

論文 先付けタイルの変形追従性および剥離抵抗性

日比野 和樹^{*1}・寺西 浩司^{*2}・永井 伴英^{*3}

要旨：本研究では、先付け工法で張り付けられた外装タイルの変形追従性および剥離抵抗性に対する諸要因の影響を調べるための実験を行った。その結果、1) タイルの変形追従性および剥離抵抗性は、横張りよりも縦張りの方が高いが、このことは裏あしの方向に起因するものではない、2) タイル剥離時の下地コンクリートのひずみは、横張りの場合、コンクリート強度が高いほど増大する、などの知見を得た。また、本研究では、このほかに、先付けタイルの変形・剥離挙動をFEMにより解析し、ディファレンシャルムーブメントの発生機構やタイルの剥離機構などを明らかにした。

キーワード：プレキャストコンクリート、先付け工法、裏あし、ディファレンシャルムーブメント、FEM

1. はじめに

近年、高強度PCa柱の外装タイルが常時荷重下で剥落するケースがあることが指摘されている。このような背景から、筆者らは、これまでに、高強度PCa部材に先付けされた外装タイルの変形追従性および剥離抵抗性について検討してきた¹⁾。しかし、種々の要因がこれらの性能に及ぼす影響については未解明なままである。そこで、本研究では、タイル形状や下地コンクリートの強度などがより広範に変化した場合について実験的な検討を行った。

また、本研究では、このほかに、コンクリート柱に外装タイル1枚を先付け工法で張り付けた単純なモデルに対してFEM解析を行った。そして、その結果を踏まえ、ディファレンシャルムーブメントの発生機構やタイルの剥離機構について考察した。本報では、これらの結果を取りまとめて報告する。

2. 実験

2.1 実験概要

(1) 実験ケース

表-1 に実験ケースを示す。本実験では、コンクリートの水セメント比を3水準に変化させた。また、タイルの種類および張付け方向（裏あしの方向）を実験要因とした。

(2) 試験体

本実験では、1 ケースにつき3 個の試験体を用意した（ただし、N-A の場合は2 個とした）。図-1 に試験体の概要を示す。試験体は無筋コンクリートの角柱とし、図-2 に示すように、その両側面に磁器質の外装タイル（厚さ7mm、裏あし高さ1mm）を横張りと縦張りで張り付けた（目地幅5mm）。また、試験体の作製にあつ

ては、鋼製型枠の内面にタイルを予めセットした状態で、表-2 および 3 に示す調合および使用材料のコンクリートを流し込んだ。そして、恒温恒湿室内（温度20℃）で材齢28日まで密封養生した後に、試験体上面を研磨し、コンクリートおよびタイル表面の図-1 および 2 中に示した位置にひずみゲージ（それぞれのゲージ長は30 および5mm）を貼付して、試験に供した。

(3) 試験方法

本実験では、圧縮試験機により0.065N/mm²/sの比較的緩やかな速度で試験体に単調圧縮載荷し、その際のコン

表-1 実験ケース

記号	水セメント比(%)	タイル種類
UH-A	15	50 二丁タイル
H-A	25	
H-B		50 角タイル
N-A	54	50 二丁タイル

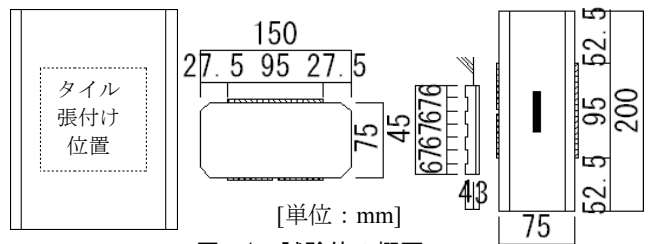
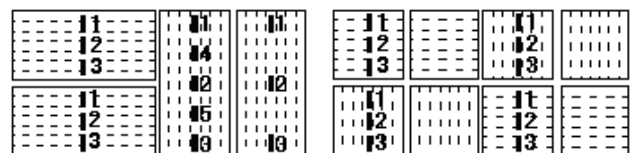


図-1 試験体の概要



(a) 50 二丁タイルの場合 (b) 50 角タイルの場合

■ひずみゲージ（ゲージ4および5はN-Aのケースのみ貼付）

*破線は裏あしの位置および方向を示す。

図-2 タイルの張付けパターン

*1 名城大学大学院理工学研究科建築学専攻修士課程(正会員)

*2 名城大学理工学部建築学科 教授・博士(工学)(正会員)

