

## 報告

## [1033] ボックスカルバートのコンクリート硬化時における温度応力と物性値について

正会員○井上 元 (五洋建設技術研究所)

正会員 内藤 英晴 (五洋建設技術研究所)

正会員 小堀 光憲 (五洋建設技術研究所)

安藤 雅彦 (五洋建設名古屋支店)

## 1. まえがき

セメントの水和熱による温度応力はマスコンクリートのひびわれ発生の原因の一つであり、重要な検討すべき事項である。ボックスカルバートでは温度応力に起因するひびわれが側壁および中壁に発生しやすい特徴があり、この種のひびわれはコンクリートの部材断面を貫通していることが多い、構造物の耐久性や水密性を大きく低下させるものである。そこで、温度応力の発生メカニズムを把握するとともに、温度応力の予測手法を確立することが必要である。温度応力を推定する手法としては、有限要素法（以下FEMと略記）が現在幅広く用いられており、最近ではCompensat ion法（以下CPMと略記）により簡単にFEMに近い解を得ることもできる。特に、ボックスカルバートに生じるひびわれの方向を考えると、その温度応力の解析方法としてCPMは有効な方法である。また、これらの解析手法を用いてより精度の高い事前予測を行うには、硬化過程におけるコンクリートの物性値を適切に取り入れることも必要である。

そこで今回、ボックスカルバートにおける温度応力発生状況を調べるとともに、CPMの適用性を検討するために、コンクリートの温度、ひずみおよび温度応力を実測し、その硬化時挙動を調査し、さらに硬化過程におけるコンクリートの物性値についても考察を行った。

## 2. 施工条件と対象構造物

図-1に今回の計測の対象となるブロック長10.0m一層ボックスカルバートの断面図、およびコンクリートの打設区分を示す。

打設は底版（第1リフト、8月打設）、柱（第2リフト、10月打設）、側壁および頂版（第3リフト、12月打設）の順で行われた。なお、コンクリートの配合を表-1に示す。

## 3. 計測概要

同じく図-1に各種センサーとその配置位置を示す。計測はブロック中央部について行い、カルバートの軸方向挙動を把握するため、各センサーとも断面に対して直角方向に取り付けた。

表-1 コンクリートの配合表

粗骨材の 最大寸法 (mm)	スランプ の範囲 (cm)	空気量 の範囲 (%)	水セメント比 W/C(%)	細骨材 率 s/a(%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				
					W	C	S	G	混和剤
25	8±2.5	4±1	55.5	43	158	285	784	1068	0.892

セメントの種類：普通ポルトランドセメント

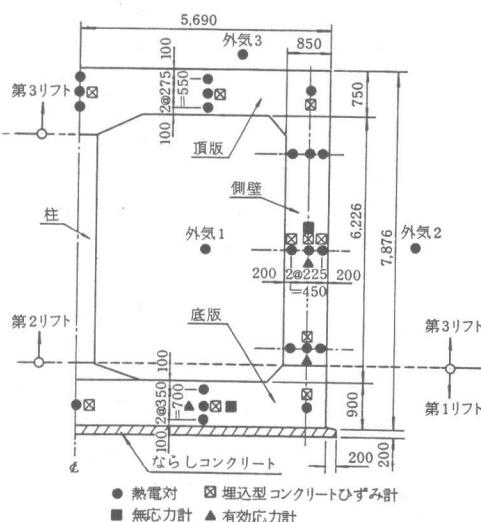


図-1 ボックスカルバートの断面図

埋込型ひずみ計は、断面内の直線的なひずみ分布を仮定する（平面保持の仮定）CPMの妥当性を確認する目的で、断面内に10ヶ所配置した。また、無拘束状態の熱による自由膨張収縮量や乾燥収縮量を測定するために、底版と側壁の2ヵ所に無応力計を取り付けた。さらに、有効応力計を底版に1ヵ所、側壁に2ヵ所設けた。なお、計測は第1リフトと第3リフトについてのみ行った。

#### 4. 計測結果および考察

##### 4. 1 コンクリート温度

底版、側壁および頂版の中央部におけるコンクリート温度の経時変化をそれぞれ、図-2、図-3、図-4に示す。

図-2より、夏期に打設された底版のコンクリート温度は中心部において61°Cまで上昇しているが、上下境界面からの熱の逸散のため、断面内で温度分布が不均一となり最高温度を示す材令にも断面内でばらつきが認められた。また図-3および図-4より、両境界面に型枠を設置してある側壁においては断面内で大きな温度差は生じていないが、上境界面に養生マットを設置した頂版においては風の影響も加味されて上境界面からの熱の逸散が大きく断面内の温度分布が不均一となっている。

