

論文 鋼橋床版の温度応力解析における膨張材効果の評価方法に関する一考察

内田 大介*1・塩永 亮介*1・高瀬 和男*1・坂根 秀和*1

要旨：膨張材を用いたコンクリートは，単位体積あたりのコンクリートの膨張が拘束体になす仕事量が一定であるという性質を有する¹⁾。そして，膨張コンクリートを用いた構造物は仕事量一定の概念を適用することにより膨張分布，および，ケミカルプレストレスが精度良く推定できることが知られている²⁾。

本研究では膨張コンクリートを用いた鋼橋床版を対象とした温度応力解析に対し，膨張材の効果を評価する幾つかの方法について検討を行い，解析結果と仕事量一定則に基づいた計算結果との比較によりその妥当性を検証した。

キーワード：仕事量，温度応力解析，膨張ひずみ，ケミカルプレストレス

1. はじめに

昨今，鋼橋では合理化を目的に少数主桁橋の建設が進められている。少数主桁橋では床版支間長が大きくなるため，橋軸直角方向にプレストレスを導入した場所打ち PC 床版を用いることが多い。場所打ち PC 床版は従来の RC 床版に比べ床版が厚いこと，また，高強度のコンクリートを用いるため，セメントの水和熱に起因する温度応力が大きくなり，有害なひび割れの発生が懸念されている。

場所打ち PC 床版の有害なひび割れを防止する対策の一つとして膨張コンクリートの使用が挙げられる。日本橋梁建設協会では膨張コンクリートによるひび割れ防止効果を 3 次元有限要素法による一連の解析で定量的に評価することを目的とし，温度応力解析時に必要な様々なパラメータに対し，実験，および，解析的検討を進めている³⁾。

膨張コンクリートを用いた構造物に仕事量一定の概念を適用し，膨張ひずみ，および，ケミカルプレストレスを精度良く推定できる方法は辻により提案されており²⁾，仕事量一定則は膨張コンクリートの基本的な性質とされているが，

通常構造計算とは異なるために一連の温度応力解析に組み込むことは困難であると考えられる。一方，これまでの日本橋梁建設協会における温度応力解析には仕事量一定に関する概念もなく，その検証も行われていなかった⁴⁾。

本研究では膨張コンクリートを用いた鋼橋床版を対象とした温度応力解析に対し，膨張材の効果を評価する方法として従来の方法に加えた幾つかの方法について解析を行い，仕事量一定則に基づいて求めた膨張ひずみ分布とケミカルプレストレス分布との比較を行うことにより，その妥当性を検証した。

2. 膨張材の仕事量の概念を適用した計算²⁾

仕事量一定則の概念は「単位体積当たりの膨張コンクリートが拘束に対してなす仕事量 U (膨張ひずみ \times ケミカルプレストレスの関数) は鉄筋あるいは外部拘束体の程度にかかわらず一定の値をとる。」，「膨張ひずみは断面内の平面保持性を有する。」という二つの仮定より膨張ひずみとケミカルプレストレスを算出する方法である。この方法では現在未解明である膨張コンクリートの初期ヤング係数やクリープ係数が未

*1 (社)日本橋梁建設協会 床版研究委員会 (正会員)

表 - 1 基本解析条件

コンクリート			鋼材		
密度	D_c kg/m ³	2400	密度	D_s kg/m ³	7850
ヤング係数	$E_c(t)$ N/mm ²	土木学会式	ヤング係数	E_s N/mm ²	200000
圧縮強度	$f'_c(t)$ N/mm ²	土木学会式	圧縮強度	f_s N/mm ²	400
引張強度	$f_t(t)$ N/mm ²	土木学会式	引張強度	f_t N/mm ²	400
ポアソン比	ν	0.167	ポアソン比	ν	0.3
JIS A6202 A法					
拘束供試体の膨張ひずみ	ϵ_{s0}	0.000175			
拘束供試体の拘束鋼材比	p_1	0.0096			
拘束鋼材のヤング係数	E_p N/mm ²	200000			

