

内部を加熱された鉄筋コンクリート中空円筒の温度応力について

Thermal stress of a reinforced concrete hollow cylinder subjected to high temperature

北海道大学工学部土木工学科 ○学生員 有海洋平(Yohei Ariumi)
 北海道大学大学院工学研究科 フェロー 大沼博志(Hiroshi Ohnuma)
 (財)電力中央研究所 正員 上野 学(Manabu Ueno)

1. はじめに

本研究では、内部に放射性物質を収納する鉄筋コンクリート中空円筒構造物を対象とする。この構造物は、放射性物質の崩壊熱によって内側から加熱される。また、放射線を遮蔽するために、鋼ライナーを設置した厚肉の鉄筋コンクリートである。コンクリートにひび割れが発生すると遮蔽性能が低下するために、構造物の安全性評価に際しては、ひび割れ発生の有無、あるいはひび割れが発生する場合にはひび割れ幅の算定を行うことが必要である。そのため、本論文では最初の段階として、温度応力による鉄筋コンクリート中空円筒のひび割れ発生を解析的に予測する方法を検討した。

2. 中空円筒試験体の加熱試験

2.1 試験体および使用した材料

試験体は、外直径 1200×内直径 590×高さ 1000mm の円筒形であり、したがって厚さは 305mm である。放射線の遮蔽のために、内面には厚さ 9.5mm の鋼ライナーを設置した。試験体底面と床との間には、テフロンシートを挿入して摩擦を除いた。また、試験体上面には断熱材を置き、熱的には断熱境界条件とした。図-1 に示すように、フープ筋 (SD345) は D16 を内側と外側に 8 段に、また縦筋 (SD345) は D13 を内側および外側にそれぞれ 16 本配筋した。その鉄筋比は周方向が 1.07%、軸方向が 0.48% である。

コンクリートには普通ポルトランドセメントを使用し、また粗骨材の最大寸法、スランプおよび空気量はそれぞれ 20mm、10cm および 4.5% であった。コンクリートの配合を表-1 に示す。解析に使用した鋼ライナーのヤング係数、ポアソン比および線膨張係数は、それぞれ $2.11 \times 10^5 \text{N/mm}^2$ 、0.293 および $11.8 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ である。また、加熱試験時のコンクリートの圧縮強度、引張強度、ヤング率、ポアソン比および線膨張係数は、それぞれ 39.6N/mm^2 、 2.51N/mm^2 、 $3.17 \times 10^4 \text{N/mm}^2$ 、0.187 および $8.51 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ であった。

ひずみを測定するために試験体外表面には歪みゲージ (長さ 120mm) を貼り、また温度分布を測定するために試験体内部および表面に熱電対を取り付けた。

2.2 加熱試験方法

恒温槽内に試験体を設置し、試験体および恒温槽内の雰囲気温度を一様に 38°C とした。温度 38°C は、この種の構造物の設計基準に規定された通常運転時の外気温である。その後、雰囲気温度を 38°C に保ったまま、試験体内側の温度が 90°C になるまで加熱ヒーターによって昇温した。このときの昇温速度は、約 2°C/hr とした。その後一定時

間この状態を維持した後、自然冷却した。加熱試験中の温度とひずみ量を測定し、また試験後に試験体表面のひび割れを観察した。

2.3 加熱試験の結果

加熱試験で得られた代表的なひずみ履歴と温度履歴をそれぞれ図-2 と図-3 に示す。図-2 のひずみ履歴から明らかなように、ヒーターによって加熱約 60 時間後に試験体上面部にひび割れが発生した。また、温度履歴から求めた試験体厚さ方向の温度分布はほとんど定常状態にあり、この試験体は厚肉の中空円筒であるので下に凸な分布であることが示された。

