

V-21

マスコンクリートの温度応力解析に関する一考察

北海道開発コンサルタント(株) 正員 中田 泰 広
 同 上 正員 井上 雅 弘
 同 上 正員 花田 真 吉

1. はじめに

構造物の養生中にセメントの水和反応により熱が発生する。熱伝導あるいは熱対流によるコンクリート表面からの放熱量が水和熱量よりも少ない場合、厚い部材には大きな温度応力が生じる。このとき、コンクリートの熱伝導率が比較的低いため、コンクリートの内部と表面に著しい温度差が生じ、その結果ひびわれが発生する。

近年、橋梁構造物の大型化に伴い温度ひびわれを制御する目的のもと、マスコンクリートとして設計時点からの配慮を必要とする構造物が増加している。また、温度ひびわれの発生は、構造形式、使用材料、環境条件（施工時期、外気温等）や施工条件（打設リフト、打設間隔、養生条件等）などの要因が複雑に影響するため、温度応力解析によってより有利な条件を選定し、さらに予想されるひびわれに対して適切な評価および対応を行うことが必要となってきている。

ここでは、スラブ状構造物と壁状構造物の2タイプの構造形状に着目することにより、それぞれの構造物の温度応力解析結果から温度ひびわれの特性を把握し、特性に応じた補強方法の提案を行うなど、温度ひびわれの制御計画についての考察を行うものである。

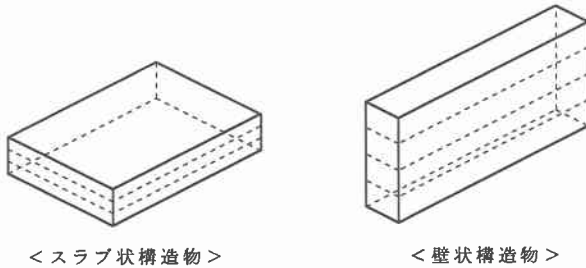


図-1 構造物形態

2. 温度および温度応力解析

2-1 解析手法

温度ひびわれを評価するための解析としては種々の方法が提案されているが、実用性から表-1に示すコンクリート工学協会による解析プログラムのうち、FEM温度解析およびCP法温度応力解析を用いた。

表-1 解析手法

温度解析	温度応力解析	ひびわれ解析
FEM	Compensation Line 法 (CL法)	CPひびわれ幅法
	Compensation Plane 法 (CP法)	
	FEM	

A Study on Thermal Stress Analysis of Massive Concrete Structures

by Yasuhiro NAKATA, Masahiro INOUE and Shinkichi HANADA

2-2 解析ケース

スラブ状構造物として大規模な橋脚や箱式橋台などの底版が挙げられ、また壁式構造物としては擁壁、橋台や橋脚のたて壁が該当する。構造物の規模、形態によって温度ひびわれの発生確率は異なるが、ここでは特に橋梁構造物で増えてきている多層状の底版（スラブ状構造物）および打設リフト高に対して壁厚の厚い橋脚のたて壁（壁状構造物）について解析を行った（図-2）。



図-2 解析位置

2-3 スラブ状構造物解析事例

(1) 解析モデルおよび解析条件

解析モデルを図-3に示す。

セメントは高炉B種を使用し、単位セメント量は調査により得られた最大値を用いた。コンクリート打設時期は最終リフト打設が冬期養生を行う直前となるように設定し、養生は外気温とした。また、側面型枠には合板を使用し、天端養生はマット養生とした。解析条件および解析にあたっての諸定数を表-2、表-3に示す。

