

大型機械台基礎コンクリートのマスコン対策について

芳賀孝成 十河茂幸
中川武志
(本社 技術本部 土木技術部)

Prevention of Cracks in Mass Concrete Footing for Machine Base

Takashige Haga Shigeyuki Sogo
Takeshi Nakagawa

Abstract

In order to control cracking due to thermal stresses in a mass concrete footing for a machine base, a number of positive measures such as the use of low-heat cement and implementation of pipe-cooling were employed, and measurements of temperature and strain in concrete were carried out accompanying construction. This report describes the results and the effects of the measures.

The results are as follows: (1) The forecast temperature is slightly lower than the measured value, but it is possible to justly forecast the temperature with proper conditions for computation. (2) The result of thermal analysis of pipe-cooling with an FEM model agrees relatively well with measured values, but further studies of boundary conditions are needed. (3) The results of stress analysis with the FEM model and measured values show trends which are relatively close, but require further studies regarding the method of estimating creep of concrete and restraining conditions. (4) Pipe cooling is effective for control of thermal stresses.

概要

大型機械台基礎コンクリートの温度ひびわれ防止のため、低発熱セメントの使用、パイプクーリングの実施など、種々の積極的な対策を講じた。施工に伴い、コンクリートの温度、ひずみなどを実測して、解析値と比較し、ひびわれ対策とその効果について検討を行った。

この結果、次のことがわかった。(1) 温度計算値は、実測値よりやや低く、断熱上昇温度を若干補正する必要があるが、コンクリート温度の予測は適切な計算条件を与えれば可能である。(2) FEM モデルによるパイプクーリングを行なった温度解析結果は実測値と比較的によく一致したが、境界条件などについてはさらに検討が必要である。(3) FEM による応力解析と実測値の傾向は比較的よく近似しているが、拘束条件、クリープの考慮の方法などについてさらに検討を要する。(4) 温度応力の低減にパイプクーリングはかなり効果的である。

1. まえがき

場所打ち杭(直径 1.2 m)上に打設される長さ約 65 m、幅 5.4~14 m、最大厚さ 3.7 m の大断面鉄筋コンクリートフーチング(コンクリート量約 1,400 m³、図-1)の施工に際し、温度ひびわれの発生が懸念された。この構造物は、精密機械の基礎であるため、有害なひびわれを防止する必要があるが、パイプクーリングをはじめ、積極的なマスコミ対策を講じた。

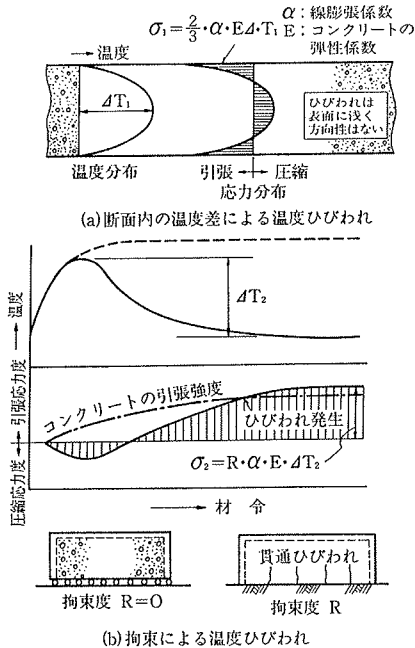
本報告は、パイプクーリングの温度応力低減効果等を確認するために行なったコンクリートの温度上昇および温度応力の測定結果についてまとめ、温度上昇の予測方法に関する問題点と FEM 応力解析によるパイプクーリングの効果の検証結果などについて述べたものである。

