

論文 アーチ状の開口を有する鉄骨内蔵壁における膨張コンクリートの収縮シミュレーション解析

坂 敏秀^{*1}・閑田 徹志^{*2}・百瀬 晴基^{*3}・依田 和久^{*4}

要旨：膨張コンクリートをアーチ状の開口を有する実大の鉄骨内蔵壁に適用し、その膨張収縮性状の計測を行った。また、普通コンクリートを対象として開発した2次元有限要素法による収縮ひずみ・収縮応力・ひび割れ幅の解析手法に膨張コンクリートのクリープ性状に関する知見を取り入れ、新たに膨張コンクリートにも対応させるとともに、計測を行った試験体に関するシミュレーション解析を実施した。

キーワード：有限要素法，分散ひび割れモデル，膨張コンクリート，クリープ，乾燥収縮

1. はじめに

鉄筋コンクリート造構造物のひび割れに対する関心は近年高まっており、耐久性や機能性に大きな影響を及ぼすひび割れの生じない構造物が期待されている。多数提案されているひび割れ対策技術の中で、乾燥収縮に起因するひび割れ発生膨張材による低減効果は広く知られている。しかしその効果の定量的評価法は確立されたとはいえず、今後の発展が期待されている。

ひび割れの定量的評価のための基礎的な技術として、著者らは2次元の有限要素法を用いた普通コンクリートの乾燥収縮に起因する収縮ひずみ・収縮応力及びひび割れ幅の解析手法¹⁾を開発してきた。本論では、膨張コンクリートのクリープ性状に関する知見を取り入れた解析手法を提案する。また、鉄骨を内蔵したアーチ状の開口を有する比較的複雑な形状の実大壁のひび割れ抵抗性を向上させるために膨張コンクリートを適用し、そのひずみ挙動を計測するとともに、提案する解析手法を用いたシミュレーション解析の結果を示す。

一方向に長い壁や床など主応力方向が一軸に限定される部材を対象としたひび割れの解析手法には、今本らの一軸型増分解法²⁾などがある。

しかし、開口部を有するなどの原因により複雑な応力場となる部材には適用が難しく、有限要素法による解析手法が有用だと考えられる。膨張コンクリートを対象とした有限要素法による解析には Ito らの研究³⁾などがあるものの、普通強度レベルのコンクリートを対象としておらず、また実大部材についての検証には至っていない。

2. 解析手法

2.1 概要

開発した解析手法の概要を以下に示す。

2次元の平面応力要素(膜要素)を用いた有限要素法にて解析を行う。コンクリートは4節点四辺形要素を用い、主応力が引張強度に達すると要素内に分散ひび割れが生じるものとして取り扱う。ひび割れ幅の評価は石田ら¹⁾の提案式に従うものとした。

ひび割れ後の軟化特性については、鉄筋の附着状態を表すことが可能な出雲らの軟化曲線⁴⁾を採用する。ただし、本解析手法では後述の通りヤング係数と引張強度の材齢依存性を考慮するため、ひび割れ後の挙動を表現する履歴則は式(1)、(2)および図-1に示すように、有効材齢 t における引張強度 $f_t(t)$ とヤング係数 $E_c(t)$ で無

*1 鹿島技術研究所 建築解析グループ 研究員 修士(環境学) (正会員)

*2 鹿島技術研究所 建築生産グループ 上席研究員 Ph.D (正会員)

*3 鹿島技術研究所 建築生産グループ 研究員 (正会員)

*4 鹿島技術研究所 建築生産グループ 上席研究員 博士(工学) (正会員)

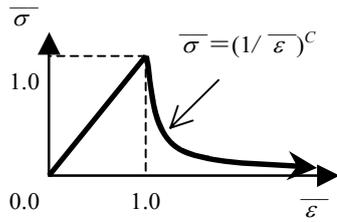


図-1 無次元化したひび割れ後軟化曲線

次元化された応力 $\bar{\sigma}$ とひずみ $\bar{\varepsilon}$ で定義する。

$$\bar{\sigma} = \frac{\sigma_c(t)}{f_t(t)}, \quad \bar{\varepsilon} = \frac{\varepsilon_{c,e}(t)}{\varepsilon_t(t)}, \quad \varepsilon_t(t) = \frac{f_t(t)}{E_c(t)} \quad (1)$$

$$\bar{\sigma} = \left(\frac{1}{\bar{\varepsilon}}\right)^C \quad (1.0 < \bar{\varepsilon}) \quad (2)$$

