

論文 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

大沼 博志*¹・浅井 大樹*²

要旨：コンクリート構造物に発生するひび割れの原因には種々のものがあるが、マスコンクリート構造物の場合にはセメントの水和熱に起因する温度収縮・温度応力が主要な原因となる。一方、定められた位置にひび割れを集中させるために、予め所定の間隔で断面欠損部を設けておき、そこにひび割れを生じさせるひび割れ誘発目地を設置することがある。本論文は、マスコンクリートである吊橋橋脚を解析対象として、ひび割れ誘発目地を用いない場合と所定の場所に設置した場合について3次元有限要素法プログラムによる非定常伝熱解析および温度応力解析を行い、ひび割れ誘発目地の有効性を解析的に検討したものである。

キーワード：ひび割れ誘発目地，温度応力，水和熱，コンクリート橋脚

1. はじめに

コンクリート構造物に発生するひび割れの原因には種々のものがあるが、その一つにセメントの水和熱に起因するコンクリートの温度収縮がある。すなわち、水和熱によってコンクリートが温度上昇した後に冷やされるとき、コンクリート構造物に外部拘束ある場合あるいは表面と内部に温度差が生じて内部拘束されている場合にはこの温度収縮によってひび割れが発生することがある。

温度ひび割れを制御する手段としてひび割れ誘発目地の設置が考えられている。ひび割れ誘発目地は、あらかじめ定められた場所にひび割れを集中させる目的で断面欠損部を設けるものであり、目地部以外のコンクリート部分のひび割れを防止するとともに、ひび割れ箇所の事後処理を容易にする効果がある。

コンクリート構造物の一例としてひび割れ誘発目地が使用された吊橋の橋脚を解析対象として取り上げた。本論文は、ひび割れ誘発目地を用いない場合と所定の場所に設置した場合につ

いて、3次元有限要素法汎用プログラム ANSYS を使用した非定常伝熱解析および温度応力解析を行い、ひび割れ誘発目地の有効性を検討したものである。

2. 解析対象としたコンクリート構造物

2.1 コンクリート橋脚の概要

解析対象としてM吊橋のP-4橋脚を取り上げた。この橋脚は、寸法 27m×13.5m×3.5mのフーチング(第1リフト)の上に、第2リフト、第3リフトおよび第4リフトが打設され、また第2, 3, 4リフトにはひび割れ誘発目地を設けた。橋脚の外観図を図-1に、各リフト高さコンクリート打設時期、打設時のコンクリート温度を表-1に示す。

使用したコンクリートは、材齢 91 日の設計基準強度が 30N/mm²、スランプ値が 8cm、粗骨材の最大寸法が 20mm である。また、使用セメントは高炉セメント B 種で、単位セメント量は 296kg/m³である。

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

* 2 北海道電力(株) 土木部 工修

2.2 ひび割れ誘発目地

ひび割れ誘発目地は 4m 間隔に設置され、亜鉛メッキ鋼板と溝状欠損部でコンクリートとの付着を切ったものである。ひび割れ誘発目地部の詳細図を図-2 に示す。コンクリートとの付着を切った長さを壁厚で除した断面欠損率はこのひび割れ誘発目地の場合には 50% であり、一般的に断面欠損率は 20% 以上とするのがよいというコンクリート標準示方書に記載された条件を満たしている¹⁾。

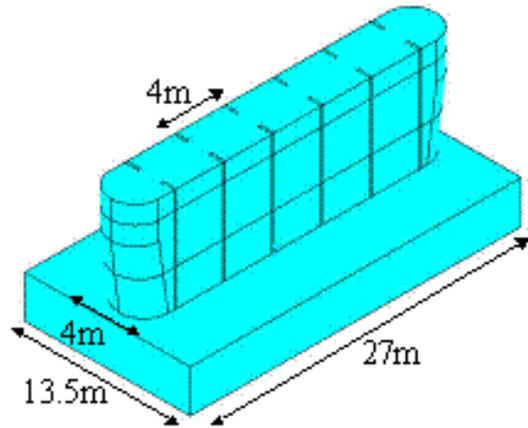


図-1 P-4 橋脚の形状寸法

3. 解析方法

解析には、3次元有限要素法汎用プログラム ANSYS を使用した⁵⁾。解析では、まず非定常熱伝導解析によって温度分布とその履歴を求め、次に3次元応力解析を行って温度応力を求めた。また、ひび割れの発生条件は、解析で求めた温度応力がコンクリートの引張強度と等しくなったときとした。

