

# 第3回 温度応力解析のいろは — 解析概要編 —

講師：吉川 信二郎\*

## はじめに

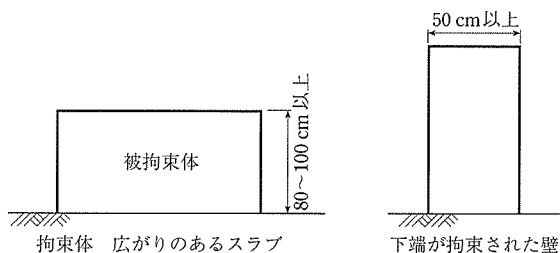
コンクリート標準示方書<sup>1)</sup>第4章 施工段階におけるひび割れ照査では施工段階で発生するひび割れが、構造物の安全性等を損なうおそれのある場合には、①セメントの水和に起因するひび割れ照査、②乾燥に伴うひび割れの照査を行わなければならないと記されています。現状では乾燥による水分移動とそれに伴う応力を、水和に起因する応力と同程度には予測する事ができないので、乾燥収縮ひずみを初期ひずみとして温度ひずみと同様に扱うこととします。ここではこれらの照査に関する解析を温度応力解析と呼ぶことにしてその概要をわかりやすく解説したいと思います。

## 1. 温度応力とは

### (1) 温度応力はなぜ発生するか

温度応力の検討対象となる構造物の部材寸法の目安は、広がりのあるスラブについては厚さ 80～100 cm 以上、下端が拘束された壁では厚さ 50 cm 以上と考えてよいが、プレストレストコンクリート構造物などのように、富配合のコンクリートが用いられる場合や、鋼桁により拘束を受けるコンクリート床版などは、より薄い部材であっても検討対象とされています。

すなわち、構造がマッシュアップであれば水和熱（水とセメントの水和反応によって生じた熱）による温度分布が、内部



対象構造	拘束体
ダム	岩盤、地盤
基礎マット	既設コンクリート、先行リフト
橋脚、柱頭部	鋼桁など
カルバート	
床板と鋼桁の複合構造	
トンネル覆工コンクリートなど	

図 - 1 温度応力の検討対象構造

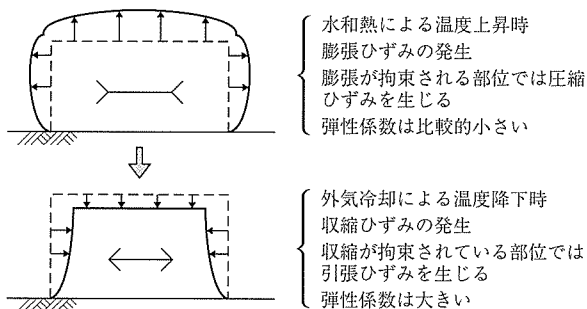


図 - 2 温度応力発生メカニズム

と外表面でより大きな差を生じること、富配合のコンクリートは水和熱の発生量がより多いこと、コンクリートは乾燥収縮するが鉄筋や鋼桁は収縮しないので、コンクリートの体積変化を拘束することなどが温度応力の発生要因となります。また段階施工においては、コンクリートの硬化現象があり、温度上昇時（若材齢時）と温度降下後では弾性係数が大きく異なります。よってコンクリートの受ける温度履歴が温度応力の大きさに深く関係してきます。

これらを整理して図 - 1、図 - 2 に示します。コンクリートは水和反応により発熱しながら硬化します。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による体積変化が生じます。体積変化が拘束されると応力が発生します。このとき生じる応力を温度応力と呼んでいます。

### (2) 温度応力の分類

温度応力は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。これを理解するために、硬い地盤上の基礎コンクリートの解析例をもとに、検討することとします。図 - 3 (a) が解析条件です。温度解析の境界条件はコンクリート上面と側面が熱伝達境界で、下面は断熱境界です。応力解析の境界条件は下面を完全拘束としました。図 - 3 (b) は下面、中央、および上面の3点の温度時刻歴です。材齢 1.5 日で下面と上面の温度差が最大となり、およそ 15 度となっています。

内部拘束応力はコンクリート内部と外部の温度差によって生じる内外部の膨張量の差により発生する応力です。材齢初期の温度上昇時あるいはピークを過ぎて外表面側が冷却されて、内外温度差が大きな時期に発生するもので小さなひび割れが表面に発生します。このひび割れは表面ひび

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

割れで、大きなひび割れになるものではないといわれています。

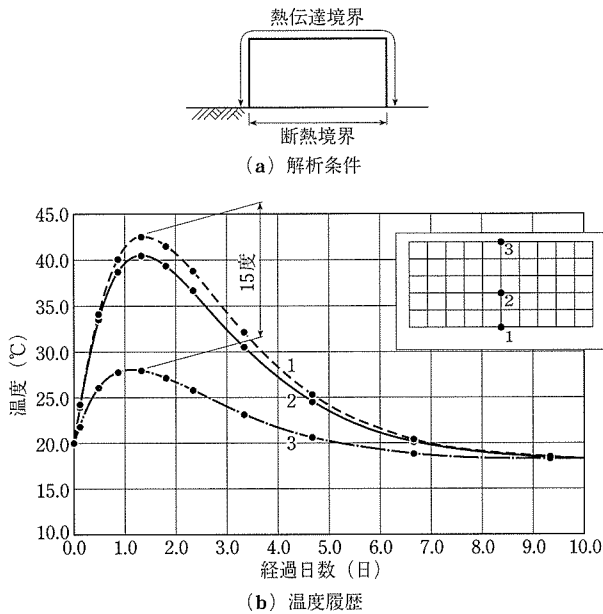


図-3 下面を拘束されたコンクリートの例題

内部拘束応力の例を図-4(a),(b)に示します。内外温度差が最大となる材齢1.5日の温度分布が図-4(a)です。内部は表面に比べて15度高くなっており、この温度勾配により図-4(b)に示すような応力が発生しています。内部は温度上昇量に見合う膨張ができない(回りのコンクリートと地盤の拘束を受けている)ので圧縮応力が発生し、外表面では温度上昇量に見合う膨張以上に内部側より膨張させられているために引張応力が発生しています。ただし表面の薄い層のみが引張応力となっていて、ひび割れが生じたとしても内部まで深く進行するものではないことが理解できます。

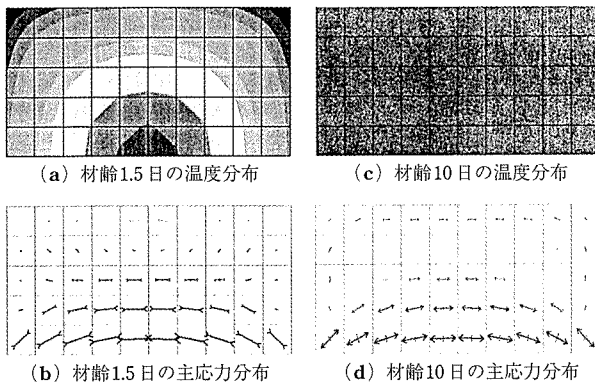


図-4 内面拘束応力と外部拘束応力

外部拘束応力はコンクリートが外気冷却され、内外の温度差が小さくなって構造全体が温度低下するとき、その収縮変形が外部の拘束体によって拘束されて生じる応力です。この応力は部材断面にほぼ一様に生じるため、もしひび割れが発生すると部材を貫通するような構造物の安全性に重