そこで、図-5の解析モデルについて、表-2に示す解析条件を用いた有限要素法による2次元温度解析を行った。なお、解析においては風の影響を考慮して、コンクリートと合板の熱伝達係数をそれぞれ2.0～10.0 (kcal/m<sup>2</sup>h°C) および2.0～8.0 (kcal/m<sup>2</sup>h°C) の範囲内で決定した。<sup>1)</sup>

図-6に底版における中心部の最高温度時の断面内温度分布を実測値と合わせて示すが、理論値と実測値がよく一致していることがわかる。

##### 4. 2 コンクリートの線膨張係数

側壁中段中心部の熱による自由膨張ひずみを無応力計により測定したが、そのひずみ増分と温度増分より若材令におけるコンクリートの線膨張係数を算定した。その経時変化を

図-7に示す。図より明らかなように、ごく若材令では線膨張係数はかなり大きな値を示すが、

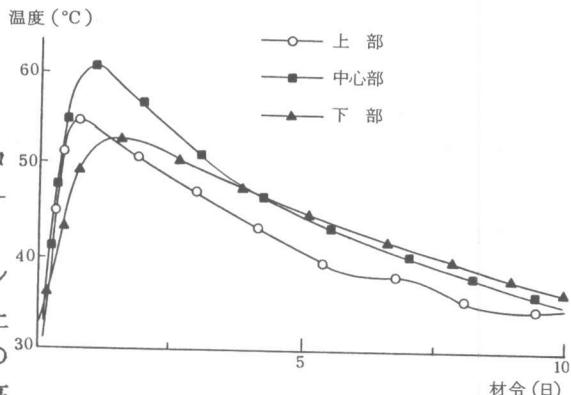


図-2 底版中央部における温度履歴

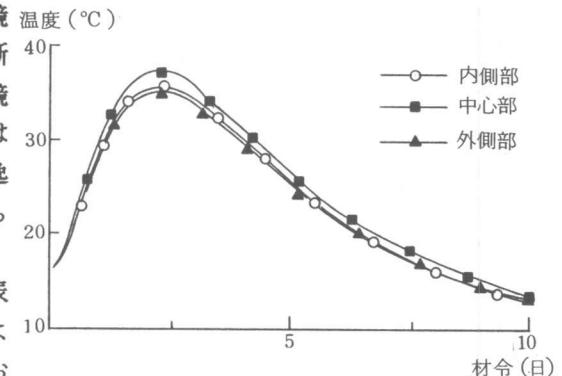


図-3 側壁中段における温度履歴

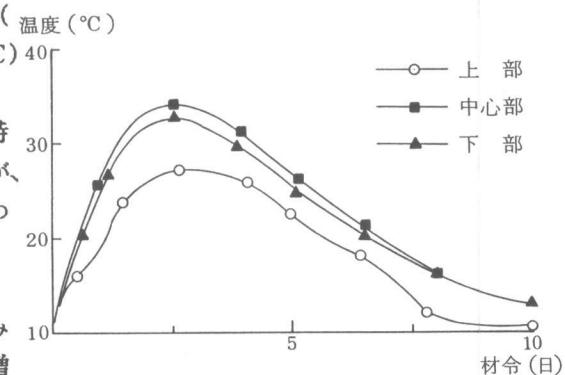


図-4 頂版中央部における温度履歴

表-2 解析条件

初期条件		
初期温度(°C)	地盤	20.0(15.0)
	コンクリート	30.0(16.0)
境界条件		
熱伝達係数 (kcal/m <sup>2</sup> h °C)	コンクリート	2.0～10.0
	合板	2.0～8.0
	養生マット+湛水	4.5
熱定数		
比熱(kcal/kg °C)	地盤	0.30
	コンクリート	0.22
熱伝導率 (kcal/mh °C)	地盤	1.0
	コンクリート	2.0
密度(kg/m <sup>3</sup> )	地盤	2500
	コンクリート	2350
断熱温度上昇式	夏期	$T = 42.4 (1 - e^{-1.408t})$
	冬期	$T = 44.3 (1 - e^{-0.502t})$

