

LNG 地下貯蔵槽に関する基礎的研究 (第 5 報)

—低温領域における RC 円筒の温度応力—

上野 孝之 大内 一
武田 寿一

Study on Underground Storage Tank for Liquefied Natural Gas (Part 5)

—Thermal Stress of Reinforced Concrete Cylinder at Cryogenic Temperature—

Takayuki Ueno Hazime Ohuchi
Toshikazu Takeda

Abstract

The value of thermal stress in an underground storage tank for liquefied natural gas caused by the low temperature of LNG cannot be precisely determined by conventional reinforced concrete theory because there are cracks in the concrete reducing the bending moment; hence the thermal stress should be reduced.

This report describes a cooling test on a cylindrical model of an underground storage tank and its inelastic behavior. Cracks initially develop at differential temperature between the inner and outer surfaces of 25°C to 30°C. At differential temperature between inner and outer surfaces of 80°C stresses of reinforcing bars are about 1,000 kg/cm² and bending moment is reduced to 20% to 40% compared with the elastic bending moment.

概 要

LNG 地下貯蔵槽は LNG の冷熱により冷却され、温度変化に伴い躯体に温度応力が発生する。この温度応力は通常の鉄筋コンクリート理論によると著しく過大となる。しかし、ひびわれによって曲げモーメントが低下し、温度応力は減少することが予測される。

本報文は鉄筋コンクリート製地下貯蔵槽の低温領域でのひびわれ挙動を明らかにするために、LNG 地下貯蔵槽をモデルとした鉄筋コンクリート円筒の内面冷却実験を行ないその非線形挙動を検討したものである。

鉄筋コンクリート円筒はひびわれ挙動を示し、ひびわれが発生する内外表面温度差は 20~30°C と予測された。実験および非弾性解析から鉄筋応力度は内外表面温度差 80°C で 1000~1400 kg/cm² の範囲にあることが予測された。これに対応した非弾性解析の曲げモーメントは弾性曲げモーメントに対して鉄筋比 0.5% のとき 0.2、鉄筋比 1.5% のとき 0.4 となる。

1. まえがき

鉄筋コンクリート製 LNG 地下貯蔵槽は冷熱により壁体が冷却され、円筒壁体の半径方向に温度勾配が生ずる。半径方向各点で温度変化に対応した自由収縮は自己拘束によって許容されず、その結果曲げ応力が生ずる。しかしコンクリートにひびわれが生じると自己拘束力は低下して曲げモーメントは減少するが、鉄筋の引張応力度は増大することが予想される。また一般的にコンクリートは低温になると静弾性係数が大きくなり、線膨張係数が変化する。したがって低温領域における温度荷重に対して鉄筋コンクリート製地下貯蔵槽は線形挙動を示さないことが予想される。

そこで、鉄筋コンクリート製地下貯蔵槽の低温領域でのひびわれ挙動を明らかにするために鉄筋コンクリート円筒の内面冷却実験を行ない、その非線形挙動について検討した。

2. 実験方法

2.1. 使用材料

(1) コンクリートの配合: 実験に用いたコンクリートは表-1 に示す配合で、配合強度は 240 kg/cm² である。セメントは普通ポルトランドセメントを用い、粗骨材には渡良瀬川産川砂利 (比重 2.57, FM 6.26) を、細骨材には旧利根川産川砂 (比重 2.59, FM 2.82) を用いた。混和剤は減水剤としてポゾリス No. 5L を使用した。

粗骨材の最大寸法 (mm)	スラブ (cm)	空気量 (%)	水セメント比 W/C (%)	細骨材 S/a (%)	単位量 (kg/m ³)				
					水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤
25	21	4	56.6	48	192	339	827	909	0.85

表-1 コンクリートの配合

(2) 材料物性: コンクリートの強度試験は $\phi 10 \times 20$ cm の供試体を用い、材齢60日まで散水養生した後、常温、 -10°C 、 -40°C 、 -80°C の各温度で圧縮試験、引張試験(割裂試験)を行なった。試験中にコンクリートが乾燥しないようにゴム状コーティング材を供試体全面に塗布した。圧縮ひずみの測定にはストレンゲージを用い、静弾性係数は応力~ひずみ曲線の圧縮強度の1/3の応力における割線値とした。

