

マスコンクリートの温度ひび割れ

コンクリート構造物のひび割れは、耐久性や美観などを低下させる原因となるため、その防止・低減が強く求められています。ひび割れの発生要因は様々ですが、部材寸法が大きい構造物（マスコンクリート）では、セメントの水和熱に伴う温度ひび割れを生じる可能性が高くなるため、その制御が重要な課題となります。今回は、温度ひび割れのメカニズム、予測技術および制御技術について解説します。

Q1

温度ひび割れの原因は何でしょうか？

A1

セメントが水と化学反応する際に生じる「水和熱」によって、コンクリートの温度が上昇することです。

解説

コンクリートが流動性を持つ状態から硬化していく過程では、セメントと水が化学反応（水和反応）を起こしています。一般的に、化学反応は発熱反応と吸熱反応に分けられますが、セメントの水和反応は発熱反応であり、そのときに発生するのが「水和熱」です。セメントは主に4つの鉱物（C₃S、C₂S、C₃A、C₄AF）で構成されており、鉱物ごとに水と反応する際に生じる熱の量と速度が異なります（表-1）。また、図-1は、種々の温度条件下におけるセメントの水和発熱速度を示したのですが、水和反応は温度条件に依存し、温度が高いほど初期の発熱ピークが大きく、そのピークが現れる時間が早まる傾向にあります。以上のことから、コンクリートの発熱量は、セメント量が多いほど増加するだけでなく、セメント

表-1 セメント鉱物の水和熱¹⁾

化合物	水和熱 (cal/g・化合物, W/C=0.40, 21℃)							完全水和物の水和熱 (cal/g・化合物)
	3日	7日	28日	90日	1年	6½年	13年	
C ₃ S	58	53	30	104	117	117	122	120
C ₂ S	12	10	25	42	54	53	59	62
C ₃ A	212	372	329	311	279	328	324	207
C ₄ AF	69	118	118	98	90	111	102	100

表-2 ポルトランドセメントの鉱物組成例

	鉱物組成 (%)				
	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	その他
普通	56	18	9	9	8
早強	63	12	9	8	8
中庸熱	43	36	3	13	5
低熱	27	55	2	9	7

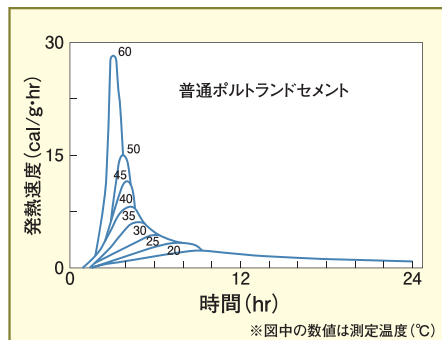


図-1 水和熱の温度依存性¹⁾

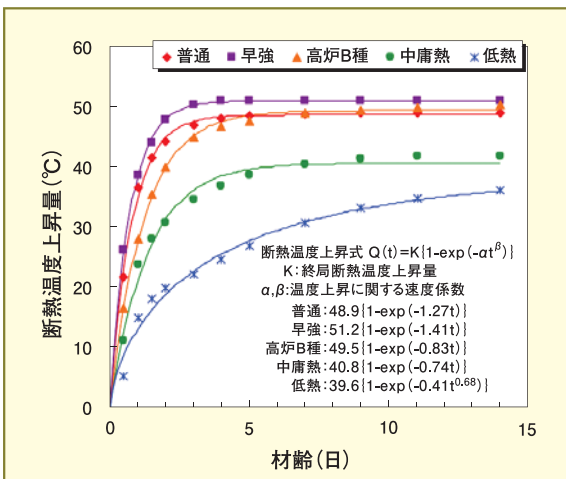


図-2 断熱温度上昇式の一例

の種類（表-2）や環境温度によっても大きく影響を受けることがわかります。

コンクリートの水和発熱特性は、断熱温度上昇式として評価するのが一般的です。これは、放熱を許さない条件下での水和熱によるコンクリートの温度上昇量を示したものであり、断熱温度上昇試験装置による計測値を