*3 三重県建設資材試験センター(正会員)

クリートおよびタイルのひずみを測定した。また、このほかに、試験体と同一条件で養生した供試体（φ10×20cm）に対して材齢28日の時点で圧縮試験を行った。

2.2 実験結果とその考察

(1) コンクリートの強度特性

表-4に、コンクリートの圧縮試験結果を示す。

(2) コンクリートとタイルのひずみの関係

図-3に、タイルとコンクリートのひずみの関係を示す（1枚のタイルの試験結果をケースごとに例示する）。同図から、コンクリートのひずみがある値に達すると、タイルのひずみが急激に減少し、タイルに剥離・浮きが生じる様子が見られる。また、剥離するまでは、両者の関係は直線的であるが、その傾きはほとんどのケースで1よりも小さくなっており、タイルは、コンクリートの変形に対して常に一定の割合でしか追従していない。すなわち、ディファレンシャルムーブメントが生じている。以上の傾向を踏まえ、本研究では、図-4に示すひずみ伝達率によりタイルの変形追従性を評価し（値が1に近いほど、タイルがコンクリートと一体になって変形し、変形追従性が高い）、また、剥離ポイントによりタイルの剥離抵抗性を評価することとした。

(3) ひずみ伝達率

図-5に、タイル中心（ゲージ2）におけるひずみ伝達率を示す（試験体ごとの2枚のタイルの平均値）。同図から、50二丁タイル（記号「-A」）の場合、コンクリート強度が高いほど縦張りタイルのひずみ伝達率が大きくなることが見られる。図-6に、ひずみ伝達率のタイル内での分布を示す（図-3と同一のタイルの試験結果）。同図から、横張り、縦張りのいずれの場合

表-2 コンクリートの調合

記号	水セメント比 (%)	スランプロン (スランプ) (cm)	空気量 (%)	粗骨材かさ容積 (m ³ /m ³)	単位水量 (kg/m ³)	絶対容積 (ℓ/m ³)			高性能AE減水剤 (kg/m ³)
						セメント	細骨材	粗骨材	
UH	15	70±10	1.5	0.54	150	325	205	306	24
H	25	65±10	±1.5			195	335	306	9
N	54	(12±2.5)	4.0±1.5	0.62	180	106	323	351	

表-3 コンクリートの使用材料

種類	仕様
セメント	UH, H シリカフェュームセメント (密度 3.08g/cm ³)
	N 普通ポルトランドセメント (密度 3.16g/cm ³)
細骨材	岩瀬産砕砂 (表乾密度 2.60 g/cm ³ , 吸水率 1.54%, 粗粒率 2.24)
粗骨材	岩瀬産砕石 (最大寸法 13mm, 表乾密度 2.62 g/cm ³ , 吸水率 1.04%, 実積率 56.6%)
高性能AE減水剤	ポリカルボン酸エーテル系

表-4 コンクリートの圧縮試験結果

記号	圧縮強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)	ポアソン比
UH-A	154	42.5	0.21
H-A	122	36.0	0.20
H-B	115	37.4	0.21
N-A	47.4	29.2	0.19

