

## 第4回 温度応力解析あれこれ!?

### — 解析事例 —

講師：吉川 信二郎\*

前回は温度応力発生メカニズムや、解析に必要な物性データと解析条件の設定方法などについて解説しました。今回は、温度応力解析の解析事例として①張出し架設を行うPC桁の柱頭部、②複合構造（鋼桁とコンクリート床版）の2例について、データ作成から結果の評価まで行うこととします。

#### 1. 柱頭部の温度応力解析

既設の橋脚に柱頭部を3リフト<sup>注)</sup>に分けて打設します。検討ケースは、セメント種類を高炉セメントと低熱セメント、リフト数を3リフトと5リフトおよび、打設開始日を変えた全4ケースとします。

<sup>注)</sup> ダムなどの打設は層ごとに行われますが、その1層をリフトと呼び、層の厚さをリフト厚あるいはリフト高と呼びます。また、一般の土木構造物では層状の打設ばかりではありませんのでロットと呼ぶことも多いようです。

##### 1.1 解析対象

解析対象構造を図-1に示します。構造の対称性から1/4モデルを解析します。

図-2に解析対象の寸法を、図-3にメッシュ分割図を示します。当然のことながら打継ぎ部は必ずメッシュ分割されなければなりません。また、上下床版、ウエブは両面が熱伝達境界面になりますから、厚み方向に3分割します。(44巻5号講座参照)

##### 1.2 解析ケース

表-1に示すような4ケースの解析を実施します。

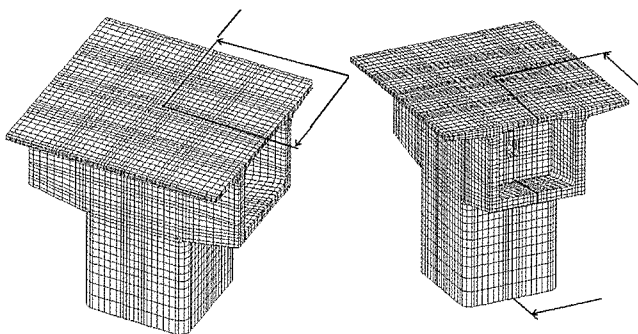


図-1 解析対象と解析領域

表-1 解析ケースの一覧

ケース番号	セメント種類	リフト数	打設開始日	打設間隔
1	高炉セメント	3	7月4日	30日
2	低熱セメント	3	7月4日	30日
3	低熱セメント	3	2月4日	30日
4	低熱セメント	5	7月4日	30日

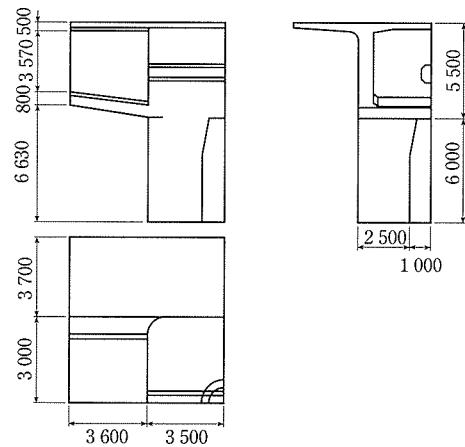


図-2 解析対象構造の寸法

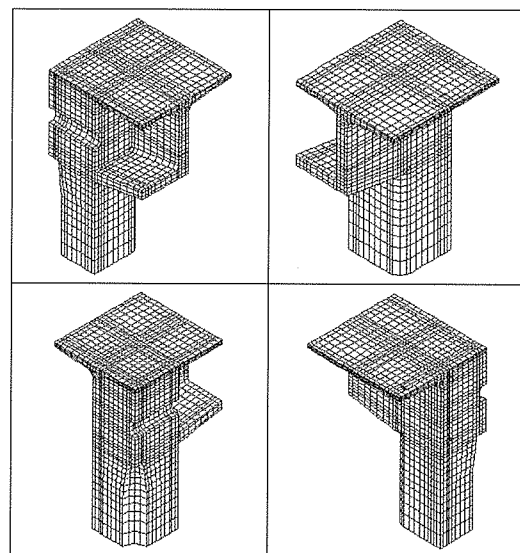


図-3 メッシュ分割図

\* Shinjiro YOSHIKAWA : (株) 計算力学研究センター 常務取締役

表 - 2 物性データ

	単 位	新 設 コンクリート	既 設 コンクリート
熱伝導率 $\lambda$	W/m °C	2.7	2.7
密度 $\rho$	kg/m <sup>3</sup>	2 400	2 350
比熱 C	kJ/kg °C	1.16	1.16
断熱温度上昇特性 $Q(t)=Q_{\infty}(1-e^{-rt})$ $Q_{\infty}$ r	°C —	表 - 3 のセメント種類と 打込み温度による	発熱なし
弾性係数 $E_c$	N/mm <sup>2</sup>	$E_c(t) = \phi(t) \times 4.7 \times 10^4 \sqrt{f_c(t)}$	29 000
圧縮強度 $f_c$	N/mm <sup>2</sup>	$f_c(t) = t \times 40 / (a + b \times t)$ a, bは表 - 4 のセメント種類による	45
引張強度 $f_t$	N/mm <sup>2</sup>	$0.44 \sqrt{f_c}$	2.95
ポアソン比	—	0.2	0.18
線膨張係数	1/°C	$10 \times 10^{-6}$	$10 \times 10^{-6}$
クリープ構成則	—	有効弾性係数法による	考慮しない
乾燥収縮ひずみ	—	考慮しない	考慮しない
自己収縮ひずみ	—	考慮しない	考慮しない
鉄筋	—	考慮しない	考慮しない

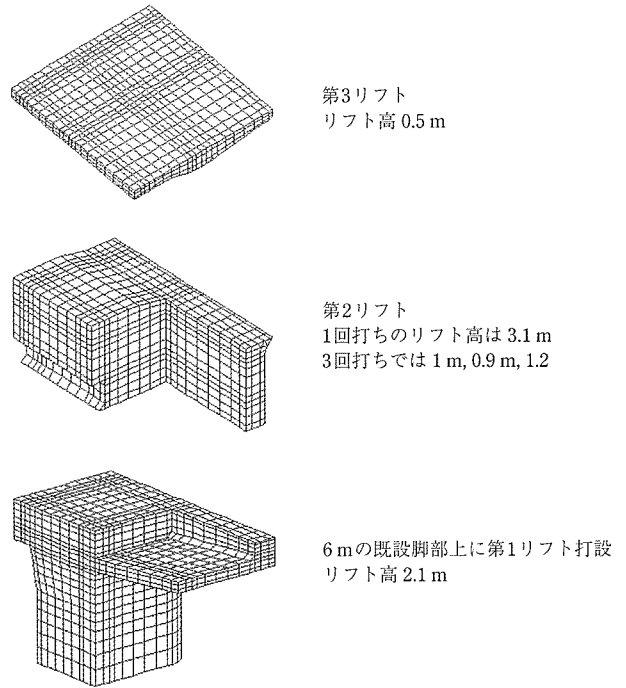


図 - 4 リフト割り

表 - 3  $Q_{\infty}$ と r の標準値

セメント種類	打込み温度 (°C)	$Q(t) = Q_{\infty}(1 - e^{-rt})$			
		$Q_{\infty} = aC + b$		$r = gC + h$	
		a	b	g	h
高炉セメント	10	0.11	14.0	0.0014	0.073
	20	0.10	15.0	0.0025	0.207
	30	0.10	15.0	0.0035	0.332
低熱セメント (参考値)	10	0.090	14.0	0.00042	0.073
	20	0.087	14.4	0.00076	0.207
	30	0.084	14.9	0.00106	0.332

ケース 1 とケース 2 はセメント種類の違いを比較し、ケース 2 とケース 3 は打設時期の差を比較します。ケース 4 はケース 3 の第 2 リフトを 3 分割したもので、リフト数の差を比較するものです。図 - 4 はケース 3 の打継ぎ位置を示します。

### 1.3 解析条件

#### (1) 物性データ

使用する物性データを表 - 2 に示します。

#### ① 断熱温度上昇特性

高炉セメントの場合は土木学会コンクリート標準示方書 施工編 2002 年制定 (以下 RC 示方書) によれば、打込み温度と単位セメント量より、表 - 3 のように標準値を決定できます。低熱セメントのデータは RC 示方書に掲載されていないので、セメント会社様から頂いたデータを使用しました。

コンクリートの打込み温度は外気温度 + 3 度として、外気温は表 - 6 の月別平均気温を使用します。ケース 3 においては 2 月、3 月の打込み温度が 10 度以下になりますが、次のように打込み温度が 10 度のデータを使用して、パラメータの値を決定します。

低熱セメント (単位セメント量 370 kg/m<sup>3</sup>)  
 $Q_{\infty} = 0.090 \times 370 + 14.0 = 47.3$

$$r = 0.00042 \times 370 + 0.073 = 0.228$$

その他の打込み温度に対するパラメータの値は、表 - 3 の値を線形補間して決定します。

図 - 5 に打込み温度 20 °C、単位セメント量 370 kg/m<sup>3</sup> としたときの両セメントの断熱温度上昇特性を比較したグラフを示します。

#### ② 圧縮強度

高炉セメントの強度発現式は RC 示方書によると、中庸熱ポルトランドセメントと同等の値を用いてよいとされています。低熱セメントのデータは RC 示方書に掲載されていないので、セメント会社様から頂いたデータを使用しました。表 - 4 に使用したパラメータの値を示します。材齢 91 日の設計基準強度を 40 N/mm<sup>2</sup> とすると、材齢 t 日の圧縮強度が  $f_c(t) = t \times 40 / (a + b \times t)$  N/mm<sup>2</sup> となります。

図 - 6 に両セメントの材齢対圧縮強度のグラフを示します。

#### ③ 有効弾性係数法

強度発現に伴う剛性の変化とクリープによる応力緩和を平均的に扱う方法として、剛性低下を考慮した有効弾性係数を用いて、温度応力計算が行われています。有効弾性係数は式 (1) に示すように、弾性係数に補正係数を掛けて求められます。補正係数と材齢の関係を図 - 7 に示します。

$$E_c(t) = \phi(t) \times 4.7 \times 10^4 \sqrt{f_c(t)} \quad (1)$$

ここに、 $E_c(t)$ : 材齢 t 日における有効弾性係数 (N/mm<sup>2</sup>)

