論文　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

永井　伴英[*1]・寺西　浩司[*2]

要旨：本研究では，先付け工法でタイルが張り付けられた超高強度 PCa 柱に短期荷重および長期持続荷重が作用した場合のタイルの変形追従性および剥離抵抗性を調べた。その結果，1）躯体コンクリートの変形に対する先付けタイルの追従性は，縦張りよりも横張りの方が低い，2）長期持続荷重により躯体コンクリートが時間依存変形する場合の先付けタイルの追従性は，短期荷重により躯体コンクリートが変形する場合のそれよりも低い，3)超高強度 PCa 柱の先付けタイルは，荷重の種類にかかわらず，躯体コンクリートのひずみが 1000×10^{-6} 以下であれば，少なくとも剥離しない，などの知見を得た。

キーワード：プレキャストコンクリート，外装タイル，先付け工法，ディファレンシャルムーブメント，剥落

1. はじめに

建物の外壁面のタイルが剥落すると，その周囲を通行する人が負傷する可能性があるため，従来から，外装タイルの剥落事故が問題となっている。タイルの張付け工法は，歴史的に，このような剥落事故を防止するために様々に改良されてきた。しかし，未だ完全に剥落を防止するまでには至っておらず，剥離したタイルの修復にも大きなコストが掛かっている。このような状況下において，後張りタイルに関しては，最近でも，特に直張り工法を対象として，剥離しにくい張付け工法の検討や設計方法の提案がなされている[1)～5)]。

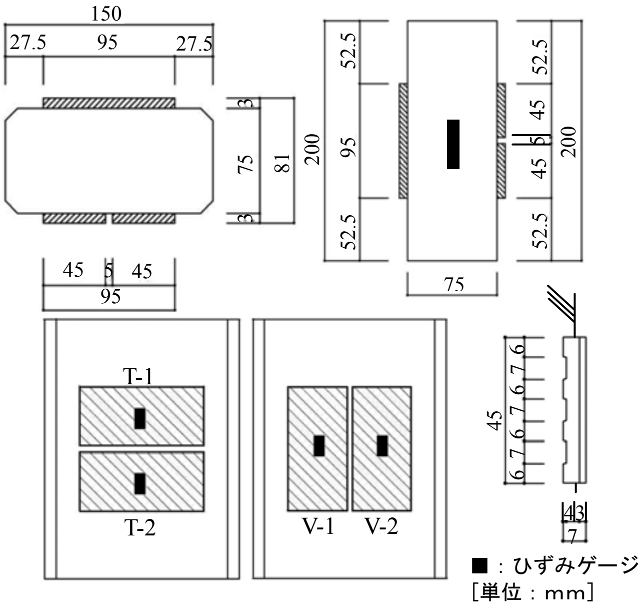
一方で，近年，設計基準強度が 100N/mm^2 を超えるような超高強度コンクリートが実用化され，それを用いた超高層・高層建築物が建設されている。そして，このような建築物に PCa 部材を適用した場合に,先付けタイルが常時荷重下で剥離する危険性があることが指摘されている[6), 7)]。先付け工法では，下地コンクリートの打込み直後からの収縮ひずみがディファレンシャルムーブメントとして蓄積されることと，超高強度コンクリートの自己収縮ひずみが大きいことを考え合わせると，このような可能性は十分に考えられる。

そこで，本研究では，以上のことを実験的に調べるため，タイルを先付け工法で張り付けた超高強度 PCa 柱の小型試験体を作製した。そして，その躯体コンクリートが短期荷重により変形した場合と，長期持続荷重下でクリープや自己収縮により時間依存変形した場合に対して，タイルの変形追従性および剥離抵抗性を検討した。

なお，本研究は，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。

表－1　実験要因とその水準

要因	水準
コンクリートの水セメント比（%）	15（UH），25（H）
タイルの張付け方向	横張り（T），縦張り（V）



図－1　試験体の概要

2. 実験概要

本研究では，柱コンクリートにごく短期的に荷重が作用した場合に対する実験（実験 1）と，長期間に渡って持続荷重が作用した場合に対する実験（実験 2）の 2 つのシリーズの実験を行った。

