

外装タイル張り仕上げのひずみ追従性設計手法の提案

名知 博司 小野 正
(技術研究所) (技術研究所)

Methods for Preventing Tile Facings from Falling Off External Walls

by Hiroshi Nachi and Tadashi Ono

Abstract

This paper proposes methods to prevent tile facings from falling off external walls. The methods introduce the concept of performance design for tile facings on external walls. In this paper, the specifications for tile facings are evaluated using the deformational performance test, and the allowable strain is obtained. The design strain is predicted from the differential movement that develops in the tile facings on external walls. Finally, both are compared and the safety is confirmed. The safety provided by the specifications for the tile facings was verified by a trial design, and the validity of the proposed method was verified by actual performance on a building.

概要

外装タイル張り仕上げに対して性能設計の概念を導入し、タイル張り仕様のひずみ追従性をひずみ追従性試験により評価し、各種タイル張り仕様の許容耐力として許容限界相対ひずみ差を設定した。外装タイル張り仕上げに生じるディファレンシャルムーブメントを設計外力として設計せん断ひずみ差を予測し、両者の関係から安全なタイル張り仕様が設計できる外装タイル張り仕上げのひずみ追従性設計手法を提案し、試設計によるタイル張り仕様の安全性を確認するとともに、実案件で、ひずみ追従性設計を適用し、その妥当性を検証した。

§ 1. はじめに

外装タイル張り仕上げは、長い歴史と豊富な経験を持ちながらも、タイル張りの剥離・落下などの故障が減少しない¹⁾。その理由として、材料・工法の改良・開発およびコスト・性能保証の要求の変化などに、それまでに蓄積してきたノウハウで対応しきれないまま工事を進めたことによる所が少なくない。つまり、施工に関する約束事は、仕様書にまとめられているが、仕様書にない設計・施工条件や長期性能保証のニーズに対して、常に後手の対応となり、様々な視点から幅広く検討し、コスト、納期、品質を確保してゆくことが達成できなかったためと言える。

タイルの剥離・剥落故障の原因としては、温冷や乾湿のくり返しによるコンクリートとタイルのひずみの

差²⁾、あるいはコンクリートや張り付けモルタルの乾燥収縮に伴うひずみの差³⁾であると言われており、これらのひずみの差は、一般にディファレンシャルムーブメントと呼んでいる。外装タイル張り仕上げでは、何らかの理由で十分な接着性が得られない場合や過度のディファレンシャルムーブメントが作用した場合に、タイルの剥離・剥落故障を招き、これが大きな問題となっている。したがって、このタイル張り層に生じるディファレンシャルムーブメントを予測し、このムーブメントに耐え得る仕様・施工法であることを事前に確認できる仕組みがあれば、剥離・剥落故障の多くは予防できると考えられる。

以上の背景から、タイル張り仕上げのひずみ追従性を予測・評価し、安全なタイル張り仕様を提示できる設計手法が必要であると考えている。

§ 2 . ひずみ追従性設計手法の概要

2 . 1 研究の目的

タイル張り層の剥離・剥落現象については、多数の事例と原因分析が報告¹⁾されており、破壊現象⁴⁾に着目すると、以下に示すような2つに分類される。

- (1) 外壁に生じる面内方向のひずみにより、タイル張り層がせん断変形し、タイル張り端部周辺が破壊する
- (2) タイル張り区画内の中央部において、下地コンクリートの乾燥収縮ひずみが拘束されて、ひび割れが発生し、これを起点にタイル張り層が浮き上がる

昨今のタイル工事ににおいては、タイル直張り工法が主流になっている⁵⁾。これは、コンクリート躯体面に、モルタル下地を施工しないで、タイルを直に張り付ける工法である。なお、現実の施工では、コンクリート躯体の精度の問題から、部分的にモルタルの薄塗り補修によって下地の不陸調整を行ってからタイルを張り付ける場合も少なくなく、このような薄塗りモルタルが下地となる場合も、タイル直張り工法の範疇に入れている。このタイル直張り工法は、タイル張り層とコンクリート躯体のひずみ挙動の差を緩衝するためのモルタル層がないか、あっても薄いため、タイル張り層に生じる面内方向のひずみ差が剥離現象を引き起こしやすいと推察される。