ここで、 $\sigma_c(t)$ はコンクリート応力、 $\varepsilon_{c,e}(t)$ はコンクリートの応力に寄与するひずみ、 $\varepsilon_t(t)$ は引張強度時のひずみ、 C はひび割れ後の軟化度合いを決めるパラメータである。なお本論では、特に明記しない場合、応力とひずみの符号を引張正・圧縮負とする。

鉄筋は、配筋方向の剛性のみ持ち、せん断剛性を持たない異方性の平面要素を用いた分布鉄筋とした。鉄骨壁は、コンクリートと同様に4節点四辺形要素でモデル化した。分布鉄筋・鉄骨壁とコンクリートは完全付着を仮定した。

2.2 若材齢力学特性・自由ひずみ特性

コンクリートの材齢は、計測したひずみの立ち上がりが確認された時刻を材齢0(日)とし、温度変化と強度発現を統一的に表現可能だとされているCEB-FIP Model Code 1990(以下CEB-FIP)のマチュリティ則⁵⁾を採用する。

乾燥収縮に起因するひび割れの発生はコンクリートの若材齢における力学特性の影響を受けるため、材齢依存性を考慮することとした。ヤング係数と圧縮強度にはCEB-FIP式を橋田らが修正した式⁶⁾を用い、引張強度は圧縮強度に比例した式⁷⁾を用いた。

本論では、脱型前の自由ひずみを膨張ひずみ、脱型後のそれを収縮ひずみと呼ぶことにする。自由ひずみ特性を式(3)、(4)のように表現する。

$$\varepsilon_B(\varepsilon^\infty, a, b, \bar{t}, t) \equiv \varepsilon^\infty \{1 - \exp[a(t - \bar{t})^b]\} \quad (3)$$

$$\varepsilon_f(t) = \begin{cases} \varepsilon_B(\varepsilon_1^\infty, a_1, b_1, 0, t) & (t \leq t_d) \\ \varepsilon_f(t_d) + \varepsilon_B(\varepsilon_2^\infty, a_2, b_2, t_d, t) & (t_d < t) \end{cases} \quad (4)$$

ここで、 t_d はコンクリートの脱型材齢(日)、 ε_i^∞ は $t \rightarrow \infty$ における終局膨張(収縮)ひずみ、 a_i 、 b_i は膨張(収縮)ひずみのパラメータ、添え字1は膨張ひずみに関する項、添え字2は収縮ひずみに関する項である。これらのパラメータは実測された結果を元に同定する。また、式(3)、(4)の表現において、膨張側のひずみは正の値、収縮側のひずみは負の値である。

2.3 クリープ解析

有効材齢 t におけるコンクリートの応力-ひずみ関係は、クリープひずみが重ね合わせの原理に基づくものとして式(5)~(8)のように表せる。

$$\sigma_c(t) = \mathbf{D}_c(t) \varepsilon_{c,e}(t) \quad (5)$$

$$\varepsilon_{c,e}(t) = \varepsilon_c(t) - \varepsilon_{cr}(t) - \varepsilon_f(t) - \varepsilon_T(t) \quad (6)$$

$$\varepsilon_{cr}(t) = \int_{\tau=0}^{\tau=t} \mathbf{J}(t, \tau) d\sigma(\tau) - \mathbf{D}_c(t)^{-1} \sigma_c(t) \quad (7)$$

$$\mathbf{J}(t, \tau) = \mathbf{D}_c(t)^{-1} + \phi(t, \tau) \mathbf{D}_{c28}^{-1} \quad (8)$$

ここで、 $\sigma_c(t)$ はコンクリートの応力、 $\mathbf{D}_c(t)$ 、 \mathbf{D}_{c28} はそれぞれ材齢 t の割線剛性、有効材齢28日の割線剛性、 $\varepsilon_c(t)$ 、 $\varepsilon_{c,e}(t)$ 、 $\varepsilon_{cr}(t)$ 、 $\varepsilon_f(t)$ 、 $\varepsilon_T(t)$ はそれぞれコンクリートの全ひずみ、応力に寄与するひずみ、クリープひずみ、自由ひずみ、温度ひずみ、 $\mathbf{J}(t, \tau)$ 、 $\phi(t, \tau)$ はそれぞれ載荷材齢 τ でのクリープ関数、クリープ係数を表す。

