

論文 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

佐々木 仁^{*1}・佐藤 幸博^{*2}・高森 直樹^{*3}・添田 智美^{*4}

要旨 : 設計基準強度 $F_c=36\text{N/mm}^2\sim 150\text{N/mm}^2$ の範囲の高強度コンクリートを対象に, 柱部材の時間依存変形に起因するタイル先付け仕上げの剥離防止対策に資することを目的に, 先付けタイルのひずみ挙動を即時的に確認するひずみ追従性試験を行った。また, タイル剥離時に生じた接着界面の面内せん断剥離応力を推定するために, シアラグ (shear lag) モデルによる次元弾性解析を行った。その結果, 建築物の供用期間中に予測される柱部材の全ひずみに照らすと, タイルが浮き, 剥離する危険性が高いこと, タイル剥離時には, タイル材端部にコンクリート割裂強度の2倍前後の面内せん断剥離応力が集中していたことが知れた。

キーワード : 高強度コンクリート, 柱, タイル先付け工法, ひずみ追従性, シアラグ

1. はじめに

近年, 設計基準強度 $F_c=100\text{N/mm}^2$ のコンクリートが超高層 RC 造住宅の下層階柱に適用されているが¹⁾, コンクリートの健全な実用化・発展のためには, 鉄筋コンクリート (以下, RC) 柱の耐震性能に加えて, 常時荷重による長期性状についても十分な検討が必要である。本研究は, RC 柱の長期性状のうち, 外装タイルの先付け仕上げに着目し, 柱の時間依存変形に対する先付けタイルのひずみ追従性能を把握し, タイルの剥離防止対策に資することを目的としている。

タイルの剥離故障や剥落事故は, 従来から幾多となく生じており, その主な原因のひとつとして, タイルとコンクリートとの線膨張率の違い, 躯体コンクリートの乾燥収縮やクリープ変形に伴う相対ひずみ差によって, 接着界面に大きなせん断力が生じるためである, と言われており²⁾, 大きな社会問題に発展している。したがって, タイルの剥離防止策の提案や, 設計段階での安全性に対する評価手法などを提案していくためには, タイルの躯体コンクリートへのひずみ追従性に対する適切な実験・評価手法の整

備と, 接着界面に作用する面内せん断剥離応力といった剥離性状の解明が不可欠である。

ひずみ追従性に対する実験・評価手法については, 近年, タイルを接着させたコンクリートに軸方向圧縮力を載荷し, 両材料間の界面に相対ひずみ差による面内せん断応力が生じるように工夫したひずみ追従性試験と呼ばれる評価実験が行われており, これまでにも幾つか報告されている^{3),4)}。本研究では, 先の研究にならない, 柱に先付けしたタイルの剥離現象をひずみ追従性試験を用いて再現し, タイルのひずみ挙動を実験的に評価する。

一方, 接着界面の剥離性状の解明に関する研究には, Airy の応力関数による弾性解析⁵⁾や境界要素法または有限要素法^{6),7)}などを用いて, 解析的に界面の発生応力の予測を試みたものがある。しかし, これらの研究は, 実施設計における評価手法として一般的に採用するには計算が煩雑であり, 実用性に難点がある。これに対して, 接着界面に作用する面内せん断剥離力をシアラグ (shear lag) 現象に単純化し (以下, シアラグモデル), 簡易に予測することを試みた渡部らの

*1 (株) フジタ 技術センター 主任研究員 博士 (工学) (正会員)

*2 (株) フジタ 技術センター 主任研究員 工修 (正会員)

*3 (株) フジタ 技術センター 主任 工修 (正会員)

*4 (株) フジタ 技術センター 主任 工修

研究⁸⁾がある。渡部らの研究は、実用性の点では有意義な試みであるといえるが、計算結果の妥当性が実験的に検証されておらず、加えて柱部材のように常時荷重の外力が作用する場合には対象外である。そこで、本研究では、接着境界面近傍のモデル化には渡部らと同様にシアラグモデルを適用するが、タイル材端部の境界条件にコンクリートに作用する外力を考慮することにより、せん断応力の算定式を導く。