そこで、柱・梁で周辺を拘束されたRC造外壁にタイルを直張りする場合を想定し、コンクリート躯体は、厚さの薄いタイル張り層に対して十分な剛性を有し、かつ、柱・梁の拘束により面外へ孕み出さないために、コンクリート躯体やタイルのひずみがタイル張り層にひずみ差として作用するために、上記(1)を原因とした剥離現象が生じやすくなると考えられる。

本研究では、コンクリート下地あるいは不陸調整を行った薄塗りモルタル下地に施工したタイル張り仕上げを対象として、ひずみ追従性設計手法の確立を目的とした。

2 . 2 ひずみ追従性設計手法の基本的な考え方

外装タイル張り仕上げにおけるひずみ追従性設計のフローを図 - 1 に示す。この設計手法の基本的な考え方は、タイル張り層内に生じるひずみ差(ディファレンシャルムーブメント)に着目し、指定のタイル張り層内で許容できるひずみ差(許容耐力)が設計仕様・施工計画に基づいて算出した設計上見込まれるひずみ差(設計外力)を上回るように検討・評価することである。

2 . 3 ひずみ追従性設計手法の仕組み

図 - 1 の設計フローに沿って、ひずみ追従性設計手法の手順について述べる。

(1) 設計と条件とタイル張り仕様の確認事項

最初に、設計図書に記載されている立地条件などの設計と条件とタイル張り仕様について、表 - 1 に示す項目を確認する。

設計と条件として確認する項目は、(1)立地条件、(2)タイル(種類、厚さ、色調)である。タイル張り仕様として確認する項目は、(3)コンクリート躯体(打込み時期、養生期間)、(4)下地処理工法、(5)不陸調整工法(種類、塗り厚)、(6)施工時期、(7)張付けモルタルである。なお、タイル張り工法については、施工的な要因と判断し、ここでは除外した。

(2) 許容耐力(許容限界相対ひずみ差)の設定

許容耐力は、タイル張り層内において破壊が始まるまでの限界相対ひずみ差を統計的に処理した許容値であり、(1)式により設定する。限界相対ひずみ差は、ひずみ追従性試験から求めることができるひずみ追従性の指標⁶⁾であり、その定義を図 - 2 に示す。あらかじめ、タイル張り仕様を模擬したタイル張り試験体を作製し、ひずみ追従性試験を実施し、ひずみ伝達率と破壊ポイントを求め、そこから限界相対ひずみ差を算出する。

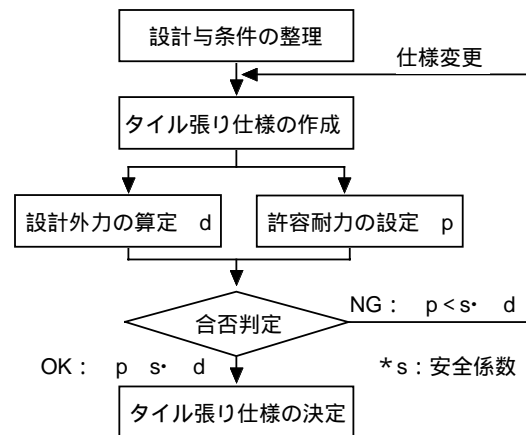


図 - 1 外装タイル張り仕上げの性能設計フロー

表 - 1 設計と条件とタイル張り仕様の確認事項

項目	概要	
設計と条件	立地	最寄りの気象官署の気象統計
	タイル	タイル種類、厚さおよび色調
タイル張り仕様	コンクリート躯体	コンクリート躯体の放置期間
	下地処理工法	超高圧水洗浄工法、サンダー掛工法など
	不陸調整工法	薄塗りモルタル種別、塗り厚
	施工時期	施工月
	張付けモルタル	張付けモルタル種別、ポリマー混入量

