

コンクリートの温度ひびわれとその制御体制

Thermal Cracks of Concrete and its Control System

一色 真人*
Makoto Isshiki

前田 詔一**
Shōichi Maeda

要 約

本報は、コンクリートの温度ひびわれ事例として、土木設計部で最近検討を行なった3例を含む4例を示し、その原因と対策を考えることにより、温度ひびわれ制御体制のあり方について述べるものである。

温度ひびわれの原因と対策は、いずれの場合においても設計・施工両面の広範囲にわたっており、温度ひびわれ制御においては、従来のように施工面のみでなく、設計・施工の両面にわたる制御体制が必要であると言える。

§1. はじめに

ダムコンクリートにおいては、セメントの水和熱に起因するコンクリートの温度ひびわれは重要な問題であり、その制御のために種々の検討がなされてきた。

近年、構造物が大型化してマスコンクリートが増えたことにより、ダム以外のコンクリート構造物においても温度ひびわれが大きな問題となってきた。同時に温度応力に関する研究も急速な進歩を遂げた。その結果、1986年にはコンクリート工学協会より「マスコンクリートのひびわれ制御指針」¹⁾が出され、また、土木学会「昭和61年度制定 コンクリート標準示方書—施工編—」の「マスコンクリート」の章も大改訂された。これによって、従来マスコンクリートの各種の規定が精神的規定でしかなかったのが、初めて定量的規定が明示され、設計・施工に十分適用できるものとなった。しかし、コンクリートの温度応力を制御するための設計・施工が行われているのは、ダムコンクリート以外では、LNGタンクや大規模アンカレイジ等の大規模構造物に限られがちで、一般的な土木構造物においては、コンクリートの温度応力に対しては無関心なところが多く、設計・施工の両面にわたる制御体制が十分でなく、温度ひびわれの発生が数多く見られるのが現状である。

温度ひびわれは、耐久性の面のみならず、場合によ

ては構造面においても有害となり得る。さらに、温度ひびわれが発生しなくても、構造物内に温度応力が残留した場合、部材耐力が低下するという報告もあり²⁾、コンクリートの温度応力制御には十分な配慮が必要である。

本報は、コンクリートの温度応力が主な原因と考えられる4つのひびわれの事例を示し、温度ひびわれ発生の原因及び温度ひびわれ制御対策について簡単に述べ、設計・施工の両面にわたる制御体制の必要性を述べるものである。

§2. 温度ひびわれ発生事例

温度ひびわれの発生事例については、種々の専門雑誌等で報告されているが、以下に土木設計部で最近検討を行った3例を含め、4例を紹介する。しかし、残念ながら、上記の3例はいずれもひびわれ発生後に検討依頼を受けたものであり、制御体制は十分でなかったといえるものである。