以上の諸点を踏まえ、本稿では、設計基準強度 $F_c=36\text{N/mm}^2\sim 150\text{N/mm}^2$ の範囲の高強度コンクリートを対象に、タイルを先付けした角柱試験体を製作し、これに圧縮荷重を加え、即時的にタイルの剥離現象を再現するひずみ追従性試験を行うことにより、コンクリートひずみに対するタイルの追従性を実験的に評価する。さらに、シアラグモデルによる弾性解析を実行することにより、タイル剥離時に生じた接着界面の面内せん断剥離応力の推定を試みるものである。

2. ひずみ追従性試験

2.1 試験体

図-1に試験体形状を、表-1に実験因子と水準をそれぞれ示す。試験体は、 $105\times 105\times 245\text{mm}$ の角柱とした無筋コンクリートである。タイルは、 50mm 二丁モザイクタイルを用い、試験体の一面に4枚を先付けした。タイルの目地幅は 5mm 、目地深さは 3mm とし、それらは全試験体共通とした。実験因子は、コンクリート圧縮強度 (F36, F60, F90, F150)、タイルの張付方向 (横向き、縦向き)、養生条件 (恒温恒湿室、実験棟放置) の3種類である。

試験体数は、実験因子の組み合わせごとに各2体用意することを基本としたが、F90及びF150の実験棟放置のみ各1体とした。また、タイルのない素地試験体の圧縮強度及び圧縮強度時のひずみなどを調べるために、同一寸法、同一条件 (試験法と養生条件) の角柱も用意した。

2.2 使用材料と試験体の作製方法

表-2にコンクリートの計画調合を、表-3

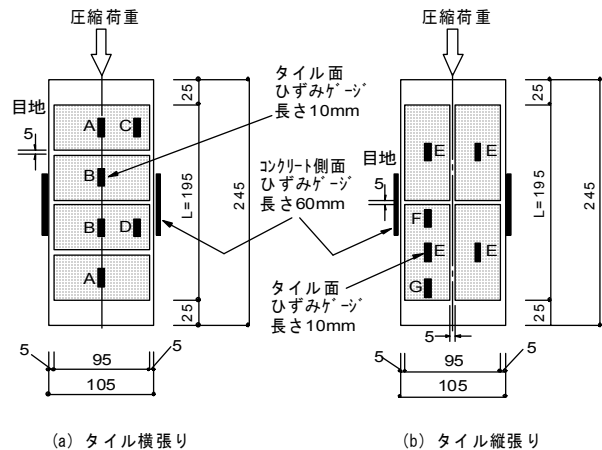


図-1 試験体形状

表-1 実験因子と水準

実験因子	記号	水準
コンクリート圧縮強度	F36	材齢28日目標強度 $\sigma_{28} \sigma_B = 36\text{N/mm}^2$
	F60	材齢28日目標強度 $\sigma_{28} \sigma_B = 60\text{N/mm}^2$
	F90	材齢28日目標強度 $\sigma_{28} \sigma_B = 90\text{N/mm}^2$
	F150	材齢28日目標強度 $\sigma_{28} \sigma_B = 150\text{N/mm}^2$
タイル張付方向	横	タイルの長手方向を横向きに張り付け
	縦	タイルの長手方向を縦向きに張り付け
養生条件	恒温室	恒温恒湿室 (室温 20°C 、湿度60%の一定)
	実験棟	実験棟内に放置 (室温、湿度とも変動)
(共通因子)		
試験体寸法: $105\times 105\times 245\text{mm}$		
使用タイル: 50mm 二丁モザイクタイル (磁器質, $95\times 45\times 7\text{mm}$)		

表-2 コンクリートの計画調合

調合記号	セメント種類	水セメント比 (%)	単体量 (kg/m^3)			高性能AE減水剤混入量 (C×%)	高性能減水剤混入量 (C×%)	
			水	セメント C	細骨材			粗骨材
F36	普通	46	170	370	830	920	0.85	—
F60	低熱	31	160	516	884	848	1.35	—
F90	SFC*1	27	160	593	821	837	—	1.5
F150	SFC*1	15	155	1033	479	822	—	1.8

