

[11] パイプクーリングを施したマスコンクリートの温度応力に関する研究

正会員 佐藤 英明 (熊谷組技術研究所)
 正会員 ○佐谷 靖郎 (熊谷組技術研究所)

1. まえがき

パイプクーリングは、主にコンクリートダムで用いられている温度規制方法であるが、近年ではダムに限らずマッシブな重要構造物に対してもパイプクーリングを適用するケースが見られる。ところで、適切なパイプクーリングを実施するには予め設計段階でその効果を予測することが必要となるが、熱的效果については、1940年代にアメリカでボルダダム建設に伴って行なわれた研究に始まり、最近では田辺らの一連の研究などによって定量的に把握することが可能になりつつある。しかし、力学的効果についてはまだ十分に明らかにされていない。そこで、本研究では、パイプクーリングが施された実構造物を対象として温度応力に関する計測、解析を行ない、パイプクーリングの力学的効果ならびにクーリング条件についての検討を行なった。

2. 構造物の概要

本研究で対象とした構造物は、多柱鋼管杭を基礎として砂質地盤上に打設されたコンクリート底盤であり、構造物の形状は図-1に示す。コンクリートの配合は表-1に示すとおりであり、コンクリートの打設は夏期に行なわれ、打設温度は30℃であった。クーリングパイプは直径1 inchの電綫鋼管を使用し、その配管は図-2に示す。通水はコンクリート打設直前から構造物内部の温度が最高となるまで行ない、クーリング水の流量は15 l/min、パイプ入口での水温は10℃となるようにして行なった。

3. 計測概要

計測器は図-1におけるA~F断面に埋設した。D断面における埋設計器とその位置は図-1に示すとおりである。A、B断面には中心線上の鉛直方向に表面から130mm、500mm、850mm、の位置に有効応力計、埋設型ひずみ計、熱電対を埋設し、C、F断面には中心線上の鉛直方向に表面から130mm、500mm、850mmの位置に熱電対のみを埋設した。E断面には中心線上の鉛直方向に500mmの位置に熱電対を埋設した。

なお、A、B、D断面において有効応力計および埋設型ひずみ計は構造物長手方向に、無応力計は鉛直

表-1 コンクリートの配合

粗骨材の最大寸法 (mm)	スランプ (cm)	空気量 (%)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/n ³)				
					W	C ^{*)}	S	G	AE剤
25	8	4	59.8	43.0	159	268	804	1092	0.088

*) 普通ポルトランドセメント

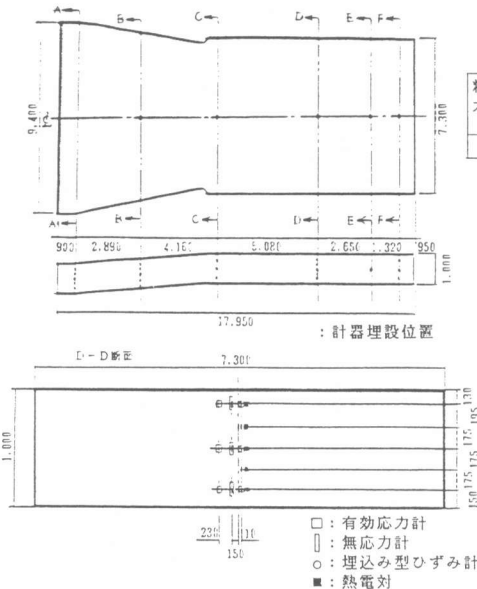


図-1 部材形状及び計器埋設位置

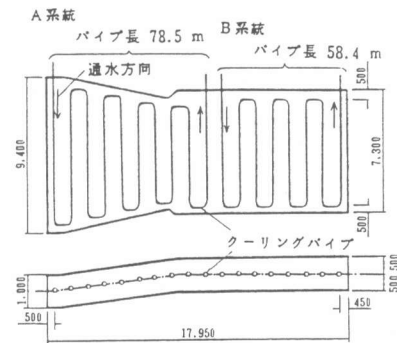


図-2 クーリングパイプ配管図

方向に埋設した。

3. 解析概要

3.1 温度解析

コンクリートの温度解析は3次元有限要素法で行なった。解析手法の詳細は別の機会に報告するとして、以下に概要を示す。

クーリング水の熱収支を流れ方向Sのみで考える。クーリング水の流速 v が十分に速いのでクーリング水の時間変化項を無視すると次式の支配方程式が得られる。

$$\rho_w \cdot C_w v \frac{\partial T_w}{\partial S} + \frac{2}{r} \alpha (T_w - T_c) = 0 \quad (1)$$