*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）

2.1 短期荷重下の実験（実験 1）

（1）実験要因とその水準

表－1 に，実験要因とその水準を示す。実験 1 では，柱コンクリートの圧縮強度として 150 および 100N/mm^2 の 2 水準を想定し，そのそれぞれに対応する水セメント比を 15 および 25%に設定した。また，この他に，タイルの張付け方向を実験要因とした。

（2）試験体

図－1 に試験体の概要を示す。実験 1 では，無筋コンクリートの角柱を試験体とし，その 2 つの側面に，45mm 二丁掛け磁器質タイル（厚さ 7mm，裏足高さ 1mm）を横張りと縦張りで張り付けた。また，試験体の作製にあたっては，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** に調合および使用材料を示すコンクリートを流し込んだ。そして，恒温恒湿室（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面の図－1 中に示した位置にひずみゲージ（それぞれのゲージ長：60 および 10mm）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/mm^2/s の緩やかな速度で試験体に単調圧縮載荷し，その際のコンクリートおよびタイルのひずみを測定した。また，タイルが剥離する様子を観察した。この他に，試験体と同一条件で養生した供試体（φ10×20cm）の 28 日圧縮強度を調べた。

2.2 長期持続荷重下の実験（実験 2）

（1）実験要因とその水準

表－4 に，実験要因とその水準を示す。実験 2 では，実験 1 で取り上げた要因・水準の他に，試験体を養生・存置する場所を，恒温恒湿室内（温度 20℃，相対湿度 60%）および温度・湿度を制御していない実験室内の 2 箇所に変化させた。

（2）試験体

実験 2 では，実際の高強度 PCa 柱の一部を 1/6 程度に縮小した RC 柱を試験体とした。**図－2** に試験体の概要を示す。コンクリートの調合，使用材料，打込み方法などは，実験 1 とほぼ同様とした（鉄筋周辺の充填性を考慮して最大寸法 13mm の粗骨材を使用した）。また，使用した鉄筋の仕様を**表－5** に示す。

試験体は，上下面を主筋ごと研磨した後に，表－4 中に示した 2 種類の環境下で試験開始まで密封養生した。また，実験 2 では，コンクリート，タイルの他に，隅角部に位置する主筋にもひずみゲージ（ゲージ長：2mm）を貼付した。

（3）載荷方法

本実験では，材齢 28 日の時点で，**図－3** に示す載荷装置により，コンクリート部分の負担する応力が載荷時圧縮強度の 1/3 となるように試験体に載荷し，その後その荷重を保持した。その際，圧縮強度は，試験体と同一の条件で密封養生した供試体（φ10×20cm）の試験結果によった。また，荷重は，載荷装置の PC 鋼棒（SBPR1080/1230，φ26mm）に貼付したひずみゲージの測定値から計算した。なお，試験体の上下面と載荷板の間には，摩擦を低減するためにテフロンシートを挿入した。

（4）測定項目

まず，実験 1 と同様に，短期荷重下のタイルの変形追従性を検討するため，載荷中の試験体の各部分のひずみを計測した（UHR のケースは除く）。その後，載荷完了後からの持続荷重下の試験体のひずみを，表－4 中に示

表－2　コンクリートの調合

記号	水セメント比 (%)	スランプフロー (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) セメント	細骨材	粗骨材	高性能AE減水剤 (g/m^3)
UH	15	70±10	1.5 ±1.5	0.54	150	325	205	306	24000
H	25	65±10				195	335	306	9000

表－3　コンクリートの使用材料

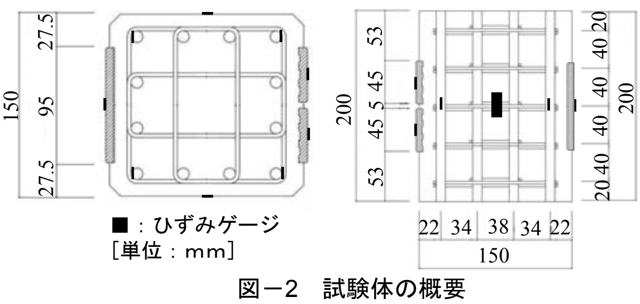
種類	仕様
セメント	シリカフュームセメント（密度：3.08g/cm^3）
細骨材	岩瀬産砕砂（表乾密度：2.60 g/cm^3，吸水率：1.54 %，粗粒率：2.24）
粗骨材	岩瀬産砕石（最大寸法：13mm，表乾密度：2.62 g/cm^3，吸水率：1.04 %，実積率：56.6%）
高性能AE 減水剤	ポリカルボン酸エーテル系