知であっても JIS A 6202 にある膨張コンクリートの拘束膨張試験 A 法のひずみがわかれば、拘束体の軸方向について膨張ひずみ分布、および、ケミカルプレストレス分布を精度良く推定できる手法である。

3. 3次元有限要素応力解析モデル

3.1 解析対象モデル

解析対象は近年、数多くの計画・建設が行われている床版支間10m程度の鋼2主桁橋における、主桁直上の床版を想定した。解析モデルの断面図を図-1に示す。断面は桁高2950mmのI断面桁に、幅2m×厚さ530mmの床版を剛結している。また、断面計算を簡略化するためにハンチは省略した。桁支間は10mである。なお、着目断面における床版の橋軸方向の鉄筋比は1.62%である。メッシュ分割図を図-2に示す。

3.2 解析条件

解析には汎用温度応力解析ソフト ASTEA MACS VER.3 を用いた。基本的な解析条件を表-1に示す。なお、想定したコンクリートは水結合材比44.0%、早強セメントを用いて膨張材を30kg/m³添加したものである。コンクリート、鋼桁ともにソリッド要素を用いてモデル化を行っている。荷重は膨張ひずみのみとし、拘束は下フランジ下面の四隅を鉛直方向に固定している。また、本検討では膨張材による効果のみに着目するため、外気温は一定とし、セメントの水和発熱も考慮していない。

3.3 鉄筋のモデル化について

膨張コンクリートでは膨張ひずみを拘束することによってケミカルプレストレスが導入され

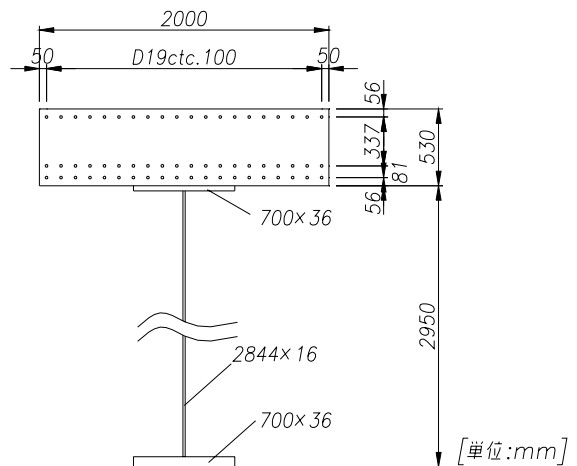


図 - 1 解析モデル断面図

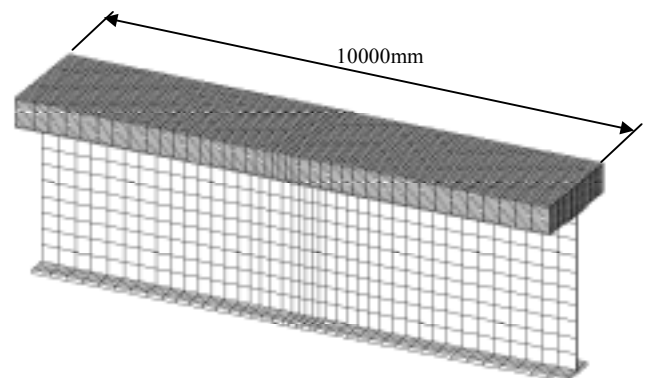


図 - 2 メッシュ分割図

る。従来の日本橋梁建設協会の温度応力解析では鋼橋の床版においては膨張ひずみに対する拘束は鋼桁によるものが主であると考え、鉄筋のモデル化を行っていなかった⁴⁾。しかし、床版の鉄筋比は1.5%前後と、一般的なRC構造物よりも大きいことを考慮し、鉄筋拘束についても検討を行った。

今回は従来の鉄筋のモデル化を行わないモデル、鉄筋のモデル化に際して分散鉄筋要素、あるいは、トラス要素を用いたモデルの2モデル、計3モデルを作成した。なお、分散鉄筋要素とは簡易的に鉄筋の剛性を考慮できる異方性を持つ8節点ソリッド要素で、コンクリート要素と全節点を共有させて使用する要素である。ここ