本解析では、式(5)~(8)に示すようなクリープひずみを含む陰な適合条件式となるため、Newton-Raphson法を用いた収束計算を採用したStep-by-Step法に基づく時刻歴応答解析を行う。

2.4 クリープ式

膨張コンクリートのクリープは百瀬らの提案式⁷⁾に従うものとした。クリープは、式(9)に示すように、膨張ひずみが微小な応力で消失してしまうクリープ(以下、膨張クリープ)と、通常のクリープ(以下、載荷クリープ)は別の機構であると仮定し、それぞれを足し合わせた形とした。

$$\phi(t, t_0) = \phi_{EX}^\infty(t_0) \times \beta_{EX}^c(t, t_0) + \phi_{CEB}^\infty(t_0) \times \beta_{CEB}^c(t, t_0) \quad (9)$$

ここで、 t 、 t_0 はそれぞれ材齢、載荷材齢、 $\phi(t, t_0)$ はクリープ係数、 $\phi_{EX}^\infty(t_0)$ 、 $\beta_{EX}^c(t, t_0)$ はそれぞれ、膨張クリープの終局クリープ係数、同速度項、 $\phi_{CEB}^\infty(t_0)$ 、 $\beta_{CEB}^c(t, t_0)$ はそれぞれ載荷クリープの終

局クリープ係数，同速度項を表す。

膨張クリープの支配的要因は，無載荷時のひずみの膨張挙動にあると仮定し，膨張ひずみをクリープ式中に反映させる。膨張クリープの終局クリープ係数と膨張クリープの速度項は式(10)～(12)のように表現される。

$$\phi_{EX}^{\infty}(t_0) = \alpha_1 \cdot \frac{\exp(m_1 \cdot t_0^{m_2})}{|f_c(t_0)|/f_1} \quad (10)$$

$$\beta_{EX}^c(t, t_0) = \frac{\beta_{EX}^c(t) - \beta_{EX}^c(t_0)}{1 - \beta_{EX}^c(t_0)} \quad (11)$$

$$\beta_{EX}^c(t) = 1 - \exp[-m_1 \cdot t^{m_2}] \quad (12)$$

ここで， $f_c(t_0)$ は載荷材齢 t_0 における圧縮強度， f_1 は単位強度1 (MPa)， α_1 は膨張クリープの大きさを決定する係数， m_1 ， m_2 は無載荷時のひずみの膨張挙動を表すパラメータを表しており，式(4)の a_1 ， b_1 にそれぞれ対応する。

載荷クリープには，既存の CEB-FIP 予測式⁵⁾を元に，載荷クリープの進行速度を決定する β_H に JCI 修正式を導入したものをを用いる。載荷クリープの終局クリープ係数と速度項は式(13)～(15)のように表現される。

$$\phi_{CEB}^{\infty}(t_0) = \phi_{RH} \times \beta(f_{cm}) \times \beta(t_0) \quad (13)$$

$$\beta_{CEB}^c(t, t_0) = \left(\frac{(t-t_0)/t_1}{\beta_H + (t-t_0)/t_1} \right)^{0.3} \quad (14)$$

$$\beta_H = 7.49 \times \exp \left[5.30 \frac{f_c(t_0)}{f_c(28)} \right] \quad (15)$$

ここで， ϕ_{RH} ， $\beta(f_{cm})$ ， $\beta(t_0)$ はそれぞれ乾燥クリープの影響の項，圧縮強度の影響の項，載荷材齢 t_0 の影響の項を表す。

表-1 調合表

W/B	s/a	水	セメント	膨張材*1	細骨材	粗骨材	高性能 AE 減水剤	流動化剤*2
(%)	(%)	(kg/m ³)	(%)	(kg/m ³)				
43.5	50.2	175	382	20	863	871	0.8	1.1