大な影響を及ぼすひび割れになる可能性があります。

図-4(c),(d)に外部拘束応力の例を示します。内外の温度差がほとんどなくなっている材齢10日を選び、そのときの温度分布が図-4(c)です。図-4(d)に示すように材齢10日の主応力の分布は内部の広い範囲に引張応力が生じていて、外部拘束応力が内部側より表面に向かうひび割れを生じさせる可能性を示しています。

一般に、温度応力の大きさは、内部拘束が卓越する場合には、温度分布形状で定まり、外部拘束が卓越する場合には、平均温度降下量と拘束体の剛性の大きさにより決まります。

## 2. 温度応力解析

セメントの水和発熱(乾燥収縮も含め)に起因するひび割れに関する検討は、通常環境条件、構造寸法、材料の熱物性、施工方法などの影響をとり入れた温度解析を最初に行います。ついで、温度解析により得られた温度分布に基づく体積変化を求め、構造の拘束条件、コンクリートの力学特性を考慮した応力解析を実施して応力を求めます。これにより有害なひび割れが発生するかを検討し、必要ならばひび割れ対策を行います。これらの流れを図-5に示します。

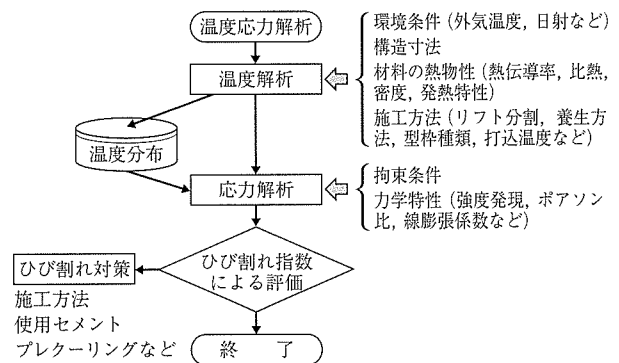


図-5 温度応力解析の流れ

### 2.1 温度解析

温度解析は水和熱による内部発熱と、外表面の対流熱伝達による冷却を考慮してコンクリートの温度分布を時刻歴で計算します。この計算には、通常、有限要素法<sup>2)</sup>(FEM)が用いられますが、本講座で既にFEMの解説がなされていますので、ここでは入力条件や解析にあたって注意すべき点について解説します。

#### (1) 温度解析における入力条件

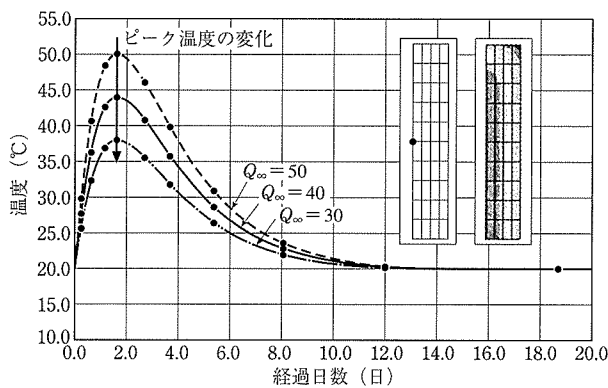
温度解析を行う際は、事前に打設計画、コンクリートの配合、使用するセメントの種類、養生方法、型枠種類、地盤や既設コンクリートなどの熱物性を入手しておく必要があります。水セメント比、セメント種類、単位セメント量はコンクリートの熱物性を決定するのに必要となります。温度解析に必要な熱物性データおよび他の入力条件データの一覧を表-1に示します。

表 - 1 温度解析における入力条件一覧

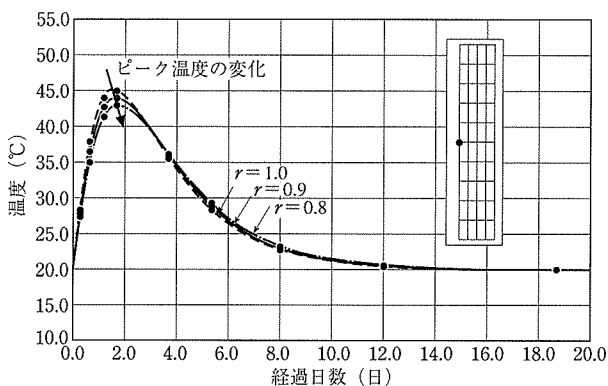
		参考値	
		コンクリート	岩盤
熱伝導率 $\lambda$	W/m $^2$ C	2.6~2.8	1.7~5.2
密度 $\rho$	kg/m $^3$	2 300~2 400	2 600~2 700
比熱 $c$	kJ/kg $^{\circ}$ C	1.05~1.26	0.71~0.88
断熱温度上昇式 $Q(t) = Q_{\infty}(1 - e^{-rt})$		セメント種類, 単位セメント 量, 打込温度 により変る	発熱しない
終局断熱温度上昇量 $Q_{\infty}$	$^{\circ}$ C		
温度上昇速度パラメータ $r$	-		
初期温度 (コンクリート打込温度)	$^{\circ}$ C	外気温度 +3 $^{\circ}$ Cなど	外気温度又は年 平均気温など
外気温 熱伝達境界 温度固定境界 解析領域 解析時間きざみ		月別平均気温などを利用する 型枠, 養生方法により熱伝達 率を設定する	

① 断熱温度上昇特性

断熱温度上昇特性とは、コンクリートに発生する水和熱を逃さない状態にしたときの時間と温度上昇量の関係を表すものです。コンクリートの発熱速度は、材齢と場所ごとに異なるコンクリート温度の履歴を考慮すべきですが、部材最小寸法が0.5 m以上であれば、コンクリートのすべての部位で断熱状態と同じであるとみなし、断熱温度上昇特性をもってコンクリートの発熱特性として使用します。現時点では0.5 m以下であってもこれを適用しているよう



(a) 終局温度上昇量の変化と温度履歴



(b) 温度上昇速度の変化と温度履歴

図 - 6 断熱温度上昇特性パラメータと温度履歴の関係

です。断熱温度上昇式は式(1)に示すように終局温度上昇量  $Q_{\infty}$  と温度上昇速度に関するパラメータ  $r$  で表されます。

$$Q(t) = Q_{\infty}(1 - e^{-rt}) \quad (1)$$

図 - 6 にパラメータを変えた場合の温度の時刻歴を比較したものを示します。壁の中央のピーク温度は、終局温度上昇量が小さくなると減少するが、ピーク出現時刻は変わりません。図 - 6(a) は終局温度上昇量を 50, 40, 30 度としたケースの、壁中央の温度履歴を比較したものです。一方、温度上昇速度を小さくすると、ピーク温度出現時刻が遅れるとともにピーク温度も減少します。図 - 6(b) が温度上昇速度を 1.0, 0.9, 0.8 としたケースの、壁中央の温度履歴を比較したものです。

