

# 論文 建築物における膨張コンクリートの膨張収縮挙動およびひび割れ抑制効果

崔 亨吉\*1・辻埜 真人\*2・野口 貴文\*3・北垣 亮馬\*4

**要旨:** コンクリートのひび割れ抑制対策として使用されている膨張コンクリートのひび割れ抑制効果の定量評価に向けての知見の蓄積を目的として検討を行った。実建築物の拘束度を同定した結果、拘束度は膨張材による初期膨張や水和に伴う温度上昇時に大きく、温度降下後の初期材齢から小さくなり、ほぼ一定に推移する。また、応力評価の結果、実建築物においても、膨張材を使用することによって圧縮応力が有効に導入され、引張応力を低減できる。さらに材齢 2 年におけるひび割れを評価した結果、膨張コンクリートのひび割れ面積は普通コンクリートの約 35% で、ひび割れ低減効果が確認できた。

**キーワード:** 膨張材, 膨張コンクリート, 乾燥収縮, ひび割れ, 拘束応力, ひび割れ面積

## 1. はじめに

2009 年版の JASS5 において、供用期間が長期・超長期のコンクリートに乾燥収縮ひずみの上限値が規定されるなど鉄筋コンクリート造建築物の収縮ひび割れ抑制に対する要求が高まっている。このような状況のもと、ひび割れの抑制対策に関して使用材料、調合、構造、施工および環境などを考慮した多くの検討がなされている。特に、材料的な面でコンクリートの乾燥収縮や自己収縮によるひび割れの抑制対策として膨張材の適用が増加しているが、建築部材でのひび割れ抑制効果を定量的に評価した例は少ない<sup>1, 2, 3)</sup>。

本報では、膨張材を使用したコンクリートと、膨張材を使用しない普通コンクリートの実建築物の外壁およびスラブの膨張収縮ひずみを測定する機会を得たので、測定ひずみに基づく応力の評価および長期材齢におけるひび割れ調査を行い、膨張材の効果を検証した。

## 2. 適用コンクリートの基本特性

### 2.1 使用材料および調合

コンクリートの使用材料を表-1 に示し、調合を表-2 に示す。実験は、エトリンサイト・石灰複合系（標準使用量 20kg/m<sup>3</sup>）の膨張材を標準使用量混入した呼び強度 39 の膨張コンクリートと膨張材を使用しない呼び強度

36 の普通コンクリートの 2 種類とした。細骨材は山砂および石灰岩砕砂を 65 : 35 の割合で混合使用した。一方、粗骨材は石灰岩碎石を全量使用した。化学混和剤は高性能 AE 減水剤を使用した。

### 2.2 試験方法

実建築物への適用に先立ち、実機プラントを利用して、フレッシュ性状、圧縮強度、乾燥収縮率および自己収縮率の基本特性の把握のための実験を行った。

圧縮強度試験用の試験体は、材齢 1 日で脱型した直後に水中養生（20±2℃）を行い、材齢 7 日および 28 日において圧縮強度試験を行った。乾燥収縮率は、JIS A 1129-2 附属書 A に準拠し、所定の材齢において測定を行った。

自己収縮率測定用の試験体は、100\*100\*400mm の型枠

表-1 使用材料

材料	種類
セメント	普通ポルトランドセメント, 密度: 3.16g/cm <sup>3</sup>
細骨材	山砂, 表乾密度: 2.60g/cm <sup>3</sup> , 吸水率: 2.18%
	石灰岩砕砂, 表乾密度: 2.66g/cm <sup>3</sup> , 吸水率: 1.06%
粗骨材	石灰岩碎石, 表乾密度: 2.71g/cm <sup>3</sup> , 吸水率: 0.55%
膨張材	複合系, 密度: 3.05g/cm <sup>3</sup> , 標準使用量: 20kg/m <sup>3</sup>
混和剤	高性能 AE 減水剤 (ポリカルボン酸エーテル系)

表-2 コンクリートの調合

水準	呼び強度	W/B (%)	スラブ厚 (cm)	空気量 (%)	細骨材率 (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )					混和剤 (B×%)	
						水	セメント	膨張材	細骨材 (山砂)	細骨材 (石灰)		粗骨材 (石灰)
膨張コン	39	41.5	21	4.5	48.0	170	390	20	533	293	921	1.15
普通コン	36	45.5	±2.0	±1.5	49.5	170	374	0	556	309	910	1.15