*1: 膨張材はセメント量の外割り

*2: 流動化剤は荷受後に添加

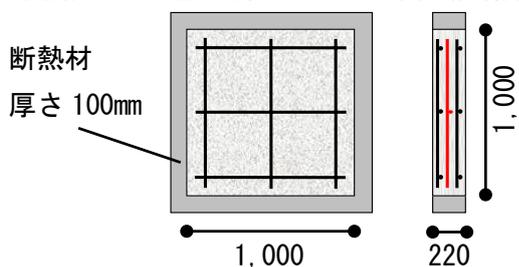


図-2 模擬試験体

3. 収縮ひずみの計測

3.1 使用コンクリート

表-1 に調合表を，表-2 に使用材料を示す。水結合材比は 43.5%，単位水量は 175kg/m³，単位膨張材量は 20kg/m³とした。セメントは中庸熟ポルトランドセメント，膨張材は石灰・エトリンガイト複合系を使用した。また，モックアップ試験体における適切な流動性および充填性を確保するために，流動化剤を添加した。

3.2 試験体概要

(1) 模擬試験体

図-2 に模擬試験体の概要を示す。1,000×1,000×220mm の試験体を作製した。膨張コンクリートは無拘束状態では膨張量にばらつきが出てしまうため，試験体に鉄筋比 0.1%の小さな拘束を導入する事により，膨張量のばらつきを抑えた。配筋量を表-3 に示す。

養生条件はモックアップ試験体と同じとするため，打設直後から封緘養生とし，モックアップの脱型（材齢 7 日，有効材齢 4.23 日）と同時に気乾養生とした。

本試験体では水平・鉛直・45 度の 3 方向のひずみと内部温度を測定した。計測したひずみから温度ひずみを取り除いたものを解析に用いる自由ひずみとした。

(2) モックアップ試験体

モックアップの形状を図-3 に示す。モックア

表-2 使用材料

区分	種類	密度 (g/cm ³)
セメント	中庸熟ポルトランドセメント	3.21
膨張材	石灰・エトリンガイト複合系	3.05
細骨材*1	混合砂 (S1+S2+S3)	2.63
粗骨材	石灰岩碎石	2.67
高性能 AE 減水剤	ポリカルボン酸系	1.05
流動化剤	特殊増粘剤入ポリカルボン酸系	-

*1: 混合砂とし質量混合比S1:S2:S3=20:28:52で用いた。

表-3 模擬試験体配筋量

上端	3-D6
中央*	1-D6
下端	3-D6
鉄筋比 (%)	0.1

* ひずみ計測を兼ねる。

ップは長さ約 10,000mm, 高さ約 5,300mm, 厚さ 220mm の実大壁部材であり, 厚さ 9mm の鉄骨壁が全断面に内蔵されている。鉄骨壁の天端はコンクリートの天端から 575mm の位置にある。鉄骨の端に沿って幅 65mm×厚さ 22mm のリブが設置されている。また, 柱位置でアーチ状開口の一部を備えた面外の支えが施されている。鉄筋は D6@100 のメッシュ筋が鉄骨壁を挟むようにダブルで配筋されている。

計測位置は, 最大応力を示す W1, ひび割れ後挙動追跡のための W2, 主応力方向の不明な W3 の 3 箇所とした。ひずみゲージを表裏両面に貼付した長さ 600mm の D6 鉄筋と温度を測定するための熱電対を計測位置に埋設した。なお, W1 におけるひずみ計は構造上の理由で 3 方向計測が難しいため水平 (X) 方向のみの計測とした。W2, W3 では水平 (X)・鉛直 (Y)・45 度の 3 方向計測を行う。また, 外気温の計測をあわせて行った。

3.3 計測結果

模擬試験体およびモックアップのひずみ計測は材齢 69 日 (有効材齢で 40 日) まで行った。模擬試験体で計測したひずみ (全ひずみ) を温度ひずみと自由ひずみに分離し, 自由ひずみを図-4 に, 同定したパラメータを表-4 に示す。測定した温度を図-5 に示す。

温度ひずみの算出に用いた線膨張係数は, ヤング係数・圧縮強度が安定したと思われる材齢 28 日 (有効材齢 15 日) 以降の各測定点の温度変化によるひずみ変化量から最小二乗法により求めた値を採用した。用いた線膨張係数の値を表-5 に示す。

3.4 コンクリートの力学特性

模擬試験体に打設したコンクリートを用いて $\phi 100 \times 200\text{mm}$ のテストピースを作製し封緘養生とし, 材齢 4, 7, 14, 28 日で圧縮強度試験及びヤング係数試験をそれぞれ 3 体ずつ行った。また, $\phi 150 \times 200\text{mm}$ のテストピースを作製し封緘養生とし, 材齢 4, 7, 14, 28 日で割裂試験を 3 体ずつ行った。試験結果と解析に用いた回帰式