② 熱伝達境界

熱伝達境界とは、コンクリートの外表面の温度と外気温度との差に比例して、熱流の移動が起きる境界で、比例係数を熱伝達率と呼びます。熱伝達率は型枠の有無・種類・厚さ・存置期間、養生方法、周囲の風速などを考慮して決定します。通常のコンクリート表面で風速 2~3 m/s の場合、熱伝達率は 12~14 W/m $^2$ C となります。コンクリート標準示方書<sup>1)</sup>にある、型枠種類や養生方法による熱伝達率の参考値を表 - 2 に示します。

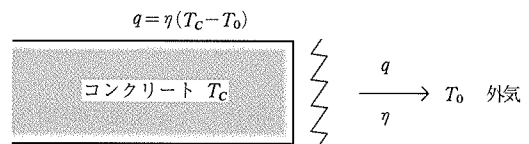


図 - 7 熱伝達境界

表 - 2 熱伝達率  $\eta$  の参考値

NO.	養生方法	$\eta$ (W/m $^2$ C)
1	メタルフォーム	14
	散水 (湛水深さ 10 mm 未満)	
2	湛水 (湛水深さ 10 mm 以上 50 mm 未満)	8
	・むしろ養生を含む	
3	湛水 (湛水深さ 50 mm 以上 100 mm 未満)	8
4	合板	8
5	シート	6
6	養生マット	5
	・湛水 + 養生マット, 湛水 + シートを含む	
7	発泡スチロール (厚さ 50 mm) + シート	2

(2) モデル化と解析時間きざみ

① 解析領域

解析対象が地盤などの上にある場合、考慮すべき地盤の範囲を次のように考えます。まず、知りたいことはコンクリートの温度応力であり、地盤の役割は単に対象構造から出てゆく熱流や拘束効果を表現するためのものであるため、地盤をある領域で切り

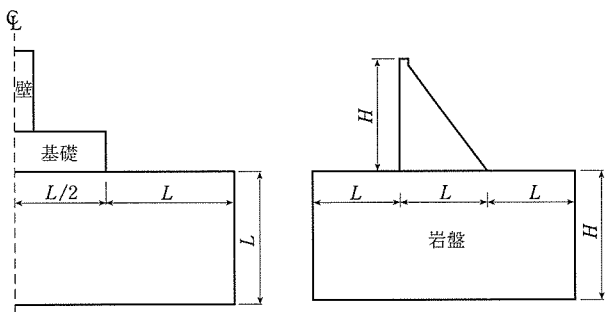


図-8 解析領域

そこに境界条件を与えた影響が、解析対象構造に及ばないように配慮します。一般には、図-8に示すように解析対象構造の1~1.5倍の領域を取ればよいと思います。

② 解析時間刻み

コンクリートの水和発熱速度は、打設直後から増加し材齢1日あたりでピークとなり、以降減少して、およそ4日~20日程度で0になります。有限要素法による解析においては、熱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)ごとに解くことになります。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、あまり細かい時間刻みでは、計算時間がかかり過ぎて効率が良くありません。また、逆に、時間刻みが粗過ぎても正しい結果が得られません。適切な解析時間刻みは、解析対象のメッシュ分割の大きさも関連してきますので、次のような考え方で設定したらよいと思います。

時間刻みの大きさは、解析したい現象の時間スケールから決定されます。たとえば、高温に熱せられた鉄板に水をかけたときの現象と、コンクリートが水和熱により温度上昇し、外気冷却される現象とでは、時間スケールがまったく異なります。コンクリートの温度解析に限定して考えると、時間スケールは

- ・水和発熱による温度上昇と下降パターン(2日でピーク温度)
- ・外気温度の変動(時間変化, 日変化, 月別平均気温, 年周期変動)

などから決めることができます。すなわち、変動パターンを表現するのに必要最小限の時間分割を考えます。通常、周期変動であれば、1周期を8~10分割でよいとされます。図-9に変動パターンと時間刻みの関係を示します。

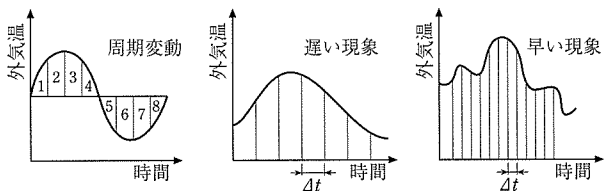


図-9 変動パターンと時間きざみ

ちょっとイイ話し

通常の温度応力の検討では、日射による輻射熱の影響は小さいとして無視していますが、輻射熱により流入する熱量を等価な外気温度に換算して、熱伝達境界として扱うことができます。また、ヒーターにシートをかけて保温するような場合も、熱伝達境界として扱うことができます。これらの例を図-A, 図-Bに示します。

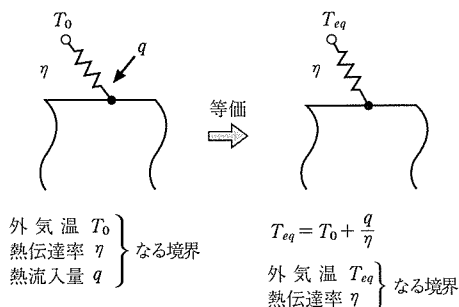
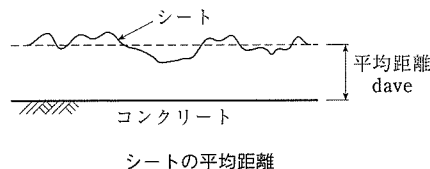


図-A 日射の熱伝達境界

熱線ヒーター付シートを考慮した場合は、次のように考えます。



シートとコンクリート面との間の熱伝達率  $\eta_s$  の目安は、たとえば、

$$\eta_s = \frac{\lambda_{air}}{d_{ave}} + \eta_{rad}$$

と考えます。ただし、輻射の影響を無視できるとして、 $\eta_{rad}=0$  空気の熱伝導率  $\lambda_{air}=0.03 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ ,  $d_{ave}=10^{-3}\text{m}$

とすれば  $\eta_s = \frac{0.03}{10^{-3}} = 30 \text{ W/m}^2\text{C}$  となります。

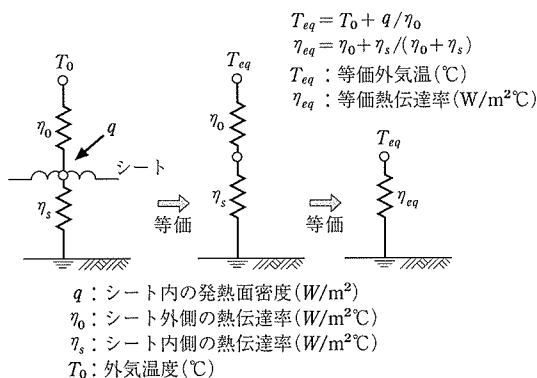


図-B ヒータとシートの熱伝達境界の例

経験的に、最小メッシュサイズが30 cm程度の解析対象に対して、下記のような時間刻みを推奨します。

- ・水和の進む初期材齢2日まで  $\Delta t = 3 \sim 6$  時間
- ・ピーク以降  $\Delta t = 6 \sim 12$  時間
- ・日平均気温の冷却過程  $\Delta t = 12 \sim 24$  時間
- ・年周期気温の冷却過程  $\Delta t = 20 \sim 30$  日
- ・日射量の変動を考慮  $\Delta t = 1 \sim 3$  時間
- ・脱型など熱伝達率の急変前後  $\Delta t = 1 \sim 3$  時間