注) *1 シリカフェーム混入セメント

にコンクリートの力学的性質を示す。表-3中には、タイル張り試験体と同一の試験条件で行ったタイルのない角柱試験体の試験結果も併せて示す。試験体のコンクリートは、実際のタイル先付け工法と同様に、タイルシート法により型枠の底面にタイルを設置した後、2層に分け打込み、突き棒により締固めた。湿潤養生を行った後、材齢8日目に型枠を脱型した。

2.3 载荷及び測定方法

ひずみ追従性試験は、 $2,000\text{kN}$ アムスラー型試験機を用いて、角柱試験体の長軸方向に単調圧

表-3 コンクリートの力学的性質

試験体寸法 (mm)	試験体 シリーズ	端面摩擦 状態	圧縮強度 (N/mm ²)	ヤング係数*1 (×10 ³ N/mm ²)	圧縮強度時 ひずみ度 (×10 ⁻⁶)	割裂強度 (N/mm ²)	試験 材齢 (日)
φ100×200 (円柱)	F36	鋼製 加圧板	46.3	29.4	2471	3.38	133
	F60		92.2	39.5	3162	5.59	168
	F90		113.0	41.9	3253	7.33	113
	F150		162.1	48.1	3600	8.16	113
105×105×245 (角柱)	F36	摩擦低減 シート	35.9	22.2	2556	—	128
	F60		54.0	26.5	2962	—	164
	F90		94.8	33.6	2891	—	111
	F150		133.5	46.5	3084	—	111

注) *1:(圧縮強度)/3時点, 試験法:円柱(JIS A 1108)

縮載荷し、同時に図-1に示した位置のタイル及びコンクリートの表面ひずみをひずみゲージにより測定した。

載荷にあたっては、試験体の断面内に生じる単軸圧縮応力状態を試験体の高さ方向にわたって一様にするを意図し、試験機の加圧板と試験体の載荷面との間に摩擦低減シート(厚0.8mm)を一組挿入し、加圧板-載荷面間に生じる摩擦力の除去に努めた。

2.4 ひずみ追従性能の評価方法⁴⁾

タイルのひずみ追従性能は、図-2に示すタイルひずみとコンクリートひずみの関係から求まる限界コンクリートひずみ(ϵ_{cm})、限界相対ひずみ差(ϵ_{dm})により評価する。

(1) 限界コンクリートひずみ

限界コンクリートひずみとは、荷重の増加に伴い増加していたタイルの圧縮ひずみが減少に転じた時点のコンクリートの圧縮ひずみであり、この時点で、タイルがコンクリートのひずみに追従できなくなり、タイルの浮き、剥離が生じたものと判断する。

(2) 限界相対ひずみ差

限界相対ひずみ差とは、タイルが剥離し始めた時点のコンクリートひずみ(ϵ_{c2})とタイルひずみ(ϵ_{t1})との差である。本研究では、この相対ひずみ差を用いて、接着界面に生じた面内せん断剥離応力の最大値を推定する。

