

論文 膨張材を使用したコンクリート造建築部材のひずみ挙動と発生応力評価に関する研究

橋田 浩^{*1}・菊地俊文^{*2}・持田泰秀^{*3}・平井吉彦^{*4}

要旨：膨張材を採用してひび割れ低減策を講じたコンクリート造建築物の床スラブおよび外壁の膨張収縮ひずみを計測し、その挙動と計測ひずみに基づく応力評価について検討した。膨張ひずみの拘束による導入圧縮応力は、自由膨張ひずみの拘束圧による低減を考慮した応力計算を実施することで、既往の実験結果と良く合致した。拘束度の高い建築部材では、膨張ひずみによる導入圧縮応力は、水和熱に起因する温度収縮によって相殺されるが、その後の長期的な温度変動や乾燥収縮に対しても、普通コンクリートとの応力差は長期的に残存し、その差は $0.6\sim 0.7\text{N/mm}^2$ と推定された。壁部材は、床スラブに比べ特に温度収縮応力が大きいことも指摘した。

キーワード：膨張材，膨張コンクリート，建築部材，収縮ひび割れ，拘束応力

1. はじめに

近年、コンクリート造建築物の収縮ひび割れ制御に対する要求が高まっており、日本建築学会の収縮ひび割れ制御設計・施工指針や2009年版のJASS 5において乾燥収縮ひずみや許容ひび割れ幅の目標値が新たに示された。このような状況を背景に、収縮補償を目的に膨張材を使用する工事が増加しているが、実部材でのひび割れ抑制効果を生じ応力の観点から定量的に検討した例¹⁾は少ない。本論では、膨張材を採用してひび割れ低減策を講じた実際のコンクリート造建築物の床スラブおよび外壁の膨張収縮ひずみを計測する機会を得たので、その挙動と計測ひずみに基づく応力評価について検討した。

2. 建物および使用コンクリートの概要

2.1 建物概要

計測対象とした建築物は、新潟県で施工中の直方体形のSRC造4階建てであり、長辺（南北面）約90m、短辺（東西面）約35m、高さ約30mの長大建築物である。収縮ひび割れ対策として、膨張材を採用してコンクリートの低収縮化を図るとともに、外壁には誘発目地を設置している。

2.2 使用コンクリート

工事で使用したコンクリートの呼び強度は $30\text{(N/mm}^2)$ であり、使用材料および標準配合を表-1、表-2に示す。粗骨材、細骨材は川砂利、川砂であり、膨張材はエトリンガイト・石灰複合系の低添加型膨張材である。表-2にコンクリートの受入れ検査結果を合わせて示す。コンクリートの打込み時期は、計測対象とした1階床スラブが

ほぼ標準期、4階外壁が夏期に相当している。

事前に実施したコンクリートの乾燥収縮率試験の特性値は約 700×10^{-6} である。また、JIS A 6202の拘束膨張試験による材齢7日の膨張率は 185×10^{-6} であり、標準的な膨張効果を有すると考えられた。ひび割れ制御設計・施工指針を参考にすれば、収縮補償を考慮したコンクリートの乾燥収縮率は、ベースコンクリートの値から 150×10^{-6} を減じた 550×10^{-6} 相当となり、代表的なコンクリートの乾燥収縮率 (800×10^{-6}) に対し3割程度の収縮低減が図られていると判断される。

3. 部材のひずみ計測

3.1 計測方法

本論で計測対象とした部材は、基礎梁上の厚さ200mmの1階床スラブ(打込み2009年10月)および厚さ270mm

表-1 使用材料

セメント	C: 普通ポルトランドセメント (密度 3.16g/cm^3)
水	W: 地下水
膨張材	Ex: エトリンガイト・石灰複合系 (密度 3.10g/cm^3)
細骨材	S: 新潟県長岡市産川砂 (表乾密度 2.60g/cm^3)
粗骨材	G: 新潟県長岡市産川砂利 (表乾密度 2.71g/cm^3)
混和剤	Ad: リグニンスルホン酸系AE減水剤

表-2 標準配合および受入れ検査結果

部材	W/B (%)	単位量 (kg/m^3)					
		W	C	Ex	S	G	
1F床	47.5	153	303	20	728	1141	0.808
	スラブ16cm, 空気量4.5%, Con温度19°C, 28日強度 42.6N/mm^2						
4F外壁	47.5	161	319	20	751	1081	0.848
	スラブ18.5cm, 空気量4.3%, Con温度29°C, 28日強度 39.6N/mm^2						