事例1：底版コンクリートに発生した温度ひびわれ
配水池の構築において底版コンクリート打設後に発生した温度ひびわれ状況を Fig.1 に示す。

ひびわれは、底版コンクリート打設後11～15日目に発生している。また、ひびわれ間隔は約3.5mで、ひびわれ幅0.15mm～0.3mmの貫通ひびわれである。

事例2：橋脚に発生した温度ひびわれ
橋脚に発生した温度ひびわれ状況を Fig.2 に示す。

*土木設計部設計課
*土木設計部設計課係長

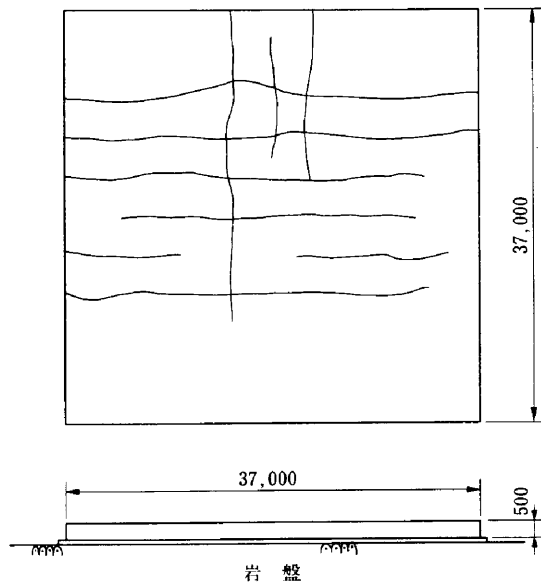


Fig.1 底版コンクリートに発生した温度ひびわれ状況

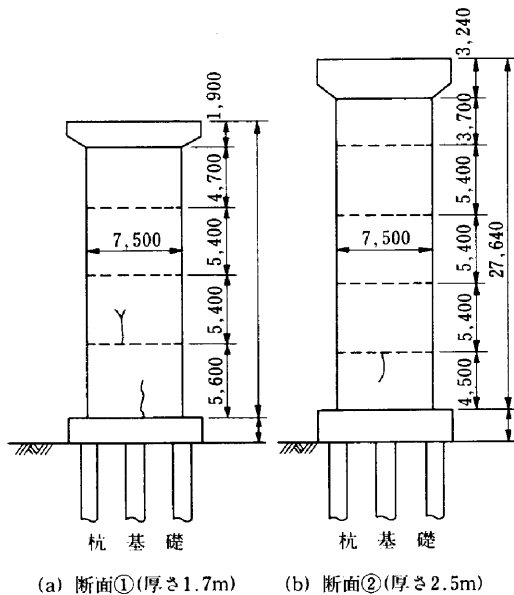
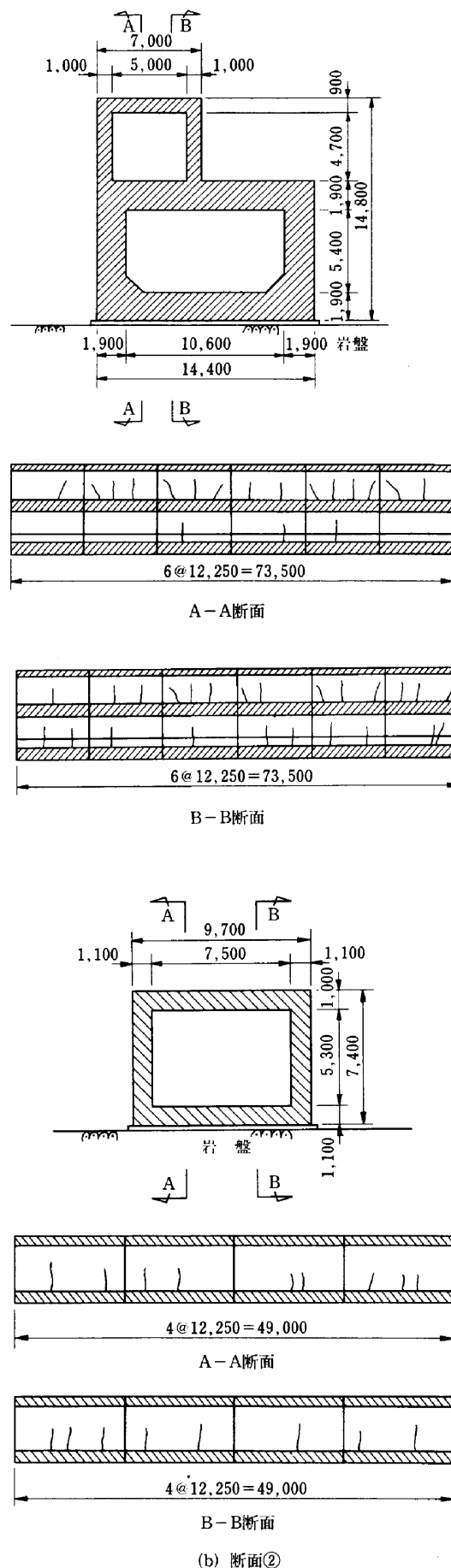


Fig.2 橋脚に発生した温度ひびわれ状況

ひびわれには、打設ブロックの下部から上方に発生するもの(断面①)、ブロック上部から下方に発生するもの(断面②)の2種類がある。また、ひびわれは、コンクリート打設後1～2週間程度で発生しており、ひびわれ幅0.1mm～0.2mmの貫通ひびわれである。

