

論文 ボックスカルバートの温度応力に対するひび割れ誘発目地の効果に関する解析的研究

塩野 岳*1・杉山 佳*2・大沼 博志*3

要旨: コンクリート構造物のひび割れには様々な要因によるものがあるが、その一つにセメントの水和熱に起因する温度応力によるひび割れがある。この温度応力によるひび割れを防ぐことを目的に、所定の間隔で断面欠損部を設けることによって、欠損部にひび割れを集中させるひび割れ誘発目地を設置する場合がある。本研究ではボックスカルバートを解析対象として、ひび割れ誘発目地を設置しなかった場合と所定の位置に設置した場合について 3次元有限要素法プログラムを使用した温度応力解析を行い、ひび割れ誘発目地は水和熱による温度応力の抑制に効果があることを明らかにした。

キーワード: ボックスカルバート, 水和熱, 温度応力, ひび割れ誘発目地, 3次元有限要素法

1. はじめに

コンクリート構造物のひび割れは、支保工の沈下、コンクリートの急激な乾燥、アルカリ骨材反応、凍結融解作用、鉄筋の腐食など様々な要因によって生じる。ひび割れ発生の原因のひとつにセメントの水和熱による温度応力がある。温度応力は、セメントの水和反応に伴う温度上昇や温度降下による変形が内部拘束および外部拘束されることによって発生し、温度ひび割れの原因となる。ひび割れの発生は、コンクリート構造物の安全性や耐久性、美観などを損なう恐れがあり、とくに、施工段階での有害なひび割れを防止することは、設計耐用期間中の性能を確保する上で重要である。

温度ひび割れを抑制するために、ひび割れ誘発目地を設置することが考えられている。ひび割れ誘発目地は、温度ひび割れが発生する位置を予め定め、所定の間隔で断面欠損部を設けることによって、欠損部にひび割れを集中的に発生させることを目的としたものである。これによってひび割れ誘発目地以外のコンクリート部のひび割れ発生を防止することができる。

最近、ボックスカルバートにひび割れ誘発目地を設置する施工例は多くなっているが、ひび割れ誘発目地の効果を温度応力解析によって解明した例はほとんどないのが実情である。そのため、本研究では、当初計画においてひび割れ誘発目地を設置せず多くのひび割れが発生すると予測されたボックスカルバートについてその効果を確認するための温度応力解析を行ったものである。すなわち、ひび割れ誘発目地を設置しなかった場合と所定の位置に設置した場合について、3次元温度応力解析プログラム ASTEA-MACS を用いた有限要素法によ

る温度応力解析を行い、ひび割れ誘発目地の効果を検討した。

2. 解析対象としたコンクリート構造物

2.1 ボックスカルバートの概要

解析対象としてボックスカルバートを取り上げた。図-1に示すように、ボックスカルバートは3回に分けてコンクリートを打設した。第1リフトは地盤上の厚さ1400mmの床版、第2リフトは壁厚1200mmの側壁、第3リフトは厚さ1200mmの頂版である。また、4隅にハンチを設けた。実際の施工実績を参考に、第2リフトは第1リフト打設から31日後、第3リフトは第2リフト打設から7日後にコンクリートを打設した。

2.2 ひび割れ誘発目地

過去の施工や試験で得られたデータを参考に、ボックスカルバートの入口から奥行き方向4mの位置にひび割れ誘発目地を設置した¹⁾。コンクリートとの付着を切った厚さ25mmの樹脂と厚さ1.2mmの鋼板から構成されており、断面欠損率を40%とした。ひび割れ誘発目地の概略図を図-2に示す。

3. 解析方法

解析には、マスコンクリート用の3次元温度応力解析専用プログラム ASTEA-MACS を使用した。非定常熱伝導解析によって温度を、3次元 FEM 応力解析によって温度応力を求めた。また、応力解析の結果からひび割れ指数を求めて、セメントの水和熱によるひび割れ発生の有無を検討した。

3.1 3次元非定常熱伝導解析

*1 北海道大学 大学院工学研究科北方圏環境政策工学専攻 (正会員)