2. 温度ひびわれについて

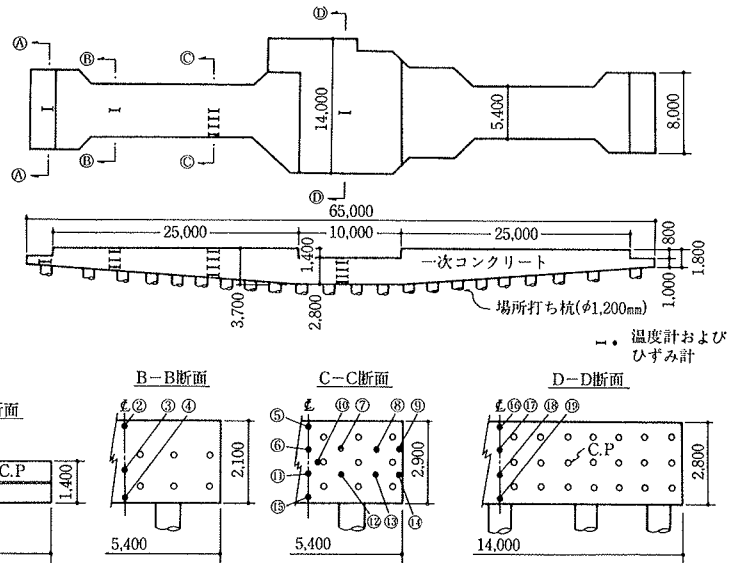
コンクリートに発生するひびわれの要因は多種多様であるが、通常 RC 構造物によく発生するひびわれは、乾

燥収縮ひびわれと水和熱による温度ひびわれである。本工事では、構造物の大半が完成後に水位下に没することもあり、温度ひびわれだけを対象として検討した。

コンクリートの水和熱に起因する温度ひびわれには、①内外の温度差応力（内部拘束）によるひびわれと、②外部拘束によるひびわれがある。これらの温度ひびわれの発生概念を図一2に示す。①のひびわれは、図一2(a)に示すように部材内に温度勾配が生じた場合の断面内応力によるもので、コンクリート温度が最大に達する比較的早い時期に表層部に生じる。②のひびわれは、図一2(b)に示すように、コンクリートの温度上昇、下降による伸縮を既設コンクリートや杭などが拘束することによって生ずる応力が、コンクリートの引張強度を上回る場合に生ずる。実際の構造物においては、温度差応力と外部拘束応力が合力として作用し、図一3に示すように初期には表面で、温度下降時には中心部で引張応力が大きくなり、ひびわれに至ることも多い。



図一2 温度ひびわれ発生概念



図一1 構造形態および測定位置

3. 施工概要

3.1. マスコン対策

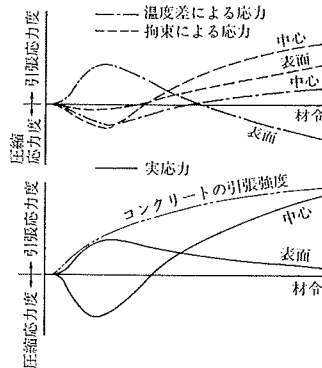
マスコン対策としては表一1に示すような種々の検討が必要であるが、通常は、施工条件や工期、工費等の制約から対策は限られる。この工事では、有害なひびわれを許容しない設計条件であるため、材料面では低発熱セメント、遅延型 AE 減水剤等を使用し、配合面では、設計基準強度の管理材令を91日とし、単位セメント量低減のため最大骨材寸法を 40 mm とした。また、施工面では、養生マットを布設した濡水養生やパイプクーリングを実施するなどの対策を講じた。

3.2. コンクリート配合

使用したコンクリートの配合を表一2に示す。使用セメントは、改良型フライッシュセメント B 種(M社製)で、その物理的性質を表一3に示す。細骨材は日比産の海砂 (FM 2.70, 比重 2.60), 粗骨材は赤穂産の碎石 (最大寸法 40 mm, FM 7.14, 比重 2.63) を用いた。なお、設計基準強度は 180 kg/cm² で、その管理材令は91日である。

3.3. 打設方法

ポンプ工法による1度打ちと、バケットなどによる区画割をした打設方法の長短所を比較検討した。その結果ポンプ打設の方が、①一体構造でありせん断抵抗力の弱点を残さない。②施工性が良好である。③工期



図一3 温度応力の概念

の大幅な短縮となる。④打継目がないため止水性、耐久性に優れている。などの利点があり、ひびわれ対策を万全にしてポンプ工法により施工することにした。

コンクリートはピストン式コンクリートポンプ車により打設し、配管はすべて5インチ管とした。打設は6:45~17:00の約10時間で行ないコンクリート温度は15~17℃であった。コンクリートの平均打設速度は48m³/hr/台でポンプ車3台使用した。なお、生コンの運搬時間は約15分であった。