3.1 3次元非定常熱伝導解析

3次元の非定常熱伝導の支配方程式は、次式によって与えられる。

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

解析に用いた境界条件は次の2種類である。断熱境界条件は対称軸面に、また熱伝達境界条件は外気および土に接する面に用いた。

(a)断熱境界条件：

$$K \frac{\partial T}{\partial x} n_x + K \frac{\partial T}{\partial y} n_y + K \frac{\partial T}{\partial z} n_z = 0 \quad (2)$$

(b)熱伝達境界条件：

$$K \frac{\partial T}{\partial x} n_x + K \frac{\partial T}{\partial y} n_y + K \frac{\partial T}{\partial z} n_z + h(T - T_0) = 0 \quad (3)$$

ここで、 T ：温度(°C)、 K ：熱伝導率(W/m·°C)、 $Q(t)$ ：内部発熱率(kJ/m³·h)、 ρ ：単位体積質量(kg/m³)、 c ：比熱(kJ/kg·°C)、 t ：時間(日)、 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 ：周囲の外気温度(°C)である。

表-1 各リフトの打設時期と打設温度

	リフト 高さ	打設時期 月/日	打設温度 (°C)
フーチング (第1リフト)	3.5m	9/10	22
第2リフト	3.0m	9/26	20
第3リフト	4.0m	11/28	15
第4リフト	1.5m	12/21	15

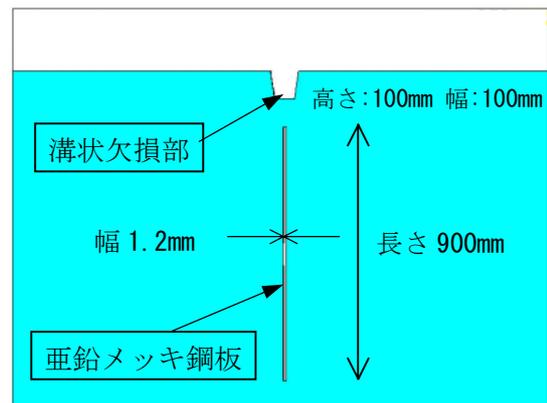


図-2 ひび割れ誘発目地の詳細

3.2 内部発熱率

内部発熱率は次式によって表される断熱温度上昇曲線を時間で微分して与える。

$$T = Q_{\infty} (1 - e^{-rt}) \quad (4)$$

ここで、 Q_{∞} ：終局温度、 r ：実験定数である。

3.3 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張係数を乗じて温度膨張あるいは温度収縮ひずみを算定し、これを自由ひずみとすると、式(5)の節点力から温度応力を求めることができる。

$$\{F\} = [K]\{\delta\} + \{F\}_e \quad (5)$$

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

3.4 解析モデル

解析モデルは対称性を考慮して1/4断面モデルとし、ひび割れ誘発目地が無いもの(誘発目地無しモデル)と、ひび割れ誘発目地にひび割れが生じたもの(誘発目地ありモデル)を作成した。第4リフトのコンクリート打設後の解析に用いた最終的な解析モデルを図-3に示す。リフトを打設するごとに要素を追加して解析モデルを作成し、それぞれの熱的境界条件、力学的境界条件を定義した。外気および土に接するフーチング部は熱伝達境界条件とし、既往の研究から熱伝達率はそれぞれ8.00および1.45W/m²℃とした⁴⁾。また、対称軸断面は断熱境界条件とした。

外気および土の温度は、表-2に示す札幌市の月別平均気温を使用した。

4. 解析に用いたコンクリートの材料特性

解析に必要な熱的と力学的な材料特性値、および断熱温度上昇曲線は現地の橋脚で使用したコンクリートの配合を基に、コンクリート標準示方書に記載された値と既往の研究で使用した値から、代表的なコンクリートの物性値を選出した^{2)、4)}。

