

## 論文

### 高炉セメントを用いた膨張コンクリートの応力算定法

#### Calculation Method of Restrained Stress of Expansive Concrete Using Blast Furnace Slag Cement

兵頭彦次\*, 松本健一\*\*,  
三谷裕二\*\*\*, 谷村充\*\*

HYODO, Hikotsugu\*\*; MATSUMOTO, Kenichi\*\*;  
MITANI, Yuji\*\*\*; TANIMURA, Makoto\*\*

#### 要 旨

著者らは、膨張コンクリートが生じる応力を精度よく解析的に評価することを目的として、温度依存性を考慮した膨張コンクリートの膨張ひずみおよびヤング係数に関する材料特性モデルを構築してきた。本研究では、これまで対象としてきた普通ポルトランドセメントの場合に加え、新たに高炉セメントB種を対象とした材料特性モデルについて検討した。また、本検討で得られた材料特性モデルをFEM温度応力解析プログラムに組み込み、実際の橋脚構造物における温度ひび割れ抑制効果について解析的な検討を行った。解析結果から、本材料特性モデルによってマス養生温度履歴下における膨張コンクリートの効果を適切に評価できる可能性が示された。

キーワード：高炉セメントB種， 膨張コンクリート， 温度依存性， 材料特性モデル，  
応力算定法， 有限要素法， 橋脚構造物

\* 中央研究所 研究開発部 セメント化学チーム Cement Chemistry Team, Research & Development Center

\*\* 中央研究所 研究開発部 コンクリート技術チーム Concrete Technology Team, Research & Development Center

\*\*\* 日本ヒューム株式会社 Nippon Hume Corporation

## ABSTRACT

This study investigates the temperature-dependant material property models for expansive strain and modulus of elasticity of expansive concrete using blast furnace slag cement (type B), while the authors already reported on those using ordinary portland cement. In addition, the effect of expansive concrete on controlling thermal cracking of the pier structure was numerically evaluated using a FEM program, considering the material property models obtained from this study. The results show that the presented material property models are applicable to calculate the restrained stress history of expansive concrete with mass curing temperature history.

**Keywords :** *Blast furnace slag cement type B, Expansive concrete, Temperature dependence, Material property model, Calculation method of restrained stress, Finite element method, Pier structure*

## 1. はじめに

膨張コンクリートは、膨張材の水和反応によって体積膨張を生じ、主に構造物のひび割れ対策に用いられている。その適用は、壁状構造物やスラブ構造物、マスコンクリート構造物など多岐にわたるが、ひび割れ抑制効果は構造物の種類や環境条件によってそれぞれ異なる。そのため、膨張コンクリートによって断面内に生じる応力を適切に評価する手法を確立することは、合理的なひび割れ制御を行ううえで重要である。最近では、解析技術の向上にともない、膨張コンクリートのひび割れ抑制効果を解析的に評価する研究が行われている<sup>1)~4)</sup>。しかし現状では、各種方法論の提案がなされている段階といえ、評価手法の一般化を進めていくうえでは、解析精度の向上や適用範囲の拡張が課題であると考えられる。

このようななか、著者ら<sup>5)6)</sup>は、膨張コンクリートの材料特性が温度に依存することに着目し、これをモデル化することで解析精度の向上を試みてきた。同検討では、材料特性モデルに加え膨張応力算定法を提示し、任意の温度履歴下で生じる膨張コンクリートの応力を精度よく再現できることを示した。しかし材料特性モデルの対象は、普通ポルトランドセメントを用いた場合に限られていた。最近では、高炉セメントと膨張材を組み合わせて用いる事例が増えており、ここでは、高炉セメントを用いた場合の

材料特性モデルについて検討を行うこととした。

本報告では、まず、これまでの知見として膨張コンクリートの応力算定法および普通ポルトランドセメントを用いた場合の材料特性モデルについて概要を示す。次に、温度条件を変化させた一軸拘束試験を実施し、新たに高炉セメントB種の材料特性モデルを構築する。さらに、この材料特性モデルをFEM温度応力解析プログラムに組み込み、実際の橋脚構造物での温度ひび割れ抑制効果を解析的に評価した結果を示す。

## 2. 膨張コンクリートの応力算定法

## 2.1 膨張応力算定法の概要

Fig. 1に、膨張応力算定法の概要図を示す。本手法の特徴の一つは、断面内の温度履歴に応じた膨張ひずみをそれぞれの位置に与える点にある。これによって、例えば水和発熱の進行速度の相違によって生じる断面内の温度差や外気温等の環境の変化を反映することができ、膨張コンクリートの効果を評価するうえで、精度向上に繋がると考えられる。同手法を成立させるためには、任意の温度履歴に対して適切な膨張ひずみを与えることができる材料特性モデルが必要となる。もう一つの特徴は、応力算定時に膨張コンクリート独自のヤング係数モデルを適用することである。膨張ひずみは、力学特性が著しく変化する若材齢時から生じる。そのため、コンクリ