3. 実験結果及び考察

3.1 実験結果の概要

(1) 試験体の破壊状況

F36, F60 シリーズでは、接着界面のコンクリ

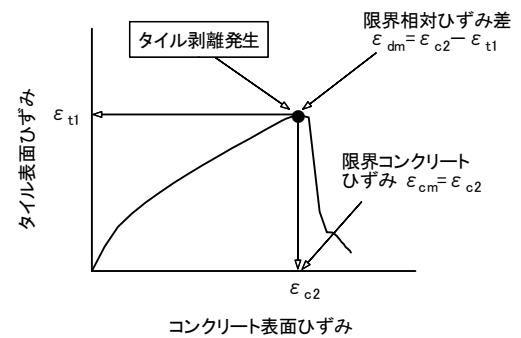


図-2 ひずみ追従性評価の定義⁴⁾

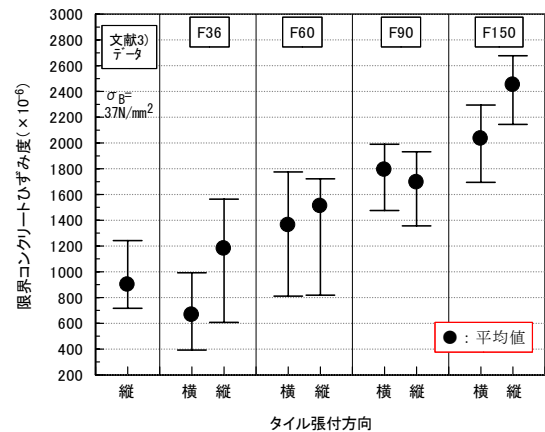


図-3 限界コンクリートひずみ

ートがせん断破壊し、F150 シリーズでは、タイルの裏足自体がせん断破壊し剥離が生じた。タイルの剥離位置は、材端部のタイルから始まり、材中央部のタイルへと各個撃破的に伝播していく傾向にあった。また、F90 シリーズでは、ひずみ追従性試験終了後(最大経験コンクリートひずみ 2000×10^{-6} 程度)、テストハンマーによる打音検査ではタイルの浮きが確認されたが、完全にタイルが剥離・剥落することはなかった。なお、全試験体はともに、表-3に示したタイルのない角柱試験体における圧縮強度時ひずみの到達以前に明確な限界コンクリートひずみを示した。

(2) 限界コンクリートひずみ

限界コンクリートひずみ(ϵ_{cm})の実験値を図-3に示す。同図中には、比較のために本実験とほぼ同様な方法で行われた普通強度の既往の実験データ³⁾を併せて示す。同図より、F36, F60, F90, F150 の各シリーズの ϵ_{cm} は、それぞれ $392 \sim 1,564 \times 10^{-6}$, $811 \sim 1,775 \times 10^{-6}$, $1,357 \sim 1,932 \times 10^{-6}$, $1,694 \sim 2,678 \times 10^{-6}$ の範囲にあった。

3.2 限界コンクリートひずみに与える実験因子の影響

限界コンクリートひずみに関して、各実験因子の影響度合いを検討する。実験因子ごとに整理した結果を図-4に示す。なお、図中の柱全ひずみ予測値については、3.3節で後述する。

(1) コンクリート圧縮強度の影響

図-4及び図-3中の既往の実験データとの比較より、タイルの張付方向、養生条件に係わらず、コンクリートの圧縮強度の増加につれて、限界コンクリートひずみも大きくなる。

(2) 養生条件の影響

図-4の(a)と(b)、及び同図の(c)と(d)のそれぞれの比較より、養生条件の違いによる有意な差異は顕著にはみられない。しかしながら、日射による温度応力などの繰り返し作用によって接着強度自体が低下していくことが考えられている²⁾ことから、それを経験させた後のひずみ追従性試験を実施するなど、今後さらに詳細な検討を進める必要がある。

(3) タイルの張付方向の影響

図-4の(a)と(c)、及び同図の(b)と(d)のそれぞれの比較より、タイル横張りに比べて縦張りの限界コンクリートひずみは、若干大きく、縦張りは横張りに比べ剥離しにくい傾向にある。

3.3 柱に生じる時間依存変形について

実際のRC柱に生じる全ひずみは、自己収縮ひずみ、乾燥収縮ひずみ、常時荷重による即時ひずみ(ϵ_e)とそれによる圧縮クリープひずみ(ϵ_{cr})の総量として与えられる。そこで、高強度コンクリートを用いたRC柱に生じる全ひずみを推定し、本実験結果と比較することにより、実際の先付けタイル柱の剥離の可能性を予測してみる。RC柱の全ひずみ(ϵ_t)は、常時荷重時の柱圧縮応力度(σ)、クリープ係数(ϕ)、柱弾性係数(E_0)、自己収縮ひずみ(ϵ_{as})が与えられれば、

$$\epsilon_t = \epsilon_e + \epsilon_{cr} + \epsilon_{as} = \sigma(1 + \phi) / E_0 + \epsilon_{as} \quad (1)$$