$\phi(t)$ : 弾性係数の補正係数

材齢 3 日まで  $\phi = 0.73$

材齢 5 日以降  $\phi = 1.0$

材齢 3 ~ 5 日は線形補間

表 - 4 強度発現式のパラメータ

セメント種類	a	b
高炉セメント	6.2	0.93
低発熱セメント (参考値)	27.4	0.7

表 - 5 熱伝達境界一覧

部 位	熱伝達率 (W/mh℃)	メ モ
上床版上面、打継ぎ面	5 → 12	材齢 7 日までマット養生
側面、穴まわり	8 → 12	材齢 7 日まで合板型枠
橋脚外面、内部表面	12	一定値

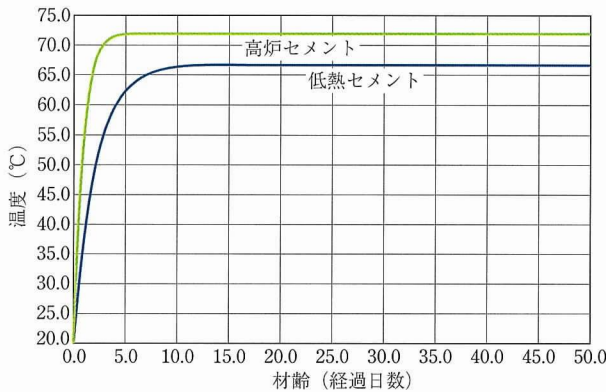


図 - 5 断熱温度上昇特性の比較

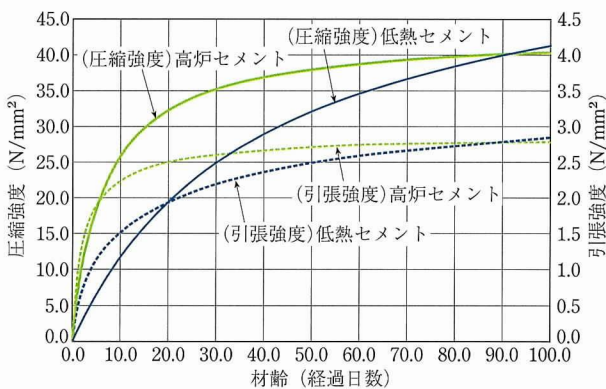


図 - 6 強度発現特性の比較

$f_c(t)$ : 材齢  $t$  日の圧縮強度 (N/mm<sup>2</sup>)

(2) 境界条件

① 熱伝達境界と外気温

熱伝達境界一覧と外気温として使用した月別平均気温を表 - 5, 表 - 6 に示します。また外気温の変動パターンを図 - 8 に、熱伝達境界を図 - 9 に示します。

③ 打設工程と初期温度

各計算ケースの打設工程と初期温度 (打込み温度) を表 - 7 に示します。既設コンクリートの初期温度は、

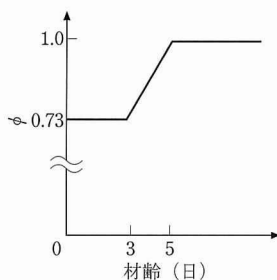


図 - 7 補正係数の変動

表 - 6 月別平均気温 (°C)

1 月	4.6	7 月	26.9
2 月	5.0	8 月	28.4
3 月	8.2	9 月	24.2
4 月	14.4	10 月	17.3
5 月	18.9	11 月	12.0
6 月	23.1	12 月	6.8

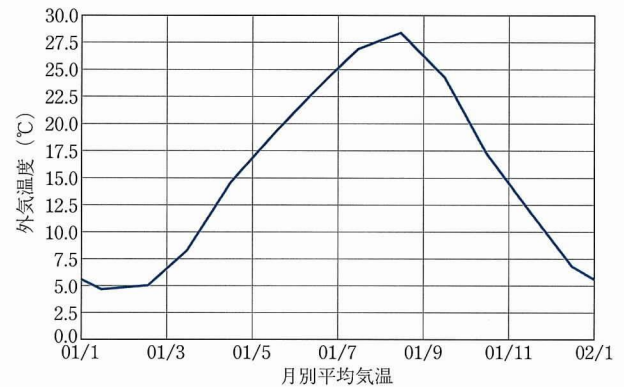


図 - 8 月別平均気温

打設開始時の外気温と同じとし、新設コンクリートの打込み温度は外気温 + 3 度としました。

④ 拘束条件

対称面上の節点には対称条件を設定します。すなわち、対称面に垂直方向の自由度 (変位成分) を拘束します。橋脚下面の節点は鉛直方向の自由度を拘束します。

⑤ 解析時間刻み

打設直後の 1 日を 3 時間、次の 1 日を 4 時間刻みとして徐々に粗い刻みに移行し、後行リフト打設とともに細かい時間刻みに戻します。この関係を図 - 10 に示します。温度解析と応力解析の時間刻みは同じものとし、打設間隔の時間刻みを表 - 8 のように設定します。

1.4 解析結果

表 - 9 に解析結果の比較一覧を示します。最高温度や最小ひび割れ指数の出現部位は計算ケースによって異なります。5 リフトモデルについては、3 リフトモデルとの対応をわかりやすくするために、第 2~4 リフトを 2-1, 2-2, 2-3 リフトと表記することとします。

(1) セメント種類による結果の比較

図 - 11 (a), (b) はケース 1 およびケース 2 の最高温度経験値<sup>注)</sup>で、図 - 12 (a), (b) がリフトごとの最高温度出現部位における温度時刻歴です。高炉セメントを使用したケース 1 の最高温度は 81°C で温度上昇量は 50 度、低熱セメントを使用したケース 2 の最高温度は 72°C で温度上昇量は 41 度となっています。ひび割れ指数の最小値は、高炉セ

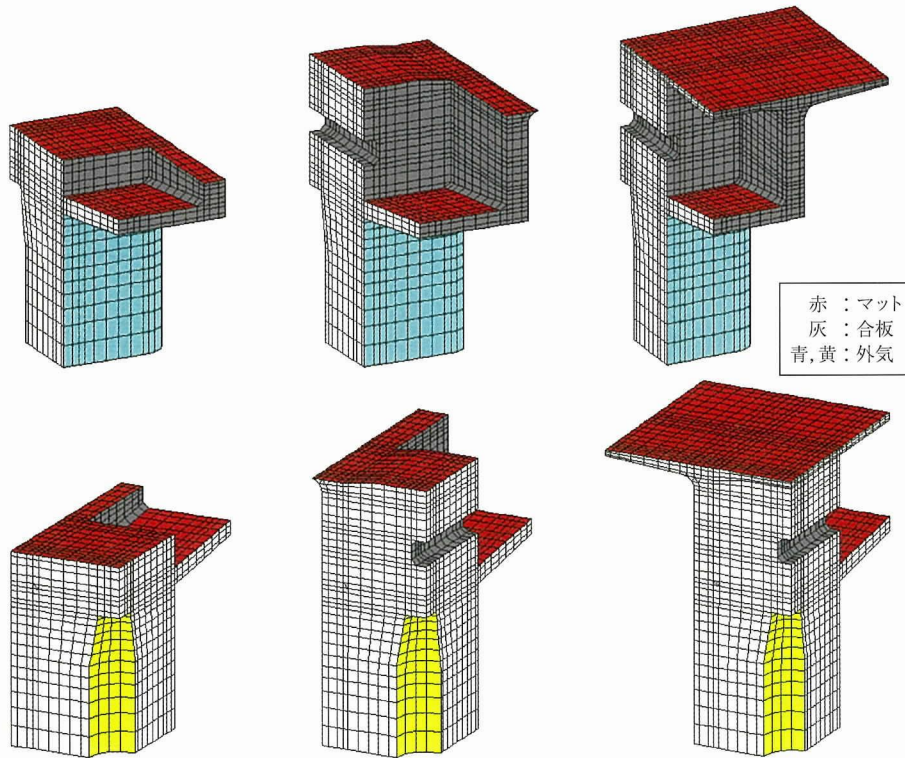


図 - 9 熱伝達境界

メントのケースで0.6, 低熱セメントのケースでは若干改善されて0.7となっています。

図 - 13 は各リフト打設後3日目の温度コンターを, 両ケースの比較で示したものです。

注) 最高温度経験値とは解析期間を通して, 各節点に発生した最高温度を拾って表示したもので, 各節点の最高温度出現時刻はまちまちです。

表 - 7 打設工程と (初期温度℃)

リフト	ケース1~2	ケース3	ケース4
1	7月4日 (28.0) (既設コン 25.0)	2月4日 (7.8) (既設コン 4.8)	7月4日 (28.0) (既設コン 25.0)
2	8月4日 (30.7)	3月4日 (9.6)	8月4日 (30.7)
3	9月4日 (29.3)	4月4日 (14.3)	9月4日 (29.3)
4			10月4日 (23.8)
5			11月4日 (17.7)

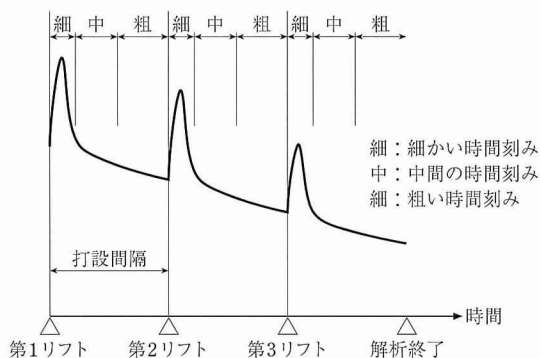


図 - 10 時間刻みの設定

### (2) 打設時期による結果の比較

夏季打設のケース2と冬季打設のケース3の結果を比較してみます。ケース3の温度上昇量はケース2のそれより, 第1リフトではおよそ10度, 第2リフトでは4度低くなっています。図 - 14 (a), (b) に両ケースのひび割れ指数

表 - 8 解析時間刻み

時間 (h)	時間刻み (h)
0 ~ 24	3.0
~ 48	4.0
~ 96	8.0
~ 192	16.0
~ 384	32.0
~ 768	64.0
~ 1536	128.0
~ 2816	256.0
~ 2832	16.0

経験最小値のコンター図を示します。また, 図-15 (a), (b) にひび割れ指数の時刻歴図を示します。ケース3では温度上昇量がかなり低下したにもかかわらず, ひび割れ指数の最小値が0.8とケース2に比べ, あまり変わらない結果となっています。また, 第1リフトのひび割れ指数はケース3のほうが0.2小さくなっています。図 - 15のひび割れ指数の時刻歴で, 材齢初期に発生するひび割れ指数の低下は内部拘束応力によるもので, ケース2では材齢2.3日で最小ひび割れ指数1.0, ケース3では材齢8日で0.8となっています。外気温度の低いケース3では材齢7日の脱型が温度勾配をさらに厳しくしたために生じたものと考えられます。どちらのケースも, 内部拘束応力による表面ひび割れ