( ) : 冬期打設

その値は材令とともに急減し、ある材令以降はほぼ一定値をとる。<sup>2)</sup>

水の体膨張係数 $\beta$ は約 $200 \times 10^{-6}/\text{°C}$ であり、水を等方性と考えると線膨張係数は $\beta/3 \approx 70 \times 10^{-6}/\text{°C}$ となり、通常のコンクリートの線膨張係数に対する設計用値である $10 \times 10^{-6}/\text{°C}$ と比べると過大なものである。したがって、ごく若材令においては、コンクリート中に未水和状態で残留する水分の影響を大きく受けるために線膨張係数は大きな値を示すが、硬化に伴い水分の影響が減少し、線膨張係数は一定値をとるものと思われる。

なお、コンクリートの弾性係数がひずみ計の見かけの弾性係数より大きく卓越している温度下降域では、ひずみ計はコンクリートの変形に追従するので、ひずみ計により出力される値はほとんど真のひずみに近いものと考えることができる。一方、ごく若材令においてはコンクリートの弾性係数は極めて小さくコンクリートの膨張がひずみ計によって局所的に拘束されることが考えられる。したがって、ごく若材令においてはコンクリートの自由膨張ひずみ、および線膨張係数を過小評価していることになる。なお、温度が最高値をとる材令付近においては、計算上線膨張係数の値が発散するため、この範囲では図-7に点線で示す

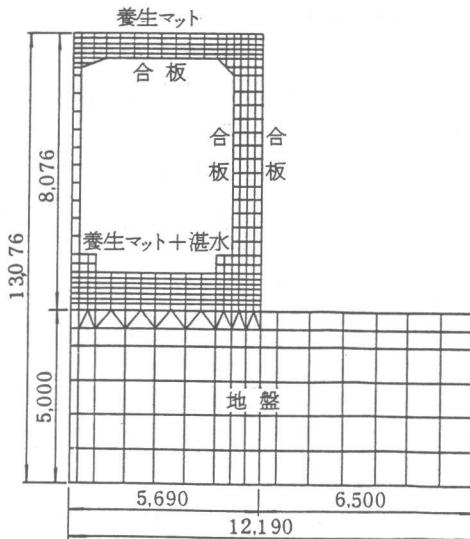


図-5 解析モデル

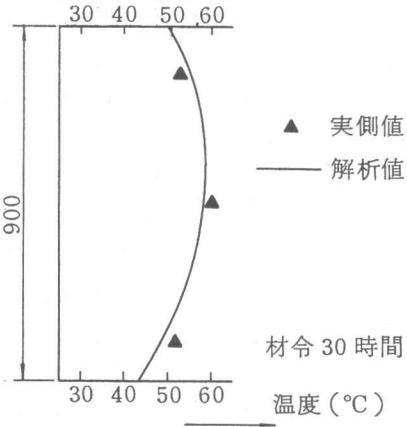


図-6 底版における温度分布

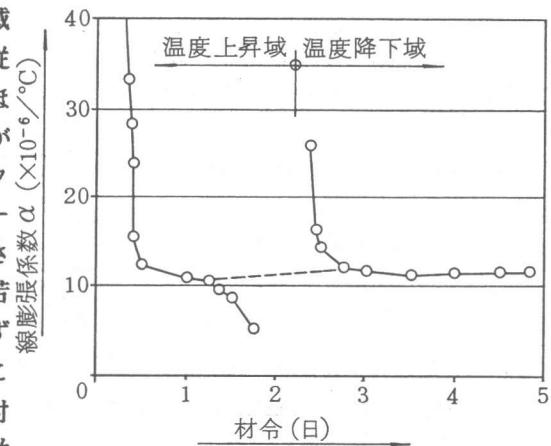


図-7 コンクリートの線膨張係数の経時変化

ように直線的に補間をした。

#### 4. 3 コンクリートの有効ひずみと有効応力

時刻  $t$  の有効ひずみと有効応力の関係式を式(1)～(4)に示す。

$$\Delta \sigma_{ef}(t) = E_{ef}(t) \cdot \Delta \varepsilon_{ef}(t) \quad (1)$$

$\Delta \sigma_{ef}(t)$  : 有効応力増分

$E_{ef}(t)$  : コンクリートの  
有効弾性係数

$$E_{ef}(t) = E_c(t) / (1 + \phi(t)) \quad (2)$$

$E_c(t)$  : コンクリートの弾性係数

$\phi(t)$  : クリープ係数

$\Delta \varepsilon_{ef}(t)$  : 有効ひずみ増分

$$\Delta \varepsilon_{ef}(t) = \Delta \varepsilon_p(t) - \Delta \varepsilon_t(t) \quad (3)$$