*1 清水建設 (株) 技術研究所 生産技術センター所長 工博 (正会員)

*2 清水建設 (株) 技術研究所 研究員 工修 (正会員)

*3 国立石川高専 建築学科 教授 工博 (正会員)

*4 電気化学工業 (株) セメント特混事業部 主事 (正会員)

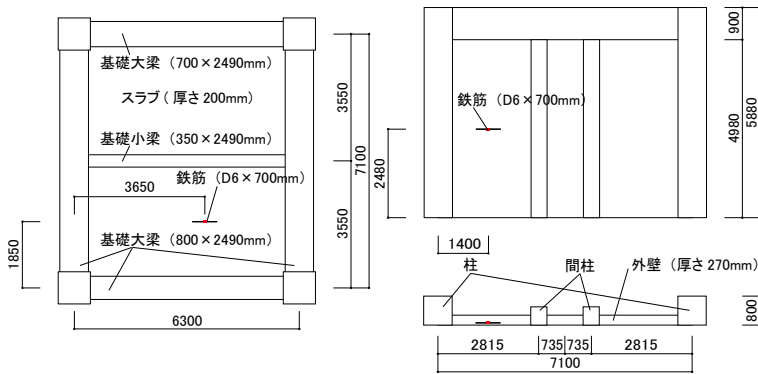


図-1 1階床スラブ（伏図）および4階外壁（軸組・断面図）

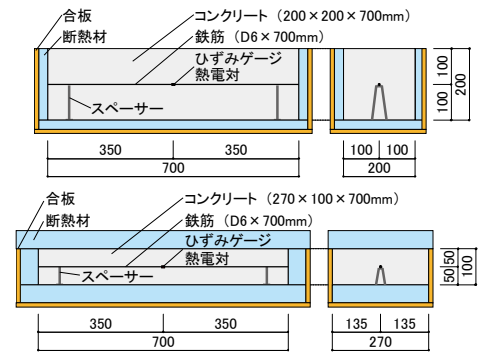


図-2 微拘束試験体（上：スラブ，下：外壁）

の4階外壁（同2010年9月）である（図-1）。1階床スラブ下面は、鋼製デッキ上に25mm厚の断熱材が敷設してある。4階外壁は南面の長辺壁であり、ほぼ中央スパンで床レベルから2.5mの高さ位置を測定箇所としている。使用したひずみ検出器は、自己温度補償型のひずみゲージ付きダミー鉄筋（D6）であり、鉄筋長は定着を考慮して700mmとした。以降の検討におけるひずみ挙動の起点は、拘束応力により鉄筋ひずみが増加し始める時点（有効材齢0.3日頃）とし、以後これを凝結と称する。また、ほぼ自由な膨脹収縮ひずみを計測するために、実部材と同じ厚さを有し、外周は脱型時まで断熱材で囲い、乾燥時は実部材と同等の体積-表面積比（V/S）となるようアルミ箔粘着テープでシールしたコンクリートブロック試験体を用いた。ひずみ検出器は同様にひずみゲ-

ジ付き鉄筋（D6）とし、鉄筋比約0.1%の微拘束状態とした（図-2）。

3.2 計測結果

図-3、図-4に、コンクリートの微拘束膨脹収縮ひずみ（温度ひずみ除外）、実部材ひずみ（温度ひずみ除外）および部材温度の計測結果を示す。ひずみは、鉄筋（ $11.6 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ）とコンクリート（ $10.0 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ と仮定）の線膨脹係数差を考慮して補正してあり、+側を膨張ひずみあるいは収縮拘束によって部材に生じる引張ひずみとして表している。なお、計測は材齢初期には連続的、後期には定期的に行っている。4階外壁は材齢12日までの型枠存置中の結果のみである。