ここで、 ρ_w, C_w は水の密度および比熱、 T_w, T_c は水およびコンクリートの温度、 r はクーリングパイプの半径、 α はクーリングパイプを含めたコンクリートと水との平均熱伝達率である。(1)式をガラキン法によって定式化することによってクーリング水の温度が求まる。

解析は実構造物と対応したケース(CASE-1)の他に、パイプクーリングを72時間行なったケース(CASE-2)についても行なった。解析の際に用いた諸定数は表-2に示すとおりであるが、断熱温度上昇式は、コンクリート温度上昇時の実測値をもとにして最小2乗法によって推定した。また、コンクリートの比熱および熱伝達率については、計測と平行して行なったグローバ法による熱拡散率の試験結果を考慮して推定した。

3.2 応力解析

応力解析は、温度解析を行なった2ケースについて、材令をいくつかの区間に分けて各区間ごとの応力を重ね合わせていく方法で行なった。各区間における応力増分は、3次元有限要素法による弾性解析で求めた。解析の際に用いた諸定数は表-3に示すとおりであるが、熱膨張率は無応力計による計測結果から求めた。

圧縮強度および弾性係数を与える式は、計測と平行して行なった

コンクリートの材料試験結果から求めた。ポアソン比、クリープ係数は既往の文献等から推定した。解析区間は12時間とし、拘束条件は、構造物が砂質地盤上に打設されたことを考慮して最下端を鉛直方向のみ拘束として他は自由端とした。また、弾性係数は各要素ごとに(2)式および表-3の式から求めた。

$$M = \frac{1}{2} \left(\int_{N-1} (T+10) \cdot \Delta t + \int_N (T+10) \cdot \Delta t \right) \quad (2)$$

(2)式において、 M は N ステップでの積算温度、 T は各ステップでの要素平均温度、 Δt は各ステップでの時間間隔である。

4. 結果と考察

4.1 温度

図-3~5にD断面中心線上におけるコンクリートの温度履歴を、図-6に鉛直方向の温度分布を示す。また、図-7にはクーリングパイプ入口および出口の水温履歴を示す。実構造物を対象とした解析値(CASE-1)はいずれも実測値と良く適合している。なお、解

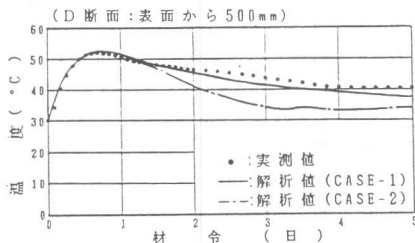


図-4 コンクリートの温度履歴(2)

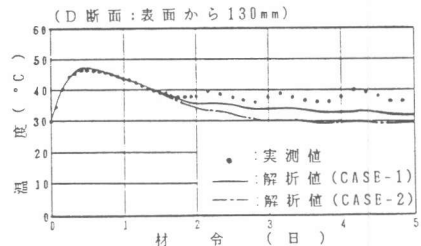


図-3 コンクリートの温度履歴(1)

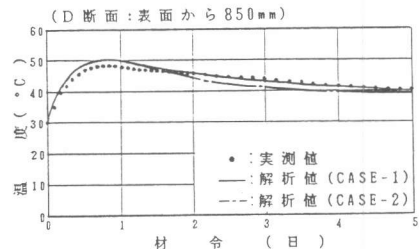


図-5 コンクリートの温度履歴(3)

表-2 温度解析における諸定数

	CASE-1	CASE-2
コ	2321.0	kg/m ³
シ	1.722	kcal/m hr で
タ	0.235	kcal/kg で
リ	断熱温度上昇 $T = 32.72 (1 - e^{x p} (-1.3632 t))$ (t:日)	
ク	コンクリートと大気との熱伝達率 $t \leq 24$ hr: 8.02	kcal/m hr で
ラ	$t > 24$ hr: 11.60	kcal/m hr で
ド	打設速度	36
ト	クーリングパイプ内径	0.0254
チ	クーリング水流速	1800
リ	材令	16
ン	コンクリートとクーリング水との平均熱伝達率	275
グ	送水期間	23 hr
外	気 温	72 hr

(*) 既社の文献を参照

表-3 応力解析における諸定数

熱膨張率	1.0×10^{-5}
弾性係数 E_c	$E_c = 613.33 \sigma_c + 119047.0$
圧縮強度 σ_c	$\sigma_c = 137.368 \log M - 141.189$
ポアソン比 μ	0.167
クリープ係数 μ_{cr}	0.5