$$= \Delta \varepsilon_e(t) + \Delta \varepsilon_{cr}(t)$$

$$= (1 + \phi(t)) \cdot \Delta \varepsilon_e(t) \quad (3)$$

$\Delta \varepsilon_p(t)$  : 実測ひずみ増分

$$\Delta \varepsilon_p(t) = C\varepsilon \cdot \Delta \varepsilon(t) + \beta \cdot \Delta T(t)$$

$$- C\varepsilon \cdot X(\Delta T(t)) \quad (4)$$

$C\varepsilon$  : ひずみ計の校正係数

$\Delta \varepsilon(t)$  : ひずみ計の指示値増分

$\beta$  : ひずみ計の線膨張係数

$\Delta T(t)$  : 温度増分

$X(\Delta T(t))$  : 温度増分  $\Delta T$  による  
ひずみ計の零点移動量

$\Delta \varepsilon_t(t)$  : 温度による  
自由膨張ひずみ増分

$$\Delta \varepsilon_t(t) = \alpha(t) \cdot \Delta T(t) \quad (5)$$

$\alpha(t)$  : コンクリートの  
線膨張係数

$\Delta \varepsilon_e(t)$  : 弹性ひずみ増分

$\Delta \varepsilon_{cr}(t)$  : クリープひずみ増分

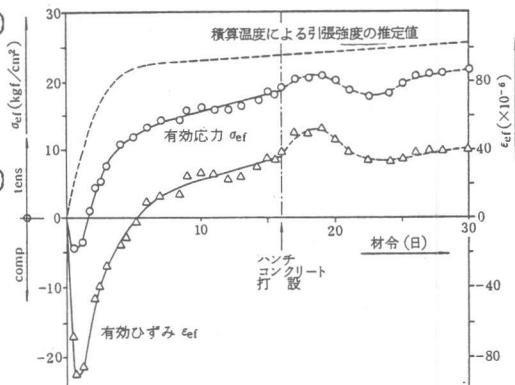


図-8 有効ひずみと有効応力（底版）

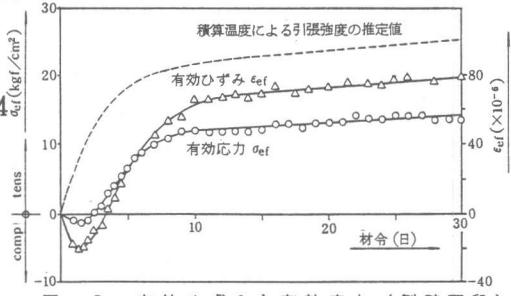


図-9 有効ひずみと有効応力（側壁下段）

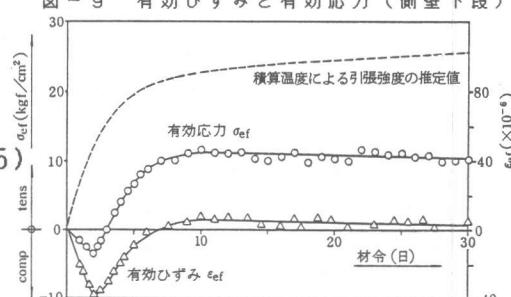


図-10 有効ひずみと有効応力（側壁中段）

底版中央部および、側壁（下段、中段）のそれぞれ中心部について、(3)式を用いて求めた有効ひずみと有効応力の経時変化をそれぞれ図-8、図-9、および図-10に示す。（なお、打設後12時間の値を初期値とした）

底版では断面内の温度差が大きいため内部的な拘束を受け、また打設長さ( $L$ )と打設高さ( $H$ )との寸法比( $L/H$ )が大きいため、地盤およびならしコンクリートから強い外部拘束を受ける結果、最終的に $2.3 \text{ kgf/cm}^2$ 程度の引張応力が発生している。