\*1 東京大学 大学院工学系研究科 建築学専攻 工修 (正会員)

\*2 清水建設株式会社 技術研究所 生産技術センター 博士 (工学) (正会員)

\*3 東京大学 大学院工学系研究科 建築学専攻 准教授 博士 (工学) (正会員)

\*4 東京大学 大学院工学系研究科 建築学専攻 講師 博士 (工学) (正会員)

表-3 フレッシュ性状および圧縮強度

水準	フレッシュ性状			圧縮強度(標準養生)	
	スランブ(cm)	空気量(%)	温度(°C)	7日(N/mm <sup>2</sup> )	28日(N/mm <sup>2</sup> )
膨張コン	22.0	5.2	31.5	42.0	53.9
普通コン	22.5	4.4	30.5	36.7	51.3

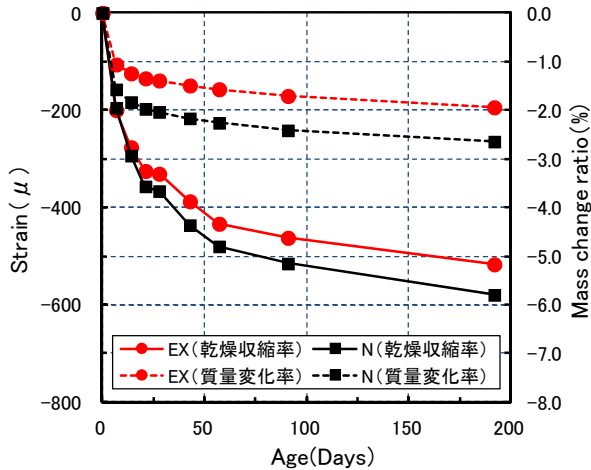


図-1 乾燥収縮率および質量変化率

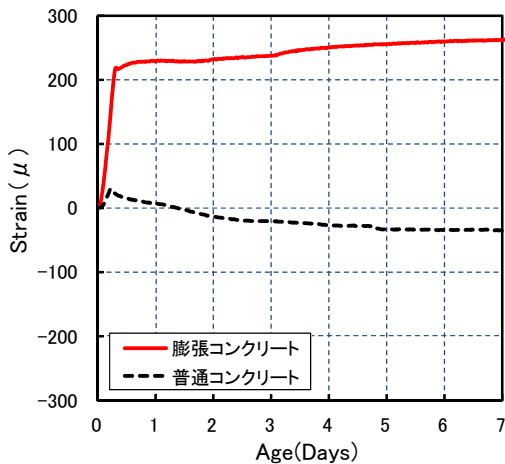


図-2 自己収縮率

を利用して、内側にテフロンシートおよびビニールシートを設け、拘束や乾燥による水分の逸散が生じないように作製した。材齢1日で脱型し、アルミテープによって全面をシールして、埋込型ひずみ計によって測定した。自己収縮の測定開始点は、埋込型ひずみ計の代わりにひずみゲージを貼りつけたD6(長さ:340mm)の鉄筋を中央に配置した試験体を作製し、鉄筋のひずみが単調に変化し始めた時を測定開始点とした。

### 2.3 実験結果および考察

適用したコンクリートのフレッシュ性状および圧縮強度の平均値を表-3に示す。各特性とも要求性能を満足している。乾燥期間26週までの乾燥収縮率および質量変化率の結果を図-1に示す。普通コンクリートにお

ける材齢26週までの乾燥収縮率は580μとなり、日本建築学会「鉄筋コンクリート造建築物の収縮ひび割れ制御設計・施工指針(案)・同解説」<sup>4)</sup>における「高級仕様」のコンクリートに相当する。一方、膨張コンクリートの乾燥収縮率は520μとなり、普通コンクリートに比べて、60μ程度小さく、初期の膨張効果による乾燥収縮率の低減効果150μ<sup>3)</sup>を加味すると、「特級仕様」に相当すると考えられる。また、乾燥材齢26週における質量変化率は、膨張コンクリートの方が0.5%程度小さくなった。この傾向は初期材齢から認められ、主として膨張コンクリートの水結合材比が低いことに起因しているものと考えられる。

