

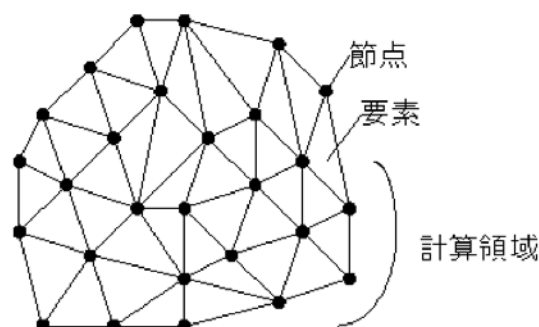
温度応力解析について

アサヒコンサルタント(株) 佃建一

1. はじめに

解析は有限要素法(FEM)と言われる数値解析手法で行ないます。一言で表現すれば、微分方程式で記述できるような物理現象(熱現象、構造力学など)に対して、コンピュータを用いて近似解を求める手法です。

右図のように解析する領域(構造物・地盤)を3角形や4角形(二次元や三次元)に細分割し(要素)、各々について方程式をあてはめ、最後に全領域をまとめた連立方程式を解くものです。大きさや形の異なる要素を組み合わせることで複雑な形状にも対応でき、何よりも実在する物体の挙動をリアルに示してくれるのが大きな特長です。



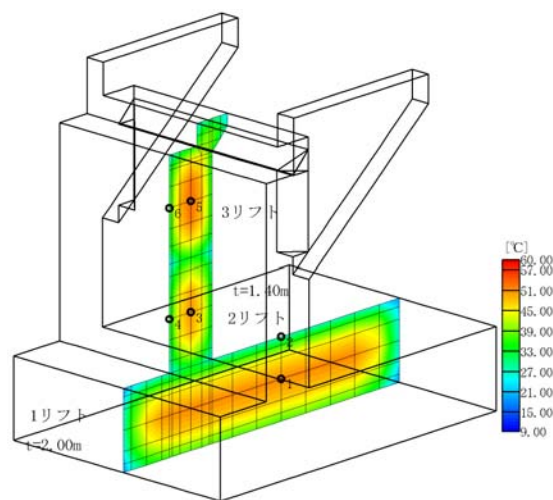
温度応力解析でも、この手法を用いてコンクリート打設後の時間経過に応じて刻々と変化する内部温度(温度解析)やそれによる内部応力(応力解析)を計算します。各要素ごとに計算するため、大規模なモデルではかなりの計算時間を要します。

2. 解析の種類

解析には二次元解析と三次元解析の二種類があります。

①二次元解析:

右図は橋台の三次元解析結果(温度分布)を中央断面で表示したのですが、長手方向ではどの断面でも同様な結果が予想されます。このように同一の断面形状で長い構造物の場合には、二次元の断面一つの情報をもとに、解析を工夫すれば中央の引張応力を推定することが可能となります。(応力状態も最大の引張応力が働くのは中央断面で、ひび割れも普通、真中に入る)。長い梁部材の応力を断面のモーメントと断面定数で計算する手法に似ています。経費が掛からず、旧コンクリート標準示方書(2007)まではこの解析法が長く標準とされて来ました。



②三次元解析:

複雑な構造物では断面形状や断面内での温度分布が大きく異なり、二次元解析の前提が成り立たなくなりますので、この解析法では計算精度が低下します。この場合には、次項以下で説明するように、構造物をリアルに三次元でモデル化して計算することになります。当然、経費は大きく増えますが、構造物の細部までひび割れ発生に関する詳細な情報を得ることが出来ます。現行のコンクリート標準示方書(2012)ではこの解析法が標準とされています。

3. 構造物のモデル化(三次元解析)

まず、構造物およびそれが接する地盤(境界)を出来るだけ忠実にモデル化します。

対象となる構造物の外に地盤もモデルに含めている理由は、①構造物と地盤の間に熱のやり取りがあり、これを考慮して温度を解析する必要がある、②ひび割れは構造物の熱変化による伸縮が拘束されて発生するため、この地盤による拘束効果を解析に取り入れる必要があること、の2点です。