回帰することで求めることができます（図-2）。断熱温度上昇式は、終局の断熱温度上昇量と温度上昇速度に関する係数を用いて表現することができ、日本コンクリート工学会、土木学会、日本建築学会の指針類では、セメント種類ごとに、単位セメント量およびコンクリートの打込み温度を考慮した各係数の算定式が提示されています²⁾³⁾⁴⁾。

Q2

温度ひび割れを生じやすい構造物はどのようなものなのでしょうか？

A2

部材寸法が大きい構造物ほど、部材内部の温度が上昇するため、温度ひび割れは発生しやすくなります。

解説

セメントの水和熱によるコンクリート部材の温度上昇量は、部材寸法（厚さ）に大きく依存します。部材寸法が大きいほど部材内部に熱が蓄積されやすく、部材の温度が高くなるため、温度ひび割れが発生する危険性は高まります。このようなコンクリート部材を特に「マスコンクリート」と呼んでいます。マスコンクリートとして扱う部材寸法は、構造形式やコンクリートの使用材料・配（調）合などの条件によって異なるため、厳密な定義はありませんが、一般的に、下端が拘束されている壁状構造物では厚さ50cm程度以上、広がりのあるスラブ状構造物では厚さ80～100cm程度以上とされています。

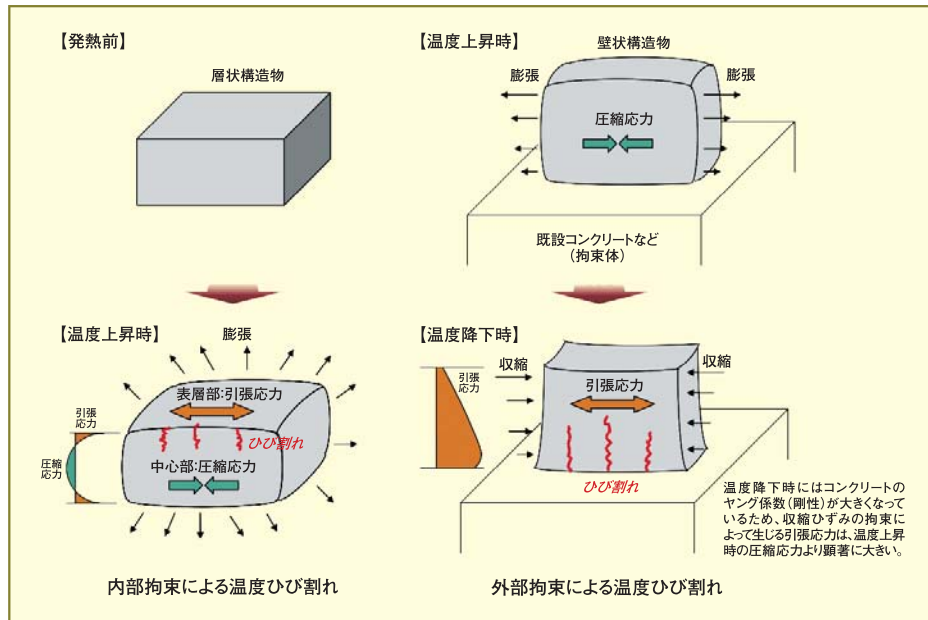


図-3 温度ひび割れ発生メカニズム

Q3

温度ひび割れはどのようなメカニズムで発生するのでしょうか？

A3

温度変化に伴うコンクリートの膨張・収縮変形（温度ひずみ）が拘束されることによって、コンクリート内部に引張応力（温度応力）が発生します。その引張応力がコンクリートの引張強度を上回ると温度ひび割れが発生します。

解説

一般的に、物体は温度の上昇に伴って膨張する特性を持っており、温度変化に対して長さ・体積が膨張する割合を熱膨張係数（熱膨張率）と呼んでいます。コンクリートの熱膨張係数は $10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 程度であり、例えば、長さ10mのコンクリート部材が30℃温度上昇・降下した場合、部材の長さは3mm膨張・収縮します。温度ひび割れは、温度変化によるコンクリートの膨張・収縮変形が拘束されることによって発生し、そのメカニズムは、「内部拘束」によるものと「外部拘束」によるものの2つに大別されます（図-3）。