全体的な傾向としては、温度が低下すると部材ひずみが+側に増加し、引張応力が高まることがわかる。特に、

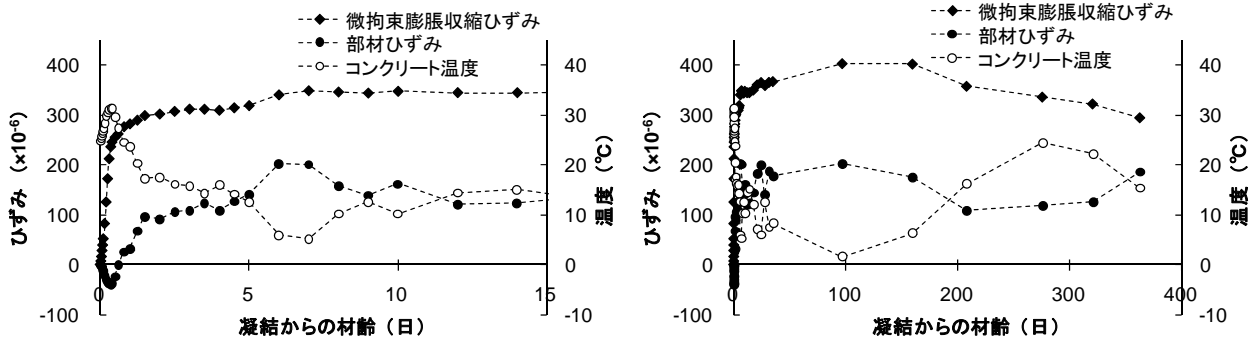


図-3 1階床スラブの計測結果

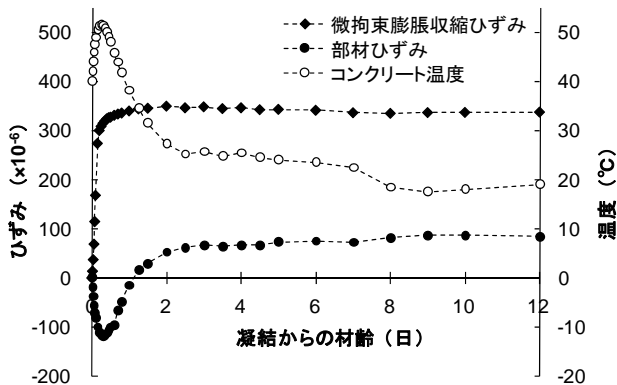


図-4 4階外壁の計測結果

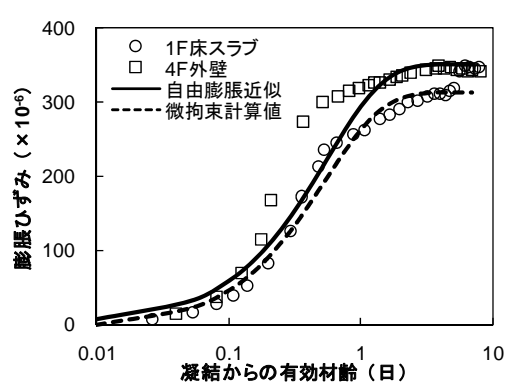


図-5 微拘束膨脹ひずみの比較

1 階床スラブは温度変化に伴う部材ひずみの変動が大き
く、地中で温度変化の小さい基礎梁による拘束が大き
いためと考えられる。一方、4 階外壁の場合、水和熱に起
因する温度膨張/収縮時は部材ひずみの変動が大き
いが、その後の外気温変化に対してはその変動は比較的小
さい。これは主たる拘束体である梁にも類似の温度変化
が生じるためと考えられる。

1 階床スラブは、水和熱による温度ピークから外気温
に平衡するまでの温度降下は 15°C 程度であるが、4 階外
壁の温度降下は 25°C にもなる。これは打込み時期や部材
厚さの影響もあるが、壁の場合、両面が型枠で覆われ、
さらに周囲が仮設材で囲われ、水和熱が籠りやすい状況
にあるためと考えられる。したがって、建築壁部材は薄
い部材ではあるが、水和熱に起因する温度応力が大きい
ことを認識する必要がある。

1 階床スラブの微拘束膨張収縮ひずみはその後、材齢
100 日で 400×10^{-6} まで上昇している。これは、2 階床ス
ラブ未施工のまま降雪期の工事を中断しているため、床
スラブは雨・雪がかり状態であり、吸水による膨張が継
続したためと推定される。材齢半年頃からは明確な乾燥
収縮が生じ始め、材齢 1 年までに 100×10^{-6} 強の収縮ひ
ずみが生じている。