モデル化では下図のように、打設割や誘発目地の位置も考慮しておきます。

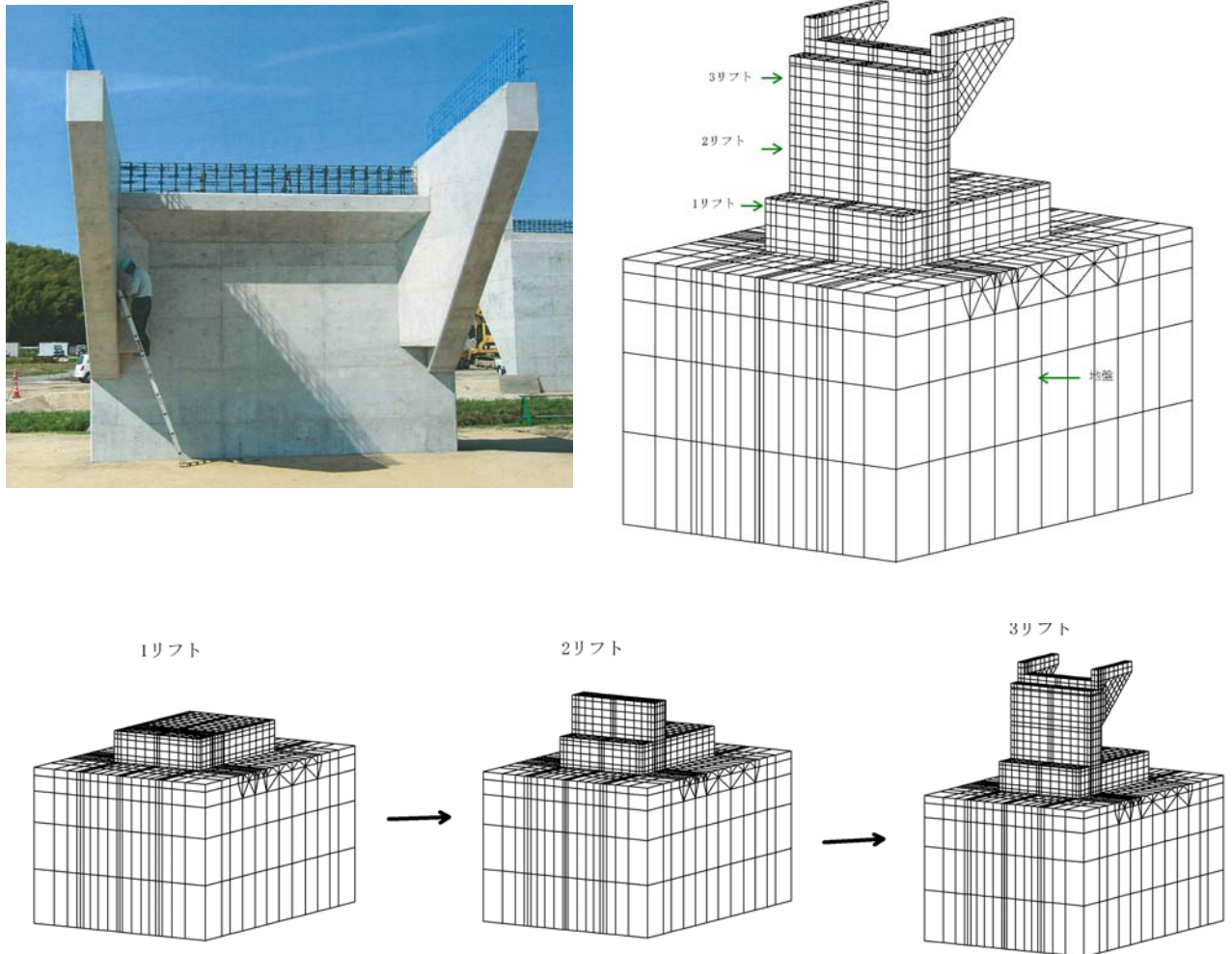


図-1 モデル化

4. 解析に必要なとなるデータ

必要となるデータは以下の通りです。主に、①温度を計算するために必要なデータ(熱特性)と、②温度に基づきコンクリートに働く応力(ひび割れ解析が目的であり、主として引張応力)を計算するために必要なデータ(力学特性)です。ともにコンクリートと地盤の両方のデータが必要です。