各温度における圧縮強度と引張強度とを表-2に示す。静弾性係数と温度の関係を図-1に示す。

コンクリートの線膨張係数の測定には表面をゴム状コーティング材で被覆した $10 \times 10 \times 30$ cm の角柱を用い、常温から -80°C の範囲で 10°C ごとの線膨張係数を求めた。測定結果を図-2に示す。

2.2. RC円筒試験体

(1) 試験体の製作: 試験体は外径 2 m、内径 1.5 m、高さ 1.5 m の円筒とし、図-3に示すように円周方向に引張側(円筒内面側)シングル配筋とした。なお、試験体数は図-3の中の表に示すように鉄筋比の異なるもの3体である。コンクリートの練りまぜは 0.25 m^3 の強制練ミキサーを用いて10 バッチ混練した後、バッチ間変動をなくするためにミキサー

温度 ($^\circ\text{C}$)	圧縮強度 σ_c (kg/cm ²)	引張強度 (割裂強度) σ_t (kg/cm ²)	単位体積重量 (kg/m ³)
9	261	26	2,300
-16	442	53	
-45	672	75	
-80	941	77	

表-2 コンクリートの性質

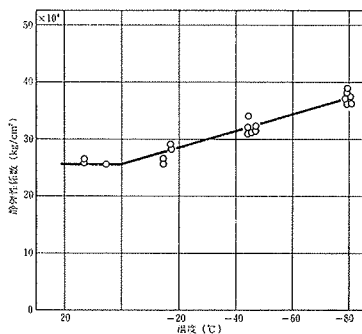


図-1 コンクリートの静弾性係数

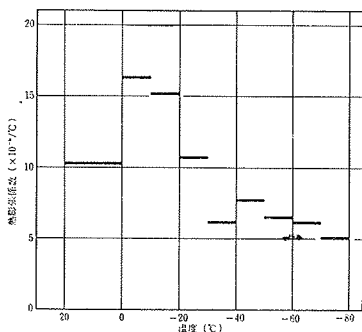


図-2 コンクリートの線膨張係数

車で全量を混練した。

硬化後は散水養生し、型枠を45日ではずして円筒の内面と外面にストレンゲージ、熱電対を設置した。上端部および内面にゴム状コーティング材を塗布して乾燥を防ぎ、冷却実験を行なうまで散水養生した。

(2) 測定: コンクリート内外表面および鉄筋のひずみは防水被覆を施したストレンゲージ(ゲージ長 25 mm および 5 mm)を用い、1ゲージ

3線式の結線方法で測定した。ひずみはすべて温度応力ひずみを検出するために、温度が変化するコンクリート内表面および鉄筋に貼付けたストレンゲージはあらかじめ常温から -80°C の範囲で温度校正をしている。ひずみの測定位置は図-4に示す。円筒の直径変化は石英管とキャンチレバー型変位計を用いて測定した。測定要領は図-5に示す。コンクリート中の温度は銅コンスタンタン熱電対によって測定した。

(3) 温度荷重: 温度荷重は内外表面温度差として与えた。すなわち試験体の上部および下部を厚さ 150 mm の

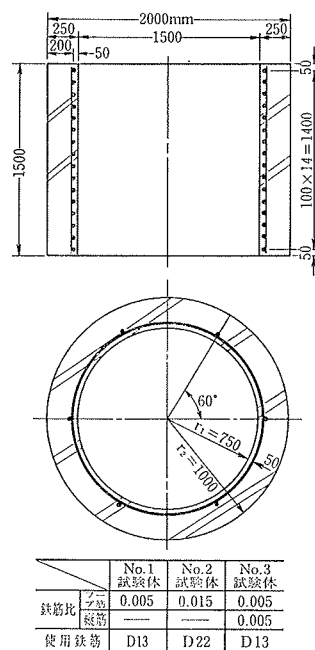


図-3 試験体形状寸法

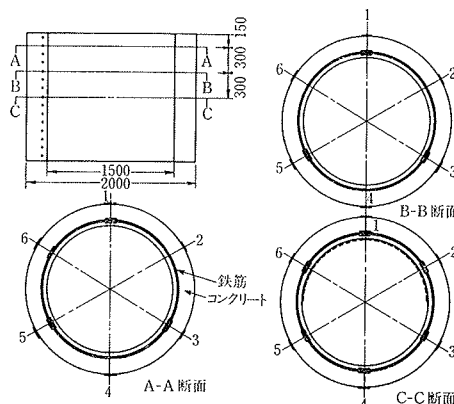


図-4 ひずみ測定位置

断熱材で断熱し、円筒外面は一定温度とするため水を常時流して約 15°C に保った。円筒内面は液体窒素を噴霧するとともにファンで攪拌して冷却した。内面の温度調節は測温抵抗体 (Pt 100 Ω) とプログラム温度調節器に