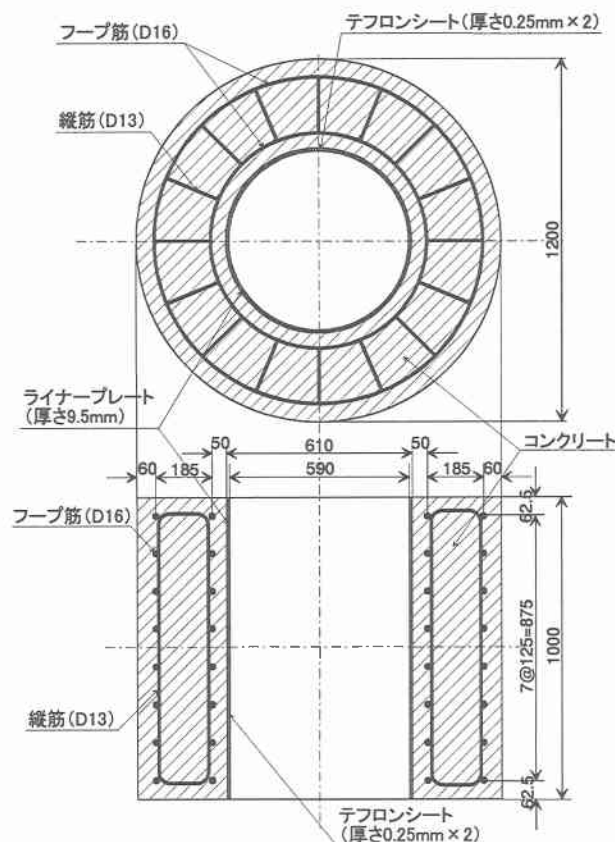


図-1 試験体の形状寸法

表-1 コンクリートの配合

W/C(%)	S/a(%)	単位量(Kg/m ³)				
		C	W	G	S	混和剤
55	53.4	305	168	960	850	3.47

3. 温度応力によるひび割れ解析

コンクリート試験体に発生する温度応力は、内外面温度差による応力およびライナーとコンクリートの線膨張係数の相違によって起きる応力の2つであると考えられる。この2つの応力の和がコンクリートの引張強度に達したとき、コンクリートにはひび割れが生じるものとした。

3.1 内外面温度差による温度応力の算定式

断面内の温度分布が線形で内外表面の温度差が ΔT のとき、外表面における温度応力 $\sigma_{\theta out}$ （引張）は次式によって与えられる¹⁾。

$$\sigma_{\theta out} = \frac{\alpha_c \cdot E_c \cdot \Delta T \cdot \left(\frac{r_i}{r_o} + 1 \right)}{4} \tag{1}$$

ここで、 α_c はコンクリートの線膨張係数、 E_c はコンクリートのヤング率、 r_i はコンクリートの内半径、 r_o は外半径である。

3.2 鋼ライナーの推力による温度応力の算定式

鋼ライナーの推力による温度応力は、鋼ライナーとコンクリートの膨張ひずみの差によって生じる。すなわち、鋼ライナーの膨張をコンクリートが拘束するために、コンクリート試験体に内圧が作用するのと同じであると考えてよい。このときの内圧 p は次式によって求めることができる。

$$p = (\alpha_s \Delta T_s - \alpha_c \Delta T_c) r_i \tag{2}$$

$$\left/ \left\{ \frac{r_i}{E_s} \left(\frac{r_s^2 + r_i^2}{r_i^2 - r_s^2} - \nu_s \right) + \frac{r_o}{E_c} \left(\frac{r_i^2 + r_o^2}{r_o^2 - r_i^2} + \nu_c \right) \right\} \right.$$

ここで、 α_s, E_s は、それぞれ鋼ライナーの線膨張係数、ヤング率を、 $\Delta T_s, \Delta T_c$ は、鋼ライナーとコンクリートの平均の温度上昇値を、 ν_s, ν_c は鋼ライナーとコンクリートのポアソン比を表している。