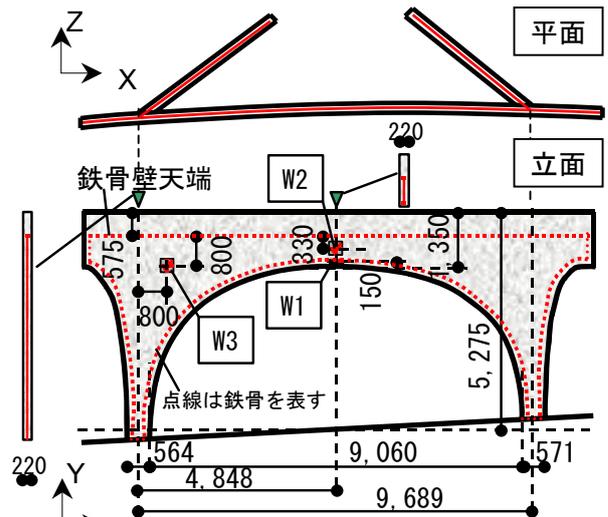


図-3 モックアップ試験体

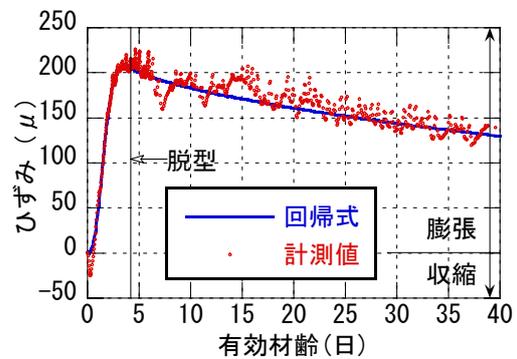


図-4 模擬試験体自由ひずみ

表-4 自由ひずみパラメータ

i	$\varepsilon_i^\infty (\mu)$	a_i	b_i
1	207.03	0.23706	2.5323
2	-475.90	-0.015702	0.67809

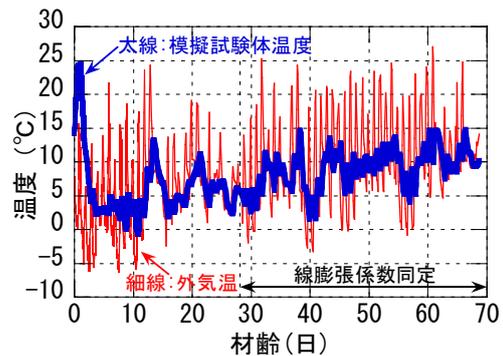


図-5 外気温と模擬試験体温度

表-5 線膨張係数

計測対象	線膨張係数 ($\mu/^\circ\text{C}$)
模擬試験体	11.61
モックアップW1	11.50
モックアップW2	12.06
モックアップW3	12.08