表－4　実験要因とその水準

要因	水準
コンクリートの水セメント比（%）	15（UH），25（H）
環境条件	恒温恒湿室内（20℃，60%）（C） 実験室内（気温・温度の変動あり）（R）
タイルの張付け方向	横張り（T），縦張り（V）

［ケースの記号］

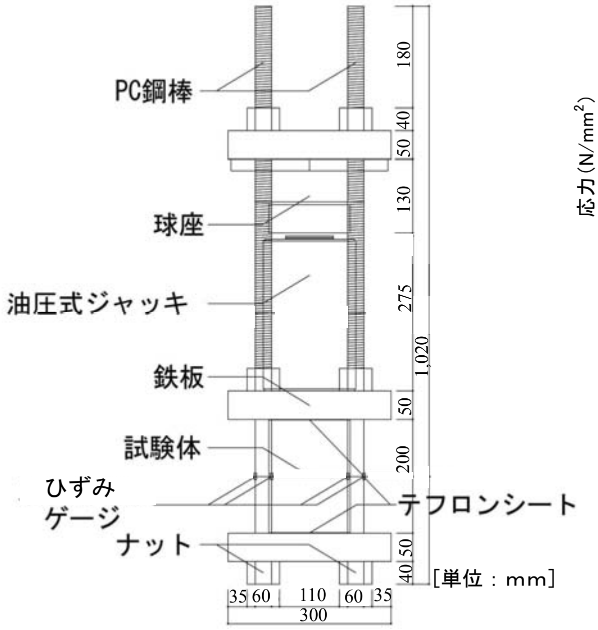
UH C
- 環境条件（C,R）
- コンクリートの水セメント比（UH,H）



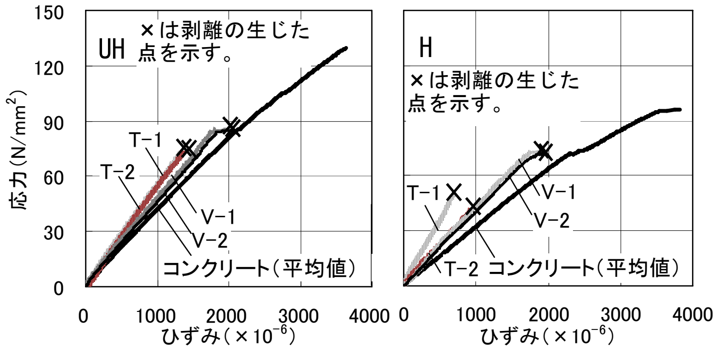
図－2　試験体の概要

表－5　鉄筋の仕様

種別	仕様
主筋	SHD685/UHD10（引張強さ：901N/mm^2，降伏点：727N/mm^2，ヤング係数：213kN/mm^2，伸び率：12.4%）
帯筋・中子筋	普通鉄線 SWM-B/φ3.20mm



図－3　載荷装置



図－4　応力とひずみの関係（実験 1）

表－6　コンクリートの圧縮試験結果（材齢 28 日）

記号	実験種類	養生方法	圧縮強度 (N/mm^2)	ヤング係数 (kN/mm^2)
UH	実験 1	密封（恒温恒湿室）	150	
	実験 2	標準水中	167	
		密封（恒温恒湿室）	154	42.1
		密封（実験室）	162	44.7
H	実験 1	密封（恒温恒湿室）	109	
	実験 2	標準水中	114	
		密封（恒温恒湿室）	111	36.9
		密封（実験室）	112	37.2

した 2 種類の環境下で約 1 年に渡って経時的に測定した。また，載荷中および載荷後のタイルの剥離状況を観察した。

3. 実験結果

3.1 コンクリートの圧縮試験の結果

表－6 に，コンクリートの圧縮試験の結果を示す（実験 1 および 2）。いずれの養生方法の場合も，材齢 28 日の時点で本実験で想定した圧縮強度が得られた。

3.2 短期荷重下の実験（実験 1）の結果

図－4 に，実験 1 で得られた応力とコンクリートおよびタイルのひずみの関係を示す（圧縮応力および収縮ひずみを正の値で表示する。以降も同様）。横張りタイルおよび縦張りタイルは，UH では，コンクリート応力が 75 および 85N/mm^2 程度のときに，また，H では，40～50 および 75N/mm^2 程度のときにそれぞれ剥離した。すなわち，横張りの方が縦張りに比べてタイルが早い段階で剥離した。なお，タイルは，コンクリートとの界面で概ね剥離し，UH の横張り以外のケースでは，タイル剥離後のコンクリート面にタイルの裏足は残っていなかった。