①熱特性

特性値	内容	備考
外気温のデータ	打設開始から最終打設後1~3ヶ月程度の期間に渡る外気温の予測データ。	多くは気象庁のHPを利用して推定。
比熱、密度、熱伝導率	コンクリートと地盤に関する特性値。	多くは、「示方書」に準拠。
断熱温度上昇特性	コンクリートの温度上昇に関するデータ。セメントの種類、単位セメント量、打設温度などにより変わる。	多くは、「示方書」に準拠。
セメントの種類、単位セメント量ほか	使用するコンクリートの配合内容	配合報告書による。
養生方法	型枠の種類(合板、鋼製)と残置期間、湿潤・保温養生シートの種類、給熱養生の方法	施工計画による。
リフト毎の打設日時		施工計画による。

②力学特性

特性値	内容	備考
強度特性(圧縮・引張)	コンクリートの引張強度を推定するもの。	多くは、「示方書」
ヤング係数	コンクリートおよび地盤の剛性(硬さ)。地盤が岩盤の場合は適切な値が必要。	多くは、「示方書」
ポアソン比	—	多くは、「示方書」
熱膨張係数	温度変化による伸縮程度を表す値。大きな値はひび割れのリスクが大きくなる。	多くは、「示方書」
誘発目地の有無	誘発目地は効果的なひび割れ防止策であり、適切な設置間隔を設定する。	
膨張材の有無	膨張材はひび割れ防止に効果的。	
配筋図	ひび割れ幅を制御する場合。	

5. 温度解析の結果

図-2 は橋台の施工において打設リフト毎の温度(中心&表面)を解析した事例です。また、表-1はその結果を詳しく整理したものです。①部材が厚いほど温度上昇量および中心と表面との温度差が共に大きいこと、②部材が厚いほど最高温度に到達するまでの日数および外気温まで低下するまでの日数が共に長くなること等が解かります。