$$p = (1 -) (bp - 1.7 v) \quad (1)$$

ここに、
 p : 許容限界相対ひずみ差
 v : ひずみ伝達率
 bp : 破壊ポイントの平均値
 v : 破壊ポイントの標準偏差

(3) 設計外力 (設計せん断ひずみ差) の算出

設計外力は、設計上見込まれるタイル張り層内に生じる相対ひずみ差とし、その概念を図 - 3 に示す。

設計せん断ひずみ差は、コンクリート躯体収縮側の拘束収縮ひずみとタイル膨張側の年間最大熱膨張ひずみの総和に、ひずみ伝達率を乗じる (2) 式により算出する。拘束収縮ひずみは、コンクリート躯体の乾燥収縮ひずみに、壁体拘束率を乗じる (3) 式により算出する。また、年間最大熱膨張ひずみは、年間を通じてタイル表面に生じる最大温度差にタイルの線膨張係数を乗じる (4) 式により算出する。

$$d = (1 -) (t + c) \quad (2)$$

$$c = (1 - R) (A \{ 1 - d / (B + d) \}) \quad (3)$$

$$t = K_t \cdot (T_{max} \cdot G_t - T_{min}) \quad (4)$$

ここに、
 d : 設計せん断ひずみ差
 v : ひずみ伝達率 (図 - 2 参照)
 c : 拘束収縮ひずみ
 R : 壁体拘束率
 d : コンクリート養生日数 (日)
 A, B : 実験定数
 t : 年間最大熱膨張ひずみ
 K_t : タイルの線膨張係数 (/)
 G_t : タイルの色調係数
 T_{max} : 8月の日最高気温 ()
 T_{min} : タイル施工月の日最低気温 ()

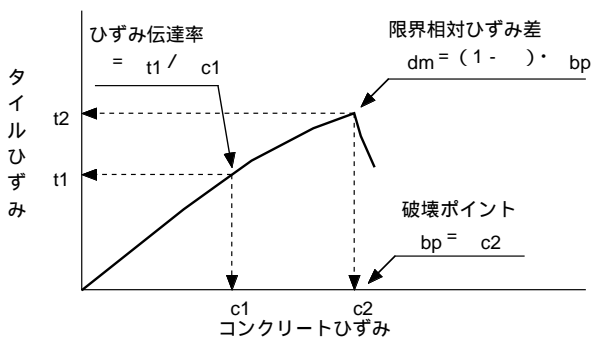


図 - 2 ひずみ追従性指標の定義

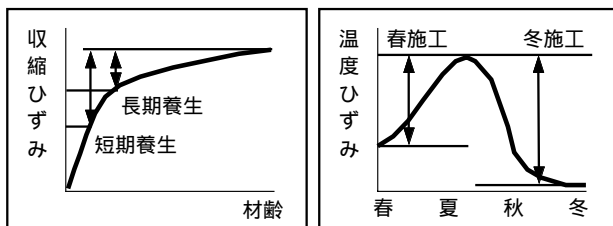


図 - 3 設計せん断ひずみ差の概念

(4) 合否判定

ひずみ追従性設計における安全性の合否は、(5) 式による。合否判定値 s が 1.5 以上の場合を合格とする。

$$s = p / d \quad (5)$$

ここに、 s : 合否判定値 (安全係数)

なお、合否判定値とは、タイル張り仕様の安全性を担保するための安全係数と位置付けられ、材料的な劣化や施工的な要因によるひずみ追従性の低下などを考慮した係数である。

§ 3 . ひずみ追従性設計手法の試行

3 . 1 設計と条件およびタイル張り仕様

前章で提示したひずみ追従性設計手法の考え方と手順に沿って、さまざまな条件下で試設計を行う。

試設計における設計と条件およびタイル張り仕様は、表 - 2 に示すとおりである。立地は、関東甲信越地方から、平地と内陸地の代表としてそれぞれ東京 23 区と熊谷市 (埼玉県) の 2 都市を対象とした。過去 30 年における 2 都市の日最高気温および日最低気温の月別平年値を表 - 3 に示す。