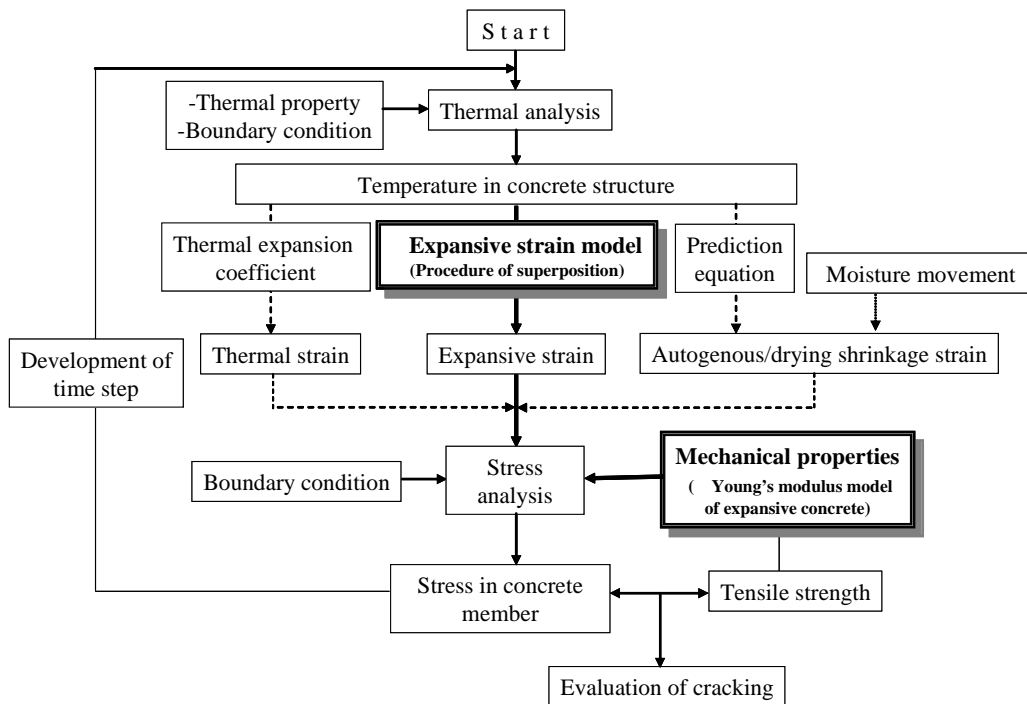


Fig. 1 Outline of the calculation method of restrained stress of expansive concrete under temperature history (温度履歴を考慮した膨張コンクリートの応力算定法の概要)

ート断面内に生じる膨張応力を適切に算定するためには、ごく初期材齢からの力学特性、すなわちヤング係数の発現やクリープの影響を考慮した材料特性モデルの構築が不可欠となる。

2.2 普通セメントの材料特性モデル

材料特性モデルは、温度条件および鋼材比を変化させた一軸拘束試験を行い、鋼材比と鋼材ひずみの関係から算出する。式(1)に普通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ひずみモデルを示す。なおここでいう膨張ひずみは、応力算定を行うために一軸拘束試験から算出した仮想の物性値であり、無拘束条件下の自由膨張ひずみと区別するために「見かけの膨張ひずみ」と定義する。また材齢には、積算温度方式による有効材齢を表わす式(2)を用いる。

$$\begin{aligned} \varepsilon_{cfa}(T, t_e) &= \varepsilon_{cfa\infty}(T) \left[ 1 - \exp\{-\alpha(T)(t_e - t_{e0})^{\beta(T)}\} \right] \\ \varepsilon_{cfa\infty}(T) &= 262 \exp(0.03T) \\ \alpha(T) &= 0.48 \exp(0.08T) \\ \beta(T) &= 0.01T + 1.22 \end{aligned} \dots (1)$$

ここに、 $\varepsilon_{cfa}(T, t_e)$ ,  $\varepsilon_{cfa}(T)$  : 見かけの膨張ひずみおよびその最大値 ( $\times 10^{-6}$ ),  $\alpha(T)$ ,  $\beta(T)$  : 実験定数,  $t_e$  : 積算温度方式に基づく有効材齢(日),  $t_{e0}$  : 凝結始発時の有効材齢 (=0.2日),  $T$  : 温度 ( )

$$t_e = \sum (T_i + 10) \cdot \Delta t_i / 30 \dots (2)$$

ここに、 $t_i$  : 温度が  $T_i$  ( ) である期間 (日)

膨張ひずみモデルの各実験定数は、温度条件に応じて定まる。したがって、同モデル式によって各種一定温度条件下における見かけの膨張ひずみの発現性を表現することができる。また、時間の経過とともに温度が変化する場合については、膨張ひずみの重ね合わせが成り立つと仮定した時間硬化則を適用し、その発現を高い精度で推定できることを確認している (Fig. 2)。

式(3)に、ヤング係数モデルを示す。同モデル式は、有効材齢2日を境界とした2つの式から構成されている。境界となる材齢は、膨張ひずみの発現がほぼ収束する時期に相当する。また、ここでいうヤング係数は、クリープ等の影響をあらかじめ含んだ

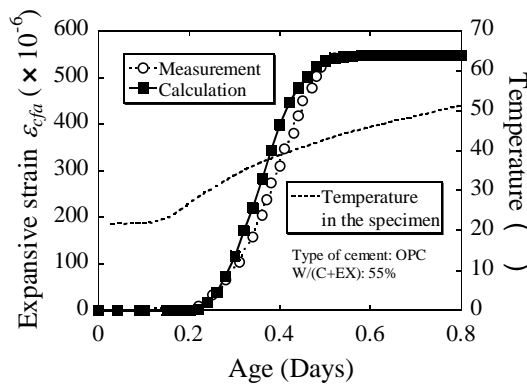


Fig. 2 Comparison between measured and calculated values for expansive strain  $\varepsilon_{cfa}$  under temperature history (温度履歴下での見かけの防張ひずみの実測値と推定値の比較)

ものであり、コンクリートの一般的な材料物性値である静ヤング係数と区別するために「見かけのヤング係数」と定義する。

$$\begin{aligned}
 & t_e \leq 2 \\
 & E_{ca}(t_e) = 3.23 \left[ 1 - \exp\{-3.64(t_e - 0.2)^{0.7}\} \right] \dots (3) \\
 & t_e > 2 \\
 & E_{ca}(t_e) = \{(t_e - 2)/(0.09 + 0.04(t_e - 2))\} + 3.23
 \end{aligned}$$

ここに、 $E_{ca}(t_e)$ ：見かけのヤング係数 (kN/mm<sup>2</sup>)

式(3)で定式化されたヤング係数モデルの妥当性については、インバー鋼(ヤング係数： $140 \times 10^3$  N/mm<sup>2</sup>、熱膨張係数： $0.5 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ )を用いた一軸拘束試験(供試体寸法：100×100×800mm)によって検証している。Fig. 3に、マスコンクリートと同様の温度履歴を膨張コンクリートに与えた場合の発生応力について、実測値と推定値の比較を示す。インバー鋼は、熱膨張係数が通常の鋼材の約1/20と非常に小さいため、実測値は、温度ひずみ、膨張ひずみ、自己収縮ひずみに起因して生じる応力の総和とみなせる。同図より、推定値は鋼材比(拘束度)にかかわらず実測値を高い精度で再現できることがわかる。