事例3：ボックスカルバートに発生した温度ひびわれ
ボックスカルバートに発生した温度ひびわれ状況をFig.3に示す。

ひびわれは、ボックスカルバートの側壁部のみに発生しており、一部に漏水が見られることにより、ひびわれ



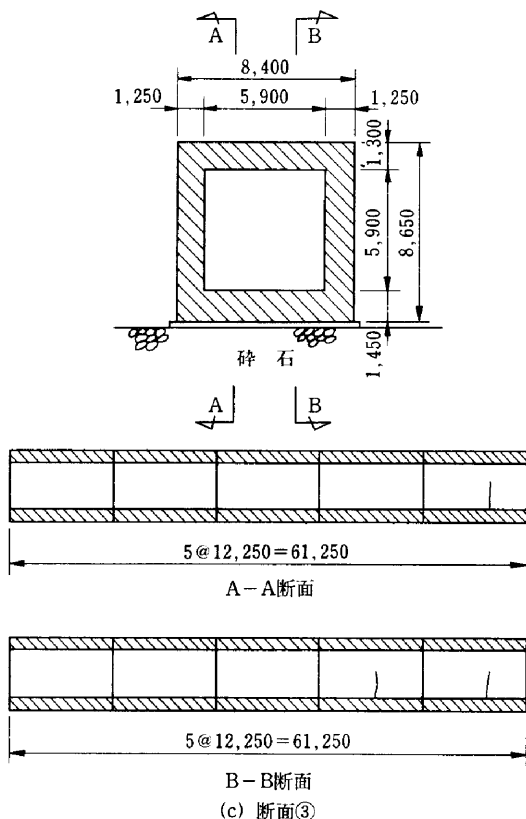


Fig.3 ボックスカルパートに発生した温度ひびわれ状況

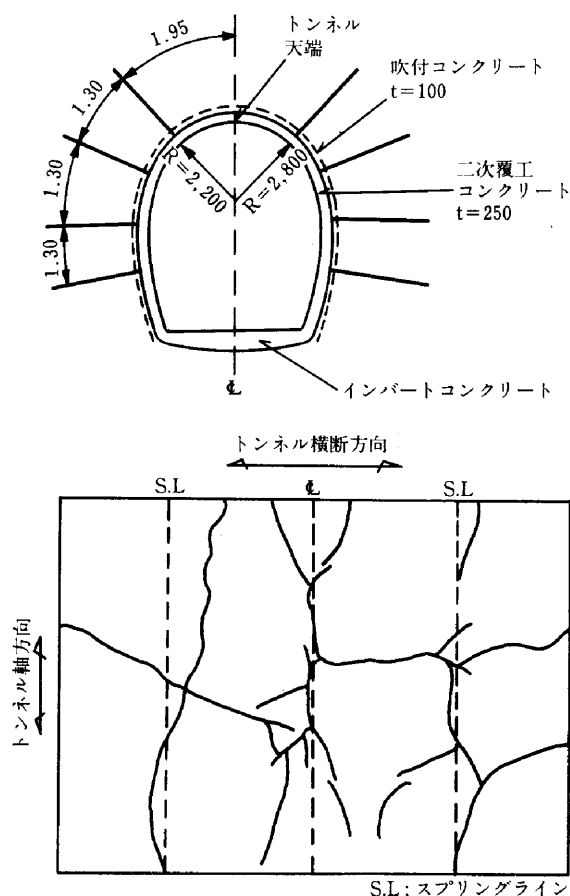


Fig.4 NATM二次覆工コンクリートに発生した温度ひびわれ状況

は貫通しているものと思われる。

事例4：NATM二次覆工コンクリートに発生した温度ひびわれ³⁾⁴⁾

NATM二次覆工コンクリートに発生した温度ひびわれ状況を Fig.4 に示す。

事例1～3とは異なり、ひびわれは無秩序に入っており、ひびわれ幅も0.04mmから最大では1.0mmにも達している。また、この種のひびわれは、過去の事例より貫通ひびわれであることが知られている。

§3. 温度ひびわれの原因と対策

コンクリートの温度応力には、内部拘束によるものと外部拘束によるものの2つがある。

内部拘束による温度応力は、コンクリート断面内に曲線状の温度分布が生じた場合に発生する応力であり、外部拘束とは無関係に生じるものである。Fig.5 に示すような外部拘束のない矩形状ブロックにおいて温度ひずみ $\alpha T(y)$ が生じる場合、断面の平面保持が成立することより断面A A'は温度変形後B B'となり、 $\alpha T(y)$ とB B'の差によって温度応力が発生する。図の場合、表面では引張応力、中心部では圧縮応力となる。これが内部拘束による温度応力である。

