

PCf版に生じる曲げ応力が打ち込みタイルの接着強度に及ぼす影響

有限要素法解析と実大実験による検証

鈴木 英之* 立山 創一** 松下 隆***

Effect on Adhesive Strength of the Tile Placed in PCa-form under a State of Bending Stress

Verification by nonlinear finite element method analyses and a real scale test

by Hideyuki SUZUKI, Souichi TATEYAMA and Takashi MATSUSHITA

Abstract

When the large-sized half-precast concrete panel was hoisted, the panel was subject to excessive bend stress, which is quite likely to cause a reduction in the adhesive strength of tiles. In order to clarify the influence of bend stress on the adhesive strength of the tiles, nonlinear finite element method analyses of the simple beam with a tile were carried out. Moreover, both a bending test involving a real scale panel and a tension test of tiles placed in the panel were carried out. Consequently, although the adhesive strength of the tile fell when subject to bending stress, there was little influence before the bending crack occurred.

要 旨

大型の型枠兼用ハーフプレキャスト版を吊り上げる際に、版には過大な曲げ応力が生じることがある。それが原因となって版に打ち込まれたタイルの接着強度が低下する懸念がある。そこで、非線形有限要素法を用いた解析と、実大のプレキャスト版を用いた曲げ実験とタイルの引張試験を行い、プレキャスト版に生じる曲げ応力がタイルの接着強度に及ぼす影響を検証した。その結果、曲げ応力によってタイルの接着強度は低下するが、曲げひび割れが発生する以前であれば接着強度の低下はほとんど無いことが明らかとなった。

キーワード：打ち込みタイル／ハーフ PCa 版／曲げ応力／接着強度／非線形有限要素法解析／実大実験

1. はじめに

外壁をタイル仕上とする場合、施工精度および施工効率を上げるために、打ち込みタイル形式の型枠兼用ハーフプレキャスト版（以下 PCf 版）を採用することがある。PC（プレキャストコンクリート）製作工場等において PCf 版を脱型、建て起こし、および吊り上げをする際には、版には曲げ応力が作用する。近年、PCf 版が大型化しているため、版に過大な曲げ応力が作用する恐れがあり、それが原因でタイルが打ち込まれた部分のコンクリート引張強度（以下、タイルの接着強度）が低下する懸念がある。本報では、まずコンクリートの非線形性を考慮

した有限要素法解析によって、PCf 版に作用した曲げ応力と、そこに打ち込まれたタイルの接着強度の相関性を導くことを目的とした。次に打ち込みタイル形式の実大 PCf 版を用いた曲げ実験とタイル引張試験を行い、PCf 版に作用した曲げ応力がタイルの接着強度に及ぼす影響を実験的に検証すると共に、有限要素法解析の妥当性を示すことを目的とした。

2. 非線形有限要素法解析

2.1 解析方法

解析にはコンクリートの直交異方性と材料非線形

* 技術研究所構造グループ

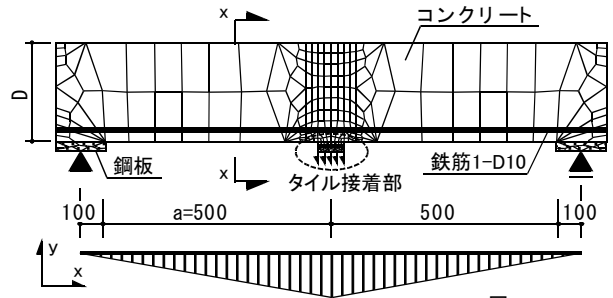
*** 第二建築事業部工事部門

** 技術研究所材料施工グループ

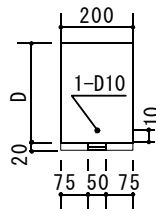
性を考慮した二次元非線形有限要素法コードである ATENA2D を使用した。解析モデルの形状を図 1 に示す。解析モデルは単純梁形式とした。梁のスパン中央下部に 50x50mm 高さ 10mm のコンクリート（以下、接着部コンクリート）を介して 50mm 角のタイルを付けた形状とした。タイルの裏足の形状は要素として考慮せず、タイルと接着部コンクリートは節点を共有している。よって、破壊面は接着部コンクリートに形成される。このタイルの下面に-y 方向の変位増分を与えることで、梁には下端引張の曲げモーメントが発生することになる。つまり、接着部コンクリートの近傍は曲げモーメントによる x 方向の引張応力と、タイルを剥離させようとする y 方向の引張応力が同時に作用する。