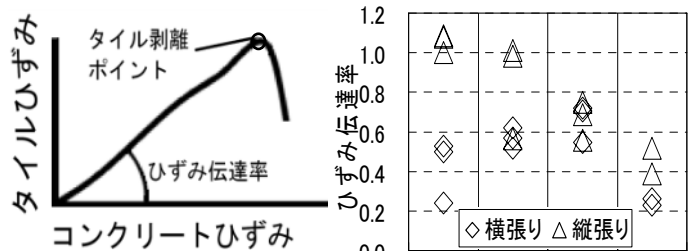


図-4 タイルの変形追従性および剥離抵抗性の評価指標

UH-A H-A H-B N-A
図-5 ひずみ伝達率

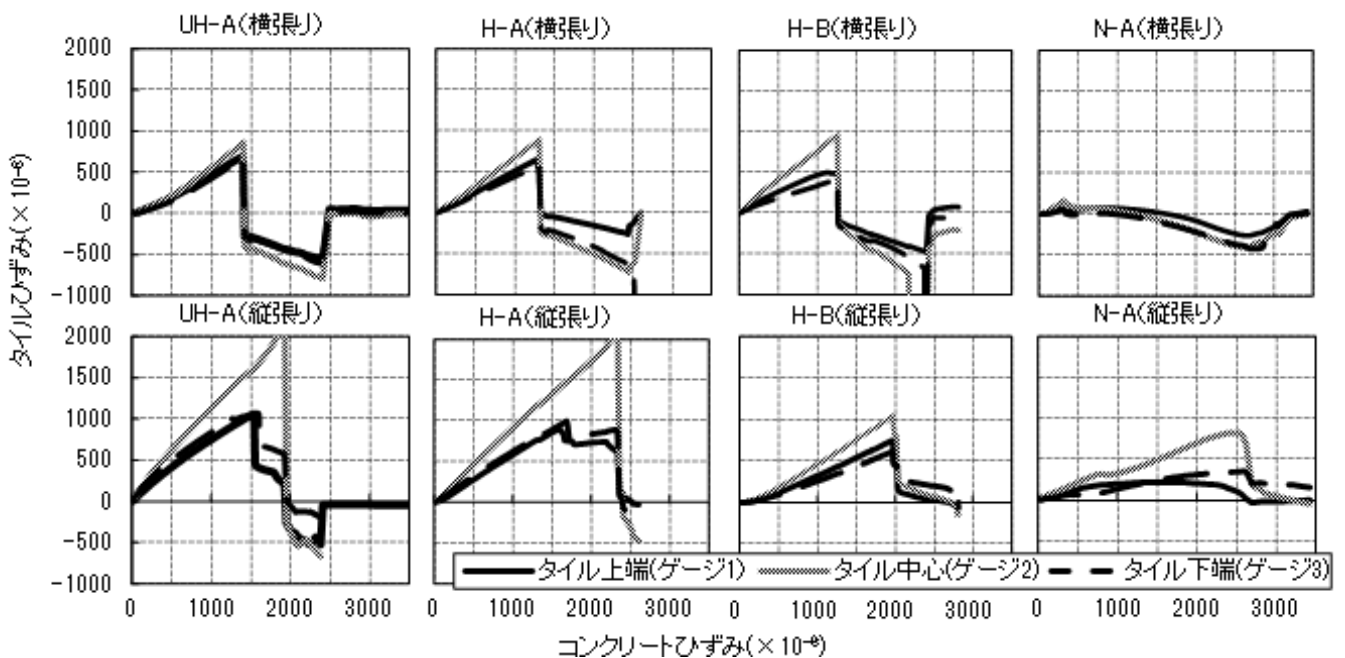


図-3 タイルとコンクリートのひずみの関係

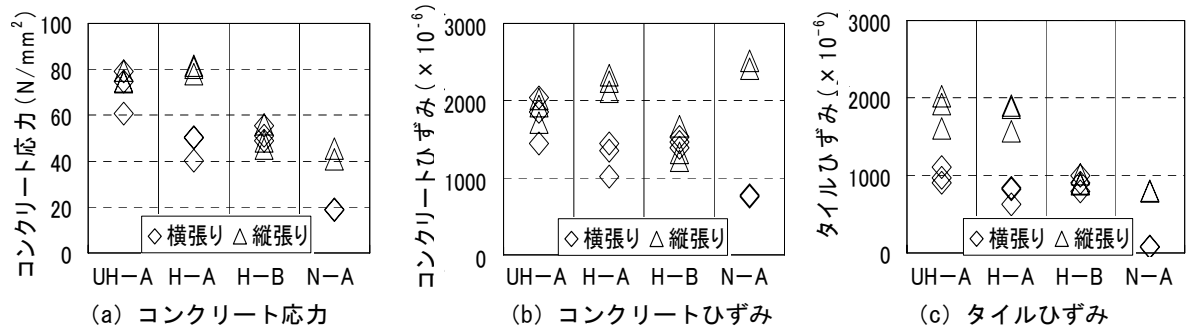


図-7 剥離ポイントの応力およびひずみ

も、タイルの端部ほど、ひずみ伝達率が小さく、コンクリートの変形に追従していないことがわかる。

(4) 剥離状況および剥離ポイント

本実験では、大半のケースで、载荷中に、タイルの周囲のコンクリートにひび割れが発生し、最終的に、コンクリートとの界面でタイルが剥離した。図-7に、タイル中心（ゲージ2）における剥離ポイントの応力およびひずみを示す（試験体ごとの2枚のタイルの平均値）。

(a) タイルの張付け方向の影響

H-Bのケースに着目すると、50角タイルの場合、剥離ポイントの各測定値に張付け方向による大きな差は見られない。したがって、裏あしの方向の違いはタイルの剥離抵抗性に大きな影響を与えないといえる。一方、50二丁タイル（記号「-A」）のケースでは、全体として、縦張りの方が横張りに比べて剥離ポイントの各測定値が大きくなっている。すなわち、剥離抵抗性が高くなっている。