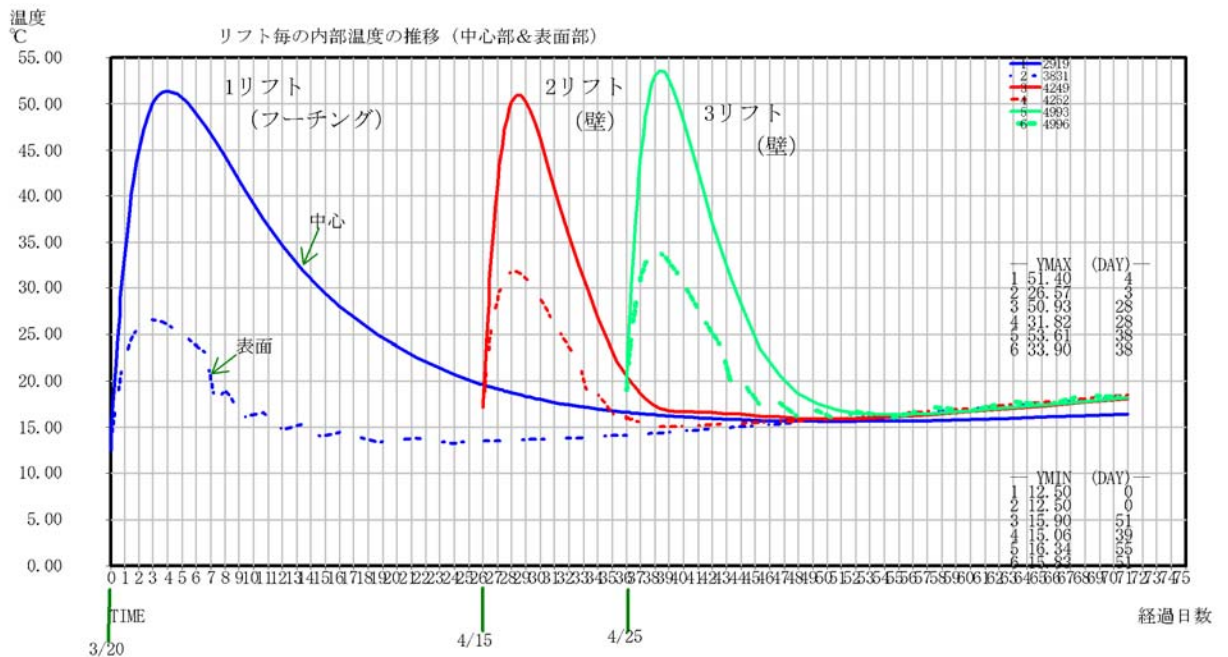
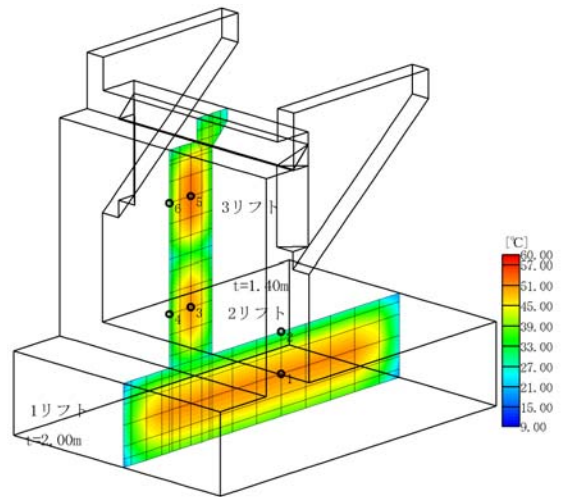


図-2 内部温度の解析事例(橋台の温度解析結果)

区分	厚さ (m)	打設日	内外温度差	中心の温度変化	表面の温度変化	最高温度に達する日数
1	2.00	3/30	25	51-13=38	26-13=13	4.0日
2	1.40	4/15	19	51-17=34	32-17=15	2.5日
3	1.40	4/25	20	54-19=35	34-19=15	2.5日

表-1 温度上昇量の違い(※ 温度変化:最高温度-打設温度=上昇温度)

6. 応力解析の結果

図-3は温度解析結果に基づく応力解析の結果です。

図①はたて壁中心断面での最小ひび割れ指数の分布を表現しています。

グラフ①はたて壁について、各リフト毎のひび割れ指数の推移(各々、中心部と表面部)を表しています。

グラフ②は2リフト中心部のNo1接点について、温度の推移、引張強度の伸び(ϵt)、引張応力(σt)の伸びを一つのグラフ上に表現したものです。

グラフ②で、引張応力(σt)=引張強度(ϵt)となる日時(37日)は、グラフ①で同一接点No1のひび割れ指数が1.00となる日時と同じであることが解かります。

実は、ひび割れ指数とは、以下の様に引張強度(ϵt)を引張応力(σt)で除算した値として定義したものです。

ひび割れ指数の定義:

ひび割れ指数: $I_{CR}(t)$ は、以下の式により求めます。

$$I_{CR}(t) = f_{tk}(t) / \sigma_t(t)$$

ここに、 $I_{CR}(t)$:材齢t日におけるひび割れ指数

$f_{tk}(t)$:材齢t日におけるコンクリートの引張強度

$\sigma_t(t)$:材齢t日におけるコンクリートの最大主引張応力度

この定義から、ひび割れ指数はひび割れ発生に対する安全率と解釈することが出来ます。

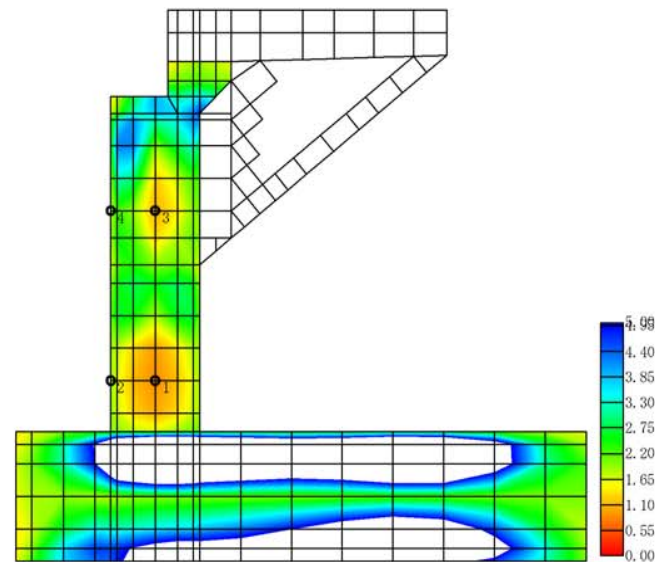
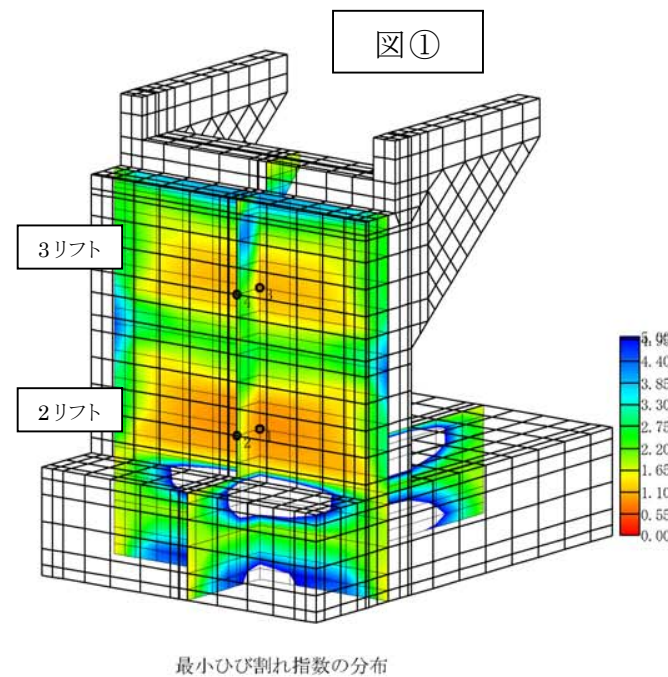


