

耐震尤度設計におけるマクロ・マイクロ塑性理論

Macro and Micro Plastic Model for Earthquake Resistant Design

北海道大学大学院
熊本大学

佐々木克彦 Katsuhiko SASAKI
眞山 剛 Tsuyoshi MAYAMA

Plastic theories have been used for evaluation of reliability of power plants including nuclear power plants over a period of time. Recently, new methods of evaluation for earthquake resistant of power plants is required because of the delay resume of the plants at Kashiwazaki-kariwa. This paper reports a method to make a new rule to resume the plants subjected to earthquake with employing macro and micro plastic models for a structural analysis. Piping systems of a nuclear power plants are targeted to be analyzed the plastic deformation due to earthquake motion and also to be estimated safety margin of the pipe systems considering earthquake motion.

Keywords: Nuclear Power Plants, Piping Systems, Plastic Models, Earthquake Motion, Safety Margin

1. 緒言

地球温暖化に伴う二酸化炭素排出規制や石油などの化石燃料の産出量の将来への不安などから、原子力発電や自然エネルギーに対する期待が今までになく高まっている。しかしながら、原子力発電所においては、地震に見舞われた時の安全性の評価を特に十分行う必要がある。このことから、最近再稼働の許可が下りた柏崎・刈羽発電所の場合は、地震を受けてから再稼働までに2年以上の歳月を有している。このような長期間の稼働停止は電力会社の損失のみならず社会的影響は多大である。これを受けて、地震に見舞われた原子力発電所の再稼働のための新基準を定める動きがあり、これには、原子力施設の建屋、機器、配管に至るまでの地震動による影響をシステムティックに検討し、その地震動に対する施設の余裕を正確に評価する必要がある。

平成20年度から開始されたプロジェクト「原子力施設用配管の耐震尤度評価法と耐震性向上技術に関する開発」(経済産業省 革新的実用原子力技術開発費補助プログラム)では、地震度を受けた原子力施設の早期再稼働のために、地震動の機器、特に原子炉周りの主蒸気管や再循環系管への影響を評価する手法について、地殻から建屋、床を通して機器、配管に伝わる地震動を考慮して検討することを目的としている。本報告で

は、このプロジェクト内における目的の一つである、原子炉周りの主蒸気管および再循環系配管に対する、地震動の影響およびその尤度に関して、マクロおよびマイクロ塑性モデルを用いた評価手法について検討した。

2. 耐震尤度評価の概要

本プロジェクトの概要を図1に示す。本プロジェクトは、1) 地盤の地震動解析から建屋の地震動解析を経た床応答の導出、2) 床応答から機器、配管への入力負

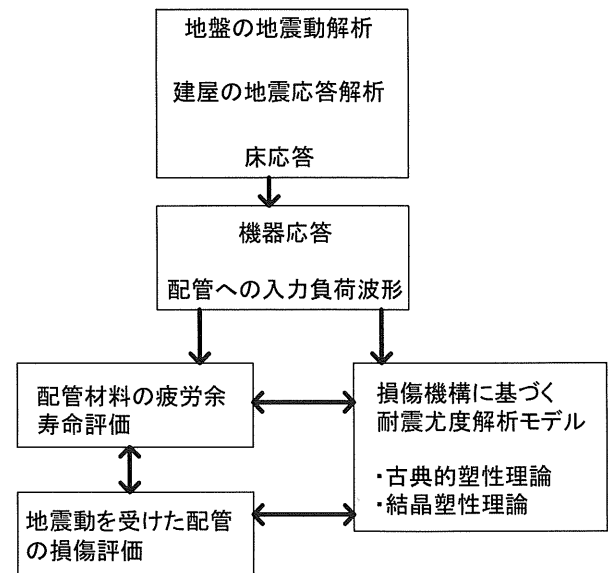


Fig. 1 Diagram for safety margin design

連絡先: 佐々木克彦、〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目、北海道大学大学院工学研究科、電話: 011-706-7889、e-mail: katsu@eng.hokudai.ac.jp