表 - 9 解析結果の比較一覧

ケース	リフト	打設日	打込温度 (°C)	最高温度 (°C)	温度上昇量 (度)	最小指数	最小指数の材令(日)
1	1	7月4日	28.0	75.9	47.9	0.7	32.0
	2	8月4日	30.7	81.1	50.4	0.6	1.2
	3	9月4日	29.3	55.1	25.8	2.1	0.5
2	1	7月4日	28.0	65.9	37.9	1.0	2.3
	2	8月4日	30.7	71.9	41.2	0.7	2.0
	3	9月4日	29.3	45.0	15.7	1.5	8.0
3	1	2月4日	7.8	35.9	28.1	0.8	8.0
	2	3月4日	4.8	42.0	37.2	0.8	5.0
	3	4月4日	9.6	27.7	18.1	3.3	15.7
4	1	7月4日	28.0	65.9	37.9	1.0	2.3
	2-1	8月4日	30.7	57.2	26.5	0.9	8.0
	2-2	9月4日	29.3	54.2	24.9	0.8	31.8
	2-3	10月4日	23.8	51.5	27.7	0.7	31.5
	3	11月4日	17.7	40.6	22.9	1.0	9.7

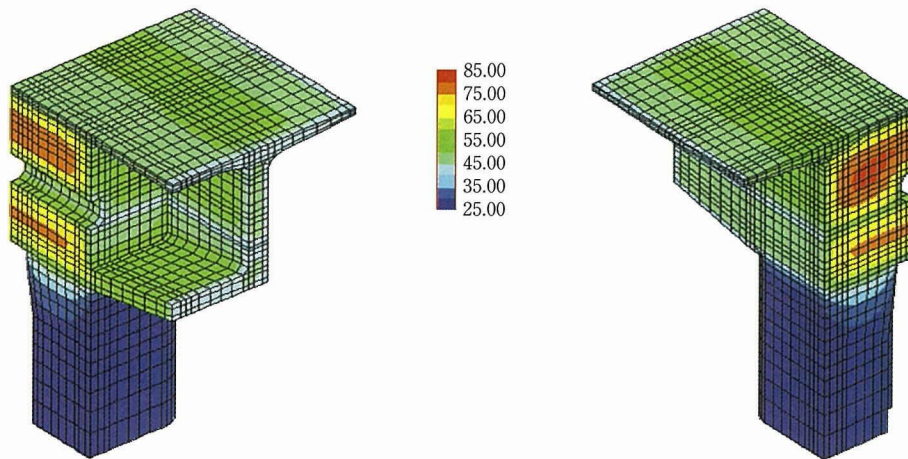


図 - 11(a) 最高温度経験値 (高炉セメント)

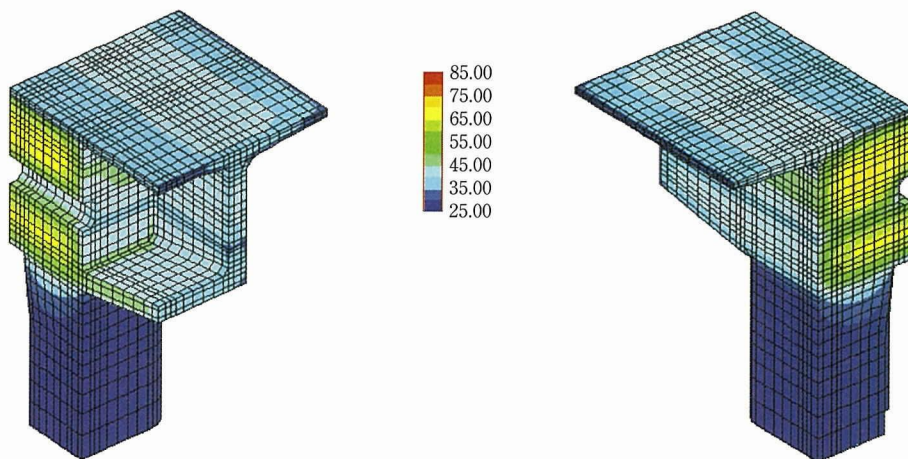


図 - 11(b) 最高温度経験値 (低熱セメント)

が発生する可能性が極めて高いといえます。

(3) リフト分割による結果の比較

図 - 16 にリフト数を増やしたケース 4 の最小ひび割れ指数経験値のコンター図を、図 - 17 にひび割れ指数の時刻歴

図を示します。ひび割れ指数は 0.7~1.0 となっています。第 3 および第 4 リフトのひび割れ指数は後行リフト打設に伴い、急激に低下しています。

図 - 18(a) に後行リフト打設に伴う先行リフトの温度分

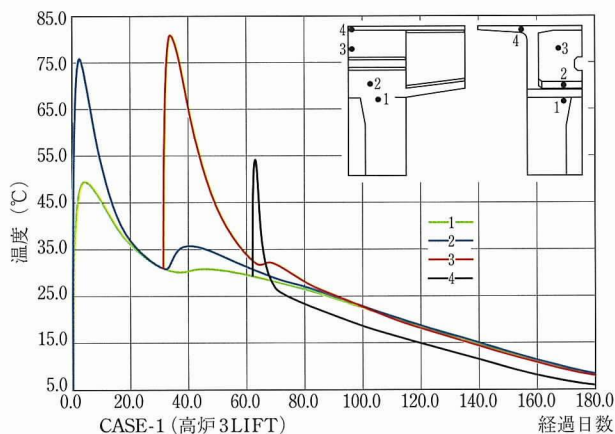


図 - 12(a) 温度時刻歴 (高熱セメント)

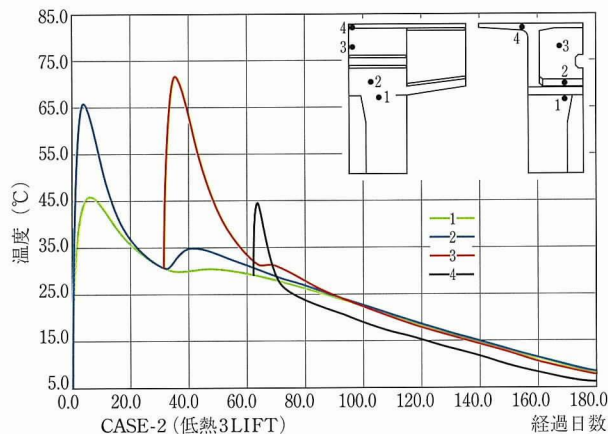


図 - 12(b) 温度時刻歴 (低熱セメント)

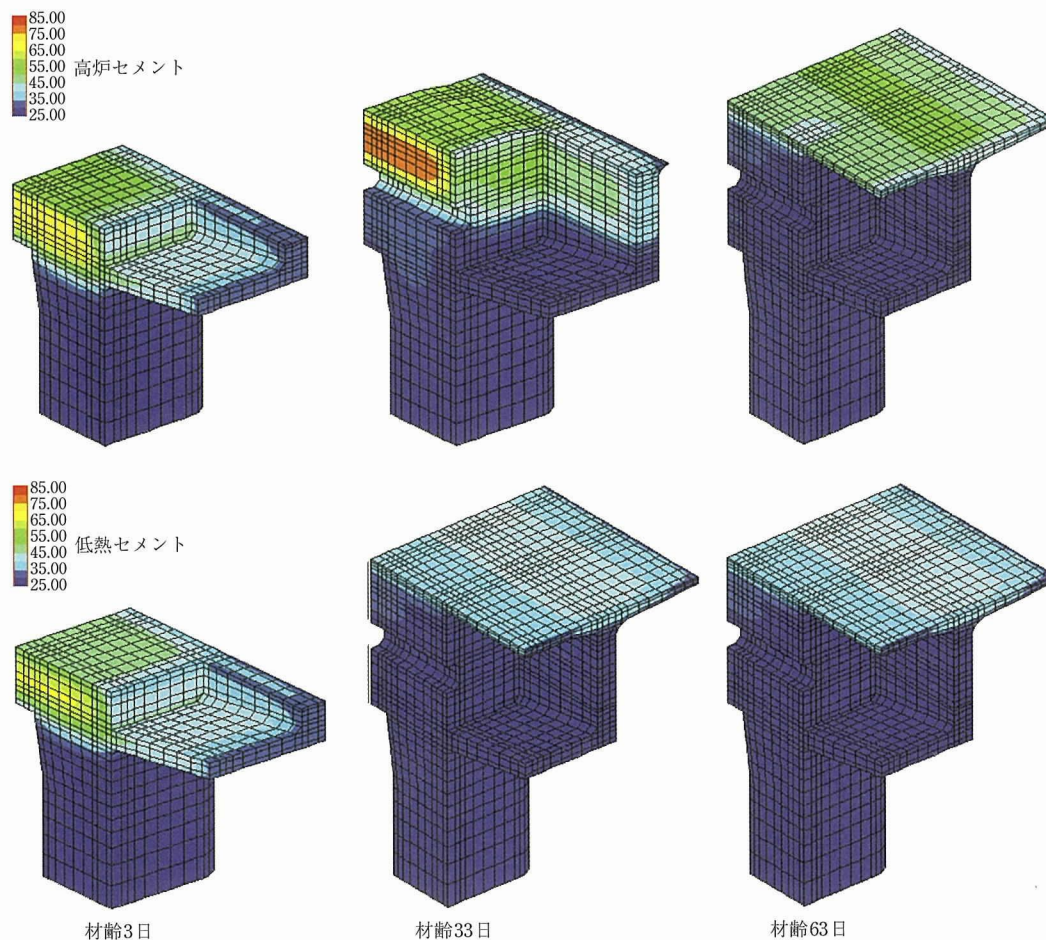


図 - 13 打設後3日の温度分布比較

布と応力分布を示します。後行リフト打設による先行リフトの温度分布は、打継ぎ面では高く内部で低くなり、表面部に圧縮応力を、内部に引張応力を生じさせます。打継ぎ直前では、外部拘束により、先行リフトの表面で圧縮応力が、内部では引張り応力が生じていましたが、打継ぎによる内部拘束応力がさらにその応力を大きくする向きに作用しています。図 - 18(b) の温度と応力の時刻歴で、その様

