

原子炉配管の LRFD (荷重耐力係数設計) 手法

Load and Resistance Factor Design For Piping of Nuclear Power Plant

普遍学国際研究所	高瀬 健太郎	Kentaro TAKASE	Member
	真木 紘一	Koichi MAKI	Member
	宮 健三	Kenzo MIYA	Member
日本原子力発電	肥田 隆彦	Takahiko HIDA	

A research project in ASME is developing a technical basis for reliability-based load and resistance factor design (LRFD) methods for piping in nuclear power plant. In LRFD, the probabilistic properties of load and resistance of components are taken into consideration. There are several advantages in LRFD methods comparing to the traditional design methods based on the deterministic theory. In this document theoretical basis of LRFD is discussed and the present research progress in ASME is reviewed based on the interim report.

Keywords: LRFD, ASME, Probabilistic Properties of Load and Resistance

1. 背景

米国機械学会 (ASME) は、先駆的に原子力発電設備の維持規格策定に取り組み、1971年に供用期間中検査を規定した ASME Code Sec. XI を策定している。その後、ASME Code Sec XI の 1974 年版では、検査で発見された欠陥の成長評価と機器の健全性に基づく欠陥評価基準が新たに導入された。

このように Sec. XI には、供用期間中検査、予防保全、補修と取替えの決定等にリスク情報を活かした手法が取り入れられており、稼働率向上等の観点から、既に大きな成果を挙げていることは周知の事実である。

これに対して構造設計規格である Sec. III は、現在も主に決定論的、機構的な設計手法に依拠している。しかしながら、全ての設計は、不確定性を伴う。具体的には、荷重条件、材料特性、解析モデルの精度、幾何学的特性、製造及び据付け精度、試験検査結果及び実際の使用条件に関わる不確定性である。これまでの工学的設計手法は決定論的な安全係数で不確定性を扱ってきたため、信頼性レベルに一貫性が無く、時に過剰に保守的なものとなっており、個々の不確定性の効果や安全性の実際的な裕度に対し明確な考察はなされていなかった。

このような状況の中、近年、確率論的設計解析手法が開発され、統計的なモデルや確率論的解析により不確実性や無作為性を扱うようになってきた。そして、近年の計算機資源や確率論的設計のためのツールが利

用可能になったことから、複雑な設計問題に対しても確率論的解析と最適化を効率的に適用可能な状況が整ってきた。現在 ASME では LRFD 手法を原子炉配管に適用すべく検討が行われており、2005 年 4 月 6 日には中間報告が出されている[1][2]。

そして、こうした確率論的手法は米国鉄鋼建設学会及び米国コンクリート学会等の設計コードでは既に取り入れられており、実際の構造物の設計に適用され、運用されてきた実績を持っている。

2. LRFD (荷重耐力係数設計) 手法

2.1 荷重係数、耐力係数

従来の許容応力設計では、構造物に係る荷重の総和に対して、強度 (耐力) に安全率を見込むことによって安全性を担保してきた。構造物に N 種類の荷重が作用している場合、次式の様に表現できる。

$$\phi R = \sum_{i=1}^N L_i \quad (1)$$

ここで R は構造物の耐力、 L_i ($1 \leq i \leq N$) は構造物に作用する i 種類目の荷重である。耐力 R の係数 ϕ は安全率を見込んで設定する。

これに対して LRFD では次式の様になる。

$$\phi R = \sum_{i=1}^N \gamma_i L_i \quad (2)$$

ここで ϕ は耐力係数、 γ_i は*i*種類目の荷重に対する荷重係数と呼ばれる。荷重係数はそれぞれの荷重の確率論的特徴を反映して決めることになり、これにより異なる種類の荷重を統一的に扱うことが可能となる。この点が、唯一の係数のみを持つ許容応力設計のフォーマットとは大きく異なっている。

2.2 限界状態関数

限界状態関数 g は、耐力、荷重の関数であり、 $g < 0$ は構造物が破損している状態に対応する。典型的には次式で表される。

$$g = R - \sum_{i=1}^N L_i \quad (3)$$

ここで関心があるのは $g < 0$ となる確率である。

2.3 破損確率と信頼性指数

手法を理解するためにまず、構造物に係る荷重が一種類である場合を考え、これを L で表す。また、構造物の耐力を R で表す。ここで限界状態関数 g として次式を採用する。

$$g = R - L \quad (4)$$

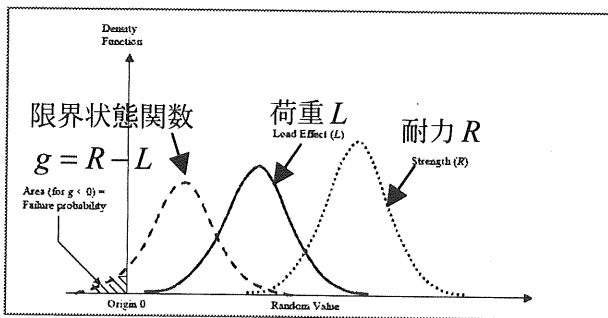


Fig. 1 Example of probability distribution of load L , resistance R and performance function g .

