

# 第9回 温度応力解析（その1） 基礎知識・モデルの作成・評価と対策

講師：吉川 信二郎\*

## 1. はじめに

施工段階における初期ひび割れ照査においてセメントの水和に起因するひび割れが問題となる場合は、温度応力解析による評価が行われます。評価対象となる構造は、厚さ 800 mm 以上のスラブ、厚さ 500 mm 以上の壁および、短辺 800 mm 以上の柱などで、マスコンクリートとした温度応力の検討が求められます。また、プレストレストコンクリートや高強度コンクリート構造物は富配合となり水和熱が高くなるため、薄い部材であってもマスコンクリートと同様の扱いが必要とされます。

温度応力の検討には 3 次元有限要素法に基づく解析プログラムが一般に利用されます。解析初心者にとって、解析対象を適切にモデル化し、計算結果を正しく評価することは簡単ではありません。

ここでは、温度応力解析（その1）として温度応力の概念・解析における注意点などを初心者向けに解説したいと思います。

## 2. 温度応力の発生要因

コンクリートは水和反応により発熱して硬化していきます。発熱による温度上昇と外気冷却による温度降下、および乾燥収縮などによる体積変化が拘束されると応力が発生します。拘束が無ければ応力は発生しません。この応力の発生機構の違いにより内部拘束応力と、外部拘束応力とに分けることができますが、一般には両者が同時に作用します。

### 2.1 内部拘束応力

図 - 1 に内部拘束応力の概念図を示します。材齢初期はコンクリート内部の温度が高く、表面側は外気に接しているため温度が内部より低い分布が想定されます。

今、温度が上昇し断面の温度分布が図のようになったとして、力の釣合条件を満たす変形が釣合位置とします。表面部では釣合位置までのひずみが全ひずみで、温度ひずみはそれより小さいので、拘束ひずみは引張ひずみとなります。中心部では拘束ひずみは圧縮ひずみとなります。すなわち、 $全ひずみ = 温度ひずみ + 拘束ひずみ$ の関係が成り立つものとしています。ただし、膨張ひずみ（引張応力）を

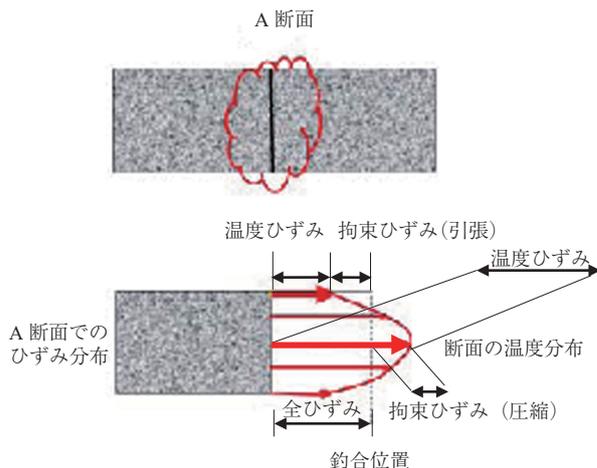


図 - 1 内部拘束応力の概念図

正に収縮ひずみ（圧縮応力）を負として考えます。温度分布が均一であれば、内部拘束応力は発生しません。

### 2.2 外部拘束応力

外部拘束体により拘束を受ける部位では、温度上昇時には膨張ひずみが拘束されて圧縮応力が生じ、温度降下時には収縮ひずみが拘束されて引張応力が生じます。外部拘束体とは、既設コンクリート・鋼桁・地盤などです。

図 - 2 はコンクリートの温度が上昇し、膨張変形が外部拘束体に拘束されて拘束ひずみ（圧縮）が生じている例

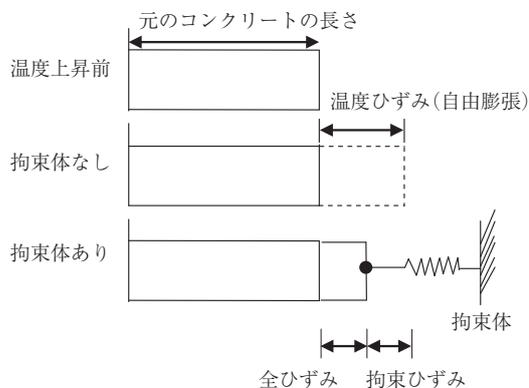


図 - 2 外部拘束応力の概念図

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

です。同様にコンクリート温度の降下時は、収縮変形が外部拘束体に拘束されて拘束ひずみ（引張）が生じます。

ここで注意すべきは、材齢とともに強度が発現してゆくため、被拘束体の剛性は温度上昇時より降下時の方が大きく、表面部より内部の方が温度降下量は大きいことです。このため外部拘束応力は被拘束体の引張応力を増大させ、内部から有害なひび割れを生じさせる要因となります。