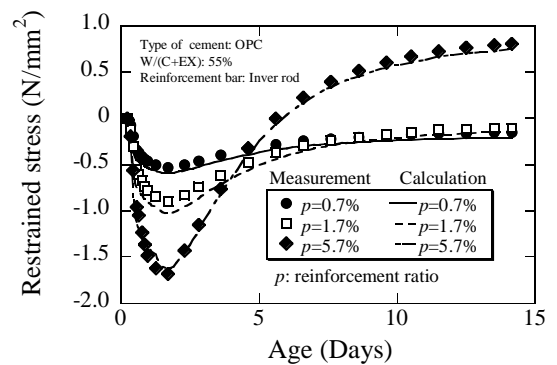


Fig. 3 Comparison between measured values and calculated values for restrained stress in concrete cross-section (コンクリートの発生応力の実測値と推定値の比較)

### 3. 高炉セメントの材料特性モデルの構築

#### 3.1 実験概要

##### (1) 使用材料

Table 1に使用材料とその物理的性質を示す。セメントは普通ポルトランドセメントを、高炉スラグは標準的な粉末度の市販品を用いた。膨張材には市販の低添加型石灰系膨張材を用いた。細骨材および粗骨材には、それぞれ静岡県河東産山砂、茨城県岩瀬産砂岩碎石を用いた。減水剤には、ポリカルボン酸系の高性能AE減水剤を用いた。

##### (2) コンクリートの配(調)合

Table 2に、試験に用いた膨張コンクリートの配(調)合を示す。単位水量は175kg/m<sup>3</sup>、水結合材比は55%とした。高炉スラグの置換率は、セメント質量に対し内割りで42%とし、高炉セメントB種の範囲とした。膨張材の添加量は、収縮補償用としての標準量である20kg/m<sup>3</sup>とした。目標スランプおよび空気量は、 $15 \pm 2.5$ cm、 $4.5 \pm 1.5$ %の範囲とし、それぞれ高性能AE減水剤、空気量調整剤で適宜調整した。

##### (3) 実験方法

Fig. 4に、一軸拘束供試体の概要を示す。一軸拘束試験は、JIS A 6202「コンクリート用膨張材」附属書2(膨張コンクリートの拘束膨張および収縮試験方法)を参考とし、拘束棒の断面積を変化させることで5種類の鋼材比を設定した。鋼材比は0.2%、0.5%、1.0%、1.5%、4.0%とした。拘束棒には、鋼材

Table 1 Materials of concrete(使用材料)

aterial	Symbol	Kind / Characteristics
Cement	C	Ordinary portland cement / Density: 3.16g/cm <sup>3</sup> , Specific surface area: 3300cm <sup>2</sup> /g
Blast furnace slag	BS	Blast furnace slag / Density: 2.90g/cm <sup>3</sup> , Specific surface area: 4180cm <sup>2</sup> /g
Expansive admixture	EX	Lime-based / Density: 3.14g/cm <sup>3</sup>
Fine aggregate	S	Mountain sand / Density: 2.59g/cm <sup>3</sup> , Absorption: 1.63%, F.M.: 2.84
Coarse aggregate	G	Crushed sand stone / Maximum size: 20mm Density: 2.64g/cm <sup>3</sup> , Absorption: 0.84%, F.M.: 6.61
Superplasticizer	SP	Polycarboxylic acid based AE

Table 2 Mix proportions of expansive concrete (膨張コンクリートの配(調)合)

W/(C+BS+EX) (%)	BS/(C+BS+EX) (%)	s/a (%)	Unit weight (kg/m <sup>3</sup> )					
			W	C	BS	EX	S	G
55	42	47	175	173	125	20	824	945

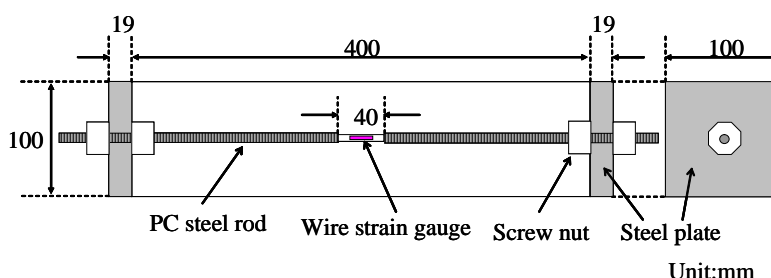


Fig. 4 Details of specimen for expansion test under uni-axial restrained condition (一軸拘束供試体の概要)

比0.2%の場合 5mmの丸鋼を、鋼材比0.5～4.0%の範囲では断面積が小さい方から呼び名9.2mm, 13mm, 17mm, 26mmのPC鋼棒を用いた。さらに、拘束棒の軸方向中央区間(40mm)を円断面に薄く切削加工し、当区間で所定の鋼材比となるようにした。鋼材ひずみは、拘束棒の軸方向中央部の円断面切削部に貼り付けた自己温度補償型ひずみゲージにより測定した。

コンクリートの練混ぜおよび打込みは、温度20℃、相対湿度80%の試験室で行った。供試体は、フリーディングがほぼ終了する2.5時間頃まで静置した。その後、乾燥を防止するために打込み面をポリエス

テルフィルムで覆い、恒温槽内で所定の温度条件を与えた。温度条件は3水準とし、20℃、40℃、60℃一定とした。なお脱型は、材齢1日の時点で恒温槽内から供試体を取り出して行った。脱型後、供試体全面をアルミ箔粘着テープでシールした後、速やかに恒温槽内に戻し測定を継続した。

(4) 見かけの膨張ひずみおよび見かけのヤング係数の算出法

見かけの膨張ひずみおよび見かけのヤング係数は、一軸拘束試験から得られる鋼材比-鋼材ひずみとの関係を式(4)で回帰することで算出した。式(4)は、

コンクリートと鋼材の力のつり合いとひずみの適合性を仮定した弾性論から導かれる関係式である。Fig. 5に、両物性値の算出法の概要図を示す。見かけの膨張ひずみおよび見かけのヤング係数は、式(4)の未知パラメータとなる。見かけの膨張ひずみは、図中に示すように、鋼材比と鋼材ひずみの関係を式(4)で外挿することで求めた鋼材比ゼロの場合の膨張ひずみに相当する。これらの未知パラメータをそれぞれ時間ステップごとに算出した。

$$\epsilon_s = \frac{\epsilon_{cfa}}{(1 + p \cdot E_s / E_{ca})} \dots (4)$$

ここに、 $\epsilon_s$  : 鋼材に生じる引張ひずみ( $\times 10^{-6}$ ),  
 $p$  : 拘束鋼材比,  
 $E_s$  : 鋼材のヤング係数(=200kN/mm<sup>2</sup>)

