505 高温機器設計規格と非弾性解析の対応

Consistency between Elevated Temperature Structural Design Rules and Inelastic Finite Element Analysis

正 藤岡 照高 (電中研)

Terutaka FUJIOKA, Central Research Institute of Electric Power Industry,
6-1 Nagasaka-2, Yokosuka, Kanagawa 240-0196

1. はじめに

規格・基準類の機能性が図られ、従来の手順を定める規格から構造物の実力をベースとした規格体系へと変遷が進められている。構造物の実力に即した設計を行うためには弾性解析よりも高精度の非弾性解析の活用が期待されるが、非弾性解析には使用する構成式等に様々なバリエーションがあり、目的や投資可能な資源に応じた選択がなされる。

圧力機器規格統一化の中でそうした選択を許容しうる Seamless (連続) で Multi-level (段階的高度化) な基準類の体系化がより明確に志向されている¹⁾。即ち、設計に用いる解析は段階的に高度化でき、様々な解析から得られる設計は構造力学的に連続で、手法簡便化のため犠牲にされる精度の違いはあるものの、最低限確保すべき構造健全性は解析法に依存しない。高速増殖炉「もんじゅ」の設計に用いられた「部分非弾性解析」²⁾はそのような段階的高度化の先駆的事例と言える。原型炉設計指針³⁾を踏襲・高度化した実証炉設計方針⁴⁾には、累積非弾性ひずみと弾性追従の評価に対する部分非弾性解析の手順が示されている。

ここでは、既往の設計許容限界⁵⁾と実際の構造応答との対応を明確化することで、部分非弾性解析を基調とした設計規格の全体概略を提案する。ここでの議論は応力分類を前提としない「解析 (主に FEA) による設計」に主眼を置く。

2. 圧力機器設計で防止すべき破損モード

2.1 評価対象とする破損モード 延性材料から成る (高温) 圧力機器設計で考慮すべき破損モードのうち FEA の評価対象は、(クリープ) 延性破断、(クリープ) 塑性崩壊、過大な (クリープ) 塑性変形、(クリープ) 疲労破壊、累積非弾性ひずみ、及び座屈 (ここでは検討対象としない) とされる。これらは (高サイクル疲労を除き) いずれも非弾性変形を伴うため、弾性解析では極限荷重、シェイクダウン、応力集中及び弾性追従等の近似概念を用いて間接的に取扱われている。

2.2 供用状態区分に応じた破損モード 原子力機器では荷重事象の頻度に応じて、通常使用の状態 (供用状態 A 及び B)、低頻度で起こりうる異常状態 (供用状態 C)、または設計寿命中には滅多に生じない仮想状態 (供用状態 D) に設計荷重を分類し、それぞれ相応の設計裕度を適用する。

供用状態 A 及び B では、2.1 節の全ての破損モードを考慮し、更に弾性設計の妥当性確保のため、「構造物を総体的に弾性領域に置く」ことが求められる。低頻度の供用状態 C では疲労および累積ひずみの評価が原則免除されるが、状態を経た後でも機器を再利用可能とするため、残留非弾性変形は抑制される。供用状態 D では状態後の運用性の保障を要さず、原則、「破断」のみを考慮する。

3. 一次応力の制限

3.1 極限解析による方法 仮想的な剛塑性体 (実用的には弾完全塑性体) の極限荷重で正規化した無次元化荷重、 λ/λ_L (λ : 図 1 に定義する荷重の比例係数、 λ_L : λ の最大値) は、実際の構造物の無次元化変位、 Δ/Δ^e (Δ : 実際の構造物の代表変位、 Δ^e : 同一荷重を受ける弾性体の Δ) と高い相関

を持ち⁶⁾、(比例荷重を前提として) 非弾性変形抑制の上で弾性設計と極限解析設計は等価となる⁷⁾。

Figure 1 Definition of loading factor, λ , for limit analysis with the assumption of proportional loading

従って、供用状態 A 及び B における「総体的な弾性領域への抑制」、並びに供用状態 C における「残留非弾性変形の抑制」は、 λ を用いた荷重の制限、即ち作用荷重を軸とする空間上で極限荷重を比例的に縮小して設計許容限界とする (図 2 参照) ことで弾性設計と同レベルに達成される。

供用状態 D では、破断防止に対してくびれを再現しない微小変形極限解析を適用する妥当性確保のために、実績のある弾性設計と整合する「 λ を用いた制限」が必要となる。破断荷重は、引張試験片では、引張強さを降伏点とする極限荷重に一致するが、一般の構造物では極限荷重よりも低い。鋭い切欠きを有する実験的検討からは、最大荷重は引張強さと 0.2% 耐力の平均を降伏点とする極限荷重に近いとされる⁸⁾。このことから引張強さを降伏点とした極限荷重を比例的に縮小して定まる現行許容限界は概ね妥当と言える (図 2 参照)。