図-5 に 1 階床スラブ、4 階外壁コンクリートの有効材
齢に伴う微拘束膨張ひずみを示す。ここで、有効材齢は
CEB-FIP MC90 式²⁾に基づいている。微拘束膨張ひずみ
は有効材齢 5 日までに $300 \sim 350 \times 10^{-6}$ 生じており、4 階
外壁のコンクリートは 1 階床スラブより養生温度が高
いため、膨張が速く、最大ひずみも若干大きくなったもの
と推察される。

4. 膨張応力評価

拘束状態にある膨張コンクリートの応力評価につ
いては、膨張ひずみが大きい初期材齢において、見かけの(有
効)ヤング係数を低減する³⁾ または大幅にクリープ係数
を増大する⁴⁾、あるいは膨張ひずみそのものを低減する

⁵⁾などの方法が提案されている。ここでは、①膨張ひず
みが大きい初期材齢でクリープ係数あるいは有効ヤ
ング係数を大きく変化させることは、初期材齢の温度応力
を評価するには不合理になる、②膨張ひずみを低減する
考え方は、拘束応力下において、マクロな膨張作用が停
滞し、内部空隙を埋める作用に移行する現象⁶⁾に適合す
ることから、東らが提案している拘束圧に応じて自由膨
張ひずみ増分を低減する方法⁵⁾を採用する。

図-6 および式(1)に、拘束応力下での見かけの自由膨張
ひずみ(以下、有効膨張ひずみと称する)を計算するた
め、本評価で使用した低減率と拘束応力の関係を示す。

$$r_{\varepsilon} = \exp(-1.5\sigma_c) \quad (1)$$

ここに、 r_{ε} : 自由膨張ひずみ増分の低減率

σ_c : 拘束応力 (N/mm²)

これは、式(2)のように最大 350×10^{-6} の自由膨張ひずみ
近似曲線を設定し、図-7 に示す JIS A 6202 の拘束膨張試
験に準じた百瀬らの実測値⁷⁾に適合するように定めたも
のである。

$$\varepsilon_f = 350[1 - \exp(-1.8t)] \times 10^{-6} \quad (2)$$

ここに、 ε_f : 自由膨張ひずみ

t : 凝結からの有効材齢(日)

鉄筋拘束下の応力は、後述する応力計算法によって鉄
筋とコンクリートの釣合い適合条件から算定している。
鉄筋比 0.1%の微拘束状態の計算結果を図-5 に合わせて
示すが、1 階床スラブの微拘束試験体の測定結果とも良
く合致している。

本評価での膨張ひずみ増分の低減率は、東らの低減割
合よりも小さい結果となった。これは、東らが最大自由
膨張ひずみとして養生温度 60°C における 700×10^{-6} を設
定しているのに対し、本評価では温度 20°C における実
測値相当の値である 350×10^{-6} を設定しているためと推
察される。このように、膨張コンクリートは養生温度が
高いほど自由膨張ひずみが大きくなるが、鉄筋比 1%程

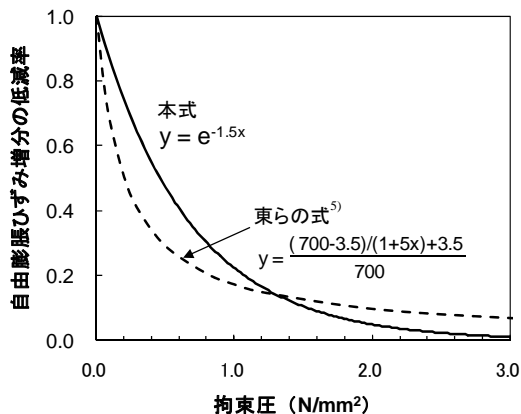


図-6 有効膨張ひずみ計算用の低減率

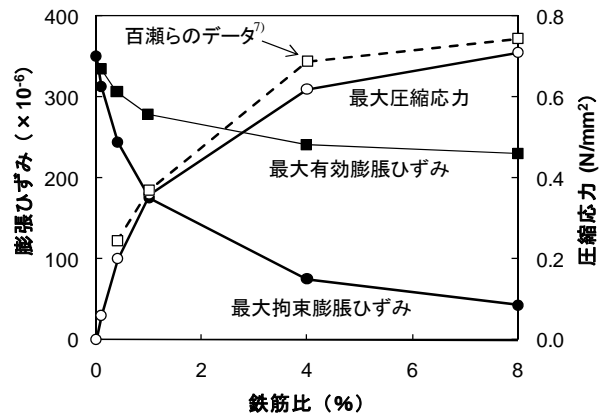


図-7 拘束膨張ひずみと圧縮応力計算例

度以上の拘束を受けると、養生温度に係わらずほぼ同一の拘束膨張ひずみ（拘束応力）となることが知られている⁸⁾。図-7 から鉄筋比 1%は拘束度で 0.5 程度であり、若材齢時の膨張コンクリートが受ける拘束は通常この値以上と考えられる。ここで、拘束度 λ は次式の定義による。