*2 北海道大学 工学部環境社会工学科

*3 北海道大学 大学院工学研究科北方圏環境政策工学専攻 教授 工博 (正会員)

3次元非定常熱伝導の支配方程式を式(1)に示す。

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q(t) = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

境界条件には熱伝達境界条件と固定温度境界条件を考慮した。それぞれの境界条件は式(2)および式(3)によって与えられる。

(a) 熱伝達境界条件

$$K_x \frac{\partial T}{\partial x} n_x + K_y \frac{\partial T}{\partial y} n_y + K_z \frac{\partial T}{\partial z} n_z + h(T - T_0) = 0 \quad (2)$$

(b) 固定温度境界条件

$$T = T_i \quad (3)$$

ここで、 K : 熱伝導率(W/m²°C), T : 温度(°C), $Q(t)$: 内部発熱率(kJ/m³h), ρ : 単位体積重量(kg/m³), c : 比熱(kJ/kg°C), t : 時間(hour), n_x, n_y, n_z : 表面に外向きに立てた法線の方向余弦, h : 熱伝達係数(W/m²°C), T_0 : 外気温度(°C), T_i : 節点の固定温度 (°C)である。

また、内部発熱率および断熱温度上昇曲線は式(4)および式(5)によって与えられる。

$$Q(t) = \frac{\partial T}{\partial t} \quad (4)$$

$$T = Q_\infty (1 - e^{-rt}) \quad (5)$$

ここで、 Q_∞ : 終局温度(°C), r : セメント種類などに依存する実験定数である。

3.2 3次元温度応力解析

各要素の温度変化にコンクリートの線膨脹係数を乗じて温度膨脹または温度収縮ひずみを求め、これを自由ひずみとすると、式(6)から温度応力を求めることができる。

$$\{F\} = [K]\{\delta\} + \{F\}_e \quad (6)$$

ただし、 $\{F\}$: 節点力, $[K]$: 剛性マトリックス, $\{\delta\}$: 節点変位, $\{F\}_e$: 膨脹および収縮ひずみによる節点力である。

3.3 解析モデル

構造物の対称性を考慮してボックスカルバートの1/4断面をモデル化した。この解析モデルを用いてひび割れ誘発目地を設置しない場合と、ひび割れ誘発目地を設置した部分に既にひび割れていると仮定した場合について解析を行った。解析に用いたひび割れ誘発目地を設置しなかった場合の要素分割を図-3に示す。