Figure 2 Relationship between limit loads, experimental maximum loads and design allowable limits

クリープに関する強度基準値で許容応力が定まる場合には、極限荷重の降伏点に対する比例性を利用し、単軸試験片ベースの強度基準値の比に応じて許容荷重を減じればよい。

3.2 一般構成式を用いた方法 実際の変形挙動を表現する構成式 (例えば式(1)) を用いれば、「過大な非弾性変形」は直接評価できる。

$$\varepsilon = \sigma/E + \varepsilon_Y^p (\sigma/\sigma_Y)^n \quad (1)$$

ここに、 ε は全ひずみ、 σ は応力、 E はヤング率であり、 σ_Y 、 ε_Y^p 及び n は塑性変形特性を表す材料定数である。

許容応力が設計降伏強さ、 S_y で定まり、かつ $\sigma_Y = S_y$ の場合、式(2)を満たす荷重を図 2 の「0.2%耐力に対する極限荷重」

と見なすことで、 Δ/Δ^e は極限解析と同等に制限できる⁷⁾。

$$\Delta/\Delta^e = 1 + E\varepsilon_Y^e/\sigma_Y \quad (2)$$

この手法は ASME⁹⁾で極限解析と並んで採用されている二倍勾配法に類似する。二倍勾配法を極限荷重の近似の目的で使った場合、許容荷重が材料特性や形状に依存し、極限解析設計との差異を生じる。二倍勾配法に代えて本手法を用いれば、これらの依存性は軽減される。本手法は極限解析よりも高めの許容荷重を与える場合があるが、構造物の実際の耐変形能力を反映しており、設計規格の目的を損なわない。

クリープ効果を考慮する場合にはクリープ解析によって、同様に弾性設計における許容限界に対応する Δ/Δ^e をベースに許容荷重を定められる。

3.3 荷重の順序の取扱い 軽水炉設計規格⁵⁾⁹⁾¹⁰⁾は、強度基準値（例えば設計応力強さの 1.5 倍）を降伏点として極限解析を行い、設計裕度を確保するよう規定している。例えば複数の荷重がその順序と共に指定された場合などには、評価対象となる設計荷重点が複数生じ、これらに対し逐一極限解析が求められる。設計労力軽減のため、これらの規格と同一の許容限界を与える以下の 2 つの極限解析を用いてもよい。

[方法 1] 弾性設計における許容応力（設計裕度を含む）を降伏点とし、例えば指定された順序どおりに荷重を付与して行き、全ての点で崩壊しないことを確認する。

[方法 2] 降伏点は設計規格の方法と同じにし、設計荷重に設計裕度を乗じた荷重を、例えば指定された順序どおりに荷重を付与して行き、全ての点で崩壊しないことを確認する。

方法 2 は荷重の特質に応じて設計裕度を与える partial safety factor¹⁰⁾を導入し易く、後述の一般構成式を用いる方法にもそのまま使用できる。なお、「解の唯一性定理」により、極限荷重には負荷履歴に依存せず、ここで言う「指定された順序どおりに荷重を付与」は負荷履歴効果の考慮でなく、複数の設計荷重点を漏れなく評価することを意図している。

一般構成式を用いる方法では、設計荷重を与えた弾性体の変形から荷重-変位曲線上の参照弾性勾配を定め、設計裕度を乗じた荷重を付与して行き、式(2)の限界線を超えないことを確認すればよい。参照弾性勾配は、荷重の付与過程で生じる代表的な設計荷重に対してそれぞれ用意する必要がある。

4. 累積非弾性ひずみの制限

4.1 Bree 線図による方法 極限解析が応力分類とマクロ変形制限の点で等価であることから、弾性設計もしくは前述の方法による一次応力制限を前提に、定常的一次応力と繰返し二次応力に対する簡便モデルをベースに導かれた Bree 線図¹¹⁾（詳細省略）によるシェイクダウン判定が可能となる。一次応力パラメータ、 X は λ/λ_L (λ_L は参照降伏点に対する)とすればよい。 X に応じて同線図から二次応力範囲の許容限界を定め、例えば文献¹²⁾の方法によりピーク応力の影響を除外した許容性判定に持ち込める。

二次応力による広範な降伏域を生じる高速炉では様々な非弾性ひずみ累積要因が考慮される⁴⁾が、軽水炉では Bree 線図に類する方法のみでも問題を生じておらず、圧力機器では、入念な累積非弾性ひずみ評価の必要性があまり感じない。