### 3.2 材料特性モデルの構築

#### (1) 膨張ひずみモデル

Fig. 6に、一軸拘束試験から得られた見かけの膨張ひずみと有効材齢の関係を温度条件別にそれぞれ示す。また、普通ポルトランドセメントと同様のモデル式を用いて回帰した結果を併記する。見かけの膨張ひずみの最大値およびその発現速度は、温度が高くなるほど大きくなった。膨張ひずみの最大値は20の結果に対し40で1.8倍、60で2.2倍程度であった。また、回帰した曲線と実験結果はよい適合性が認められ、高炉セメントB種の場合においても、普通ポルトランドセメントと同様のモデル式が適用可能であった。さらに、得られた回帰係数と温度の関係について定式化を行った(Fig. 7)。ただし、

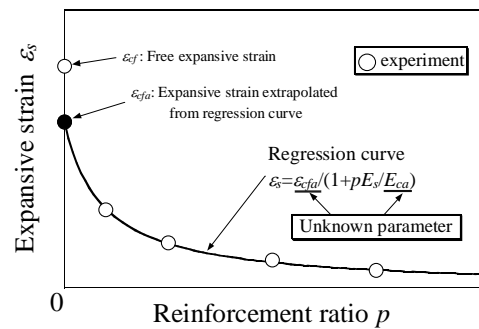


Fig. 5 Method for estimation of expansive strain  $\epsilon_{cfa}$  and Young's modulus  $E_{ca}$  (見かけの膨張ひずみ, 見かけのヤング係数の算出法)

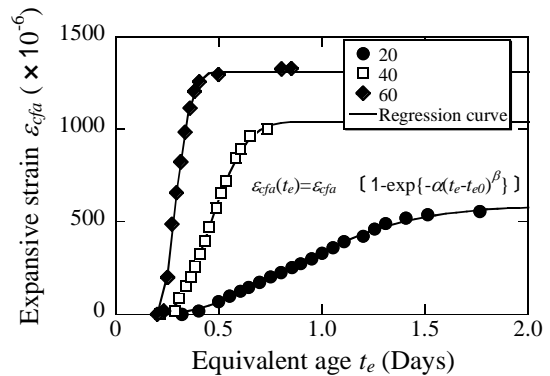


Fig. 6 Relationship between expansive strain  $\epsilon_{cfa}$  and equivalent age  $t_e$  (見かけの膨張ひずみと有効材齢の関係)

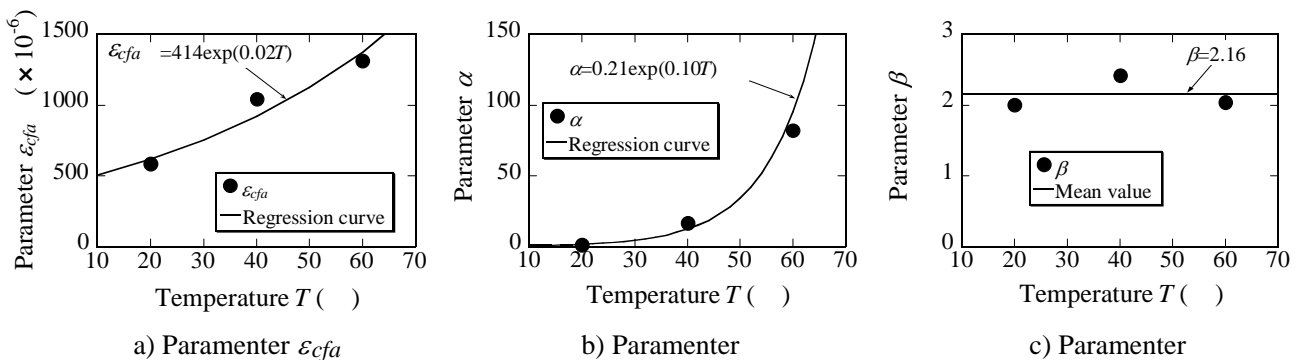


Fig. 7 Relationship between parameters  $\epsilon_{cfa}$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$  of expansive strain model and temperature (膨張ひずみモデルの係数  $\epsilon_{cfa}$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$  と温度の関係)

実験定数 については温度と明確な関係が認められなかったため、ここではそれぞれの結果を平均し、温度によらず一定値とした。定式化した結果を式(5)に示す。

$$\begin{aligned} \varepsilon_{cfa}(T, t_e) &= \varepsilon_{cfa\infty}(T) \left[ 1 - \exp\{-\alpha(T)(t_e - t_{e0})^{\beta(T)}\} \right] \\ \varepsilon_{cfa\infty}(T) &= 414 \exp(0.02T) \\ \alpha(T) &= 0.21 \exp(0.10T) \\ \beta &= 2.16 \end{aligned} \quad \dots (5)$$

(2) ヤング係数モデル

Fig. 8に、一軸拘束試験から得られた見かけのヤング係数と有効材齢の関係を温度条件別にそれぞれ示す。またこれらの関係を、普通ポルトランドセメントの場合と同様に、有効材齢で整理できるものとして、温度条件によらず単一のモデル式を用いて回帰した結果を併記する。見かけのヤング係数の発現は、おおむね有効材齢の概念によって整理でき、回帰曲線と実験結果はよい適合性を示した。式(6)に定式化した結果を示す。

$$E_{ca}(t_e) = 1.27 \left[ 1 - \exp\{-8.61(t_e - 0.2)^{1.66}\} \right] \quad t_e \leq 2 \quad \dots (6)$$