3.4 温度境界条件

空気と接している面は熱伝達境界条件とし、地盤内の境界は固定温度境界条件とした。すなわち、散水養生したコンクリート上面および型枠(合板)面の熱伝達係数は、

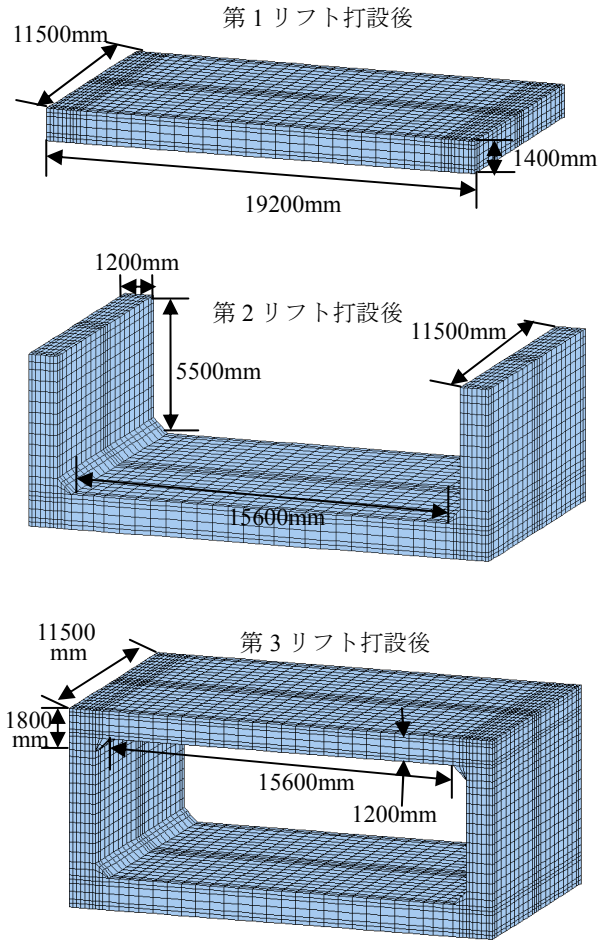


図-1 ボックスカルバートの打設工程

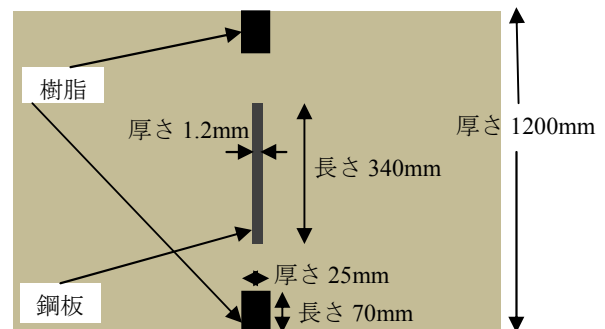


図-2 ひび割れ誘発目地(第2リフト)

それぞれ $h = 14\text{W/m}^2\text{°C}$ および $8\text{W/m}^2\text{°C}$ とし、地盤上面の熱伝達係数は $14\text{W/m}^2\text{°C}$ とした。また、地盤内の固定温度は 20°C とした。温度境界条件の詳細を図-4に示す。この図において、水色部が散水養生、橙色部が型枠、紫色部が地盤上面、緑点部が固定温度境界である。

3.5 拘束条件

温度応力解析に用いた拘束条件を図-5に示す。各対称面、地盤底面および地盤側面の垂直方向を拘束した。

3.6 ひび割れ指数

ひび割れ指数は、コンクリートの引張強度とセメントの水和熱によってコンクリートに発生する引張応力の比で定義されており、式(7)によって与えられる²⁾。したがって、ひび割れ指数が大きいほどひび割れは発生しにくく、逆に小さいほどひび割れが発生しやすい。

$$I_{cr}(t) = \frac{f_{tk}(t)}{\sigma_t(t)} \quad (7)$$

ここで、 $I_{cr}(t)$ ：ひび割れ指数、 $f_{tk}(t)$ ：材齢 t 日におけるコンクリートの引張強度(N/mm²)、 $\sigma_t(t)$ ：材齢 t 日におけるコンクリートの発生引張応力(N/mm²)である。

また、ひび割れ指数を用いてひび割れ発生確率を算定できる³⁾。

4. 解析に用いたコンクリートと地盤の材料特性

解析に用いたコンクリートおよび地盤の熱特性や力学的特性は、コンクリート標準示方書や既往の研究を参考にして、代表的な値を選択した^{3), 4), 5)}。

4.1 コンクリートの材料特性値

使用セメントは高炉セメントB種、単位セメント量は300kg/m³、打設時のコンクリート温度は20℃である。これらから断熱温度上昇曲線の終局温度は $Q_{\infty} = 45.0$ ℃、実験定数は $r = 0.957$ とした。材齢91日におけるコンクリートの設計基準強度は30N/mm²である。コンクリートの圧縮強度、引張強度およびヤング係数はコンクリートの材齢を考慮して式(8)、式(9)および式(10)で与えられる³⁾。また、解析で用いたその他の特性値を表-1に示す。

$$f'_c(t) = \frac{t}{6.2 + 0.93t} f'_{ck} \quad (8)$$

$$f_{tk}(t) = 0.44 \sqrt{f'_c(t)} \quad (9)$$

$$E_e(t) = \phi(t) \times 4.7 \times 10^3 \sqrt{f'_c(t)} \quad (10)$$

ただし、 t ：材齢(日)、 $f'_c(t)$ ：材齢 t 日におけるコンクリートの圧縮強度(N/mm²)、 $f_{tk}(t)$ ：材齢 t 日におけるコンクリートの引張強度(N/mm²)、 f'_{ck} ：コンクリート