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て、全体の時間ステップ数を減らして計算時間の節約を図ります。

③ 時間刻みとメッシュの分割

次に、時間刻みが決定されたら、その時間刻みに対応する最適メッシュ寸法について考えます。まず、 $\tau$  時間に熱がどの程度浸透するか調べて見ます。

$$x = 2\sqrt{a\tau} : \text{平均的な浸透距離 (m)} \quad (2)$$

$$a = \lambda/\rho c : \text{熱拡散係数 (m}^2/\text{h)} \quad (3)$$

ここに、 $\lambda$  は熱伝導率 (kj/mh $^{\circ}$ C)、または (W/m $^{\circ}$ C)

$\rho$  は密度 (kg/m $^3$ )

$c$  は比熱 (kj/kg $^{\circ}$ C)

普通コンクリートの熱拡散係数は、およそ0.004 (m $^2$ /h)であるので、熱の浸透距離は表-3のようになります。

表-3 時間に対する熱浸透距離

時間 $\tau$ (h)	浸透距離 $X$ (cm)
1.0	13
3.0	22
6.0	31

$\Delta t$  時間での熱の浸透距離を考慮して、図-10に示すような1次元の熱伝導モデルを考えます。図-10(a)は領域を1要素で分割したケース、図-10(b)は領域を2要素で分割したものです。熱は領域の左側から右に向かって浸透するとして、 $\Delta t$  時間後の温度分布を示してあります。図中の破線はFEMで求められる温度分布(要素内では直線分布)で温度勾配が大きい程、結果の精度が悪くなっています。このことから、 $\Delta t$  時間での熱の浸透距離よりもメッシュサイズを小さくすることが望ましいといえます。ただし、温度勾配があまり大きくない部分は、少し大きなメッシュサイズ

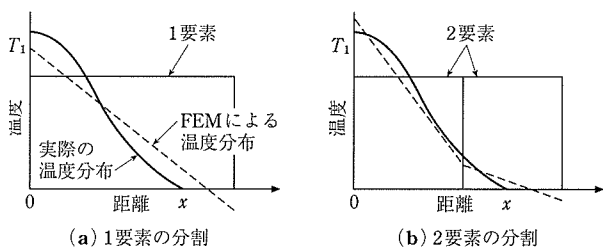


図-10 メッシュサイズと温度分布

にしても差し支えありません。一般に、外表面のメッシュサイズは20~50 cm程度で、内部のメッシュサイズは50~100 cmとして、最小時間刻みを3~6時間とした解析が行われています。

図-11は既設コンクリートの上に新設コンクリートを打設したときの1次元の熱伝導モデルです。最小時間刻みを3時間として、打継ぎ目のメッシュ分割を粗くしたケースと、細かくしたケースの結果を比較したものです。3時間での熱の浸透距離はおよそ22 cmの熱物性を使用し、既設コンクリートと新設コンクリートの初期温度はそれぞれ17 $^{\circ}$ Cおよび20 $^{\circ}$ Cとしました。図-11(a)がメッシュ分割図です。

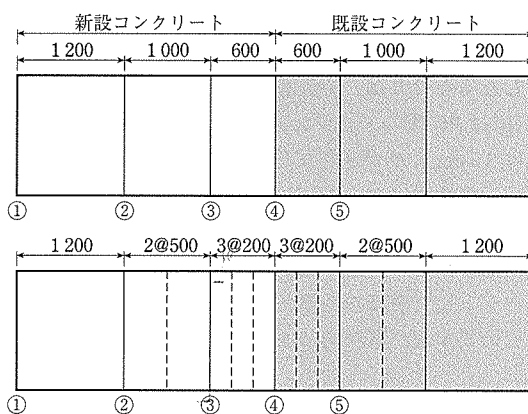


図-11(a) メッシュ分割図

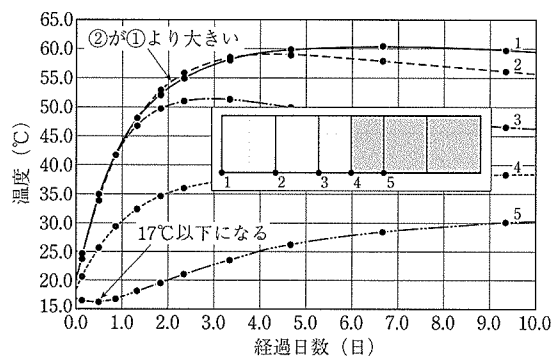


図-11(b) 粗いメッシュ分割の温度履歴

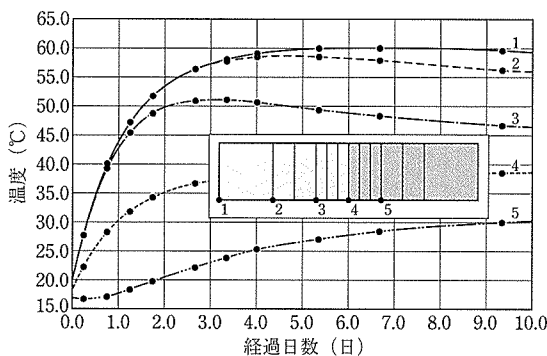


図-11(c) 細かいメッシュ分割の温度履歴

浸透距離 22 cm に対しておよそ 2 倍の大きさとなっているため、②の温度が①より大きくなっているところがあること、および、⑤の温度が初期温度 17℃より下がっているなど、精度があまり良くないことがわかります。

一方、図 - 11 (c) のメッシュサイズが 20 cm のケースでは、そのような現象はなくなっています。また、解析対象左側の温度勾配が小さな領域では、メッシュサイズが 120 cm であっても、とくに異常は見あたりません。

④ 温度分布とメッシュ分割の関係

時間刻みに関連したメッシュ分割の注意点のほかに、温度変化が大きくなる部位についての分割にも注意が必要です。たとえば、新設コンクリートの両面から熱が放散される部分は、図 - 12 (a) に示すような温度分布が予想されます。FEM の場合、ひとつの要素内の温度分布は直線となりますので、このような温度分布を表現させるためには、少なくとも 2 要素が、精度を落とさなければ、3 要素での分割が必要です。図 - 12 (b) は PC 橋のメッシュ分割例です。張出し先端の厚さは 25 cm ですが 3 層に分割してあり、厚さ方向 1 メッシュの寸法は 8 cm 程度です。橋軸方向の分割は、橋軸方向の温度勾配が大きくなる打継ぎ部を 50 cm、温度勾配の小さい内部は 200 cm の分割としています。アスペクト比 (要素の長辺と短辺の比) が 25 と大きくなっていますが、精度的にはあまり問題にはなりません。