非定常熱伝導解析に用いた熱特性値は、熱伝導率を $K = 2.7\text{W/m}^\circ\text{C}$ 、比熱を $c = 1.26\text{kJ/kg}^\circ\text{C}$ 、単位体積質量を $\rho = 2400\text{kg/m}^3$ とした。高炉セメントB種を使用していることから、断熱温度上昇曲線は終局温度を $Q_\infty = 44.6^\circ\text{C}$ 、実験定数を $r = 0.947$ とした。

構造解析に使用した特性値は、熱膨張係数10

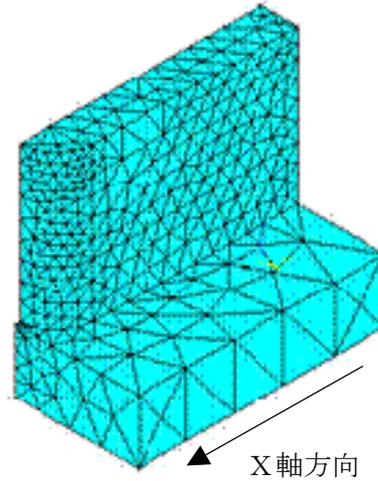


図-3 P-4橋脚の解析図-3 P-4橋脚の1/4断面解析モデル

表-2 札幌市における月平均温度

月	9	10	11	12	1	2	3
気温 ℃	17.6	11.3	4.6	-1.0	-4.1	-3.5	0.1

×10⁻⁶/°C、設計基準強度30N/mm²、ポアソン比0.2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の影響を考慮して次式のように与えた。

$$f'_c(t) = \left(\frac{t}{6.2 + 0.93t} \right) \times 30 \quad (6)$$

$$f'_{tk}(t) = 0.44 \sqrt{f'_c(t)} \quad (7)$$

$$E_e(t) = \phi(t) \times 4.7 \times 10^3 \sqrt{f'_c(t)} \quad (8)$$

ただし、
$$\begin{cases} t \leq 3: \phi(t) = 0.73 \\ t \geq 5: \phi(t) = 1.0 \end{cases}$$

ここで、 $f'_c(t)$ ：コンクリート材齢 t 日における圧縮強度(N/mm²)、 $f'_{tk}(t)$ ：引張強度(N/mm²)、 $E_e(t)$ ：ヤング係数(N/mm²)、 $\phi(t)$ ：温度上昇時にコンクリートの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る。

5. 解析結果および考察

5.1 温度履歴

解析から得られた対称軸断面における各リフトの表面（側面中央高さ）と内部（中央高さ，中央厚さ）の温度履歴を図-4示す。コンクリート打設後，セメントの水和反応による発熱でコンクリートの温度は著しく上昇することが分かる。内部の最高温度は，第1，第2，第3および第4リフトでそれぞれ約55℃，52℃，49℃および38℃に達した。また，打設時のコンクリート温度の差である温度上昇はそれぞれ約35℃，32℃，24℃および13℃であり，これらの温度上昇は特にリフト高さや打設時の外気温に依存することが示された。

最高温度に達してからの温度降下は温度応力が引張応力となるため，ひび割れの発生に大きな影響を及ぼす。第1リフトから第4リフトに進むにつれ温度降下速度が速くなっており，外気温の影響によるものである。この温度降下時における表面と内部との温度差は，リフト高さが最大(4m)である第3リフトで最大で約35℃に達しており，内部拘束によって大きな引張応力が表面に発生するものと考えられる。また，冬に向かって，橋脚の温度は打設時のコンクリート温度よりも低くなっており，水和熱とともに外気温低下による温度応力が付加されることが予想される。

5.2 応力履歴

誘発目地無しと誘発目地ありモデルで得られた第2，3，4リフトのX軸方向（橋脚長手方向）の応力履歴を図-5に示す。これらは，縦方向のひび割れが発生すると予想される橋脚長手方向の中央位置側面における表面最上部と表面最下部の解析結果である。したがって，誘発目地ありモデルでは誘発目地の中間位置に相当する。打設直後の温度上昇時には圧縮応力が生じたが，その値は約0.3MPaと小さかった。これは，コンクリートが若材齢のために拘束が小さいことと，クリープを考慮して若材齢のヤング係数を小さく設定したためと考えられる。

