

## PCはり構造物における膨張材効果の評価方法に関する基礎的研究

名城大学 正会員 工博 ○石川 靖晃  
 名城大学大学院 羽田 和香予  
 名城大学大学院 山口 将太

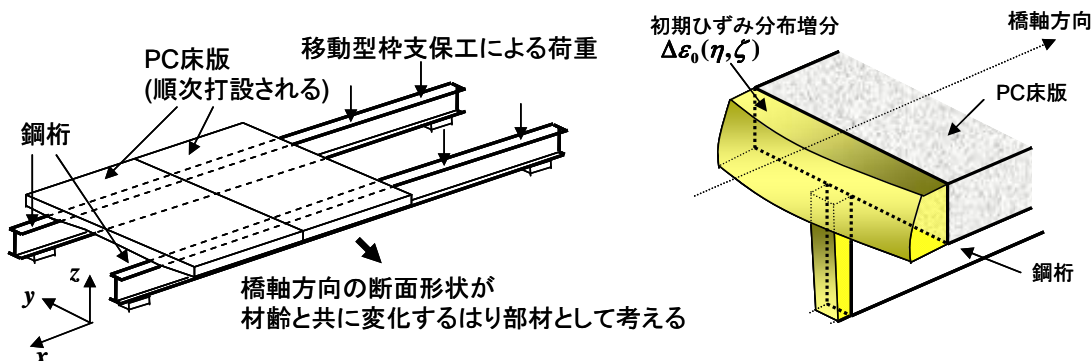
Abstract : In this study, a new analytical procedure is developed. A future of the proposed procedure is that the effect of expansive additive can be objectively considered based on the conservation law of chemical energy. The proposed procedure also makes a remarkable reduction in calculation time of initial stress analyses by combining the CP method and 2D FEM using beam element. Then, the proposed procedure is applied to thermal stress analyses of real PC girder structures. In the girder structures, a few PC deck slabs are casted on the main girder using traveling form. Consequently, the method based on the conservation law of chemical energy can globally estimate the behavior of the PC girder structures.

Key words : Conservation law of chemical energy, CP method , Thermal stress analysis

### 1. はじめに

PC構造物の耐久性を向上させる技術が現在注目されている。耐久性を向上させるための方策の一つに、施工時ひび割れを制御することが挙げられる。施工時ひび割れの発生は主に、水和熱や乾燥収縮に起因しており、現在まで様々なひび割れ制御技術が確立されている。その一つに、膨張材を使用することで、部材にケミカルプレストレスを導入する手法がある。ケミカルプレストレスを定量的に評価する場合、現状では、3次元FEM温度応力解析プログラムに膨張材による自由膨張ひずみを初期ひずみとして与える方法が主流であるが、FEM温度応力解析を行う場合、入力データ作成や計算に手間を要することは論をまたない。また、膨張材の挙動は、エネルギー一定則に従い、自由膨張ひずみは周囲の拘束により変動すると言われているが、自由膨張ひずみを単に初期ひずみとして与えただけでは、拘束の影響を考慮することが出来ないといった問題がある。

一方、CP法と、はり要素の剛性方程式を融合させることにより、橋梁に生じる施工時ひび割れを短時間で精度良く予測する解析手法が、著者らにより提案されており、3次元FEMと同等の精度で、かつ3次元FEMに比べ計算時間を大幅に短縮できることが報告されている<sup>1)</sup>。なお、この段階では、自由膨張ひずみを単に初期ひずみとして与えており、ケミカルプレストレスに関する検討は十分にされて



図－1 初期ひずみと外力を受けるはり構造

いなかった。しかし、近年では、膨張コンクリートの変形挙動は、エネルギー一定則にほぼ従うことが著者らによって確認され、エネルギー一定則に基づく手法は、自由膨張ひずみを単に初期ひずみとして与える方法に比べ、膨張材料の変形挙動を比較的良好に捉えることも報告されている<sup>2)</sup>。

本研究では、著者らが提案したCP法と、はり要素の剛性方程式を融合させた初期応力解析手法に、エネルギー一定則に基づき膨張材の効果を定量的に導入することを試みた。そして、提案手法と自由膨張ひずみを単に初期ひずみとして与えた初期応力解析手法、並びに既存の橋梁の実測結果との比較検討を行った。