自己収縮率試験の結果を図-2に示す。鉄筋のひずみが単調に変化しはじめた測定開始点は、注水から4時間(打込みから3時間)が経過した時であった。膨張コンクリートは、測定開始からの材齢7日で260μの膨張ひずみが確認できた。測定開始からの材齢0.3日の時点で、220μ程度の膨張ひずみ量が生じており、練り上がり温度が高く、膨張材の反応が早期に進んだことが原因と考えられる。一方、普通コンクリートも鉄筋のひずみが単調に変化しはじめた測定開始点は、注水から4時間(打込みから3時間)が経過した時であった。よって、膨張コンクリートと普通コンクリートの凝結時間には大きな差はなかったと考えられる。普通コンクリートの材齢7日における自己収縮ひずみは、36μであった。膨張材により、自己収縮は抑制されていることがわかる。

## 3. 実構造物への適用

### 3.1 測定概要

測定対象は東京都内の地上7階のRC造建築物の3階外壁および4階スラブならびに4階外壁および5階スラブである。1階から4階のスラブまでは膨張コンクリートを、4階の壁より上部には普通コンクリートを適用した。図-3に測定部の平面図および測定器の埋設部分の概要を示す。測定対象の外壁の左右には柱はなく、上下の小梁に挟まれている。また、壁の中央部には誘発目地がある。一方のスラブは、大梁および小梁によって4辺が拘束されている。ひずみ測定は埋込型ひずみ計(標点距離:100mm, 測温機能付き)で行った。実建築物での測定に合わせて、建築物に適用したコンクリートと同一のコンクリートを採取して、外部拘束を受けない自由膨張収縮試験体を作製し、埋込型ひずみ計によって膨張収縮ひずみおよび温度を測定した。なお、自由膨張収縮試験体は構造物と同一時期に脱型し、外壁およびスラブと同様の乾燥状況を模擬するために外壁の場合は両側面以外の4面を、スラブの場合は上面以外の5面をアルミ箔粘着テープでシールした。その後、実部材と同日間散

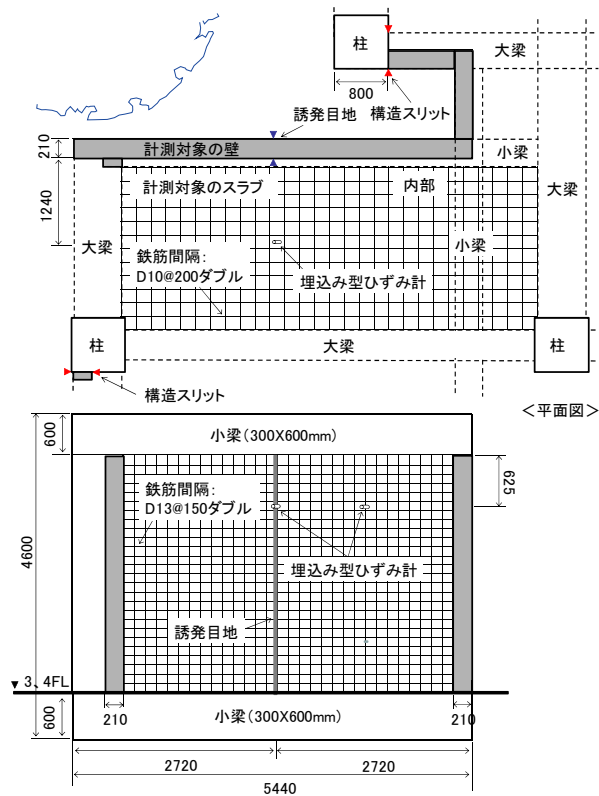


図-3 測定部の平面図および測定器の埋設部分

表-4 打込みおよび養生日程

	水準	打込み日	脱型日	散水養生
膨張コン	3階壁 / 4階スラブ	2010/11/01	2010/11/03	2010/11/08
普通コン	4階壁 / 5階スラブ	2010/11/20	2010/11/24	2010/11/27

水養生を行い、測定を継続した。測定部分の打込み日、脱型日や養生期間を表-4に示す。

### 3.2 測定結果

図-4 から図-6 に自由膨張収縮試験体のひずみ（温度ひずみ除外）および実部材でのひずみ（温度ひずみ除外）を示す。なお、コンクリートの線膨張係数は既往の研究<sup>2)</sup>を参考にして $7.0 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ と一定にした。