表 1 に解析ケースの一覧、図 2 に各解析ケースの形状図を示す。梁幅と梁スパンはすべて同一とし、梁せい(D)だけを変化させることで、せん断スパン比を 1~10 とした。つまり、case1 の 50R-D は梁の断面係数が大きいので、曲げ応力の影響が小さいが、梁せいが小さくなるにつれ曲げ応力による梁下端の引張ひずみの影響が大きくなる。また、曲げ破壊を先行させないために、梁の下端には鉄筋を模擬した線要素を設けた。なお、要素分割には自動メッシュ機能を使用し、スパン中央付近とタイル近傍の要素を細かくした。

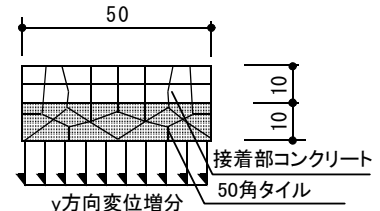
表 2 に解析モデルに使用した材料特性、表 3 に要素特性をそれぞれ示す。また、図 3 にコンクリート材料のモデルを示す。コンクリートはひび割れを考慮した非線形モデルとし、ひび割れは分散型回転モデルで表現した。コンクリートの引張強度は、ひび



a. 要素分割の一例とモーメント図



b. x-x 断面図



c. タイル接着部詳細

図 1 解析モデルの形状図

表 1 解析ケース一覧

ケース	モデル名	梁せい D	せん断スパン比 a/D	断面係数 Z(mm ³)	曲げひび割れモーメント $0.56\sqrt{f_c \sigma_B} \cdot Z$ (kN·mm)	解析結果	
						曲げひび割れの有無	引張破壊時の梁変形角 ($\times 10^{-3}$ rad.)
1	50R-D	500	1.00	8.33E+06	21385	無し	0.01
2	25R-D	250	2.00	2.08E+06	5346	無し	0.03
3	20R-D	200	2.50	1.33E+06	3422	無し	0.06
4	15R-D	150	3.33	7.50E+05	1925	無し	0.12
5	12R-D	120	4.17	4.80E+05	1232	有り	0.22
6	10R-D	100	5.00	3.33E+05	855	有り	0.37
7	9R-D	90	5.56	2.70E+05	693	有り	0.52
8	8R-D	80	6.25	2.13E+05	547	有り	0.68
9	7R-D	70	7.14	1.63E+05	419	有り	1.04
10	6R-D	60	8.33	1.20E+05	308	有り	2.00
11	5R-D	50	10.0	8.33E+04	214	有り	2.20