$$\lambda = \frac{\varepsilon_f - \varepsilon_r}{\varepsilon_f} \quad (3)$$

ここに、 ε_f : 自由膨張ひずみ

ε_r : 拘束膨張ひずみ（実ひずみ）

したがって、温度変化を伴う部材の応力評価に際しても、自由膨張ひずみとして養生温度 20°C の値を用い、図-6 の自由膨張ひずみ増分の低減率を考慮することで、有効膨張ひずみおよび応力計算が可能と考えられる。図-7 には、計算された有効膨張ひずみの最大値も合わせて示してある。鉄筋比 4~8%（拘束度 0.8~0.9）の有効膨張ひずみは自由膨張ひずみの 65~70%となっている。

5. 部材の応力評価法

5.1 計算法

本論で対象とする部材は、膨張材による膨張ひずみの他、水和熱による温度ひずみ、気温変動に伴う温度ひずみ、さらに乾燥収縮ひずみ（自己収縮ひずみも含む）が複合されたひずみが生じ、その拘束によって応力が発生する。ここでは、上記のひずみをすべて単純加算して一つの自由ひずみとして扱うが、応力計算に際しては、膨張材による膨張ひずみについてのみ、有効膨張ひずみを使用する。

応力算法としては、乾燥収縮応力⁹⁾、自己収縮応力や水和熱に起因する温度応力¹⁰⁾などで検討実績があり、推定精度が比較的高いとされている逐次計算（step-by-step）法¹¹⁾を用いることとする。

5.2 強度、ヤング係数

圧縮強度およびヤング係数発現は式(4)、式(5)の CEB-FIP 式²⁾でモデル化し、 s 値は普通強度コンクリート

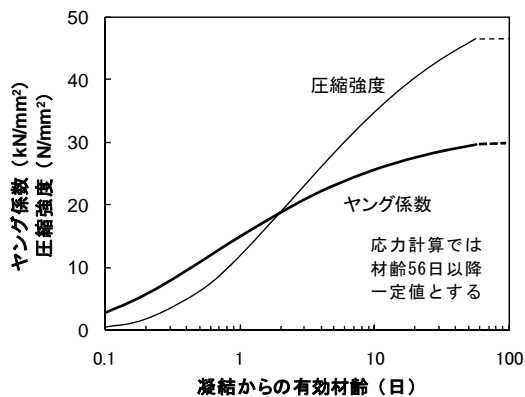


図-8 圧縮強度およびヤング係数

の代表的な値と考えられる 0.3 とする。引張強度は式(6)により定める。

$$f(t) = f_{28} \cdot \exp\left\{s \left[1 - \left(\frac{28}{t}\right)^{0.5}\right]\right\} \quad (4)$$

$$E(t) = E_{28} \cdot \exp\left\{0.5s \left[1 - \left(\frac{28}{t}\right)^{0.5}\right]\right\} \quad (5)$$

$$f_T(t) = 0.291 \cdot f(t)^{0.637} \quad (6)$$

ここに、 f_{28} : 標準養生材齢 28 日の圧縮強度

E_{28} : 標準養生材齢 28 日のヤング係数

t : 凝結からの有効材齢 (日)

なお、材齢 28 日のヤング係数は受入れ検査時の圧縮強度から JASS 5 式により定めた。圧縮強度およびヤング係数発現のモデル曲線を図-8 に示すが、応力計算の入力値であるヤング係数は、圧縮強度に比べ、凝結後から早期に発現するモデルとなる。