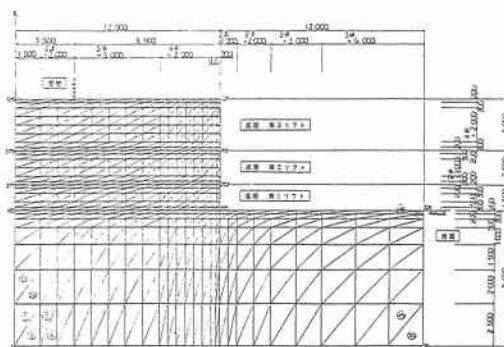


図-3 底版解析モデル

表-2 解析条件

使用材料	設計基準強度	210 kgf/cm ²
	セメント種類	高炉B種
	単位セメント量	290 kg/m ³
構造寸法	底版平面寸法	24m×28m
	高さ	6.5m
	打設リフト	1.5+2.0+3.0m
施工条件	打ち込み温度	20℃
	打設間隔	14日
	外気温	15.2~1.5℃(9~11月)

表-3 諸定数

コンクリート	比熱 (kcal/kg℃)	0.25
	熱伝達率 (kcal/cmhr℃)	0.022
	密度 (kg/cm ³)	0.0023
地盤	熱膨張率 (/℃)	10×10 ⁻⁶
	比熱 (kcal/kg℃)	0.26
	熱伝達率 (kcal/cmhr℃)	0.017
	密度 (kg/cm ³)	0.0018
	熱膨張率 (/℃)	10×10 ⁻⁶

(2) 温度ひびわれ指数の解析結果

ひびわれ指数の解析結果から、ひび割れ指数低下領域を図-4に示す。

① 第1リフトのひびわれ指数

- ・第2リフト打設までの間に側面のひびわれ指数 ((a)-A部) が低下するが、平均的に1.0以上であり、第2リフト打設までに回復する。
- ・第2リフト打設後に第1リフト側面付近内部 ((b)-B部) のひびわれ指数が低下するが、1.2以上であり、第3リフト打設までに回復する。

- ・第3リフト打設後に再びB部のひびわれ指数が低下し、平均的に0.9程度となるが、長期的には回復していく。

②第2リフトのひびわれ指数

- ・打設後にリフト上面および側面のひびわれ指数 ((b)-C部) が低下するが、平均的に1.0以上であり、第3リフト打設までに回復する。
また、上面は表面のみである。
- ・上面と側面の回復とともに側面付近の内部 ((c)-D部) の指数が低下しはじめる。
- ・第3リフト打設後にD部の指数低下範囲は第2リフト全体 ((e)-E部) に広がるが、0.9~1.0程度であり、E部はしだいに回復する。