1) 内部拘束による温度ひび割れ

水和熱によってコンクリート部材の温度

ますが、この収縮ひずみが既設のコンクリート部材や地盤などから拘束されると、部材内部には引張応力が発生します。これによって生じるひび割れを、外部拘束による温度ひび割れと呼んでいます。内部拘束によるひび割れが部材表面に留まることが多いのに対して、外部拘束によるひび割れは部材を貫通することが多く、構造物の耐久性や水密性の低下を招く要因となることから、外部拘束による温度ひび割れを防止・低減することが特に重要となります。

Q4

温度ひび割れの発生を予測する方法はありますか？

A4

数値解析によってコンクリート構造物内部の温度や応力などを算定し、その結果から温度ひび割れが発生する危険性を予測する技術が普及しています。また最近では、数値解析結果の統計処理に基づく簡易評価手法も提案されています。

解説

解析技術の進歩にともない、対象となるコンクリート構造物のモデル化および材料特性や環境条件などの設定を行った上で、Compensation Plane法（CP法）や有限要素法（FEM）などの手法を用いて数値解析（温度応力解析）することにより、

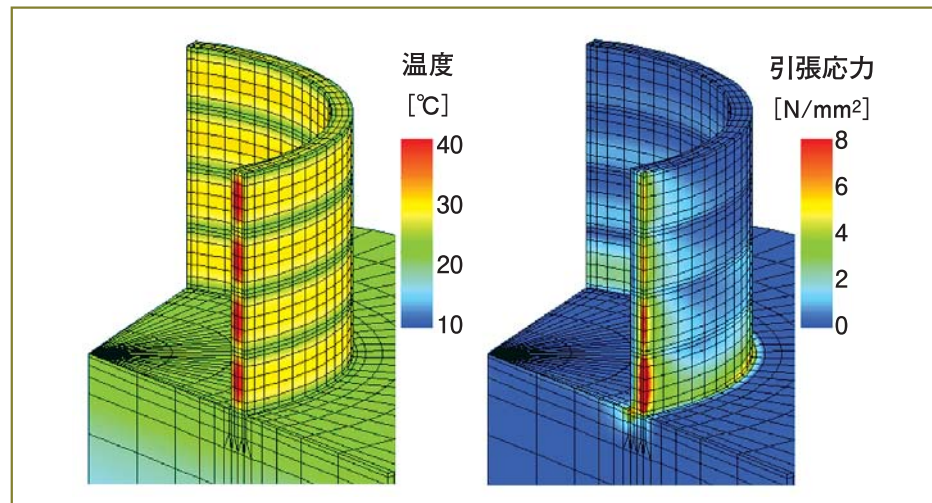


図-4 3次元FEMによる温度応力解析の一例

A5

構造物内部の温度履歴や応力挙動を推定できるようになりました。最近では、コンピュータ性能の向上やソフトウェアの充実も相まって、複雑な形状の構造物にも対応可能な3次元FEMによる解析が主流になっています(図-4)。温度ひび割れが発生する可能性については、一般に構造物内部に生じた引張応力とその時点におけるコンクリートの引張強度の関係から評価されます。日本コンクリート工学会および土木学会では『ひび割れ指数(引張強度/引張応力)』²⁾³⁾、日本建築学会ではその逆数で表される『応力強度比(引張応力/引張強度)』⁴⁾を温度ひび割れ照査(検証)の指標としており、温度ひび割れの発生を防止する場合などの限界値を提示しています。ただし、検討に用いた解析手法ならびに引張強度をはじめとする材料特性値の取り扱いの違いにより、各学協会が示している限界値は異なっています。したがって、これらの指針類に準じて照査・検証を行う際には、用いる指針類で示されている種々の解析条件を満足していなければなりません。

前述したCP法やFEMによる解析は、モデルの作成や各種条件の設定などにかなりの手間がかかるため、簡便に温度ひび割れを評価する方法も提案されています。日本コンクリート工学会では、3次元FEM解析結果をベースに、温度ひび割れの発生に関連が深い要因で重回帰分析することにより、ひび割れ指数を簡易的に推定する式を定めています²⁾。ただし、簡易評価法を使用する場合には、部材寸法、セメント種類、コンクリート配(調)合などの適用範囲が限定されること、かなり安全を見込んだ評価結果を示すこと、などに留意する必要があります。