5.3 クリープ係数

若材齢時まで考慮したクリープ係数（本論では標準養生材齢 28 日の弾性ひずみに対するクリープひずみの比）のモデル式は ACI 型の式(7)とする¹⁰⁾。終局クリープ係数 ϕ_0 は式(8)、クリープ発現速度に係わる β は式(9)とする。これらは、ヤング係数の関数としている¹⁰⁾。

$$\phi(t, t_0) = \phi_0 \frac{(t-t_0)^{0.6}}{\beta + (t-t_0)^{0.6}} \quad (7)$$

$$\phi_0 = 3 - 1.7 \frac{E(t_0)}{E_{28}} \quad (8)$$

$$\beta = 0.05 \exp\left[5.0 \frac{E(t_0)}{E_{28}}\right] \quad (9)$$

式(8)のヤング係数比と終局クリープ係数の関係を図-9 に示す。CEB-FIP の原式²⁾から求めたヤング係数比と終局クリープ係数の関係および既往の報告¹⁰⁾も同図に示す。入力終局クリープ係数は CEB-FIP モデルとほぼ同

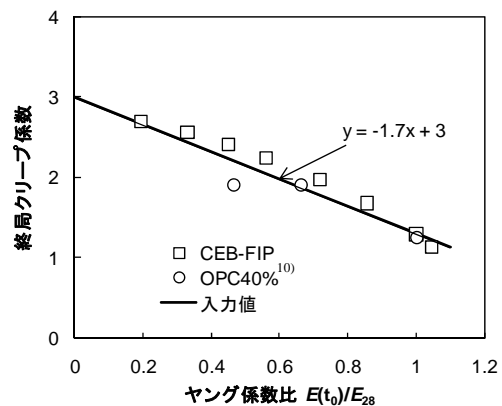


図-9 終局クリープ係数

値となる。一方で、クリープ発現については、CEB-FIP 原式では特に若材齢時の発現速度が過小評価されているため、本モデルの入力クリープ係数は CEB-FIP モデルより大きな値となっている。

5.4 入力自由ひずみと拘束度の同定

計算での入力値である自由ひずみは、有効材齢 5 日までは図-5 の自由膨脹ひずみ近似曲線に実部材の温度ひずみを加算したものであり、有効材齢 5 日以降は自由膨脹ひずみの最大値 (350×10^{-6}) に微拘束試験体の継続ひずみ変化と温度ひずみを加算したものとしている。ここで、コンクリートの線膨脹係数は $10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 一定としている。応力計算に当たっては、まず、部材の計測実ひずみ (全ひずみ) と合致するように適当な期間毎に自由ひずみに与える拘束度 (0~1.0) を同定し、この拘束度を導入した逐次計算で、ステップ毎の応力が算定できる。

6. 計算結果および考察

図-10 に 1 階床スラブの入力自由ひずみと部材の実ひずみ、および同定した拘束度と応力の計算結果を示す。凝結からの膨脹材による膨脹および温度上昇時における拘束度は 0.9 と高く、温度降下時には拘束度は 0.8、材齢経過後でも連続測定期間の材齢 35 日まで拘束度は 0.75 と比較的高い。これは床スラブの日々の温度変動 (ひずみ) に対し基礎梁の温度はほぼ一定のためと考えられる。その後材齢約 1 年までの結果をみると、拘束度は 0~0.9 と大きく変動するが、平均的には材齢初期より低

くなる。また、最低および最高温度のピーク前の時期は拘束度が低く、ピーク後暫くは拘束度が高い傾向が認められる。これらの主要因は、年間を通じての基礎梁の温度変動は床スラブより小さいものの同調し、さらに、両者の温度振幅に位相差があるためと推察されるが、今後の検討課題としたい。

部材の発生応力 (膨脹材有り) については、材齢 6 日~7 日に $1\text{N}/\text{mm}^2$ を超える引張応力が生じているが、これは床スラブの急激な温度低下によってもたらされている。計測期間内では、材齢約 1 年で、部材の温度降下と乾燥収縮の進行により、 $1\text{N}/\text{mm}^2$ を超える引張応力が再び生じる結果となっている。

図中には仮に膨脹材が無い場合の普通コンクリートの計算応力も示している。計算では、拘束度は同定されたものをそのまま使い、膨脹材による膨脹ひずみ成分を除いた自由ひずみを入力値としている。膨脹材の有無で約 $0.7\text{N}/\text{mm}^2$ の応力差が生じ、材齢 6 日~7 日の部材温度低下時に、ひび割れ発生の目安となる $0.7 \times$ 引張強度を超える引張応力が発生している。