③第3リフトのひびわれ指数

- ・第2リフトと同様に打設後上面および側面のひびわれ指数 ((e)-F部) が低下するが、平均的に0.8程度であり、しだいに回復する。

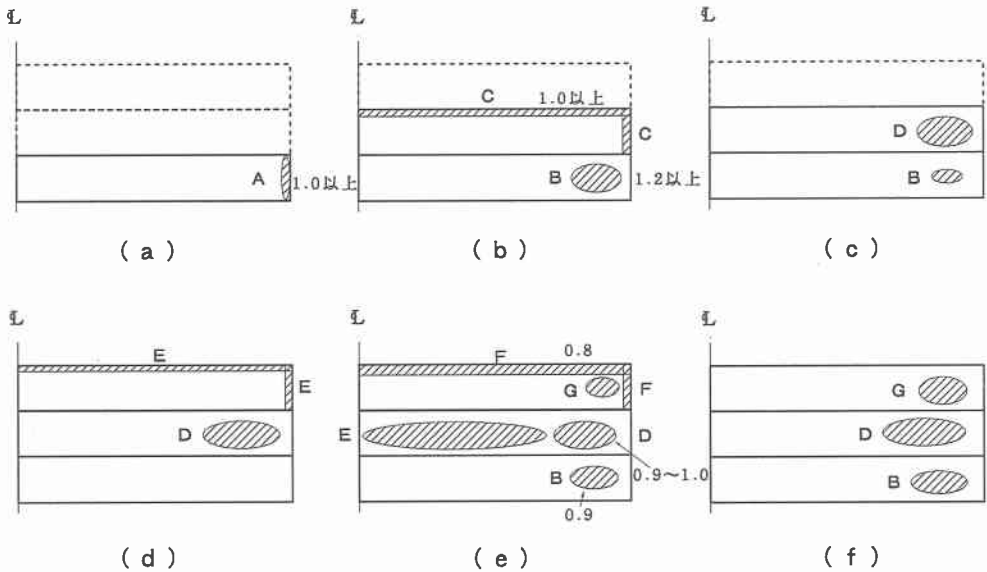


図-4 ひびわれ指数低下領域

2-4 壁状構造物解析事例

(1) 解析モデルおよび解析条件

解析モデルを図-5に示す。たて壁については、下端の拘束状態の設定が温度ひびわれの解析結果に大きく影響するため、たて壁下端を拘束状態とみなすより、底版・たて壁を一体として下面の拘束度を0とした方が実際の拘束状態に近いと判断した。そのため、底版のヤング係数を底版のみのモデル化に対する面積比で補正した。

セメントは高炉B種を使用し、単位セメント量は調査により得られた最大値を用いた。コンクリート打設時期は第1リフト打設が半旬平均気温最高時に設定し、養生は外気温とした。また、側面型枠には合板を使用し、天端養生は湛水養生とした。

解析条件および解析にあたっての諸定数を表-4、表-5に示す。

表-4 解析条件

使用材料	設計基準強度	300 kgf/cm ²
	セメント種類	高炉B種
	単位セメント量	364 kg/m ³
構造寸法	壁の平面寸法	4.6m×30.3m
	高さ	4.6m
	打設リフト	1.7+1.7+1.2m
施工条件	打ち込み温度	23℃
	打設間隔	7日
	外気温	21.2~10.0℃

(2) 温度ひびわれ指数の解析結果

ひびわれ指数の解析結果から、ひびわれ指数低下領域および履歴図を図-6、図-7（番号は図-6による）に示す。

① 第1リフトのひびわれ指数

- ・ 第2リフト打設までの間に側面のひびわれ指数 ((a)-A部、B部) が低下するが、平均的に 1.0以上であり、第2リフト打設までに回復する。
- ・ 第2リフト打設後に第1リフト側面および内部 ((b)-B部、C部) のひびわれ指数が低下し、平均的に 0.7程度となるが、第3リフト打設までに回復する。
- ・ 第3リフト打設後に再びC部のひびわれ指数が低下するが、平均的に 0.8程度であり、長期的には回復していく。

② 第2リフトのひびわれ指数

- ・ 打設後にリフト上面および側面のひびわれ指数 ((b)-D部、E部) が低下するが平均的に1.0以上であり、第3リフト打設までに回復する。
- ・ 第3リフト打設後に内部のひびわれ指数 ((d)-F部) が低下し、平均的に 0.8程度となるが、しだいに回復する。