として求められる。ここで、タイル仕上げのため乾燥収縮ひずみは無視し、また、 σ に圧縮強度(σ_B)の30%を仮定し、 σ_B と E_0 には表-3中

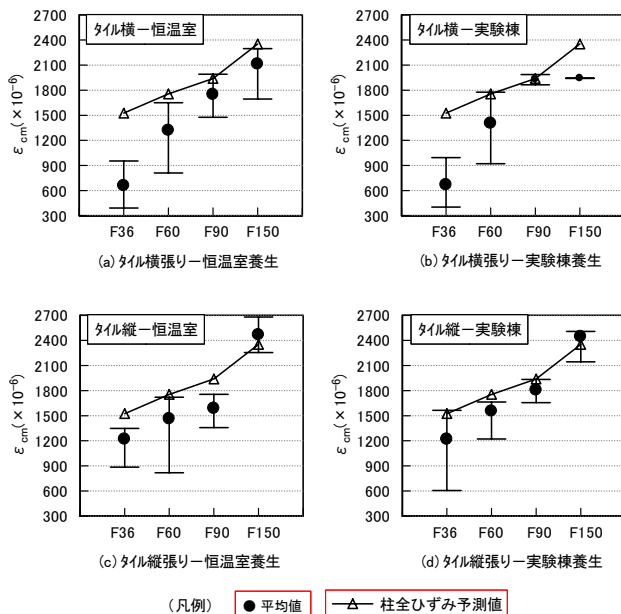


図-4 実験因子別の限界コンクリートひずみ

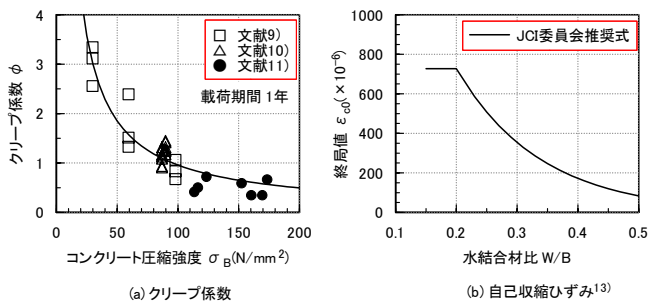


図-5 クリープ係数と自己収縮ひずみ

の円柱の試験結果を用いる。クリープ係数(ϕ)は、荷材齢により変化するが、ここでは図-5(a)に示す荷材齢1年における既往の実験データ^{9),10),11)}を基に求めた回帰曲線($y=76.1 \cdot x^{-0.95}$)より算定する。自己収縮ひずみ(ϵ_{as})は、図-5(b)に示すJCI委員会推奨式¹³⁾による終局値(ϵ_{s0})を採用するが、 $W/B=0.15$ は適用範囲外であるため、 $W/B=0.2$ で頭打ちとした。以上の仮定より求めた柱に生じる全ひずみの予測結果を図-4中に併せて示す。図-4の比較より、 ϵ_{cm} が柱全ひずみの予測値に比べ小さく、タイルの剥離が生じる危険性が高いといえる。また、実際の施工の制約条件や自然環境条件を併せて考えると、養生期間の短いプレキャスト柱ほど、すなわち若材齢時ほどクリープひずみが大きくなることや、施工サイクルに合わせ徐々に荷重が増加していくこと、日射による温度応力も接着界

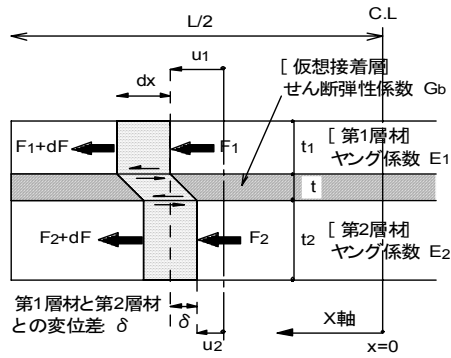


図-6 接着層近傍のシアラグモデル⁸⁾

面に繰り返し作用すること、などの付加要因が重なり、タイルの剥離の危険性がより高まることになる。

4. シアラグモデルによる接着界面に生じたせん断応力の推定

タイル剥離時に生じた接着界面の面内せん断剥離応力を推定するために、シアラグモデルを用いた一次元弾性解析を実行する。なお、ここでの解析は、タイルの破壊モードに対応したせん断応力が求まるものではない。