(*) M は-10℃を基準とした積算温度

(**) 既往の文献から推定

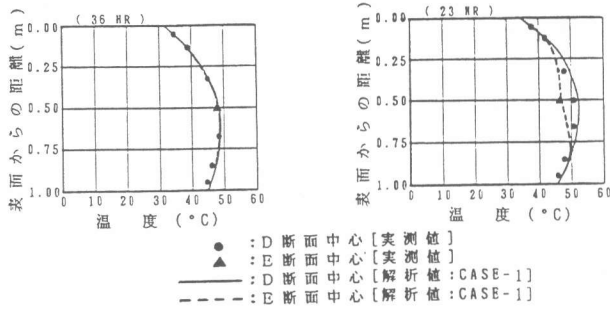


図-6 計測位置を含む鉛直線上の温度分布

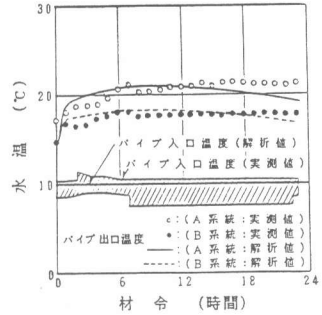


図-7 クーリング水の温度履歴

折では日射の影響を考慮していないため、図-5において解析値は実測値に比べて日変動量が少なくなっている。

次に、解析結果に基づいてパイプクーリングの熱的効果について検討する。図-4においてCASE-1のクーリング停止後約24時間で、CASE-1とCASE-2との温度差が顕著となるが、図-3および図-5はCASE-2のクーリング停止時期においてもあまり差が生じていない。

また、図-8はクーリングパイプを含む鉛直線上の温度分布であるが、コンクリート打設後6時間ですでにパイプ周辺に大きな温度勾配が生じ、クーリング停止後約十数時間で温度勾配は消滅している。この温度勾配が生じる範囲はパイプから約20cmの距離である。

以上より、パイプクーリングによる熱的効果を強く受けるのはパイプからの距離が20cm程度までの範囲であり、この範囲を越えると効果が現われるまでの時間が長くなり温度低減量も減少すると思われる。

4.2 応力

図-9～11はD断面に埋設した有効応力計の計測結果および解析結果である。鋼管杭による外部拘束の影響によって図-11では実測値と解析値には若干のずれが生じているが、図-9および図-10においては実測値と解析値はほぼ一致している。なお、各有効応力計の計測位置とクーリングパイプとの直線距離は、図-9では約45cm、図-10では約25cm、図-11では約43cmである。実測値において、図-10ではクーリング停止後の温度勾配の消滅に伴って圧縮応力の増大が見られるが、図-9および図-11ではこの現象は顕著ではない。

次に、解析結果に基づいてパイプクーリングの力学的効果について検討する。図-10においてCASE-1とCASE-2とはクーリング停止時期の違いにより応力発生状態に差が生じているが、図-9および図-11ではこの差はあまり顕著ではない。また、図-12はクーリングパイプの水平距離による応力分布の発生状況を示しているが、クーリングパイプ周辺に生じる温度勾配に起因する引張応力は、材

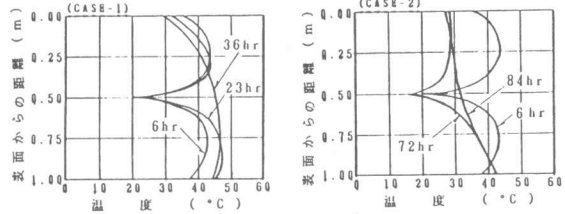


図-8 クーリングパイプを含む鉛直線上の温度分布

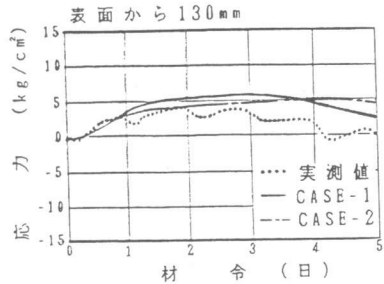


図-9 構造物長手方向の応力履歴(1)

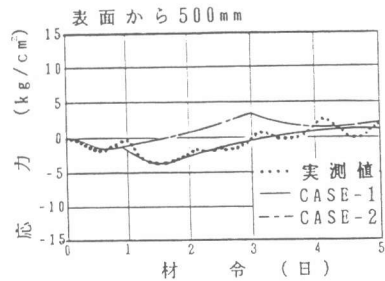


図-10 構造物長手方向の応力履歴(2)