③ 第3リフトのひびわれ指数

- ・ 打設後に上面のひびわれ指数 ((d)-G部) が若干低下するが、1.2以上である。

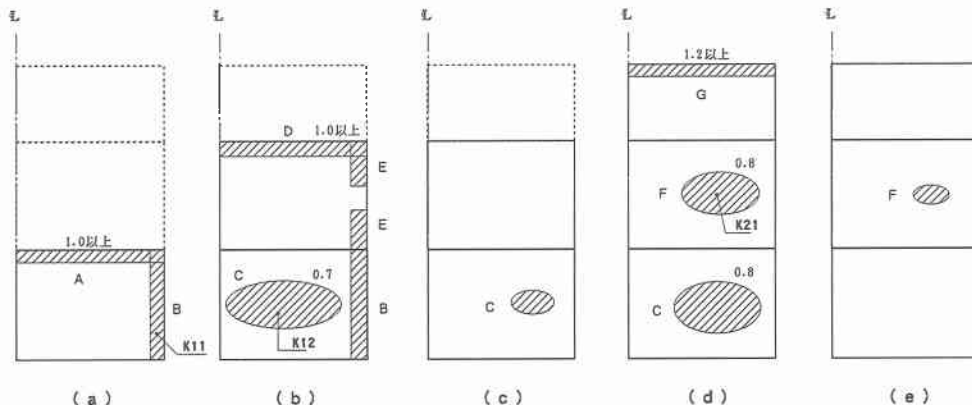


図-6 ひびわれ指数低下領域

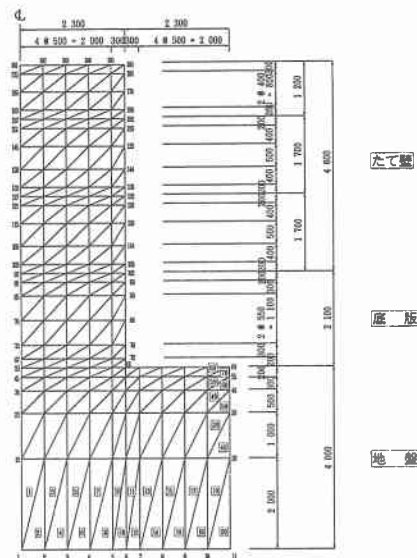


図-5 たて壁解析モデル

表-5 諸定数

コンクリート	比熱 (kcal/kg℃)	0.25
	熱伝達率 (kcal/cmhr℃)	0.022
	密度 (kg/cm ³)	0.0023
	熱膨張率 (/℃)	10×10 ⁻⁶
地盤	比熱 (kcal/kg℃)	0.39
	熱伝達率 (kcal/cmhr℃)	0.012
	密度 (kg/cm ³)	0.0016
	熱膨張率 (/℃)	---

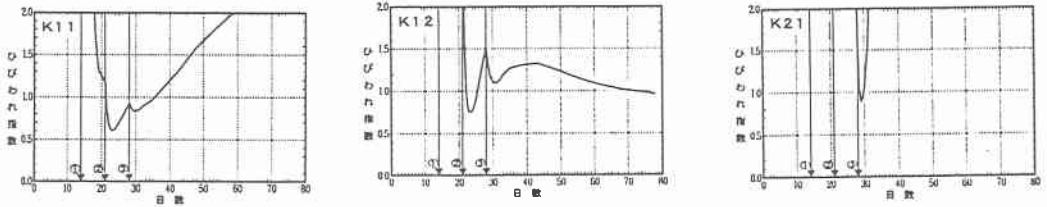


図-7 ひびわれ指数履歴図

3. ひびわれ制御

3-1. 鉄筋によるひびわれ制御方法

「コンクリート標準示方書 15章マスコリート」において、一般的な配筋の構造物における標準的なひびわれ指数の参考値が示されている（表-6）。

本文の解析事例も含め解析上でひびわれを防止する施工条件を選定できない、あるいは施工面での十分な改善策をとれない場合、ひびわれの発生自体は避けられないものとして、鉄筋量を増加することによってひびわれ幅を小さくし、ひびわれの分散によって構造物にとって有害なものとならないようにする方法である。

3-2 ひびわれ制御鉄筋量の算定（案）

解析において引張応力度が発生する場合には、その引張力をすべて鉄筋で受け持たせるような設計が考えられるが、鉄筋量が過大となりすぎるため、引張応力の発生する材令時のコンクリートの引張強度まではコンクリートで負担するものと考え、それを越える引張力に対して鉄筋を配置するものとした。

ここでは、有害なひびわれを生じさせないためにひびわれ指数が1.2以下となる部分についての検討を行った。

補強鉄筋の負担する応力度は次式で表される。

$$\sigma_s(t) = (\sigma_c(t) - \sigma_{ta}(t)) \times A_c / A_s$$

ここに、 $\sigma_s(t)$: 材令 t 時の鉄筋 1 本あたりの負担する引張応力度(kgf/cm²)