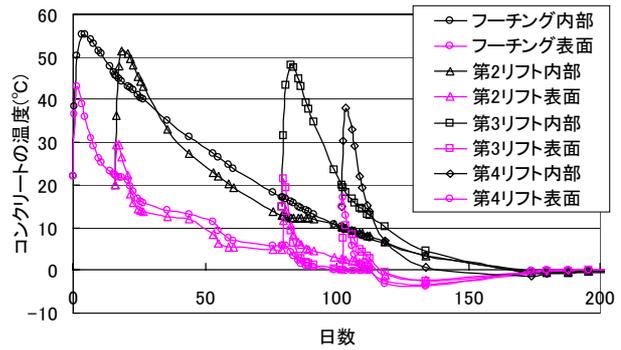


図-4 温度履歴の解析結果

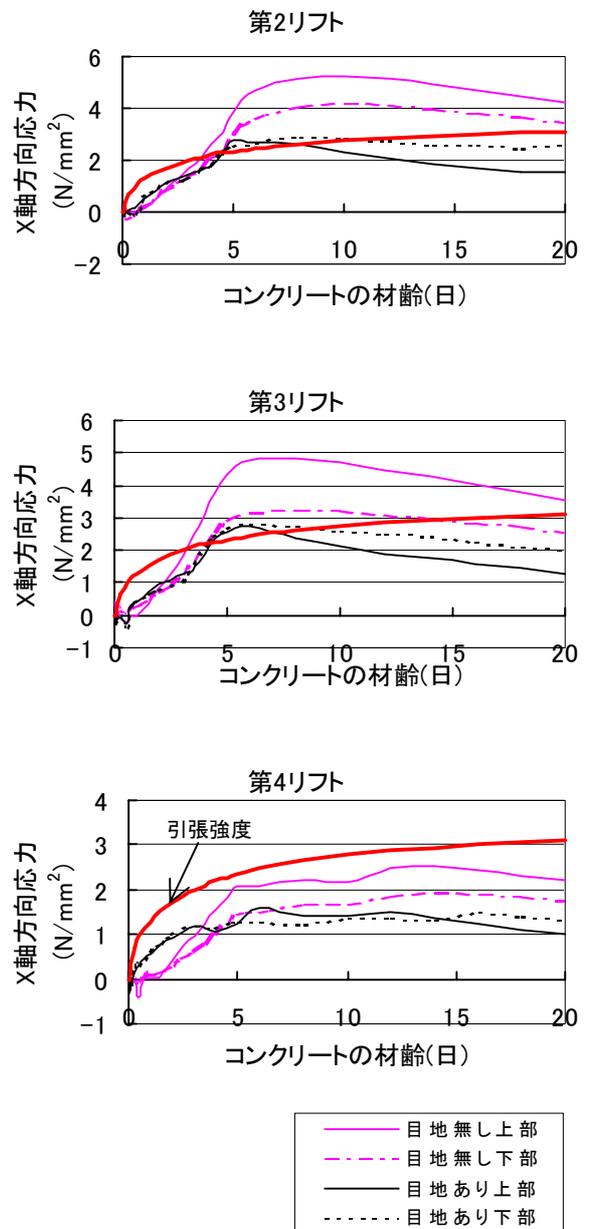
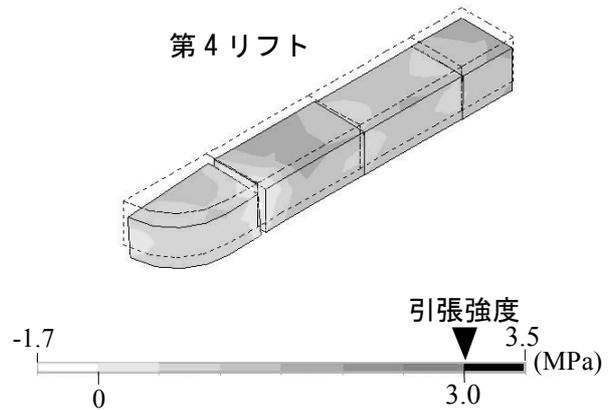
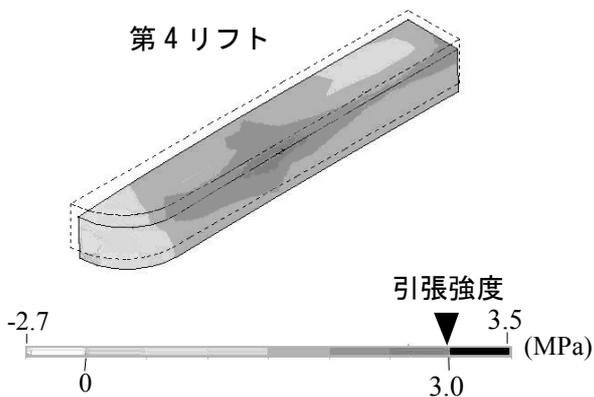