の設計基準強度(N/mm²)、 $E_e(t)$ ：材齢 t 日における有効ヤング係数(N/mm²)、 $\phi(t)$ ：温度上昇時においてクリープの影響が大きいことを考慮したヤング係数の補正係数であり、次式によって与えられる。

$$\begin{cases} t \leq 3 : \phi(t) = 0.73 \\ t \geq 5 : \phi(t) = 1.0 \\ 3 \leq t \leq 5 : \text{直線補間} \end{cases}$$

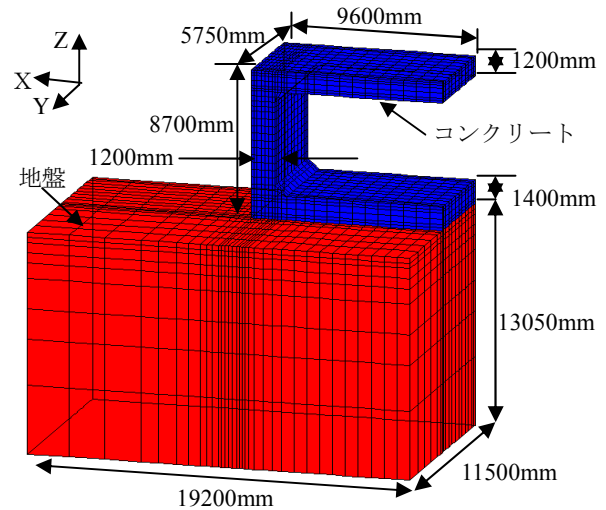


図-3 ボックスカルバートの解析モデル (1/4 断面)

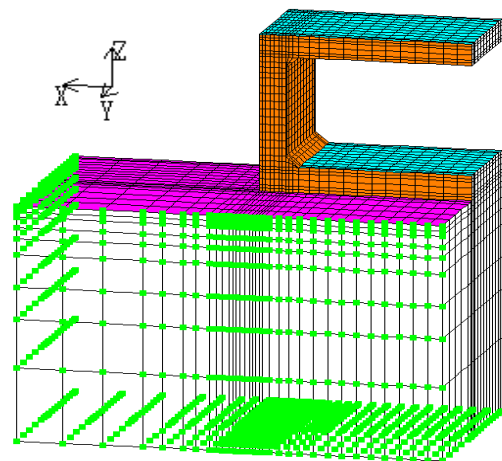


図-4 温度解析の境界条件

表-1 コンクリートの材料特性値

熱伝導率 (W/m ² ℃)	密度 (kg/m ³)	比熱 (kJ/kg℃)	初期温度 (℃)	ポアソン比	線膨脹係数 (μ/℃)	設計基準強度 (材齢91日) (N/mm ²)
2.7	2400	1.26	20	0.2	10	30

表-2 地盤の材料特性値

熱伝導率 (W/m ² ℃)	密度 (kg/m ³)	比熱 (kJ/kg℃)	初期温度 (℃)	ヤング率 (N/mm ²)	圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	ポアソン比	線膨脹係数 (μ/℃)
3.45	2650	0.8	20	6000	22.6	1.96	0.15	8