また、側壁においては表面に風の影響がほとんどなく、断面内での温度差が小さいため内部的大きな拘束力は加わらないが、既設コンクリートから外部拘束を受けるため、底版と比較すると過小ではあるが、下段で $1.4 \text{ kgf/cm}^2$ 、中段では $1.0 \text{ kgf/cm}^2$ ほどの引張応力が発生している。

また、いずれのケースも温度上昇時には圧縮ひずみ、および圧縮応力が生じ、式(1)に示されるようにひずみ増分 $\Delta \epsilon_{ef}$ が0となる材令で応力増分 $\Delta \sigma_{ef}$ も0となり、以降温度が降下域に入るとひずみ、応力増分とも引張方向に反転している。さらに、ここで有効応力が0となる材令での有効ひずみ量が初期の圧縮応力作用時のクリープ変形により生じた零点移動量と考えられる。

#### 4.4 コンクリートの有効弾性係数とクリープ係数

図-8、図-9、および図-10に示した有効ひずみと有効応力の関係を図-11に表す。

式(1)からわかるように、図-11の勾配はコンクリートの有効弾性係数を表しているが、区間①～③と材令の範囲により有効弾性係数が異なることがわかる。<sup>3) 4)</sup>

区間①は材令0から温度が最高値に達し、最大圧縮応力が発生するまでの範囲で、その後区間②で温度が下降域に入ると、有効弾性係数は不連続的に変化するが、応力が圧縮から引張へ反転しても有効弾性係数は連続的な変化を示す。

さらに区間③では、引張クリープに加えて、引張応力によるコンクリートの塑性化の影響が加味されるため、弾性係数は一層低減されることになる。

それぞれの区間における有効弾性係数の平均値は区間①で $0.65 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ 、区間②で $2.06 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ 、区間③では $1.69 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ となった。

また、温度解析結果から求まる積算温度より、洪の提案式<sup>1)</sup>を用いてコンクリートの圧縮強度を推定し、さらに弾性係数を推定することにより、式(2)を用いてクリープ係数 $\phi$ 、ならびに弾性係数低減率 $\eta$ を求めた結果を図-12に示す。若材令時では $\phi$ 、 $\eta$ とも大きな変化を示すが、材令とともに $\phi$ は増加し、逆に $\eta$ は減少しあ