3.4. パイプクーリング

3.4.1. クーリングパイプとその配置 クーリングパイプにはφ25mm(一部φ38mm)の薄肉亜鉛びき鉄管を用い、ジョイントはエルボーチーズジョイント、導水管(メインパイプ)はφ150mmの薄肉鋼管、サクションホースなどを使用した。配管概略図を図-4に示す。配管ピッチは、水平・鉛直方向ともに80~90cmピッチとした。なお、冷却水の出入口の温度差をできるだけ小さくするため、最大流路長を約15mとした。

3.4.2. 冷却水 送水は還元方式とした。そのため、排水温度の上昇が考えられたので、工業用水(0.68m³/分, 12℃)とウエルポイント排水(0.19m³/分, 16℃)の2系列を適当に利用し、水温が上昇を始めると水槽へ氷塊の投入を行なった。氷塊はコンクリートの温度上昇開始直後から下降に移る直前まで約12時間、1.1ton/回を約1時間おきに投入した。なお、冷却水の送水は、水頭差による自然流下とし、送水量は1.84~1.20m³/分であった。

3.4.3. 温度管理 冷却水の温度は、コンクリートの最高温度を抑え、温度下降速度をゆるやかにすることを目標とし、かつ、コンクリート温度と冷却水温の差を30

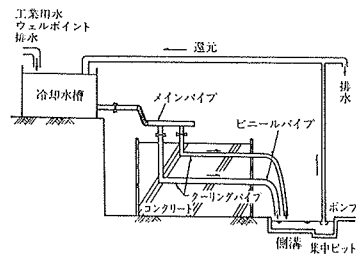


図-4 クーリングパイプの配管概要

分類	検討項目	検討事項の要点	備考
計画	ひびわれ制御の目的	許容限度を明確にする。	耐力、耐久性、水密性、美観とひびわれ幅
	工事の時期	なるべく暑中はさける。	工期との関係
	設計基準強度	必要以上に高強度としない。	品質管理材料、割増し率
	配筋	コンクリートの充てん性とひびわれの分散効果のバランス	細径で密にするとひびわれは分散し、ひびわれ幅は減少するが充てん性は悪くなる。
	打継目	構造耐力上支障のない位置とする。打継目の止水対策も検討しておく。	伸縮継目の設置、リフト高さ
材料および配合	温度上昇の予測	許容温度上昇量を定める。	必要に応じて応力解析を行なう。
	セメント	水和熱が少なく、水和速度の遅いセメントを使用する。	中庸熟セメント、フライアッシュセメント、高炉セメントなどの使用の可能性を調査
	混和材料	水和熱の低減に役立つものを使用する。	フライアッシュ、凝結遅延剤、減水剤、流動化剤
	骨材の最大寸法	施工上可能な範囲で大きくする。	配筋との関係
	スランプ	打設可能な限り小さくする。	運搬方法、打込み方法
施工	配合強度	管理材料を長期にとり、大きすぎないようにする。	割増し率、長期強度での品質管理
	打設時期	高温時をさける。	早朝あるいは夜間の打設
	ブレーキング	混練り水、骨材を冷却する。	冷却設備、コンクリート温度
	パイプクーリング	必要な範囲でできるだけ実施する。	配管ピッチ、送水計画、温度の計測管理
	コンクリートの製造	マスコンクリート用の製造設置の有無	専用プラントの使用、大粒骨材の使用、特殊セメントの使用、ブレーキング設備
	コンクリートの運搬、打設方法	ポンプ使用の可否、バケットの使用	打設量、スランプ、材料分離の防止
	締固め	十分に締固める。	バイブレータの使用
	打継ぎ	付着をよくし、計画的に行なう。	打継目の処理、時期、打継目の止水
養生	コンクリート内部の温度を一律にし、表面の乾燥を防ぐ。	日おおいをし直射日光や風をさける。型枠の脱型時期	

表-1 マスコンクリートの検討項目

粗骨材の最大寸法 (mm)	スランプの範囲 (cm)	空気量の範囲 (%)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				
					水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 ポリス No.8
40	12±2.5	4±1	62	38.9	162	260	718	1141	0.65