では鉄筋の剛性を床版コンクリート全体に平均化して使用した。

3.4 入力膨張ひずみの算出方法

解析で入力する膨張ひずみ特性は、従来の鉄筋のモデル化を行わない方法では鉄筋拘束下の膨張ひずみ履歴を入力していたが、鉄筋のモデル化を行った場合には入力した膨張ひずみに対する鉄筋の拘束効果が模擬されるため、入力する膨張ひずみは無拘束下における有効な膨張ひずみ（以下、有効自由膨張ひずみ⁵⁾）の履歴とする必要がある。有効自由膨張ひずみは概念的なものであり定義付けが困難であるため、ここでは仮想の有効自由膨張ひずみを算出することとし、コンクリートと拘束鋼材の力の釣合いより算出する方法（CASE-1）と、力の釣合いの一部に仕事量一定の概念を取り込んで算出する方法（CASE-2）の2種類を考えた。

入力する膨張ひずみ履歴の算出方法を以下に示す。

(1) 鉄筋のモデル化を行わない場合

鉄筋のモデル化を行わない場合は、式(1)に表すように鉄筋拘束下の膨張ひずみを用いて算出した場合の仕事量と、拘束膨張試験 A 法より求めた膨張ひずみを用いて算出した仕事量が一定であると仮定した。入力する膨張ひずみ履歴は式(1)より対象モデルの着目する橋軸方向の鉄筋比 1.62%の膨張ひずみ ε_1 を算出し、実測より得られた簡易式である式(2)³⁾を用いて材齢を考慮した。

$$\frac{1}{2} p_s \cdot E_p \cdot \varepsilon_{s0}^2 = \frac{1}{2} p_1 \cdot E_s \cdot \varepsilon_1^2 \quad (1)$$

$$\varepsilon_1(t) = \varepsilon_1 \cdot (1 - e^{-0.7t^{1.5}}) \quad (2)^3$$

p_s : A 法での拘束鋼材比

E_p : A 法での拘束鋼材のヤング係数

ε_{s0} : 拘束膨張試験 A 法より求めた膨張ひずみ

p_1 : 解析モデルの鉄筋比 (1.62%)

E_s : 解析モデルの拘束鋼材のヤング係数

ε_1 : 鉄筋比 p_1 での膨張ひずみ

t : 材齢 (日)

(2) 鉄筋のモデル化を行う場合 CASE-1

CASE-1 では拘束膨張試験時のコンクリートと拘束鋼材の力の釣合いより有効自由膨張ひずみの履歴を算出した。

ある時間において、コンクリートと拘束鋼材の力の釣合いを考えれば式(3)、(4)の関係が成り立つ。

$$E_c(t) \cdot \Delta \varepsilon_c \cdot A_{Ac} = E_p \cdot \Delta \varepsilon_{st} \cdot A_p \quad (3)$$

$$\varepsilon_c(t) = \varepsilon_0(t) - \varepsilon_{s0}(t) \quad (4)$$

ここに、 $E_c(t)$ はコンクリートのヤング係数、 A_{Ac} と A_p は A 法におけるコンクリートと拘束鋼材の断面積であり、 $\varepsilon_0(t)$ は膨張コンクリートの有効自由膨張ひずみ履歴、 $\varepsilon_{s0}(t)$ は拘束膨張試験時の膨張ひずみの履歴、 $\varepsilon_c(t)$ は $\varepsilon_0(t)$ から $\varepsilon_{s0}(t)$ を差し引いた値で自由に膨張したコンクリートが拘束鋼材により拘束された分のひずみの履歴を示す。

式(3)、(4)より有効自由膨張量は式(5)で示される。

$$\varepsilon_0(t) = \sum \left\{ \left[\frac{E_p \cdot A_p}{E_c(t) \cdot A_{Ac}} + 1 \right] \cdot \Delta \varepsilon_{s0} \right\} \quad (5)$$