よって行なった。
内部の雰囲気温度は図-6に示すように段階的に低下させるものとし、各段階でコンクリート中の温度勾配が定常に達した状態で直径変化とひずみの測定をおこなった。

円筒の中央高さの水平断面に関して各温度段階における温度分布を図-7に、内外表面温度差を同図の表に示す。なお、実験装置を写真-1に示す。

3. 実験結果とその考察

3.1. 解析

実験に供した試験体は有限長の円筒である。そこでつぎの仮定を設け、軸対称積層円筒殻の温度応力近似解法¹⁾を拡張して解析した。

- ① 図-8に示すようにRC円筒を軸対称円筒殻と仮定し、温度は各層を横切って直線的に分布する。
- ② 薄肉円筒のため平面保持条件を満足する。
- ③ 変形後は一様ひずみ ϵ_0 となる。
- ④ 円筒長さ方向ひずみ $\epsilon_z = \epsilon_\theta = \text{Const.}$ とする。

なお解析にあたって、コンクリートの静弾性係数(E_c)、線膨張係数(α_s)は温度による変化を考慮し、またコンクリートのポアソン比(ν_c)および鉄筋の静弾性係数(E_s)、線膨張係数(α_s)は一定とした。

これより、 i 層のコンクリートの温度応力と j の位置にある鉄筋の温度応力は次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{\theta i} &= \epsilon_{\theta i} \cdot E_{ci} / (1 - \nu_c) \\ \sigma_{\theta j} &= \epsilon_{\theta j} \cdot E_s \end{aligned} \right\} \dots\dots(1)$$

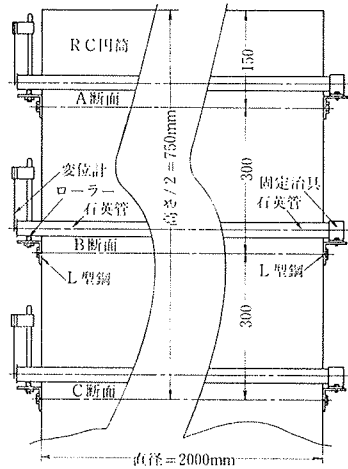


図-5 直径変化測定要領

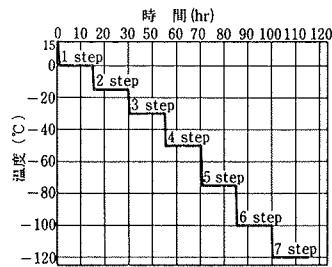


図-6 温度荷重

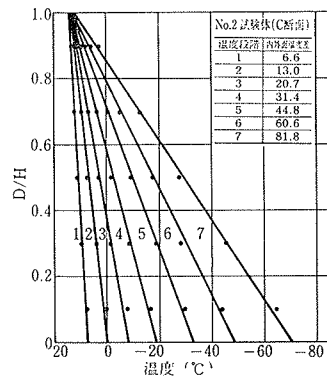


図-7 実測温度分布

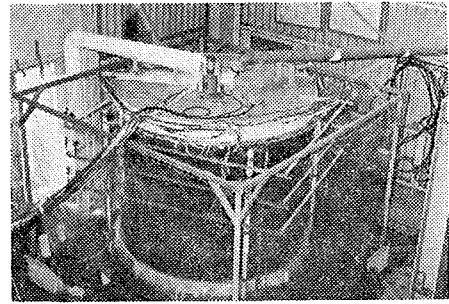


写真-1 冷却実験全景

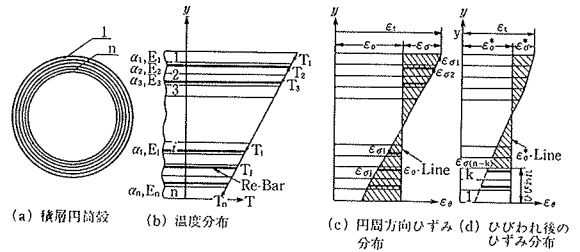


図-8 積層円筒殻と温度、ひずみ分布

$$\begin{aligned} \text{ここに、} \quad \epsilon_{\sigma i} &= \epsilon_{t i} - \epsilon_0, \quad \epsilon_{t i} = \alpha_{ci} \cdot T_i \\ \epsilon_{\sigma j} &= \epsilon_{t j} - \epsilon_0, \quad \epsilon_{t j} = \alpha_s \cdot T_j \end{aligned}$$

