

神戸大学大学院 学生員。山田 毅、神戸大学 正員 梶井春輔

1. はしがき

筆者らは、最近、新設の水道トンネルに送水を開始した直後、コンクリート覆工にき裂が発生した事実を知った。そこで、筆者らはこのき裂がコンクリートに生じる熱応力によって生じたのではないかという仮説のもとに若干の理論的考察を行った。解析手法は有限要素法であり、種々の境界条件のもとにトンネル覆工に生ずる熱応力を計算し、冷水によってコンクリートにき裂の発生する場合もあり得るといふ結論を得た。

2. 有限要素法

用いた要素は8節点アイソパラメトリック要素であり、温度分布ならびに応力解析の両方に対し同じ要素を用いた。有限要素解析の詳細は省略する。

3. 解析結果とその考察

3.1 非定常温度分布解析

まず解析手法に対する精度および用いる材料定数の妥当性を検討するために、計算値と実験によって得られた温度分布との比較を行なう。解析の対象とするモデルは図-1に示すものであり、これは、神戸大学麓井研究室において行なわれた実験供試体である。実験はコンクリート供試体壁頂上に2℃の水を流し、供試体の温度分布、ひずみ分布を測定したものである。数値解析における仮定は、供試体が恒温室にあったことから供試体表面を断熱境界とし、2℃の水を流すにあたって熱伝達を無視し、壁頂で2℃の温度を固定境界としてステップ状に与えるものとする。初期値としては実測値を用い、時間間隔を5分にして120分まで24回計算した。解析結果を実測値と比較すると、120分後で節点8を除いてその差が1℃以内にあることから、用いたコンクリートに対する材料定数(熱伝導率; 2.0 kcal/mh℃、密度2.3 g/cm³、比熱0.2 kcal/kg℃)および解析での仮定が、ともに、実際の状態に対して妥当なものであったことがわかる。

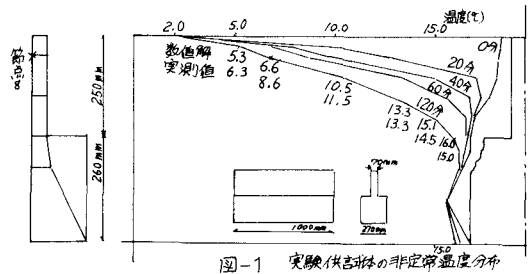


図-1 実験供試体の非定常温度分布

図-1に示すものであり、これは、神戸大学麓井研究室において行なわれた実験供試体である。実験はコンクリート供試体壁頂上に2℃の水を流し、供試体の温度分布、ひずみ分布を測定したものである。数値解析における仮定は、供試体が恒温室にあったことから供試体表面を断熱境界とし、2℃の水を流すにあたって熱伝達を無視し、壁頂で2℃の温度を固定境界としてステップ状に与えるものとする。初期値としては実測値を用い、時間間隔を5分にして120分まで24回計算した。解析結果を実測値と比較すると、120分後で節点8を除いてその差が1℃以内にあることから、用いたコンクリートに対する材料定数(熱伝導率; 2.0 kcal/mh℃、密度2.3 g/cm³、比熱0.2 kcal/kg℃)および解析での仮定が、ともに、実際の状態に対して妥当なものであったことがわかる。

3.2 定常温度分布および定常熱応力解析

解析モデルを図-2に示す。ここで用いる材料定数は、線膨張係数 $\alpha = 10 \times 10^{-6}$ と弾性係数 $E = 2.5 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ であり、コンクリートの初期温度は一様に20℃であるとする。境界条件としては、5℃の水が水深50cmで流れる場合を想定する。周囲岩盤の温度を20℃、また空気に触れる部分は熱伝達率が小さいことから断熱として、図-3に定常温度分布の解析結果を示す。なお図-3(b)は水の浸潤を考慮して水面下の岩盤温度を5℃として解析した温度分布である。次に図3-(a)の温度分布に対する熱応力分布の解析結果を図-4に示す。図4(a)は周囲の拘束条件を固定とした場合の結果であり、等応力線(最大主応力を用いた)として示してある。また、図4(b)は周囲の拘束を解いた場合の結果である。拘束した場合は、節点01(インバートから側壁に拘る部分)で最大の引張り応力 78.58 kg/cm^2 を示し、一方、無拘束の状態では、節点139(インバート中央)で最大引張り応力 27.55 kg/cm^2 を示す。またインバート表面では 25 kg/cm^2 以上の値となっている。図-3(b)の温度分布に対する熱応力解析の結果は、無拘束の状態では、ほぼ無応力の結果を示した。