(b) コンクリート強度の影響

50二丁タイルの場合のみに着目すると、剥離ポイントのコンクリート応力およびタイルひずみは、タイルの張付け方向にかかわらず、コンクリート強度が高いほど大きくなっている。一方、剥離ポイントのコンクリートひずみは、横張りの場合にコンクリート強度が高いほど増大するのに対し、縦張りの場合は逆の傾向になっている。

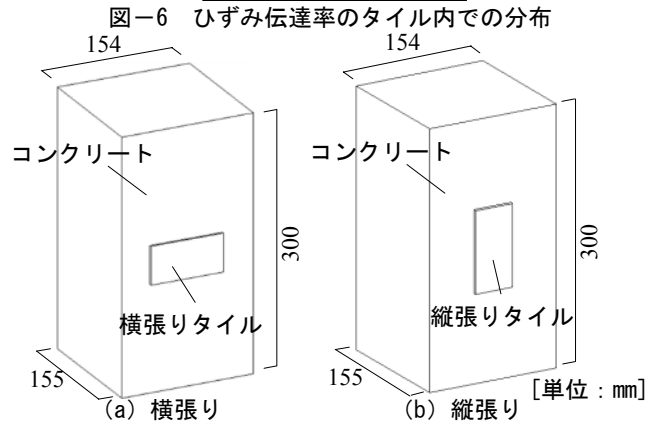
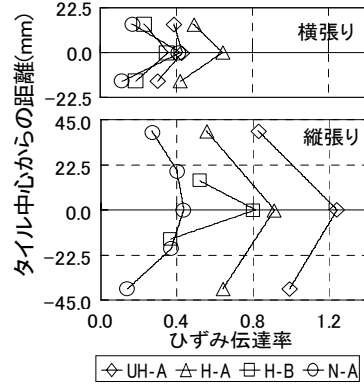


図-8 解析対象

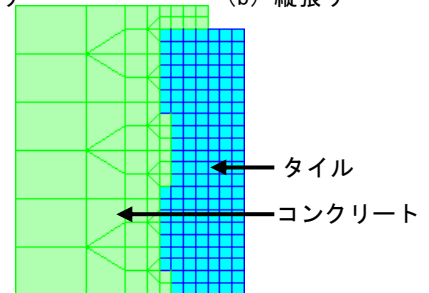
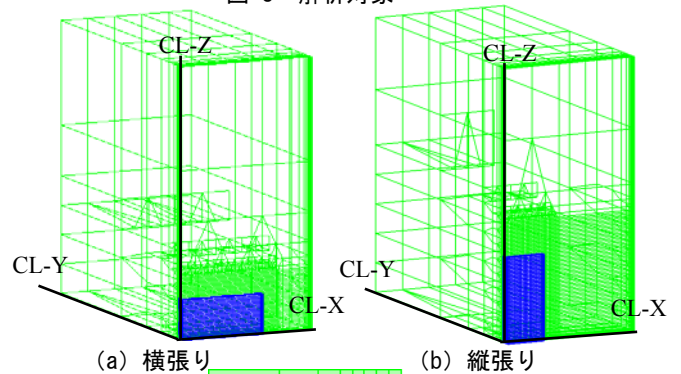


図-9 要素分割図

3. FEM 解析

3.1 解析概要

(1) 解析モデル

本解析では、図-8に示すような、50二丁タイル1枚を横張りまたは縦張りで先付けしたコンクリート柱を解析対象とした。そして、対象性を考慮してそれを4分割した部分を図-9に示すように要素分割した。その際、タイルの裏あしは、図(c)に示すように幾何学的にモデル化した。また、タイルの目地深さは実験の場合と同様に3mmとした。

(2) 解析方法

3次元FEMプログラム²⁾を用いて、前項に示した解析モデルの変形挙動をシミュレートした。その際、まず、

コンクリートおよびタイルにひび割れが発生しないと
の仮定の基に逐次弾性解析を行い (n モデル), 基本的な
変形挙動を確認した。次に, ひび割れの発生を考慮した
材料非線形解析を行い (c モデル), タイルの剥離挙動の
検討を行った。ただし, 本解析の範囲では, ひび割れ発
生後のコンクリートおよびタイル要素の構成則の検証
が十分ではなかったため, c モデルに関しては, 初期の
ひび割れの発生直後までを検討の対象とした。