なお、 $\varepsilon_{s0}(t)$ は式(6)で表せるとし、コンクリートのヤング係数 $E_c(t)$ については材齢初期の膨張コンクリート特性が未解明であるため、便宜上、土木学会のコンクリート標準示方書にある膨張材無しコンクリートの値(式(7))を用いることとした(有効ヤング係数法も考慮)。

$$\varepsilon_{s0}(t) = \varepsilon_{s0} \cdot (1 - e^{-0.7t^{1.5}}) \quad (6)^3$$

$$E_c(t) = 4.7 \times 10^3 \cdot \sqrt{\frac{t}{2.9 + 0.97 \cdot t}} \cdot 1.07 \cdot f'_{ck} \quad (7)$$

f'_{ck} : コンクリートの設計基準強度

(3) 鉄筋のモデル化を行う場合 CASE-2

CASE-2 では有効自由膨張ひずみを算出する際に仕事量一定の概念を組み込むことを試みた。この方法は、コンクリート断面の中心位置においてのみ常に仕事量が一定となることとした仮定の下で、膨張ひずみを温度による膨張ひずみと同様に考えてコンクリートと拘束鋼材の力の釣合いより仮想の有効自由膨張ひずみの履歴を算出

するものである。

まず、コンクリート断面の中心位置においてある材齢 t 日から $t + \Delta t$ 日での膨張ひずみとケミカルプレストレスの増分に仕事量一定則を適用すれば、以下の式が成り立つこととなる。

$$\frac{1}{2} \Delta \sigma_c \cdot \Delta \varepsilon_{st} = \frac{1}{2} p_s \cdot E_p \cdot \Delta \varepsilon_{s0}^2 \quad (8)$$

ここに、 σ_c はコンクリート断面の中心におけるケミカルプレストレスの増分、 ε_{st} はコンクリート断面の中心における膨張ひずみの増分である。また、材齢 t 日における仮定の有効自由膨張ひずみ履歴を $\varepsilon_0(t)$ とし、 $\varepsilon_0(t)$ と $\varepsilon_{st}(t)$ の差を $\Delta \varepsilon_0(t)$ とすれば式(8)は、

$$E_c(t) \cdot \Delta \varepsilon_c^2 - E_c(t) \cdot \Delta \varepsilon_c \cdot \Delta \varepsilon_0 + p_s \cdot E_p \cdot \Delta \varepsilon_{s0}^2 = 0 \quad (9)$$

と表せる。

一方、コンクリートと桁の合成断面を考え、コンクリートの膨張を考えると $\Delta \varepsilon_c$ は、次式で表される。

$$\begin{aligned} \Delta \sigma_c &= E_c(t) \cdot \Delta \varepsilon_c \\ &= E_c(t) \cdot \Delta \varepsilon_0 - \frac{1}{n(t)} \left(\frac{\Delta P_1}{A_v(t)} + \frac{\Delta M_v}{I_v(t)} \cdot d_c(t) \right) \end{aligned} \quad (10)$$

$n(t)$: ヤング係数比

P_1 : 膨張による軸力 = $E_c(t) \cdot \varepsilon_0 \cdot A_c$

M_v : 膨張による曲げモーメント

$$= P_1(t) \cdot d_c(t)$$

A_c : コンクリートの断面積

$A_v(t)$: 合成断面の鋼換算断面積

$I_v(t)$: 合成断面の鋼換算断面 2 次モーメント

$d_c(t)$: 合成断面の図心軸からコンクリート断面中心までの距離

式(10)より $\Delta \varepsilon_c$ を求め、式(9)に代入すれば、

ε_0 が求まる。よって、コンクリート中心位置での仕事量を一定とした場合の仮定の有効自由膨張ひずみの履歴 $\varepsilon_0(t)$ は次式で求まることとなる。