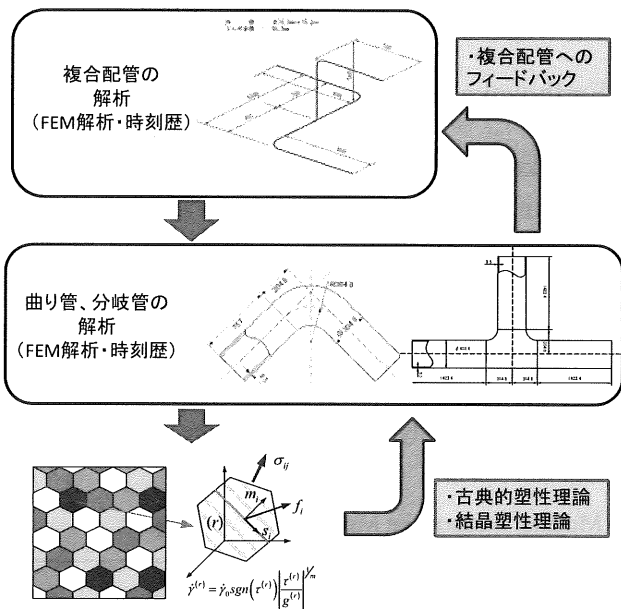


Fig. 2 Macro and micro plastic analysis

荷波形の導出、3) 入力負荷波形を利用した配管材料の余寿命評価、4) 地震動を受けた配管の損傷評価、5) 損傷機構に基づく耐震尤度解析モデルに大きく分けられそれぞれが密接に関連し合っている。

本研究では図2に示す損傷機構に基づく耐震尤度解析手法について検討する。ここでは、配管系と曲り管、分岐管の解析をマクロ塑性理論とマイクロ塑性理論としての結晶塑性理論の双方から行う。マクロ塑性理論による解析においては実験的余寿命評価と合わせた尤度評価法の構築を行う。また、結晶塑性理論による解析においては、損傷評価を援用しつつ配管材料の結晶方位を制御することによる高寿命化などを検討する。

本報告ではまずマクロおよびマイクロ塑性モデルについて紹介し、次いで有限要素解析による具体的な計算例について述べる。

3. マクロおよびマイクロ塑性モデル

3.1 マクロ塑性モデル

マクロ塑性モデルにおいては、対象としている変形特性の一つとして繰返し塑性変形がある。これは、圧力容器や制御棒に繰返し作用する機械的あるいは熱的負荷を想定したもので、30年ほど前から盛んにおこなわれてきている。最近では材料の微視的変形を考慮したマクロ塑性モデルによる解析が例えば著者らにより