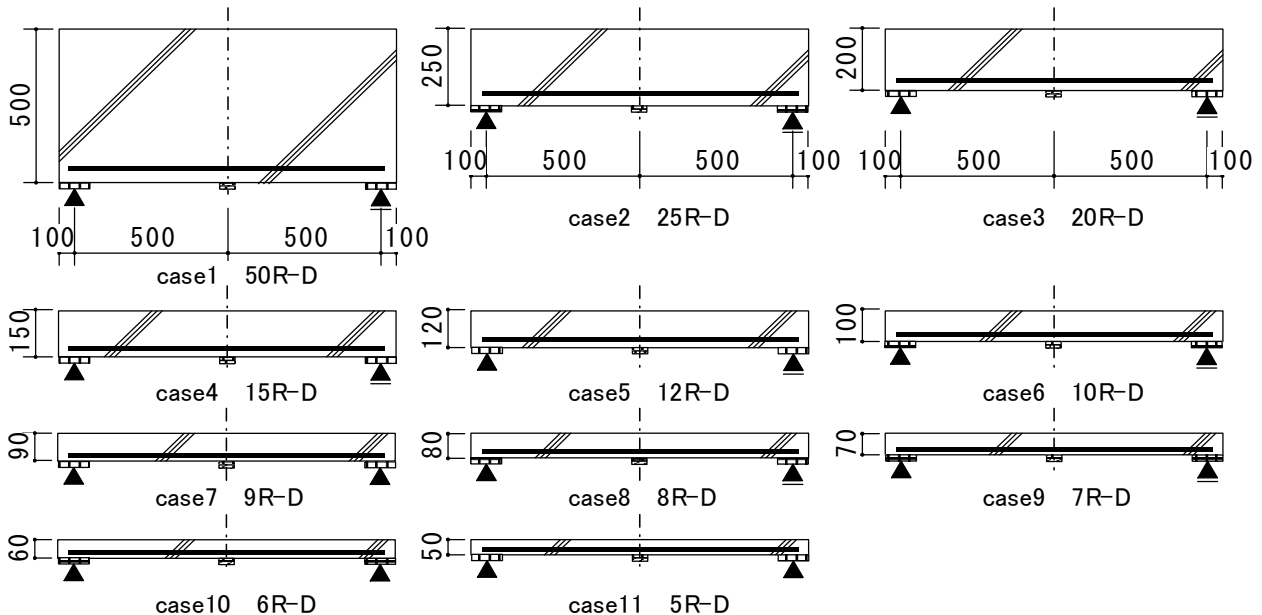


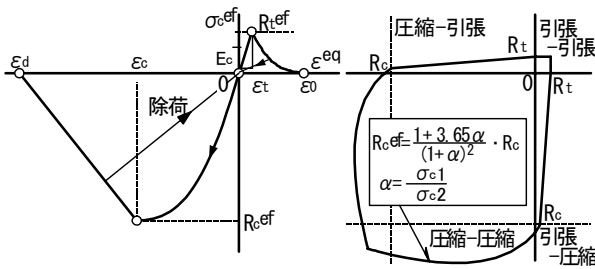
図 2 各解析ケースの形状図

表 2 材料特性

コンクリート (非線形 s-betaモデル)	設計基準強度	$c\sigma_B$	21	N/mm ²
	初期弾性係数	E_c	2.60E+04	N/mm ²
	引張強度	$c\sigma_t$	1.83	N/mm ²
	ひび割れ	分散型回転モデル		
タイル(線形)	弾性係数	E_t	5.90E+04	N/mm ²
鉄筋, 鋼板 (弾塑性モデル)	弾性係数	E_s	2.06E+05	N/mm ²
	降伏強度	$s\sigma_y$	200	N/mm ²

表 3 要素特性

コンクリート, タイル, 鋼板	4点積分型4節点要素
鉄筋	2節点線要素



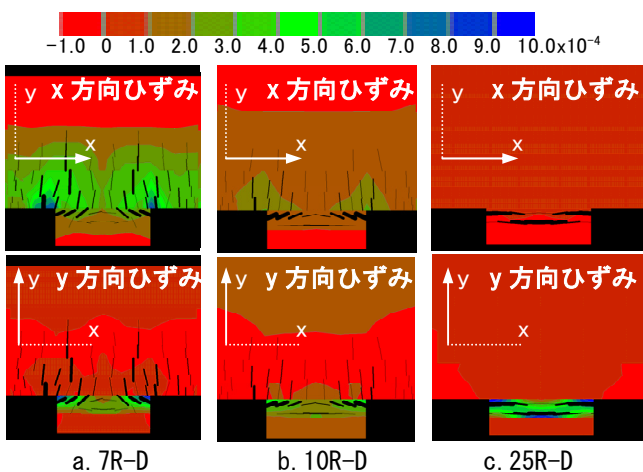
a. 応力-ひずみ関係 b. 二軸応力下の破壊基準
図 3 コンクリート材料のモデル化

割れ強度の下限値として $0.4\sqrt{c\sigma_B}$ ($=1.83 \text{ N/mm}^2$) とした。荷重ステップはタイル下面への -y 方向の変位増分とした。1 ステップあたりの変位増分は 0.1mm (5R-D)~ $5 \times 10^{-4}\text{mm}$ (50R-D)とし、引張破壊直前は増分を極力小さくした。接着部コンクリートのひび割れが貫通し、引張応力を負担不能となった時点で解析を終了した。