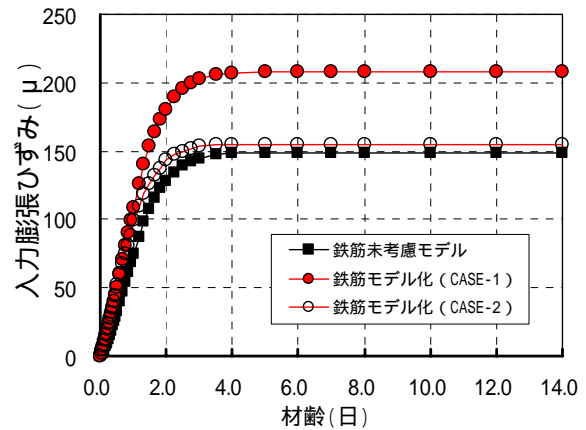


図 - 3 入力膨張ひずみ履歴

$$\varepsilon_0(t) = \sum \Delta \varepsilon_0$$

$$\Delta \varepsilon_0 = \sqrt{\frac{-p_s \cdot E_p \cdot \Delta \varepsilon_{s0}^2}{E_c(t) \cdot \alpha \cdot (\alpha - 1)}}$$

$$\alpha = \left\{ 1 - \frac{A_c}{n(t)} \left(\frac{1}{A_v(t)} + \frac{d_c(t)^2}{I_v(t)} \right) \right\} \quad (11)$$

式(11)においては、 ε_{s0} と $E_c(t)$ は前述の式(6)と式(7)より算出した。

図 - 3 に各モデルの入力膨張ひずみを示す。尚、諸検討は解析終了時(14日目)の結果を用いて行う。

4. 仕事量一定則と有限要素応力解析結果の検証

有限要素応力解析は従来の鉄筋のモデル化を行わないケース、鉄筋のモデル化を行ったケースとしては分散鉄筋要素、トラス要素を用いたモデルのそれぞれに CASE-1, CASE-2 の膨張ひずみ履歴を入力した 4 ケース、計 5 ケースについて行った。

図 - 4 と図 - 5 に橋軸方向の膨張ひずみとケミカルプレストレスについて、解析結果と仕事量一定則より求めた結果の比較を示す。解析結果の着目断面は桁支間中央断面の鋼桁 WEB 中心位置とし、床版部については幅補方向端部から 200mm の位置についても着目した。

4.1 膨張ひずみについて

図 - 4 (b), (c) の比較より、床版断面内の鋼桁 WEB 中心位置と端部から 200mm の位置の膨張ひずみ分布に差はない。

鉄筋のモデル化を行っていない場合の解析結果に着目すると、図 - 4 (a) より断面内のひ

ずみ分布は仕事量一定則より求めた結果とほぼ一致していることがわかる。また、床版部のひずみ分布を示した図 - 4 (b), (c) では、仕事量一定則より求めた値より約 3μ 大きくなっているが、分布形状は良く一致している。

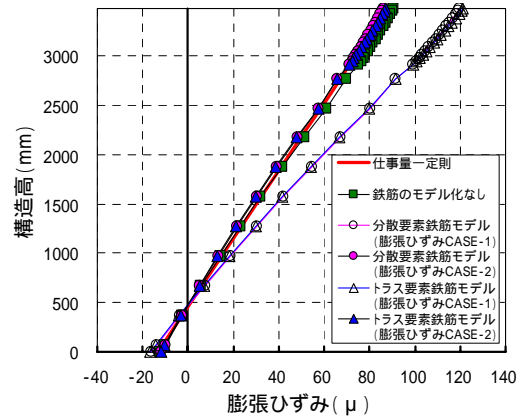
鉄筋のモデル化を行った場合の解析結果について、分散鉄筋要素とトラス要素の差は小さい。入力膨張ひずみ履歴による比較を行うと、まず、図 - 4 (a) より力の釣合いのみから算出した CASE-1 は値、勾配ともに全体的に大きな値を示しているが、コンクリート断面の中心位置において常に仕事量が一定となるように算出した CASE-2 は仕事量一定則より求めた結果と良く一致した。また、図 - 4 (b), (c) で床版部における比較を行うと、CASE-2 は仕事量一定則より求めた結果と良く一致していること、CASE-1 では約 30μ 大きくなっていることがわかる。