自由膨張収縮試験体の打込み材齢180日の時点で、膨張コンクリートは膨張ピーク時から外壁の場合には $210\mu$ 、スラブの場合には $255\mu$ 程度収縮している。一方の普通コンクリートは、外壁の場合には $275\mu$ 、スラブの場合には $310\mu$ 収縮しており、外壁およびスラブにかかわらず膨張コンクリートに比べて普通コンクリートのほうがより収縮しているとみられる。

実部材において水和熱による温度ピークからの温度降下は、外壁の場合には約 $25\sim 30^{\circ}\text{C}$ 、スラブの場合には約 $15\sim 20^{\circ}\text{C}$ であった。普通コンクリートと膨張コンクリートともに外壁の温度変化が大きい傾向が見られる。これは外壁の場合、両面の型枠および周囲の梁に囲まれて水和熱が逃げにくく、初期の温度上昇が大きいことに起

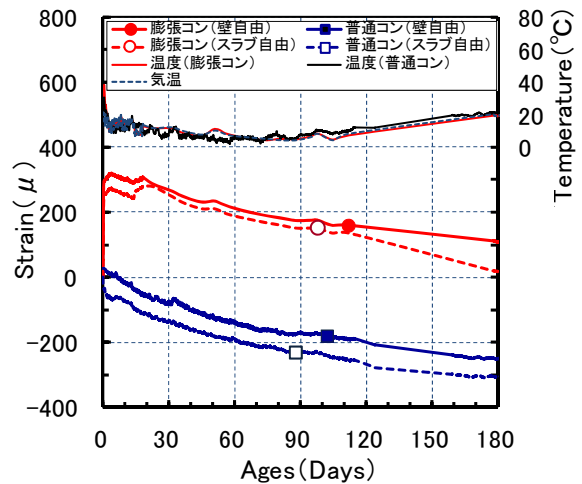


図-4 自由膨張収縮ひずみ

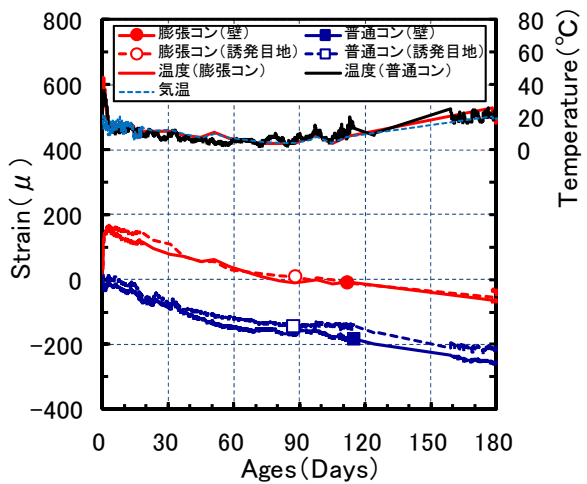


図-5 実部材ひずみ（外壁）

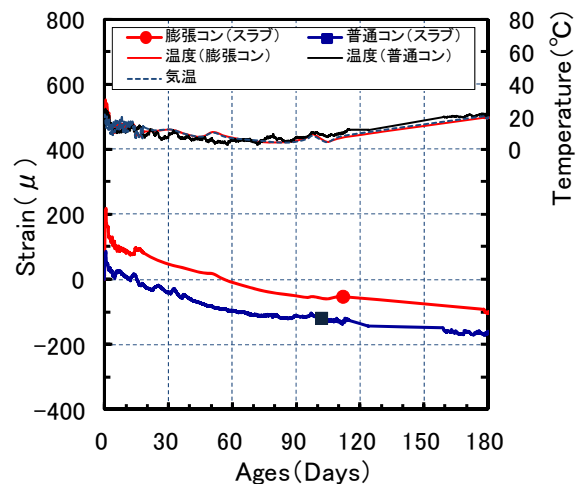


図-6 実部材ひずみ（スラブ）

因している。実部材での膨張コンクリートの最大膨張ひずみは、外壁の場合には $152\mu$ （材齢2.08日）、スラブの場合には $217\mu$ （材齢0.77日）であった。一方、普通コンクリートは、散水養生以後に明確に収縮している。なお、図-5に合わせて示した誘発目地部のひずみは、膨