(3) 入力値

表-5 に材料特性値を示す。コンクリートに関する値
には, 実験の H-A および N-A のケースの圧縮試験結
果を用い, 文献³⁾ により引張強度を求め, 土木学会式⁴⁾
により破壊エネルギーを計算した。また, タイルに関す
る値は, 文献⁵⁾ などに基づいて設定した。

(4) 入力変形

コンクリート柱に対する単調圧縮荷重を想定し, 解析
モデルの上端面に, 解析ステップごとに, 300×10^{-6} のコ
ンクリートひずみに相当する下向き強制変位を与え
ていった。その際, 解析モデルの上端面の水平方向変位
は拘束しなかった。

3.2 ひび割れの発生を考慮しない場合の解析結果

(1) 変形状況

図-10 に, n モデルにおけるタイル周辺の変形状況を
示す (H-A, 初期ひずみ 1500×10^{-6} の時点)。同図より,
横張り, 縦張りのいずれの場合も, コンクリートの圧縮
変形によりタイルの端部に曲げを伴う変形が生じてい
る様子がわかる。

(2) タイルとコンクリートの軸方向ひずみの関係

図-11 に, n モデルにおける, タイルとコンクリートの
軸方向ひずみの関係を示す。ここで, タイルのひずみ
は中心位置の表面における値である。同図によると,
両者の関係は直線的であり, その傾きは1よりも小さくな
っている。すなわち, 実験結果に見られたような, ディ
ファレンシャルムーブメントが解析上で再現されてい
る。

また, 関係線の傾きは, 横張り縦張りでは横張りの
ほうが小さくなっており, H-A と N-A のケースでは,
コンクリート強度の低い N-A の方が小さくなっている。
すなわち, 図-3 に示した実験結果と同様の傾向となっ
ている。ただし, H-A と N-A の傾きの差 (すなわち,
ひずみ伝達率の差) は実験結果ほど顕著ではなく, この
点については, 今後さらに詳細な検討が必要である。

(3) 軸方向ひずみの分布

図-12 に, n モデルにおける軸方向ひずみの分布を
示す (初期ひずみ 1500×10^{-6} の時点, CL-Y と CL-Z で構
成される面における値)。同図によると, いずれのケー
スの場合も, ひずみは, コンクリート中の比較的深い位

表-5 材料特性値

種別	コンクリート		タイル
	H-A	N-A	
圧縮強度 (N/mm ²)	122	47.4	109
ヤング係数 (kN/mm ²)	36.0	29.2	64.4
ポアソン比	0.20	0.19	0.17
引張強度* (N/mm ²)	6.21	3.40	17.5
破壊エネルギー (N/mm)	0.117	0.085	

*n モデルでは十分に大きな値とした。

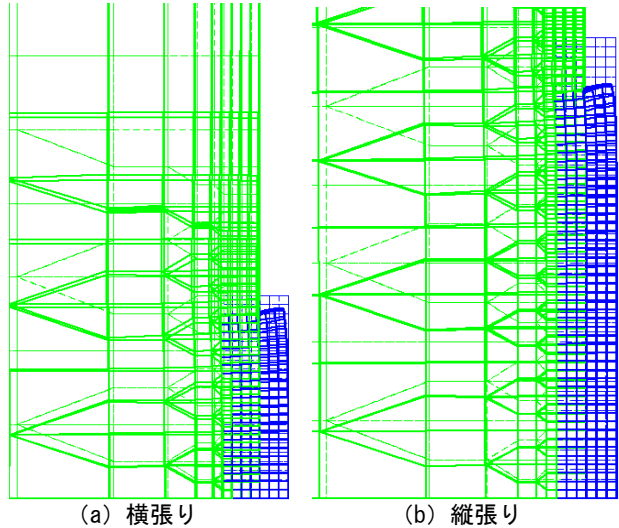


図-10 変形状況 (H-A)