図-3 応力解析の結果

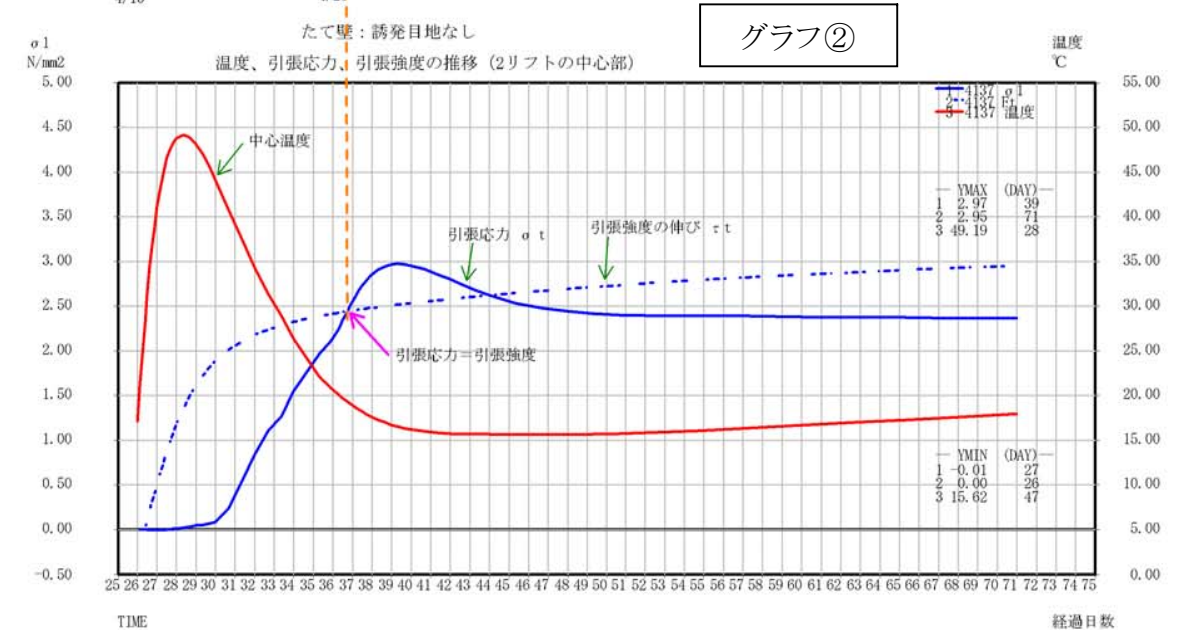
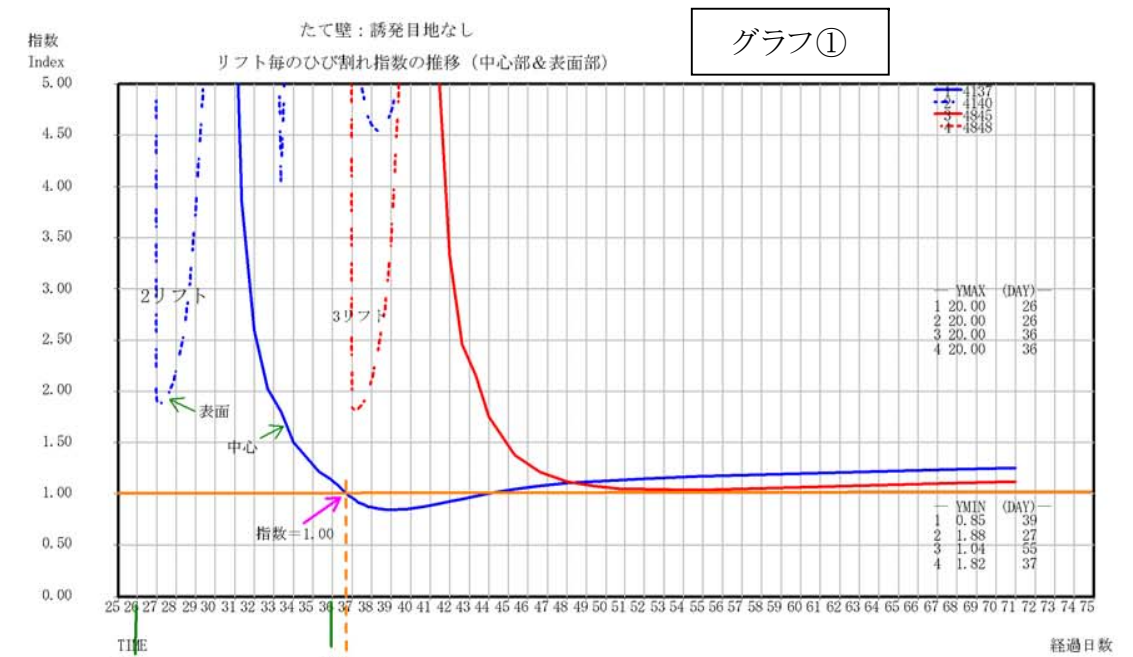


図-3 より、いずれのリフトでも以下の特長が見られます。(温度とひび割れ指数の推移を比較して下さい)