## 2. エネルギー一定則に基づくはり部材の初期応力解析手法

打設中の PC はり構造物(移動型枠等が存在しても構わない)を、図-1に示すように剛性や断面形状が異なるはり要素から構成されるはり構造物であると仮定し、外的な力に加えて各々のはり要素において、温度変化や乾燥収縮に加え膨張材混入による化学膨張等が生じる場合を考える。床版のブロックが打設された場合には、鋼桁と床版を一つのはり要素として考えることにする。すなわち、要素断面は時間ステップ毎に変化するものとする。ただし、個々のはり要素内では断面の剛性および形状は、橋軸方向について一様であると仮定する。本手法は二軸曲げでも適用可能であるが、簡略化のため一軸曲げのみを対象とする。

まずこのはりの1つの要素を取り出し、その断面に局所座標系 $(\eta, \zeta)$ を与える。また、断面は異なるヤング率 $E_k$ をもついくつかの領域 $A_k$ から構成されているとする。なお、ヤング率は要素や時間ステップごとに異なるとする。この要素の任意断面に、初期ひずみ分布増分 $\Delta\varepsilon_0(\eta, \zeta)$ を与えた場合を考える。このとき膨張コンクリートを含む断面内では、初期ひずみ増分は、温度、乾燥収縮等が寄与する初期ひずみ増分 $\Delta\varepsilon_0^{sh}(\eta, \zeta)$ と膨張材による自由膨張ひずみ増分 $\Delta\varepsilon_0^{exp}(\eta, \zeta)$ の和で次式で表わされる。

$$\Delta\varepsilon_0(\eta, \zeta) = \Delta\varepsilon_0^{sh}(\eta, \zeta) + \Delta\varepsilon_0^{exp}(\eta, \zeta) \quad (1)$$

ここで、 $\Delta\varepsilon_0^{sh}(\eta, \zeta)$ は既知量であり、入力値として容易に与えられる一方で、 $\Delta\varepsilon_0^{exp}(\eta, \zeta)$ は、後述するエネルギー一定則に基づき決定される物理量であることに留意されたい。

要素断面が初期ひずみによる変化の前後において平面保持するものと仮定する。この平面が存在する位置は Compensation Plane と呼ばれている(図-2)。この考え方は、土木学会コンクリート標準示方書にも採用されている<sup>3)</sup>。このとき、要素断面の重心位置における自由な軸ひずみ変形増分 $\Delta\bar{\varepsilon}_0$ および変形の曲率増分 $\Delta\bar{\phi}_0$ は次式で表される。

$$\Delta\bar{\varepsilon}_0 = \frac{\sum_k E_k \int_{A_k} \Delta\varepsilon_0(\eta, \zeta) dA_k}{\sum_k E_k A_k} \quad \Delta\bar{\phi}_0 = \frac{\sum_k E_k \int_{A_k} (\Delta\varepsilon_0(\eta, \zeta) - \Delta\bar{\varepsilon}_0)(\zeta - \zeta_g) dA_k}{\sum_k E_k \int_{A_k} (\zeta - \zeta_g)^2 dA_k} \quad \zeta_g = \frac{\sum_k E_k \int_{A_k} \zeta dA_k}{\sum_k E_k A_k} \quad (2)$$

この Compensation Plane を用いると、はり要素が自由変形する場合においても、初期ひずみ勾配の影響によるはり要素内部の内部拘束応力が次式のように求められる。