子を理解する事ができます。このようにリフト厚を小さくすると後行リフトの影響が顕著になることもあります。このケースでもひび割れ指数の大幅な改善は見られません。

(4) 鉄筋量の算定

いずれのケースも最小ひび割れ指数が1以下であり、高い確率でひび割れが発生する可能性があります。ここでは低熱セメントによる夏季打設のケース2で鉄筋量の算定を



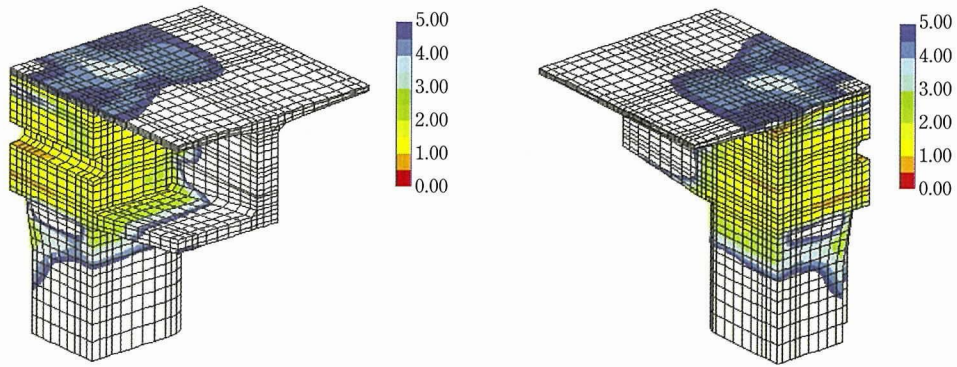


図 - 14(a) 経験最小ひび割れ指数 (ケース 2 : 夏季打設)

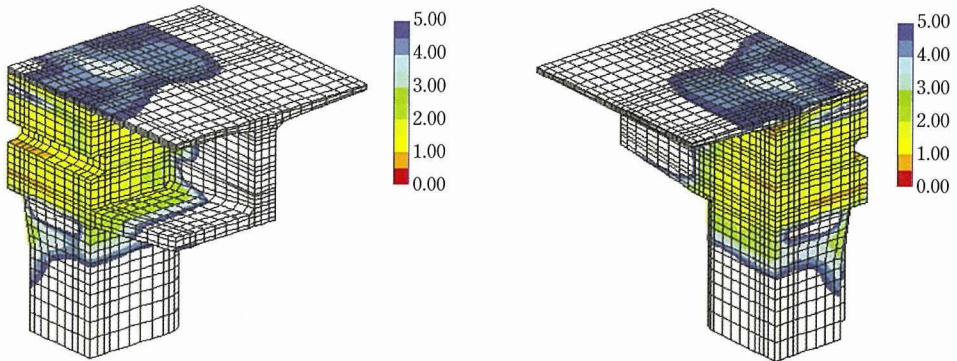


図 - 14(b) 経験最小ひび割れ指数 (ケース 3 : 冬季打設)

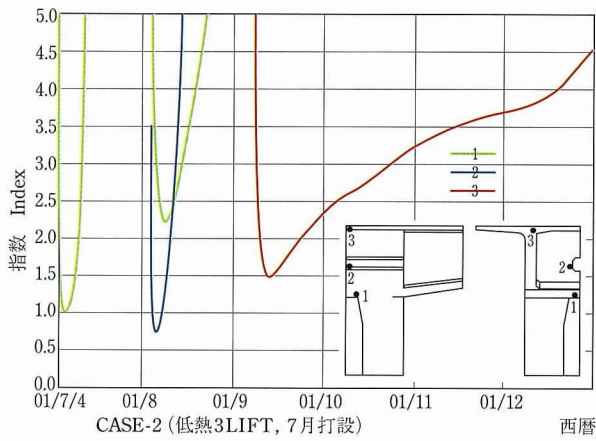


図 - 15(a) ひび割れ指数の時刻歴 (ケース 2 : 夏季打設)

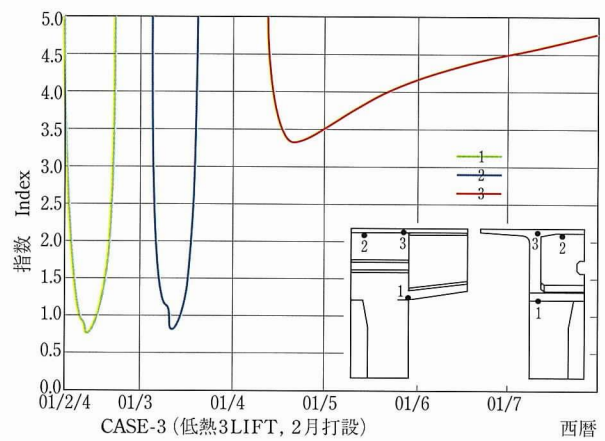


図 - 15(b) ひび割れ指数の時刻歴 (ケース 3 : 冬季打設)

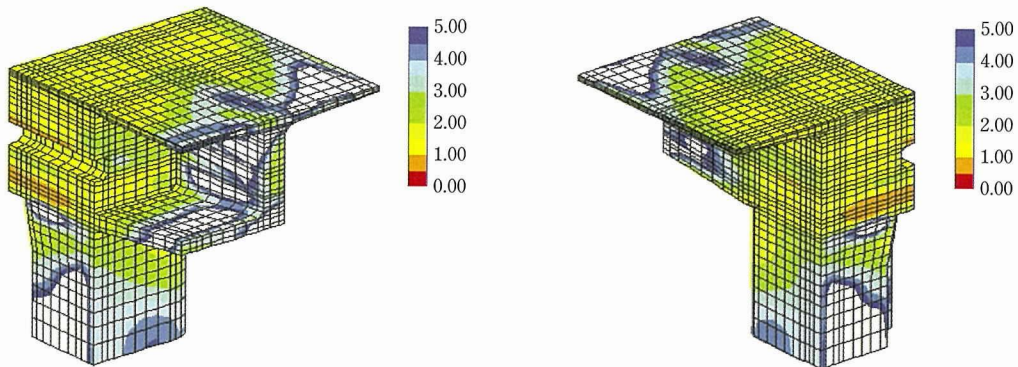


図 - 16 最小ひび割れ指数経験値 (ケース 4)

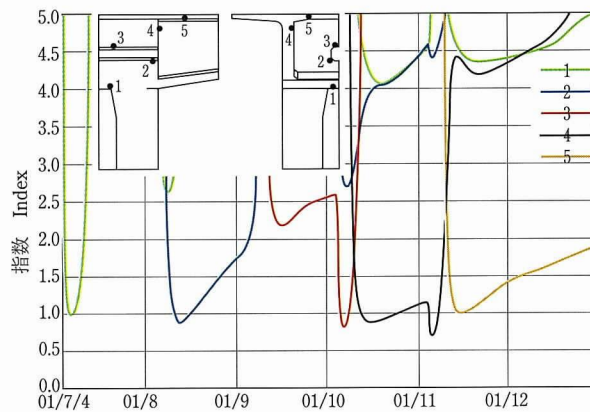


図 - 17 ひび割れ指数の時刻歴 (ケース 4)

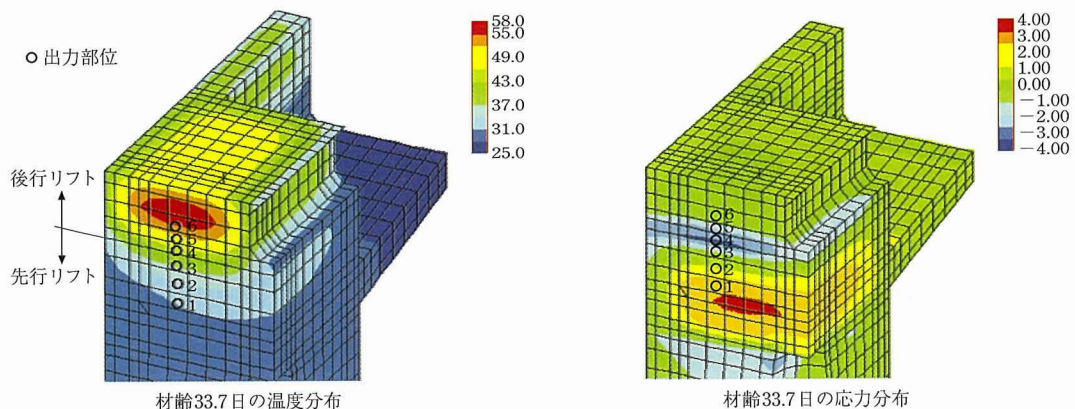


図 - 18(a) 材齢 33.7 日の温度および応力の分布

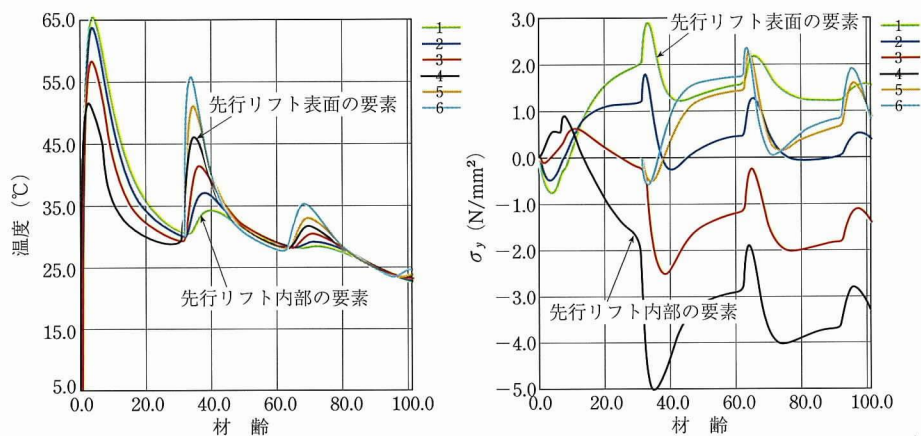


図 - 18(b) 出力部位の温度および応力の時刻歴

試みてみます。第2リフトでひび割れ指数の最小値は0.7となっており、これは開口部まわりに内部拘束応力による表面ひび割れを発生させるものと考えられます。第1、第2リフトの内部の広い領域で、後行リフト打設時にひび割れ指数が0.7となり、以降、材齢の経過とともに1以上に回復しています。図 - 19、図 - 20 参照。図 - 21 は最小ひび割れ指数の発生した材齢 3.3 日の主応力図です。開口を回り込む応力と、橋軸方向および橋軸直角方向の応力が発生しています。図 - 22 は橋軸方向応力成分の時刻歴で、最大応力が 3.4 N/mm<sup>2</sup> となっています。プレストレスの導

入によりこの応力を低減させることも可能ですが、ここでは、この応力を鉄筋がもつとし、鉄筋の応力を降伏応力以下の 400 N/mm<sup>2</sup> にするならば、鉄筋比は 3.4/400 と計算して 0.85% となります。

(5) ま と め

- ・高炉セメントを使用した場合に比べ低熱セメントを使用すると温度上昇量が減少しひび割れ指数が 0.1 改善されました。
- ・低熱セメントを使用した夏季打設と冬季打設の比較では顕著な差は見られませんでした。