2.2 解析結果

a. 接着部近傍のひずみとひび割れ

解析結果の一例として、図 4 に引張破壊直前における、接着部コンクリート周囲の x,y 方向のひずみ



a. 7R-D b. 10R-D c. 25R-D
図 4 引張破壊直前のひずみコンターとひび割れ図

のコンター図にひび割れ図を重ねたものを示す。ここで図示されているひび割れ幅は $1 \times 10^{-3}\text{mm}$ 以上であるため、実際には目視されない微細なひび割れも含まれている。いずれの解析ケースも最終的に接着部コンクリートの引張破壊で終局を迎えた。せん断スパン比が小さい 15R-D~50R-D では梁の下端に曲げひび割れは生じなかった。同図 a は接着部コンクリート付近に曲げひび割れが多く発生した 7R-D、同図 c は最終ステップまで曲げひび割れが発生しなかった 25R-D、同図 b はその中間の 10R-D である。図中のコンターは寒色系(カラー表示時)が引張応力場を表している。これによると、いずれも接着部コンクリートの y 方向の引張ひずみが破壊の直前に大きくなっている。

せん断スパン比が小さい 25R-D は接着部コンクリートのひび割れが x 軸に水平であるのに対し、10R-D, 7R-D とせん断スパン比が大きくなるにつれ、ひび割れが x 軸となす角度が大きくなっていった。つまり、せん断スパン比が小さい場合は接着部コンクリートには一軸引張応力が作用しているが、せん断スパン比が大きくなると、梁下端の引張ひずみが大きくなるため、接着部コンクリートには二軸応力が作用していることを表している。

b. 曲げ応力場におけるタイトルの接着強度

図 5 にタイルが接着する断面におけるコンクリートの引張応力と梁下端の x 方向引張ひずみの関係を示す。ここで、引張ひずみは接着部コンクリートが付く区間における平均ひずみである。○印は接着部コンクリートが引張破壊した点である。これによると、梁に曲げひび割れが発生しなかった 50R-D から 15R-D は、表 2 の材料特性に示したコンクリートの引張強度である 1.83N/mm^2 に近い強度で破壊していた。

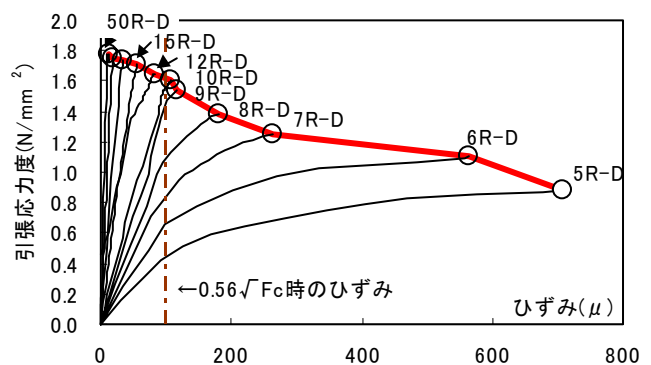


図 5 タイル接着部の引張応力度(接着強度)と梁下端の x 方向引張ひずみ関係

図中の太実線は各解析ケースの最終ステップである引張破壊時の点を結んだものである。せん断スパン比が大きくなるにつれ、引張破壊時の応力度が低下しており、その時の梁下端のひずみが大きくなる事がわかる。これは曲げ応力により梁下端の引張ひずみが増加すると、そこに接着されるタイトルの接着強度が低下することを表している。図中の一点鎖線は平均的な曲げひび割れ応力度である $0.56\sqrt{c\sigma_b}$ を弾性係数で除した引張ひずみであり約 100μ である。

本解析はタイトルの接着部に曲げ応力と引張応力が同時に作用した状態を表している。つまり曲げ応力が部材に作用しても、部材に未だひび割れが発生してなく、コンクリートが弾性域にある場合は、曲げ応力の解放後にひずみが零になるため、接着強度は低下しないと考えられる。

3. 実大PCf版を使用した実験

3.1 PCf 版の曲げ実験

a. 試験体および実験方法

試験体形状図を図6に示す。試験体は型枠ベツト面側に、同図eに示す形状の50角タイトル(外形寸法45mmx45mm)を打ち込み、打設面側の材軸方向に4本のトラス筋($h=70\text{mm}$)を配したハーフPCf版とした。