### 3. 温度ひび割れ照査の方法

2012年制定コンクリート標準示方書<sup>1)</sup>によれば、ひび割れ発生を許容しない場合は、ひび割れ発生確率の限界値を設定して照査するとし、ひび割れ発生は許容するが所要の性能が損なわれないように制限する場合は、ひび割れ幅の限界値を設定して照査すると記されています。

ひび割れの発生は、ひび割れ発生確率の限界値から定められるひび割れ指数により照査します。材齢  $t$  日におけるひび割れ指数は式(1)に示すように、引張強度を最大主応力度で割った値として定義されます。

温度応力解析で求めたひび割れ指数が、安全係数より大きいことを照査します。図-3にひび割れ指数とひび割れ発生確率の関係を示し、表-1に対策レベルに応じたひび割れ発生確率と安全係数の関係を示します。

$$I_{cr}(t) = f_{ik}(t) / \sigma_t(t) \quad (1)$$

$$I_{cr}(t) > \gamma_{cr}$$

$f_{ik}(t)$  : 材齢  $t$  日における引張強度

$\sigma_t(t)$  : 材齢  $t$  日における最大主応力度

$\gamma_{cr}$  : 安全係数

ひび割れ幅の限界値は鋼材の腐食に対するひび割れ幅の限界値を用いて良いとされています。また、土木学会の限界状態設計法<sup>2)</sup>には、表-2に示すように、ひび割れ幅とかぶりの関係が示されています。

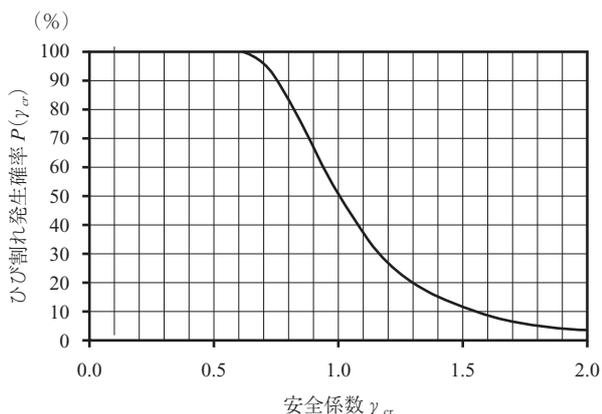


図-3 安全係数とひび割れ発生確率<sup>1)</sup>

### 4. 温度応力解析

セメントの水和発熱（乾燥収縮なども含め）に起因するひび割れに関する検討は、環境条件、構造寸法、材料の熱物性、施工工程などの影響を採り入れた温度解析を行い、得られた温度分布に基づく体積変化を求め、拘束条件、力

表-1 ひび割れ発生確率と安全係数<sup>1)</sup>

対策レベル	ひび割れ発生確率	安全係数
ひび割れを防止したい場合	5%	1.85以上
ひび割れの発生をできるかぎり制限したい場合	15%	1.40以上
ひび割れの発生を許容するが、ひび割れ幅が過大とならないように制限したい場合	50%	1.0以上

表-2 許容ひび割れ幅の例<sup>2)</sup>

	鋼材種類	鋼材の腐食の難易による環境条件		
		一般の環境	腐食性環境	とくに厳しい腐食環境
鉄筋コンクリート	異形鉄筋 普通丸鋼	0.005 c	0.004 c	0.0035 c
プレストレストコンクリート	異形鉄筋	0.005 c	0.004 c	0.0035 c
	PC鋼材	0.004 c	0.0035 c	0.003 c

c はかぶり (mm)

学特性を考慮した応力解析を実施して応力を求めます。これら作業の流れを図-4に示します。

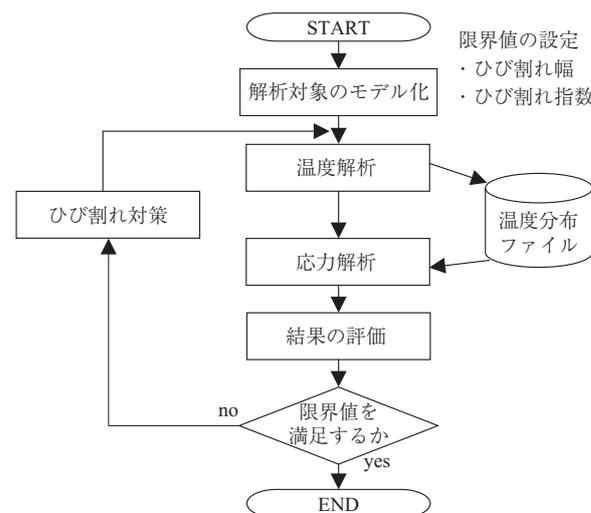


図-4 温度応力解析の流れ

有限要素法による温度応力解析を行うためには、対象構造を適切にモデル化する必要があります。モデル化とは解析対象を要素分割とかメッシュ分割と呼ばれる小さな領域に分割し、境界条件等の解析条件を設定することです。小さな領域が要素で、要素の頂点を節点と呼びます。とくに、要素分割は注意が必要で分割が粗すぎると正しい結果が得られないことがあり、適切な要素分割が必要となります。