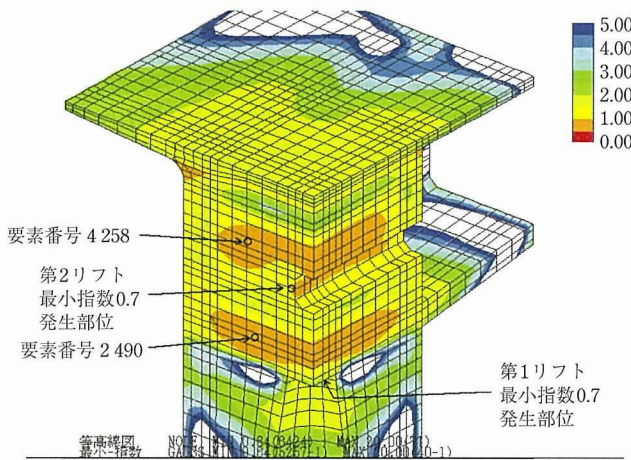


図 - 19 ひび割れ指数最小値発生部位

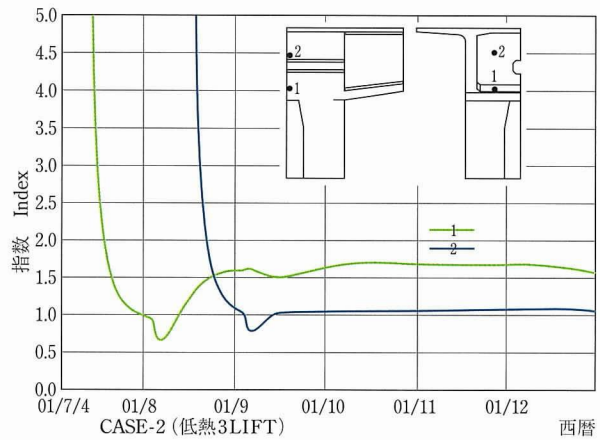


図 - 20 第1, 2リフト中央部のひび割れ指数時刻歴

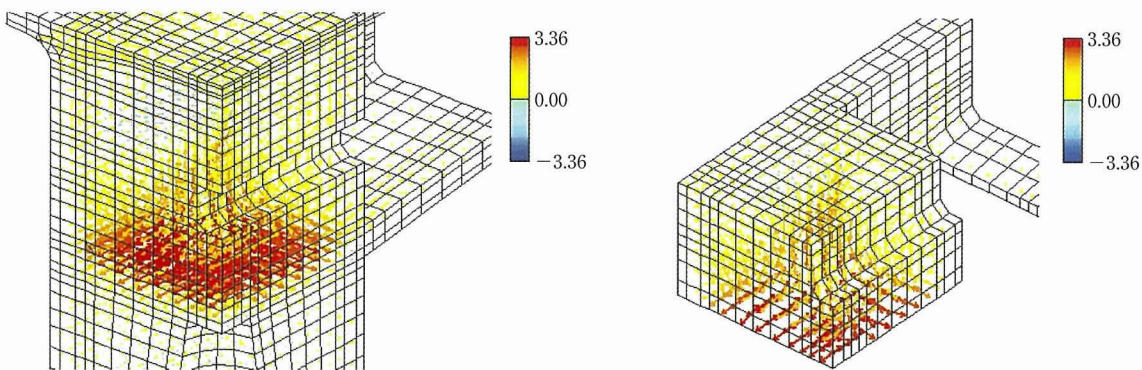


図 - 21 主応力矢線図

- ・低熱セメントを使用してリフト数を増やしたケースは、全体的にひび割れ指数の改善がはかれるものの後行リフトの影響が大きく、その効果大きくはないようです。
- ・低熱セメントを使用するとした前提で、さらに検討すべき項目として下記が考えられます。
  - ① 打設間隔を短くし、先行リフトの応力が小さいうちに、後行リフトを打設する
  - ② プレクーリングにより打込み温度を下げて温度降下量を低減する
  - ③ 型枠存置期間を20日間に延ばし、内部拘束応力の低減を図る
  - ④ 単位セメント量を減らして温度上昇量を低減する

## 2. 複合構造の温度応力解析

鋼桁上にコンクリート床版を2リフト打設します。検討ケースは乾燥収縮ひずみを考慮しないケースと考慮するケースの2ケースとします。

### 2.1 解析対象

構造の対称性から1/2モデルを解析対象とします。図-23 (a), (b), (c) に全体構造、解析対象の構造寸法を、図-24 にメッシュ分割図を示します。床版の厚さは、端部で250 mm、主桁上で550 mm、支間中央で350 mmです。主桁の上下フランジの厚さは45 mm、ウェブ厚さは25 mmと

します。横桁は主桁下フランジ下面より250 mmから1250 mmに取り付き、厚さは15 mmとします。メッシュ分割は、床版の厚み方向は4分割、主桁との接合面は6分割、打継ぎ部は大きな応力が発生する可能性が高いので、橋軸方向に200 mmのメッシュとします。鋼材は厚み方向に1要素で分割します。

### 2.2 解析条件

#### (1) 物性データ

使用する物性データを表-10に示します。

#### ① 乾燥収縮ひずみ

乾燥収縮ひずみを考慮する場合は、以下に示すRC示方書の定義式を使用します。

$$\epsilon'_{cs}(t, t_0) = [1 - \exp\{-0.108(t, t_0)^{0.56}\}] \cdot \epsilon'_{sh} \quad (2)$$

$$\epsilon'_{sh} = 50 + 78 [1 - \exp(-RH/100)] + 38 \log_e W - 5 [\log_e ((V/S)/10)]^2 \quad (3)$$

$\epsilon'_{sh}$  : 収縮ひずみの最終値 ( $\times 10^{-5}$ )

$\epsilon'_{cs}(t, t_0)$  : コンクリートの材齢  $t_0$  から  $t$  までの収縮ひずみ ( $\times 10^{-5}$ )

$RH$  : 相対湿度 (%) ( $45\% \leq RH \leq 80\%$ )

$W$  : 単位水量 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) ( $130 \text{ kg}/\text{m}^3 < W < 230 \text{ kg}/\text{m}^3$ )

$V$  : 体積 ( $\text{mm}^3$ )

$S$  : 外気に接する表面積 ( $\text{mm}^2$ )

$VS$  : 体積表面積比 (mm) ( $100 \text{ mm} \leq VS \leq 300 \text{ mm}$ )

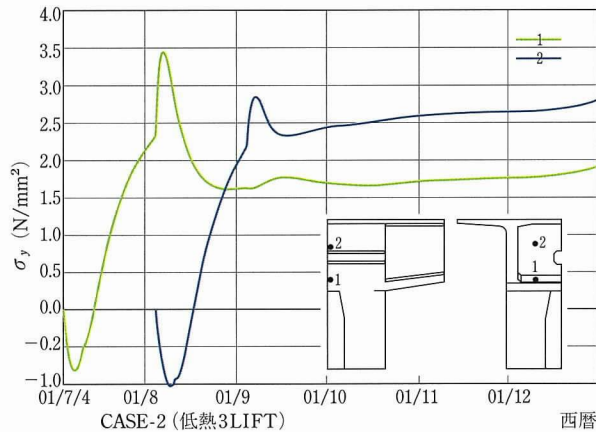


図 - 22 橋軸方向応力の時刻歴

$t_0$  および  $t$ : 乾燥開始時および乾燥中のコンクリートの有効材齢 (日) であり、式 (3) により補正した値を用います。

$$t = \sum_{i=1}^n \Delta t_i \cdot \exp \left[ 13.65 - \frac{4000}{273 + T(\Delta t_i) / T_0} \right] \quad (4)$$

$\Delta t_i$ : 温度が  $T$  (°C) である期間の日数,  $T_0 = 1^\circ\text{C}$   
 ここでは、収縮ひずみの最終値が  $150\mu$  になるような相対湿度を与えることとします。

まず体積表面積比を求めます。床版の表面積が  $12370\text{ mm}^2$ 、体積は  $2794000\text{ mm}^3$  ですから体積表面積比は  $226\text{ mm}$  となります。単位水量を  $200\text{ kg/m}^3$  とすると式 (3) より、相対湿度が  $75.4\%$  となります。乾燥開始材齢は  $0$  日とします。

図 - 25 に収縮ひずみのグラフを示します。

(2) 境界条件

① 熱伝達境界と外気温

熱伝達境界一覧を表 - 11 に示します。外気温度は月平均気温を使用します。

図 - 26 に温度解析の境界条件を示します。

② 打設工程と初期温度

第 1 リフトの打設を 4 月 5 日、第 2 リフトを 4 月 15 日として、10 月 30 日まで計算します。打込み温度は外気温度 + 3 度とし、第 1 リフトが  $12.5^\circ\text{C}$  第 2 リフトが  $14.6^\circ\text{C}$ 、既設コンクリートおよび鋼桁の初期温度を  $9.5^\circ\text{C}$  とします。

③ 拘束条件

対称面上の節点には対称面に垂直方向自由度 (変位成

分) を拘束します。床版部は対称条件以外に拘束する自由度はありません。鋼桁の拘束は主桁の片端のみとし、ウェブ、フランジの全節点について橋軸方向を拘束し、下フランジ下面の全節点の鉛直方向および水平方向自由度を拘束します。図 - 27 に応力解析の境界条件を示します。

④ 解析時間刻み

打設直後の 1 日を 3 時間、次の 1 日を 4 時間刻みとして徐々に粗い刻みに移行します。温度解析と応力解析の時間刻みは同じものとして表 - 12 のように設定します。

2.3 解析結果

(1) 温度分布と温度時刻歴

図 - 28 に最高温度経験値の断面コンター図を示します。第 2 リフトの中央部で最高温度がおよそ  $29^\circ\text{C}$  となっています。主桁フランジとの接合面からコンクリート床版の熱が伝わり、鋼材表面からの放熱によって冷却されている様子を見ることができます。同一断面における代表部位の温度時刻歴図を図 - 29 (a), (b) に示します。

(2) ひび割れ指数経験最小値

図 - 30, 図 - 31 は乾燥収縮を考慮しないケースと考慮したケースの、ひび割れ指数経験最小値コンター図です。床版を上から見たものと下から見たものを示しています。乾燥収縮を考慮したケースでは、ひび割れ指数の小さい領域が拡大しており、鋼桁接合面と打継ぎ面の新設床版側ではひび割れ指数が  $1.0$  以下になっています。