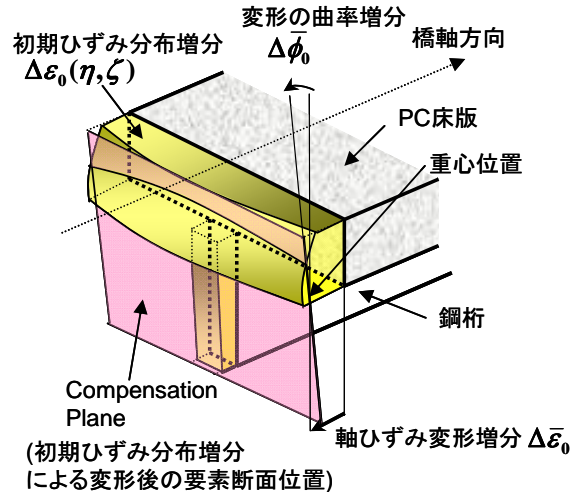


図-2 Compensation Plane

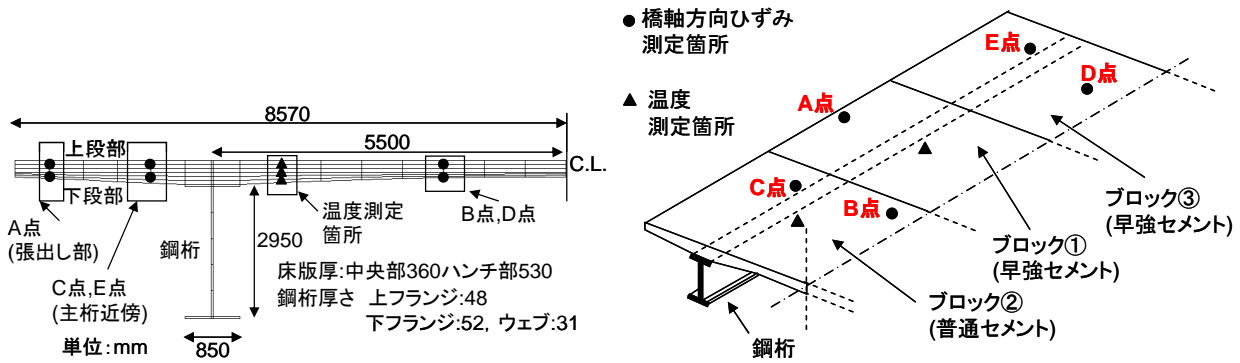


図-3 解析対象床版断面および上面図

$$\Delta\sigma_I(\eta, \zeta) = E_k \left( \Delta\bar{\epsilon}_0 + (\zeta - \zeta_g) \Delta\bar{\phi}_0 - \Delta\epsilon_0(\eta, \zeta) \right) \quad (3)$$

式(3)からわかるように、内部拘束応力は構造体全体の境界条件とは無関係に算定される。

また、全軸ひずみ増分  $\Delta\epsilon$  および全曲率増分  $\Delta\phi$  は、弾性軸ひずみ増分  $\Delta\epsilon_e$  および弾性曲率増分  $\Delta\phi_e$  および前述の初期変形増分の和で次式で表わされる。

$$\begin{Bmatrix} \Delta\epsilon \\ \Delta\phi \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \Delta\epsilon_e \\ \Delta\phi_e \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \Delta\bar{\epsilon}_0 \\ \Delta\bar{\phi}_0 \end{Bmatrix} \quad (4)$$

全軸ひずみ成分および全曲率成分は要素毎に初期変形成分  $\Delta\bar{\epsilon}_0$  および  $\Delta\bar{\phi}_0$  を初期ひずみとして与え、通常のはり要素から構成される全体剛性方程式を解くことにより得られる。この全体剛性方程式についての誘導の詳細は文献 1) を参照されたい。要素内の任意断面の軸応力増分  $\Delta\sigma_{NR}$  および曲げ応力増分  $\Delta\sigma_{MR}$  は、次式で表される。

$$\begin{Bmatrix} \Delta\sigma_{NR} \\ \Delta\sigma_{MR} \end{Bmatrix} = E_k \begin{Bmatrix} \Delta\epsilon_e \\ (\zeta - \zeta_g) \Delta\phi_e \end{Bmatrix} \quad (5)$$

したがって、はり要素内の任意断面の応力増分  $\Delta\sigma(\eta, \zeta)$  は、式(3)の内部拘束応力増分  $\Delta\sigma_I(\eta, \zeta)$  と式(5)から得られる応力の和として次式で表される。

$$\Delta\sigma(\eta, \zeta) = \Delta\sigma_I(\eta, \zeta) + \Delta\sigma_{NR} + \Delta\sigma_{MR} \quad (6)$$