ただし、添字の σ は温度応力ひずみを表わし、 t は自由膨張ひずみを表わす。

(1)式を軸力 = 0 の条件式

$$\int_A \sigma dA = 0 \quad \dots\dots(2)$$

に代入し、各層における温度 T_i を用い、コンクリート層数を n 、鉄筋の層数を m として積分すれば、

$$\begin{aligned} \epsilon_0 &= \left\{ \sum_{i=1}^n A_{ci} \cdot E_{ci} \cdot \alpha_{ci} \cdot T_i / (1 - \nu_c) + \sum_{j=1}^m A_{sj} \cdot E_s \cdot \alpha_s \cdot T_j \right\} \\ & / \left\{ \sum_{i=1}^n A_{ci} \cdot E_{ci} / (1 - \nu_c) + \sum_{j=1}^m A_{sj} \cdot E_s \right\} \quad \dots\dots(3) \end{aligned}$$

となる。したがって弾性挙動する場合のコンクリートおよび鉄筋の各層の温度応力は(1)、(3)式より求められる。

つぎに断面の内側から k 番目の層まで半径方向のひびわれが生じた場合の釣合を考える。ひびわれの入った層の剛性を零とし、一たんひびわれが入った層での除荷はないものとして釣合を考えると、コンクリート部分の積分範囲は 1 から $(n - k)$ 層までとなり(3)式に準じて、

$$\begin{aligned} \epsilon_0^* &= \left\{ \sum_{i=1}^{n-k} A_{ci} \cdot E_{ci} \cdot \alpha_{ci} \cdot T_i / (1 - \nu_c) + \sum_{j=1}^m A_{sj} \cdot E_s \cdot \alpha_s \cdot T_j \right\} \\ & / \left\{ \sum_{i=1}^{n-k} A_{ci} \cdot E_{ci} / (1 - \nu_c) + \sum_{j=1}^m A_{sj} \cdot E_s \right\} \quad \dots\dots(4) \end{aligned}$$

と表わされる。(1)式の ϵ_{σ} 、 σ_{θ} を ϵ_{σ}^* 、 σ_{θ}^* で表わした式に(4)式の ϵ_0^* を代入するとひびわれ後のコンクリートおよび鉄筋の温度応力が求められる。

各温度におけるひびわれひずみを $\epsilon_{cr} = \sigma_i / E_c$ と仮定してひびわれの判定を行なった。ここに、 σ_i : 割裂強度

(表-2に示す), E_c ; 圧縮試験より求めた静弾性係数(図-1に示す)。

計算において鉄筋の静弾性係数 $E_s=2.1 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$, 線膨張係数 $\alpha_s=12.5 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$, コンクリートのポアソン比 $\nu_c=1/5$ とし, コンクリートの温度変化に対する E_c と α_c は図-1と図-2に示す値を用いた。

3.2. 変形状

(1) 外表面円周方向ひずみ度: 各試験体のB断面で測定した外表面円周方向ひずみ度の平均値を直径変化 ($\delta = \bar{\epsilon}_\theta \cdot D_0$, ただし D_0 ; 円筒の外径) に換算した値と変位計で直接測定した直径変化を図-9に示した。両者の値はほぼ一致しており, 変形とひずみの対応が確認された。なお, ひずみは以後ことわらない限り応力ひずみをしめす。図-9の計算値のうち実線は温度変化に対応してコンクリートの線膨張係数と静弾性係数のみの変化を考慮した弾性計算値であり, 破線はひびわれを考慮した非弾性計算値である。