ここでは、簡単な箱桁と2主桁を例として、3次元温度応力解析プログラム ASTEA MACS (株式会社計算力学研究センター) を用いて温度応力解析モデルを作成する際の注意点などを説明します。

#### 4.1 要素分割

箱桁の要素分割例を図 - 5 に示します。構造の対称性を考慮した4分の1モデルとなっています。

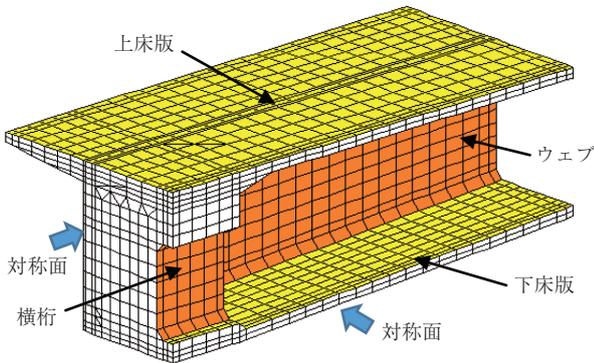


図 - 5 箱桁の要素分割例 (1/4 モデル)

要素分割の基本として、重要な断面や放熱面が 600 mm は 200 mm 程度に分割します。この例では横桁を 200 ~ 300 mm で分割、250 mm 厚の床版は 2 層に分割、400 mm 厚のウェブは 1:2:1 比率の 3 分割としています。この程度の分割が標準的な分割と思いますが、既往の解析例を参考に、どの部位が問題となりそうかを調べてから要素分割を行うのが良いでしょう。

図 - 6 は 2 主桁の要素分割例で 2 分の 1 対称モデルです。鋼桁部もソリッド要素と呼ばれる厚みを持った要素で分割しますが、着目部位ではないことおよび、熱伝導性能が高いので厚さ方向は 1 層で問題ありません。

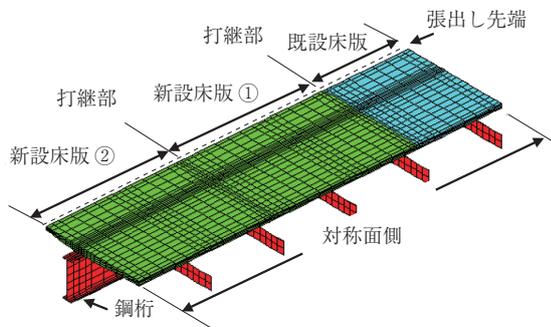


図 - 6 2 主桁の要素分割例 (1/2 モデル)

新設床版が既設床版に拘束され、打継部に大きな応力が発生すること、新設床版の打設回数が増えるにしたがって張出し先端の応力が増加するなどが予想されるため、この例では、250 mm 厚の床版を 4 層に分割し、橋軸方向の分割は打継面近傍で 200 mm とし、ほかは 1000 mm などと粗い分割としています。

要素分割を行ううえで注意すべき点をまとめます。

- 温度変化・応力変化の大きな領域は細かく分割
- 放熱面から 600 mm は 3 分割程度を基本とする
- 要素の形状はなるべく直方体が望ましい
- 要素の長辺と短辺の長さ比は 10 以下が望ましい

• 鋼材の厚さ方向は 1 要素で良い

応力変化が大きい部位がどこか分からないことが多く、実際の構造でこれらをすべて満たすように要素分割を行うことが困難な場合もあると思います。とりあえず、粗い要素分割で計算した結果を見てから、要素分割を修正して再計算するのも一つの方策です。

#### 4.2 境界条件

##### (1) 温度解析の境界条件

温度解析とはコンクリートの水和熱が時間とともに各部に伝わり、外気温によって冷却されてゆく現象を計算するもので、コンクリートや鋼桁表面の境界条件として、熱伝達境界および、固定温度境界を考慮します。

熱伝達境界はコンクリート表面の温度と外部温度との温度差に比例して、熱が高温側から低温側に流れてゆく境界で比例定数が熱伝達率となります。熱伝達率は型枠種類や養生条件などの熱伝達境界の状態によって値が決まっていますが、施工段階の解析において特徴的な点は、脱枠や養生期間に応じて熱伝達率が変化する事です。表 - 3 に熱伝達率の参考値を示します。

表 - 3 熱伝達率  $\eta$  の参考値<sup>1)</sup>

養生方法 (熱伝達境界の状態)	$\eta$ (W/m <sup>2</sup> °C)
メタルフォーム, 散水 (湛水深さ 10 mm 未満)	14
湛水 (湛水深さ 10 mm 以上 50 mm 未満) ・むしろ養生を含む	8
湛水 (湛水深さ 50 mm 以上 100 mm 未満)	8
合板	8
シート	6
養生マット ・湛水+養生マット, 湛水+シートを含む	5
発泡スチロール (厚さ 50 mm) + シート	2
エアバッグ (シート付) ; 2 枚, 3 枚, 4 枚	6, 4, 2
コンクリート・地盤・岩盤の露出面	14