- 図①より、ひび割れ指数の最も小さい領域は壁の中心部であること。このことから、ひび割れが発生するとすれば、壁の中央に最初のひび割れが発生する可能性が高い。特に 3 リフトよりも 2 リフトの方がひび割れ指数が低く、フーチングの真上の壁の方がフーチングからの拘束をより強く受けてひび割れ発生の可能性が高い。
- 温度が上昇してゆく初期段階(内外の温度差が拡大)では表面のひび割れ指数が大きく低下し、温度降下(温度差が縮小)が始まると、逆に急激に回復してゆく。この段階で発生するひび割れはいわゆる「内部拘束型」のひび割れである。この状態では内部の膨張圧で中心部には圧縮応力、表面部には引張応力が作用しており、ひび割れは引張応力が作用する表面部にのみ留まる。このケースではひび割れ指数の最小値が大きく、このタイプのひび割れ発生の可能性は少ないが、このケースの壁厚(1.40m)より大きな壁厚の場合には、温度上昇と内外温度差がさらに増大する結果、このタイプのひび割れ指数が大きくて低下し、表面ひび割れが発生することもある。
- 温度がピークを過ぎて降下が始まると、中心部の引張応力の上昇とひび割れ指数の低下が徐々に進行し、37 日目(打設後、11 日目)に至って引張応力が引張強度に達し(ひび割れ指数=1.00)、ひび割れ発生の可能性が高い。この段階で発生するひび割れはいわゆる「外部拘束型」のひび割れである。温度降下による壁の収縮をフーチングが拘束するためであり、発生した場合には、ひび割れが中心部から表面に向かって進行するため、壁を貫通するひび割れとなる。

7. ひび割れ指数の評価

温度応力解析の目的は、「構造物のどこに、どの様なひび割れが、どの程度の確率で発生し易いか。」の情報を得て、施工計画に反映させることと言えます。

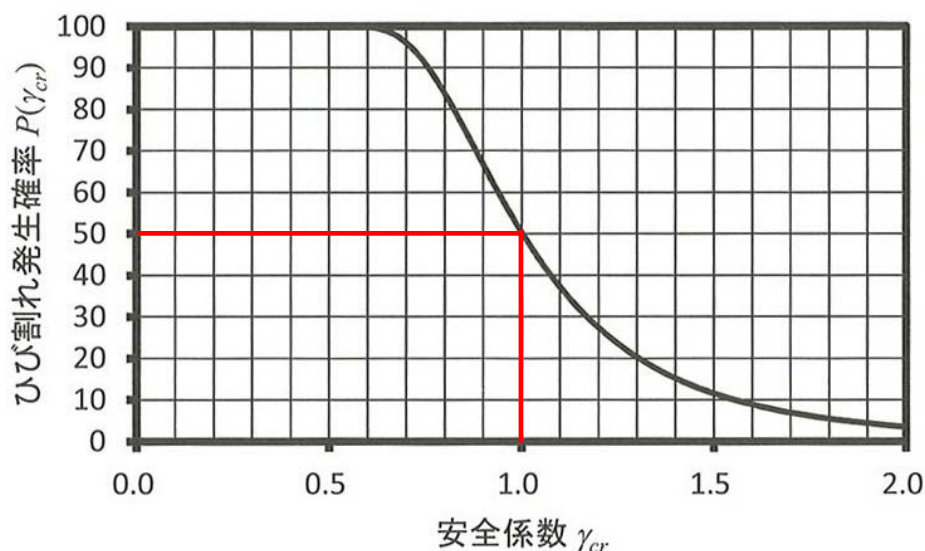
そのための指標として一般に利用されるのが、これまでに説明してきた「ひび割れ指数」です。経験的に、ひび割れ指数とひび割れ発生確率との間には高い相関関係があることが認められています。この事実関係を具体的に数値で表現したものが図-4です。