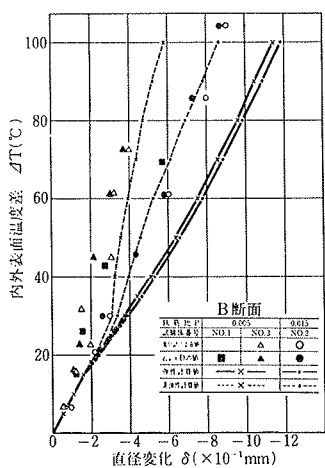


図-9 直径変化

実測値は内外表面温度差20~30°Cを境にして温度差の増大に対して直径の変化割合が小さくなる傾向を示し, 鉄筋量が多いほど同じ温度差で直径変化が大きくなっている。内外表面温度差80°Cで直径変化は鉄筋比 0.5%で約 0.4 mm, 鉄筋比 1.5%で約 0.7 mmであった。

弾性計算では物性変化のために若干直線性は失われるものの内外表面温度差に対応して直径変化はほぼ比例的に増大するが, 鉄筋比の影響はほとんどない。一方ひびわれを考慮した非弾性計算では内外表面温度差が20~30°Cを越えると弾性計算よりも直径変化は小さくなる。内外表面温度差が80°Cのとき非弾性計算と弾性計算との直径変化の比は鉄筋比 0.5%で0.5, 鉄筋比 1.5%で0.7となる。実測値は各鉄筋比の非弾性計算値に近似し, ひびわれによって拘束効果が減る分だけ直径変化が小さくなり, また鉄筋量が多いほど拘束効果は大きいため変形が大きくなることが予測される。

(2) 鉄筋ひずみ度: 図-10にB断面における内外表面温度差に対するひずみ度変化を示す。鉄筋のひずみ度の個々の測定結果にはおよそ $\pm 150 \times 10^{-6}$ のばらつきがある。このばらつきはひびわれ発生位置からのへだたりの

程度によって生ずるものと思われる。したがって平均的な挙動をみるために鉄筋ひずみ度は平均値で示した。実線は温度変化に対応してコンクリートの線膨張係数と静弾性係数のみの変化を考慮した弾性計算値であり, 破線はひびわれを考慮した非弾性計算値である。

実測値は内外表面温度差20~30°Cを境にして温度差の増大に対して鉄筋ひずみ度の増加割合は大きくなる傾向が認められる。しかし鉄筋比の差による鉄筋ひずみ度の差は判然としない。鉄筋の引張応力度は内外表面温度差80°Cで約 1,000~1,400kg/cm²と予測される。非弾性計算では内外表面温度差

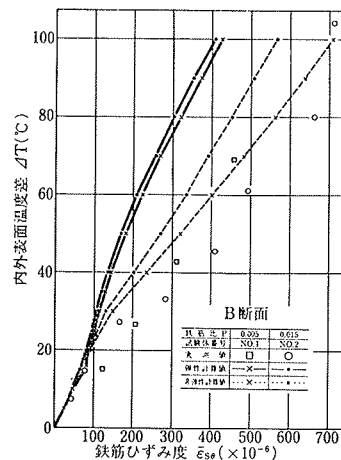


図-10 鉄筋のひずみ度

が20~30°Cを越えると弾性計算値よりも鉄筋ひずみ度は大きくなっている。また鉄筋比が大きいほど鉄筋ひずみ度は小さくなっている。内外表面温度差80°Cにおける鉄筋ひずみ度の非弾性計算と弾性計算との比は鉄筋比 0.5%で1.7, 鉄筋比 1.5%で1.5となっている。実測値は計算による非弾性応答よりも多少大きめの値を示しているが, ひびわれが生ずると鉄筋のひずみ度が増大することがわかる。

(4) ひびわれ: 一般にひびわれは目視によって観測されるが, この実験においてはひびわれの観測ができないために内面円周方向に貼付けたストレングージにより予測することにした。

前述したように割裂強度と静弾性係数からひびわれ発生ひずみはおよそ $150 \sim 200 \times 10^{-6}$ の範囲にあることが予想されることよりこれをひびわれ発生の基準値とした。

図-11に No. 2 試験体 (鉄筋比 1.5%) の円筒中央高さの引張側で測定したコンクリートの表面ひずみ度分布を示す。

内外表面温度差が約25°Cより大きくなるとこれまでほぼ同様であったひずみ度分布は一様性を失い, 部分的に上記ひずみを超える。

したがって内外表面温度差が約25°Cでひびわれが部分的に発生し, 以後内外表面温度差の増大に伴ってひびわれが進展していくことが予想される。このことは直径変化と鉄筋のひずみ度がひびわれ挙動に対応していること