4.2 ケミカルプレストレスについて

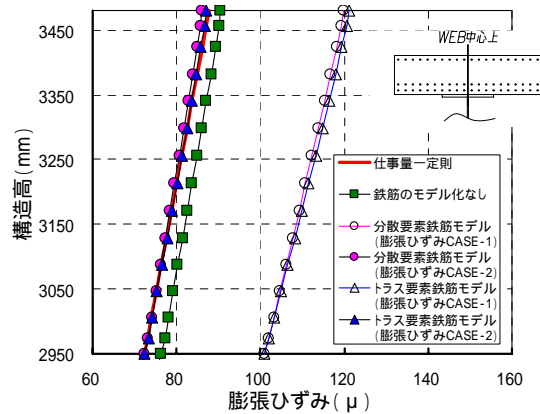
ケミカルプレストレス分布は図 - 5 (a) より断面全体の傾向としては解析結果と仕事量一定則より求めた結果と一致していることがわかる。床版部のみを抽出した図 - 5 (b), (c) で、同一ケースの解析結果を比較すると WEB 中心線上の結果である図 - 5 (b) の解析結果の勾配が図 - 5 (c) の端部から 200mm の位置よりも大きくなる傾向にあった。

図 - 5 (c) で鉄筋のモデル化を行っていない場合の解析結果に着目すると、仕事量一定則より求めた値より約 0.2N/mm^2 小さくなっているが、分布形状は良く一致している。

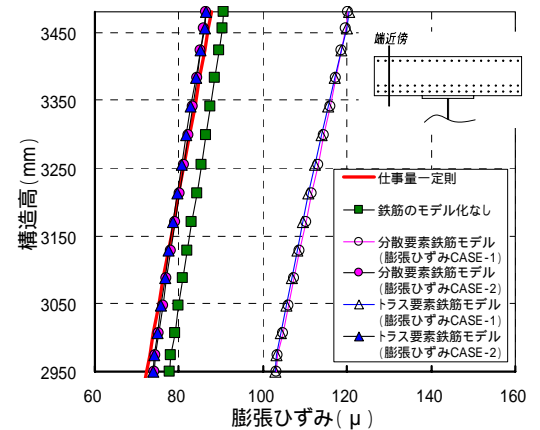
鉄筋のモデル化を行った場合の解析結果について、まず、分散鉄筋要素とトラス要素の差は膨張ひずみ分布の結果同様に小さい。また、入力膨張ひずみ履歴ごとに解析結果と仕事量一定則より求めた結果を図 - 5 (c) を用いて比較を行うと、CASE-1 では解析結果が約 0.4N/mm^2 大きくなっている。一方、CASE-2 は仕事量一定則より求めた結果より若干大きめの値ではあるが、良く一致しているといえる。



(a) 全体分布図



(b) 床版部 (WEB 中心上)



(c) 床版部 (端近傍位置)

図 - 4 膨張ひずみ分布

5. まとめ

本研究では鋼橋床版へ膨張コンクリートを使用した際のひび割れ防止効果を 3 次元有限要素法による一連の解析で定量的に評価することを目的とし、膨張材の効果を評価する方法について、従来の鉄筋をモデル化しないケースに加え、鉄筋をモデル化した 4 ケースについて解析を行った。そして、仕事量一定則に基づいた計算結果と比較することにより解析結果の検証を行い、