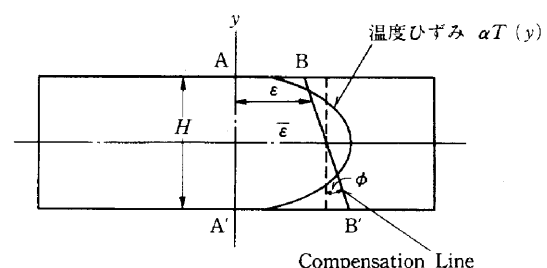


Fig.5 内部拘束状態⁵⁾

$\alpha T(y)$ が直線分布をなす場合は、 $\alpha T(y)$ とB B'は同じになり内部拘束による温度応力は発生しない。つまり、内部拘束による温度応力を低減するには、十分な養生等によって断面内の温度分布を直線分布に近づけるのが有効である。

外部拘束による温度応力は、コンクリートが温度変化を受けて伸縮あるいは曲げ変形（そり変形）しようとするのを岩盤や旧コンクリートあるいは先行コンクリートによって外部的に拘束されて発生する応力である。すなわち、Fig.6 に示すように、断面A A'が自由な温度変形後B B'となる場合、外部拘束によってC C'の変形にとどまる。この時B B'とC C'との差によって温度応力が発生

する。これが外部拘束による温度応力である。

また、外部拘束による温度応力パターンには Fig.7 に示すようなA型とB型の2つのパターンがあることが指摘されている⁶⁾。

A型における温度ひびわれは、リフト上部あるいは中心部から下方に向かって発生しやすく、この応力パターンは外部拘束がかなり強い場合に現れる。つまり、岩盤等の拘束体のヤング係数が新コンクリートのヤング係数の1/10以上の範囲で、かつ新コンクリートの高さ(H)に対する長さ(L)の比 L/H が大きくかつ拘束体との境界面ですべりなどが生じない場合に現れる。

一方、B型における温度ひびわれは、リフト下部ある

いは中心部から上部に向かって発生しやすく、この応力パターンは外部拘束が比較的弱い場合に現れる。つまり、拘束体のヤング係数が新コンクリートのヤング係数に比べて1/10以下の場合か、 L/H が小さい場合、あるいは拘束体との境界ですべりが生じる場合に現れる。

このように、外部拘束による温度応力は、コンクリートの温度変形が拘束体によって妨げられるために発生するものである。したがって、この外部拘束による温度応力を低減させるには、コンクリート自身の発熱や外気温の変動による温度変形を小さくするか、あるいは、拘束の程度を低減するのが有効である。