(3) ひび割れ指数および応力成分の時刻歴

最小ひび割れ指数の値が小さい部位は図 - 31 より、第 1 リフトと既設床版の接合部で第 1 リフト側主桁上の A、支間中央の B、および、第 1、第 2 リフト接合部で第 2 リフト側主桁上の C、支間中央の D 点です。これらの点の上

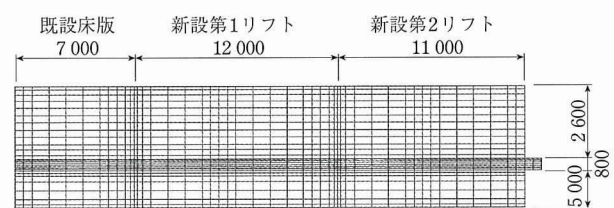


図 - 23 (b) 構造寸法 (床版部)

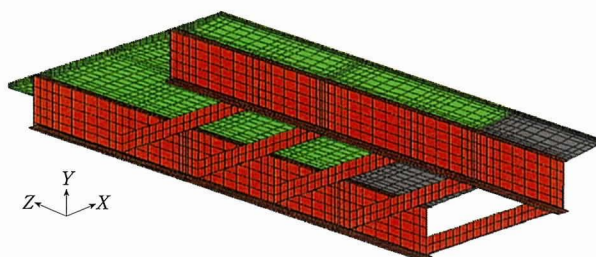


図 - 23 (a) 全体構造図

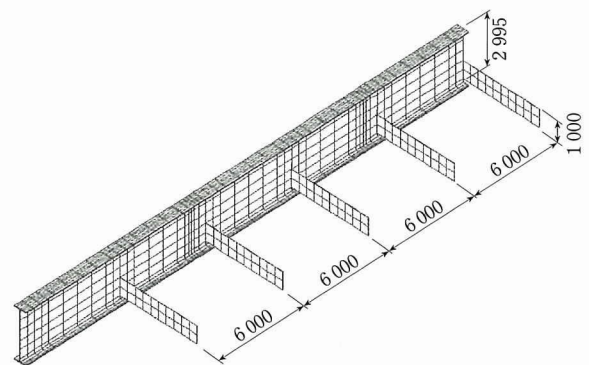


図 - 23 (c) 構造寸法 (鋼桁部)

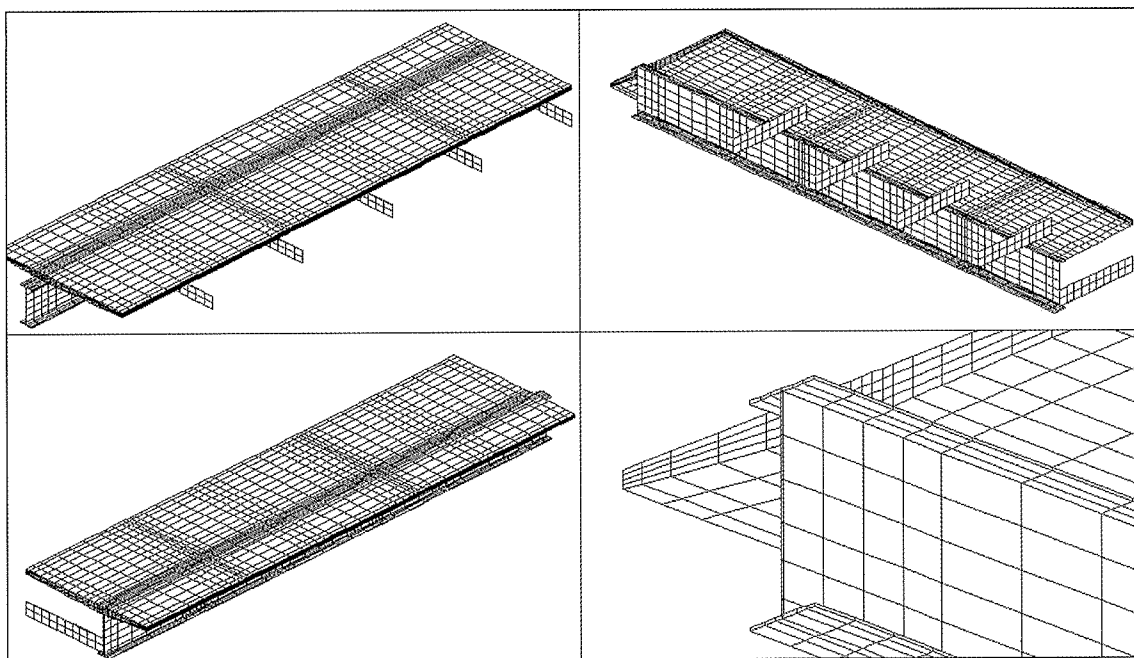


図 - 24 メッシュ分割図

表 - 10 物性データ

	単位	新設コンクリート	既設コンクリート	鋼 桁
熱伝導率 $\lambda$	W/m °C	2.7	2.7	25.0
密度 $\rho$	kg/m <sup>3</sup>	2 400	2 400	7 850
比熱 C	kJ/kg °C	1.15	1.15	0.473
断熱温度上昇特性 $Q(t) = Q^{\infty}(1 - e^{-t/r})$				
$Q^{\infty}$	°C	40.0	発熱なし	発熱なし
$r$	—	0.9		
弾性係数 $E$	N/mm <sup>2</sup>	$4\,700\sqrt{f_c}$	29 400	200 000
圧縮強度 $f_c$	N/mm <sup>2</sup>	RC 示方書による	39.2	—
$a$		4.5		
$b$		0.95		
91 日強度		39.2		
引張強度 $f_t$	N/mm <sup>2</sup>	$0.44\sqrt{f_c}$	2.75	—
ポアソン比	—	0.18	0.18	0.3
線膨張係数	1/°C	$10 \times 10^{-6}$	$10 \times 10^{-6}$	$12 \times 10^{-6}$
クリープ構成則	—	RC 示方書 有効弾性係数法による	—	—
乾燥収縮ひずみ	—	考慮する/しない	考慮しない	考慮しない
自己収縮ひずみ	—	考慮しない	考慮しない	考慮しない
鉄筋	—	考慮しない	考慮しない	考慮しない

下面のひび割れ指数の時刻歴を両ケースについて図 - 32 (b), (c) に示し、図 - 32(a) には出力部位を示しました。

乾燥収縮を考慮しないケースではひび割れ指数が 1 以下になるところはありませんが、乾燥収縮を考慮したケースでは、点 A, C の下面でひび割れ指数が 0.8~0.9 となっています。これは、床版の収縮ひずみを主桁のフランジが拘束したためと考えられます。

図 - 33(a), (b) と図 - 34(a), (b) に両ケースの応力成分の時刻歴を示します。図 - 33(a) の乾燥収縮を考慮しないケースにおいて、A 点下面の応力が経過日数 40~130 日に

かけて上昇しているのは、主桁の線膨張係数がコンクリートの線膨張係数より 2 割大きいため、外気温の上昇に伴い主桁がコンクリートを引っ張ったためと考えられます。

(4) 打継ぎ部の応力分布

図 - 35(a), (b) は既設床版と第 1 リフト接合部の両側 50 cm の領域を抜き出して、ひび割れ指数と応力成分のコンター図を比較したものです。表示した材齢は第 2 リフト打設後 120 日です。乾燥収縮を考慮したケースでは、第 1 リフト側で支間中央から主桁位置まで橋軸直角方向応力が 1~3.5 N/mm<sup>2</sup>、橋軸方向応力は主桁位置で 1.7 N/mm<sup>2</sup> となって



います。乾燥収縮を考慮しないケースでは、同様な傾向を示すものの、応力の大きさは 1/3 以下となっています。

(5) 主応力の分布

第 2 リフト打設後 120 日の主応力矢線図を図 - 36 (a), (b) に示します。

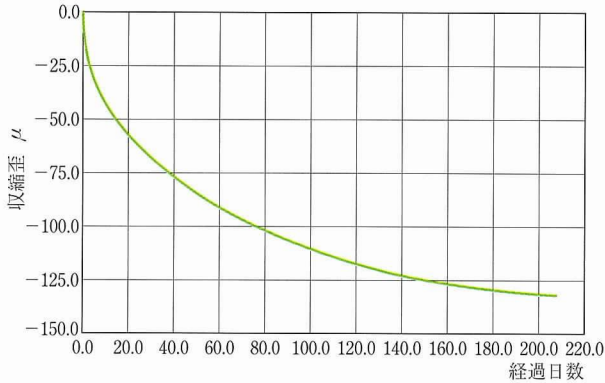


図 - 25 乾燥収縮ひずみ

表 - 11 熱伝達境界一覧

部位	熱伝達率 (W/mh℃)	メモ
既設コンクリートの表面 床版上面	12	一定値
新設床版の下面、側面 鋼桁表面	8 → 12	材齢 1.5 日まで合板型枠
	12	一定値

表 - 12 解析時間刻み

時間 (h)	時間刻み (h)	時間 (h)	時間刻み (h)
0 ~ 24	3.0	~ 384	32.0
~ 48	4.0	~ 768	64.0
~ 96	8.0	~ 1 536	128.0
~ 192	16.0	~ 4 608	256.0
		~ 4 752	144.0

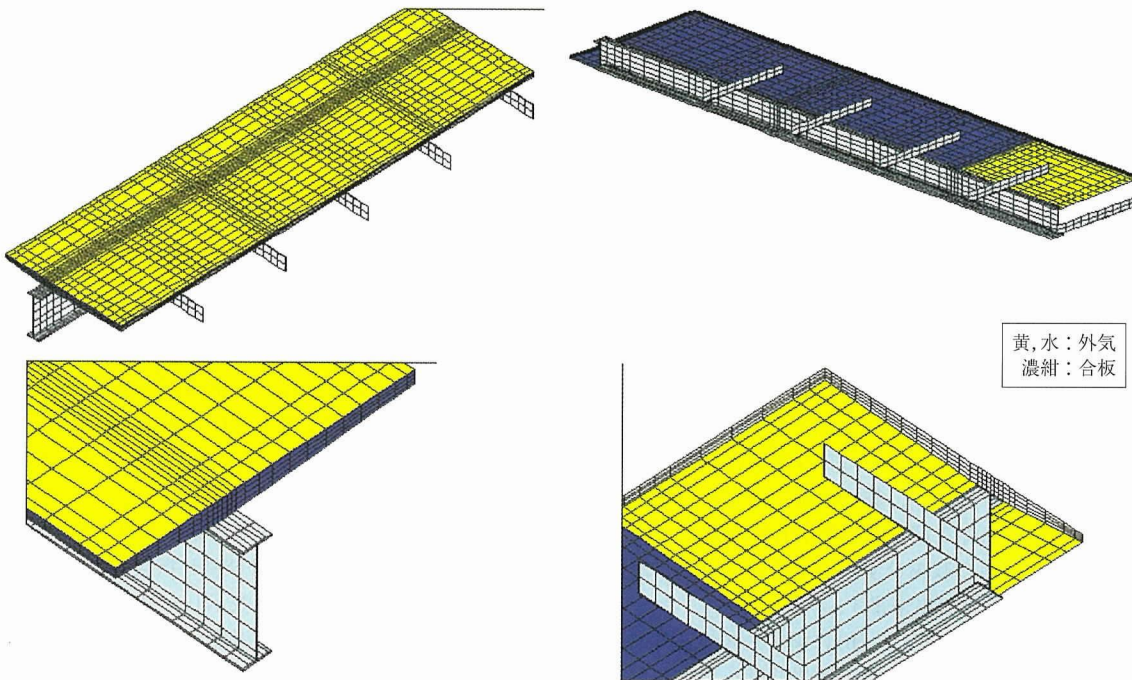


図 - 26 熱伝達境界の設定

いずれのケースにおいても、打継ぎ面の新設床版側に橋軸直角方向応力が発生しています。

(6) まとめ

乾燥収縮を考慮したケースと考慮しないケースの結果の比較を表 - 13 に示します。乾燥収縮を考慮したケースでは考慮しないケースのおよそ 3~4 倍の応力が生じています。