表-2 コンクリート配合

セメントの種類	比重	粉末度 比表面積 (cm ² /g)	凝結 始発終結 (時-分)(時-分)	曲げ強さ (kg/cm ²)				圧縮強さ (kg/cm ²)				水和熱(cal/g)	
				3日	7日	28日	91日	3日	7日	28日	91日	7日	28日
改良型フライアッシュB種	2.96	3,210	2-49 4-16	33.0	44.0	64.0	—	130	197	350	—	67.6	80.7
中庸熟セメント	3.21	3,040	3-35 4-50	27.5	38.0	66.0	80.2	95	155	357	491	61.2	75.0
高炉セメントB種	3.05	3,680	3-00 4-22	29.6	43.0	69.5	82.5	116	192	402	511	72.3	85.1
普通セメント	3.17	3,050	2-42 3-56	32.5	50.0	71.2	77.5	132	237	412	470	77.2	88.5

表-3 セメントの物理試験結果

	名称	型式	メーカー	仕様
計器	ひずみ計 (19点)	KM-100F	東京測器	標点距離: 100mm 温度範囲: -20~+100°C 非直線性: ±1%FS 350Ω 4ゲージ法
	温度計 (19点)	Cu-Co熱電対	日立電線	φ0.65mmビニール被覆 測定範囲: -100~+100°C 精度: ±0.5°C
測定器	自動デジタルひずみ測定器	TDS-256DC	東京測器	測定範囲: ±39999×10 ⁻⁶ 使用温湿度範囲: 0~50°C 85%RH以下
	ひずみ計用スイッチボックス	ASW-324D	"	測定点数: 256点 精度: ±0.1%
器	温度計用スイッチボックス	ASW-32T	"	測定点数: 32点 使用温湿度範囲: 0~50°C 85%RH以下
	タイマー	T-24P	"	水晶振動子発振分周式 使用温湿度範囲: 0~50°C 85%RH以下

表-4 使用計器

℃以内とした。そのため、打設直後には冷却水温を下げるため氷塊を使用し、下降過程では、断続的に冷却し、

打設後約6日で冷却を終了した。

4. 測定内容および方法

表一4に示す計器および測定器を用いて、コンクリート温度、内部ひずみ、冷却水温、外気温などを測定した。測定位置は図一1に示すとおりである。また、コンクリートの圧縮強度、静弾性係数、引張強度、単位体積重量、熱膨張係数、断熱温度上昇量などの物理的性質を試験により求めた。

5. 測定結果

5.1. コンクリートの性質

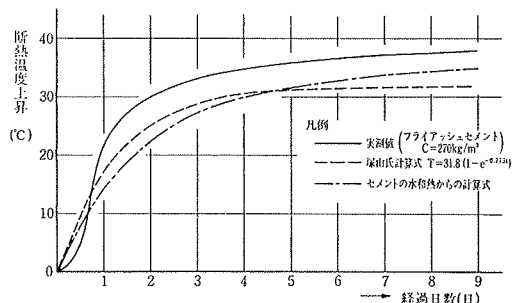
コンクリートの物理的性質を表一5に示す。断熱温度上昇試験結果は図一5に示すとおりである。また、コンクリートの熱膨張係数は $9 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ であった。

5.2. 温度上昇

コンクリートの内部温度、冷却水温、排水温、外気温の経日変化を図一6に示す。コンクリートの最高温度は断面中央付近で打設後約1.5日で生じ、 45.5°C であった。断面方向の温度分布は図一7に示すように、型枠面から80 cm程度内部ではほとんど中央付近と同様の温度であり、打設後5日頃で若干中央部と差が生じている。図一

項目	材 令				
	1日	3日	7日	28日	91日
圧縮強度 (kg/cm ²)	50.8	122	167	227	303
静弾性係数 ($\times 10^4$ kg/cm ²)	15.9	25.9	29.3	33.5	35.9
引張強度 (kg/cm ²)	—	12.6	18.1	21.5	28.8
単位容積重量 (kg/m ³)	2289	2300	2323	2328	2340