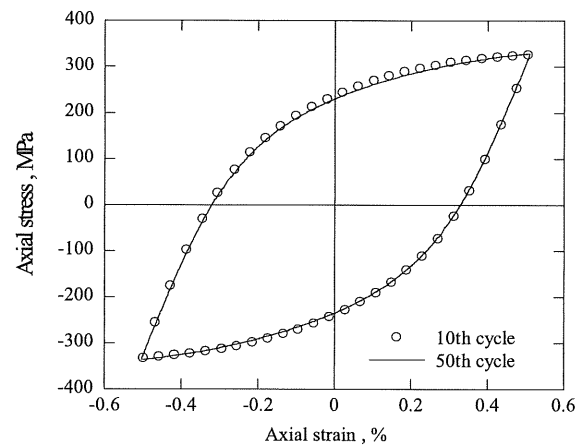


Fig. 3 Stress-strain relation caused by cyclic loading

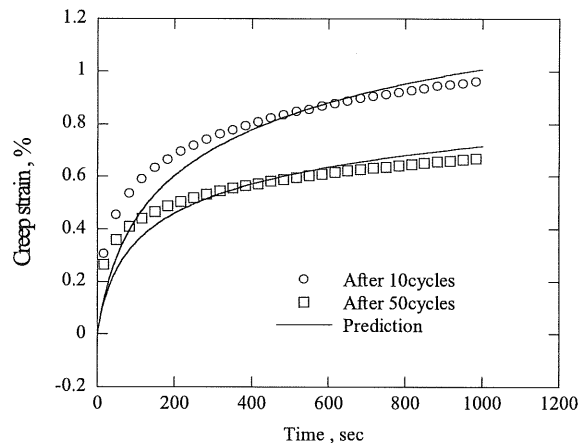


Fig. 4 Creep curves after cyclic loading

行われている[1]。その概要を以下に示す。

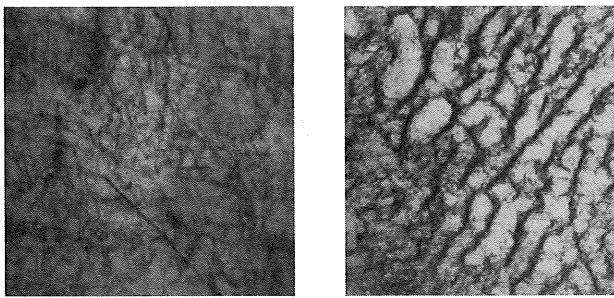
$$F = \frac{H}{n+1} \left\langle \frac{\bar{\sigma} - R}{H} \right\rangle^{n+1} \quad (1)$$

$$\bar{\sigma} = \left\{ \frac{3}{2} (\boldsymbol{\sigma} - \mathbf{X}) : \mathbf{C} : (\boldsymbol{\sigma} - \mathbf{X}) \right\}^{1/2} \quad (2)$$

$$\dot{\boldsymbol{\epsilon}}^v = \frac{3\dot{\bar{\epsilon}}^v}{2\bar{\sigma}} \mathbf{C} : (\boldsymbol{\sigma} - \mathbf{X}) \quad (3)$$

$$\dot{\bar{\epsilon}}^v = \left\langle \frac{\bar{\sigma} - R}{H} \right\rangle^n \quad (4)$$

式(1)は粘塑性変形を考慮した負荷関数、式(2)は相当応力、式(3)は負荷関数式(1)と塑性流れ則などから導出される粘塑性ひずみ増分テンソル、式(4)は相当粘塑性ひずみ増分である。各式中の $\boldsymbol{\sigma}$ は応力テンソル、 \mathbf{X} は背応力テンソル、 \mathbf{C} は異方性テンソルであり、



(a) after 10 cycle (b) after 50 cycle
Fig. 5 Micro-structure after cyclic loading

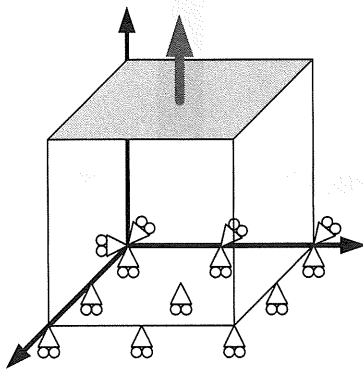
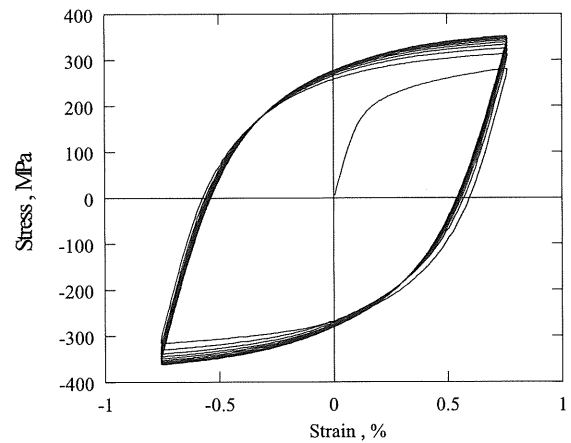