断面が膨張コンクリートを含んでいる場合、膨張コンクリートを構成する全ての節点において、エネルギー一定則が成立する。エネルギー一定則とは、化学作用によって力学的な外的環境へ系が作用する力学的エネルギーが一定であるという法則である。なお、拘束が極めて小さい場合はエネルギー一定則は成立しない。単位体積当たりの膨張エネルギー増分を  $\Delta U_{che}$  とすると、膨張コンクリートの任意の断面内節点において次式が成立する。

$$\sigma(\eta, \zeta) \Delta\epsilon_0^{exp}(\eta, \zeta) = -\Delta U_{che} \quad (7)$$

式(7)から、断面内各節点における自由膨張ひずみ成分  $\Delta\epsilon_0^{exp}(\eta, \zeta)$  が計算される。ただし、応力が限界応力  $\sigma_0$  より引張側に移行したときは、式(7)の応力  $\sigma(\eta, \zeta)$  を  $\sigma_0$  に置き換えて自由膨張ひずみを求めている。なお、限界応力とは、エネルギー一定則が成立する限界の応力を意味している。

式(1)において、自由膨張ひずみを適当な値で仮定し、式(1)~(7)の手順を、自由膨張ひずみがほぼ

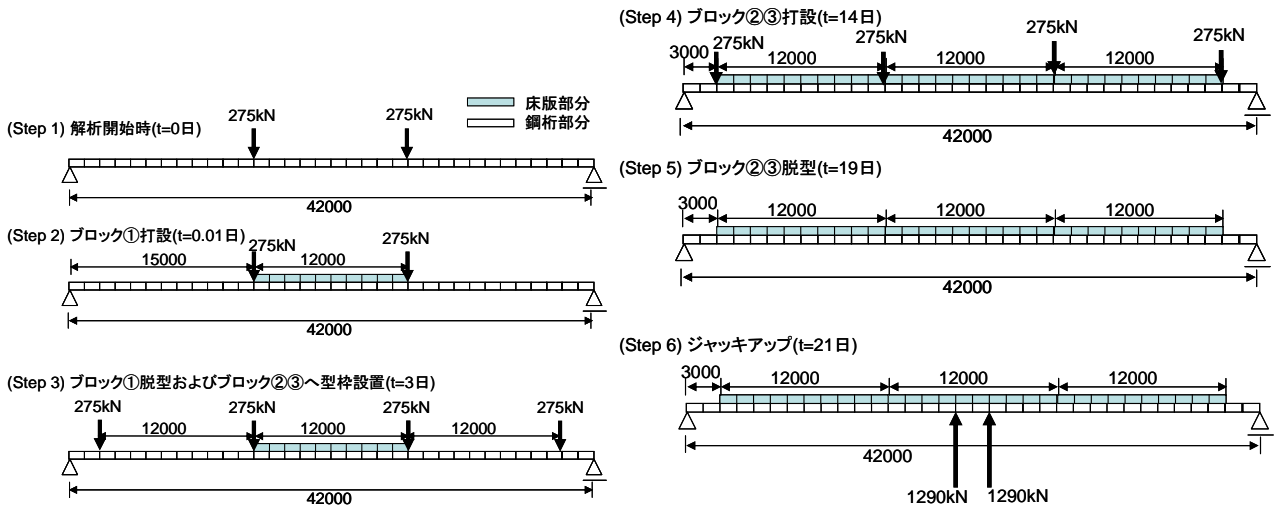


図-4 PC床版の打設手順

表-1 解析に用いた材料特性値

熱特性値	コンクリート(普通)	コンクリート(早強)	鋼桁
ヤング率 (N/mm <sup>2</sup> )	$\frac{30000t}{t+1.0}$	$\frac{30000t}{t+0.7}$	210000
t : 材齢(日)			
線膨張係数	$10 \times 10^{-6}$	$10 \times 10^{-6}$	$12 \times 10^{-6}$

