

監査廊のパイプクーリングの最適位置の検討について

野 中 資 博*

A Study on Optimum Position of Pipe-Cooling
in Fill-Dam Gallery
Tsuguhiro NONAKA

Pipe-cooling is usually used for reducing thermal stress in fill-dam gallery. Sensitivity analysis can ask for the position of pipe-cooling. The elements which influence thermal cracking at both shoulder and arch crown were picked out on the result of sensitivity analysis, i. e., influence coefficient to thermal stress. As a result, the difference between the optimum position and the actually placed position is a little, and the optimum position shows closely spacing near the lower part of crown.

1. はじめに

堤高が30m以上のフィルダムには、現在、監査廊なる鉄筋コンクリート構造物がほぼ設置されている。その目的はフィルダム挙動の把握、ならびに種々のアフターケアにあり、設置位置はカルバート型では、多くの場合コアの直下である。このような監査廊のフィルダムに対する役割は大きく、監査廊自体を安全性・耐久性の面から検討することは重要である。そして、安全性・耐久性を考える時に、従来特に問題とされてきたのが、施工後初期に現れる温度応力による温度ひびわれであった。この温度ひびわれに対する研究は数多く試みられており、その結果も現実に近いものとなってきた。しかし、フィルダム監査廊には、まだ多くの解決すべき問題が残されており、その解析および対策が講じられなければならない。この報告では、その内、温度応力低減法として通常用いられているパイプクーリングについて、その最適位置を感度解析の観点から、理論的に求めることを検討した。

2. 温度応力とパイプクーリング

フィルダムに設置される監査廊は、その断面が大きいためにマスコンクリート構造物として取り扱わねばならない。すなわち、コンクリート打設時に、セメントの水和熱によるコンクリートの温度上昇が大きいので、この

ため断面内の温度分布が不均一になり熱ひずみが生じ、コンクリートの変形が内部的に拘束されて温度応力が生じる。加えて、この温度上昇は打設後数日で最高温度に達し、そして降下を始めるが、この温度降下時のコンクリートの全体収縮が岩盤等により外部的に拘束を受けても温度応力が発生する。これらの内部拘束と外部拘束により発生した温度応力の合計が、コンクリートの引張強度に達した時、温度ひびわれが生じるのである。現在、こうした温度ひびわれを防止するために温度応力の低減が重要な課題となっている。代表的な監査廊の温度応力低減法としては、パイプクーリング、プレクーリング、適切なセメント材料の選択、縁切りなどが挙げられる。そこで、次節では温度応力を低減する一つの方法である、パイプクーリングについて、その最適位置の検討を行うための手法について述べる。ここで、パイプクーリングとは、セメントの水和反応によって生じた水和熱を、パイプに冷水を流すことによって強制的に外部に逃がし、大きな温度応力の発生を防ごうとするものである。従来は、このパイプクーリングの位置を経験的に決めていたが、ここではこの位置を理論的に求め、経験的なものとの比較検討を試みようとするものである。

3. 解析理論と解析方法

解析理論としては、田辺等が述べた温度応力影響線の理論を用いた。温度応力影響線とは、各部位に注目して各要素毎に単位温度変化を与えて、その部位の要素毎の

* 農村工学講座

発生応力を算出したものである。これは広く言えば感度解析の一種であり、パイプクーリングの最適位置の探索に利用する場合は、注目部位に最も影響を与える要素を選びだし、この要素にパイプクーリングを行うべきと考えるものである。

温度応力はコンクリートの剛性の変化、温度変化を考慮して、時間ステップ毎に計算し、それを逐次総和しなければならないが、影響線を算出するためだけなら、弾性体の温度応力の計算を利用できる。すなわちその計算式は次式である。

$$\{\sigma\} = [D][B][K]^{-1}\{\Delta F\} - \{\Delta \epsilon_0\} \quad (1)$$

ここで、 $\{\sigma\}$ は応力ベクトル、 $[D]$ は弾性係数マトリクス、 $[B]$ は勾配マトリクス、 $[K]$ は剛性マトリクス、 $\{\Delta F\}$ は初期ひずみ増分に対応する節点力ベクトル、 $\{\Delta \epsilon_0\}$ は初期ひずみベクトルである。

また、 $\{\Delta F\}$ は初期ひずみ（温度ひずみ）による荷重成分だから、一要素が1℃の温度変化を生じたときの荷重として、初期ひずみを $\{\alpha\}$ で表せば、次のようになる。

$$\{\Delta F\}^e = -\int_v [B]^T [D] \{\alpha\} dv \quad (2)$$

すなわち、 j 要素のみが1℃の温度変化を生じたときの監査廊各部位の応力は、 j 要素を除いて、

$$\{\sigma\}_j = [D][B][K]^{-1} \begin{Bmatrix} 0 \\ \vdots \\ \{\Delta F\}_j^e \\ \vdots \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (3)$$