なお現段階では、ヤング係数モデルの適用範囲は有効材齢2日以前に限られており、今後、これ以降のモデルについても拡張を図る予定である。

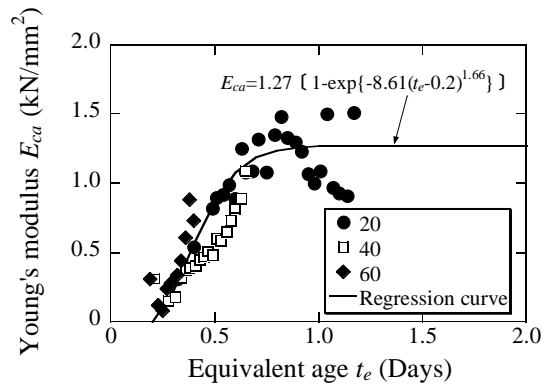


Fig. 8 Relationship between Young's modulus  $E_{ca}$  and equivalent age  $t_e$  (見かけのヤング係数と有効材齢の関係)

4 . FEM温度応力解析への適用

4.1 解析対象構造物

(1) 構造物および施工概要<sup>7)</sup>

Fig. 9に、対象とする橋脚構造物の概要図および施工時に発生したひび割れの状況を併記する。橋脚部の水平断面寸法は7×4mであり、マスコンクリート構造物に相当する。橋脚部の施工はフーチング天端から高さ0～6.3mを第1リフト、6.3～12.6mを第2リフトに分割し、それぞれ1月上旬、2月上旬の冬期に行われた。第1リフトを施工したところ、温度応力が原因と考えられる幅0.1～0.25mm程度の

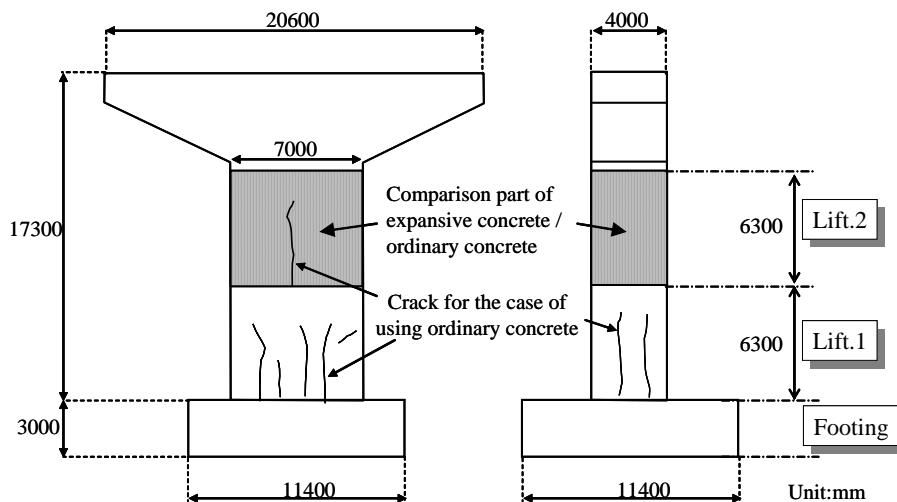


Fig. 9 Outline of the pier structure and cracking in ordinary concrete (橋脚構造物概要および普通コンクリート適用時のひび割れ発生状況)

Table 3 Mix proportions of concrete(コンクリートの配(調)合)

Symbol	Type of concrete	Type of cement	Nominal strength (N/mm <sup>2</sup> )	W/(C+EX) (%)	s/a (%)	Unit weight (kg/m <sup>3</sup> )				
						W	C	EX	S	G
BB	Ordinary concrete	Blast furnace slag cement type B	24	51	46.0	161	316	-	827	1011
BB-EX	Expansive concrete					161	296	20	827	1011

多数の表面ひび割れが発生した。そこで、第2リフトでは、膨張材の添加によって温度ひび割れ対策を行うこととした。また同じ施工区域において、同様な橋脚の第2リフトの施工が計画されていたため、ここでは膨張材無添加の普通コンクリートを適用し、両者を比較することで膨張材添加による効果を検証した。

### (2) コンクリートの配(調)合

Table 3に、橋脚第2リフトに用いた普通コンクリート(以下、BB)および膨張コンクリート(以下、BB-EX)の配(調)合を示す。セメントは高炉セメントB種を用い、膨張材は低添加型の石灰系膨張材を用いている。いずれの配(調)合も呼び強度24N/mm<sup>2</sup>(基準材齢28日)、水セメント比は51%で同一である。膨張材の添加量は20kg/m<sup>3</sup>とし、セメントに対して内割で置換している。

### (3) ひび割れ発生状況

材齢7日まで一般的な養生を行い、脱型時にひび割れ調査を行った。BBを用いた橋脚第2リフトでは、Fig. 9に示すように、水平長手方向の中央部に鉛直

のひび割れが認められた。ひび割れの幅は0.15mm、深さは170mm程度であった。原因は、第1リフトと同様に温度ひび割れと考えられ、ひび割れの特徴やその発生時期から、断面内の温度分布に起因する内部拘束作用の影響が大きいと推察された。一方、BB-EXを用いた橋脚第2リフトではひび割れの発生は認められず、膨張材の添加がひび割れ抑制に一定の効果を示したと考えられる。これまで膨張材の適用は壁構造物のような外部拘束が卓越するものが多く、橋脚のような内部拘束作用の影響が大きい構造物については十分な知見がないのが現状であった。本構造物での比較検証は、このような内部拘束卓越型の部材に対する膨張材の効果を示す一つの有用な事例といえる。

## 4.2 解析的検討

### (1) 解析モデル

Fig. 10に解析モデルの概要を示す。解析は3次元FEMを用い、構造物の対称性から1/4モデルとした。ここで解析モデルの軸方向は、橋脚水平断面の長辺方向をX方向、短辺方向をY方向とし、鉛直方向をZ方向と定義する。解析期間は、養生期間であ