張コンクリートおよび普通コンクリート共に、一般外壁部のひずみ挙動と大きな差は認められず、材齢 180 日の時点では、ひび割れは発生していないものと考えられる。

### 3.3 各測定部の拘束度および膨張応力の算定

拘束度  $\lambda$  は式(1)によって定義した。計算での入力値である自由膨張収縮ひずみは、部材の温度履歴を与えた自由膨張収縮試験体のひずみであり、拘束膨張収縮ひずみは温度履歴を含んだ部材の実ひずみである。本報では、自由膨張収縮ひずみに拘束度を与えることで実構造物の測定した実ひずみと合致するように、適当な間隔毎に拘束度を同定し、各間隔での平均値を求めた。

$$\lambda = (\varepsilon_f - \varepsilon_r) / \varepsilon_f \quad (1)$$

$\lambda$  : 拘束度

$\varepsilon_f$  : 自由膨張収縮ひずみ

$\varepsilon_r$  : 拘束膨張収縮ひずみ (部材の実ひずみ)

一方、初期膨張ひずみが拘束されることによって導入される圧縮応力は、拘束圧による自由膨張ひずみの低減を考慮した式(2)を利用することによって導出した<sup>6)</sup>。

$$\gamma_\varepsilon = \exp(-\alpha \cdot \sigma_c) \quad (2)$$

$\gamma_\varepsilon$  : 自由膨張ひずみ増分の低減率

$\sigma_c$  : 拘束応力 (N/mm<sup>2</sup>)

$\alpha$  : 拘束応力の低減特性を表す係数 (=1.5)

応力算定には、逐次計算 (step-by-step) 法を利用し、強度やヤング係数の算定には、有効材齢による整理がなされた CEB-FIP の式(3)および式(4)を利用し、 $s$  値は普通強度コンクリートの代表的な値と考えられる 0.3 とした。なお、材齢 28 日のヤング係数は圧縮強度から AIJ 式により求めた。また、応力計算における圧縮強度およびヤング係数は、有効材齢 56 日以降を一定値とした。クリープ係数については、ACI-209 型モデルを採用し、それが若材齢においても整合するように、終局クリープ係数およびクリープ発現速度をヤング係数の関数として改良した式(5)から式(7)を用いた。

$$f(t) = f_{28} \cdot \exp\{s[1 - (28/t)^{0.5}]\} \quad (3)$$

$$E(t) = E_{28} \cdot \exp\{0.5s[1 - (28/t)^{0.5}]\} \quad (4)$$

$f_{28}$  : 材齢 28 日 (標準養生) の圧縮強度 (N/mm<sup>2</sup>)

$E_{28}$  : 材齢 28 日 (標準養生) のヤング係数 (N/mm<sup>2</sup>)

$t$  : 有効材齢 (日)

$$\phi(t, t_0) = \phi_0 \cdot (t - t_0)^{0.6} / [\beta + (t - t_0)^{0.6}] \quad (5)$$

$$\phi_0 = 3 - 1.7 \cdot E(t_0) / E_{28} \quad (6)$$

$$\beta = 0.05 \cdot \exp[5.0 \cdot E(t_0) / E_{28}] \quad (7)$$

$\phi_0$  : 終局クリープ係数

$\beta$  : クリープ発現速度係数

$t_0$  : 載荷材齢 (日)

### 3.4 拘束度および膨張応力計算結果および考察

入力した自由膨張収縮ひずみと部材の実ひずみおよ

び同定した拘束度を図-7 から図-10 に示す。膨張コンクリートでは、凝結からの膨張材による膨張発生時および温度上昇時の拘束度は、外壁において 0.42、スラブにおいて 0.51 であり、温度降下時は大きく拘束度が低下する結果が得られた。さらに、温度が降下した材齢 1.98 日 (外壁) および 1.50 日 (スラブ) 以降も 0.05 と小さな拘束度であった。一方、普通コンクリートでも、水和に伴う温度上昇時の拘束度は、外壁で 0.31、スラブで 0.4 であったが、温度降下時はそれぞれ 0.15、0.2 であり、温度降下後は 0.1 と小さくなった。

全体的に外壁に比べてスラブの拘束度がやや大きい傾向であった。これは、本報で対象とした外壁は柱や基礎スラブのような拘束体の影響が小さい場所であったことに起因しているものと考えられる。長期材齢では、膨張コンクリートに比べて普通コンクリートにおける拘束度はやや大きく、下階の膨張コンクリートの乾燥収縮が小さいことに起因している可能性が考えられる。各測定部分での応力算定の結果を図-11 および図-12 に