一様な内圧 p が作用するとき、試験体の外表面における円周方向応力（引張）は次式で与えられる。

$$\sigma_{\theta out} = p \cdot \frac{2r_i^2}{r_o^2 - r_i^2} \tag{3}$$

4. 解析結果およびひび割れ発生条件

加熱試験で得られた試験体厚さ方向の温度分布はほぼ常状態であるが、厚肉の中空円筒なので下に凸な分布となる。そのため、最初にこの温度分布を等価な直線分布に換算することにした。次に、この直線温度分布を用いて、(1)式および(3)式から内外面温度差および鋼ライナーの推力による温度応力を算定した。

コンクリートにひび割れが生じておらず、すなわち弾性体であると仮定した場合の温度応力履歴を図-4に示す。この図から、加熱試験において試験体にひび割れが発生した時点の温度応力は 2.62N/mm^2 であり、この値はコンクリートの引張強度 2.51N/mm^2 にほぼ等しい。

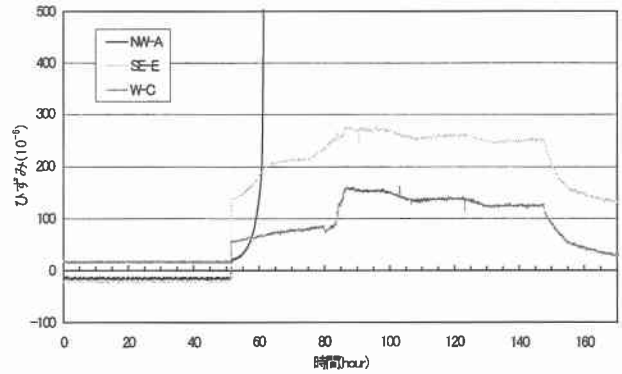


図-2 ひずみ履歴一例

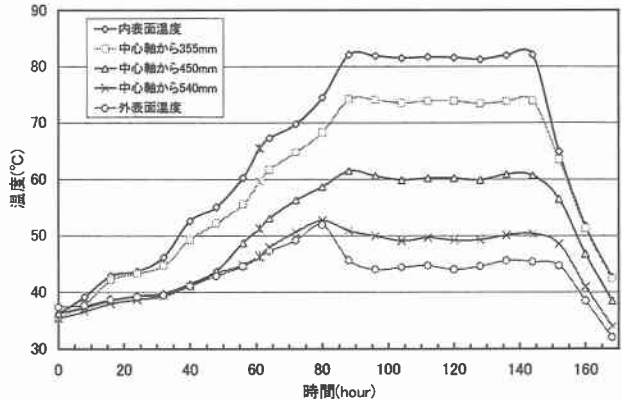


図-3 温度履歴

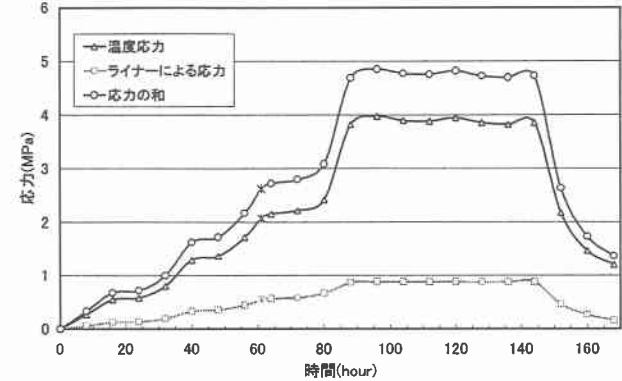


図-4 温度応力履歴

5. まとめ

鉄筋コンクリート中空円筒構造物のひび割れ発生時の温度応力評価においては、内外面温度差による温度応力に加えて、剛性が大きい鋼ライナーを設置した場合にはこの鋼ライナーの推力による温度応力を加算しなければならないことが明らかにされた。

本研究の弾性解析法によって、ひび割れ発生時の温度応力を相当に精度よく算定できると考える。

参考文献

1) 大沼博志, 青柳征夫ほか, コンクリート製中空円筒体の温度勾配によるひび割れ性状と鉄筋コンクリート部材の曲げ剛性評価に関する研究, 電力中央研究所報告, No.376002, 1976年10月