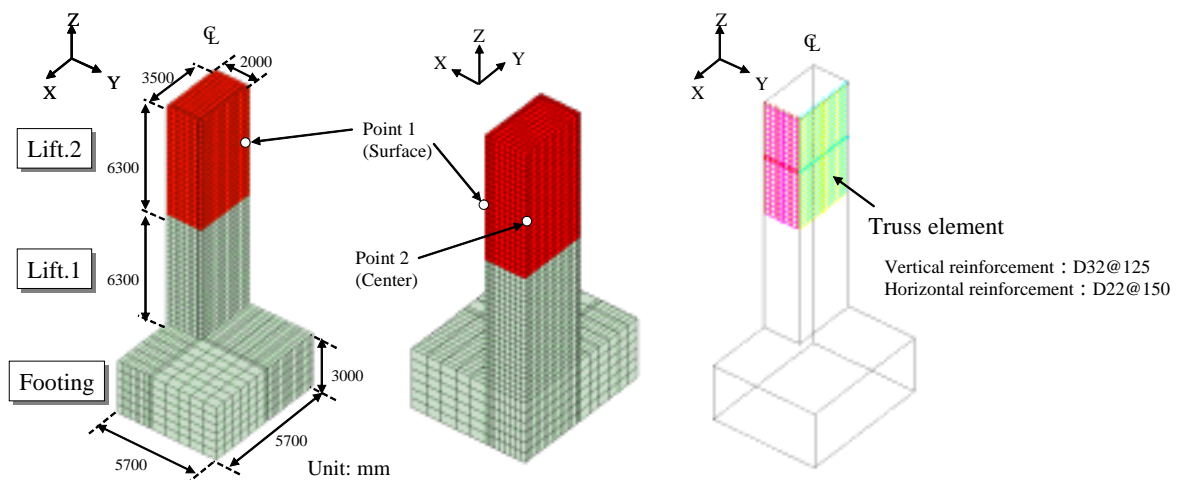


Fig. 10 Analytical model (解析モデル)



る7日とした。拘束条件は、解析対称面および底面の法線方向を完全拘束とした。また鉄筋の拘束の影響を考慮するため、実構造物における主鉄筋および帯鉄筋の配置と同様にトラス要素を設定した。通常、温度応力解析においては、コンクリートと鉄筋の熱膨張係数の差が小さいため鉄筋の拘束を無視することが多いが、本解析では温度ひずみ以外の膨張ひずみの影響を評価することが重要であるため、これを考慮することとした。なお、本解析の主な対象点として、実際に構造物にひび割れが生じた第2リフトの水平かつ鉛直中央表層部をPoint.1, その水平断面の解析対称軸上の点をPoint.2とする。

## (2) 解析条件

Table 4に解析条件を示す。第2リフトにおける基本的な熱物性値および力学物性値は、土木学会コンクリート標準示方書 [施工編]<sup>8)</sup>(以下、示方書[施工編]と略記する)に示される参考値に準じた。ただし、解析精度におよぼす影響が大きい断熱温度上昇特性および強度発現性については、最近示された日本コンクリート工学協会「マスコンクリートのひび割れ制御に関する研究委員会報告書」<sup>9)</sup>の推奨式を用いた。また膨張材添加の影響はさほど大きくないため、BB-EXについてもBBと同一の式を用いた。打ち込み時のコンクリート温度は、施工時の受け入れ検査で計測した3回の平均値とした。なお、フーチング、

Table 4 Analysis conditions  
(解析条件)

	Unit	Footing / Lift.1	Lift.2	
Type of concrete	-	-	BB	BB-EX
Period of analysis	Days	7		
Adiabatic temperature rise		-	$Q(t) = 54.7(1 - \exp(-0.441t))$	
Specific heat	kJ/kg	1.2		
Heat conductivity	W/m	2.7		
Density of concrete	kg/m <sup>3</sup>	2350		
Concreting temperature		6.6	10.0	
Compressive strength	N/mm <sup>2</sup>	24	$f'_c(t_e)/f'_c(91) = M/(266 + 0.780M)$ $f'_c(91) = 43.1, M : \text{maturity}$	
Tensile strength	N/mm <sup>2</sup>	3.5	$f(t_e) = 0.44\sqrt{f'_c(t_e)}$	
Young's modulus	kN/mm <sup>2</sup>	23	$4.7\sqrt{f'_c(t_e)}$	$t_e \leq 2 : \text{Equation(6)}$ $t_e \geq 3 : \phi = 1.0, \phi \times 4.7\sqrt{f'_c(t_e)}$
Reduction coefficient $\phi$ for Young's modulus by effect of creep	-	-	$t \leq 3 : \phi = 0.73, t \geq 5 : \phi = 1.0$ $\phi \times 4.7\sqrt{f'_c(t_e)}$	
Poisson's ratio	-	0.18		
Thermal expansive coefficient	$\times 10^{-6}/$	10		
Autogenous shrinkage	$\times 10^{-6}$	$\epsilon'_{as}(t) = 3070[1 - \exp\{-0.03(t-0.2)^{0.8}\}] \cdot 1.3$		
Expansive strain	$\times 10^{-6}$	Equation(5)		

Table 5 Boundary conditions  
(境界条件)

	Unit	Curing mat	Formwork	Exposure
Average outside air temperature		6.6		
Heat transfer coefficient	W/(m <sup>2</sup> )	5.0	6.0	12.0

第1リフトについては、施工後1ヶ月以上経過していることから、水和発熱を無視し、力学特性は呼び強度およびそこから算定される一定値を用いた。

BB-EXの膨張ひずみおよびヤング係数には、前章で示した材料特性モデルを用いた。ただし、有効材齢2日以降のヤング係数モデルについては定式化がなされていないため、本解析では既往の検討<sup>10)</sup>を基に、有効材齢3日以降コンクリートを完全弾性体として取り扱うこととした。

Table 5に境界条件を示す。外気温は、建設地域での気象庁発表データを基に、養生期間中の平均気温を用いた。境界条件は、解析対称面およびフーチング底面を断熱境界とした。それ以外の面については実施工の養生方法を反映し、フーチング、第1リフト表面は対流境界、第2リフト側面を合板型枠、第2リフト天端を養生マットとして、それぞれ示方書[施工編]に示される熱伝達率の参考値を用いた。

#### 4.3 解析結果

##### (1) 温度解析結果

Fig.11に、Point.1(表層部)およびPoint.2(断面中心部)の温度解析結果と材齢の関係を示す。最高温度は、Point.2で60.1℃、Point.1で27.6℃となり、最高温度に達する材齢は、それぞれ7日および3.5日であった。両位置での温度差は材齢7日で最大となり、その差は34.8℃であった。