タイルは、二丁掛タイルを対象とし、タイル厚さが薄い平タイルと、厚い山形タイルの 2 種類とした。色調は、茶褐色系と白系の 2 種類とした。

コンクリート躯体のタイル張りまでの放置期間は、2 週間、1 カ月、および 3 カ月の 3 種類とした。コンクリート躯体の下地処理工法は、超高压水洗浄工法

表 - 2 試設計の設計と条件とタイル張り仕様

項目		仕様	
設計と条件	立地	千代田区、熊谷市	
	タイル	種類 厚さ	二丁掛平 厚さ10mm 二丁掛山形 厚さ18mm
		色調	茶褐色系、白系
タイル張り仕様	コンクリート躯体の放置期間	2週間、1ヶ月、3ヶ月	
	下地処理工法	超高压水洗浄工法、水洗い	
	不陸調整工法	既製調合モルタル 塗り厚 0mm、3mm、10mm	
	タイル張りの施工時期	1月、4月、7月	
	張付けモルタル	現場調合モルタル P/C = 0%、5%	

表 - 3 日最高および日最低気温の月別平年値

地域	気温 ()	1月	4月	7月	10月	年平均
東京	日最高気温	9.8	18.4	29.0	21.6	19.7
	日最低気温	2.1	10.5	22.5	15.0	12.5
熊谷	日最高気温	9.3	19.0	29.6	21.3	19.8
	日最低気温	-1.1	8.1	21.3	12.5	10.2

(吐出圧150N/mm²、処理速度0.3m²/分)と、水洗いの2種類とした。タイル張り下地は、不陸調整を行わない直張りの他に、セメント混和用のポリマーを混入した既製調合モルタルを厚さ3mm、10mmで塗付けた不陸調整下地とした。タイル張りの施工時期は、1月(冬期)、4月(中間期)および7月(夏期)の3種類とした。張付けモルタルは、現場調合モルタル(C:S=1:1)とし、セメント混和用のポリマーの混入量(P/C)を、0%と5%とした。なお、試験に用いたモルタルの物性を表-4に示す。

3.2 許容限界相対ひずみ差

(1) ひずみ追従性試験方法

表-2に示したタイル張り仕様において、許容耐力(許容限界相対ひずみ差)を設定するために、ひずみ追従性試験を実施した。タイル張り仕様の組合わせを表-5に示す。

ひずみ追従性試験用のタイル張り供試体⁸⁾の形状・寸法を図-4に示す。試験体数は、1水準につき2体とした。コンクリートは、設計基準強度27N/mm²のレディーミクストコンクリートで、内法寸法が100×100×650mmの塗装合板型枠に打ち込んだ。打込み後2日で脱型し、屋内試験ヤード内でポリエチレン製フィルムを用いて封かん養生した。コンクリート打込み後4週目に、コンクリートの下地処理として、超高压水洗浄工法および水洗いを実施した。

コンクリート打込み後5週目に、不陸調整モルタルの施工を行った。不陸調整モルタルは、それぞれの塗り厚に応じた既製調合モルタルを3mmおよび10mmの塗り厚で施工し、湿空状態で1日養生した後、恒温恒湿室内(20±5%RH)に戻した。コンクリート打

表-4 試験に用いたモルタルの基本物性

項目	不陸調整モルタル		張付けモルタル P/C=5%
	3mm用	10mm用	
比重	1.71	1.48	2.04
圧縮強度(N/mm ²)	22.3	19.7	65.8

表-5 タイル張り仕様の組合わせ

タイル	下地処理	張付モルタル P/C(%)	モルタル下地厚さ(mm)		
			0	3	10
二丁掛 平	超高压 水洗浄	0			
		5	-	-	
	水洗い	0			
		5	-	-	
二丁掛 山形	超高压 水洗浄	0			
		5	-	-	
	水洗い	0			
		5	-	-	

込み後6週目に、コンクリートの相対する2面に、振動工具を用いて密着張りでタイルを張付けた。タイル張り翌日に目地詰めを行い、湿空状態で2日間養生した後、恒温恒湿室内で約2週間養生し、さらに、張付けモルタルの強度発現を促進させる目的で、40℃温水浸漬⁹⁾を約1カ月間行った。

温水浸漬後、十分な乾燥期間を取り、長辺方向のタイルひずみが測定できるように図-5に示す位置にひずみゲージを貼り付けた。2,000kN万能試験機を用いて、載荷速度1.7kN/秒で長軸方向に単調圧縮載荷し、タイルとコンクリートの表面ひずみを測定し、図-2に定義したひずみ追従性指標を求めた。