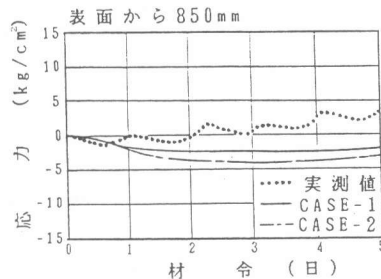
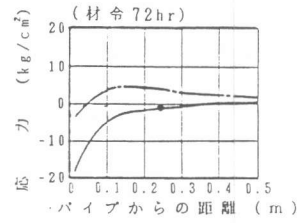
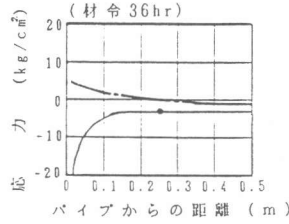
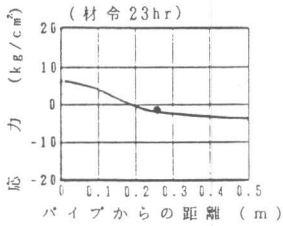


図-11 構造物長手方向の応力履歴(3)



令 23 時間で約 $6\text{kg}/\text{cm}^2$ であり、ここでクーリングを停止した場合 (CASE-1) には約 $20\text{kg}/\text{cm}^2$ の圧縮応力となる。また、クーリングを継続させた場合 (CASE-2) には、パイプ近傍の応力は徐々に圧縮側へと転化していき、クーリングパイプから離れると応力は逆に引張側へと転化してゆく。この現象は大きな温度勾配の生じている範囲

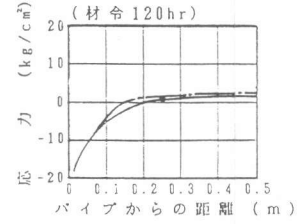
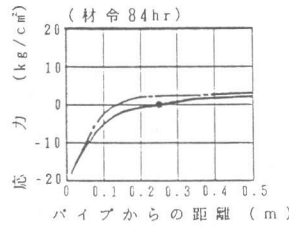


図-12 パイプからの水平距離による応力分布

●: 実測値
—: CASE-1
---: CASE-2

のコンクリートよりも、温度勾配を生じていないコンクリートの方が温度降下量が多いためと思われる。さらに、図-12の材令36時間および材令72時間においてCASE-2の結果はCASE-1の結果よりも引張側となっていることから、パイプクーリングは、コンクリート温度が降下を始めた時点で停止するのが良いと思われる。

5. 結論

本研究で得られた結論は、以下のとおりである。

- (1) パイプクーリングによる熱的効果を強く受けける範囲は、クーリングパイプからの距離が20cm程度以内の範囲である。
- (2) パイプクーリングによる力学的効果を強く受ける範囲は、熱的効果と同様にクーリングパイプからの距離が20cm程度以内である。
- (3) パイプクーリングによってパイプ近傍に発生する初期引張応力は今回の場合約 $6\text{kg}/\text{cm}^2$ (材令23時間) であり、材令とともに減少していく。
- (4) パイプクーリングの実施時期は、コンクリート打設直前から、コンクリート温度が降下しはじめるまでが良いと思われる。

今後は、初期水温、パイプの内径、構造物の形状なども考慮した最適クーリング条件について考えていく予定である。

参考文献

- (1) U.S.Bureau of Reclamation 「Boulder Canyon Project Final Reports、PartVII -CEMENT AND CONCRETE INVESTIGATIONS、Cooling of Concrete Dams」 1949
- (2) 田辺忠顕、山川秀次「マスコンクリートにおけるクーリング効果の解析」 土木学会第36回年次学術講演概要集、第5部、昭和56年10月
- (3) 渡辺 朗、田辺忠顕「コンクリート構造物におけるパイプクーリング効果の擬3次元解析」日本鋼構造協会第17回大会研究集会マトリックス解析法研究発表論文集、昭和58年7月
- (4) 溝渕利明、田辺忠顕「マスコンクリートのパイプクーリングによる熱除去効果の解析」 第7回コンクリート工学年次講演会論文集、昭和60年6月
- (5) 佐藤英明、佐谷靖郎「マスコンクリートの温度応力に関する研究-地下スラブの温度実測と初期材令コンクリートの力学的特性に関する一考察」、熊谷技報 NO. 33、1983年7月