となる。ただし、 j 要素については $-[D]\{\Delta \epsilon_0\}$ を付け加える。総ての要素について、 $\{\sigma\}_j$ を求めると、これは監査廊の一部が単位温度変化を生じたときの監査廊各部の応力変動を示している。監査廊の着目点、たとえば肩部、アーチクラウン部について $\{\sigma\}_j$ を得れば、これからパイプクーリングの最適位置が判断できる。すなわち、肩部とアーチクラウン下部は温度ひびわれの特に発生しやすい所であるから、ベース部を除く監査廊の各要素の節点にマイナスの単位温度変化を与えて、注目部位の発生引張応力を順次出力する。これらの結果に基づいて肩部、クラウン下部両方に最も影響を与える要素を数個選ぶ。この選びだした部分にパイプクーリングを行えば良いのである。解析モデルを図1に、その要素分割を図2に示す。また、解析に用いた物性値を表1に示す。表において、ベース部はアーチ部より早く打設されており、弾性係数をアーチ部より大きくとっている。鉄筋は考慮していない。

4. 解析結果からみた最適位置の検討

温度応力影響線というより、温度応力影響係数として

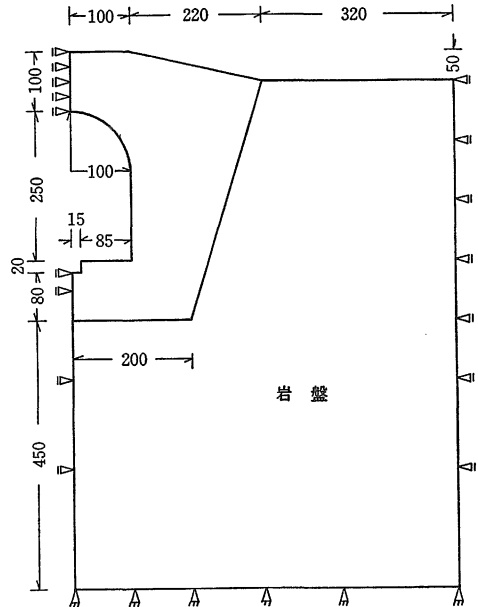


図1 パイプクーリング最適位置の解析モデル (cm)

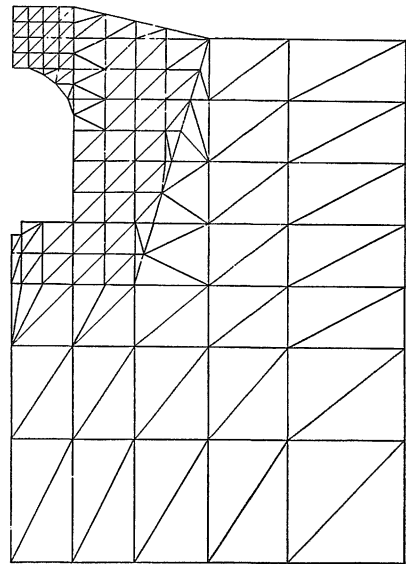


図2 要素分割図

解析結果を示す。図3が肩部のものであり、図4がアーチクラウン下部のものである。ここでは、いずれも影響係数の大きい方から20個のみを示した。肩部の場合、影響の大きい所は監査廊上部の表面付近に集中している。このため、肩部についてパイプクーリングを行う場合、理論的にはこの部分が良いと思われるが、施工上不可能であるため、この近傍の断面中心部分で影響の大きい所

表1 最適位置解析に用いた物性値

材 料	コンクリート		岩 盤
	アーチ	ベース	
弾性係数(kg/cm ²)	140000	210000	15000
ポアソン比	0.17	0.17	0.25
密度(kg/cm ³)	0.0024	0.0024	0.0025
熱膨張係数(1/°C)	0.00001	0.00001	0.00001

に行うものとする。同様に、クラウン下部の場合、影響の大きい部分は、通廊上部に生じている。これも施工上不可能であるため、同じく中心部分で影響の大きい所に行う。ただし、肩部、クラウン下部ともに近くが影響が大きいとは一概に言えなかった。

次に、肩部、クラウン下部の両方に共通に影響の大きい部分数個を選んだものと、実際に施工された位置を併せて図5に示す。この場合、理論的に求めた中で施工上不可能と思われる所は、意図的に除いてある。この結果より、理論的に求めた位置と、従来の経験的に求めた位置とはあまり違いは見られないが、理論的に求めた方が、クーリングパイプの数が多くなった。さらに、全体的に通廊側に近寄った配置を示した。従来は、影響の大きいクラウン周辺に一本しかクーリングパイプを設置していなかった。よって、パイプクーリングにより、有効に温度応力の低減を計るためには、クラウン周辺にクーリングパイプを少なくとも一本増やすことが肝要であると思われる。