(2) ひずみ追従性試験結果と考察

ひずみ追従性試験結果の一覧を表-6に、破壊ポイントの比較を図-6と図-7に示す。

ひずみ伝達率は、タイルが厚いほど、モルタル下地厚が厚いほど、低下する傾向にある。最もひずみを伝達しやすい二丁掛・平タイルの直張りの場合で0.915、最もひずみを伝達しにくい二丁掛・山形タイルでモルタル下地厚10mmの場合で0.740であった。

破壊ポイントは、平タイルの方が山形タイルよりも全般的に大きく、タイルの厚さに影響を受ける。下地処理は、超高压水洗浄を施した方が、水洗いよりも、破壊ポイントが大きくなり、また、モルタル下地を施さない場合には、張付けモルタルにポリマーディスページョンを混入した方が破壊ポイントが増加した。モルタル下地厚の影響については、明確な傾向が

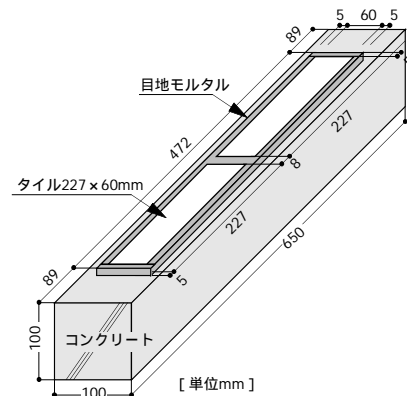


図-4 タイル張り供試体の形状・寸法

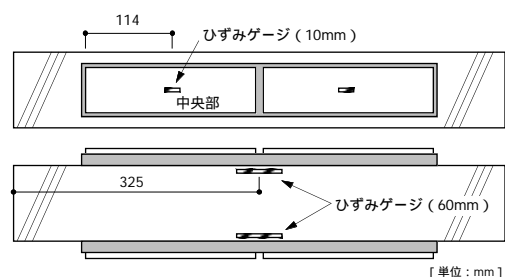


図-5 ひずみゲージの貼り付け位置

認められなかったが、10mm程度のモルタル下地を施した方が、安定したひずみ追従性が得られている。

3.3 設計せん断ひずみ差

表-2に示した設計と条件およびタイル張り仕様の組合せにおいて、拘束収縮ひずみ ϵ_c と、年間最大熱膨張ひずみ ϵ_t を算出する。水セメント比60%、スランプ18cm程度の標準的な普通コンクリートの乾燥収縮ひずみの試験結果から求めた(6)式に示す乾燥収縮ひずみ曲線を用いた。壁体拘束率Rは、小笠原の実測データ¹⁰⁾から、0.675を採用した。

$$cc = 854 \{ 1-d / (27.6 + d) \} \quad (6)$$

表-6 ひずみ追従性試験結果一覧

タイル	下地処理	モルタル下地厚(mm)	張付モルタルP/C(%)	ひずみ追従性指標			
				$\epsilon_{bp} (\times 10^{-6})$		$\epsilon_p (\times 10^{-6})$	
				\bar{x}	v		
二丁掛平	超高压水洗净	0	0	0.915	571	76.1	38
		5			683	71.8	48
		3	0	0.898	598	139.5	37
	水洗い	10	0	0.858	702	54.0	62
		0	0	0.915	505	43.7	37
		5			577	42.0	43
二丁掛山形	超高压水洗净	0	0	0.800	540	50.8	91
		5			543	31.9	98
		3	0	0.788	567	58.9	99
	水洗い	10	0	0.740	540	7.8	112
		0	0	0.800	455	59.7	71
		5			415	33.0	72
水洗い	3	0	0.788	386	23.5	73	
	10	0	0.740	492	61.9	82	