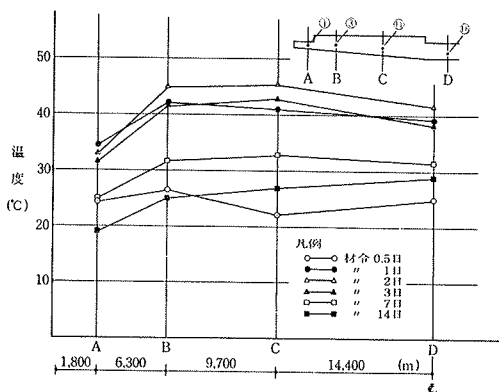
表一5 コンクリートの物理試験結果



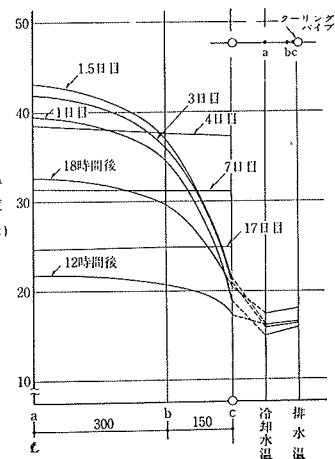
図一5 断熱温度上昇曲線

8は断面中央付近の長辺方向の温度分布で、図一9は、クーリングパイプ間の温度の経時変化である。

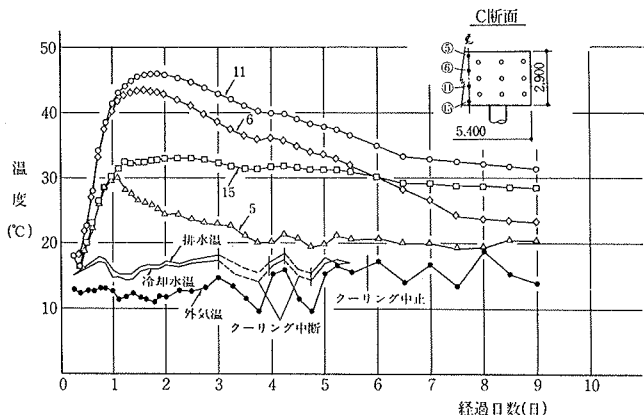
図一10は有限要素法による温度解析プログラム (DETECT) によってパイプクーリングの有無の比較を行なった結果を示している。計算に用いた諸条件を表一6に示す。この結果、パイプクーリング



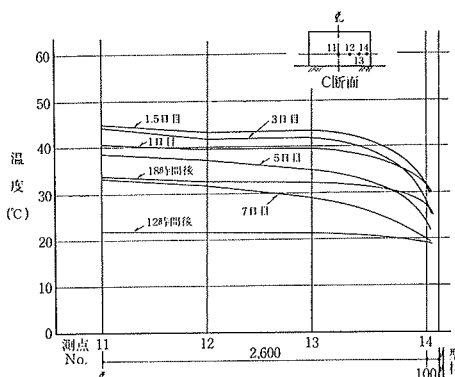
図一8 長辺方向の温度分布



図一9 クーリングパイプ周辺温度の経時変化



図一6 温度上昇の経日変化



図一7 断面方向の温度分布

諸元	記号	単位	コンクリート	地盤	型枠
熱伝導率	K	kcal/m・hr・°C	1.8	1.2	0.2
比熱	C	kcal/kg・°C	0.24	0.5	0.5
単位体積重量	γ	t/m ³	2.31	1.7	0.8
熱膨張係数	α	/°C	9.0×10^{-6}	—	—
弾性係数	E	t/m ²	材令により変化 ¹⁾	1200	—
ポアソン比	ν	—	0.17	0.3	—
剪断弾性係数	G	t/m ²	材令により変化 ²⁾	460	—
熱伝達率		kcal/m ² ・hr・°C	上面……20 側・下面……10		
初期温度	T ₀	°C	18	15	12.5

注1) クリープを考慮して瞬間弾性係数の67%に低減した値。
 2) $G = \frac{E}{2(1+\nu)}$
 3) 外気温は12.5→15°C(30日後)に直線変化、冷却水温は実測値を用いた。

表-6 計算に用いた諸条件

によって最大温度が約 6.5°C 低減されたものと思われる。クーリングを行なった場合の計算値は図-10に示すように実測値と比較的よく一致しているが、実測値より低く予測計算では若干補正が必要である。また単位セメント量やセメント種類からの算定式(塚山式)

や水和熱からの計算式では、図-5でも明らかなようにさらに小さい予測値となるため、これらの簡易式を用いる場合には、適切な補正を行なわねばならない。なお、図-11に断面内の温度分布の変化(計算値)を示す。