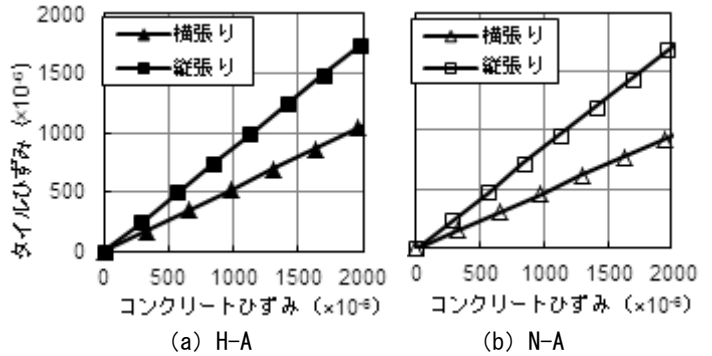


図-11 タイルとコンクリートの軸方向ひずみの関係

置では, 分布にややばらつきがあるものの, 全体として,
初期ひずみ (1500×10^{-6}) に近い値となっている。また,
タイルの表層に近くなるほど, 全体として小さな値にな
っている。さらに, タイル端部近傍のコンクリートに着
目すると, この領域には, 他の部分に比べて非常に大き
なひずみが生じていることがわかる。

なお, 以上のようなひずみ分布は, コンクリートより
ヤング係数の大きなタイルによってその下面周辺のコ
ンクリートの圧縮変形が拘束され, その結果として, タ
イルとコンクリートにひずみ差が生じている状況を表
している。すなわち, 下地コンクリートの圧縮変形に伴
うディファレンシャルムーブメントの発生メカニズム
を表しているものと考えられる。

図-13 に, タイル表面の軸方向ひずみの高さ方向の分

布を示す。同図によると、横張り、縦張りのいずれの場合も、タイル端部ほどひずみが小さくなっている。すなわち、図-6 に示したひずみ伝達率と同様の、コンクリートからタイルへのひずみの伝達状況が FEM 解析によっても確認された。なお、このようなひずみ分布となるのは、図-10 に示したように、タイルに曲げ変形が生じているからである。

3.3 ひび割れの発生を考慮した場合の解析結果

c モデルに対する解析結果によると、H-A のケースでは、横張り、縦張りのいずれの場合も、ひび割れは、初期ひずみが 1200×10^{-6} の時点（4 ステップ目）で発生した。また、この時点では、図-14 に示すような、タイル裏面近傍のコンクリートのひび割れと、タイル脇のコンクリート表面のひび割れの2つのパターンのひび割れが発生した。このうちの後者のひび割れは、タイルとコンクリートのヤング係数の差、すなわち変形性能の差に起因して発生したせん断ひび割れであると考えられる。

一方、前者のひび割れは、図 (i) および (ii) からわかるように、タイル裏あし近傍のコンクリートの一部に、水平方向に帯状に連なって発生している。また、そのひび割れ面は、タイルが剥離するような方向となっている。さらに、ひび割れが発生した位置は、横張り、縦張りのいずれの場合も、図-13 における、タイル表面のひずみが端部に向かって急激に減少し始める起点、すなわち、図-10 に示したタイルの曲げ変形の、曲率が增大し始める起点とほぼ一致している。

これらのことを踏まえると、下地コンクリートの圧縮変形に伴うタイルの剥離現象は、タイル端部の曲げ変形により下地コンクリートからタイルが浮き上がろうとする力が最も大きい部分での剥離が起点となり進行していくものと考えられる。なお、本解析では、タイル-コンクリート界面での剥離現象を考慮していないが、仮にこのことを考慮した解析を行えば、本解析でひび割れが発生した位置の近辺のタイル-コンクリート界面での剥離が先行して生じる可能性が高いものと推察される。また、図 (i) によると、ひび割れは、横張りの場合、タイル裏面の裏あしのない部分（凹部分）に生じるのに対し、縦張りの場合は、裏あしの部分（凸部分）に発生している。すなわち、ひび割れ（剥離）が初期に発生する位置は、詳細にみれば、タイルの張付け方向によって異なっている。

4. まとめ

本研究では、先付けタイルの変形追従性や剥離抵抗性に対する諸要因の影響を調べるための実験を行った。また、ディファレンシャルムーブメントの発生機構やタイルの剥離機構の解明を目的とした FEM 解析を行った。