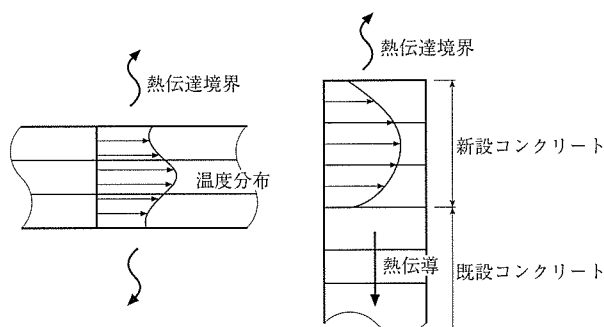


図 - 12 (a) 温度分布性状

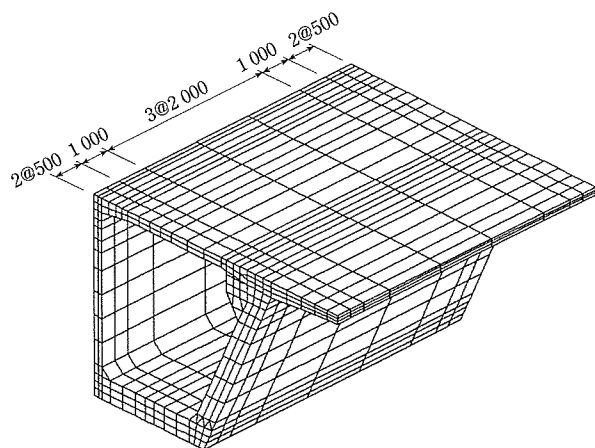


図 - 12 (b) PC 橋メッシュ分割例

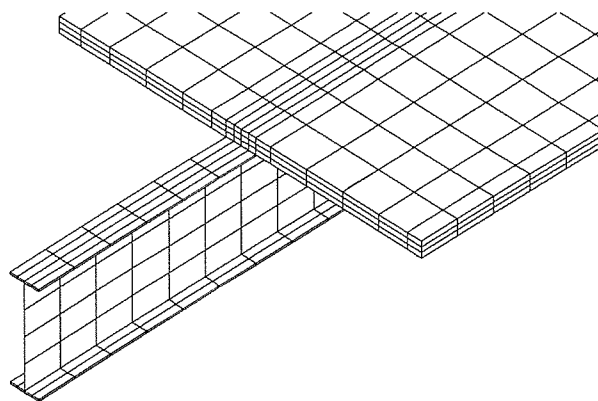


図 - 12 (c) 鋼桁と床版のメッシュ分割例

また、図 - 12 (c) には鋼桁と RC 床版の複合構造のメッシュ分割例を示します。この解析は、コンクリートの乾燥収縮変形が、鋼桁のフランジ部により拘束されて発生するコンクリートの応力を評価するものです。通常の応力解析では鋼桁のモデル化にはシェル要素を使用しますが、温度解析では、ソリッド要素を使用します。鋼桁のウェブ、フランジともに厚み方向は 1 要素で分割します。これは、少し大胆な扱いですが、鋼桁の熱伝導率が大きく、板厚も薄く、厚み方向の温度勾配は小さいので、温度解析の結果には大きな影響はないと思われます。応力解析の結果の精度に関しては、鋼桁の応力は興味の対象外であること、および、鋼桁をシェル要素に変更する作業が大変であることなどから、このようなモデル化で温度応力解析を行っているのが現状です。

(3) 温度解析の結果

温度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ぎ面上) 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。図 - 13 に示すように、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 - 14 に温度履歴が振動している例を示します。データの単位が誤っていたり、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。このような場合で、データの単位系等に誤りがなければ、熱伝導方程式の時間積分の方法を確認して

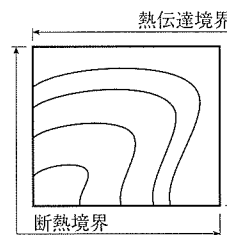


図 - 13 温度等高線図

ください。通常は、温度の時間に関する微分を、一階差分商で近似するとき、時間増分間隔の中央での値（中央差分）とみなして離散化が行われます。この方法で温度が振動するのであれば、一階差分商が時間増分終了での値（後退オイラー法）で計算すると、振動を抑える効果があります。

図 - 14 の破線がその結果です。コンピュータがいくら高性能になったとはいえ、極端に細かいメッシュ分割と時間刻みでの計算は現実的ではありません。3～5万節点以下に抑えて、時間刻みもできるかぎり粗く取り、時間積分法は中央差分の結果が振動するようであれば後退オイラー法で再計算してみます。それでも振動がおさまらない場合は、メッシュ分割を細かくして時間刻みの調整が必要となります。

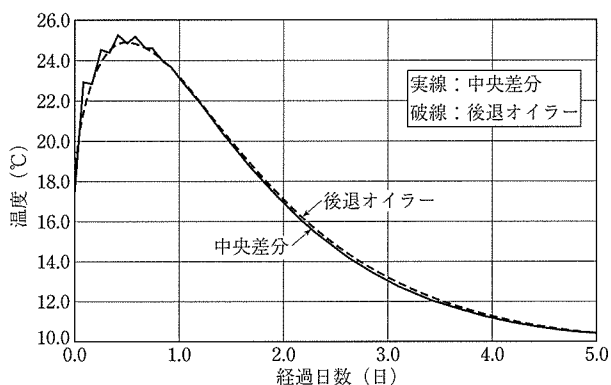


図 - 14 時間積分パラメータ

## 2.2 応力解析

応力解析は温度解析で求められた温度変化から、コンクリート、鋼材、地盤などの拘束体の体積変化を求め、境界および変形適合条件と力の釣り合い条件を満足するように、コンクリートの応力を求めます。ここでは、FEMを用いた応力解析の入力条件やひび割れ照査の方法について説明します。

### (1) 温度応力の数値計算手順

温度解析ですべての節点の温度が求められているので、時間増分  $\Delta t$  の温度増分量と収縮ひずみの増分量は既知であり、増分時間後のひずみを求めてから応力が計算されます。ひずみは全ひずみ、拘束ひずみ、温度ひずみ、および体積ひずみに分類され、式(4)の関係があります。

$$\begin{aligned} (\text{全ひずみ}) = & (\text{拘束ひずみ}) + (\text{温度ひずみ}) \\ & + (\text{体積ひずみ}) \end{aligned} \quad (4)$$

ここに、

全ひずみ : 釣り合った状態で、実際に目に見える変形に対応するひずみ

拘束ひずみ : 応力に寄与するひずみで、弾性ひずみとも呼ばれる

温度ひずみ : 温度増分に線膨張係数を掛けたひずみ

体積ひずみ : 収縮ひずみ、膨張ひずみ、クリープひずみを総称したひずみ

数値計算上は、増分時間内の増分量を求めるので、増分拘束ひずみに弾性係数を掛けて応力増分が計算され、増分

開始時点の応力に増分応力が加えられます。これらの関係を図 - 15 に示します。

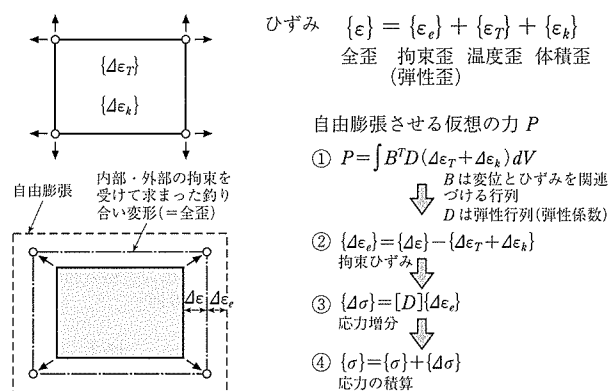


図 - 15 数値計算の手順

### (2) 解析手法

モデルを作成する場合は解析対象構造の形状を観察して、2次元解析、3次元解析、擬似3次元解析または、CP法のどれを使用するかを決めます。

通常、応力解析は温度解析に使用したモデルと同じメッシュ分割のデータを使用しますが、擬似3次元解析を行う場合は、温度解析と応力解析のメッシュが異なります。打継ぎ面、岩盤や鋼桁とコンクリートの接合面は滑らないとします。