5.3. 温度応力

コンクリートの温度応力はコンクリートの内部ひずみにコンクリートの有効弾性係数を乗じて求めた。有効弾性係数はコンクリートのクリープを考慮したもので瞬間弾性係数の67%とした。温度応力の経日変化を図-12に示す。コンクリート表面および型枠付近は、材令初期に引張応力が生じ、温度降下とともに圧縮応力になってゆく。断面中心部では逆に初期に圧縮応力が生じ、温度

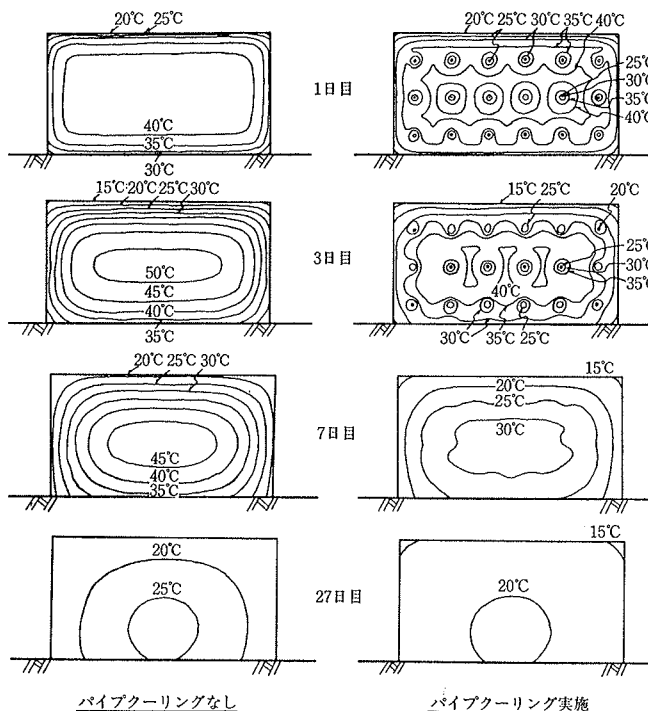


図-11 断面内温度分布の変化(計算結果)

降下につれ引張応力に変わり、1カ月後には約 20 kg/cm² の引張応力となった。温度応力は、初期材令および温度降下時においていずれもコンクリートの引張強度に対して安全側にあり、構造物の目視観察でもひびわれが認められなかったことを裏付けている。

有限要素法による応力解析(EARTH FEM STRESS)でパイプクーリングの有無の比較を行なった結果、中心部の長手方向の応力は、パイプクーリングによる材令30日において約 4 kg/cm² すなわち 20%程度引張応力が低減されたことになり、パイプクーリングがひびわれ防止にかなり効果的であったと思われる。なお、図-13に示すように、計算値は実測値と比較すると、長期的にはほ

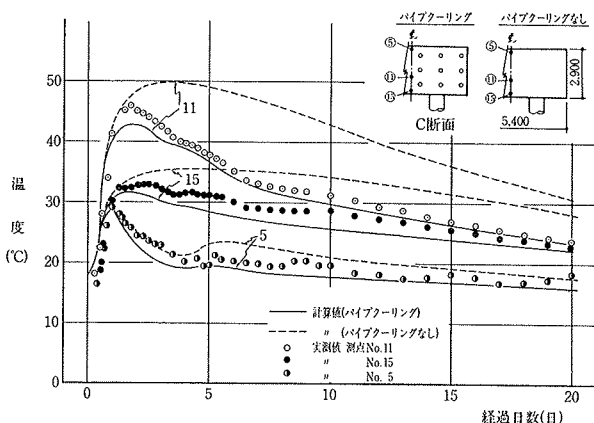


図-10 温度解析結果と実測値

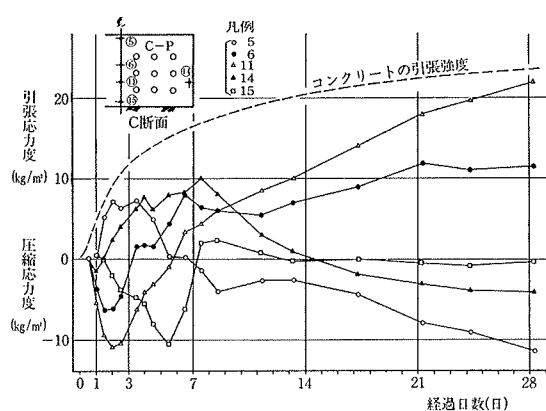


図-12 温度応力の経日変化(実測値)