同じ値となるまで繰り返し計算を行うことにより解を得ることが出来る。

### 3. 提案した手法および実測値の比較検証

PC床版の施工検証実験結果<sup>1)</sup>と比較することで本手法の妥当性の検証を試みた。施工検証実験では、図-3に示すように2つの鋼桁上にセメントの種類が異なるブロックが打設されている。また、ブロック①およびブロック③は早強セメント(以下、早強と称する)、ブロック②は普通セメント(以下、普通と称する)を使用しており、全てのブロックに膨脹材(混入量 20kg/m<sup>3</sup>)が混入されている。図-3右中のA~E点では、上段部および下段部(図-3左)で、橋軸方向ひずみが鉄筋計により計測され、ブロック①およびブロック②それぞれ3箇所(図-3左)に熱伝対を埋め込むことにより温度が計測されている。打設手順は図-4に示すとおりである。この施工検証実験に対して、本提案解析法を適用し、実測値との比較検討を試みた。解析の手順として、まず

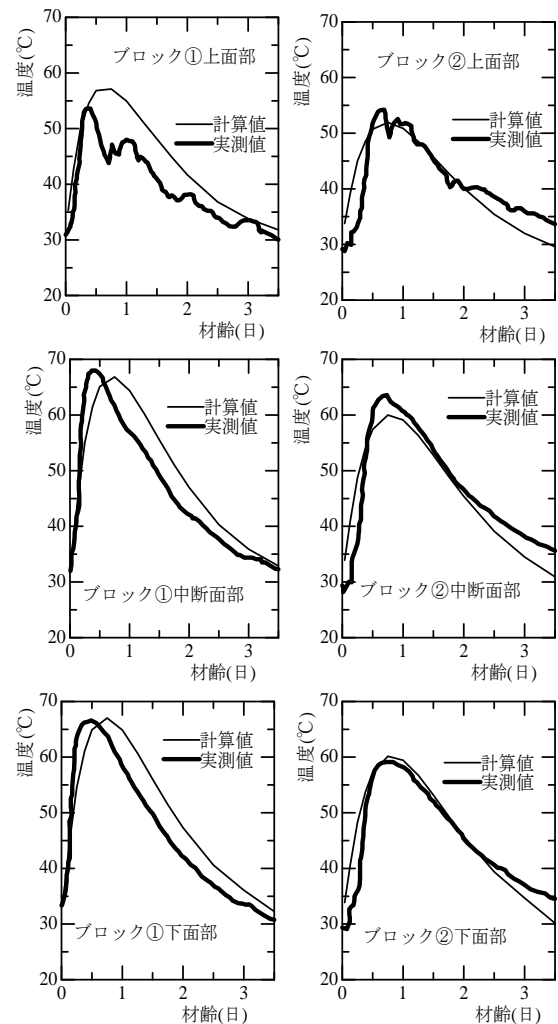


図-5 温度経時変化の計算および実測結果

図-3に示す断面を用いて物性の異なる床版断面毎に2次元FEMによる温度解析を行い、それぞれの温度履歴を算定した。温度経時変化の計算および実測結果を図-5に示す。続いて、図-4に示す

打設手順を考慮し、提案した解析手法を用いて、逐次弾性応力解析を行った。変形解析に用いた材料特性値を表-1に示す。なお、これらの値は測定値を基に決定している。自己収縮ひずみ成分  $\varepsilon_{auto}$  は、ひび割れ制御指針(2008)<sup>4)</sup>を参考にし、次式で与えた。

$$\varepsilon_{auto}(t_e) = -0.00008(1 - \exp(-1.23t^{0.87})) \quad (8)$$

膨張材による自由膨張ひずみ  $\varepsilon_{che}$  も、ひび割れ制御指針を参考に次式で推定した。

$$\text{早強: } \varepsilon_{che}(t) = 0.00165(1 - \exp(-0.45t^{1.33})), \quad \text{普通: } \varepsilon_{che}(t) = 0.00015(1 - \exp(-0.69t^{1.11})) \quad (9)$$

とした。ここで、 $t$ は材齢(日)である。なお、ひび割れ制御指針では、式(8)(9)においては、有効材齢を使用するが、本論文では簡便のため、有効材齢の代わりに材齢を用い、さらに遅れ時間は0とした。