注) ϵ_c : ひずみ伝達率、 ϵ_{bp} : 破壊ポイント
 \bar{x} : 平均値、 v : 標準偏差
 ϵ_p : 許容限界相対ひずみ差

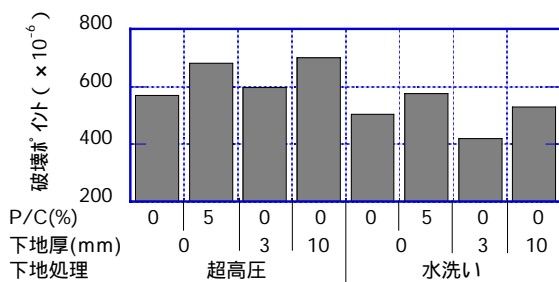


図-6 破壊ポイントの比較(二丁掛・平)

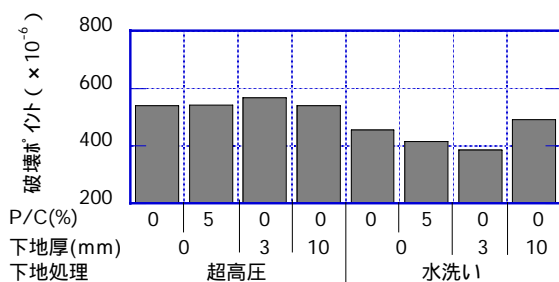


図-7 破壊ポイントの比較(二丁掛・山形)

ここに、 ϵ_c : コンクリートの乾燥収縮ひずみ
 タイルの色調係数は、表-7に示す実測データ¹¹⁾を参考に、8月の日最高気温の平年値からタイル表面温度の実測値が換算できるように、茶褐色系は1.5、白系は1.3とした。また、表-3に示した日最低気温の月別平年値が、タイル張り施工時の最低気温 T_2 を下回る場合には、採暖などの処置をとるものとして、 T_2 を下限とした。タイルの線膨張係数は、タイルによって若干の変動があることが知られているが、ここでは一律 $6.0 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ を採用した。

以上の条件設定により、(3)式から求めた拘束収縮ひずみ ϵ_c の一覧を表-8に、(4)式から求めた年間最大熱膨張ひずみ ϵ_t の一覧を表-9に示す。

3.4 試行結果と考察

表-2に示したタイル張り仕様の中から、表-10に示す7ケースを設定し、試設計を実施した。

ケース1は、竣工後約10年が経過し、タイルの浮き故障が発生した事務所ビルでの検証結果である。

- ・立地：東京都渋谷区
- ・竣工：1992年(平成4年)
- ・外装：せつ器質二丁掛山形タイル 3,562m²

外壁全体の約11%に浮きが発生しており、日照条件の厳しい南面は約20%であった。モルタル下地の施工やタイルの裏足充填性には、特に支障がなく、良好な施工が行われていたが、ひずみ追従性設計手法により合否判定値を算出した結果は0.91となり、許容耐力が設計外力を下回った。浮きの発生状況から判断し

表-7 タイル表面温度の実測データ

測定日時	南面・小口平 ()			日最高気温 ()
	明色	中間色	暗色	
春 1988.5	30	28	33	22.7
夏 1988.8	40	42	45	30.8
秋 1987.10	27	30	34	21.6
冬 1988.1	22	26	29	9.8

表-8 コンクリート躯体の拘束収縮ひずみの一覧

[単位： $\times 10^{-6}$]

項目	コンクリート躯体の養生期間		
	2週間	1カ月	3カ月
拘束収縮ひずみ	180	133	87

表-9 タイルの年間最大熱膨張ひずみの一覧

[単位： $\times 10^{-6}$]

立地	色調	タイル施工月		
		1月	4月	7月
東京	茶褐色系	265	214	142
	白系	227	177	105
熊谷	茶褐色系	272	235	156
	白系	234	197	118

表 - 10 試設計における合否判定値の一覧

項 目		ケース1	ケース2	ケース3	ケース4	ケース5	ケース6	ケース7
設計 と条件	立地	東京						熊谷
	タイル	山形				平		
	色調	茶褐色				白色		
タイル 張り仕様	躯体養生	1ヶ月			2週間	1カ月		
	下地処理工法	水洗い	超高压水洗浄法					
	不陸調整厚さ (mm)	10						
	施工月 (月)	4	7	1	4			
	張付モルタルP/C (%)	0						
合否 判定	許容限界相対ひずみ差 ($\times 10^{-6}$)	82	112	112	112	112	62	62
	設計せん断ひずみ差 ($\times 10^{-6}$)	90	90	72	103	102	44	47
	合否判定値	0.91	1.24	1.56	1.09	1.10	1.41	1.32