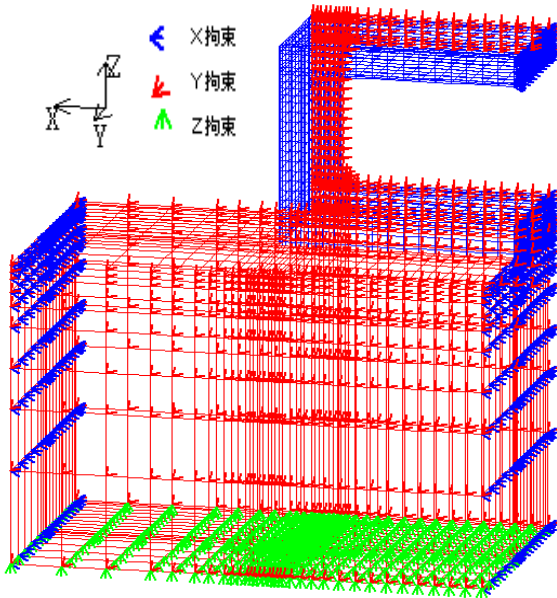


図-5 温度応力解析の拘束条件

4.2 地盤の材料特性値

地盤はN値がおおよそ 50 の軟岩であるので、解析には表-2 に示すような地盤の材料特性値を用いた。

5. 解析結果および考察

座標軸は、X 軸が水平方向、Y 軸が奥行き方向、Z 軸が高さ方向である。また、解析は第 1 リフト打設から 91 日後まで行った。

5.1 温度履歴

ひび割れ誘発目地を設置していない場合の、第 1 リフトと第 3 リフトの対称面(YZ 平面)におけるボックスカルバート入口部(高さ中央)と対称面(XZ 平面・高さ中央)、第 2 リフトのボックスカルバート入口部(最下面)と対称面(XZ 平面・最下面)の厚さ中央部における温度履歴を図-6 に示す。

コンクリート打設後、セメントの水和熱によって温度が上昇し、最高温度に到達後徐々に温度が降下して外気温に近づいていった。第 1、第 2、第 3 リフトいずれも打設後 2 日程度で最高温度に達した。最高温度は第 1 リフトの対称面(XZ 平面)で 54℃、入口部で 37℃、第 2 リフトの対称面(XZ 平面)で 46.7℃、入口部で 34.4℃、第 3 リフトの対称面(XZ 平面)で 52.2℃、入口部で 36.6℃となった。

最高温度に達した後の温度降下勾配は、温度応力(引張応力)の発生原因となるため、ひび割れの発生に大きな影響を及ぼす。この勾配は第 3 リフトが一番大きく、第 1 リフトが一番緩やかであった。また、温度低下時の対称面(XZ 平面)と入口部との温度差は、第 1 リフトで最大 18.9℃となっており、これが内部拘束となって第 1 リフ

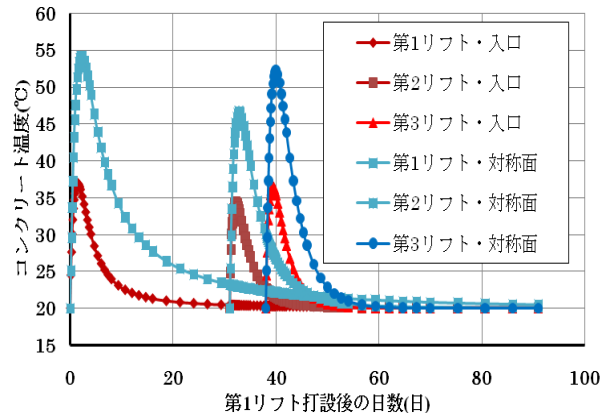


図-6 温度履歴(奥行き方向の比較)

ト内部に大きな引張応力を発生させる一因であると考えられる。

5.2 温度応力履歴

ひび割れ誘発目地を設置しなかった場合と設置した場合における、第 1 リフト、第 2 リフトおよび第 3 リフトの奥行き方向(Y 軸方向)の応力履歴を図-7 に示す。これらは、第 1 リフトと第 3 リフトの対称面(YZ 平面)におけるボックスカルバート入口部(高さ中央)と対称面(XZ 平面・高さ中央)、第 2 リフトのボックスカルバート入口部分(最下面)と対称面(XZ 平面・最下面)の厚さ中央部における解析結果である。

第 1 リフトでは、入口部で打設から 4 日、対称面(XZ 平面)で 6 日まで温度上昇に伴って圧縮応力が生じ、その後温度降下に伴い引張応力に転じた。対称面(XZ 平面)における Y 軸方向の応力の解析結果から、ひび割れ誘発目地を設置しなかったときの引張応力は 1.8N/mm^2 に達したが、設置したときは 1.04N/mm^2 であった。これは、ひび割れ誘発目地を設置したことによって発生する引張応力が低減されたためである。

