内圧を受ける配管の繰返し軸方向引張圧縮によるラチェット変形解析*

寺前 哲夫^{*1}, 鈴木 俊一^{*1}The Ratchet Analysis of Internally Pressurized Pipe Subjected to
Cyclic Axial Tension and CompressionTetsuo TERAMAE^{*2} and Shunichi SUZUKI^{*2} Tokyo Electric Power Company, Materials Engineering Center,
4-1 Egasaki-cho, Tsurumi-ku, Yokohama-shi, Kanagawa, 230-8510 Japan

It is well known that the internally pressurized pipe shows the mechanical ratchet phenomenon when it is subjected to cyclic axial secondary membrane stress. This phenomenon is the main failure mode when the power plant pipes are subjected to the seismic load. In this paper, the authors show the theoretical method to calculate the shakedown limit and the hoop ratchet strain for elastic-perfectly plastic material.

Key Words: Mechanical Ratchet, Piping, Seismic Load, Pressure

1. 緒言

内圧を受ける配管が過大な繰返し負荷を受けると周方向に膨らむ, いわゆるラチェット変形を起こすことが知られている. 朝田等^{1, 2)}は SUS304 鋼の単軸ラチェット疲労試験および内圧を受ける配管試験体の繰返し軸力・捩り試験を行い, ラチェット疲労寿命を繰返し損傷と延性消耗を組み合わせた式で評価している. また, 地震時の配管系の挙動を把握するため, 国内外で実規模配管系の強度実証試験が行われており^{3, 4)}, ラチェット疲労が主な損傷モードであることが明らかにされている.

一方, ラチェット変形に関する理論的検討としては, 熱ラチェットに対する有名な Bree の研究⁵⁾があるが, 機械的ラチェットに対する理論的な検討は, 著者の知るところ, あまり行われていない. そこで, 内圧を受ける配管の繰返し引張圧縮によるラチェット変形について理論解析を行い, ラチェット歪評価法を検討したので報告する.

2. 理論式

弾完全塑性体に対する降伏条件 (降伏曲面) は,

$$\bar{\sigma}^2 - \sigma_y^2 = 0 \quad (1)$$

ここで, $\bar{\sigma}$: Mises 応力, σ_y : 降伏応力

で与えられる. 等温塑性変形状態において, 塑性歪増分が降伏曲面の法線成分に比例すると仮定すると, 塑性歪増分は次式で与えられる⁶⁾.

$$d\epsilon_{ij}^P = \frac{s_{kl}s_{ij}d\sigma_{kl}}{P} \quad (2)$$

$$\text{ここで, } P = \frac{4H\bar{\sigma}^2}{9}, \quad \bar{\sigma} = \sqrt{\left(\frac{3}{2}s_{ij}s_{ij}\right)}$$

$$s_{ij} = \sigma_{ij} - \frac{1}{3}\delta_{ij}\sigma_{mm}, \quad \bar{\epsilon}^P = \int d\bar{\epsilon}^P$$

$$d\bar{\epsilon}^P = \sqrt{\frac{2}{3}d\epsilon_{ij}^Pd\epsilon_{ij}^P}, \quad H = \frac{d\sigma_y}{d\bar{\epsilon}^P}$$

径方向, 軸方向, 周方向をそれぞれ 1, 2, 3 で表す. 周方向応力および径方向応力が変化しないと考えると, 歪増分は次式で与えられる.

$$d\epsilon_{ij}^P = \frac{s_{22}s_{ij}d\sigma_{22}}{P} \quad (3)$$

軸方向の歪増分は,

$$d\epsilon_{22} = d\epsilon_{22}^E + d\epsilon_{22}^P = \frac{d\sigma_{22}}{E} + \frac{s_{22}s_{22}d\sigma_{22}}{P} \quad (4)$$

で与えられ, 軸方向応力増分が次式で与えられる.

$$d\sigma_{22} = \left(\frac{EP}{P + E(s_{22})^2} \right) d\epsilon_{22} \quad (5)$$

(5) 式を (3) 式に代入すると, 周方向塑性歪増分は,

$$d\epsilon_{33}^P = \left(\frac{s_{33}}{s_{22}} \right) d\epsilon_{22}^P = \left(\frac{-\sigma_{22} + 2\sigma_{33}}{2\sigma_{22} - \sigma_{33}} \right) d\epsilon_{22}^P \quad (6)$$

* 原稿受付 2008 年 9 月 29 日.

^{*1} 正員, 東京電力(株) (〒230-8510 横浜市鶴見区江ヶ崎町 4-1).