5. お わ り に

報告の最後になって次のようなことを述べるのは、いささか気がとがめるが、実は、著者の以前からの考えは、温度応力低減法としてはパイプクーリングよりもプレクーリングの方が優れていると判断している。それは、パイプクーリングがスポット的な冷却ならば、プレクーリングは構造全体として温度低下を計るからである。断面内不均一温度分布も防げるし、構造全体としての温度上昇も小さい。すなわち、内部拘束による温度応力も外部拘束による温度応力もいずれも小さくできる。パイプクーリングにはそのような総合的な効果は期待できない。よって、現在の主流はプレクーリングになりつつあり、大規模な工事では液体窒素を使ったプレクーリングも実施されている。経済的な側面があるので、監査廊の施工にそのようなプレクーリングが適用可能かどうか判断はつかないが、従来の施工例に捕われることなく、白紙の状態でも柔軟に比較検討を現場では試してみたい。

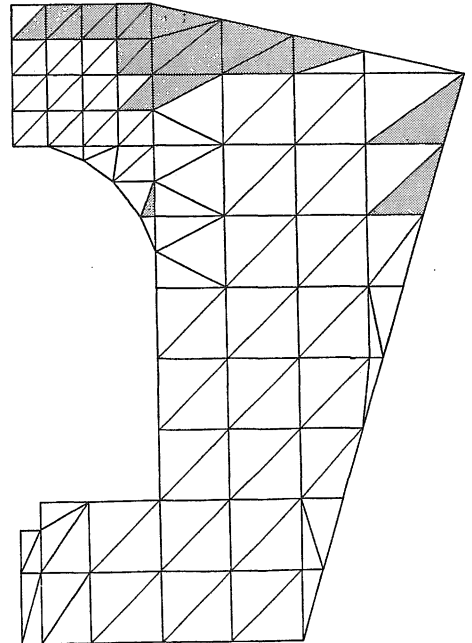


図3 肩部の温度応力影響係数(影付：影響大)

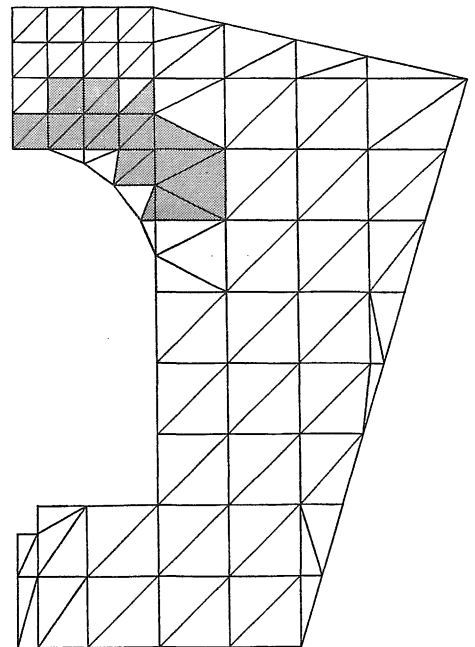


図4 クラウン下部の温度応力影響係数(影付：影響大)

のである。それでもやはりパイプクーリングということなら、この報告の結論が参考になるだろう。アーチクラウン下部を念頭に置き、従来より多少密に配置を心がけ

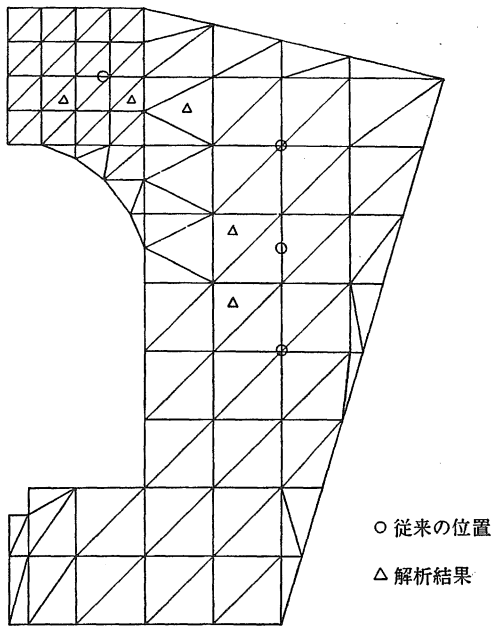


図5 パイプクーリングの最適位置の比較

られると良いと思う。

最後に、この研究の解析を実施していただいた、宮廻哲男氏に謝意を表します。

引用文献

1. 例えば、野中他：農業土木学会誌，56(12)：5-10，1988.
2. 田辺他：土木学会論文報告集，337：185-196，1983.