外部拘束が大きい第 2 リフトでは、Y 軸方向の応力は温度上昇とともに比較的小さな圧縮応力が発生し、その後は温度降下に伴って引張応力に移行した。第 2 リフトにおいても、ひび割れ誘発目地を設置しなかった場合と比較して、設置した場合の対称面(XZ 平面)の発生引張応力は著しく低減しており、ひび割れ誘発目地の有効性が明らかになった。

第 3 リフトでは、外部拘束が小さく、ほぼ内部拘束のみであるため、発生した引張応力は小さなものであった。また、外部拘束が小さいため、ひび割れ誘発目地を設置することによる引張応力の低減は少なかった。

また、発生した応力が最も大きかった第 1 リフト打設後 91 日の奥行き方向(Y 軸方向)の応力分布を図-8 に示す。図-8 から、大きな引張応力は第 1 リフト、第 2 リフトの下部および第 3 リフトのハンチ部に生じた。また、

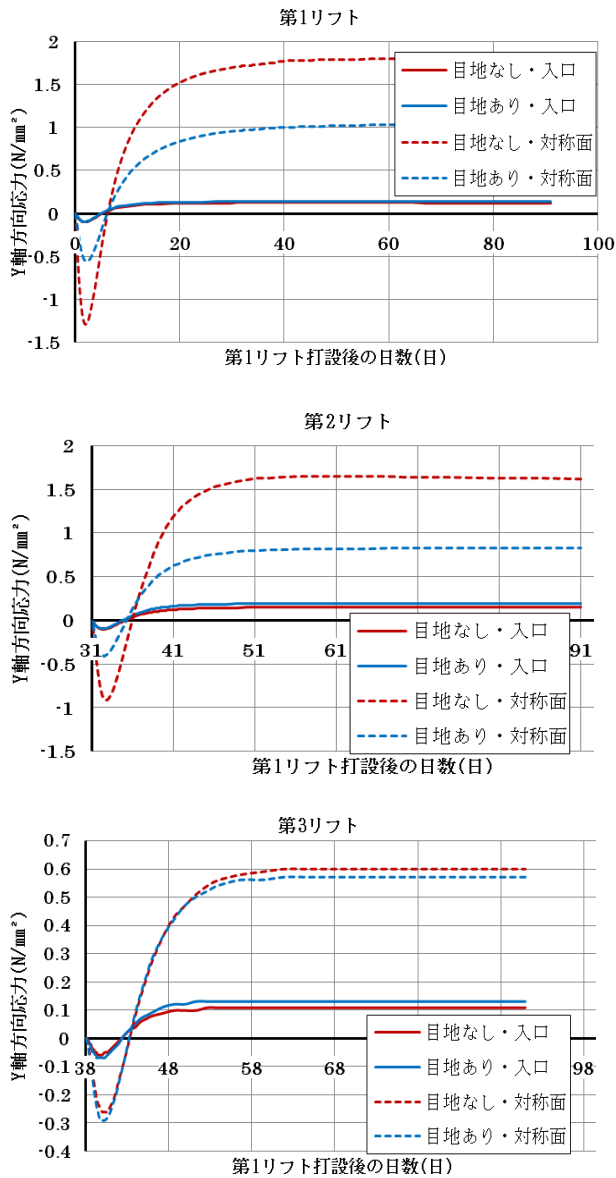


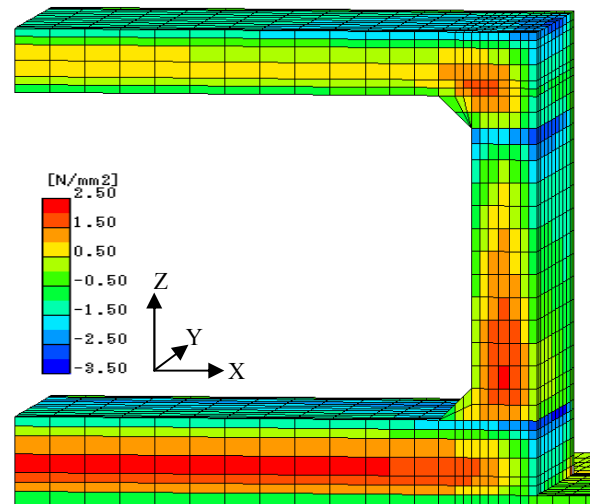
図-7 Y 軸方向の応力履歴

ひび割れ誘発目地を設置した場合には、設置しなかった場合よりも全体的に発生引張応力は小さくなるのが分かった。とくに、第2リフト下部の引張応力が大きく減少した。このことから、ひび割れ誘発目地が発生する引張応力の低減に効果があることが分かった。

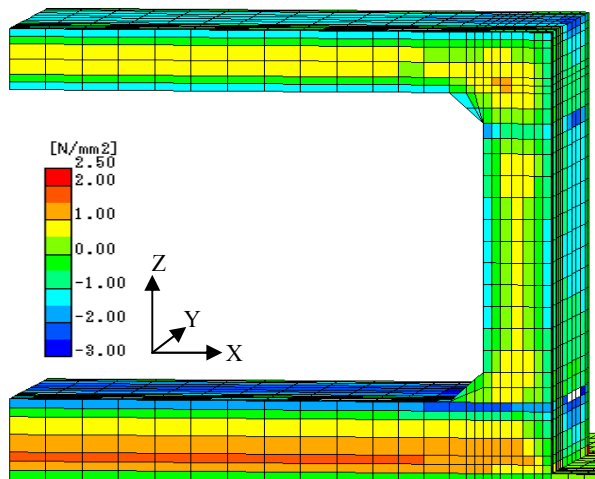
5.3 ひび割れ指数