膨張材を考慮しないケース「膨張材非考慮」、自由膨張ひずみを初期ひずみとして直接与えることにより、膨張材の効果を考慮したケース「初期ひずみ直接代入」、本提案手法すなわちエネルギー一定則に基づき膨張材の効果を考慮したケース「エネルギー一定則」の3つを解析ケースとして設定した。「膨張材非考慮」では、温度、自己収縮ひずみのみを考慮した。「初期ひずみ直接代入」では、温度、自己収縮ひずみに加え、式(9)で自由膨張ひずみを入力値として与えた。「エネルギー一定則」では、温度、自己収縮ひずみに加え、膨張材による化学エネルギーを入力値として与えた。このエネルギーは、一軸拘束試験からひずみエネルギーを求めることで評価される。本研究では既往の実験結果<sup>5)6)</sup>を基に、次式にて化学エネルギーを推定した。

$$U_{che}(t) = U_{che,max}(1 - \exp(-rt)) \quad (10)$$

$r$ は普通、早強ともに0.8、 $U_{che,max}$ は、普通で $0.3 \times 10^{-4} \sim 0.65 \times 10^{-4}(\text{N/mm}^2)$ 、早強で $0.4 \times 10^{-4} \sim 0.65 \times 10^{-4}(\text{N/mm}^2)$ の範囲で推定された。よって、本ケースでは、これらの上限下限の値を用いて解析を行った。なお、限界応力  $\sigma_0$  は、普通早強ともに $0.1(\text{N/mm}^2)$ と設定した。この設定根拠については今後検討していく必要がある。

ひずみの実測結果および計算結果の比較を図-6に示す。図の横軸は、経過時間であり、各ブロックが打設された時刻を原点としている。また、各解析において、BC点およびDE点では、解析値がほぼ同様の値であったため、いずれか一方を記述している。さらに、「エネルギー一定則」の解を表わす曲線は2本示されているが、これらは、解の上限および下限を表わしており、「エネルギー一定則」による解は、これら2つの曲線の間が存在するというを意味している。実測においては、DE点において、ひずみ履歴が大きく異なっていることがわかる。ブロック①③においては上下段部とも応力はほぼ同様となっているが、解析では平面保持の仮定に基づき鋼桁とコンクリート接合部は完全付着としていることが一つの原因として考えられる。

「膨張材非考慮」の計算値は、どの点においても、実測値よりも小さい値となっており、実構造において膨張材の効果が発揮されていることがうかがえる。両手法とも全体的には、ある程度実測値を捉えているが、本例においては、幅員/支間比が1.0以下であり平面保持則の仮定が十分に成立しない部位があること、かつ床版が3個に分かれており、その接続部で構造的には完全な連続性を仮定できない事等の理由からか、図-6のDE点の様な実測値と解析値の乖離がみられる。これらの点を踏まえ、各解析手法の信頼性のみならず実測値自身についてもさらに検討を加えたいと考えている。いずれにしても、本手法の長所は、膨張材混入量が異なっていた場合、あるいは、他の特殊セメントを使用した場合には、膨張による化学エネルギーを一軸拘束試験等で求め、そのひずみエネルギーを単に入力