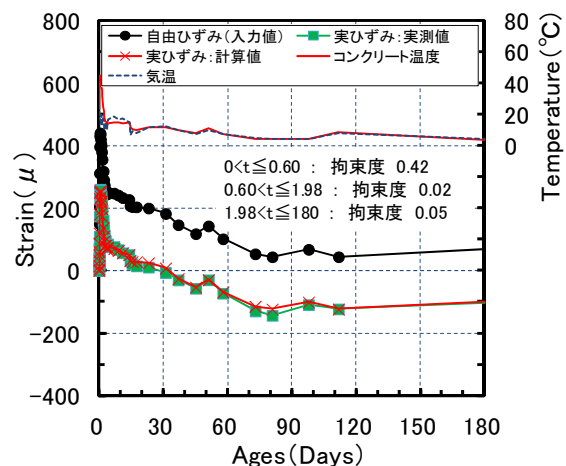


図-7 3F 外壁における実ひずみと計算結果 (膨張コンクリート)

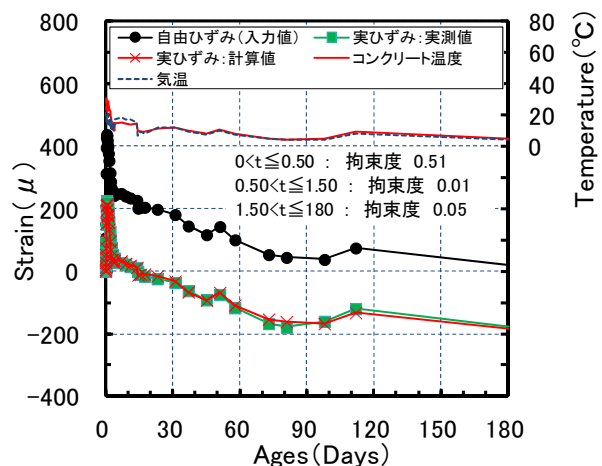


図-8 4F スラブにおける実ひずみと計算結果 (膨張コンクリート)

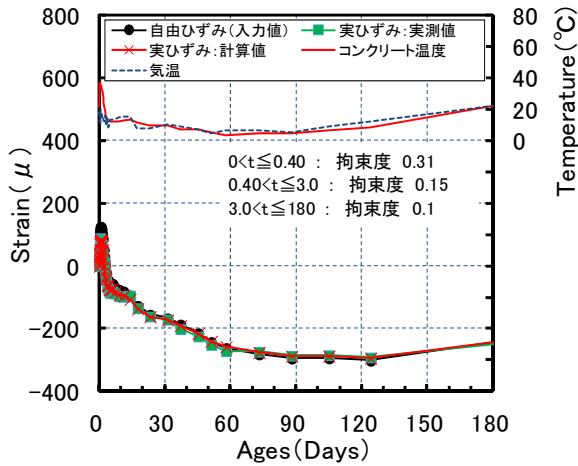


図-9 4F 外壁における実ひずみと計算結果 (普通コンクリート)

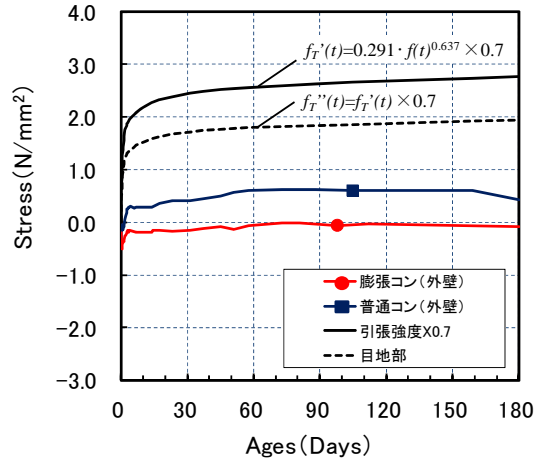


図-11 各測定部分の応力算定結果 (外壁)