前述したCP法やFEMによる解析は、モデルの作成や各種条件の設定などにかなりの手間がかかるため、簡便に温度ひび割れを評価する方法も提案されています。日本コンクリート工学会では、3次元FEM解析結果をベースに、温度ひび割れの発生に関連が深い要因で重回帰分析することにより、ひび割れ指数を簡易的に推定する式を定めています²⁾。ただし、簡易評価法を使用する場合には、部材寸法、セメント種類、コンクリート配(調)合などの適用範囲が限定されること、かなり安全を見込んだ評価結果を示すこと、などに留意する必要があります。

前述したCP法やFEMによる解析は、モデルの作成や各種条件の設定などにかなりの手間がかかるため、簡便に温度ひび割れを評価する方法も提案されています。日本コンクリート工学会では、3次元FEM解析結果をベースに、温度ひび割れの発生に関連が深い要因で重回帰分析することにより、ひび割れ指数を簡易的に推定する式を定めています²⁾。ただし、簡易評価法を使用する場合には、部材寸法、セメント種類、コンクリート配(調)合などの適用範囲が限定されること、かなり安全を見込んだ評価結果を示すこと、などに留意する必要があります。

Q5

温度ひび割れの制御対策にはどのようなものがありますか？

A5

コンクリートの材料・配(調)合選定や施工計画などの各段階で種々の方法があり、「コンクリートの温度上昇量を低減する方法」、「温度応力(引張応力)を低減する方法」、「ひび割れ幅を低減する方法」の3つに大別することができます(図-5)。