以下は、土木学会編 2012「コンクリート標準示方書(設計編)p.304」からの引用です。

(1) ひび割れ指数とひび割れ発生確率

ひび割れ指数(安全係数)よりひび割れ発生確率を求める場合には、下図を使用します。

図-4 安全係数とひび割れ発生確率



(2) 温度ひび割れに対する制御水準の目安

「示方書」では、この図-4を基に、一般的な配筋の構造物における標準的なひび割れ指数(安全係数): γ_{cr} の目安を下表の通りとしています。

表-2 温度ひび割れの制御水準とひび割れ指数(安全係数)の目安

温度ひび割れの制御水準	ひび割れ指数(安全係数)	ひび割れ発生確率
① ひび割れを防止したい場合	1.85 以上	5%以下
② ひび割れの発生をできるだけ制限したい場合	1.40 以上	15%以下
③ 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	1.0 以上	50%以下

ひび割れ指数 1.00 の場合、ひび割れ発生確率は 50%となります。

(3) 目標とするひび割れ指数の考え方

温度ひび割れの制御水準としては①以上(ひび割れ発生確率 5%)が望ましいのですが、大断面のマスコンクリートでこの水準を確保しようとするすると相当の対策(費用、工期など)が求められ、現実には適用困難となる場合が多くあります。

このため、ひび割れの発生機構(貫通ひび割れ or 表面ひび割れ)と構造物の性能(特に耐久性)に及ぼす影響、材料の供給能力(プラントの立地・設備状況など)、施工性、工期及び経済性を総合的に考慮して判断することになります。

一般的な考え方としては以下の2通りがあり、状況に応じて使い分けます。

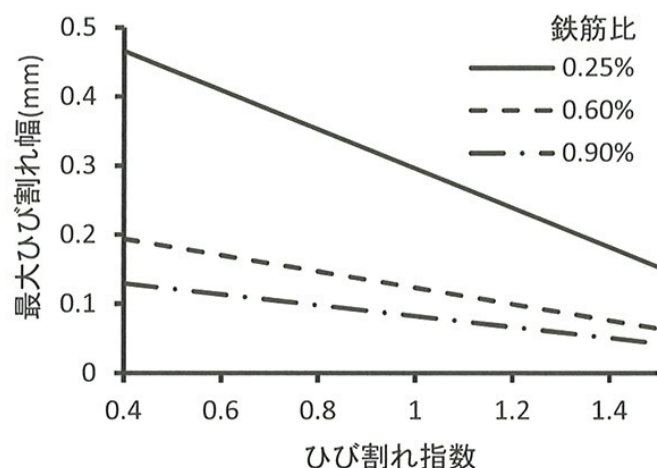
①ひび割れ発生確率の制御:

一つは、ひび割れの発生確率そのものをどのレベルまで許容するかと云うものです。例えば、50%(以下)で妥協するのであれば、図-4より対応するひび割れ指数は1.00(以上)となります。ひび割れが発生した場合に、どの程度のひび割れ(特にひび割れ幅)となるかは不明ですが、表-2から大体的見当は付きます。比較的高いひび割れ指数が容易に確保できる場合にはこの考え方が解かり易いと言えます。また、鉄筋量が少ないか無筋の構造物のように、発生した場合にひび割れ幅が大きくなり易い場合にも採用されます。

②ひび割れ幅の制御:

二つ目は、ひび割れの発生は許容するが、ひび割れ幅は制限したい(例えば、0.20mm以内)と云うものです。十分なひび割れ指数の確保は困難であるが、ひび割れに抵抗する鉄筋量(特に配力筋)がある程度あり、ひび割れ幅の制御が可能な場合に適用できます。

現在の所、計算によってひび割れ幅を精度良く推定することが困難なため、以下の図(「示方書」)がよく利用されています。この図は、鉄筋比(ひび割れに直交する断面の鉄筋)に応じて、解析より求まるひび割れ指数から最大ひび割れ幅を推定するものです。



解説 図 2.2.1 最大ひび割れ幅とひび割れ指数との関係