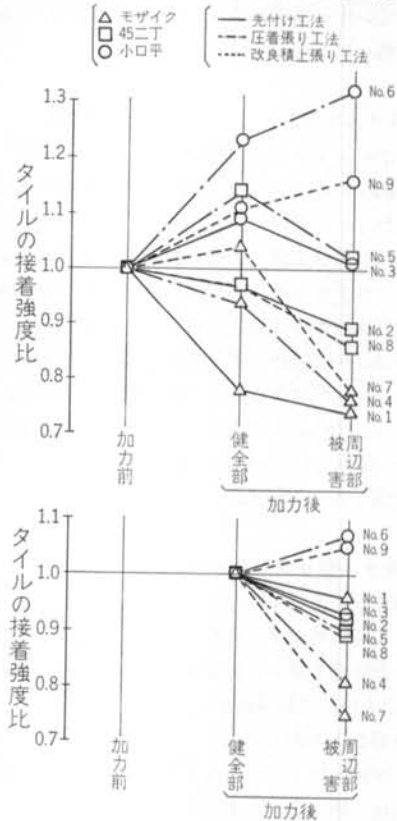


図-13 加力前と加力後の接着強度比

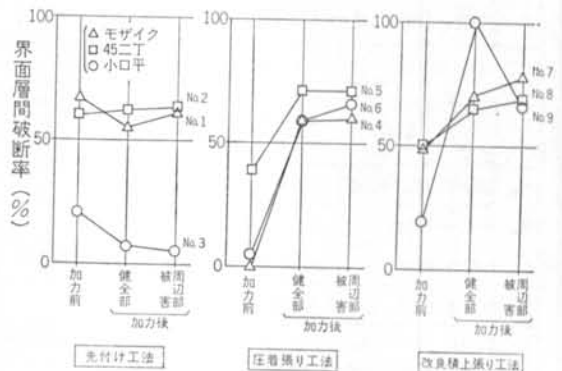


図-14 接着強度試験における界面層間破断の割合

下 (-25~+7%) が認められた。

加力前後の接着強度の破断箇所の変化は、図-14に示すとおりである。前述したように、加力による接着強度の低下度は、主にタイルの種類(タイルの裏足形状の良否)に影響されているが、破断箇所の変化は張付け工法の種類に影響されている。すなわち、手張り工法の圧着張り工法と改良積上張り工法では、タイル張り層の層間剝離が急増しているのに対して、先付け工法では殆ど変化していない結果が得られており、先付け工法のタイルの接着性における安定性がうかがえる。

3.6 タイルの接着強度と浮上がりとの関係

加力前のタイルの接着強度と加力後の浮上がり率との関係は図-15のとおりであり、相互の相関関係はあまり認められなかった。

建築研究所の実験⁹⁾では、参考図-3に示すように接着強度と浮上がり率との関係が得られている。本実験との差異は次のように考えられる。建築研究所の実験の接着強度は5~20 kgf/cm²の範囲であり、本実験の場合は10~25 kgf/cm²である。建築研究所の実験では、接着強度が10 kgf/cm²以下のものに大きな浮上がりが生じており、10 kgf/cm²以上の高接着強度では、浮上がりが生じにくい領域と考えられる。

3.7 タイル張り壁面の被害に影響する要因

建物外壁の地震挙動を想定した静的水平加力実験によって、有開口外壁タイル張り仕上げに生じる被害の内、亀裂および浮上がりに影響する要因の分析を重回帰分析(数量化I類, 変数減増法)によって行なった。

1) 亀裂長さに関して

タイル張り仕上げ面に生じる亀裂に関する重回帰分析の要約は、表-2に示すとおりである。

これによると、亀裂の発生度合に関しては、荷重サイクルの低い段階の2サイクル(1/3000)および3サイクル

特性値	亀裂長さ					浮上がり				
	2∞	3∞	4∞	5∞	6∞	2∞	3∞	4∞	5∞	6∞
加力サイクル										
F値	F ₀	F ₀	F ₀	F ₀	F ₀	F ₀	F ₀	F ₀	F ₀	F ₀
要因										
A. 張付け工法の種類	4.09	14.07	—	—	(0.41)	—	—	(0.44)	423.6	2.57
B. タイルの種類	3.48	(0.73)	—	—	2.86	—	—	18.41	945.9	(1.89)
C. 伸縮目地の有無	20.68	4.15	—	—	(0.15)	—	—	3.38	873.1	2.41
寄与率(%)	Σ86.3	Σ80.2			Σ31.8			Σ83.6	Σ99.8	Σ45.6

亀裂長さ(Fin. out=0.00→Fin. out=2.00) (注)No.9のデータを除外した分析結果
 浮上がり(Fin. out=0.00→Fin. out=2.00)