3.3 長期持続荷重下の実験（実験 2）の結果

（1）タイルの剥離状況

表－7 に，実験 2 の試験体におけるタイル剥離時の載荷日数および剥離状況を示す（ここでは，浮きも剥離の一種と見なす）。一部のタイルは，載荷中の，荷重が所定の載荷荷重に達するほぼ直前に剥離した。また，載荷後は，縦張りタイルに異常は認められなかったが，ほと

表－7　タイル剥離時の載荷日数および剥離状況

	横張りタイル		縦張りタイル	
	T-1	T-2	V-1	V-2
UHC	57 日（浮き）	65 日（浮き）	－	載荷中（剥離）
UHR	載荷中（剥離）	載荷中（剥離）	－	－
HC	1 日（浮き）	6 日（浮き）	－	－
HR	52 日（浮き）	－	－	－

＊「－」は異常なし

表－8　載荷荷重および載荷時ひずみ

記号	載荷荷重 (kN)	載荷時ひずみ（$\times10^{-6}$）					
		コンクリート	主筋	T-1	T-2	V-1	V-2
UHC	1348	1441	1384	828	784	1388	（剥離）
UHR	1406	1547	1414	（剥離）	（剥離）	1095	1148
HC	1000	1106	1034	722	713	945	1023
HR	1010	1147	1184	765	775	913	944