通常外部温度は全境界面に共通な月平均気温データなどが使用されます。日平均気温や時間ごとの気温データを使用する際は、計算時間刻みの指定にも注意が必要です。

これらの境界データの他に初期値としてコンクリートの初期温度を与える必要があります。新設コンクリートの初期温度は打設時の気温 + 5 °C が一般的です。既設コンクリートや鋼材の初期温度は計算開始時の気温とします。

図 - 7 に箱桁の温度解析における熱伝達境界設定例を示します。固定温度境界 (温度が一定の境界) は地盤最深部などに定義される境界ですが、この例では存在しません。4 分の 1 モデルの対称面は断熱境界、床版上面が養生マット、床版下面・ウェブ側面・横桁側面を合板型枠として定義しています。

##### (2) 応力解析の境界条件

応力解析の境界条件は節点の変位拘束条件になります。3 次元解析では、節点の変位成分は X, Y, Z の 3 成分で、節点ごとにどの方向の変位を拘束するかを指定します。

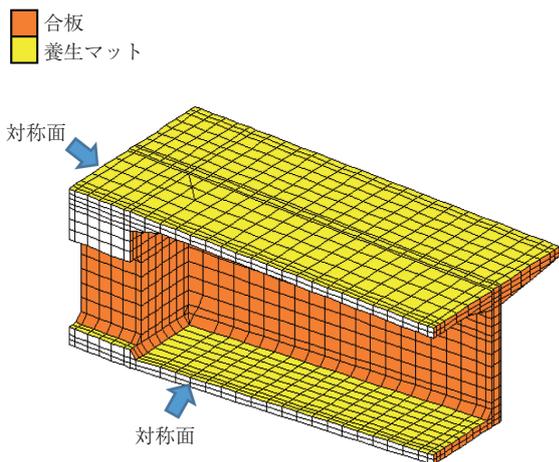


図 - 7 熱伝達境界設定例 (1/4 モデル)

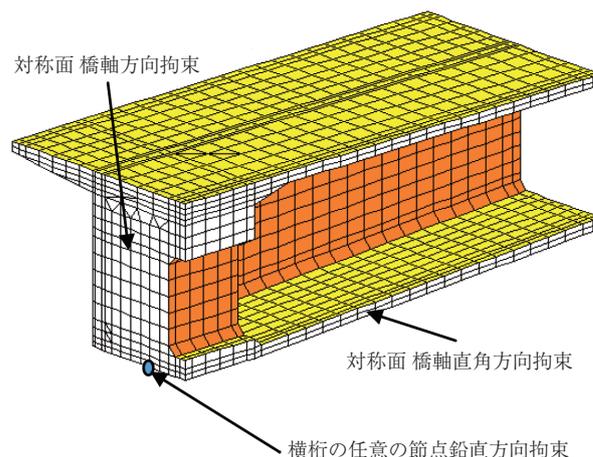


図 - 9 変位拘束の例 (1/4 モデル)

有限要素法は節点での力の釣合方程式を解いて節点変位を求めます。このとき剛体変形が生じないような変位拘束条件が最低限必要となります。剛体変形とは応力やひずみが発生しない変形モードをいい、3次元ではX、Y、Z並進方向とX軸、Y軸、Z軸回りの回転の全6モードあります。

剛体変形を拘束するために拘束すべき節点と方向は

- 対称条件がある場合は対称面上節点の法線方向変位
- 支承や支保工で支持されている節点の支持方向変位を拘束します。これで剛体変形が拘束されていれば問題は

ありません。拘束が不足するようであれば、余分な応力が生じないような必要最小限の拘束条件を設定しなければなりません。拘束が過剰になればその拘束による応力が発生してしまいます。

図 - 8 に剛体変形の拘束不足例を示します。この例では、辺1-5の方向のY軸回り剛体モードが拘束されていません。辺1-5の間の節点のX方向又はZ方向を拘束しても解消できませんので、解析領域を半分にして対称条件を入れるなどして解析します。