ひび割れ指数の分布では、乾燥収縮を考慮したケースにおいて、主桁上および既設床版との接合面の支間中央付近で 0.8~1.5 となっています。乾燥収縮を考慮しないケースでは、ひび割れ指数が 2.0 以上となっておりひび割れは発生しない結果となっています。

表 - 13 解析結果の比較

	乾燥収縮を考慮しない	乾燥収縮を考慮する
ひび割れ指数	2.0 (材齢 1.0 日) 3.0 (材齢 130 日)	0.7 (材齢 138 日)
主応力 (N/mm <sup>2</sup> )	1.02	3.74
橋軸直角方向応力 (N/mm <sup>2</sup> )	0.97	3.62
橋軸方向応力 (N/mm <sup>2</sup> )	0.77	2.26

主応力の分布では、両ケースともに既設床版あるいは先行リフトに橋軸直角方向の変形が拘束され、大きな橋軸直角方向応力が発生しています。この部分では橋軸方向および、橋軸方向から -45 度方向のひび割れが予想されます。

3. おわりに

コンクリートの温度応力解析を行う上で必要な基本的項目の説明と解析事例について 2 回に分けて解説しました。現在、温度応力の検討を行うには、有限要素法、あるいは CP 法が一般に使用されています。残念ながら市販のプログラムでは、入力条件に対する解析結果が出力されるだけで、どのような施工条件にすればよいのか、ひび割れ対策とし



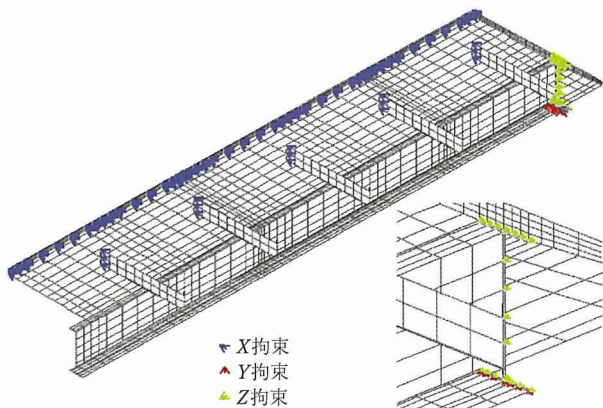


図 - 27 応力解析の拘束条件

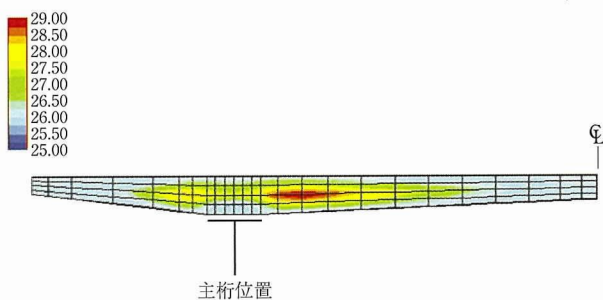


図 - 28 最高温度経験値断面コンター図

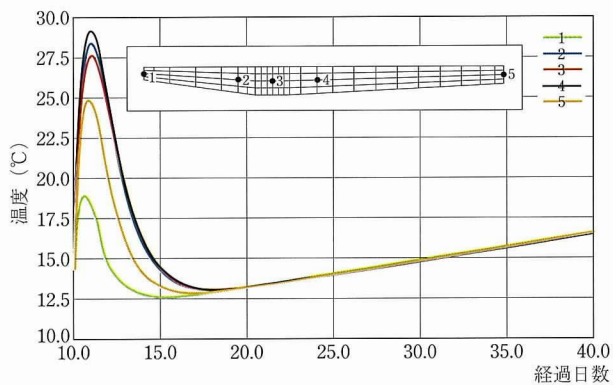


図 - 29(a) 温度時刻歴図 (床版内部)

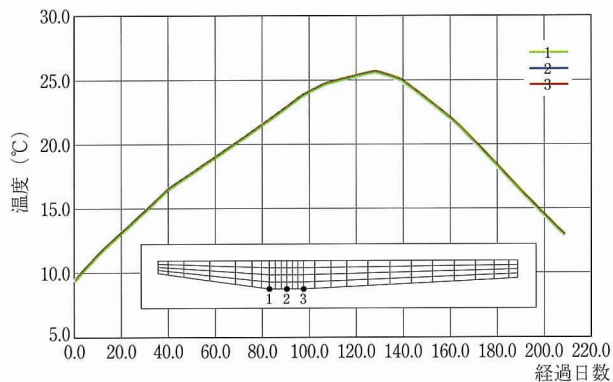


図 - 29(b) 温度時刻歴図 (床版下面主桁上)

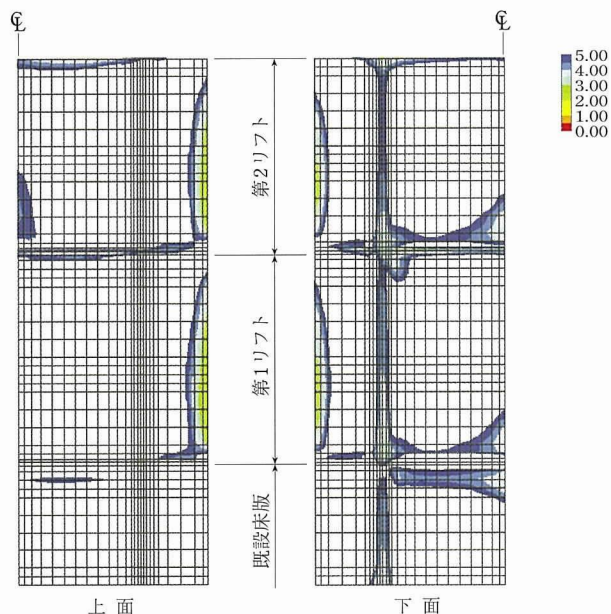


図 - 30 ひび割れ指数経験最小値 (乾燥収縮考慮しない)

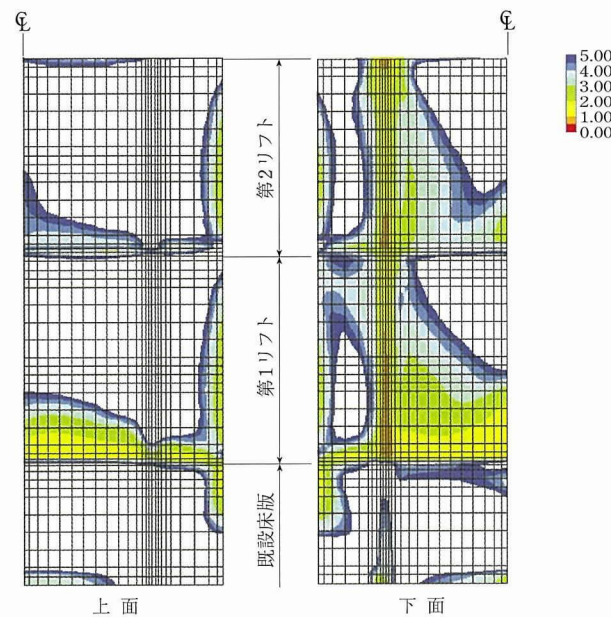


図 - 31 ひび割れ指数経験最小値 (乾燥収縮考慮)

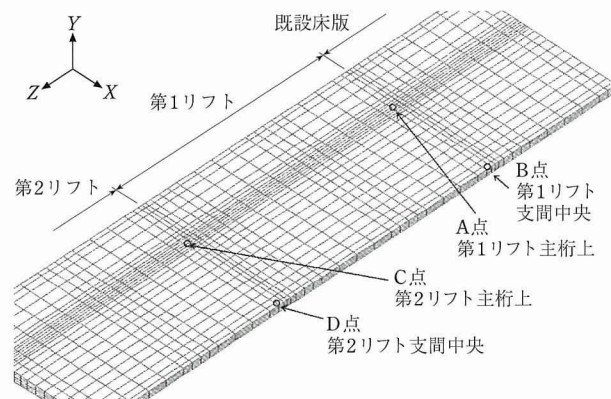


図 - 32(a) 出力部位

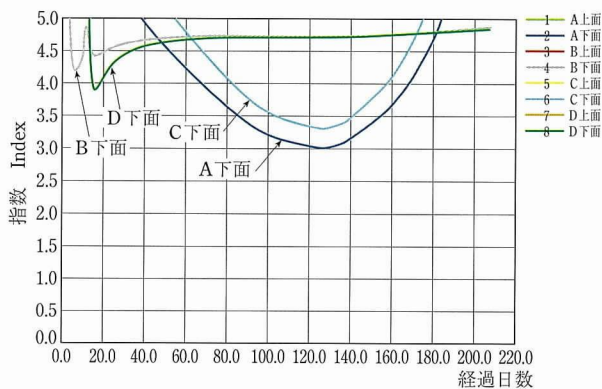


図 - 32(b) ひび割れ指数の時刻歴 (乾燥収縮考慮しない)