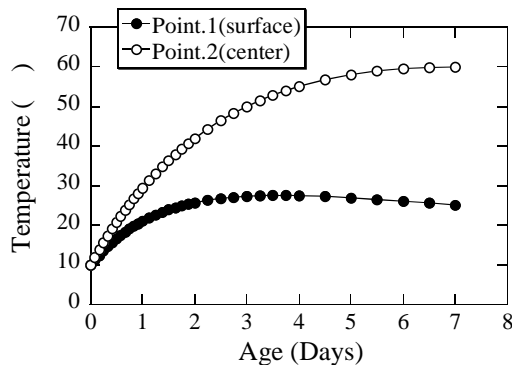


Fig. 11 Numerical results of the temperature at Point. 1 and Point. 2  
(Point.1, Point.2の温度解析結果)

##### (2) 応力解析結果

Fig.12に、Point.1に発生する応力と材齢の関係を、BB、BB-EXについてそれぞれ示す。なお対象とする応力は、実構造物で発生したひび割れの法線方向であるX軸方向応力 $\sigma_x$ とし、応力の符号は引張を正とする。BBの場合、材齢初期から引張応力が生じた。引張応力は時間の経過とともに大きくなり材齢7日の時点で2.26N/mm<sup>2</sup>に達した。一方BB-EXの場合、ごく初期に引張応力が生じるが、材齢1日頃から圧縮応力に転じた。圧縮応力の最大値は約0.1N/mm<sup>2</sup>であった。材齢約2日以後、応力は引張応力に転じ、材齢7日の時点で1.69N/mm<sup>2</sup>と、BBに比べ0.57N/mm<sup>2</sup>の引張応力の低減効果を生じる結果となった。

##### (3) ひび割れ指数

Fig.13に、Point.1におけるひび割れ指数と材齢の関係を示す。なお、図示するひび割れ指数の範囲は20以下とする。BBの場合、材齢初期からひび割れ指数が時間とともに小さくなり、6.5日で最小となった。最小ひび割れ指数は0.90であった。一方BB-EXの場合、材齢1日の時点で一時的にひび割れ指数が8.0程度まで小さくなる挙動が認められた。その後、材齢2日頃からひび割れ指数は時間とともに小さくなり、6.5日で最小となった。BB-EXの最小ひび割れ指数は1.21であり、BBと比べて約0.3の指数改善効果が認められた。ひび割れ発生の指標を一般的な値である指数1.0とすれば、両者の最小ひび割れ指数は実構造物の現象を反映した妥当な結果を示していると考えられる。

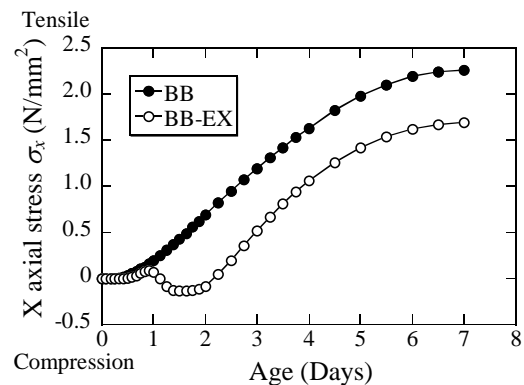


Fig. 12 Numerical results of X axial stress at Point. 1  
(Point.1におけるX軸方向応力 $\sigma_x$ )

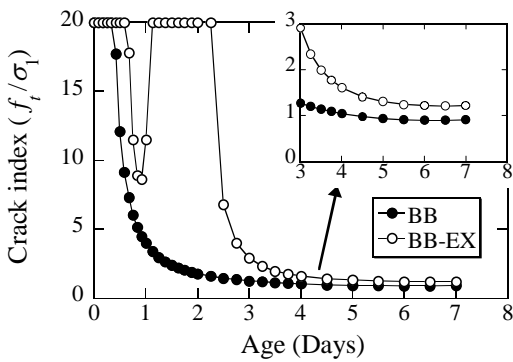


Fig. 13 Numerical results of crack index at Point. 1  
(Point. 1におけるひび割れ指数)

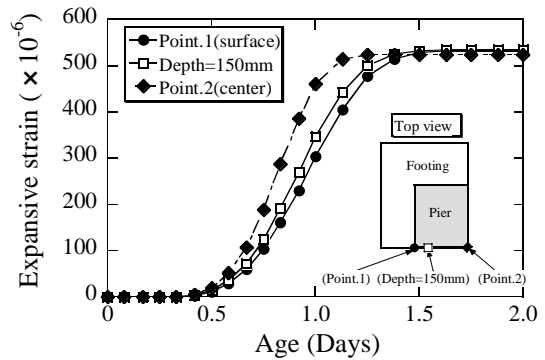


Fig. 14 Relationship between development of expansive strain and location in horizontal cross-section  
(膨張ひずみの発現性と水平断面内の位置との関係)

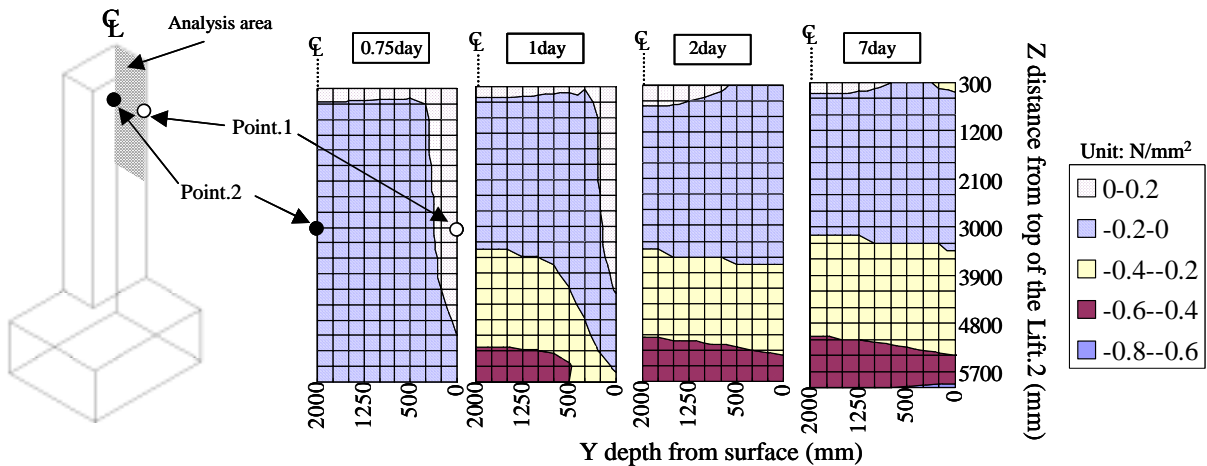


Fig. 15 Distribution of X axial stress  $\sigma_x$  due to expansive strain in Y-Z cross-section  
(膨張ひずみによって生じたY-Z断面におけるX軸方向応力  $\sigma_x$  の分布)