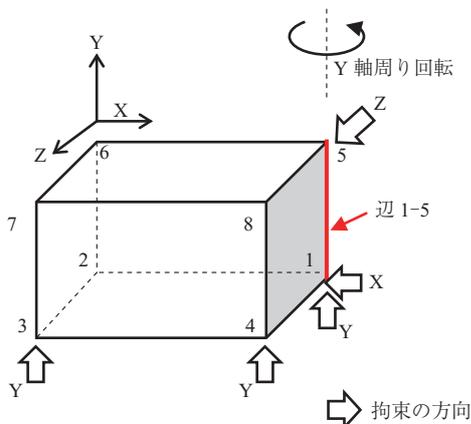


図 - 8 剛体変形モードの拘束不足の例

図 - 9 に箱桁モデルの拘束条件設定例を示します。このモデルは対称条件があるので鉛直方向の拘束は1節点の

みで良く、横桁の任意の節点を選ぶことができます。

### 4.3 物性値

温度応力解析に使用される物性データは、熱物性と力学物性です。ひび割れ制御指針 2008<sup>3)</sup> で推奨する物性データは、断熱温度上昇特性・圧縮強度については実際のコンクリートの施工計画や過去の配合例などにより定められたもので、セメント種類・単位セメント量・水セメント比・管理材齢および、打込み温度から決定され、弾性係数・引張強度は圧縮強度から算定されます。その他標準的な値を表 - 4 に示します。

表 - 4 標準的な物性値の例

	単 位	コンクリート	鋼
熱伝導率	W/m℃	2.7	25.0
密度	kg/m <sup>3</sup>	2 400	7 850
比熱	kJ/kg℃	1.15	0.473
断熱温度上昇特性	—	ひび割れ制御指針 2008 推奨の推定式	—
弾性係数	N/mm <sup>2</sup>		2.0e5
圧縮強度	N/mm <sup>2</sup>		—
引張強度	N/mm <sup>2</sup>	—	—
ポアソン比	—	0.2	0.3
線膨張係数	1/℃	10 μ	12 μ

### 4.4 解析期間と時間分割

温度応力解析においては、熱や力の釣り合い方程式を、ある時間間隔（時間刻みとも呼びます）ごとに解くこととなります。通常、この計算時間刻みは解析者があらかじめ入力しますが、時間刻みが大きすぎると正しい結果が得られないことがあります。コンクリートの発熱特性・強度発現特性や外気温の変化などの時間スケールを考慮しなければなりません。

打設直後のコンクリートは水和熱により温度が上昇し2～3日で最高温度となります。また、コンクリートの強度も急激に増加するので、この期間は1～3時間の時間刻みでの計算が必要となります。

また、毎時計測された気温データなどを用いて1日の気

温の変化を忠実に反映させたい場合は3～4時間刻みで計算する必要があります。

適切な解析時間刻みは、解析したい現象の時間スケールから表 - 5、表 - 6 のように考えることができます。

表 - 5 時間刻みの分類

①	水和熱によりコンクリートの温度が打設後1～3日で最高温度となる温度上昇期
②	最高温度以降の外気による冷却期間
③	外気の変動パターン (月平均・日平均・時間変化)

表 - 6 推奨する時間刻み

①	材齢2～3日まで	1～3時間刻み
②	最高温度以降の冷却期間	3～6時間刻み
③	月平均気温のみの変化期間	10～20日刻み
	日平均気温のみの変化期間	6～12時間刻み
	時間変化気温のみの変化期間	1～3時間刻み
	脱型など境界条件の急変前後	1～3時間刻み

もっとも小さい時間刻みで全解析期間を計算するのではなく、現象が速い期間は時間刻みを小さくし、現象の遅い期間は刻みを大きくするなどします。

解析期間は新コンクリート打設から最終ロット打設後3ヵ月程度とされていますが、既設コンクリートなどがある場合には、新コンクリート打設の3ヵ月前から計算を開始するのが良いとされています。

4.5 乾燥収縮・自己収縮

乾燥収縮は部材厚の大きなコンクリートではほとんど考慮しませんが、PC床版などの解析では考慮する場合があります。図 - 6 に示した鋼桁と床版のモデルでは、床版厚が250 mm のため乾燥表面付近と内部とで、ほとんど同じ量の収縮ひずみが生じます。鋼材は乾燥収縮しないため床版の乾燥収縮変形が拘束されてフランジ部に沿って引張応力が生じます。図 - 10 に乾燥収縮を考慮した場合と考慮しない場合のひび割れ指数の比較を示します。乾燥収縮ひずみを考慮した結果はフランジに拘束される部位で、ひび割れ指数が低い値になっています。

自己収縮は普通ポルトランドセメント、および高炉セメントB種のみを結合材とする場合は予測式<sup>1)</sup>があり、セメント種類と水セメント比を与えることで定義できます。

4.6 パイプクーリング

柱頭部や横桁などの初期材齢における最高温度を下げる目的で、あらかじめ埋設したパイプに水または空気を流すものです。通常は内径1インチの鋼管が使用されますが、50～80 mm のシース管を利用することもあります。パイプの配置間隔が短いほど、冷却媒体の温度が低いほどクーリング効果は高くなりますが、パイプ付近の温度勾配が大きくなり過ぎないようにします。通常はパイプ間隔を500～750 mm、1インチ管の通水量は毎分10～20ℓ、通水期間は数日としている場合が多いようです。