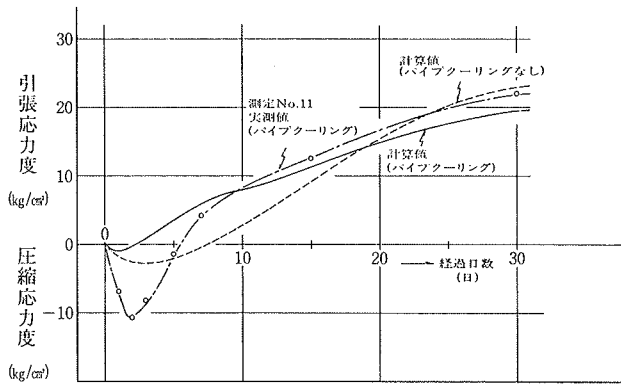


図-13 部材中央部の応力の比較

ば等しくなるが、若材令では差違が大きかった。今後、温度応力を適確に予測させるためには、拘束境界条件、力学的性質、クリープ特性などについてさらに検討が必要であると思われる。

6. まとめ

最大部材厚約 3.7 m の大型鉄筋コンクリート基礎の施工に伴って生ずるコンクリートの温度および温度応力を測定し、FEM による計算値と比較することにより次のことが明らかとなった。

- (1) コンクリートの温度上昇量の予測を行なう場合、断熱温度上昇試験の結果を用いると温度上昇勾配および最高温度とも若干小さくなる。なお、セメントの種類や単位量から算出する方法やセメントの水和熱から算出する方法などでは、何らかの補正が必要である。
- (2) 計算結果によると、最高温度はパイプクーリングをしない場合打設後 3～4 日で生じ、パイプクーリングによって最大となる時期は打設後 1.5～2 日に早まり、約 6.5℃ 上昇温度が低減される。なお、実測結果では、打設後 1.5～2 日で最高温度 45.5℃ に達し、計算値とほぼ一致した。
- (3) パイプクーリングの配管間隔は小さい程効果があり最高温度を低減するには、少なくとも 80 cm 以下にすることが好ましい。冷却水の循環を行なう場合、パイプ系列を増しコンクリート内の 1 系列の配管距離を短くしさらに、冷却方法を効率的なものとするれば、送水方向の

逆転は不要である。また、温度上昇時に氷を用いて冷却水温を下げたことは、最高温度を下げるのにかなり寄与したと思われる。

(4) コンクリート断面内の温度応力は、材令初期に圧縮応力で、材令とともに引張応力となり、材令 30 日で約 20 kg/cm² に達した。有限要素法による応力解析結果と実測値は、若干差違があり、拘束境界条件や、その他の諸条件についてさらに検討する必要があると認められた。

(5) パイプクーリングによって最高温度が約 6.5℃ 低減された。パイプクーリングの応力低減効果を計算により求めると、材令 30 日で約 4 kg/cm²、約 20% の引張応力が低減されたことになり、パイプクーリングの十分な効果が認められた。

7. あとがき

マッシブな鉄筋コンクリート構造物に生ずる温度ひびわれの予測は、現状ではきわめて困難な問題とされている。しかし、コンクリートの温度上昇および応力解析の精度を高め、適切なマスコン対策を行なうことは極めて重要であり、今後、さらに検討しなければならない。

なお、本構造物では積極的なマスコン対策を行なった結果、完成後においてもひびわれは皆無であった。

最後に、本報告を行なうに際し御尽力を頂いた本社技術本部土木技術部の岩崎良一、新開千弘、小沢郁夫の各職員に深く謝意を表します。

参考文献

- 1) 塚山隆一：マスコンクリートの施工（コンクリート技術の基礎），日本コンクリート会議，（1973.9），pp. 105～124
- 2) 塚山隆一：マスコンクリート工事とひびわれ，コンクリートジャーナル，Vol. 11, No. 9, (1973), pp. 26～30
- 3) 高橋，永井，西川：マスコンクリートについて，大林組技術研究所報，No.10, (1975), pp.133～138
- 4) 塚山，宮地：各種セメントを用いたコンクリートの温度上昇，セメント技術年報，XXV, (1971), pp. 220～223