以下、§2において示した4つの事例に対して、それぞれの原因と対策を内部拘束による温度応力と外部拘束による温度応力とに分けて述べる。

3-1 底版コンクリートに発生した温度ひびわれ

(1) 内部拘束による温度応力

底版コンクリートの鉛直方面の温度分布は、

- ・底版厚さが50cmと比較的薄いこと
- ・セメントに高炉B種セメントを用いていること
- ・冬期打設であること

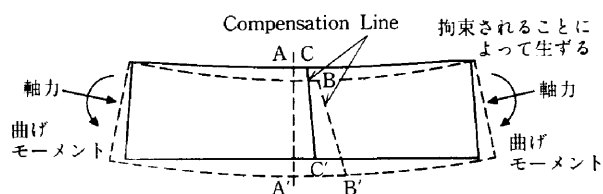


Fig.6 外部拘束状態⁵⁾

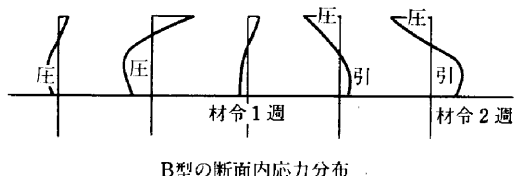
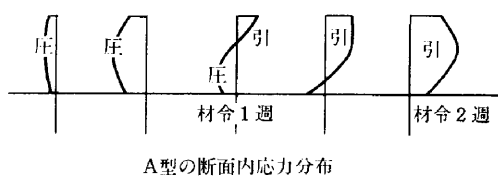
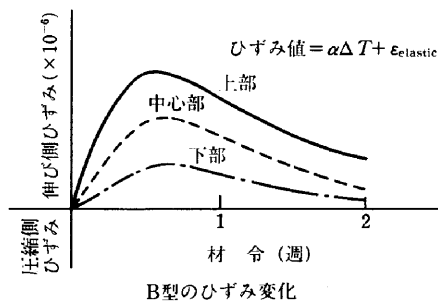
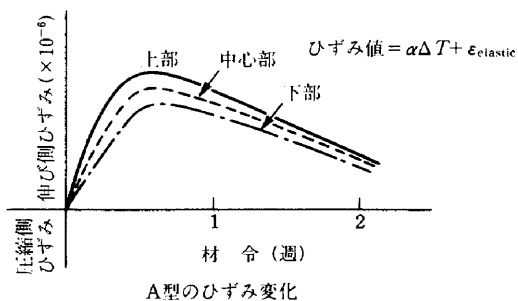
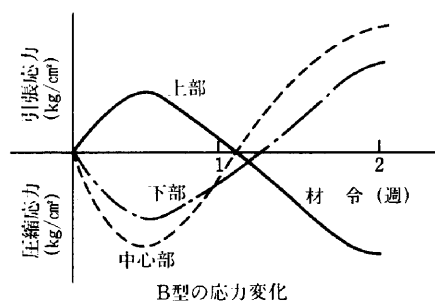
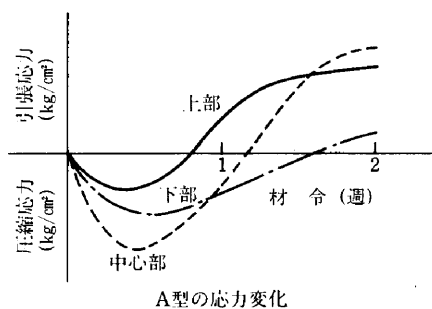


Fig.7 A型、B型の応力パターン

等により、直線分布に近くなり、内部拘束による引張応力はほとんど問題とはならない程度である。

(2) 外部拘束による温度応力

上述したように、この底版コンクリートは温度応力に対しては非常に有利な条件で施工されており、材令10日までは外部拘束による引張応力も引張強度の1/2以下であった。しかし、材令11日から13日にかけて厳しい冷え込みにあい、コンクリート断面内に大きな温度勾配が生じている。この温度勾配によって、外部拘束による引張応力が急増し、温度応力の合計が引張強度を上回る程に達している。

(3) 温度ひびわれの原因と対策

本事例では内部拘束による温度応力を抑えることには成功しているが、材令11日から13日の厳しい冷え込みによって外部拘束による引張応力が急増して、ひびわれに至ってしまったものと思われる。

本事例のような温度ひびわれを低減するためには、以下のような対策が考えられる。

- ・ 厳しい冷え込みや強風の影響を受けないよう十分な養生を行なう。
- ・ 適切なブロック割りによりL/Hを小さくし外部拘束を低減する。
- ・ 捨てコンクリートと基礎岩盤との間に碎石層等を設けて外部拘束を低減する。

3-2 橋脚に発生した温度ひびわれ

(1) 内部拘束による温度応力

橋脚の厚さが断面①と断面②でそれぞれ1.7m、2.5mと比較的厚いため、内部拘束による温度応力は引張強度の7～8割程度にも達しており、内部拘束による温度応力だけでもひびわれが発生する可能性があるといえる。

(2) 外部拘束による温度応力

杭基礎であることにより主な拘束体は先行ブロックであり、外部拘束による温度応力は引張強度の3～4割程度である。

(3) 温度ひびわれの原因と対策

ひびわれのパターンから見て Fig.7 に示すA型とB型の応力パターンがそれぞれ断面①、断面②に発生したものと思われる。しかし、拘束体との境界条件を解析に取り入れることができないため、温度ひびわれが発生することは予測できるが、その応力パターンまでは予測しがたいのが現状である。

本事例における温度ひびわれの原因は、主に内部拘束による温度応力であるため、温度ひびわれを制御する対策として以下のような方法が有効である。

- ・ 型枠に保温材を張りつけて保温養成する。

- ・ 低発熱性のセメントの使用や単位セメント量の低減を検討する。

- ・ 断面形状（特に厚さの低減）を検討する。

3-3 ボックスカルバートに発生した温度ひびわれ

(1) 内部拘束による温度応力

Fig.3 に示す3断面のうち内部拘束による温度応力のみてひびわれが発生する可能性が高いのは、断面①の下部ボックスカルバートである。この場合、壁厚が1.9mと比較的厚いため断面内に大きな温度分布が生じ、そのために発生した内部拘束による引張応力は、引張強度の8～9割にも達しており、内部拘束だけでもひびわれが発生する可能性が高いと言える。一方、他の断面においては壁厚が1.25～1.0mと比較的薄いため、断面内にはそれほど大きな温度分布は発生しておらず、内部拘束による引張応力も引張強度の1/2以下であり、内部拘束だけでひびわれが発生する可能性は低いと言える。