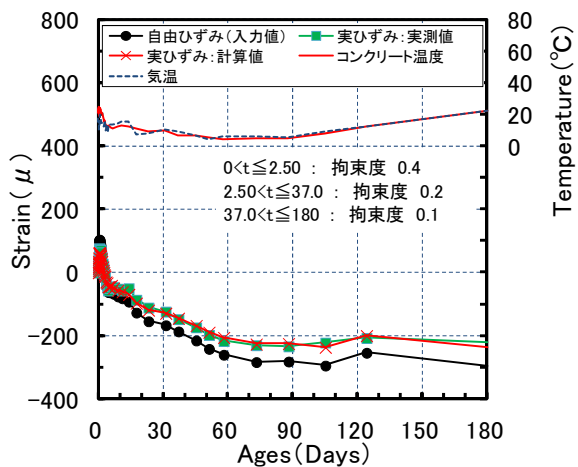


図-10 5F スラブにおける実ひずみと計算結果 (普通コンクリート)

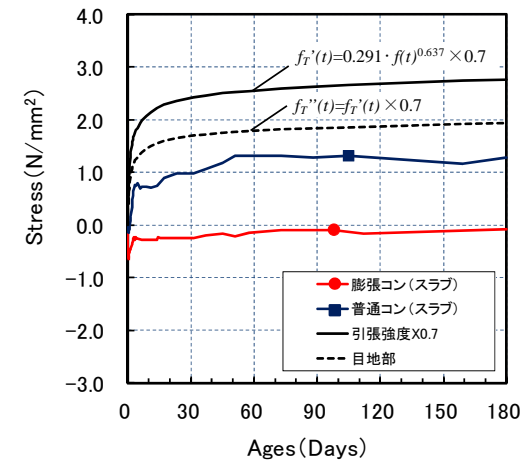


図-12 各測定部分の応力算定結果 (スラブ)

示す。外壁およびスラブにおいて、膨張コンクリートは初期膨張の際に  $0.6\text{N/mm}^2$  程度の圧縮応力が導入され、以後の温度降下および乾燥収縮の進行によって圧縮応力は低下しているが、拘束度が小さいこともあり、材齢180日においても引張応力はほとんど生じていない。

一方、普通コンクリートは水和による温度上昇からの温度降下によって外壁で  $0.6\text{N/mm}^2$ 、スラブで  $1.3\text{N/mm}^2$  程度の引張応力が生じている。よって、膨張材による材齢初期の圧縮応力の導入によって引張応力を低減できている。

図-11 および図-12 には、様々な調査結果からひび割れ発生の目安<sup>3)</sup>となる割裂引張強度の70%の曲線 ( $f_T'(t)$ ) および誘発目地部(断面欠損率30%)を仮定した曲線 ( $f_T''(t)$ ) も示している。本報で対象とした部材の結果では、割裂引張強度の70%の指標を下回っており、ひび割れの発生は抑制できているものと考えられる。特に、膨張コンクリートでは、普通コンクリートに比べて引張応力が低減できていることからひび割れが発生する可能性は低いと考えられる。ただし、応力集中を受ける隅角部などについては、本報の検討で十分に評価でき



写真-1 ひび割れの評価箇所

ていないと考えられ、今後も検討を進める必要があるといえる。

### 3.5 ひび割れ評価

ひび割れの評価場所を写真-1に示す。ひび割れの調査は、3階の膨張コンクリート部の外壁および4階の普通コンクリート部の外壁のAおよびB区域である。なお、図-3で示した測定場所とは異なる場所である。発生したひび割れの長さおよび幅を測定し、評価場所のひび割れ幅と総ひび割れ長さを積算してひび割れ面積を算出した。

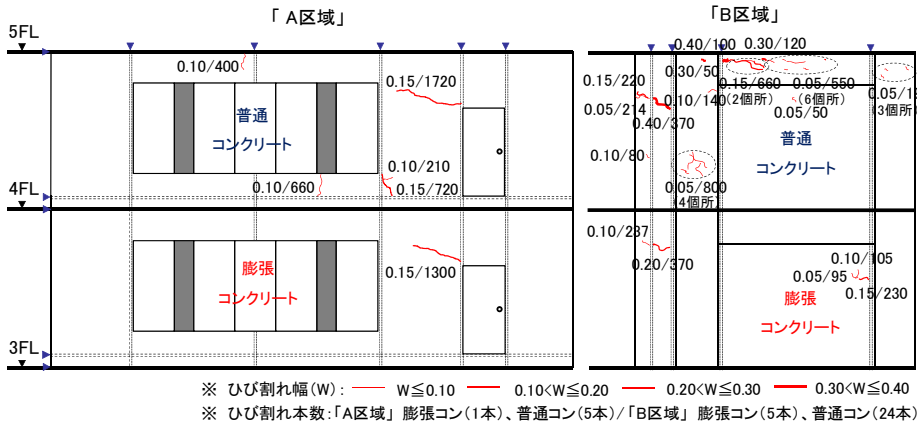


図-13 ひび割れ調査結果 (ひび割れ長さ (mm) / ひび割れ幅 (mm))