ひび割れ誘発目地を設置しなかった場合と設置した場合における、第1リフト、第2リフトおよび第3リフトのひび割れ指数の履歴を図-9に示す。

ひび割れ誘発目地を設置しなかったときには、第1リフト対称面(XZ平面)のひび割れ指数の最小値は1.3(ひび割れ発生確率45%)となった。第2リフトでは、対称面(XZ平面)で第3リフト打設後にY軸方向引張応力が増加するために、日数50日で最小値の1.33(ひび割れ発生確率40%)となった。また、第3リフトでは発生した応力が小



ひび割れ誘発目地を設置しなかった場合



ひび割れ誘発目地を設置した場合

図-8 Y 軸方向の応力分布

さいので、ひび割れ指数が大きくなった。最小値は対称面(XZ平面)の3.69(ひび割れ発生確率0%)であった。

ひび割れ誘発目地を設置したときには、第1リフト対称面(XZ平面)でひび割れ指数は最小値2.3(ひび割れ発生確率0%)となった。この位置は地盤による拘束が大きいが、ひび割れ誘発目地を設けたことにより、ひび割れが発生する可能性が極めて低いという結果になった。第2リフトではひび割れ誘発目地を設置しなかったときに最小値をとった日数50日に対称面(XZ平面)のひび割れ指数が2.7(ひび割れ発生確率0%)となっており、ひび割れ誘発目地の効果が表れている。発生した応力が小さい第3リフトでは、ひび割れ指数が高く、ひび割れが発生する確率は低いと考えられる。

このように、ひび割れ誘発目地を設置すると、引張応力は低くなった。特に、第2リフト対称面(XZ平面)ではひび割れ指数がおよそ2倍となっており、ひび割れ指数が顕著に増加していることから、ひび割れ誘発目地は温