1)コンクリートの温度上昇量を低減する方法
コンクリートの材料・配(調)合の観点から、コンクリートの温度上昇量を小さくする方法

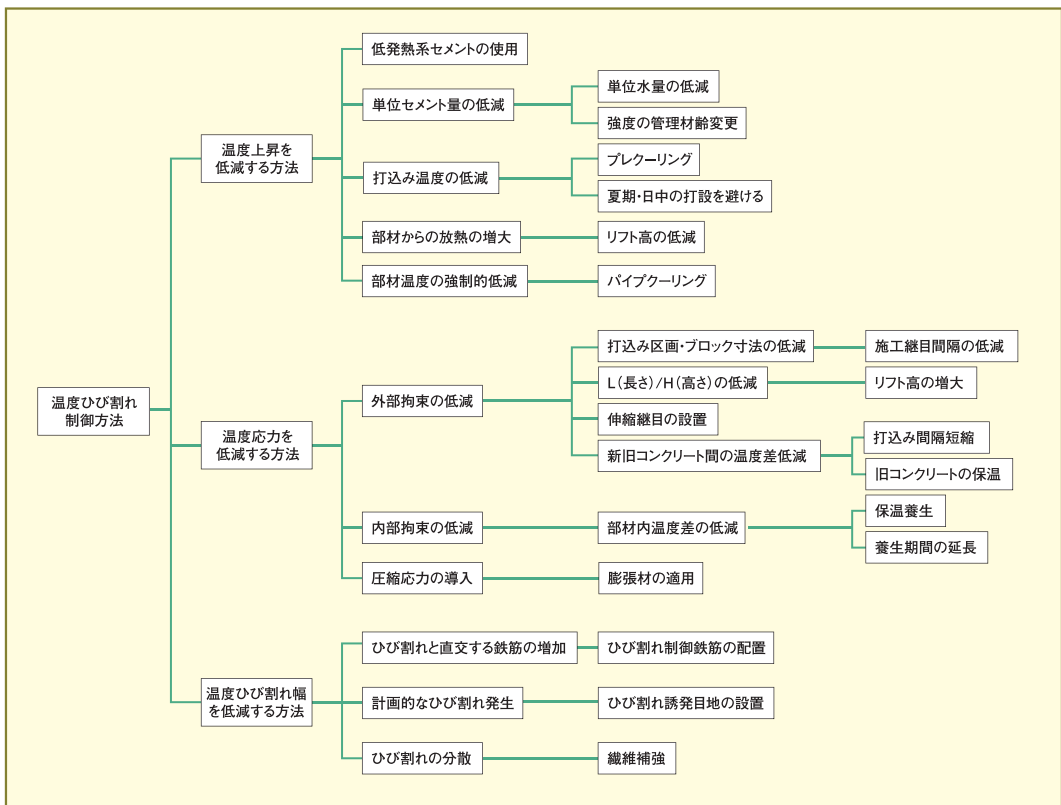


図-5 温度ひび割れ制御方法の例

として最も効果的なのは、水和熱の小さい低発熱系セメントを使用することです。低発熱系セメントの代表格はC₂Sの構成割合を大きくした低熱ポルトランドセメントおよび中庸熱ポルトランドセメントです。図-6は厚さを変えた壁状構造物の最高温度と温度ひび割れ指数(小さいほどひび割れが生じやすい)を解析により算出した一例ですが、これらのポルトランドセメントを使用することで、最高温度および温度ひび割れの発生リスクを大幅に低減できることがわかります。一方、

高炉セメントB種については、近年の知見より、断熱温度上昇量が普通ポルトランドセメントと同等であること(図-2)、また、水和反応によって生じる自己収縮(CEM'S質問箱第20回を参照)や熱膨張係数が多い²⁾ことなどにより、温度ひび割れ指数のレベルが普通ポルトランドセメントと同程度である結果が得られる(図-6)こともあり、その温度ひび割れ対策用セメントとしての位置づけが従来とは異なってきているようです。なお最近では、混合する高炉スラグ微粉末に粉末度の小さいものを用いることなどにより、水和熱や自己収縮を抑制した新しいタイプの高炉セメント(JISにおける高炉セメントB種に適合)が開発・実用化されています⁵⁾。

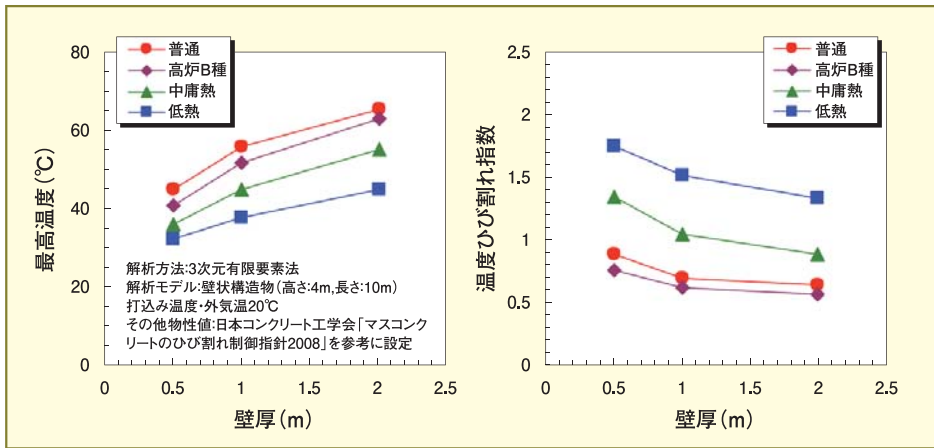


図-6 低発熱系セメントの温度ひび割れ制御効果(解析による検討例)

ント量を減らすことがコンクリートの温度上昇を抑えるのに大変有効です。この場合、所要の強度およびコンシステンシーを確保した上で単位セメント量を低減することが前提となります。図-7は単位セメント量が壁部材の最高温度に及ぼす影響を解析的に検討した一例を示したのですが、単位セメント量を10kg/m³減らすことによって最高温度を1~1.5℃程度低減できる結果となっています。

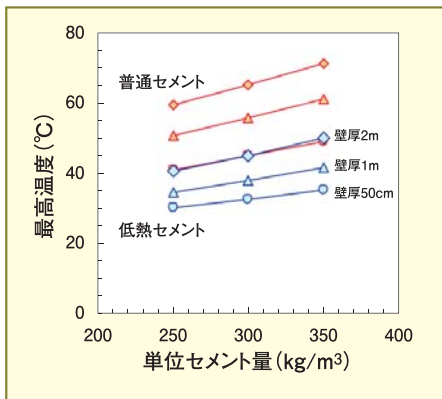


図-7 単位セメント量と部材の最高温度(解析による検討例)

その他、コンクリートの温度上昇量を低減する方法としては、骨材などコンクリート材料の一部を事前に冷却しておくブレイクーリング、あらかじめ構造物内に配置した管内に水や空気を流すパイプクーリング、コンクリートを一回に打設するブロック(部材厚さ・リフト高さ)の制限、夏場・日中などの外気温が高い時間のコンクリート打設を避けること、などがあります。