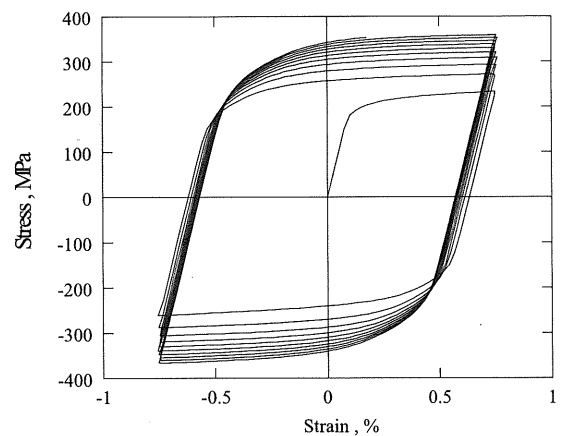
Fig. 6 FEM model for analysis by crystal plasticity

また、 R は流れ応力、 H および n は材料の特性を表わすための変数である。材料特性を表わす変数 R 、 H 、 n は材料内部の組織変化と関連づけることができる[1]。

図3はSUS316L材に対して、ひずみ振幅0.5%の引張り・圧縮繰返し負荷を与えた時の10サイクルおよび50サイクル後の応力-ひずみ曲線を示している。10サイクル後と50サイクル後の応力-ひずみ関係はほぼ一致していることがわかる。図4は10サイクルおよび50サイクル繰返した後に、応力-ひずみ関係の最大応力でクリープ変形させたときのクリープ曲線である。なお、図3に示したように各サイクル数での応力-ひずみ関係が一致していることから、その時の最大応力は同一である。同一の応力レベルでのクリープ変形にも関わらずクリープ曲線に大きな差がみられ、繰返し塑性変形が後続のクリープ変形に大きな影響を与えていることが図4よりわかる。図4中で○印が実験値、実線が計算結果であるが、計算と実験がよく合っている。すなわち、ここで用いた塑性モデルは材料に加わった負荷の影響を考慮した変形解析に適用可能であり、本研究で



(a) experiment



(b) simulation

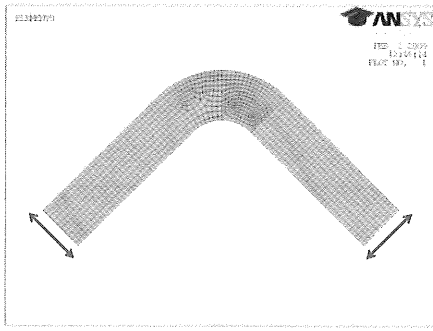
Fig. 7 Micro-structure after cyclic loading

行う地震動を受けた後の余寿命評価に応用可能であると考えられる。

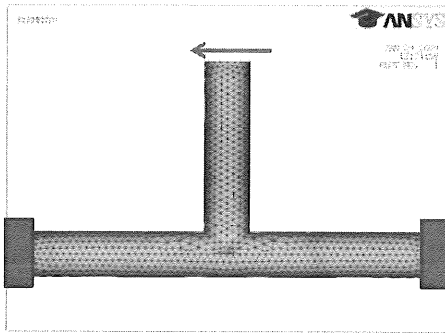
図5は繰返し負荷中の材料内部のTEMによる微視的組織の観察結果である。図5(a)は10サイクル後、図5(b)は50サイクル後の内部組織観察結果である。サイクル数が増すに従い転位の集積が増加し、50サイクル後においてはポリゴン化しつつあることがわかる。図4に示した計算において決定した材料変数は、図5で示す繰返し負荷中の材料内部の組織変化と定性的ではあるが関連付け可能である。

3.2 マイクロ塑性モデル

著者らは文献[2]においてマイクロ塑性モデルとして、結晶塑性モデルを用いた繰返し塑性変形に関する検討を行い、直接的に材料内部の転位組織とシミュレーション結果との関連付けを試みている。ここで用いた結晶塑性理論の基礎式を以下に示す。



(a) bent pipe



(b) T-pipe

Fig. 8 FEM model of pipes

$$\dot{\gamma}^{(\alpha)} = \dot{\gamma}_0 \operatorname{sgn}(\tau^{(\alpha)}) \left| \frac{\tau^{(\alpha)}}{g^{(\alpha)}} \right|^m \quad (5)$$

$$\dot{g}^{(\alpha)} = \sum^N h^{(\alpha\beta)} |\dot{\gamma}^{(\beta)}| \quad (6)$$

$$h^{(\alpha\beta)} = h_0 \left(\frac{h_0 \gamma_a}{\tau_0 n} + 1 \right)^{n-1} \quad (7)$$