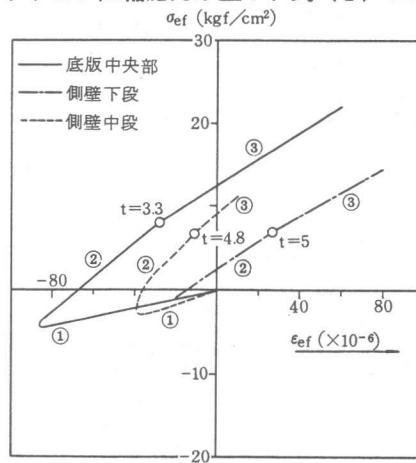


図-11 有効ひずみと有効応力の関係

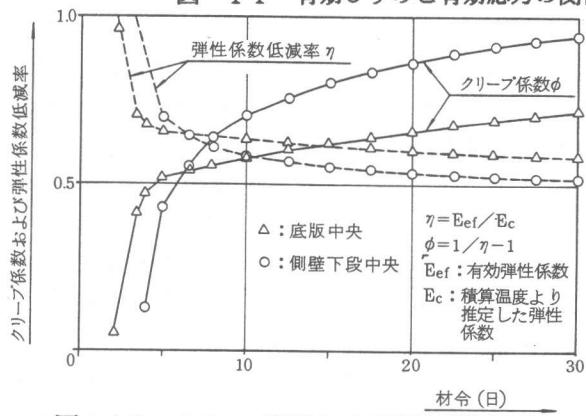


図-12 クリープ係数および弾性係数低減率

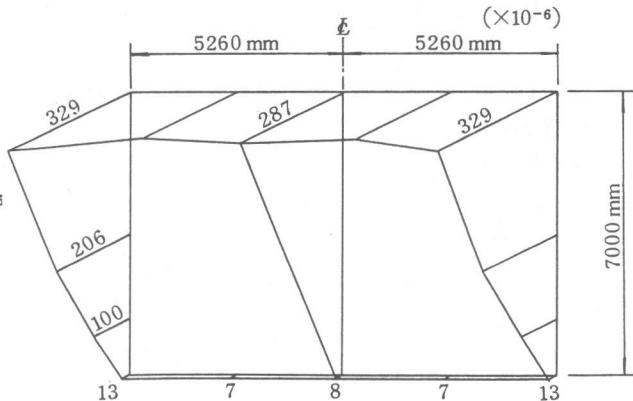


図-13 最高温度上昇時までの実測ひずみ増分の分布

る一定値に近づく。

なお、通常 $\varepsilon$ は1.0を越えることはないが、弾性係数に関しては推定値を用いたために、計算上1.0を越える結果となった。

#### 4. 5 CPMの適用検討

JCIマスコンクリートの温度応力研究委員会が提案したCPMは、式(4)で定義した実測ひずみが断面に直角な方向に直線分布を成しているという仮定(平面保持の仮定)に基づいている。

そこで、この仮定を検証するために打設開始から12時間経過後の値を初期値として最高温度上昇時におけるカルバート全断面にわたる実測ひずみ増分分布を求めた結果を図-13に示す。

頂版の両端においては外部拘束が小さく、ほとんど自由膨張に近いひずみが発生しているが、頂版中央部においては柱からの拘束を受けている。また、側壁においては地盤側に近づくほど実測ひずみは小さくなっている、全断面内ではほぼ直線的なひずみ増分分布を示している。

さらに、底版、および側壁(下段、中段)についてCPMにより応力解析を行った結果を実測値と合わせて図-14に示す。なお解析においては軸方向拘束係数 $R_N$ を0.2、曲げ拘束係数 $R_M$ を1.0とした。

同図より底版においては解析値と実測値の両者は比較的よく一致している。また、側壁に関しては、解析値が実測値より大きくなる傾向があるが、実用上においては問題はないと思われる。

#### 5. 結論

- 1) 式(1)を利用して、ごく若材令におけるコンクリートの有効弾性係数を求めるには、ごく若材令のコンクリートおよびセンサーの熱膨張特性を把握する必要がある。
- 2) CPMは一種の曲げ理論を用いており、対象構造物の寸法比が $L/H > 1$ の範囲内でのみ適用可能である。<sup>5)</sup>本ボックスカルバートにおいては、 $L/H$ が約1.3と小さくCPMの適用限界に近いところであるにもかかわらず、断面内のひずみ増分はほぼ直線分布をしており、中空断面を有するボックスカルバートにもひずみ増分の直線性を仮定したCPMは十分に適用可能であることが判った。

#### (参考文献)

- 1) マスコンクリートのひびわれ制御指針：日本コンクリート工学会第2回マスコンクリート工学協会：第2回マスコンクリート工学協会、1984
- 2) 竹下、浅沼、横田「マスコンクリートの温度応力発生メカニズムに関する論文集」：日本コンクリート工学協会、1982
- 3) 田沢、飯田「硬化時温度応力発生メカニズムに関する論文集」：日本コンクリート工学協会、1982
- 4) 青畠、伊藤、「マスコンクリートの有効弾性係数に関する実験的研究」：第8回コンクリート工学年次講演会論文集、1986
- 5) コンクリート標準示方書改訂資料：土木学会第61号（コンクリート標準示方書改訂資料）：土木学会
- 6) 青畠、前野、「大断面ボックスカルバートの硬化時温度応力について」：第2回マスコンクリート工学協会、1984
- 7) 竹下、浅沼、横田「ボックスカルバートの温度応力の実測と解析」：第8回コンクリート工学年次講演会論文集、1986

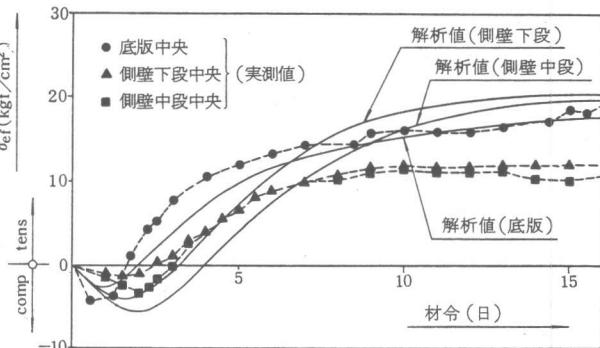


図-14 発生応力とCPMによる解析値との比較