(2) 外部拘束による温度応力

外部拘束による引張応力が最も大きくなるのは、断面①の上部ボックスカルバートで、引張強度の4割程度の引張応力が発生している。これは、上部ボックスカルバート打設後2～3日で、上部ボックスカルバートのコンクリートのヤング係数と下部ボックスカルバートのコンクリートのヤング係数が同じオーダーとなっており、下部ボックスカルバートによる上部ボックスカルバートへの外部拘束がかなり厳しかったためと考えられる。

次に外部拘束による引張応力が大きくなるのは、断面①の下部ボックスカルバートと断面②で、引張強度の2～3割程度の引張応力が発生している。これは、基礎岩盤による拘束はあるものの、基礎岩盤のヤング係数がコンクリートのヤング係数の1/100程度で、断面①の上部ボックスカルバートの場合ほどは外部拘束の影響が強くなかったためと思われる。

また、断面③の場合は、基礎が碎石のため外部拘束は無視できる程度のものと思われる。

(3) 温度ひびわれの原因と対策

本事例におけるひびわれの発生原因を考慮すると、ひびわれの発生分布は、次の3つに分類できる。

- (a) 断面①の下部ボックスカルバート
- (b) 断面①の上部ボックスカルバートと断面②
- (c) 断面③

ここで断面③の場合、内部拘束による引張応力が引張強度の1/2程度で、外部拘束による引張応力は無視できる程度であったため、他の断面に比べてひびわれの発生は著しく少なかったものと思われる。以下、(a)(b)の温度ひびわれについて原因と対策を述べる。

(a) 断面①の下部ボックスカルバート

この場合は事例2の橋脚の温度ひびわれと同様に、内部拘束応力だけでも温度ひびわれの可能性が高いのに加え、岩盤拘束による外部拘束応力が加わり、ひびわれに至ったものと思われる。したがって、温度ひびわれを制御する主な対策も事例2の場合と同様である。

(b) 断面①の上部ボックスカルバートと断面②

これらの場合、内部拘束による引張応力が引張強度の4～5割程度で、外部拘束による引張応力が引張強度の3～4割程度で、引張応力の合計が引張強度の7～8割程度になってひびわれに至ったものと思われる。このような場合、内部拘束を低減するか外部拘束を低減するか、あるいは両方低減するかで対策も異なってくる。内部拘束を低減させる主な対策は前述しているの、ここでは先に述べた内部拘束を低減する対策以外のものについて述べる。

- ・スパン長を短くして外部拘束を低減する。
- ・構造上問題とならない範囲で、拘束体とコンクリートとの縁切りを行って外部拘束を低減する。

3-4 NATM二次覆工コンクリートに発生した温度ひびわれ

(1) 内部拘束による温度応力

二次覆工コンクリートの平均厚が41～58cmであることより、内部拘束による温度応力はほとんど問題にならないものと思われる。

(2) 外部拘束による温度応力

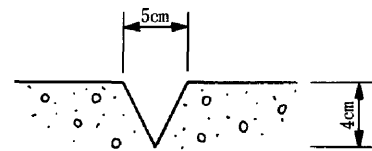
二次覆工コンクリートのひびわれは、トンネルが貫通して風が流れ込んだ場合や、坑口付近では外気が急激に冷え込んだ場合に発生しやすいことが経験的に知られている。これは、コンクリートが急冷され、縮みや曲げ変形（そり変形）を生じようとするのを岩盤や自分自身の形状によって拘束されるためである。ここで、自分自身の形状によって拘束されるというのは、二次覆工コンクリートが馬蹄形状等の形状をしており、閉じた構造系をしているため、温度応力による曲げ変形（そり変形）が拘束されるということである。