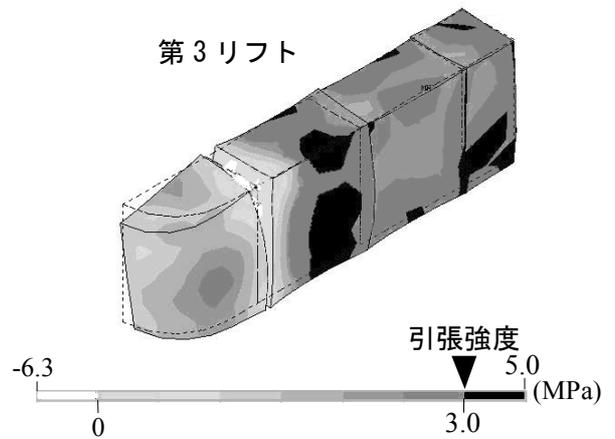
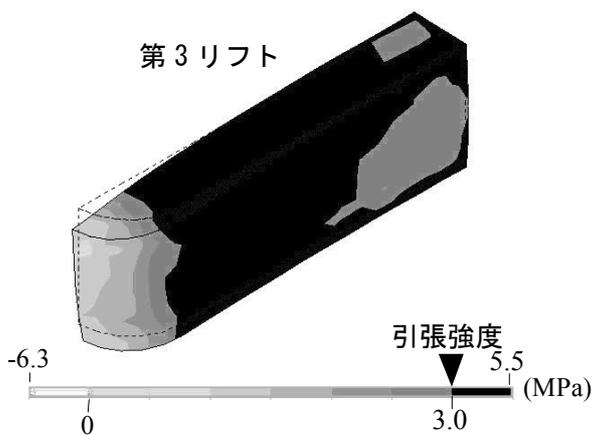
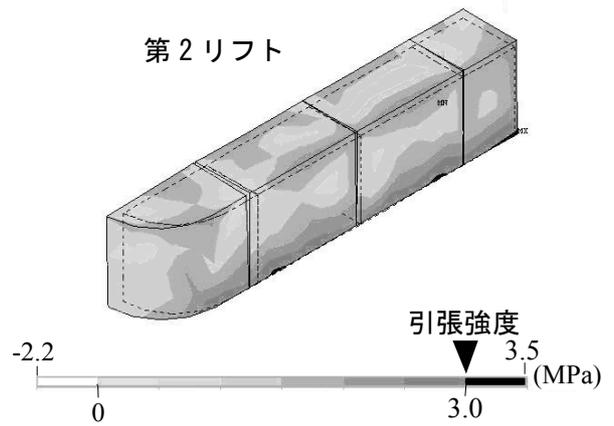
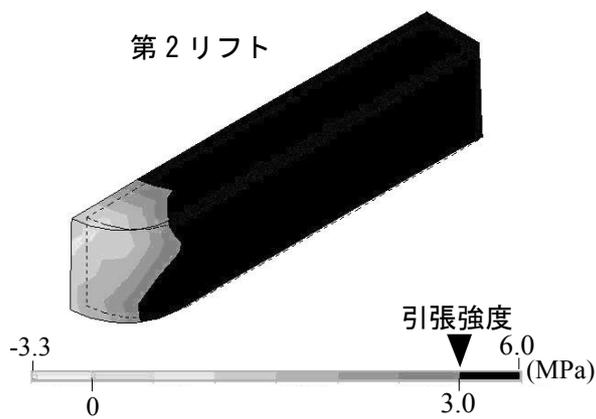


図-5 温度応力履歴の解析結果



図—6 温度応力分布の解析結果
(ひび割れ誘発目地なし)