＊コンクリートおよび主筋の載荷時ひずみは平均値

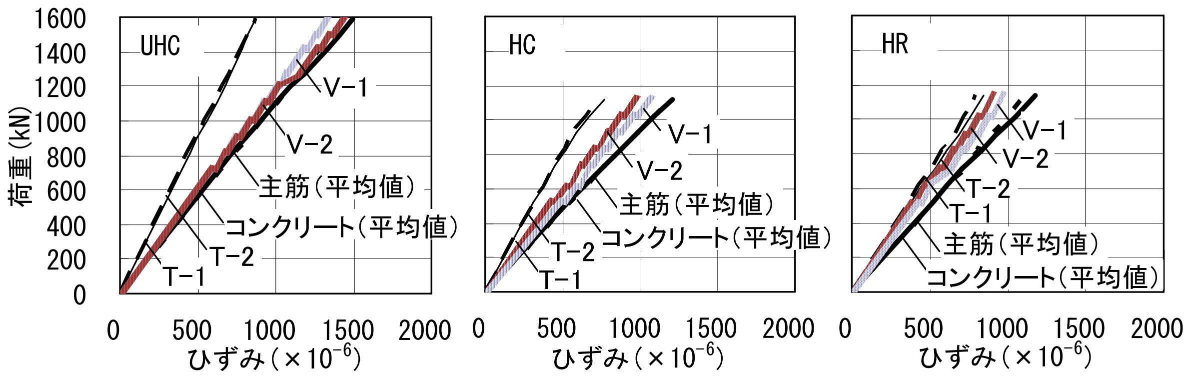
んどの横張りタイルにいずれかの時点で浮きが生じた。

（2）載荷中のひずみ

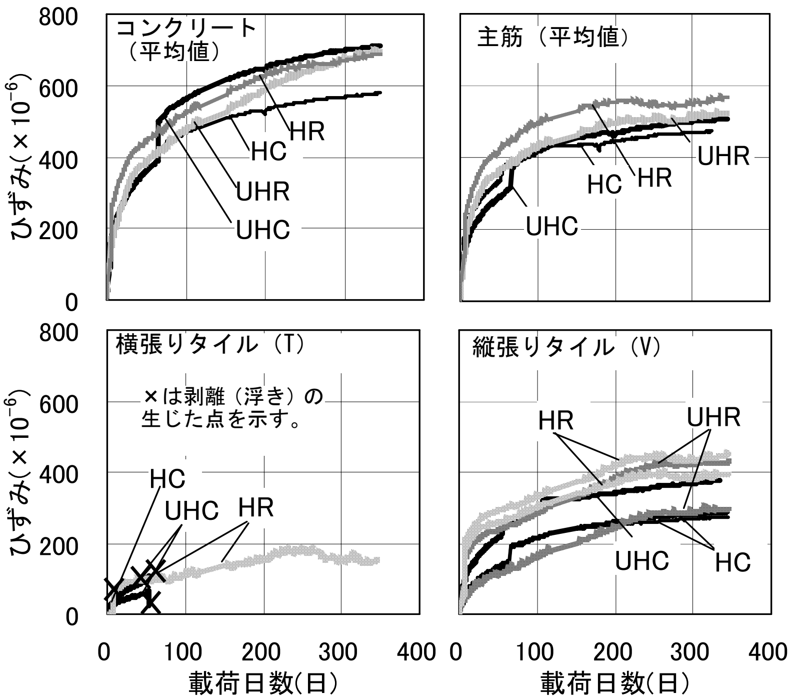
図－5 に，載荷中の荷重と各種ひずみの関係を示す。同図によると，コンクリートと主筋は一体となって収縮変形している。それに対し，タイルは，コンクリートの変形に必ずしも追従していない。

（3）載荷後のひずみ

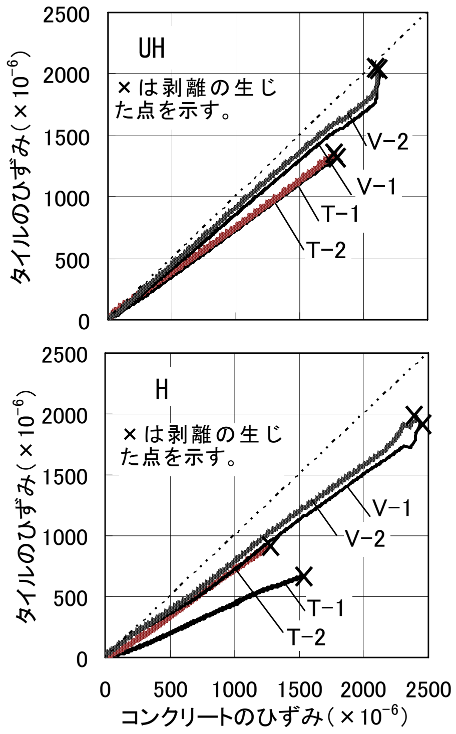
表－8 に，載荷完了時の荷重と各部分のひずみの一覧を示す。また，**図－6** に，載荷完了以降に生じたひずみ（以下，載荷後ひずみという）の経時変化を示す。コンクリートの時間依存変形は，クリープの他に自己収縮や乾燥収縮によって生じたものと考えられる。また，同図によると，主筋の載荷後ひずみはコンクリートに概ね追従しているが，タイルの載荷後ひずみは，載荷中のひずみの場合と同様に，コンクリートに追従してはいない。