(4) 膨張ひずみの発現性

Fig.14に、BB-EXの膨張ひずみ(温度ひずみ、自己収縮ひずみを除く)の発現性と水平断面内の位置との関係を示す。対象とする位置は、Point.1(表層)、Point.2(断面中心部)および両点を結ぶ直線上で表層から深さ150mmの位置の3点とする。膨張ひずみの終局値は、位置による違いがほとんど認められなかった。一方、膨張ひずみの発現速度は、早期に温度が上昇する断面中心部のほうが表層部に比べて速く、本手法によって材料特性の温度依存性を表現できていることがわかる。Point.1とPoint.2の膨張ひずみを比べると、両者のひずみ差は材齢1日で最も大きくなり、その差は $150 \times 10^{-6}$ 程度となった。これは、前項で述べたBB-EXのひび割れ指数が一時的に

低下した材齢と一致しており、指数の低下は、主に断面内外の膨張ひずみ差にともなう内部拘束作用によってもたらされたと考えられる。

(5) 膨張ひずみによって導入される応力

Fig.15に、BB-EXの膨張ひずみ(温度ひずみ、自己収縮ひずみを除く)によって生じるX軸方向応力 $\sigma_x$ の分布図を、材齢0.75、1、2、7日についてそれぞれ示す。なお対象とする断面は、Point.1、2を含む鉛直断面(Y-Z断面)とし、応力の符号は圧縮を負とする。応力の発現は、鉛直上方に比べ下方の方が、また表層部に比べ断面内部のほうが早い傾向を示した。鉛直方向の位置による応力発現の違いは、膨張ひずみを拘束する第1リフトの影響度合いに依

存していると考えられる。一方、断面内外の応力発現の違いは、ひずみの場合と同様に、温度履歴に応じた結果であると考えられる。また材齢初期においては、断面表層の一部で引張応力が生じることが解析的に示された。これは、前述したBB-EXにおける一時的なひび割れ指数の低下が断面内外の膨張ひずみ差に起因することを裏付ける結果といえる。ただし、引張応力は最大でも $0.05\text{N/mm}^2$ 程度と小さく、実際の構造物にひび割れを発生させるレベルに至らなかったと考えられる。最終的に材齢7日では、位置によって程度は異なるものの、ほぼ断面全体に圧縮応力が生じ、膨張コンクリートが橋脚構造物の引張応力低減に寄与することが示されている。

## 5. ま と め

高炉セメントB種を用いた膨張コンクリートの材料特性モデルについて検討した。また、この材料特性モデルを組み込んだFEM温度応力解析プログラムを用いて、実際の橋脚構造物における温度ひび割れ抑制効果を解析的に評価した。本検討の範囲内で得られた結果を以下にまとめる。

- (1) 20～60 の範囲の一定温度条件下で一軸拘束試験を実施し、温度依存性を考慮した膨張ひずみモデルおよび有効材齢2日までのヤング係数モデルを構築した。
- (2) 解析から得られたひび割れ指数と実構造物の比較より、本材料特性モデルによってマス養生温度履歴下における膨張コンクリートの効果を適切に評価できる可能性が示された。
- (3) 実際の橋脚構造物に膨張コンクリートを適用し、膨張材を用いない橋脚と比較することにより、一定の温度ひび割れ抑制効果を生じることが確認された。

今後は、実構造物の評価実績を蓄積していくとともに、構造物中に発生する応力やその挙動を把握し、解析結果と比較検証することで精度向上を図っていく予定である。

## 参 考 文 献

- 1) 溝淵利明, 横関康祐, 信田佳延, 一軸拘束試験装置を用いた膨張材の温度応力抑制効果に関する実験的検討, コンクリート工学年次論文報告集, 20(2), 1051-1056(1998)
- 2) 保利彰宏, 栖原健太郎, 膨張材を用いたコンクリートの温度応力評価手法に関する一考察, 土木学会第60回年次学術講演会講演概要集, 部門, 711-712(2005)
- 3) 東 邦和, 中村敏晴, 増井 仁, 梅原秀哲, 膨張材を用いた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に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, 28(1), 1277-1282(2006)
- 4) 高瀬和男, 八部順一, 小林 潔, 橋吉 宏, 場所打ちPC床版における膨張材の有効性に関する研究, コンクリート工学, 43(7), 26-33(2005)
- 5) 三谷裕二, 谷村 充, 佐久間隆司, 佐竹紳也, 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報告集, 27(1), 1141-1146(2005)
- 6) 三谷裕二, 谷村 充, 松本健一, 佐竹紳也, マス養生温度履歴下における膨張コンクリートの応力評価手法, コンクリート工学年次論文報告集, 28(1), 1295-1300(2006)
- 7) 兵頭彦次, 三谷裕二, 谷村 充, 棚木 隆, 早野博幸, 立川則久, 添田政司, 橋脚の温度ひび割れ対策としての膨張材の効果に関する検討, 土木学会第61回年次学術講演会講演概要集, 部門, 495-496(2006)
- 8) 土木学会, コンクリート標準示方書[施工編], 46-53(2002)
- 9) 日本コンクリート工学協会, マスコンクリートのひび割れ制御に関する研究委員会報告書, 292-295(2006)
- 10) 谷村 充, 三谷裕二, 松本健一, 佐竹紳也, 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, 土木学会第61回年次学術講演会講演概要集, 部門, 493-494(2006)