図7に加力・計測方法を示す。試験体はタイトル面を下側とした単純梁形式の支持とし、内法スパン長は4000mmとした。内法スパンをおよそ3等分する位置でレベルを合わせたサポートを設け、試験体を支持した状態で初期値を計測した。その後、支点間のサポートを撤去し自重によるたわみを生じさせた。荷重は、あらかじめ重量を計測した鋼板を1ステップ毎に約400Nずつスパン中央部の荷重台に載せ、各ステップで計測およびひび割れの観察を行った。主な計測項目はスパン中央部の鉛直変位と7箇所断面の曲率とした。曲率は試験体の上下両面に π 型変位計を取り付け、計測区間の平均曲率とした。曲げ試験時のコンクリートの圧縮強度は 43.8N/mm^2 、1/3割線剛性は $2.41 \times 10^4\text{N/mm}^2$ であった。

b. 実験結果

図8にスパン中央部から支点の間の曲率分布を示す。図中に示した太点線は材料強度に基づいた断面曲げ解析結果である。図7aに示したサポートを撤去することで、自重による鉛直変位が2.9mm生じ

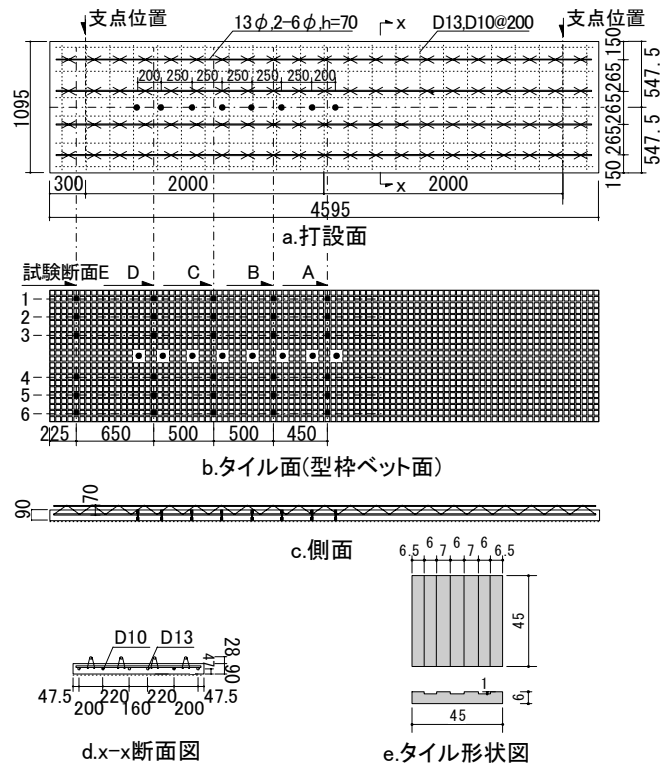


図6 試験体形状図

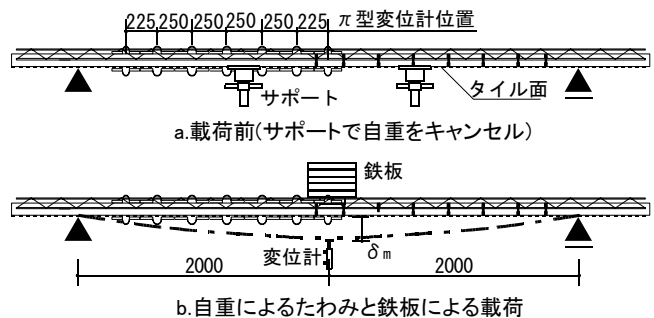


図7 加力・計測方法

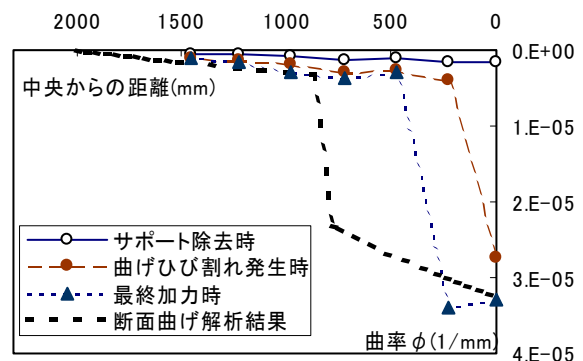


図8 曲率分布の実験値と解析値の比較

た。その後の鋼板による荷重では $\delta=5.9\text{mm}$ まではひび割れが発生せず、荷重変位関係も弾性の挙動を示した。荷重点における曲げモーメントが $M=8.45\text{kN}\cdot\text{m}$ 時に曲げひび割れが発生し剛性が低下した。積荷荷重 $5.33\text{kN}(M=10.0\text{kN}\cdot\text{m})$ 時にトラス上