4.2 弾完全塑性解析による方法 弾完全塑性体は高応力条件下で高精度非弾性構成式よりも安全側のひずみ累積挙動を与える¹³⁾ため、実証炉設計方針⁴⁾では、弾完全塑性解析で得られる主ひずみを板厚平均成分、等価線形化表面成分に分類してそれぞれ定量的に制限する方法を採用している。低応力条件下では弾完全塑性解析が非安全側になりうるが、この領域は弾性設計で許容されてきたシェイクダウン領域にほぼ一致し、非安全性を問題視する必要はないと見込まれる。

定量的評価では応力分類に似たひずみの分類がなされる。

このため、定量的制限は（分類を要さない）ピークひずみに対する ASME NH¹⁴⁾の制限 (5%) に留め、マクロ変形に係わる板厚平均や等価線形化表面ひずみの制限には、シェイクダウン判定を代用する方法も考えられる。三次元体のシェイクダウン限界は、荷重変動を漸増させた弾完全塑性解析によって代表点変位の変化状況を概観して定める方法がある¹⁵⁾。

5. クリープ疲労損傷の制限(ピークひずみ範囲評価)

疲労損傷の制限に用いる一次+二次応力によるピークひずみ範囲、 $\Delta\varepsilon$ は次式で近似できる⁴⁾。

$$\Delta\varepsilon = [1 + (q_p - 1)\{1 - (2\sigma_y/S_p)\}]\sigma_p/E \quad (3)$$

ここに、 S_p は弾性解析における一次+二次ピーク相当応力範囲、 q_p はピークひずみ範囲に対する弾性追従係数である。 q_p は同一荷重サイクルに対する弾性及び非弾性解析によるピークひずみ範囲の比で定まり、一般にその決定には非弾性解析を要する。ただし、 q_p は構成式依存性が小さく¹⁶⁾、弾完全塑性解析によって定めたものを広く使用してもよい⁴⁾。

q_p は Kq_n (K : 弾性応力集中係数、 q_n : 公称ひずみで定義した弾性追従係数)で近似可能⁴⁾。更に、現実的には $q_n \leq 3$ とされる³⁾。鋭い切欠きを有する試験体のクリープ疲労試験データから、 K は 2 以上とすることを要さない¹⁷⁾。類似形状の解析等から K や q_n が推定できれば非弾性解析を要さない。

ただし、これらの手法の妥当性は既往規格を満足する条件下で確かめられており、前述の一次応力制限の満足を前提として適用が図られる。

クリープ損傷は $\Delta\varepsilon$ をベースに定めた初期応力と q_p を用いた応力緩和解析結果に基づき評価しうる。

6. おわりに

既往規格と構造力学的帰結の上で整合する（比例負荷に基づく）一次応力制限を出発点とすることで、弾性解析と全面非弾性解析の間を補完し、Seamless で Multi-level な設計規格を構成する部分非弾性解析に基づく高温圧力機器設計法の全体概略を提案した。そこでは応力分類は必須ではなくなった。

参考文献

- 1) 例えば、A. Javanovic, EPRI/DOE - Conference on Advances in Life Assessment and Optimization of Fossil Power Plants, EPRI, 2002.
- 2) Y. Nakagawa, et al., ICONE3, 1995, p. 255.
- 3) K. Iida, et al., Nucl. Engng. & Des., 98, 1987, p. 305.
- 4) 日本原電, 高速増殖実証炉高温構造設計方針 (案), 1999.
- 5) 日本機械学会, 発電用原子力設備規格 設計・建設規格, JSME S NC1-2001, 2001.
- 6) 例えば、R. K. Penny and D. L. Marriott, Design for Creep, McGraw-Hill, 1971.
- 7) T. Fujioka, ICONE9, Paper #369, 2001.
- 8) 例えば、藤岡, 他 6 名, 電中研究報告, T94036, 1995.
- 9) ASME, B & PV Code, Section III, 2001.
- 10) EC, The Design-by-Analysis Manual, EUR19020EN, 1999.
- 11) J. Bree, Journal of Strain Analysis, Vol. 2, 1967, p. 226.
- 12) A. Okamoto, et al., ICPVT-9, Vol.2, 2000, p. 613.
- 13) Igari, T., et al., Trans. of SMiRT-14, Vol. L, 1997, p. 213.
- 14) ASME, B & PV Code, Sec. III, Div. 1, SS NH, 2001.
- 15) 例えば、H. Kaguchi, et al., ASME/JSME PVP, PVP-Vol. 360, 1998, p. 217.
- 16) N. Kasahara, Proc. of CREEP7, JSME No. 01-201, 2001, p. 625.
- 17) T. Fujioka, et al., PVP-Vol. 338, ASME, 1996, p. 43.