下記の結果を得た。

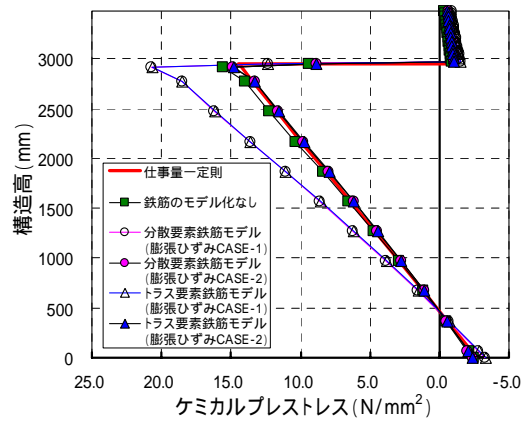
- (1) 従来の鉄筋をモデル化しない手法による解析結果は仕事量一定則に基づいた計算結果と比較を行うと、膨張ひずみ分布、および、ケミカルプレストレス分布の差は小さく、解析結果は鋼橋床版設計へ適用できるレベルにあると考えられる。
- (2) 鉄筋を分散鉄筋要素あるいはトラス要素を用いてモデル化を行い、力の釣合いの一部に仕事量一定の概念を組み込んで算出した仮定の有効自由膨張ひずみ履歴を入力すれば、膨張ひずみ分布、ケミカルプレストレス分布が仕事量一定則より求めた値と良く一致する。なお、今回は橋軸方向のみに着目したが、鉄筋のモデル化については橋軸直角方向に着目した検証等、課題が残る。

謝辞

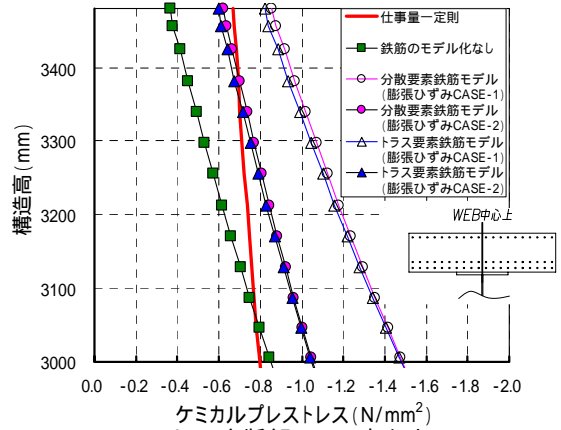
本研究の遂行にあたっては群馬大学工学部 辻幸和 教授、広島大学大学院工学研究科 佐藤良一 教授、東京大学生産技術研究所 岸利治 助教授、長岡技術科学大学環境・建設系 丸山久一 教授に貴重なご意見を頂いた。ここに記して深謝いたします。

参考文献

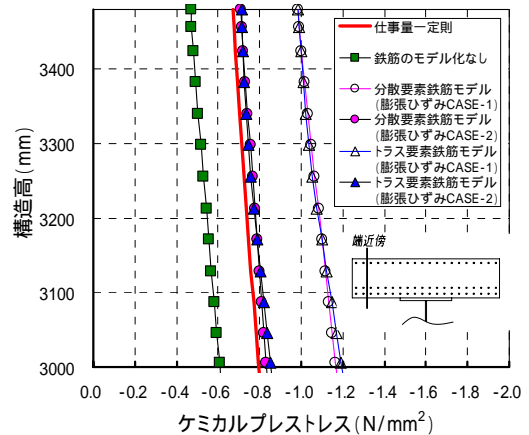
- 1) 辻 幸和：コンクリートにおけるケミカルプレストレスの利用に関する研究，土木学会論文報告集，第 235 号，No.5，pp.111-124，1975.3
- 2) 辻 幸和：ケミカルプレストレスおよび膨張分布の推定方法，コンクリート工学，Vol.19，No.6，pp.99-105，1981.6
- 3) (社)プレレスト・コンクリート建設業協会，(社)日本橋梁建設協会：長支間場所打ち PC 床版施工試験報告書（短期），p.7-2-4，2002.3



(a) 全体分布図



(b) 床版部 (WEB 中心上)



(c) 床版部 (端近傍位置)

図 - 5 ケミカルプレストレス分布

- 4) 例えば，倉田幸広，河西龍彦，高瀬和男，小林 潔，橘 吉宏，丸山久一：膨張材の効果を考慮した場所打ち PC 床版の施工時 F E M 解析，第三回道路橋床版シンポジウム講演論文集，pp.127-132，2003.6
- 5) 岡田 清，六車 熙 編：コンクリート工学ハンドブック，朝倉書店，1981.