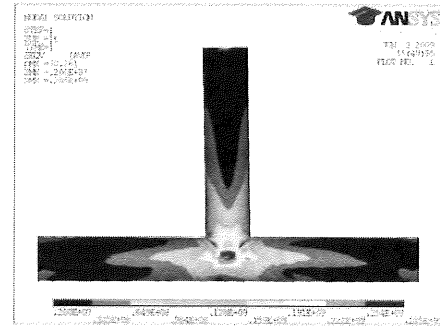
$$\gamma_a = \int \sum_{\alpha} |\dot{\gamma}^{(\alpha)}| dt \quad (8)$$

上式で、 $\dot{\gamma}^{(\alpha)}$ はすべり系のせん断ひずみ速度、 α はすべり系番号、 $\tau^{(\alpha)}$ はすべり方向に作用する分解せん断応力、 $g^{(\alpha)}$ はすべり抵抗、 $\dot{\gamma}_0$ は基準すべり速度、 m はひずみ速度敏感性指数、 h_0 は初期硬化係数、 n はすべりの加工硬化指数、 τ_0 は応力次元のパラメータである。なお、計算は図6に示す立方体モデルによりその内部に343個の結晶粒を想定し行った。

図7にひずみ振幅0.75%で繰返し引張り・圧縮負荷を与えた時の実験結果と解析結果を示す。図7(a)が実験結果であり、図7(b)が解析結果を示す。実験結果と解析結果には、弾性域から塑性域に移行する



(a) bent pipe



(b) T-pipe

Fig. 9 Results of FEM analysis (equivalent stress)

遷移領域部分で大きな差異が認められる。しかしながら、式(5)~(8)の比較的簡単な結晶塑性モデルでバウンシグー効果を含む繰返し硬化を記述可能であることがわかる。

3.3 配管の有限要素法解析

図8(a)に示す曲り管や図8(b)に示す分岐管のモデルを考える。図9(a)および図9(b)に曲り管の両端に一例として、30mmの変位を外側に作用させた場合と、分岐管の一端に30mmの変位を作用させた場合の解析結果である応力分布を示す。図9は極めて簡単な等方硬化則を用いた一方向負荷に対する塑性解析であるが、実際には、各配管の端面に床応答から導出される時系列の繰返し負荷波形や初期動を想定した衝撃波を考慮し解析する必要がある。そのような場合には、先に示したバウンシグー硬化を記述可能なマクロ塑性モデルと衝撃塑性理論を有限要素法に導入し解析を行う。さらに、結晶塑性解析により、たとえば、マクロ塑性モデルにより明らかになる配管の危険部位の結晶方向を制御することによる、さらに余裕のある配管構造の提案を試みる。

4. 結言

本研究では、地震動による発電施設内の配管系に対する余寿命評価や尤度評価のために、マクロ塑性モデルおよびマイクロ塑性モデルとしての結晶塑性モデルによる配管の解析の可能性について検討した。両モデルによる素材単独での解析がある程度可能であることから、これらを実機を対象とした有限要素解析に取り入れることにより、地震動を模擬したより正確な配管の変形解析が可能となることを示した。

謝辞

本研究は経済産業省革新的実用原子力技術開発費補

助金により実施された成果の一部である。関係各位に深く謝意を表す。

参考文献

- [1] T. Mayama, K. Sasaki, and H. Ishikawa, "A Constitutive Model of Cyclic Viscoplasticity Considering Changes in Subsequent Viscoplastic Deformation due to the Evolution of Dislocation Structures", *International Journal of Plasticity*, Vol. 23, 2007, pp. 915-930.
- [2] Tsuyoshi Mayama, Katsuhiko Sasaki, and Mitsutoshi Kuroda, "Quantitative evaluations for strain amplitude dependent organization of dislocation structures due to cyclic plasticity in austenitic stainless steel 316L", *Acta Materialia*, Vol. 56, 2008, pp. 2735-2743.