図-11 に 4 階外壁の結果を示す。温度上昇時における拘束度はほぼ 1.0 となり、温度降下時は 0.65 となる。初期拘束度が完全拘束に近いのは SRC 造であること、長大外壁の中央スパンであることなどが要因として考えられる。部材温度が外気温に平衡してからの拘束度は 0.25 に低下し、主な拘束体である梁も温度変化に追随するためと考えられる。

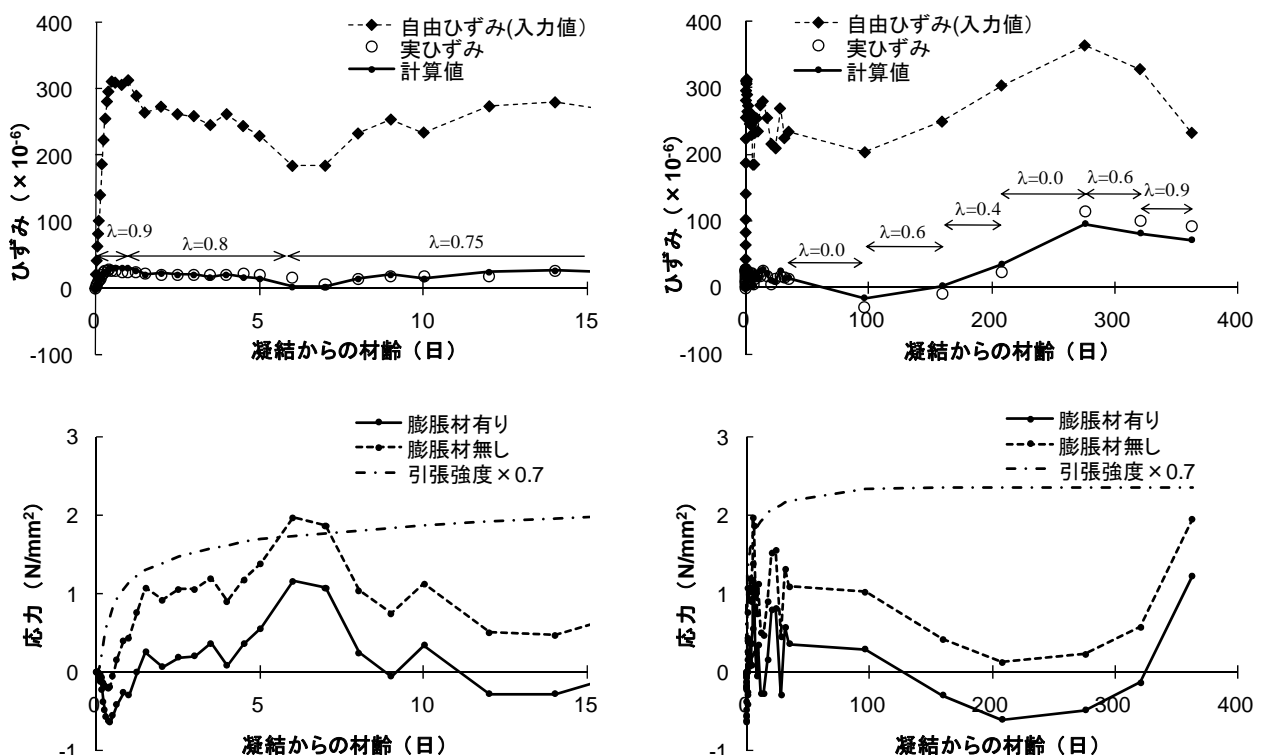


図-10 1階床スラブの実ひずみと応力の計算結果

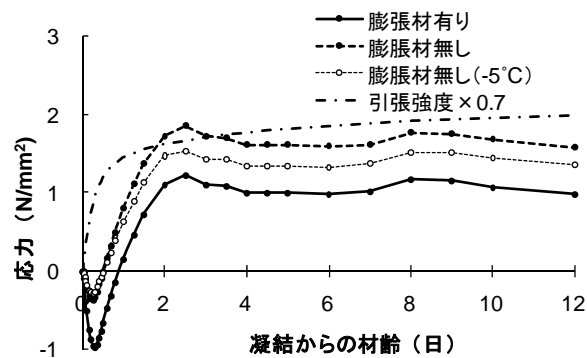
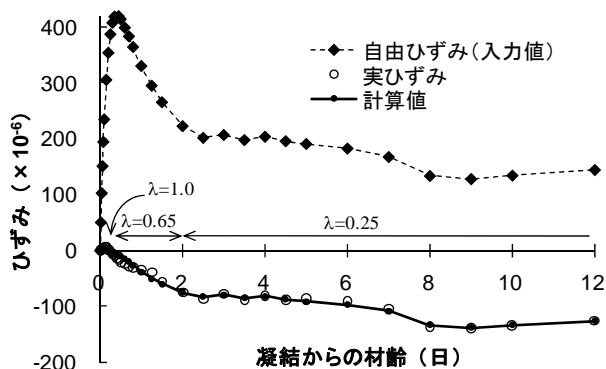