端筋のひずみが、許容座屈応力度[1]付近に達したと判断し曲げ加力を終了した。この時の載荷点における鉛直変位は 23.7mm であった。

実験結果から得られた曲率と材料強度に基づいた断面曲げ解析結果と比較すると、初期剛性、およびひび割れ後の剛性ともに実験値と解析値は概ね一致しており、試験体の自重および鉄板による載荷によって、想定通りの変形が PCf 版に生じていたことが確認された。

図 9 にひび割れ図を示す。ひび割れはタイルの目地に沿って発生し、試験体の幅方向で連続しており、幅方向にはほぼ均一な曲げ応力が生じていると考えられる。最終加力時のひび割れ幅は最大で約 0.25mm だった。

このひび割れ図と図 8 に示した曲率分布を比較すると、曲げひび割れが発生した区間で曲率が大きくなっており、ひび割れが入っていない区間は曲げモーメントに応じた緩やかな曲率勾配となっていた。

3.2 タイル引張試験

建研式試験法によりタイルの引張試験を実施した。曲げ実験終了後に PCf 版に補強アングルを取り付け、曲げ変形を保持した状態で試験体を反転させ、タイル面を上面とした。図 9 中にタイル引張試験を実施した箇所を■印で示す。試験体幅方向の曲率分布は一定であるとし、5 水準の曲率に対して各 6 箇所の引張試験を実施した。試験箇所の記号はスパン中央から順に A,B,C,D,E とし、各断面毎に 1~6 の番号を付けた。引張試験は、中央側の A 列を 1~6 の順に試験を行い、続けて、同様に B,C,D,E 列の順で行った。引張耐力は油圧ジャッキの圧力計の読み値とし、接着強度はそれを 45mmx45mm で除した値とした。また、タイル引張試験時のコンクリート圧縮強度は 44.7 N/mm² だった。

表 4 にタイル引張試験の結果一覧、図 10 に同試験結果をグラフ化したものを示す。これによると、全箇所においてタイルの引張破壊が確認された。PC 版の曲率が大きいスパン中央側の方が接着強度が小さい傾向が見られるが、同一曲率内の偏差の方が大きかった。最も接着強度が低いのは B4 の 1.38 N/mm² であったが、これは JASS19[2]に示されている 0.6 N/mm² の 2.3 倍であった。

図 11 にタイルの接着強度の強度比と各断面における PCf 版下端のコンクリートの引張ひずみの関係を示す。ここで、タイル接着強度の強度比とは、

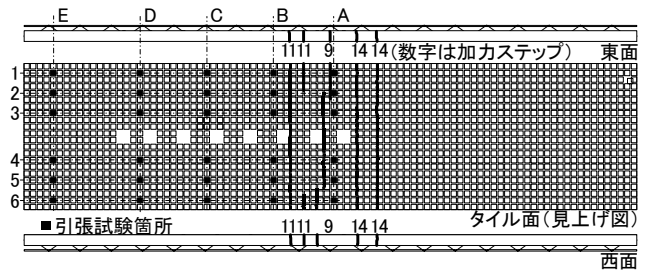


図 9 ひび割れ図

表 4 タイル引張試験結果一覧(単位:N/mm²)

番号	断面	E	D	C	B	A
1		1.88	2.57	1.58	1.48	1.73
2		2.47	2.47	1.73	2.22	1.73
3		2.22	2.07	1.73	1.98	1.88
4		2.37	2.57	1.98	1.38	1.73
5		2.37	1.73	2.22	1.73	2.37
6		2.37	1.98	2.07	1.58	2.22
平均		2.28	2.23	1.88	1.73	1.94