E-mail: Teramae.Tetsuo@tepcoco.jp

となり、周方向全歪増分は次式で与えられる。

$$d\varepsilon_{33} = d\varepsilon_{33}^E + d\varepsilon_{33}^P = -\frac{\nu d\sigma_{22}}{E} + \frac{s_{22}s_{33}d\sigma_{22}}{P} \\ = \left(-\frac{\nu}{E} + \frac{s_{22}s_{33}}{P} \right) \left(\frac{EP}{P + E(s_{22})^2} \right) d\varepsilon_{22} \quad (7)$$

軸方向に引っ張り圧縮の繰返しを与えた場合の応力状態を考える。径方向応力を無視すると、塑性変形状態での引っ張り側および圧縮側での軸方向応力は次式で与えられる。

$$\sigma_{22} = \frac{1}{2} \left(\sigma_{33} \pm \sqrt{(\sigma_{33})^2 - 4((\sigma_{33})^2 - \sigma_y^2)} \right) \quad (8)$$

ここで、周方向応力は内圧による応力である。(6)、(8)式から以下のことが言える。

- ・ 周方向内圧応力により、繰返し中の引っ張りと圧縮における軸方向応力状態が異なり、塑性歪増分を支配する偏差応力も異なる。
- ・ このため、引っ張りと圧縮で周方向歪増分が異なり、繰返しごとに周方向ラチェット歪が生じ、径方向に膨らみが起こる。

軸応力範囲が(8)式で与えられる引っ張りと圧縮での軸方向応力の差よりも小さければ、シャイクダウンを起こし、ラチェット変形は生じない。したがって、シャイクダウン限界応力範囲は、

$$\Delta\sigma_{22}^s = \left(\sqrt{(\sigma_{33})^2 - 4((\sigma_{33})^2 - \sigma_y^2)} \right) \quad (9)$$

で与えられる。

一方、(6)式から引っ張り圧縮での1サイクルあたりのラチェット歪増分が求められる。軸方向の仮想弾性応力範囲 $\Delta\tilde{\sigma}_{22}^E$ と1サイクルあたりの周方向ラチェット歪 $\Delta\tilde{\varepsilon}_{33}^R$ の関係は最終的に次式で与えられる。

$$\Delta\tilde{\sigma}_{22}^E = E\Delta\tilde{\varepsilon}_{22} = \left(\frac{\Delta\tilde{\varepsilon}_{33}^R}{3\tilde{\sigma}_{33}} + 1 \right) \Delta\tilde{\sigma}_{22}^s \quad (10)$$

ここで、応力および歪はいずれも降伏応力および降伏歪で無次元化している。

3. 計算結果

図中、 εR は降伏歪で除した1サイクルあたりのラチェット歪量である。なお、多軸等価応力としてMises応力を用いたため、周応力が降伏応力を越えた領域でも、無次元周応力が1.154まではシャイクダウン領域が存在する。図1に(10)式で計算したラチェット歪を示す。

4. 結言

内圧を受ける配管の繰返し引張圧縮によるラチェット変形について理論解析を行い、ラチェット歪評価式を得た。

実際の配管では軸方向および周方向の繰返し曲げ応力も作用するので、今後、これらの応力がラチェット変形に及ぼす影響についても検討していく。

Fig.1 Ratchet strain diagram of pressurized pipe

参考文献

- (1) Y. Asada, "Failure Criterion on Low-Cycle Fatigue with Excessive Progressive Deformation", HPI ETD Committee, 98ETD1-6, 1998
- (2) J. Namaizawa, K. Ueno, A. Ishikawa, Y. Asada, "Life Prediction Technique for Ratcheting Fatigue", PVP-Vol.266, Creep, Fatigue, and Leak Before Break Assessment, 1993
- (3) S. W. Tagart, Jr., Y. K. Tang, D. J. Guzy and S. Ranganath, "Piping dynamic reliability and code rule change recommendations", Nuclear Engineering and Design, Vol. 123, pp.373-385, 1990
- (4) K. Suzuki, H. Abe, Y. Sasaki, S. Kanno, T. Sato, H. Yokota and K. Suzuki, "Seismic Proving Test on the Ultimate Strength of Piping System (Component Tests), JSME 2000 Annual Conference, pp833-834, 2000
- (5) J. Bree, "Elastic-Plastic Behavior of Thin Tubes Subjected to Internal Pressure and Intermittent High-Heat Fluxes with Application to Fast Nuclear-Reactor Fuel Elements", Journal of Strain Analysis, Vol.2, No.3, 1967
- (6) T. Teramae, "Outline of the computer program: ISTRAN/3D for Inelastic Analysis of Three Dimensional Structures", 13th Matrix Structural Analysis Symposium, 1979