鉄筋の拘束効果が無視できない場合は、鉄筋も考慮しますが、鉄筋とコンクリートは完全付着と見なします。

#### ① 解析モデルの分類

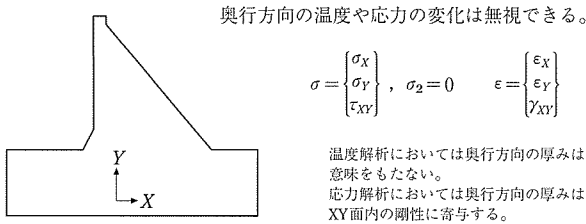
2次元で解析可能な場合は、平面応力、平面ひずみ、または軸対称の分類があります。軸対称は円筒タンクの底版・側壁などの解析で周方向の境界条件が一定の場合に使用します。重力式ダムの上流面内の解析モデルで堤長方向がブロック分けされている場合は、堤長方向の温度分布を一様とみなして、平面応力問題として解析します。平面応力問題では、奥行き方向の寸法が、剛性の計算に考慮されます。平面ひずみは面外のひずみが0と見なせる場合に使用します。この場合、奥行き寸法は単位の厚さとして計算が行われます。図 - 16(a)～図 - 16(c)

#### ② CP法

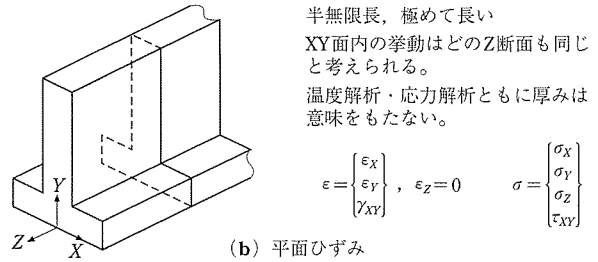
温度変化による体積変化が卓越する構造物に対して、簡易的に行う応力解析の手法のひとつにCP法<sup>3)</sup>があります。この方法は、解析対象断面内のひずみ分布が直線であるとの仮定を設け、自由な熱変形を軸変形成分と曲げ変形成分に分離して、それぞれの変形に対する拘束効果を考慮して、コンクリートの応力が算定されます。③の有有限要素法による擬似3次元解析と同等の解析方法と考えられます。図 - 16(d)

#### ③ 擬似3次元解析

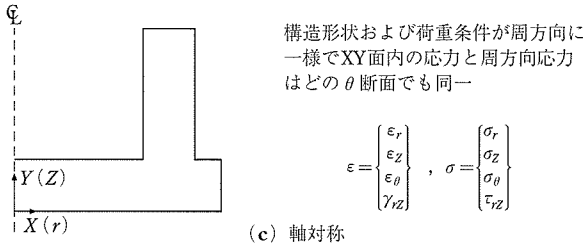
壁のような構造物を2次元で解析する場合の温度解析モデルは、壁断面の2次元解析とします。応力解析は、壁断面に直交する面内の2次元平面応力解析を行います。



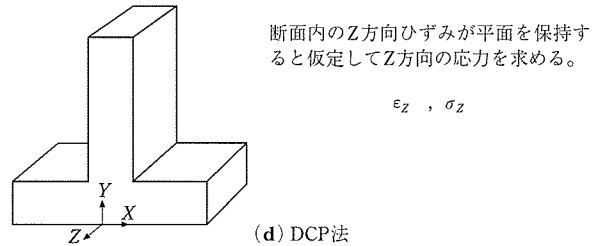
(a) 平面応力



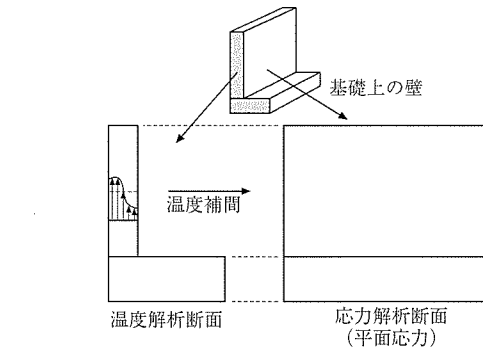
(b) 平面ひずみ



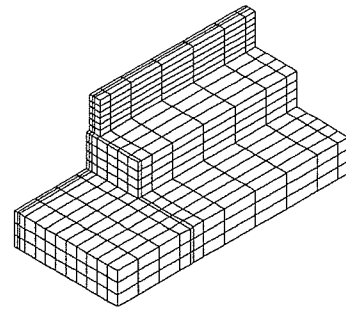
(c) 軸対称



(d) DCP法



(e) 疑似3次元解析



(f) 3次元解析

図 - 16 解析モデルの分類

温度解析のメッシュと応力解析のメッシュが異なりますので、壁の厚み方向の平均温度を応力解析のメッシュに与えるなどの温度補間が必要になります。図 - 16 (e)

④ 3次元解析

壁の接合部や橋脚柱頭部など3次元で解析しなければ意味がない構造もありますが、近年のコンピュータの高性能化に伴い、3次元解析も比較的簡単に行えるようになっていたので、今後、ますます多くなると思われます。

図 - 16 (f)

(3) ひび割れ照査の方法

材齢  $t$  日におけるコンクリートの引張強度を  $f_{tk}(t)$ 、最大主引張応力を  $\sigma_t(t)$  としたとき、ひび割れ指数  $I_{cr}(t)$  が式 (5) で定義されます。

$$I_{cr}(t) = f_{tk}(t) / \sigma_t(t) \quad (5)$$

このひび割れ指数が安全係数より大きければひび割れ照査に合格したとします。安全係数は 1.0~1.8 の値で、コンクリート標準示方書<sup>3)</sup>の安全係数とひび割れ発生確率との関係 (図 - 17) から求めます。たとえば、ひび割れ発生確率を 25% 以下にしたい場合は、安全係数を 1.45 とします。