図-11 4階外壁の実ひずみと応力の計算結果

部材の発生応力（膨張材有り）については、温度降下時に引張応力が最大となり、 1N/mm^2 を超えている。これは水和熱に起因する温度収縮応力であり、床スラブに比べかなり大きい。膨張材無しの普通コンクリートの場合、温度降下時にひび割れの目安となる $0.7\times$ 引張強度を超えており、両者の応力差は約 0.6N/mm^2 である。一般的には、膨張材使用により部材温度上昇が若干大きくなるので、仮に普通コンクリートの最高温度が 5°C 低いと仮定した場合には、両者の応力差は約 0.35N/mm^2 に縮まる。

7. まとめ

本研究では、膨張材を使用したコンクリート造建築物の床スラブおよび外壁の膨張収縮ひずみ挙動と応力評価について検討し、以下の知見が得られた。

- (1) 膨張ひずみの拘束による圧縮応力は、自由膨張ひずみの拘束圧による低減を考慮することで、合理的な計算が可能となる。
- (2) 膨張ひずみによって建築部材に導入される圧縮力は、水和熱に起因する温度収縮応力によって相殺されるが、膨張材の有無による $0.6\sim 0.7\text{N/mm}^2$ の応力差はその後の温度変化、乾燥収縮中も継続される。
- (3) 外壁は、床スラブに比べ、水和熱に起因する温度収縮応力が大きい。また、膨張材によって温度上昇量が増加する場合は、膨張材の有無による応力差は縮まる。

参考文献

- 1) 百瀬晴喜, 閑田徹志, 三橋博三: 実構造物における収縮ひび割れ制御設計に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, No.624, pp.157-164, 2008
- 2) Muller, H.S.: New Prediction Models for Creep and Shrinkage of Concrete, Creep and Shrinkage of Concrete: Effect of Materials and Environment, Daye and Fu (eds.), ACI SP-135, pp.1-18, 1992

- 3) 三谷裕二, 谷村 充, 松本健一 他: マス養生温度履歴を受ける膨張コンクリートの応力算定法とその検証, 日本建築学会学術講演梗概集(材料施工), pp.217-218, 2006
- 4) 百瀬晴喜, 閑田徹志, 石田雅利 他: 膨張材及び収縮低減剤を併用したコンクリートのひび割れ抵抗性に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, No.587, pp.7-14, 2005
- 5) 東 邦和, 中村 敏晴, 梅原秀哲 他: 膨張材によるマスコンクリートの収縮低減効果の解析手法と構造物適用, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.2, pp.145-150, 2008
- 6) 山本賢治, 金 尚奎, 坂井悦郎: 膨張材を混和したセメント硬化体の炭酸化における拘束状態の有無の検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.2, pp.169-174, 2001
- 7) 百瀬晴喜, 閑田徹志: 膨張材による収縮低減効果の定量化, 「コンクリートの収縮特性評価およびひび割れへの影響」に関するシンポジウム, 日本コンクリート工学協会, pp.71-76, 2010.12
- 8) 三谷裕二, 谷村 充, 佐久間隆司 他: 膨張コンクリートのマス養生温度履歴を考慮した膨張応力算定法, コンクリート工学年次論文集, Vol.27, No.1, pp.1141-1146, 2005
- 9) 鈴木計夫, 大野義照, 中川隆夫: コンクリートの収縮拘束ひび割れ試験(その1; 収縮応力の算定), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造系, pp.177-178, 1976
- 10) 橋田浩, 山崎庸行: 初期高温履歴を受ける高強度コンクリート構造体の自己収縮応力の算定法に関する検討, 日本建築学会構造系論文集, No.537, pp.7-12, 2000
- 11) Neville, A.M., Dilger, W.H. and Brooks, J.J.: Creep of plain and structural concrete, Construction Press, Longman, pp.246-263, 1983