パイプクーリングを解析に反映させるには、節点を選んでパイプの経路を指定し、特性値として冷媒温度、パイプ

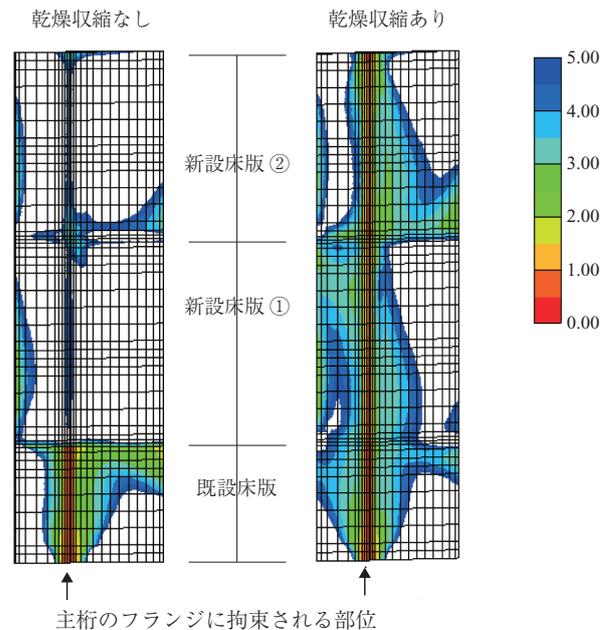


図 - 10 床版 (鋼桁側) のひび割れ指数分布

壁面の熱伝達率を与えます。節点における冷媒とコンクリートの温度差に応じた熱流を考慮し、パイプの経路に関係なく冷媒温度一定を仮定した計算が一般的です。冷媒が水または空気の場合のパイプ壁面の熱伝達率は文献<sup>4～6)</sup>があります。

4.7 プレストレス

コンクリートに生じる引張応力を軽減するため、あらかじめPC鋼材でコンクリートに圧縮応力を加えるものです。ポストテンション方式のプレストレスを考慮する場合は、内部ケーブルと外ケーブルを考慮した設定を行います。外ケーブルは定着節点間を1本のトラス要素で表現し、内ケーブルは要素内の節点間を1本のトラス要素で接続します。緊張時刻以前は、トラス要素は無いものとして扱われ、緊張時刻以降はトラス要素として剛性も考慮されます。

入力データとしては、ケーブルの断面積、ヤング率E、線膨張係数a、緊張応力σ<sub>0</sub>、緊張時刻です。緊張時には温度変化量ΔT = σ<sub>0</sub> / (E × a) が各トラス要素に生じたものとして処理します。トラス要素はコンクリートの拘束を受けてσ<sub>0</sub>以下の応力となり、コンクリートに圧縮応力が導入されます。

4.8 減水剤、膨張材

減水剤は単位水量を低減することで単位セメント量を低減することができます。高性能AE減水剤は単位セメント量を20 kg/m<sup>3</sup>程度低減可能と言われています。ただし、単位セメント量10 kg/m<sup>3</sup>あたりの終局温度上昇量は1℃程度の増減になります。

膨張材はコンクリートの収縮ひずみを補償するもので温度応力によるひび割れ制御に有効であるとされています。ひび割れ制御指針2008には、標準的な使用量20 kg/m<sup>3</sup>の膨張材を使用する場合の近似式がありますが、同時に自己収縮ひずみも考慮する必要があるなど、使用に際しては注

意が必要です。また、材齢初期においては内部拘束応力をさらに増大させる傾向があるため、外部拘束が卓越する部材に使用するのが一般的と思われます。

### 5. 結果の評価

解析が終了したなら、まず、結果が妥当であるか調べます。これは、解析対象の適切な部位（たとえば、熱伝達境界面上や打継面上）の温度履歴や等高線図を表示させて見るのが良いでしょう。温度が振動していないか、各部位で経験した解析期間内の最高温度などを調べます。