図—7 温度応力分布の解析結果
(ひび割れ誘発目地あり)

図—5の温度降下時における誘発目地無しモデルの解析結果から、コンクリートの引張強度を上回る引張応力が第2と第3リフトに生じることが示された。また、全てのリフトにおいて側面最上部の引張応力は側面最下部の引張応力を上回っていた。これは、打設時期が秋から冬

にかけて気温が低かったために表面と内部に大きな温度差が生じたことから、内部拘束の影響が既打設コンクリートによる外部拘束よりも大きかったものと考えられる。

一方、誘発目地ありモデルの解析結果は全体的に誘発目地無しモデルよりも小さな引張応力

となっており、誘発目地が有効に働いたことが明らかにされた。第4リフトにおいては引張強度を上回る応力は生じなかったが、第2と第3リフトにおいてコンクリートの引張強度を多少上回る引張応力が得られており、リフト高さ、誘発目地の間隔などをさらに検討すべきであることが示唆された。

5.3 応力分布

全体的な温度応力分布を見るために、第2, 3, 4リフトの誘発目地無しモデルと誘発目地ありモデルの各リフト打ち込み10日後におけるX軸方向の表面応力分布を図-6と図-7に示す。

誘発目地無しモデルでは、第2と第3リフトにおいて表面の広範囲に、第4リフトにおいては上端部表面の一部に引張強度を上回る引張応力が生じることが示された。

一方、誘発目地ありモデルでは、第2リフトの下部表面の一部に引張強度を少し上回る応力が生じた。これは、既設のフーチング(第1リフト)による拘束が大きいことによるものと考えられる。第3リフトにおいて表面の狭い範囲に引張強度を上回る応力が生じている。これは、リフト高さが高かったために内部と表面で大きな温度差を生じ、誘発目地で緩和しきれずに引張応力が発生したためと考えられる。リフト高さが低い第4リフトにおいては引張強度を上回る応力は生じていない。

誘発目地無しモデルと誘発目地ありモデルの解析結果の比較から、全てのリフトにおいて誘発目地ありモデルは誘発目地無しモデルよりも低い引張応力であることが明らかにされた。誘発目地の設置によってコンクリートの引張応力は顕著に減少することから、ひび割れ誘発目地は水和熱に起因する温度ひび割れの抑制に有効であることが示された。

6. 結論

3次元有限要素法汎用プログラムを使用した非定常伝熱解析および温度応力解析の解析結果から、ひび割れ誘発目地の有効性に関して以下

の結論が得られた。

1) 誘発目地無しモデルと誘発目地ありモデルの解析結果の比較から、ひび割れ誘発目地を設置することによってコンクリートの温度応力は全体的に著しく減少することが示された。さらに、誘発目地がある場合、引張強度を越える応力が生じる箇所は極狭い範囲であり、またその応力値が小さいことから、ひび割れ誘発目地は温度ひび割れの抑制に有効であることが明らかにされた。

2) 水和熱による温度応力はコンクリート打設のリフト高さ、誘発目地の間隔、外気温などによって変化するため、ひび割れ誘発目地の設計に当たっては、これらを考慮する必要のあることが示唆された。

本研究では、構造モデルは実構造物を厳密にモデル化しているが、コンクリートの熱特性値は温度依存性を考慮していないこと、外気温を月平均気温としていること、など改良が必要と思われる事項があり、今後の課題としたい。しかしながら、研究の目的であるひび割れ誘発目地の有効性(ひび割れの低減および発生位置の制御)は解析結果からおおよそ明らかにされたと考える。

参考文献

- 1) 土木学会：2002年制定コンクリート標準示方書[施工編]
- 2) 土木学会：2002年制定コンクリート標準示方書[構造性能照査編]
- 3) 小澤正志，大沼博志，名和豊春：鉄筋コンクリート製LNG貯蔵地下タンクの温度応力のクリープ解析，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.21，No.3，pp.43-48，1999.6
- 4) 川田雅紀，大沼博志，名和豊春，出雲健司：覆工コンクリートの温度および乾燥収縮応力のクリープ解析，コンクリート工学年次論文集，Vol.24，No.2，pp.91-96，2002.6
- 5) CAD/CAE研究会-編：ANSYS工学解析入門