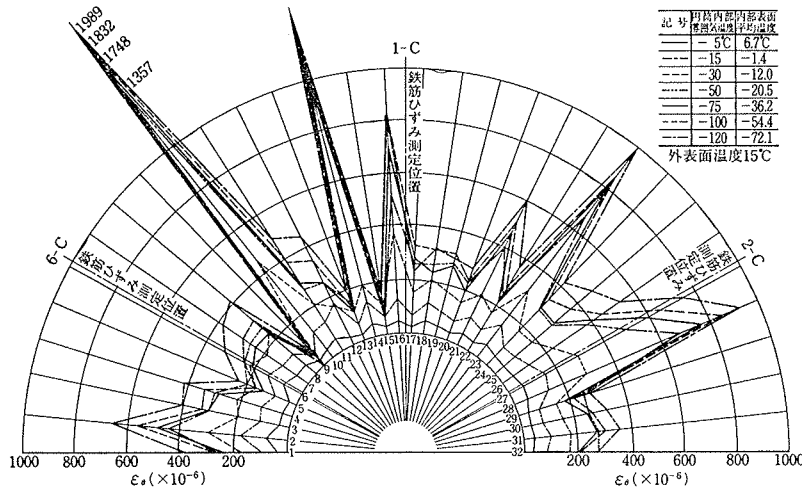


図-11 円筒内表面ひずみ度分布 (C断面)

を裏付けるものである。なお、試験後常温にもどして内面のひびわれを観察したが目視によってひびわれを確認することはできなかった。

(4) 曲げモーメント: ひびわれ深さおよび厚さ方向のひずみ分布が不明のため実測値から曲げモーメントを推定することは困難である。しかしコンクリートおよび鉄筋のひずみ度の実測値と計算値とが近似していることから解析によってひびわれ発生に伴う曲げモーメントの低下を推定した。図-2に内外表面温度差に対する非弾性曲げモー

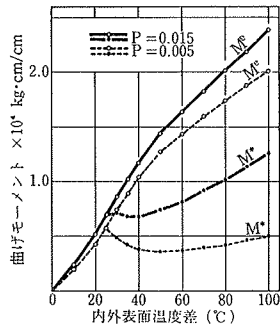


図-12 内外表面温度差～モーメント (M*, Me) 関係

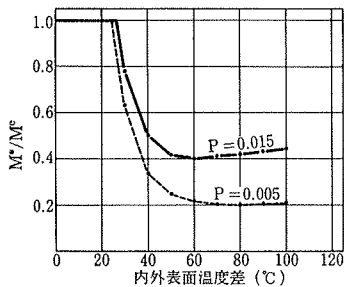


図-13 内外表面温度差～モーメント比 (M*/Me) 関係

メント (M*) と弾性曲げモーメント (Me) を示し、両者の比を図-13に示した。内外表面温度差が約25°Cでひびわれが発生し、曲げモーメントは低下し始める。温度差が60°Cになるとほぼ定常に達しひびわれ深さの増大が止まる。このとき M*/Me の値は鉄筋比1.5%で0.4となり鉄筋比0.5%で0.2となる。

4. まとめ

本実験のようなプロポーションを持つ円筒に温度荷重が作用する場合の挙動に関して以下のようなことがいえる。

鉄筋ひずみおよび内面のコンクリートひずみよりひびわれ挙動が予測された。ひびわれが発生する内外表面温度差は約20～30°Cと予測される。ひびわれが生じると鉄筋のひずみは増大するものの半径方向変位は押えられる。これはひびわれに伴う拘束力の減少によるものと思われる。

解析によるとひびわれの進行に伴う曲げモーメントは内外表面温度差80°Cで弾性モーメントに対して、鉄筋比0.5%のとき0.2、鉄筋比1.5%のとき0.4となる。

なお実験値と非弾性解析より予測される鉄筋応力度は内外表面温度差80°Cでおよそ 1,000～1,400 kg/cm² の範囲にあるものと考えられる。一方弾性解析より得られた曲げモーメントを通常のRC設計式に照らして考えるとき鉄筋応力度ははるかに大きくなり、この点からもひびわれによる鉄筋応力の低減は大きいといえよう。

参考文献

- 1) 林 毅, 編: 軽構造の理論とその応用(上), (株)日科技連出版社, (1966), p. 540