$\sigma_c(t)$: 材令 t 時のコンクリートの引張応力度(kgf/cm²)

$\sigma_{ta}(t)$: 材令 t 時のコンクリートの許容引張応力度(kgf/cm²)

A_c : 図-8 による鉄筋 1 本あたりの負担するコンクリート断面積(cm²)

A_s : 図-8 による補強鉄筋 1 本あたりの断面積(cm²)

なお、配置した鉄筋の応力度はひびわれ幅を制御する観点から $\sigma_s(t)=1000\text{kgf/cm}^2$ 程度となることを目安とした。

表-6 ひびわれ指数参考値

ひびわれを防止したい場合	1.5以上
ひびわれの発生を制限したい場合	1.2以上1.5未満
有害なひびわれの発生を制限したい場合	0.7以上1.2未満

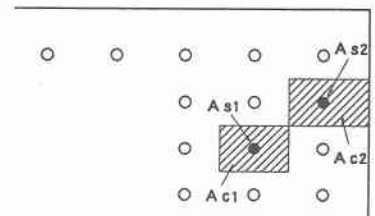


図-8 ひびわれ制御鉄筋

4. 補強事例

(1) スラブ状構造物

ひびわれ指数が低下するのは主に表面であることと、指数が1.0前後であることから、設計上の配筋で負担するものと考えれば応力的に十分であり、特に補強筋の配置は行わなかった。

なお、ひびわれに対する補強筋が構造上の主鉄筋となっている場合には残留応力についての検討が必要となる。

(2) 壁状構造物

各リフトの側面部および第2リフト上面部には設計上の鉄筋が配置されていることから、それにより負担するものと考え、第1リフト上面部はひびわれ指数から補強筋(D19@250)により引張応力を負担させるものとした。

特に、第1リフトおよび第2リフト内部のひびわれ指数が厳しく、また発生時期は異なるが表面の指数も低下することから貫通ひびわれの可能性があると判断し、それぞれの内部に補強筋(D25@250, D16@250)を配置した。(図-9)

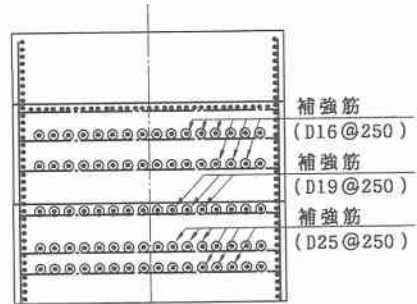


図-9 たて壁補強事例

5. おわりに

構造物がより大型化し複雑になってきている現在、温度ひびわれに関して、施工時に温度計測や鉄筋ひずみ計測が行われ温度応力解析との比較結果が報告されている。それらによると現地条件を的確に推定していれば、コンクリートの温度履歴については比較的よい精度で温度応力解析によって算定可能である。

補強鉄筋量の算定に簡易的な方法を示したが、その妥当性については解析値と現地計測のデータが不足していることから、今後のデータ蓄積が望まれる。

温度ひびわれに関する問題は、解析、現場での施工実績など総合的な判断のもとに必要な応じて的確な補強を行い、耐久性に優れた構造物としていく必要がある。

最後に、本文事例である実構造物においては若干のひびわれが発生したが、特に問題となるものはなかったことを参考までに報告しておく。

参考文献

- 1)コンクリート標準示方書(平成3年版)施工編, 土木学会
- 2)マスコンクリートのひびわれ制御指針, 日本コンクリート工学協会
- 3)マスコンクリートの温度応力研究委員会報告書, 日本コンクリート工学協会(1992.9)
- 4)コンクリート構造物の体積変化によるひびわれ幅制御に関するコロキウム論文集, 日本コンクリート工学協会, 1990.8
- 5)井上雅弘: マスコンクリートの温度ひびわれ対策, 第1回技術研究発表論文集, 北海道開発コンサルタント(株), pp124~128, 1995.9