(3) 温度ひびわれ対策

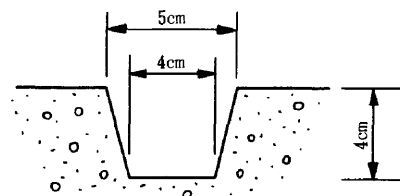
二次覆工コンクリートのひびわれについては、構造上ある程度やむを得ないのでひびわれの発生場所を制御して、後で補修を行なう方法がよく用いられているようである。

ひびわれ発生場所を制御するために用いるひびわれ誘発目地には、Fig.8に示す2種類がある。目地部の応力集中度はいずれの場合も同程度であるが、目地周辺部の

応力集中度は応力緩和溝工法の方が低く、ひびわれ誘発目地としては、応力緩和溝工法のほうが良いようである。また、ひびわれ誘発目地の有効な設置位置についても、しだいに明らかにされてきている。



(a) コントロールジョイント工法



(b) 応力緩和溝工法

Fig.8 ひびわれ誘発目地

§4. おわりに

コンクリートの温度応力に伴うひびわれは、構造物が大型化し、マスコンクリートが増えたことによってクローズアップされてきた。しかし、§2に示したように一般的な土木構造物においても温度ひびわれは数多く発生しており、温度ひびわれの制御に関しては十分な配慮が必要である。

「マスコンクリートのひびわれ制御指針」¹⁾において、マスコンクリートのひびわれ制御フローとして設計面と施工面の2つのフローが示されている。(Fig.9, Fig.10)。これは、従来の温度ひびわれ制御が施工面のみであったために十分な効果を出しきれなかったのに対し、設計段階から温度ひびわれ制御を考慮した設計を行なうことによって、より合理的な躯体の構築が可能となるためである。しかし、現段階では温度ひびわれ対策を十分に行なったとしても温度ひびわれを完全に防ぐことは非常に困難であるが、特に有害となるような温度ひびわれを制御することは可能である。