図－5　載荷中の荷重とひずみの関係



図－6　載荷後ひずみの経時変化



図－7　タイルとコンクリート
のひずみの関係（実験 1）

4. 考察

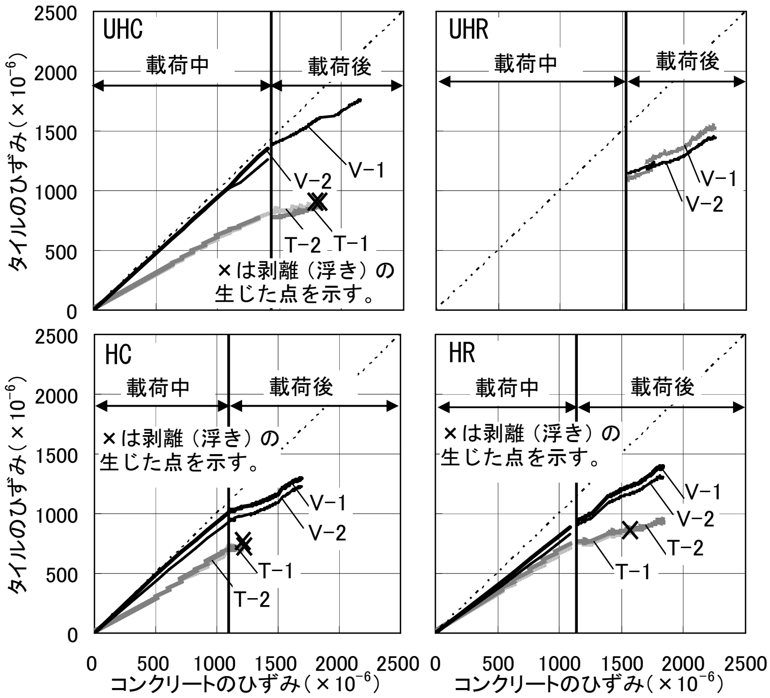
4.1 タイルとコンクリートのひずみの関係

図－7 に，実験 1 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。同図によると，両者の関係はいずれの場合もほぼ直線的であり，その傾きは 1 よりも小さい。すなわち，タイルは，載荷初期から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。また，横張りと縦張りでは，横張りの方が関係線の傾きが緩やかであり，タイルの変形追従性が低い。なお，このように，タイルの張付け方向によって変形追従性が異なる原因としては，より直接的には，タイル自身の形状の影響と裏足方向の影響とが考えられる。しかし，この内のいずれが支配的な影響を及ぼすかは本研究の範囲では明確にすることができないため，今後の検討課題としたい。

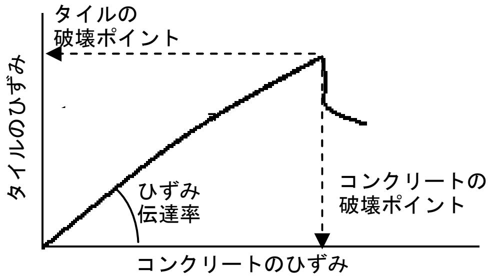
図－8 に，実験 2 で得られた図－7 と同様な関係を示す。図中には，載荷中のひずみとそれに累積する形での載荷後ひずみを示してある。同図によると，載荷中，すなわち短期荷重下の両者の関係は，実験 1 の場合と類似している。それに対し，載荷後の長期持続荷重下における両者の関係の傾きは，載荷中よりも緩やかになっている。すなわち，コンクリートが時間依存変形する場合と短期荷重下で変形する場合とではタイルの追従性は異なり，時間依存変形の場合の方が追従性が低い。