を図-6~8 に示す。ただし, 引張強度は割裂強度の 0.7 倍⁸⁾だと仮定し, 図-8 には割裂試験値の 0.7 倍をプロットした。

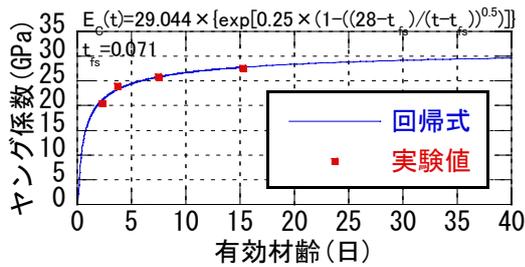


図-6 ヤング係数

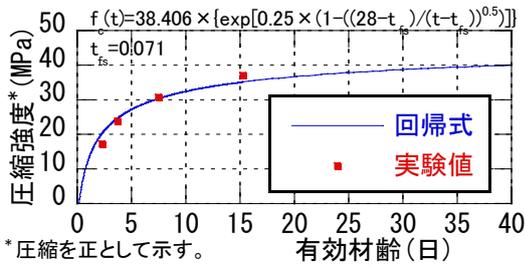


図-7 圧縮強度

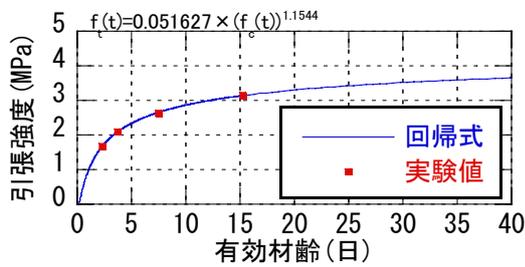


図-8 引張強度

4. モックアップ試験体のシミュレーション解析

4.1 解析モデル

解析に用いたモックアップ試験体の要素分割を図-9に示す。コンクリート製基礎版の水平軸剛性を求め、柱脚内側同士を結ぶ水平バネを配置した。境界条件は、柱脚に鉛直方向の拘束を与えるのみとし、水平方向はフリーとした。その他の部位に拘束は与えていない。本試験体において、収縮応力を生じさせる主たる拘束は内蔵の鉄骨壁とメッシュ筋であると考え、柱に付属する面外の拘束部分および、柱からモデルの外側に片持ち梁として突き出している部分は省略してある。解析ではコンクリート温度 20℃を仮定し、温度ひずみが生じないとした。自重で生じる X 方向のひずみは小さいと考えられるため、解析では自重を無視した。

4.2 計測結果および解析結果

図-10~14にモックアップ試験体における実ひずみの計測結果および解析結果を示す。ただし図示した計測値は、計測した両面のひずみゲ

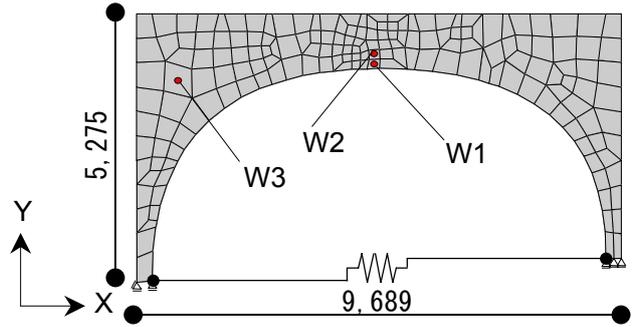


図-9 モックアップ解析モデル

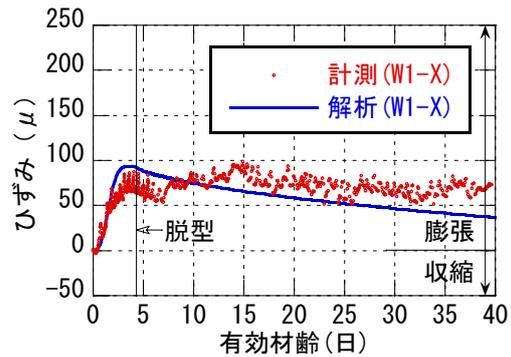


図-10 モックアップ実ひずみ(W1 水平)

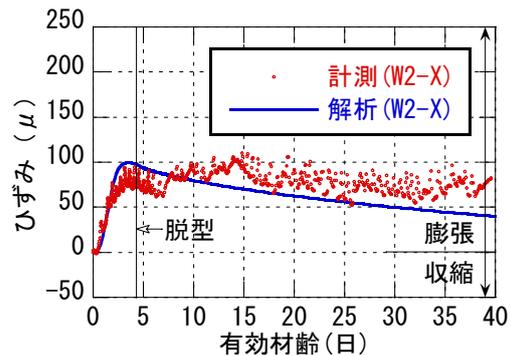


図-11 モックアップ実ひずみ(W2 水平)

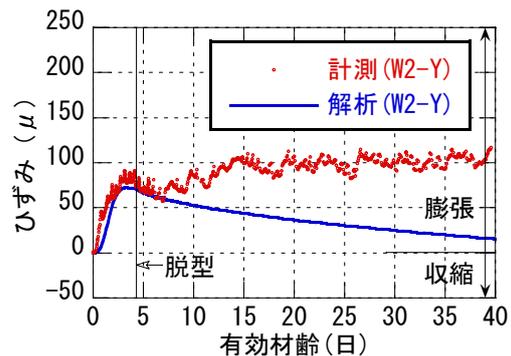


図-12 モックアップ実ひずみ(W2 鉛直)

ージの平均値から表-5に示した線膨張係数を用いて温度ひずみを取り除いたものである。

計測結果は、有効材齢4日(脱型時)まで膨張を続け、15日以後なだらかに収縮している様子が観察される。15日以降のひずみ変動で線膨張係数を同定しているため、4~15日にかけての