表-2 重回帰分析の要約

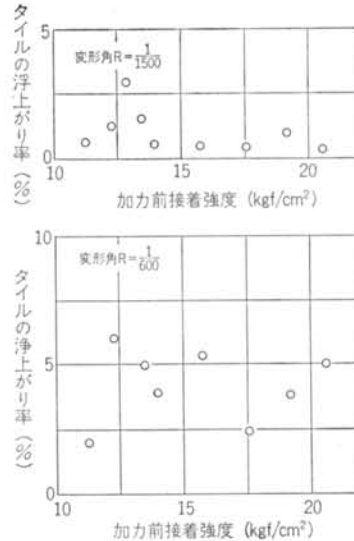
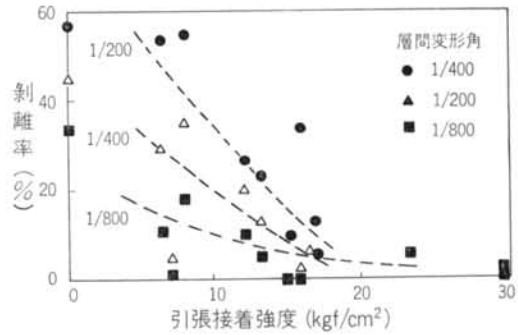


図-15 加力前接着強度とタイルの浮上がり率



参考図-3 水平加力された鉄筋コンクリート実大構造物供試体の壁面に接着された仕上げの剝離率と引張接着強度との関係(目地切り状態)

(1/1500)で寄与率が80%以上になっているが、それ以降は低い寄与率になっている。4サイクル以降で寄与率が低くなっているのは、実験に取上げた3つの要因(張付け工法の種類, タイルの種類, 伸縮目地の有無)が、4サイクル以降では亀裂の制御要因として働かないものと思われる。

2サイクルおよび3サイクルでともに取り上げられた要因は“伸縮目地の有無”と“張付け工法の種類”であり、“タイルの種類”はあまり効いていないと判断される。取り上げられた要因の最適水準(亀裂を少なくする水準)は、図-16の偏回帰係数から判断でき、伸縮目地に関しては目地有りが、

また張付け工法に関しては改良積上張り工法が該当している。

伸縮目地の効果は、3サイクル程度までは、伸縮目地が変形を吸収する効果を果たしていると考えられる。一方、張付け工法に関しては改良積上張り工法が、先付け工法および圧着張り工法とは異なり、張付けモルタル層が断続状態である効果のためと考えられる。

2) 浮上がりに関して

タイル張り仕上げ面に生じる浮上がりに関する重回帰分析の要約も、表-2に示すとおりである。

タイルの浮上がりに関しては、図-5(部材角と亀裂長さ)と図-9(部材角と浮上がり率)との比較で分かるように、まずタイル壁面に亀裂が発生し、それより少し遅れて浮上がりが生じている。そのためか、重回帰式が成立したのは4サイクル(1/1000)以降になっている。

重回帰式に取り上げられた要因は荷重サイクル毎に異なっているが、ほぼ“タイルの種類”“伸縮目地の有無”“張付け工法の種類”の順で効いているといえる(前者ほど効いている)。取り上げられた要因の最適水準は、図-17に示すように“タイルの種類”では小口平に、“伸縮目地の有無”では目地有りに、また“張付け工法の種類”では圧着張り工法になっている。

“タイルの種類”で小口平タイルの浮上がりが少ないのは、図-13に示したように、加力を受けても接着強度の遞減が生じにくいためと推測される。“伸縮目地の有無”では、目地有りが有利になっている。これは亀裂長さの考察と同じように、伸縮目地が層間変形を吸収し、タイル張り層の応力を緩和している効果によるものと考えられる。張付け工法の種類において圧着張り工法が優れる理由は明確ではないが、通常の手張り工法の接着強度(参考図-4参照)に比べ、今回の接着強度はすべて10 kgf/cm²以上の値が得られており、実験に取り上げた3つの張付け工法間で大きな差があったため、このような結果になったと思われる。

タイルの接着強度に張付け工法間で差をつけた別途の追加実験の結果(圧着張り 5~10kgf/cm² < 改良積上張り 8~13kgf/cm²)では、層間変形により圧着張り工法の剝離が改良積上張り工法に比べ、明らかに大きくなるという結果が得られている。