断熱境界には等高線が垂直になり、熱伝達境界では等高線が平行になっていれば、境界条件の設定は正しくなされています。図 - 11 に温度等高線図の例を示します。

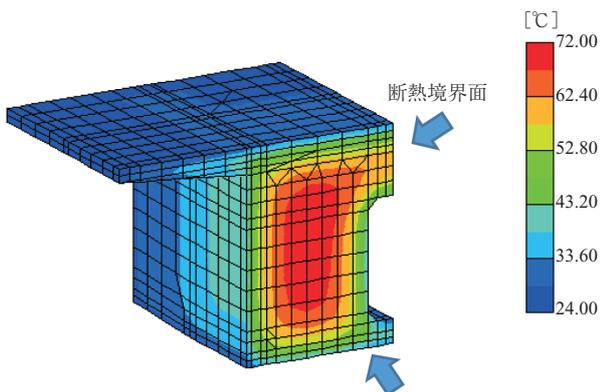


図 - 11 温度等高線図の例

図 - 12 に温度計算結果（青線）が振動している例を示します。メッシュ分割が粗すぎたり、あるいは、時間刻みが大きすぎたりすると、温度が振動することがあります。

この例は、脱枠による急激な温度変化が引き金となり温度が振動しています。このような場合は、メッシュサイズと時間刻みを細かくすることで対処します。

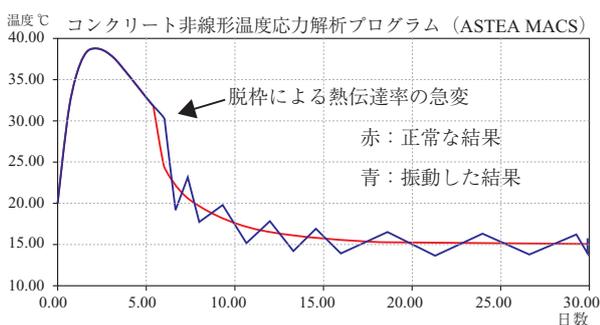


図 - 12 温度計算結果の振動例

応力解析の結果は、変形図や主応力図で結果の妥当性を調べてから結果整理を始めます。異常に大きな値が出ているようであれば、物性値・境界条件に誤りがあるのでもう一度データを調べます。

#### 5.1 ひび割れ発生確率の限界値による照査

解析で求めたひび割れ指数の最小値が図 - 3 の安全係数より大きいことを確認します。ここで注意すべきは、図

- 3 は 3 次元 FEM の計算結果と実構造との比較によって作成されたものであり、壁・スラブの応力の緩やかな断面に適用すると記されていることです。したがって、隅角部など応力が集中する部位の最少ひび割れ指数を用いて照査することは適切ではないといえます。

#### 5.2 ひび割れ幅の限界値による照査

有限要素法によるひび割れ幅の算定も可能となっていますが、計算で求めた最小ひび割れ指数から図 - 13、式 (2) を用いて最大ひび割れ幅<sup>1)</sup>を予測することが多いと思います。この関係は外部拘束の卓越した壁構造の実験結果から得られたもので、隅角部や表面を除く部材内部の最小ひび割れ指数から最大ひび割れ幅を推測するものであると記されているので適用には注意が必要です。

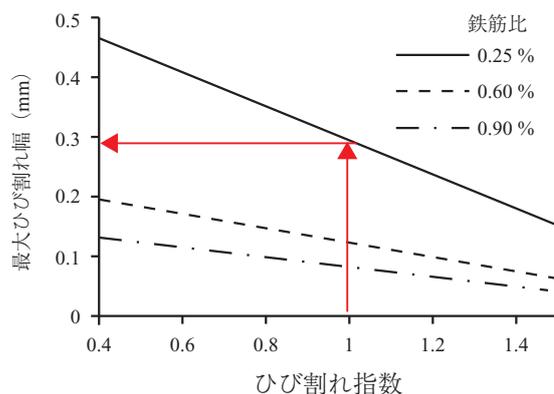


図 - 13 最大ひび割れ幅とひび割れ指数の関係<sup>1)</sup>

計算で求めたひび割れ指数の最小値が 1.0 で、その部位の鉄筋比が 0.25 % ならば、予想されるひび割れの最大ひび割れ幅は 0.3 mm であるとします。こうして求めた予測値がひび割れ幅の限界値を超えていないかを照査します。

$$w = \gamma_a (-0.071/p) \times (I_{cr} - 2.04) \quad (2)$$

w : 最大ひび割れ幅 (mm)

p : 鉄筋比 (%)

$I_{cr}$  : ひび割れ指数

$\gamma_a$  : 安全係数で一般に 1.0

### 6. ひび割れ対策

温度ひび割れの対策は体積変化を抑制する、発生応力を低減する、ひび割れ幅を制御するなどに大別できます。また、応力の発生が内部拘束応力卓越型か、あるいは外部拘束応力卓越型かによって、発生応力の低減対策も異なるものとなるので、効果の期待できる対策を単独あるいは併用して行うことになります。ここでは、対策例と期待される効果・注意点について表 - 7 にまとめます。

ひび割れ補強鉄筋はひび割れ発生そのものを防止するものではなく、ひび割れと直交する方向に鉄筋を配置することでひび割れ幅の拡大や進展を抑制するものです。温度応力解析の結果から補強鉄筋量を算定する方法の明確な規定はありませんが、ここでは二つの算定例を紹介したいと思います。