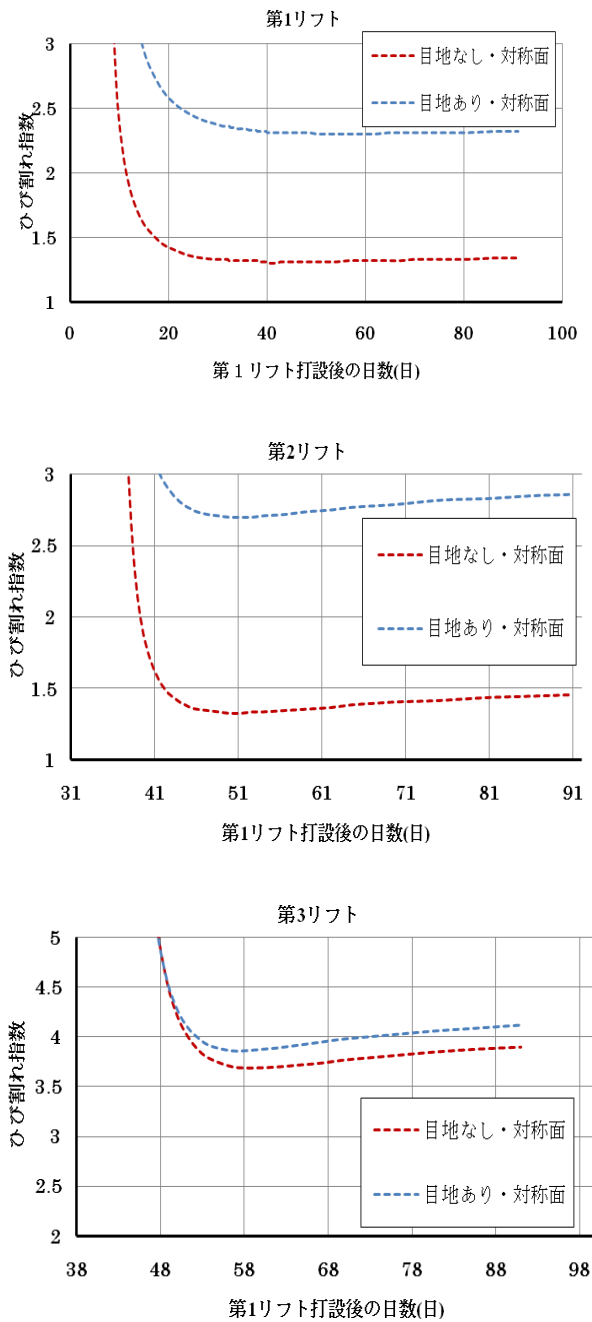


図-9 ひび割れ指数の履歴

度ひび割れの対策として効果があると言える。

また、全てのリフトにおいて入口部のひび割れ指数は

10 を超えており(ひび割れ発生確率 0%), ひび割れが発生しないことが分かった。

6. まとめ

ボックスカルバートを対象として、セメントの水和熱による温度ひび割れに対するひび割れ誘発目地の効果を検討した。結果をまとめると以下の通りである。

- 1) ひび割れ誘発目地を設置した場合と設置しなかった場合の解析結果の比較から、セメントの水和熱によってコンクリートに発生する温度応力は、ひび割れ誘発目地を設置することによって大幅に低減できることが明らかになった。
- 2) ひび割れ誘発目地を設置した場合のひび割れ指数は 2.3 以上であるので、対象としたボックスカルバートのひび割れ発生確率は相当に低く、ひび割れ誘発目地を設置することでこのひび割れを防ぐことが可能であることが示唆された。

本研究では、外気温や熱伝導率を一定にしていること、ひび割れ誘発目地の解析モデルを簡略化していること、など実構造物とは異なる所がある。今後、これらを改良することでより精度の高い解析としたい。

参考文献

- 1) 日本仮設株式会社：KB 目地 カタログ
- 2) Se-Jin Jeon: Advanced Assessment of Cracking due to Heat of Hydration and Internal Restraint, ACI MATERIAL JOURNAL, pp.325-333, July.-August.2008
- 3) 土木学会：2007 年制定コンクリート標準示方書[設計編]
- 4) 土木学会：2007 年制定コンクリート標準示方書[施工編]
- 5) 大沼博志, 浅井大樹：コンクリート橋脚におけるひび割れ誘発目地の有効性に関する解析的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp1289-1294, 2006