ここで定義されたひび割れ指数には、ひび割れがさらに進展するか否については考慮されていません。また、ひび

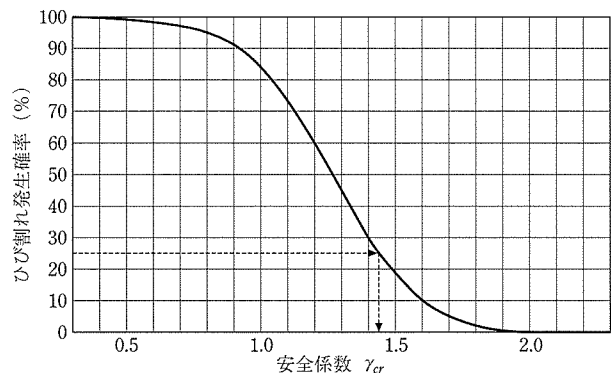


図 - 17 ひび割れ発生確率と安全係数

割れ幅を計算で求める方法もいくつか提案されていますが、精度よく算定するまでにはいたっていません。

(4) 応力解析における入力条件

応力解析に必要な力学特性データおよび他の入力条件の一覧を表 - 4 に示します。

① 強度発現特性

コンクリートは練りませ後数時間で凝固し始め、水和発熱により温度上昇が生じます。通常材齢 1~2 日で最高



表 - 4 応力解析での入力条件一覧

弾性係数		$E(t) = \phi(t) \times 4.7 \times 10^3 \sqrt{f_c(t)}$ } コンクリート 標準示方書 <sup>1)</sup> 施工編 P.52	
圧縮強度	N/mm <sup>2</sup>		$f_c(t) = t/(a+bt) \times d \times f_{ck}$
引張強度			$f_{tk}(t) = c \sqrt{f_c(t)}$
ポアソン比	-	0.2	
線膨張係数	1/°C	10 × 10 <sup>-6</sup>	
クリープひずみ		有効弾性係数を用いることが多い	
乾燥収縮ひずみ		複合構造では考慮することがある	
自己収縮ひずみ		考慮しないことが多い	
鉄筋		考慮しないことが多い	
鋼桁, 鋼管など		鋼による拘束の影響が大きい場合に考慮する	
自重		考慮しないことが多い	
外荷重		プレストレス力や後死荷重などを温度応力に重ねあわせることがある	

温度に達し、強度は同材齢では60%程度の発現となります。圧縮強度を積算温度の関数とした実験式も提案されていますが、コンクリート標準示方書<sup>1)</sup>では材齢の関数とし、平均弾性係数にクリープ、リラクゼーションなどによる剛性低下を考慮した有効弾性係数を用います。

$$f_c(t) = \frac{t}{a+bt} \times d \cdot f_{ck} \quad (6)$$

$$f_{tk}(t) = c \sqrt{f_c(t)} \quad (7)$$

$$E_c(t) = \phi(t) \times 4.7 \times 10^3 \sqrt{f_c(t)} \quad (8)$$

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

$f_{tk}(t)$  : 材齢  $t$  日の引張強度 (N/mm<sup>2</sup>)

$f_{ck}$  : コンクリート設計基準強度 (N/mm<sup>2</sup>)

$E_c(t)$  : 材齢  $t$  日の有効弾性係数 (N/mm<sup>2</sup>)

$\phi_c(t)$  : 弾性係数の補正係数

= 0.73 (材齢3日まで)

= 1.0 (材齢5日まで)

② クリープひずみ

現状では、クリープひずみも考慮した温度応力解析はあまり多くないと思われます。強度発現特性で記したように、コンクリートの弾性係数に強度低下係数を掛けた有効弾性係数を使用することで、クリープの影響を考慮しています。

③ 乾燥収縮ひずみ

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。PC床版の温度応力解析などでは、コンクリート標準示方書<sup>1)</sup> 解 3.2.3 の最終収縮ひずみを 150 $\mu$  にして使用<sup>4)</sup> することもあります。この式は、収縮ひずみが有効材齢で表されていますが、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。結果として、長手方向が拘束されると、断面内様に異常に高い応力が発生するので、使用するには注意が必要です。

④ 自己収縮ひずみ

現状はほとんど考慮しません。

⑤ 鉄筋

コンクリートと鉄筋の線膨張係数がほとんど同じであることから、温度変化に対する体積変化は同じとなり、鉄筋による拘束の影響はないものとしてこれを無視して

います。ただし、乾燥収縮のように、コンクリートのみが収縮して鉄筋は収縮しない場合には、鉄筋による拘束効果を考慮することがあります。このとき、鉄筋とコンクリートは完全付着を仮定します。収縮ひずみが材齢20日で200 $\mu$ 生じるとして、鉄筋比が0.5%で拘束なしの普通コンクリートの応力は1.3 N/mm<sup>2</sup>程度になります。鉄筋比が大きくなるにしたがって、鉄筋の拘束効果が大きくなります。この様子を図-18に示します。

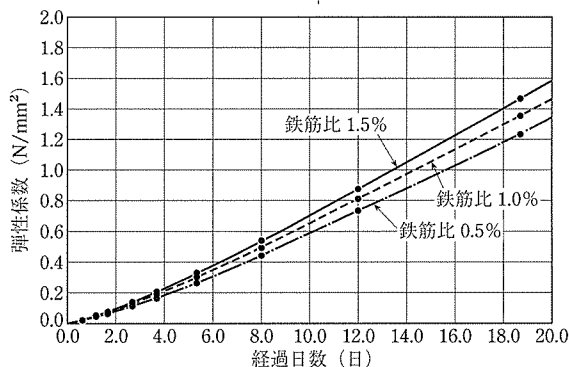


図 - 18 鉄筋の拘束によるコンクリートの応力

(5) 応力解析の結果評価

応力解析が終了したなら、温度解析の場合と同様に、結果が妥当であるかを調べます。たとえば、変形図や経験最小ひび割れ指数の等高線図などを表示させて見ます。

コンクリートの弾性係数が材齢とともに変化するために、通常の弾性解析の応力とひずみの関係とは異なった傾向を示します。応力とひずみの関係や、コンクリートの温度応力解析結果の特殊性について検討することは、解析結果を評価する上で大切なことです。ここでは、いくつかのサンプル計算を基に、その検討を行います。

① 応力とひずみの関係

弾性係数が変化する新設コンクリートと、一定のまま変化しない既設コンクリートに、同一の温度変化を与えた場合の応力履歴を比較します。図-19(a)には弾性係数の変化を示します。図-19(b)は、完全拘束されたコンクリートに、最初の5日間で温度を2度上げ、後の5日間で元に戻した場合のコンクリートの応力履歴を示し

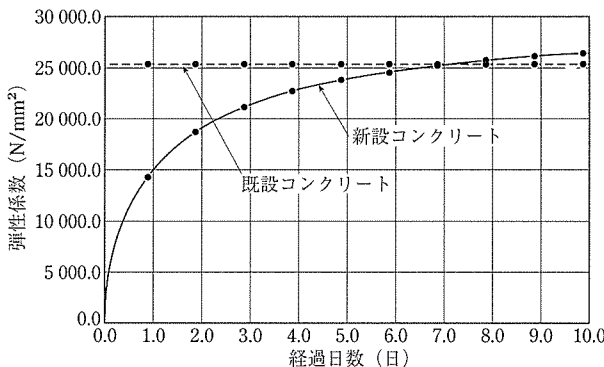


図 - 19 (a) 弾性係数の変化

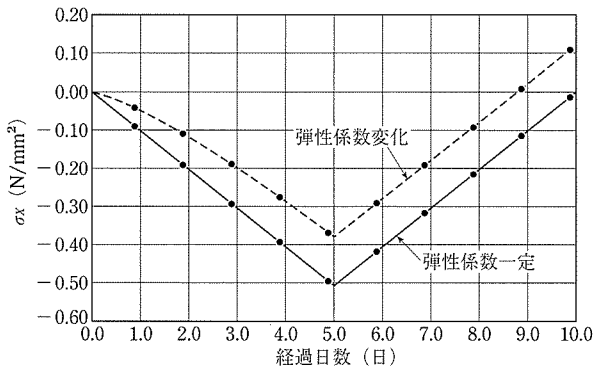


図 - 19 (b) コンクリートの応力履歴

ます。弾性係数一定のコンクリートの応力は5日後に-0.51 N/mm<sup>2</sup>の圧縮応力が生じ、その後逆向きに増加して10日後には0に戻っています。