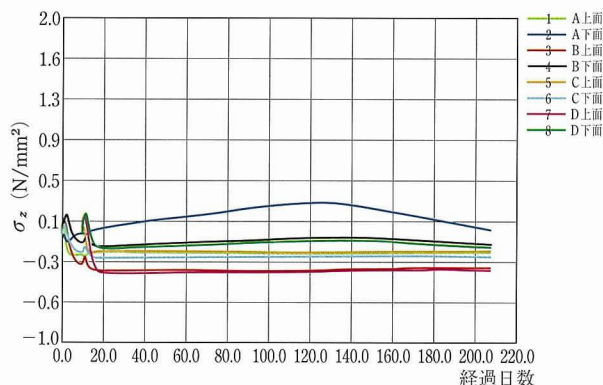


図 - 34(a) 橋軸方向応力：乾燥収縮考慮しない

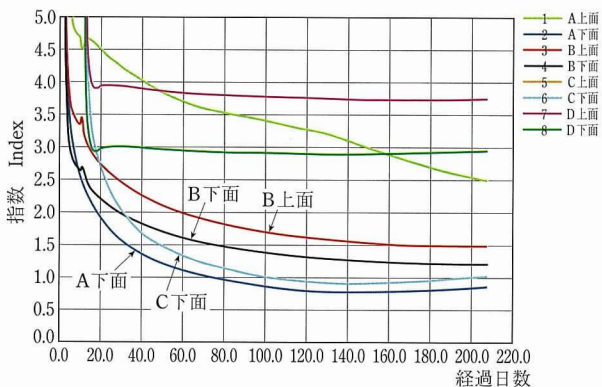


図 - 32(c) ひび割れ指数の時刻歴 (乾燥収縮考慮する)

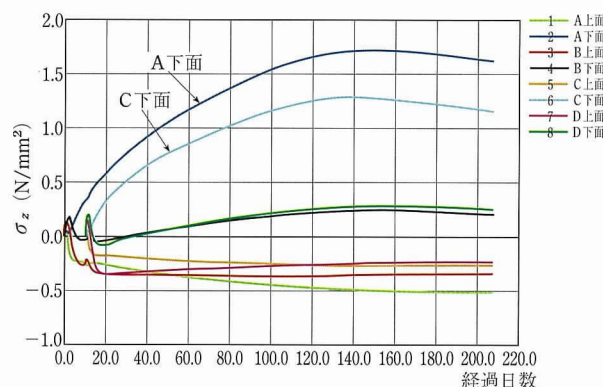


図 - 34(b) 橋軸方向応力：乾燥収縮考慮

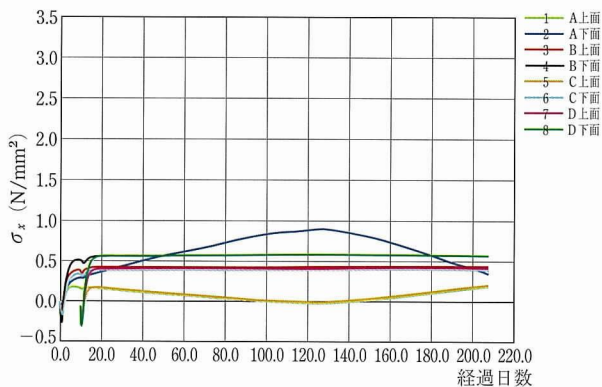


図 - 33(a) 橋軸直角方向応力：乾燥収縮考慮しない

て何をすればよいのかは答えてくれません。それは、解析者が結果を評価して判断しなければなりません。ただ、解析条件をいろいろ変えたパラメータスタディーを手軽に素早く行う事ができますので、そのような利用法を考えるべきと思います。近い将来は、エキスパートシステムを内蔵した温度応力解析プログラムが、最適施工計画まで求めてくれるようになるかも知れません。それまでは、ここに解説した、コンクリートに温度応力が生じるメカニズム、数値計算での処理手順と注意すべき点などが、温度応力解析を実施する上で、少しは役に立つものと思います。

【2002年10月8日受付】

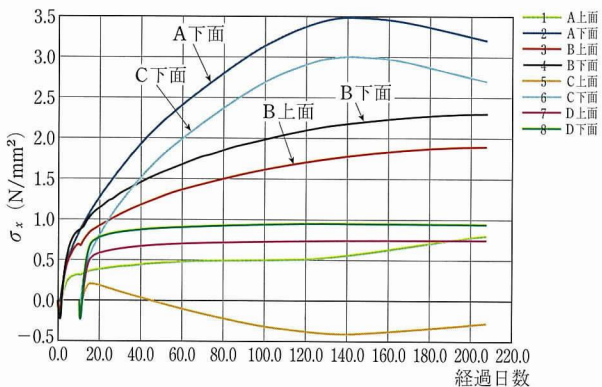


図 - 33(b) 橋軸直角方向応力：乾燥収縮考慮



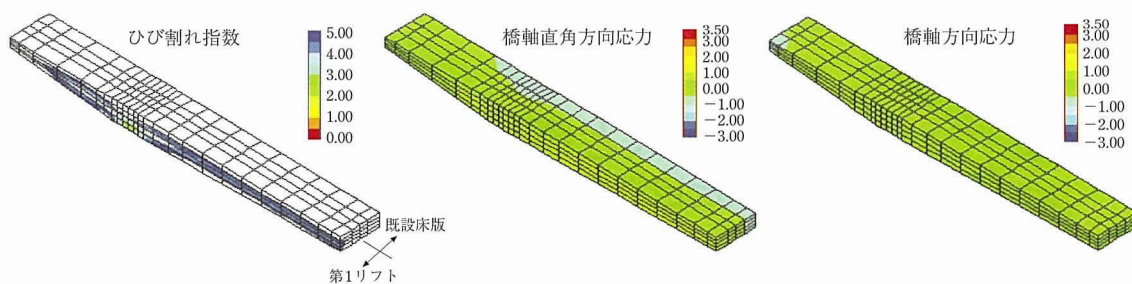


図 - 35(a) 第 2 リフト打設後 120 日：乾燥収縮考慮しない

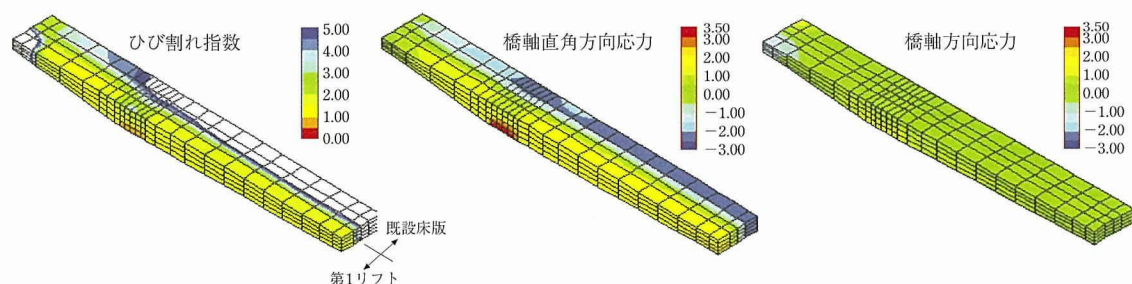


図 - 35(b) 第 2 リフト打設後 120 日：乾燥収縮考慮する

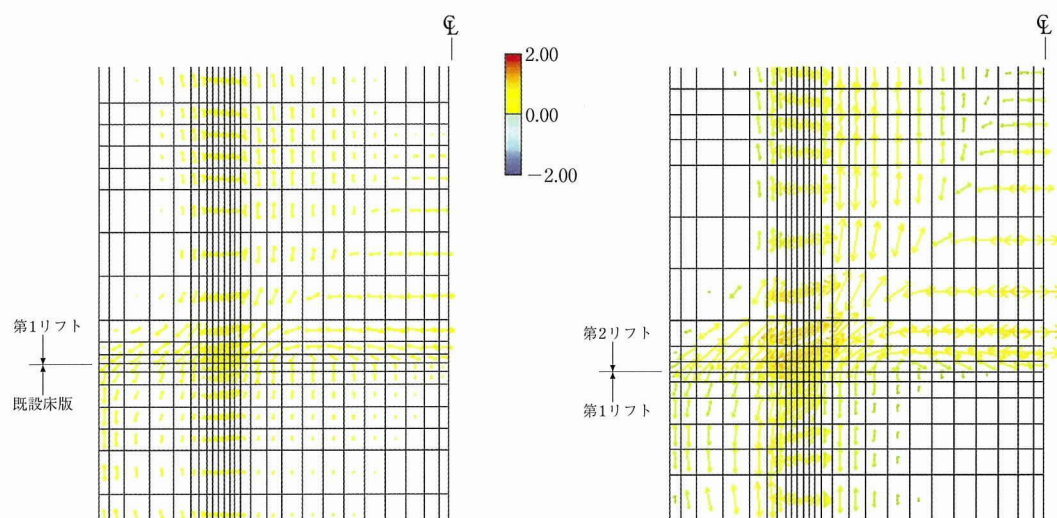


図 - 36(a) 第 2 リフト打設 120 日の主応力（乾燥収縮考慮しない）

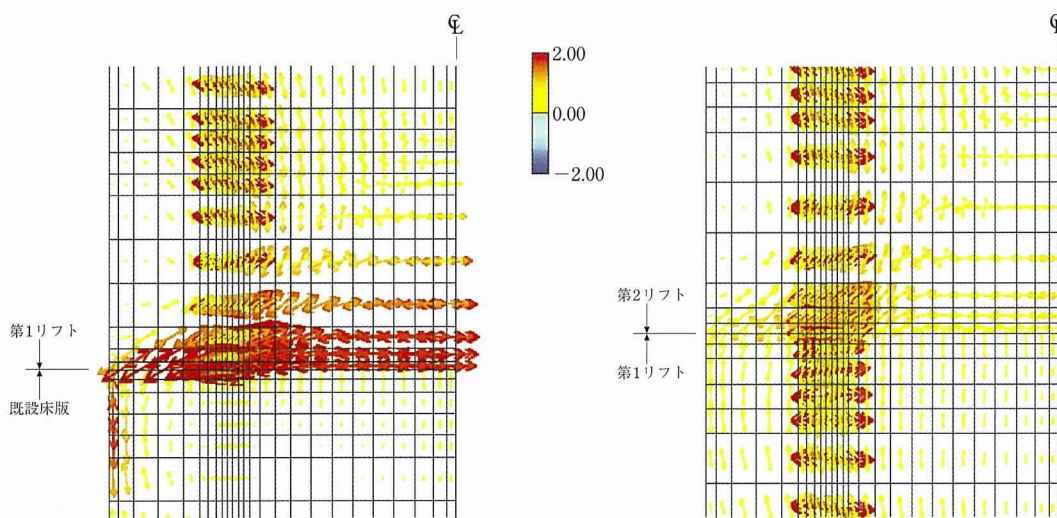


図 - 36(b) 第 2 リフト打設 120 日の主応力（乾燥収縮考慮する）