4.1 せん断応力算定式の誘導

渡部らが提案した接着境界面近傍のシアラグモデル⁸⁾を図-6に示す。境界面に生じる面内せん断剥離力は、第1層材及び第2層材のそれぞれに生じる材軸方向(X軸)における自由ひずみの差 $\Delta \varepsilon (= \varepsilon_1 - \varepsilon_2)$ 、すなわち相対ひずみ差によって生じるものである。この相対ひずみ差が材軸方向に均等に作用すると仮定し、材長中央部($x=0$)より左右対称なモデルを考える。したがって、力の釣り合い、変形の適合条件より、2層材間の材軸方向変位差 δ に関する微分方程式は式(2)のようになり、その一般解は式(3)のように求められる⁸⁾。

$$\frac{d^2 \delta}{dx^2} = \frac{G_b}{t} \left(\frac{1}{t_1 \cdot E_1} + \frac{1}{t_2 \cdot E_2} \right) \cdot \delta \quad (2)$$

$$\delta = A_1 \cdot \cosh \left(\beta \frac{x}{L} \right) + A_2 \cdot \sinh \left(\beta \frac{x}{L} \right) \quad (3)$$

ここで、 $\beta = C \cdot L = \sqrt{\frac{G_b}{t} \left(\frac{1}{t_1 \cdot E_1} + \frac{1}{t_2 \cdot E_2} \right)} \cdot L \quad (4)$

さらに、各層の変位(u_1, u_2)は、各層の自由ひずみと材軸方向力によるひずみとの和から求めら

表-4 接着界面のせん断応力計算用物理定数

物理定数	値(タイル縦張り試験体)			
	F36	F60	F90	F150
ヤング係数 ($\times 10^3 \text{N/mm}^2$)				
E_1 (タイル)	44.8 ¹²⁾			
E_2 (コンクリート)	29.4	39.5	41.9	48.1
E_b (仮想接着層)	37.1	42.2	43.4	46.5
(共通定数)				
ポアソン比 ν_b (仮想接着層)	0.2			
層厚 (mm)	t_1 (タイル)=7.14, t_2 (コンクリート)=105			
	t (仮想接着層)=2.19 ⁸⁾			

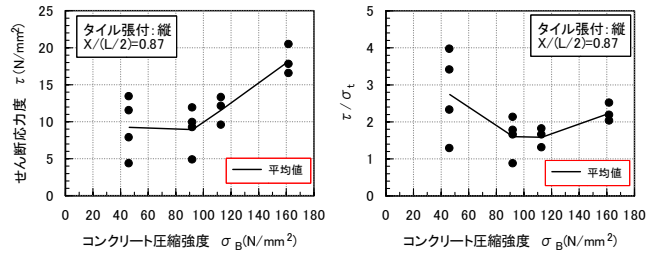


図-7 接着界面のせん断応力の解析結果

れることから、2層材間の相対ひずみ差 $\Delta \varepsilon$ と x 位置における2層材間の軸方向変位差の微分値 $d\delta$ との関係は式(5)となる⁸⁾。

$$d\delta = d(u_1 - u_2) = \Delta \varepsilon + \left(\frac{F_1}{t_1 \cdot E_1} - \frac{F_2}{t_2 \cdot E_2} \right) \quad (5)$$

一方、境界条件に関して、材中央部における材軸方向層間変位差 δ は0である。また、材端部の単位幅あたりの外力は、タイル $F_1=0$ 、コンクリート $F_2=F_2$ となる。したがって、境界条件は式(6)で与えられるから、材軸方向層間変位差 δ に関する解は式(7)となる。さらに、式(7)を用いて界面のせん断剥離応力 τ は、式(8)のように求められる。

$$(\delta)_{x=0} = 0, \quad \left(\frac{d\delta}{dx} \right)_{x=L/2} = \Delta \varepsilon - \frac{F_2}{t_2 \cdot E_2} \quad (6)$$

$$\delta = \frac{\Delta \varepsilon \cdot t_2 \cdot E_2 - F_2}{C \cdot t_2 \cdot E_2} \cdot \frac{\sinh \left(\beta \frac{x}{L} \right)}{\cosh \left(\frac{\beta}{2} \right)} \quad (7)$$

$$\tau = \frac{C \cdot (\Delta \varepsilon \cdot t_2 \cdot E_2 - F_2)}{\left(\frac{t_2 \cdot E_2}{t_1 \cdot E_1} + 1 \right)} \cdot \frac{\sinh \left(\beta \frac{x}{L} \right)}{\cosh \left(\frac{\beta}{2} \right)} \quad (8)$$