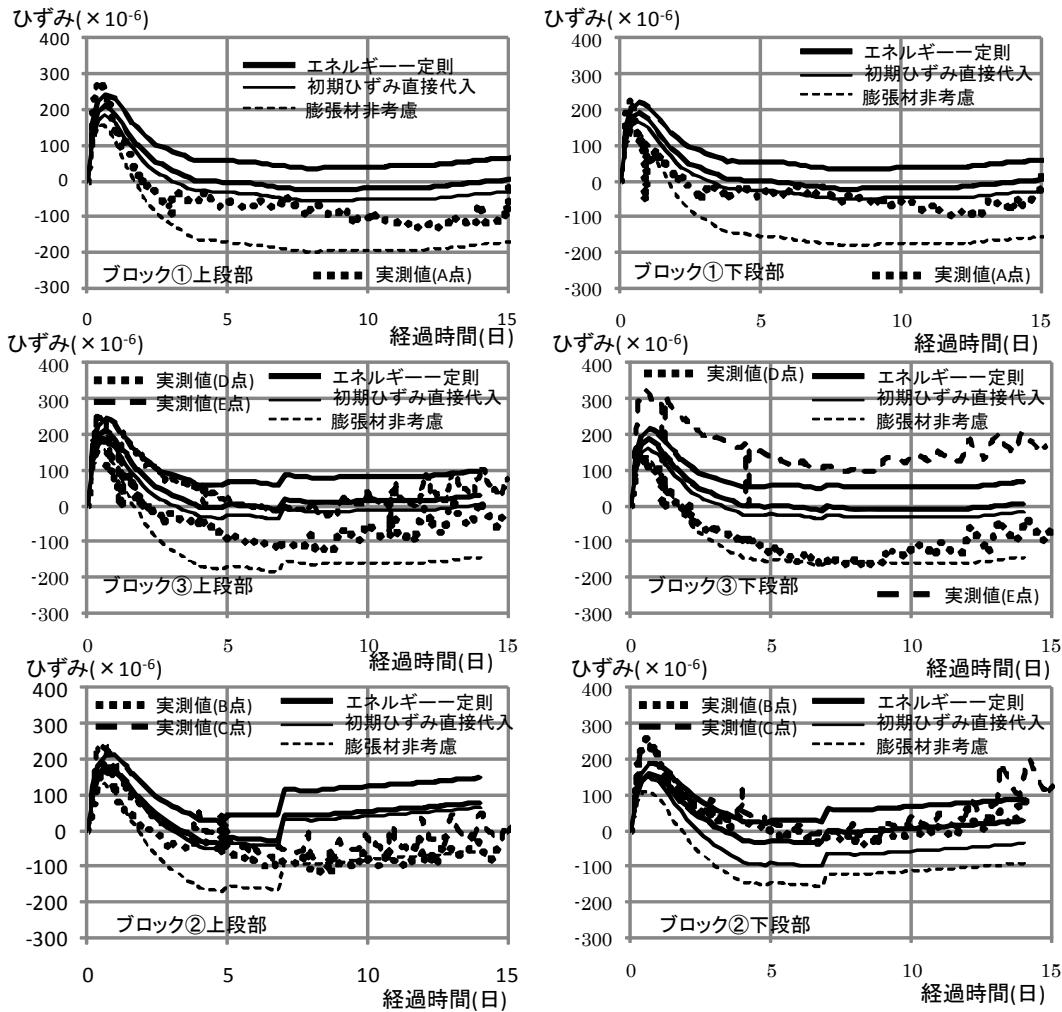


図-6 ひずみ履歴の比較

値として与えるだけであり、膨張材に対する効果検討が従来よりも広範囲で可能となることが期待される。

#### 4. おわりに

本論文では、PCはり構造物における膨張材の効果を簡易かつ客観的に評価する手法を構築した。本手法では、型枠移動など施工に伴う荷重変動が簡単に考慮できること、さらには、エネルギー一定則により、化学エネルギーを測定するだけで、膨張材の効果が簡単に予測できることが確認された。本手法は、PCはり構造物の施工時ひび割れ抑制に対する多角的な戦略が可能であることを示唆している。今後、さらに検討を行っていきたい。

#### 参考文献

- 1) 石川靖晃, 西垣義彦, 田辺忠顕: 移動型枠支保工による PC 厚肉床版施工時ひび割れ評価法の提案, プレストレストコンクリート, Vol.45, No.3, pp.97-107, 2003
- 2) 石川靖晃, 柴田要: 仕事量一定則に基づく膨張コンクリートの变形挙動に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.1, pp.351-356, 2008.7
- 3) 土木学会: 土木学会コンクリート標準示方書「設計編」2007年度制定版, 2008.3.
- 4) 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指針, 2008.11.
- 5) 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集, Vol.28, No.1, pp.1295-1300, 2006.7
- 6) 林陸太, 石川靖晃: 二軸拘束状態下での膨張コンクリートの仕事量に関する考察, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, pp.511-516, 2009.7