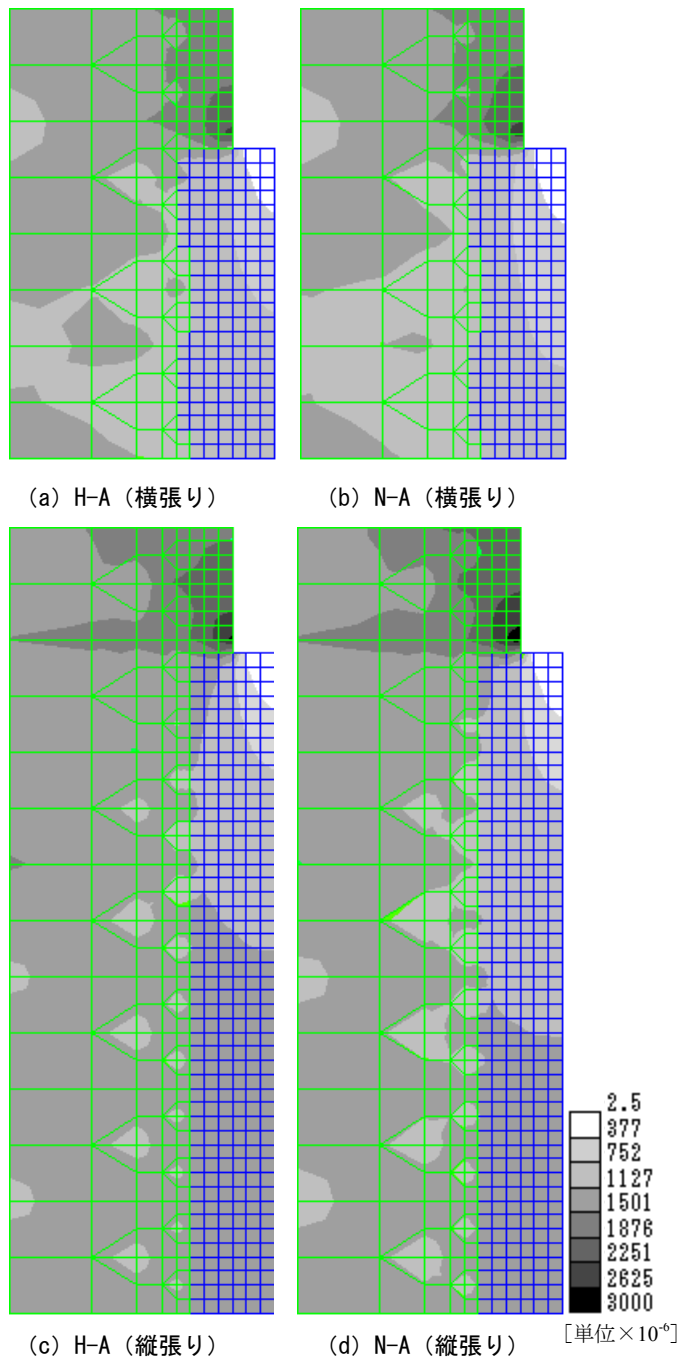


図-12 軸方向ひずみの分布

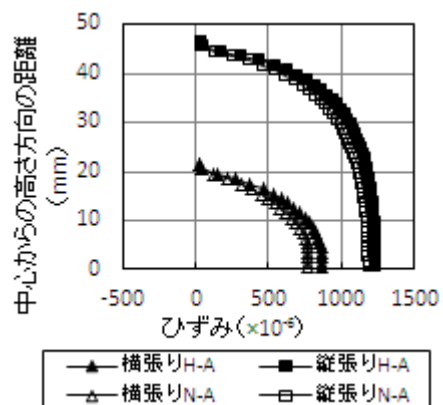


図-13 タイル表面のひずみの分布

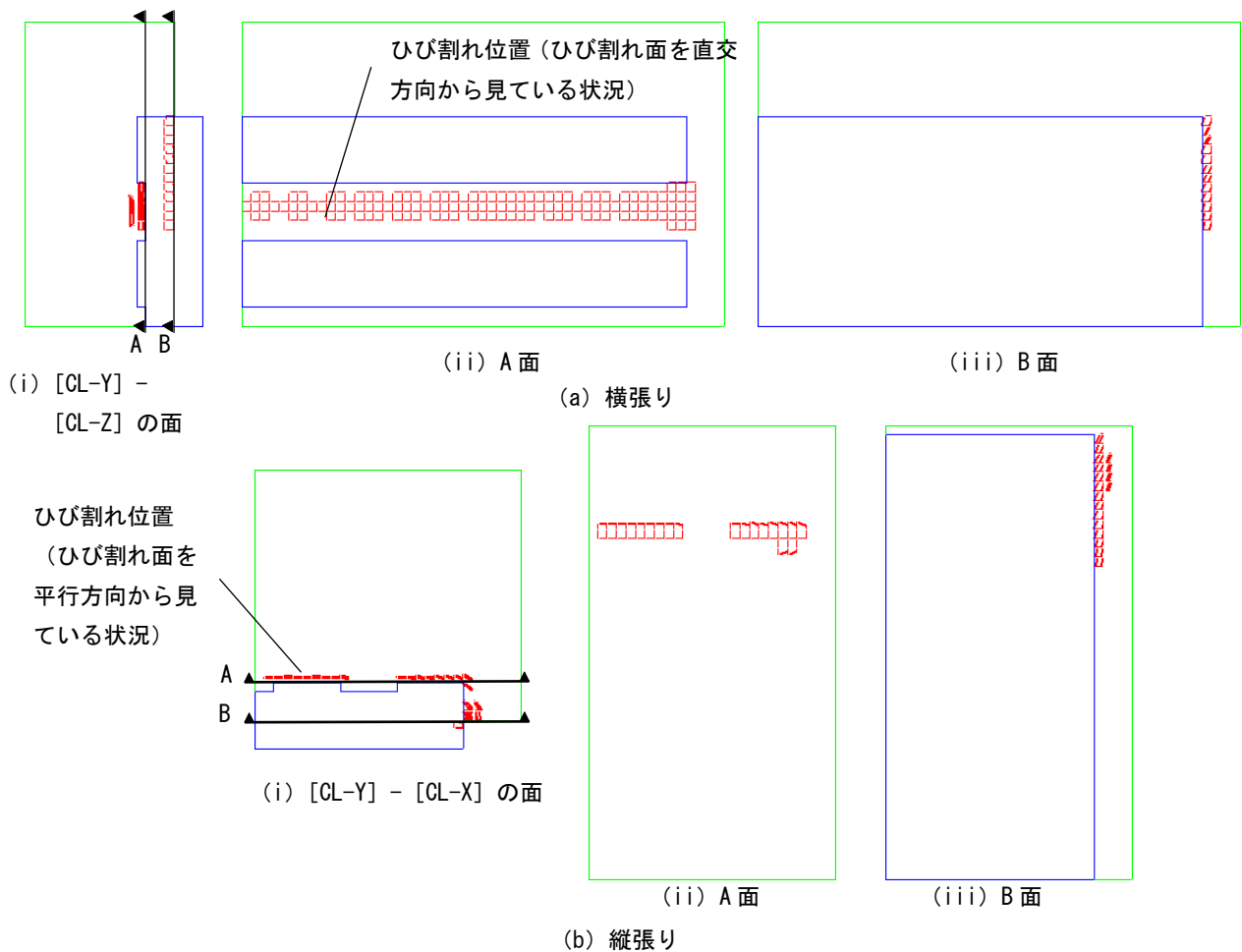


図-14 初期のひび割れの発生状況 (H-A)

その結果得られた知見は、以下の通りである。

(1) タイル剥離時のコンクリート応力は、コンクリート強度が高いほど大きくなる。また、タイルの変形追従性は、縦張りの場合にコンクリート強度が高いほど大きくなる。

(2) タイルの変形追従性および剥離抵抗性は、横張りよりも縦張りの方が高い。ただし、このことは裏あしの方向に起因するものではない。

(3) 下地コンクリートに圧縮変形が生じた場合、コンクリートよりヤング係数の大きいタイルによってその下面周辺のコンクリートの変形が拘束され、その結果として、タイルのディファレンシャルムーブメントが発生する。

(4) 下地コンクリートに圧縮変形が生じると、タイル端部の曲げ変形により、タイルが下地コンクリートから浮き上がろうとする。そして、その力が最も大きな部分がタイルの剥離の起点となる。

本研究の一部は、社団法人プレハブ建築協会 PC 建築部会からの委託を受けて実施したものである。

謝辞

本研究の実施に際し、名城大学理工学部建設システム工学科・石川靖晃教授に解析プログラムを提供して頂いた。ここに付記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 永井伴英, 寺西浩司: 超高強度 PCa 柱に先付けされた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.32, No.1, pp.1259-1264, 2010.7
- 2) 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, 技報堂出版, 2004.3
- 3) 野口貴文, 友澤史紀: 高強度コンクリートの圧縮強度と各種力学特性との関係, 日本建築学会構造系論文集, No.472, pp.11-16, 1995.6
- 4) 土木学会: コンクリート標準示方書 [構造性能照査編], 丸善, 2002.3
- 5) 添田智美, 高山勝行, 中山昌尚, 佐々木仁: 外装タイル直張り工法の剥離防止性能に及ぼす目荒らしおよび吸水調整材の影響 その 1 単調圧縮荷重によるひずみ追従性試験結果, 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-1, pp.105-106, 2008.9