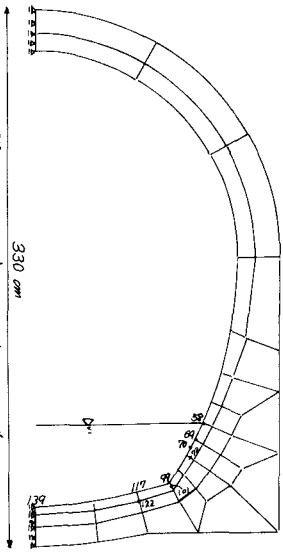


図-2 排水管の要素分割

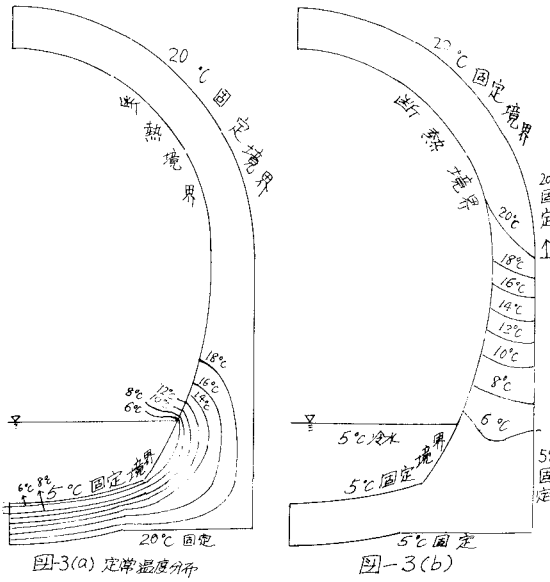


図-3(a) 定常温度分布

図-3(b)

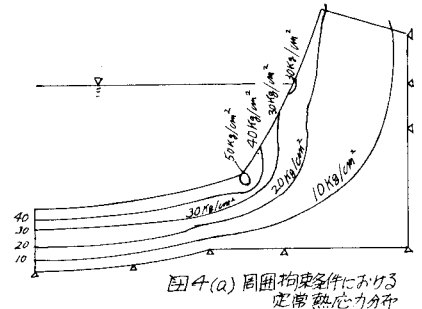


図4(a) 周囲拘束条件における定常熱応力分布

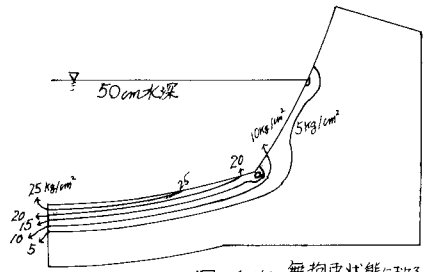


図-4(b) 無拘束状態における熱応力分布

3.3 非定常熱応力解析

材料定数は定常の場合と同じものを使用し、熱伝導率 2.0 kcal/mhc 密度 2.3 g/cm^3 比熱 $0.2 \text{ kcal/kg}^\circ\text{C}$ として無拘束状態で解析した。コンクリートの初期温度を一律に 20°C として、 5°C の水が水深 50 cm で急激に与えられてからの温度分布と熱応力を10分間隔で50分まで求めた。水ぎわの節点58、側壁における節点69、70、72、インバートと側壁の境 節点99、101、およびインバート部節点117、122、139 (図-2 参照) の最大主応力 (引張応力) を表-1 に示す。ここでも、水の熱伝達が空気の100倍程度であるため、空気に触れる面を断熱とし、水に接触する部分では温度を 5°C と直接与える境界とした。一般に流体によって急加熱 (冷却) を受ける物体においては、

表-1 応力の経時的变化 (kg/cm^2)

節点番号	10分後	20分後	30分後	40分後	50分後
58 (表面)	38.3	33.7	31.5	29.8	28.4
69 (表面)	42.0	35.3	32.2	29.9	28.1
70 (表面)	41.2	35.3	32.5	30.2	28.4
72	7.5	16.7	17.7	18.0	17.9
99 (表面)	40.0	34.8	33.8	32.5	31.5
101	32.6	38.2	36.7	36.7	35.8
117 (表面)	41.0	35.8	33.6	31.9	30.5
122	7.6	6.4	10.5	12.0	13.0
139 (表面)	42.6	38.6	37.0	35.6	34.5

ある一定時間後に、応力の極値を示し、後、徐々に減少するものである。しかし、表面の節点において計算の最初のステップで最大応力が現われているのは、コンクリート表面に直接水温を与えたためであらうと考えられる。

なお、節点101は、50分後においても、 36 kg/cm^2 程度の応力が作用していることから、この付近 (インバートと側壁の境) に大きな引張応力が、長期にわたり、残存していることを示している。

なお、最後に 実験データを提供していただいた 藤井 学博士に 深謝の意を表します。

参考文献

- 1) 鳥越 進; 神戸大学卒業研究, 昭和52年3月
- 2) G. Beer; Ph.D Thesis, University of Queensland, 1975