温度ひびわれを制御する場合、設計段階で考慮すべき因子としては、

- ・構造形式
- ・部材断面
- ・伸縮目地、ひびわれ誘発目地

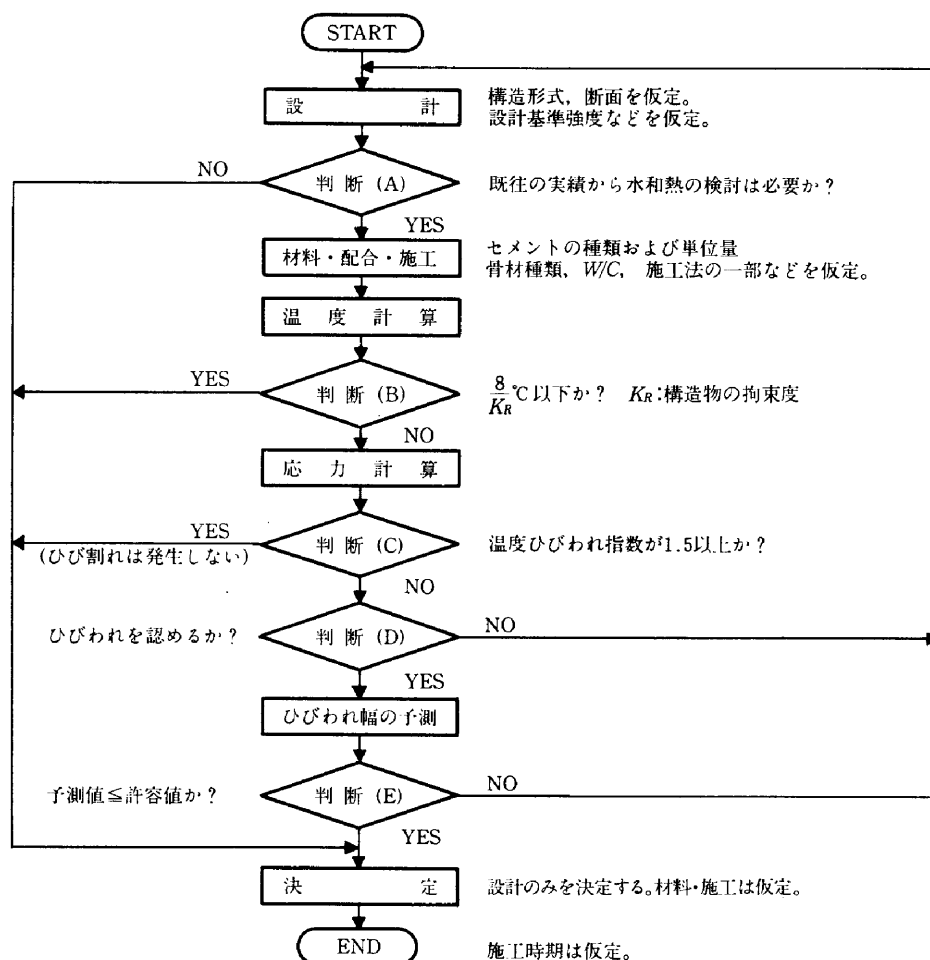


Fig.9 温度ひびわれ制御フロー(設計面)¹⁾

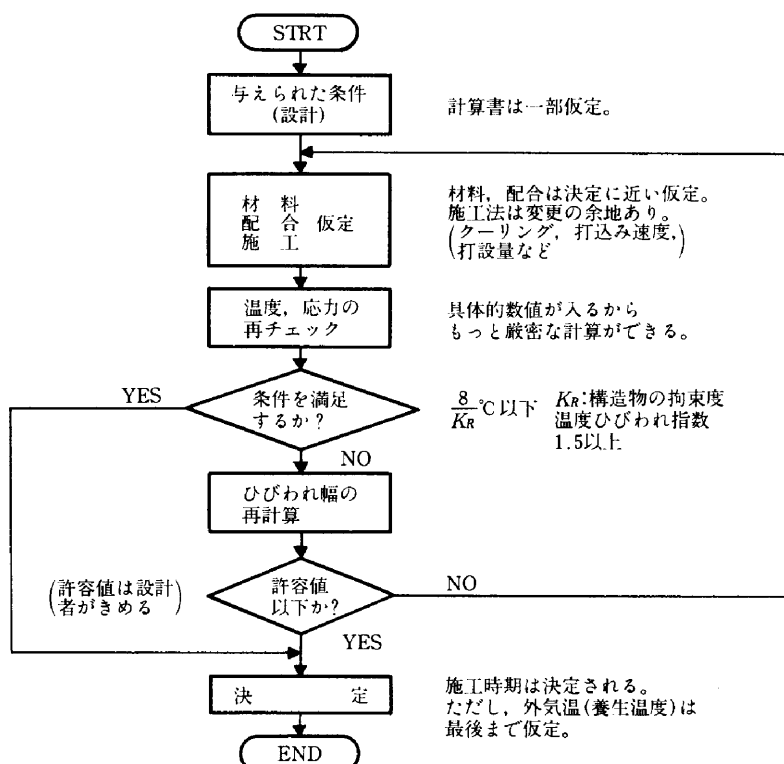


Fig.10 温度ひびわれ制御フロー(施工面)¹⁾

- ・配筋
- ・コンクリートの設計基準強度
- ・コンクリートの配合（単位セメント量、セメントの種類など）

などがあり、施工段階で考慮すべき因子としては、

- ・コンクリートの配合強度
- ・コンクリートの練上がり温度
- ・1回に打設するブロックの大きさ
- ・養生方法
- ・型枠の材質および脱型時期

などがある。

上記のように、温度ひびわれに影響を与える因子は設計・施工両面の広範囲にわたっており、従来のように施工面のみの対策では不十分であり、設計・施工の両面にわたる温度ひびわれ制御体制が必要である。

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学協会「マスコンクリートのひびわれ制御指針」
- 2) 遠藤孝夫・田辺忠顕「コンクリート構造物の終局耐力におよぼす初期応力の影響」コンクリート工学年次講演会 1986
- 3) 江渡正満・白石誠一・奥村文直「応力緩和溝を用いた MATM 二次覆工コンクリートの応力性状について」土木学会年次学術講演会 1986
- 4) 白木博昭・速水昭正・田中栄治「トンネル二次覆工コンクリートのひびわれ制御対策に関する一考察」土木学会年次学術講演会 1986
- 5) マスコンクリート温度応力研究委員会「外部拘束係数の同定とそれに基づく温度応力の計算方法の提案」コンクリート工学 Vol.23, No.8, Aug.1985
- 6) 田辺忠顕・原口晃・石川雅美「マスコンクリートの温度応力問題における岩盤あるいは旧コンクリートの外部拘束効果」マスコンクリートの温度応力発生メカニズムに関するコロキウム 1982