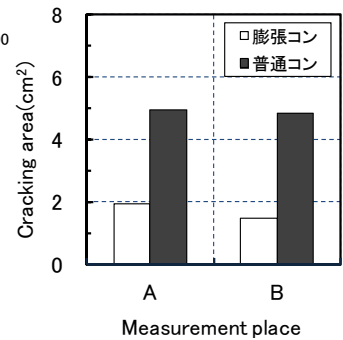


図-14 ひび割れ面積

材齢約2年が経過した時のひび割れ調査結果およびひび割れ面積を図-13および図-14に示す。3.4において算定した応力計算では、ひび割れ発生の目安(割裂引張強度の70% ( $f_t'(t)$ ) に至らなかったが、実際の構造物ではひび割れが発生したことが分かる。特に、隅角部でのひび割れが大きいと判断でき、前述したように応力集中を受けていることが原因と考えられる。

膨張コンクリートではひび割れ幅0.2mmを超過する有害なレベルのひび割れは発生しておらず、0.05~0.20mm程度の比較的小さなひび割れで総6本(A:1本, B:5本)のひび割れであった。一方、普通コンクリートでは最大で0.3mmのひび割れを含む総29本(A:5本, B:24本)のひび割れを確認した。普通コンクリートでは、表面ひび割れとみられる細かなひび割れが多く認められた。発生したひび割れ面積を合算した結果は、普通コンクリートの9.76cm<sup>2</sup>に対して、膨張コンクリートでは約35%のひび割れ面積であり、膨張材のひび割れ抑制効果が確認できた。

以上の結果から、膨張材を使用することによる初期材齢の圧縮応力の導入によって、引張応力の低減およびひび割れ低減効果が実建築物で確認できた。

#### 4. まとめ

本研究では、膨張コンクリートと普通コンクリートの実建築物における膨張収縮ひずみを測定し、測定ひずみに基づく応力の評価および長期材齢におけるひび割れ調査を実施して、膨張材のひび割れ抑制効果を検証した。得られた知見を以下に示す。

- (1) 使用した普通コンクリートの乾燥期間26週における乾燥収縮率は580 $\mu$ で、高級仕様のコンクリートに相当する。一方の膨張コンクリートは500 $\mu$ 以下と考えられ、特級仕様に相当する。
- (2) 拘束度は、膨張材による初期膨張や水和に伴う温度

上昇時に大きく、温度降下後の初期材齢から小さくなり、ほぼ一定に推移する。

- (3) 実建築物においても、膨張材を使用することによって圧縮応力が有効に導入され、引張応力を低減できる。
- (4) 材齢2年におけるひび割れを評価した結果、膨張コンクリートのひび割れ面積は普通コンクリートの約35%で、ひび割れ低減効果が確認できた。

#### 参考文献

- 1) 寺内利恵子ほか：実建築物における膨張コンクリートの評価，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.659-660，2005.9
- 2) 閑田徹志ほか：膨張材と収縮低減剤を用いたコンクリートが床スラブのひび割れ発生リスクに及ぼす影響，日本コンクリート工学会 高性能膨張コンクリートの性能評価とひび割れ制御システムに関する研究委員会報告書，pp.423-426，2011.9
- 3) 唐沢智之ほか：中庸熱ポルトランドセメントを用いた膨張コンクリートの膨張収縮挙動に関する研究(その2 実験結果)，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.657-658，2005.9
- 4) 日本建築学会：「鉄筋コンクリート造建築物の収縮ひび割れ制御設計・施工指針(案)・同解説」，2006.2
- 5) 白石らほか：セメント硬化体の線膨張係数に及ぼすセメント，混和材および骨材の種類の影響，三菱マテリアル(株) セメント研究所 研究報告，No.11，pp.33-40，2010
- 6) 橋田らほか：膨張材を使用したコンクリート造建築物部材のひずみ挙動と発生応力評価に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.33，No.1，pp.557-562，2011.7