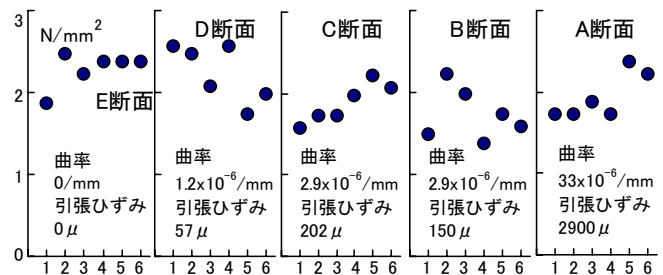


図 10 各断面のタイル接着強度

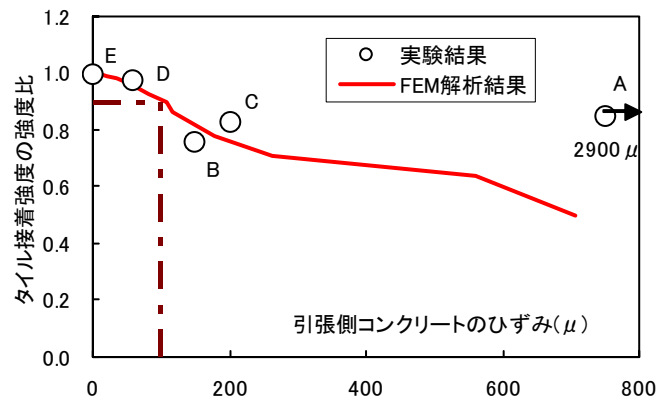


図 11 タイル接着強度の強度比

と PCf 版引張ひずみ関係

各断面のタイルの接着強度の平均値を、曲げ応力が作用していないタイルの接着強度の平均値で除した値であり、引張側コンクリートのひずみはπ型変位計によって計測された対応する区間の平均ひずみである。図中の実線は図 5 中に示した FEM 解析結果であり、曲げ応力の影響が少ない 50R-D のタイル接着強度比を 1.0 としている。解析結果では PCf 版

の引張ひずみが大きくなるにつれタイルの接着強度が低下しているのに対し、実験値は 200μ までは解析値と同様な傾向を示し、それ以上のひずみでは相関性は見られなかった。これは、A～B 断面は近傍に発生したひび割れに引張ひずみが集中し、タイル引張試験を行った箇所の曲げ応力によるひずみが小さくなったためと推測される。

図 9 において、E 断面は曲げ応力をほとんど受けていない。この断面におけるタイルの接着強度の最小値は 1.88N/mm^2 であった。これを $\alpha\sqrt{c\sigma_B}[c\sigma_B=44.7\text{N/mm}^2]$ の形で表すと、曲げ応力を受けていない状態の打ち込みタイルの接着強度の下限值(σ_{min})は式(1)から算出される。

$${}_t\sigma_{min} = 0.28\sqrt{c\sigma_B} \quad (\text{N/mm}^2) \quad (1)$$

図 11 によると、曲げひび割れが発生する時のひずみを 100μ とすれば、その時のタイル接着強度は元の 90%程度まで低下する。式(1)に型枠脱型時の確認コンクリート強度である 12N/mm^2 を代入すると ${}_t\sigma_{min}=0.97\text{N/mm}^2$ となる。PCf 版にひび割れの発生する応力が作用したとして、これに 0.9 を乗じると、タイル接着強度は 0.87N/mm^2 となる。これは JASS19 で定められている最低強度(0.6N/mm^2)の 1.45 倍である。つまり、曲げひび割れが発生しない吊り位置や吊り方法で管理することで、タイルの接着強度は曲げ応力の影響を受けない値を確保できると考えられる。

4. まとめ

打ち込みタイルを模擬した解析モデルによる非線形有限要素法解析および、実大 PCf 版による曲げ実験とタイル引張試験より、以下に示す知見が得られた。

- 1)非線形有限要素法解析より、ひび割れの有無によらず、曲げ応力による引張ひずみによって、その応力場に貼られたタイルの接着強度が低下することが明らかとなった。しかし、コンクリート表面のひずみが、 100μ 以下の範囲では、曲げ応力による接着強度の低下はほとんど無かった。
- 2)実大の PCf 試験体に曲げ変形を生じさせた状態での 30 箇所のタイルの引張試験の結果、全箇所において、JASS19 に示されている 0.6N/mm^2 を上回ることを確認した。
- 3)タイルの接着強度と曲率の相関性は見られ、その

関係は非線形有限要素法解析による結果と定性的に一致した。

- 4)実大実験および非線形有限要素法解析の結果より、PCf 版に作用する曲げ応力を曲げひび割れ発生応力以下とすることで、JASS19 に示されている打ち込みタイルの必要接着強度を確保できることが確認された。つまり、PCf 版に曲げひび割れが発生しないような工事管理を行うことでタイルの接着力の低下を防止することができる。

参考文献

- [1]日本カイザー：カイザー耐力壁 設計・製造・施工要領，1992 年
- [2]日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説 JASS19 陶磁器質タイル張り工事 1996.10