一方、強度発現式にしたがって、弾性係数の変化するコンクリートの応力は、最初の5日間では、圧縮応力が少しずつ増加しながら-0.38 N/mm<sup>2</sup>となり、その後逆向きに増加して10日後には、0.13 N/mm<sup>2</sup>の引張応力となっています。増分拘束ひずみは最初の5日間は、1日当たり-4μ/日で、後の5日間は+4μ/日になります。応力は、(1)で説明したとおり、増分拘束ひずみにその時点の弾性係数を掛けて計算しますから、式(9)のように書くことができます。

$$\sigma = E_1 \cdot \Delta \epsilon_1 + E_2 \cdot \Delta \epsilon_2 + \dots + E_i \Delta \epsilon_i + E_{i+1} \Delta \epsilon_{i+1} + \dots + E_n \Delta \epsilon_n \quad (9)$$

弾性係数  $E_i$  が一定なら、10日後の応力は0になることが理解できます。また、弾性係数が変化する場合も、このケースでは、 $\Delta \epsilon_i$  が前半と後半で符号が変わるだけですから、材齢初期の弾性係数が、後半での値より小さいことで、最終段階で引張応力となることが容易に理解できます。このように、拘束ひずみの最終値が0あるいは圧縮であるにも拘わらず、コンクリートの応力は引張になることがあります。

② バネモデルによる拘束度の検討

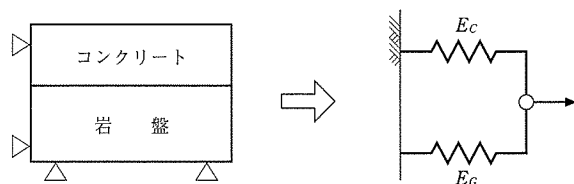


図 - 20 (a) 簡易モデル 図 - 20 (b) バネモデル

温度変化がコンクリートのみを生じる場合、温度変化量を  $\Delta T$ 、コンクリートの線膨張係数を  $\alpha$ 、コンクリートと岩盤の弾性係数をそれぞれ  $E_c$ 、 $E_G$  とすると、全ひずみ  $\epsilon$  は式(10)で与えられます。

$$\epsilon = \frac{1}{E_c + E_G} \cdot \alpha E_c \Delta T \quad (10)$$

コンクリートの弾性ひずみ  $\epsilon_c$  は、全ひずみから熱ひずみを差し引いたもので、

$$\epsilon_c = \frac{1}{E_c + E_G} \cdot \alpha E_c \Delta T = - \frac{\lambda}{1 + \lambda} \cdot \alpha \Delta T$$

但し、 $\lambda = \frac{E_G}{E_c}$  (11)

式(11)の  $\lambda / (1 + \lambda)$  は拘束度と考えることができ、拘束度は単純に岩盤（拘束体）とコンクリートの剛性比ではないことが理解できます。

また、鉄筋による拘束効果を考えるのであれば、岩盤の剛性  $E_G$  を鉄筋の剛性と鉄筋比を掛けたもので置き換えて、温度変化を収縮ひずみと考えます。

$\lambda / (1 + \lambda)$  のグラフは、単位温度変化に対する拘束ひずみの量（あるいは、単位の収縮ひずみによって生じるコンクリートの拘束ひずみ）を表すと考えられ、図 - 21 のような変化になります。図中に表示されている  $\lambda$  の値は、コンクリート強度が十分発現した時点の弾性係数と岩盤の弾性係数の比を表しており、 $\lambda$  が大きい程拘束体の剛性が大きいこととなります。

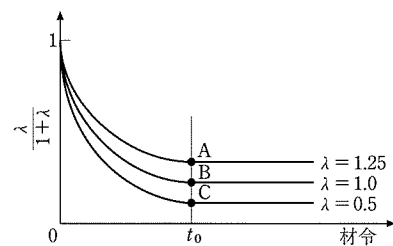


図 - 21 拘束度の変化

材齢  $t_0$  において  $\Delta T$  の温度差により生じる拘束ひずみは A, B, C の値に比例するので、同一温度履歴を与えた場合のひずみ変動量（ピーク温度到達時までの変化量や、ピークから終了時までの変化量）は拘束体の剛性が大きいほど大きくなるのが分かります。

実際の現象は、このような拘束度の材齢での変化と、内部拘束の影響を受けて、複雑な挙動となります。

3. 温度ひび割れ対策

温度応力解析結果の最小ひび割れ指数が、ひび割れ発生確率を許容する安全率より小さい場合は、ひび割れ対策を施す必要があります。温度ひび割れ対策として、図 - 22 に示すものが考えられます。

- 発熱量の低減
  - 単位セメント量の低減
  - 低発熱セメント
- 応力発生に寄与する温度差の低減
  - 打込温度(プレクーリング)
  - 保温養生
  - パイプクーリング
- 外部拘束度の低減
  - リフト高, 打設間隔
  - ひび割れ誘発目地
- その他
  - プレストレス, 膨張材

図 - 22 温度ひび割れ対策の種類

① 発熱量の低減

高性能 AE 減水材等を用いて、単位水量、単位セメント量を低減します。あるいは、低発熱セメントのように、

発熱量の小さいセメントを使用して、コンクリートの温度上昇を抑えます。

#### ② 温度差の低減

コンクリートの打込温度を低下させて、最高温度を低減させます。1回の打設高さを低くして、放熱量を高めて最高温度を低減します。パイプクーリングにより強制的にコンクリート内部の温度を低下させます。コンクリートの内部と外表面部との温度差を小さくするために、保温養生を行い内部拘束応力を低減します。

#### ③ 外部拘束度の低減

1回の打設長さを短くして、外部拘束応力を低減します。ひび割れ誘発目地を設け、ひび割れを目地に集中させます。

#### ④ その他

膨張材を使用して引張応力を低減します。プレストレ

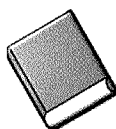
スなどでコンクリートに圧縮力を作用させて、引張応力を低減させます。

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について、簡単に説明しました。次回は、実規模の温度応力解析例をご紹介します。

#### 参考文献

- 1) (社) 土木学会：コンクリート標準示方書・施工編 2002年
- 2) 矢川・宮崎：有限要素法による熱応力・クリープ・熱伝導解析，サイエンス社
- 3) (社) 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
- 4) (社) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 P38

【2002年8月2日受付】



刊行物案内

## 第 10 回 プレストレストコンクリートの 発展に関するシンポジウム 論 文 集

(平成12年10月)

本書は、平成12年10月に淡路島で開催された標記シンポジウムの講演論文集です。

頒布価格：会員特価 10 000 円 〈非会員価格 12 000 円〉(送料はいづれも 600 円)

体 裁：B5判，箱入り