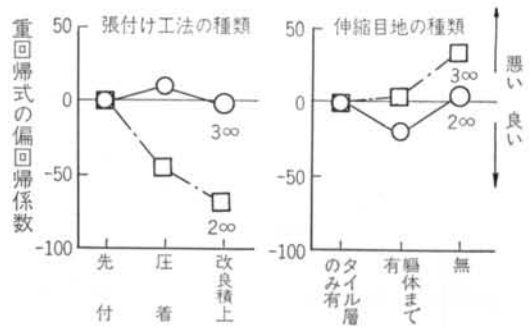


図-16 亀裂長さに関する偏回帰係数

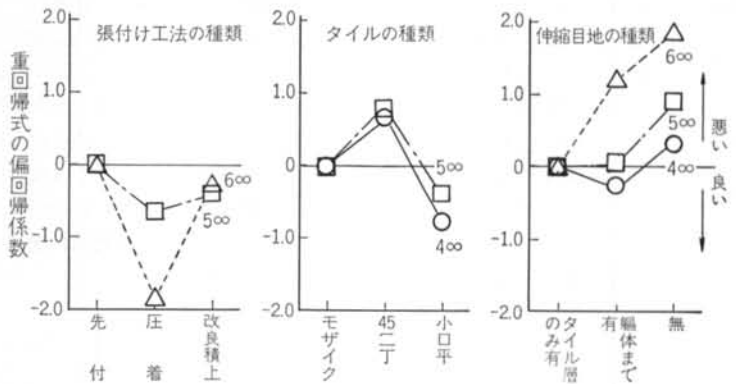
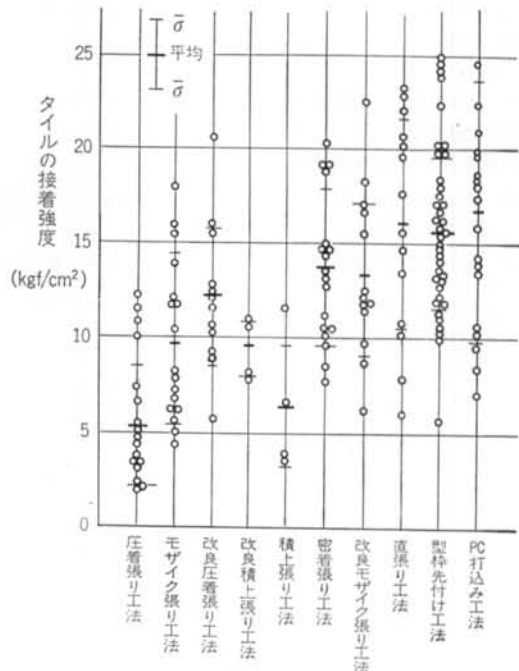


図-17 浮上がり率に関する偏回帰係数



参考図-4 タイル張り工法と接着強度

§ 4. まとめ

本検討の実験結果よりタイル張り壁の耐震性について判明した事項は、以下のとおりである。

(1)タイル仕上げ面の亀裂および浮上りの発生は、変形角1/3000程度で生じ始め、躯体の亀裂発生変形角に対応し、変形の増大に伴い比例的に発生率が増していく。

(2)タイル仕上げ面の亀裂および浮上り被害箇所は、躯体の亀裂箇所にはほぼ対応して生じる。伸縮目地は、亀裂および浮上りを通減させる効果が期待できる。

(3)タイル仕上げ面の被害の発生傾向は、手張り工法が亀裂の進展とともに浮上りが直線的に増すのに対し、先付け工法では変形の初期で亀裂のみが進展するが、ある変形段階から浮上りが増大する傾向が認められた。

(4)タイル仕上げ面に生じる亀裂は、タイル目地に入るものとタイルが割れるものとに分けられる。剥落を防ぐためには後者の状態の方が好ましく、一般にタイルの裏足形状がしっかりした小口平タイルのものにその傾向が大である。

(5)接着強度の加力による変化は、タイル寸法の影響が

大きく、モザイクタイルは接着強度の低下が大きいが、小口平タイルでは接着強度が殆ど低下しない。後者のタイルは、前者に比べ裏足形状が良好である。また、接着強度が約10kgf/cm²以上では、浮上りが生じにくいといえる。

(6)手張り工法のタイルと張付けモルタルとの界面破断率は加力によって増加するが、先付け工法のそれ(タイルとコンクリートとの界面)は殆ど変化がなく安定している。

(7)実験結果から、耐震性の優れているタイル張付け工法は、小口平タイルを先付け工法により施工したものと考えられる。

以上の実験の結果および過去の知見等を総合して判断すると、以下のようになれる。

接着に良好な裏足をもつタイルを先付け工法で施工しかつ有効な伸縮目地を設ければ、震度V～VI程度の地震に対しても危険な剥落が生じない。また、逆を手張り工法でも接着強度で10kgf/cm²以上確保してやれば、安定した耐震性能が得られる。

〈参考文献〉

- 1) 建築業協会宮城県沖地震調査団編：“宮城県沖地震被害状況調査報告書” 建築業協会（昭和53年9月）
- 2) 建築物とその周辺の防災対策調査委員会：“建築物とその周辺の防災対策調査（地震時における外装材の落下対策調査）報告書”
- 3) 熊谷敏男：“日本海中部地震（1983年）における外装仕上材の被害状況” 建築防災（1984年1月）
- 4) 馬場明生、伊藤弘：“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（昭和52年、55年）
- 5) 伊藤弘、坂本功他：“鉄骨造実大6層建物による非構造部材の耐震実験 その1～10” 日本建築学会大会学術講演梗概集（昭和60年、61年）
- 6) 熊谷敏男：“外装陶磁器質タイル張りの剝離故障分析” 日本建築学会構造系論文報告集 第422号（1991年4月）