

内部に発熱体を有する鉄筋コンクリート中空円筒の温度応力評価

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

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

試験体の形状を図-1に示す。コンクリートには、普通ポルトランドセメントを使用した。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 E_s 、ポアソン比 ν_s 、線膨張係数 α_s は、それぞれ $2.11 \times 10^5 \text{N/mm}^2$ 、0.293、 11.8×10^{-6} 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 E_c 、ポアソン比 ν_c 、線膨張係数 α_c 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 8.51×10^{-6} であった。

また、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、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℃ とした。温度 38℃ 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℃ に保ったまま、試験体内側の温度が 90℃ になるまで加熱ヒーターによって昇温した。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。

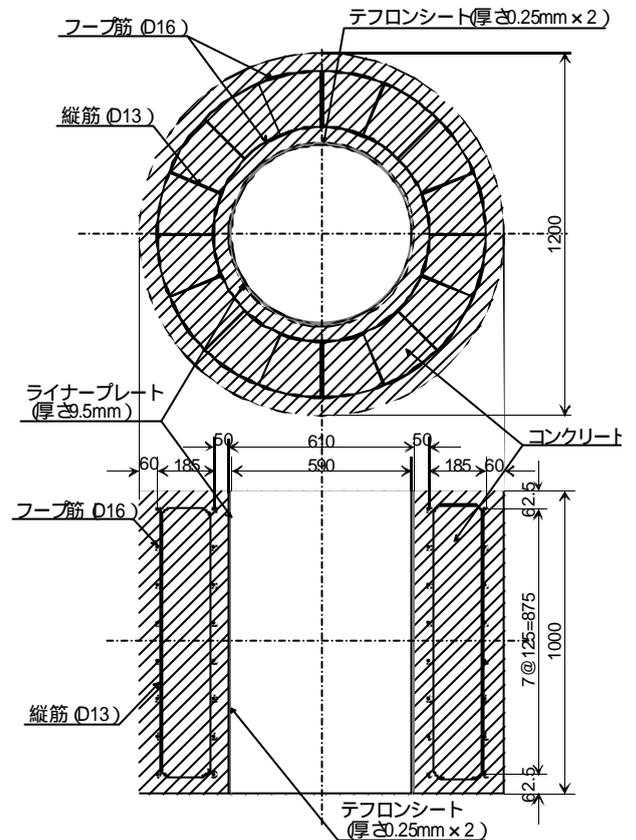


図 - 1 試験体の形状寸法

表 - 1 コンクリートの配合

W/C (%)	S/a (%)	単位質量 (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、温度勾配による応力および鋼ライナーとコンクリートの膨張率の相違により発生する応力の2つであると考えた。この2 応力の円周方向の和が、コンクリートの引張強度に達したときに、コンクリートにひび割れが発生するものとした。

3.1 温度勾配による温度応力の算定式

温度勾配による温度応力とは、温度膨張のひずみ差によって発生する応力である。コンクリートの内半径を r_i 、外半径を r_o 、中心軸からの距離 r における温度を $T(r)$ とすると、コンクリートの内面と外面の間の自由温度膨張によるひずみ差 ϵ_f は次式によって表すことができる。

$$\epsilon_f = \frac{\Delta r}{r_o} = \frac{a_c T_i r_i}{r_o} + \frac{1}{r_o} \int_{r_i}^{r_o} a_c T(r) dr - a_c T_o \quad (1)$$

このとき、円周方向の引張応力 s_{out} は次式で表せる。

$$s_{out} = \frac{\epsilon_f \cdot E}{2} \quad (2)$$

3.2 鋼ライナーの推力による応力の算定式

鋼ライナーの推力による応力は、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。

$$p = \frac{(a_s \Delta T_s - a_c \Delta T_c) r_i}{\left\{ \frac{r_i}{E_s} \left(\frac{r_s^2 + r_i^2}{r_i^2 - r_s^2} - n_s \right) + \frac{r_o}{E_c} \left(\frac{r_i^2 + r_o^2}{r_o^2 - r_i^2} + n_c \right) \right\}} \quad (3)$$

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。

$$s_{out} = p \cdot \frac{2r_i^2}{r_o^2 - r_i^2} \quad (4)$$

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定常状態であるが、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、実測値をもとに4本の直線分布に分割した。次に、この直線温度分布を用いて、(2)式および(4)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 2.30N/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。

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。

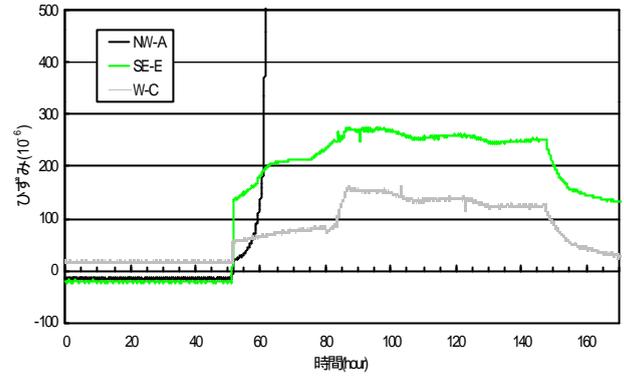


図 - 2 ひずみ履歴の一例

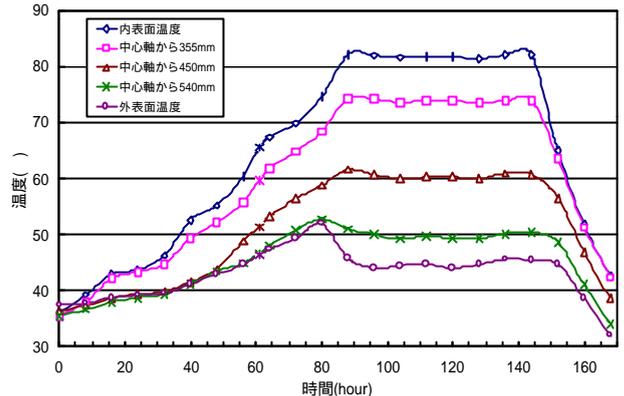


図 - 3 温度履歴

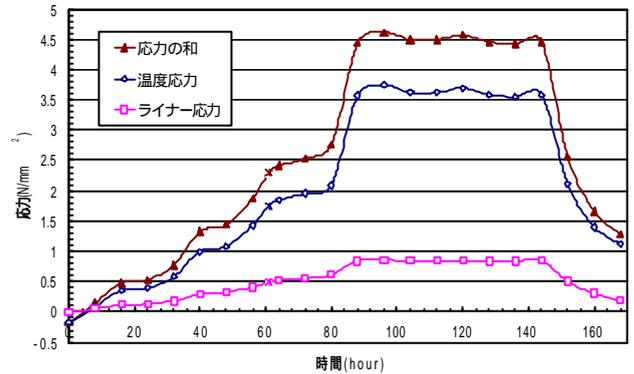


図 - 4 温度応力履歴