計測結果は温度ひずみの誤差が大きいと考えられる。また、線膨張係数一定として温度ひずみを差し引いているため温度ひずみの誤差が大きく、計測結果はいずれも日変化の温度ひずみを取り除ききれていないと考えられる。W2の鉛直方向のひずみに関しては、脱型後も膨張を続けており、計測されたひずみを精査したところ、有効材齢40日時点で表と裏のひずみに約50 μ 程度の差が生じていた。W2鉛直方向の計測には何らかの問題があった可能性が考えられる。

解析結果は観察されたひずみ現象を良好な精度で再現できていると考えられる。有効材齢40日時点で実ひずみは収縮側に達しておらず、コンクリートにひび割れは生じていない。また、解析結果においても同様にひずみが膨張側にとどまり、ひび割れは生じていない。

本解析結果に基づき、別途実躯体壁の収縮予測解析を行い、その結果をひび割れ防止筋の配筋量など実躯体設計の検討に用いた。

5. まとめ

膨張コンクリートを適用したアーチ状の開口を持つ鉄骨内蔵壁およびその模擬試験体の収縮性状の計測結果を報告するとともに、膨張コンクリートの収縮ひずみ・収縮応力およびひび割れ幅を予測する解析手法を提案した。

また、計測したモックアップ試験体を対象にシミュレーション解析を実施し、若材齢の実ひずみに関して解析手法の適用性を確認し、複雑な形状を持つ実大壁に対しても有限要素法を用いた解析手法によりひずみ挙動の追跡が可能なことを確認した。

参考文献

- 1) 石田雅利ほか:分散ひび割れモデルを用いたRC部材の乾燥収縮ひび割れ幅評価法, 日本建築学会構造系論文集, 第610号, pp.41-48, 2006.12
- 2) 今本啓一ほか:収縮ひび割れ制御に関する性能設計について—その1 収縮拘束応力の算

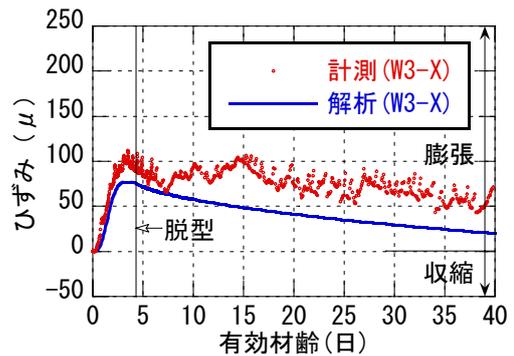


図-13 モックアップ実ひずみ(W3 水平)

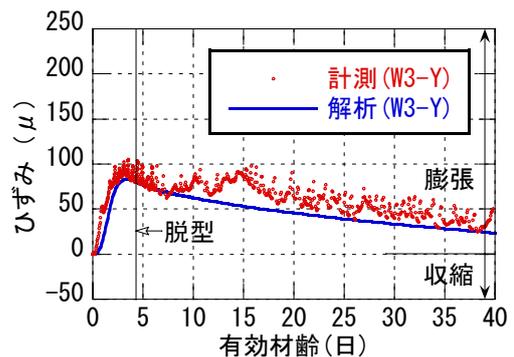


図-14 モックアップ実ひずみ(W3 鉛直)

定式について, 2004年度日本建築学会関東支部研究報告集, pp.41-44, 2004

- 3) Hidetoshi Ito, et al. : Early Age Deformation and Resultant Induced Stress in Expansive High Strength Concrete, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.2, No.2, pp.155-174, June 2004
- 4) 出雲淳一ほか:面内力を受ける鉄筋コンクリート板要素の解析モデル, コンクリート工学, Vol.25, No.9, pp.107-120, 1987.9
- 5) CEB: CEB-FIP Model Code 1990, Thomas Telford, 1993
- 6) 橋田浩ほか:高強度コンクリートを用いた鉄筋コンクリート構造部材の初期ひび割れに関する実験ならびに応力解析, コンクリート工学論文集第10巻, 第1号, pp.51-63, 1999.1
- 7) 百瀬晴基ほか:膨張材を用いたコンクリートのクリープ性状に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第608号, pp.1-7, 2006.10
- 8) 日本建築学会:鉄筋コンクリート構造物の収縮ひび割れ制御設計・施工指針(案)・同解説, p.74, 2006.3