最大ひび割れ幅とひび割れ指数の関係より算定する例は

表 - 7 ひび割れ対策例一覧

対策	目的・効果	注意点
ブロック分割	温度上昇量の低減	<ul style="list-style-type: none"> <li>施工工程に関連</li> <li>既設コンクリートが拘束体となる</li> </ul>
保温養生	内外温度差の低減 表面ひび割れの抑制	<ul style="list-style-type: none"> <li>養生終了時の温度急変</li> <li>外部拘束応力の助長</li> </ul>
低発熱セメント	温度上昇量の低減	<ul style="list-style-type: none"> <li>材料の入手が可能か</li> <li>強度発現までの期間</li> </ul>
膨張材	収縮ひずみの補償	<ul style="list-style-type: none"> <li>制御機構が十分解明されていない</li> <li>内部拘束応力を助長</li> </ul>
高性能AE減水剤	単位セメント量の低減	<ul style="list-style-type: none"> <li>単位セメント量 10 kg/m<sup>3</sup> で 1℃ 程度の温度増減</li> </ul>
パイプクーリング	温度上昇量の低減	<ul style="list-style-type: none"> <li>設備コスト</li> </ul>
ひび割れ誘発目地	ひび割れの発生を目地位置に制御	<ul style="list-style-type: none"> <li>耐久性上の弱点になり得る</li> </ul>

許容最大ひび割れ幅とひび割れ指数から式(2)または図-13より必要鉄筋量を算定します。

もう一つの例は、補強すべき領域の面積・領域内の平均応力などから必要鉄筋量を算定するものです。

図-14は引張主応力に直交する断面のひび割れ指数を表示したもので、ひび割れ指数が1前後の赤線で示した領域(1100mm \* 800mm)が補強対象とします。この領域内要素の断面直交方向の応力の平均値が3.24 N/mm<sup>2</sup>とします。

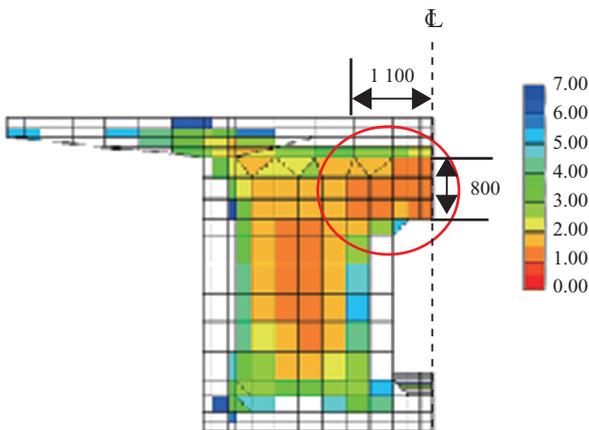


図 - 14 評価断面のひび割れ指数

表-8はひび割れを発生させないよう引張応力をすべて補強鉄筋に負担させる場合の断面直交方向鉄筋量の算出

例を示します。また、ひび割れ発生を許容し、コンクリートの負担できない応力分をプレストレスで補う場合について断面直交方向に配置すべきPC鋼材の算出例を表-9に示します。

表 - 8 必要鉄筋の算出例

領域の平均応力 $\sigma_c$	領域面積 $A$	$\sigma_c * A$
3.24 (N/mm <sup>2</sup> )	8.8 * 10 <sup>5</sup> (mm <sup>2</sup> )	2.85 * 10 <sup>6</sup> (N)
補強鉄筋の許容応力 120 (N/mm <sup>2</sup> ) とした場合の必要鉄筋量は 2.85 * 10 <sup>6</sup> / 120 = 23 750 (mm <sup>2</sup> )		

表 - 9 必要 PC 鋼材の算出例

コンクリートの引張強度 $f_{tk}$	超過応力 $\sigma_c - f_{tk}$	$\sigma * A$
2.40 (N/mm <sup>2</sup> )	0.84 (N/mm <sup>2</sup> )	7.39 * 10 <sup>2</sup> (KN)
PC 鋼材 1 本当たりの緊張力を 600 (KN) とすると PC 必要本数は 739/600 = 1.2 → 2 本		

## 7. おわりに

今回の講座(その1)は温度応力解析における基礎知識とモデル作成での注意点について解説しました。

温度応力は自己平衡力により生じる応力であり、強度発現と温度変化によって複雑な挙動を示します。解析者はデータに誤りがないか、モデル化は適切かなども含めて計算結果の工学的判断を行う必要があります。この講座がその判断の一助となれば幸いに思います。

### 参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート標準示方書設計編 2012 年制定
- 2) 土木学会：コンクリート構造の限界状態設計法(案)コンクリートライブラリー第 52 号, 1983 年, 11 月
- 3) 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
- 4) 田辺 他：パイプクーリングにおける管壁面の熱伝達率の決定並びに冷却効果の解析, 土木学会論文報告集, 第 343 号, 1984 年, 3 月
- 5) 新居 他：鉛直パイプクーリング工法におけるクーリングパイプ表面の熱伝達率の検討, コンクリート工学年次論文集, vol.36, No.1, 2014
- 6) 笹倉 他：エアパイプクーリングによる温度ひび割れ抑制効果に関する研究 コンクリート工学年次論文集, vol.24, No.1, 2002

【2016 年 2 月 22 日受付】