4.2 界面に生じた最大せん断応力の推定結果

本解析では、縦張り試験体を対象に、最初にタイルの剥離が確認された材長中央から最も遠

い位置に貼付したひずみゲージ（図－1のG）について、剥離発生時に生じた面内せん断剥離応力の最大値を推定してみる。

(1) 各定数の設定

接着界面のせん断応力を求めるための物理定数を表－4に示す。タイルのヤング係数は文献12)より、仮想接着層の層厚は文献8)による提案式を採用した。また、仮想接着層のヤング係数は、タイル裏足の長手方向と並行に载荷したことから、タイルとコンクリートの並列バネを仮定し求めた。

(2) 最大せん断応力度の推定結果

上記の物理定数と相対ひずみ差 $\Delta \varepsilon$ に限界相対ひずみ差 $\Delta \varepsilon = \varepsilon_{dm} = \varepsilon_{c2} - \varepsilon_{t1}$ を採用して、算定した結果を図－7に示す。F36 と F60 シリーズの最大せん断応力度は、同程度の値を示すが、F60 シリーズ以上では、コンクリートの圧縮強度が増すにつれ、最大せん断応力度も大きくなる。これらのせん断応力度をコンクリートの割裂強度 (σ_j) で除して無次元化すると、タイル剥離時には、各シリーズの平均値でタイル材端部にコンクリート割裂強度の約 1.6～2.7 倍ものせん断応力度が集中し、材端のタイルから中央のタイルへ向かい各個撃破的に剥離していったことが伺える。

5. まとめ

以上の実験結果及び考察より、以下のことが知れた。

- (1) 先付けタイルのひずみ追従性試験に関して、実験より得られた限界コンクリートひずみの最小値を、建築物の供用期間中に予測される柱部材の全ひずみに照らすと、タイルが浮き、剥離する危険性が高い。
- (2) タイル剥離時に生じた接着界面の面内せん断剥離応力を推定するために、シアラグモデルによる一次元弾性解析を行った。その結果、タイル剥離時には、タイル材端部にコンクリート割裂強度の2倍前後の面内せん断剥離応力が集中していたことがわかった。

参考文献

- 1) 石川裕次:高層RC造建物構造特性データ分析, コンクリート工学, Vol.40, No.3, pp.8-18, 2002.3
- 2) 熊谷敏男:外壁タイル張り仕上げの剥離・剥落性状, 施工, No.377, pp.44-54, 1997.3
- 3) 村井正, 柿崎正義, 小笠原和博:高流動コンクリート構造物へのタイル張りに関する研究ーコンクリートひずみに対する追従性ー, 日本建築学会技術報告集 第8号, pp.29-34, 1999.6
- 4) 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 第563号, pp.15-22, 2003.1
- 5) 馬場明生, 平石久廣:仕上げ材料のひびわれ・はく離応力の弾性解析, 日本建築学会関東支部研究報告集, pp.345-348, 昭和55年
- 6) 平居孝之:タイルの貼り付け面の温度応力解析(その1, その2), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.9-12, 1991.9
- 7) 高田栄治ほか:建築物の外壁におけるディファレンシャルムーブメントに関する研究(その1), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.19-20, 1991.9
- 8) 渡部嗣道, 馬場明正:鉄筋コンクリート建築物の表面部材および界面の応力算定に対するシアラグ理論の適用性に関する一考察, 日本建築学会構造系論文集 第542号, pp.31-37, 2001.4
- 9) 飛坂基夫ほか:高強度コンクリートを用いた柱部材の圧縮クリープ性状(その2), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1023-1024, 1993.9
- 10) 松浦恒久, 角一行:高強度鉄筋コンクリートのクリープおよび乾燥収縮特性, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.16, No.1, pp.609-614, 1994
- 11) 片寄哲務, 西田浩和, 寺岡勝:超高強度コンクリートの圧縮クリープ性状, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.391-392, 2005.9
- 12) 渡部嗣道:界面破壊力学による建築仕上げ材の変形追従性能評価, 日本建築学会構造系論文集, No.594, pp.25-32, 2005.8
- 13) 日本コンクリート工学協会:自己収縮研究委員会報告書, pp.117-121, 1996.11