4.2 ひずみ伝達率

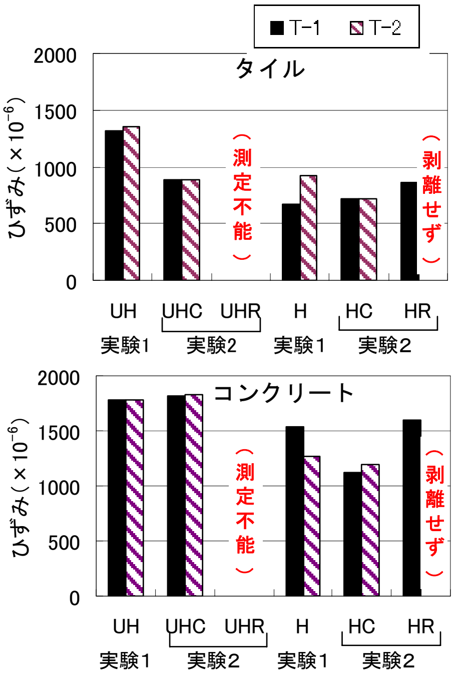
本研究では，上記のタイルとコンクリートのひずみの

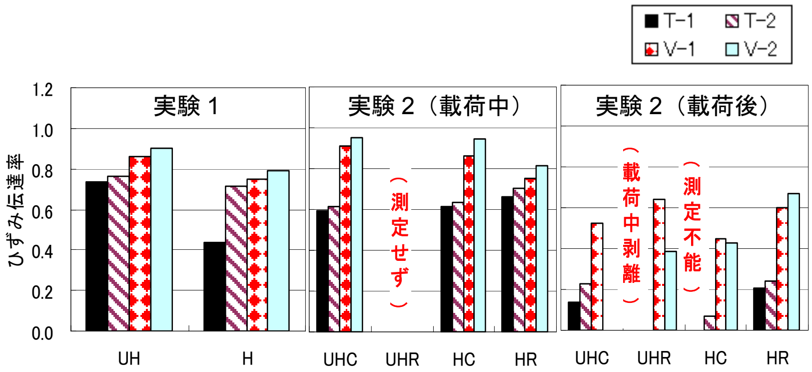


図－8　タイルとコンクリートのひずみの関係（実験 2）



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（横張りタイルの場合）

関係に着目し，**図－9** 中に示す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それぞれ評価することとした。ここで，ひずみ伝達率は，関係線の回帰直線の傾きとして算出し，実験 2 では，載荷中と載荷後のそれぞれについてこの値を計算した。

図－10 にひずみ伝達率を示す。「実験 1」および「実験 2（載荷中）」の図からわかるように，短期荷重下のひずみ伝達率は，横張りタイルでは 0.4～0.8，縦張りタイルでは 0.75～0.95 の範囲にある。このように値のばらつきは大きいが，本実験の範囲では，実験の種類や要因による明確な差異は見られなかった。また，「実験 2（載荷後）」の図からわかるように，長期持続荷重下のひずみ伝達率は，横張りタイルでは 0.05～0.25，縦張りタイルでは 0.4～0.7 程度であり，短期荷重下に比べてかなり小さな値となっている。

4.3 破壊ポイント

図－11 に，横張りタイルの破壊ポイントを示す（実験 2 では，載荷中と載荷後のひずみの累積値を示してある）。同図によると，コンクリートの破壊ポイントは，実験の種類やケースにかかわらず 1000～2000×10^{-6} 程度の範囲にある。このことから，超高強度 PCa 柱の先付けタイルは，荷重の種類にかかわらず，躯体コンクリートのひずみが 1000×10^{-6} 以下であれば，少なくとも剥離しないと判断できる。

5. まとめ

本研究では，先付け工法でタイルが張り付けられた超高強度 PCa 柱に短期荷重および長期持続荷重が作用した場合のタイルの変形追従性および剥離抵抗性を調べた。その結果から得られた知見は以下の通りである。

（1）本実験の範囲では，躯体コンクリートの変形に対する先付けタイルの追従性は，縦張りよりも横張りの方が低い。
（2）長期持続荷重により躯体コンクリートが時間依存変形する場合の先付けタイルの追従性は，短期荷重により躯体コンクリートが変形する場合のそれよりも低い。
（3）超高強度 PCa 柱の先付けタイルは，荷重の種類にかかわらず，躯体コンクリートのひずみが 1000×10^{-6} 以下であれば，少なくとも剥離しない。

参考文献

1) 名知博司，小野正：外装タイル張り仕上げのひずみ追従性設計法の提案，日本建築学会構造系論文集，No.615，pp.31-37，2007.5
2) 名知博司，小野正：タイル直張り仕上げのひずみ追従性に及ぼすタイル要因の影響，日本建築学会構造系論文集，No.563，pp.15-22，2003.1
3) 添田智美，中山昌尚，高山勝行，佐々木仁：外装タイル仕上げにおける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 1～2），日本建築学会大会学術講演便概集，A-1，pp.105-108，2008.9
4) 渡部嗣道，馬場明生，守明子，森田和宏，川手洋：コンクリートに接着された仕上げ材の変形追随性能に関する実験的研究（その 1～3），日本建築学会大会学術講演梗概集，A-1，pp.171-176，2002.8
5) 佐々木仁，添田智美，中山昌尚，高山勝行：外装タイル仕上げにおける剥離防止性能に関する基礎実験（その 3　直張り仕上げの繰り返し型ひずみ追従性試験結果），日本建築学会大会学術講演便概集，A-1，pp.693-694，2007.8
6) 佐々木仁，佐藤幸博，高森直樹，添田智美：高強度コンクリート柱へのタイル先付け仕上げのひずみ追従性に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.28，No.1，pp.455-460，2006.7
7) 久保田浩，陣内浩，黒岩秀介，渡邉悟士，寺内利恵子，下野充雄，服部敦志，寺島知宏：設計基準強度 150N/mm^2 クラスの高強度コンクリートを用いたタイル先付け PCa 部材のタイル接着強度に関する実験的研究，日本建築学会技術報告集，No.24，pp.15-20，2006.12