て、この検証結果は妥当な値であると判断される。

ケース2は、ケース1の事例において、現状の仕様書で推奨している超高压水洗浄工法を採用した場合である。合否判定値は1.24となり、ケース1の合否判定値からは大きく改善された。茶褐色系の二丁掛山形タイルは、ひずみ追従性の観点から、安全余裕度の少ないタイル張り仕様であり、採用に当たっては注意が必要である。ケース3は、夏季にタイル張り施工した場合で、合否判定値は1.5を上回った。一方、ケース4は、真冬にタイル張り施工した場合で、合否判定値は1.09と低下した。ケース5は、コンクリートの養生が2週間程度しかとれず、タイル張り施工した場合で、ケース4と同様に、合否判定値は1.10と低くなった。このように、茶褐色系の二丁掛山形タイルを使用する場合には、タイル張り仕様や施工法に問題がなくても、コンクリートの養生期間を十分に取れない場合や冬期のタイル張りなどでは、安全余裕度が殆どなくなり、剥離する危険性が高まることから、このような場合にはタイル張り仕様の見直しを検討すべきである。

ケース6は、ケース2と同様の条件で、白色系の二丁掛平タイルを採用した場合で、合否判定値は1.41となり、茶褐色系の二丁掛山形タイルの場合の1.24よりも大きくなり、安全性の高いタイル仕様であるといえる。最後に、ケース7は、熊谷市でタイル張りした場合で、合否判定値は1.32となり、東京23区で施工し

た場合よりも、低くなった。1日の寒暖差が大きい北関東地域は、温暖な南関東地域よりも、タイル張りにおいて条件が厳しい。

以上、試設計の結果から、ひずみ追従性設計手法の有効性は十分に検証され、タイル張りの剥離防止に有用な手法であると考えられる。

§4. まとめ

本研究では、ひずみ追従性試験によりタイル張り仕様のひずみ追従性を評価し、許容耐力を設定し、外装タイル張り仕上げに生じるひずみ差を設計外力として予測し、両者の関係から安全なタイル張り仕様が設計できる外装タイル張り仕上げのひずみ追従性設計手法を提案し、試設計を行ってその有効性を検証した。

本研究で提案したひずみ追従性設計手法は、タイル張りの地域差、タイルの厚み、コンクリート躯体の養生期間、タイル張りの施工時期など、これまでのタイル工事では、あまり検討されていなかったパラメータを取り扱うことにより、設計段階で、問題点の把握および安全なタイル張り仕様の選定、施工段階における、施工上の注意点や管理ポイントの洗い出しなどが可能になり、外装タイル張り仕上げの剥離・剥落防止に役立つものと期待される。

<参考文献>

- 1) 日本建築仕上学会編：外壁仕上げの損傷事例 原因と対策，技術書院，1996.2
- 2) 熊谷：外壁タイル張り仕上げの剥離・剥落性状，施工，pp.44～54，1997.3
- 3) 藤井他：内外壁タイルの剥離防止対策，施工，pp.55～69，1997.3
- 4) 渡部他：日本建築学会構造系論文集，第542号，pp.31～37，2001.4
- 5) 村井他：日本建築仕上学会学術講演会研究発表論文集，pp.241～244，1996
- 6) 名知他：日本建築学会構造系論文集，第563号，pp.15～22，2003.1
- 7) 国立天文台編：理科年表，丸善，2001.11
- 8) 名知他：日本建築仕上学会学術講演会研究発表論文集，pp.99～102，2004.10
- 9) 名知他：日本建築学会技術報告集，第19号，pp.15～18，2004.6
- 10) 小笠原他：日本建築学会大会学術講演梗概集（関東），pp.1051～1052，1996.9
- 11) 熊谷他：清水建設研究報告，第60号，pp.15～27，1994.10