2)温度応力(引張応力)を低減する方法

コンクリート構造物内に発生する温度応力を低減する方法としては、前述した内部拘束および外部拘束を低減する方法、

圧縮応力を導入する方法があります。

内部拘束の低減には、コンクリート部材の中心部と表層部の温度差を小さくすることが必要であり、部材表面からの放熱を抑えることが対策となります。代表的な方法は、コンクリート打込み後にコンクリート表面をシート、スポンジ状のマット(養生マット)、断熱材などで覆う保温養生を施すこと、熱伝導率が小さい木製の型枠を用いること、型枠の取り外し時期を遅らせること、などがあります。

一方、既設のコンクリート部材や地盤などからの外部拘束は、打込むコンクリートの長さ(L)と高さ(H)の比(L/H)に大きく影響し、L/Hが小さいほど拘束は緩和されます。また、打込むコンクリートと既設のコンクリートの温度差を小さくすることも外部拘束の低減に有効です。

コンクリートに圧縮応力を導入することで温度降下後の引張応力を低減する方法として、膨張材(CEM'S質問箱第16回を参照)が利用されています。最近では、膨張材の使用効果を定量的に評価するための研究が進み、温度応力解析で取り入れる膨張コンクリートの材料特性値が提案されています⁶⁾。図-8は、日本コンクリート工学会より提示されている膨張特性値²⁾を用いて、温度ひび割れに対する膨張材の効果を評価した一例です。壁厚によって効果は異なりますが、膨張材の適用により温度ひび割れ指数が増加する結果が得られています。

3)ひび割れ幅を低減する方法

温度ひび割れの制御対策では、ひび割れの発生自体を防止することだけではなく、ひび割れが発生した場合においても、その

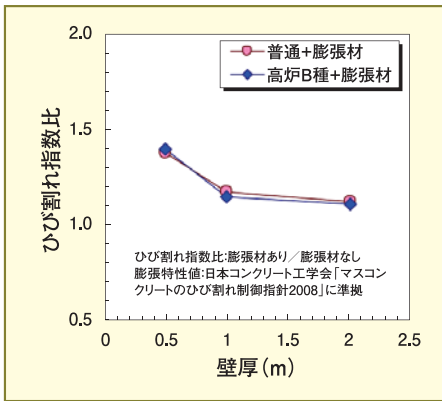


図-8 膨張材の温度ひび割れ制御効果(解析による検討例)

ひび割れ幅を許容値以内に抑えて構造物の要求性能を満足させることが重要となります。ひび割れ幅は、ひび割れと直交する方向の鉄筋比に依存し、鉄筋比を高めることでひび割れ幅を小さくすることができます。また、断面欠損させた目地(ひび割れ誘発目地)を所定の間隔で設け、計画的にひび割れを発生・分散させることもひび割れ幅を小さくするためには効果的です。

以上のとおり、温度ひび割れの制御対策には種々の方法がありますが、その中から、対象構造物のひび割れ制御目標を達成する上で最適な方法を選定することが必要となります。前述した温度応力解析などを活用してひび割れ発生の可能性や対策効果を事前に予測・評価することにより、効率的かつ効果的な対策が可能になると考えられます。

太平洋セメント株式会社中央研究所
セメント・コンクリート研究部TBCチーム

三谷 裕二

【参考文献】

- 1) セメント協会:わかりやすいセメント科学,1993
- 2) 日本コンクリート工学会:マスコンクリートのひび割れ制御指針2008
- 3) 土木学会:2007年制定コンクリート標準示方書[設計編],2008
- 4) 日本建築学会:マスコンクリートの温度ひび割れ制御設計・施工指針(案):同解説,2008
- 5) 二戸信和,廣島明男,大友健,宮澤伸吾:スラグ粒度と化学成分の異なる高炉セメントB種を用いたコンクリートの特性,セメント・コンクリート論文集,No.59,pp.231-238,2005
- 6) 日本コンクリート工学会:高性能膨張コンクリートの性能評価とひび割れ制御システムに関する研究委員会報告書,pp.158-172,2011