LRFD では耐力及び荷重を確率変数と見なすことが本質的に重要な点である。この様子を Fig. 1 に示す。Fig. 1 には限界状態関数 g の確率密度分布も併せて示しているが、この分布は耐力 R 及び荷重 L の確率密度分布より求められる。そして g の確率密度分布を $g < 0$ となる領域について積分することにより、総破損確率が計算される。

以下、簡単のため、2つの確率変数、即ち耐力 R と

荷重 L はそれぞれ正規分布に従うものとする。正規分布は確率変数の平均値と標準偏差の2つのパラメータで分布形状が定められる。耐力 R と荷重 L の平均値をそれぞれ μ_R, μ_L 、標準偏差を σ_R, σ_L とする。

ここで議論の見通しを良くする目的で変数 R', L' を次式で定義しておく。

$$R' = \frac{R - \mu_R}{\sigma_R} \quad (5)$$

$$L' = \frac{L - \mu_L}{\sigma_L} \quad (6)$$

即ち、 R', L' はどちらも平均 0、標準偏差 1 の正規分布に従う。構造物の耐力が R 、係る荷重が L となる事象の確率密度を $P(R, L)$ で表すと、

$$P(R, L) \propto \exp\left(-\frac{1}{2}(R'^2 + L'^2)\right) \quad (7)$$

となり、 $R'-L'$ 平面上における原点からの距離のみの関数になる。定性的には、 $R'-L'$ 平面における原点においてその確率密度は最大になる。これは原点が耐力、荷重共に平均値となる事象が、最も確率密度が高いことに対応する。そして $R'-L'$ 平面における原点からの距離が大きくなる程、その確率密度は小さくなっていく。

また、 R', L' を用いて式(4)の限界状態関数 g は次式のように表される。

$$g = \sigma_R R' - \sigma_L L' + \mu_R - \mu_L \quad (8)$$

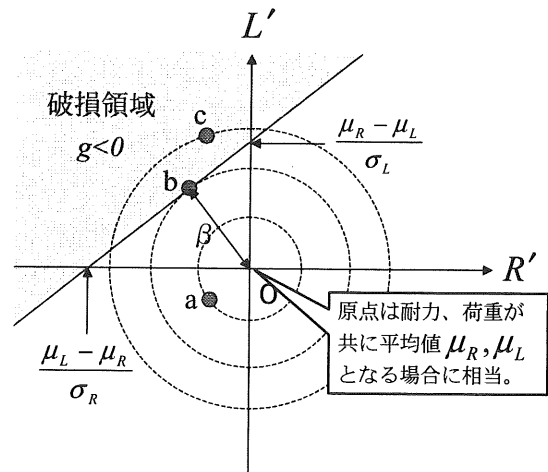


Fig. 2 $R'-L'$ plane and failure area and surface.

Fig.2 は R'-L' 平面上における破損領域 $g < 0$ を示したものであり、状態 a ~ c はここでの説明を補助する目的で例示している。

状態 a, b, c の中では、状態 a が実現する可能性が最も高いが、破損直線 $g=0$ よりも下にあるので、状態 a では破損は生じない。状態 b 及び c では構造物の破損が生じる。この2つの状態を比較して、状態 b は状態 c よりも原点に近いので、より実現する可能性が高い。

このように考えて、この平面上において設計上最も関心がある点は、破損領域上の点の内、最も原点に近い点 b であることが分かる。この点は最も実現確率の高い破損点、即ち最確破損点である。

構造物の全破損確率 P_f は、破損領域における各点の、確率密度分布を積分することによって求められる。

$$P_f = 1 - \Phi(\beta) \quad (9)$$

$$\Phi(\beta) = \int_{-\infty}^{\beta} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2}x^2\right) dx \quad (10)$$

ここで β は最確破損点 (Fig.2 における点 b) と R'-L' 平面の原点との距離であり、信頼性 (安全性) 指数と呼ばれる。ここで、構造物の全破損確率 P_f はただ一つの指標 β で計算できることと、 β が大きい程、 P_f が小さくなる点が重要である。 β は次式で求められる。

$$\beta = \frac{\mu_R - \mu_L}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_L^2}} \quad (11)$$

式(11)で分かる様に、荷重の平均値 μ_L が大きくなれば β は小さくなり、耐力の平均値 μ_R が大きくなれば β は大きくなる。これは、 β が大きい程、構造物の全破損確率が小さくなることと対応している。

上記は、構造物に1種類の荷重が作用している場合であったが、 N 種類の荷重が作用しており、かつそれらの荷重が全て正規分布に従う場合には信頼性指数 β は

$$\beta = \frac{\mu_R - \sum_{i=1}^N \mu_{Li}}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sum_{i=1}^N \sigma_{Li}^2}} \quad (12)$$

となる。ここで μ_{Li}, σ_{Li} は i 種類目の荷重の平均値及び標準偏差である。

上記手法は FOSM (First-Order Second Moment) 法と呼ばれる手法である。ここまでは、耐力及び荷重といった確率変数が正規分布に従う場合について議論してきたが、実際はもちろん様々な分布形を持ち得る。一般の確率分布を持つ耐力及び荷重に対しては FOSM 法を改良した AFOSM (Advanced FOSM) 法と呼ばれる手法が適用される。その基本的な考え方は FOSM 法と同様であるが、反復計算が行われ、信頼性指数 β を収束させることで結果を得る点が FOSM 法と異なっている。

3. 荷重の組み合わせ 及び 基礎確率変数

2005年4月6日付けの ASME の中間報告書が発行された時点においては、原子炉配管に係る荷重の内、一次荷重のみが取り扱われており、熱応力などの二次荷重については今後の検討課題となっている。

一次荷重の内訳は①重量、②内圧、③地震荷重となっている。ASME コードでは、次の2種類の地震を考慮している。

- ・ 運転基準地震 (OBE : Operating Basis Earthquake)
ASME BPV コードの使用限界 B, C に用いられる。この地震は典型的には 100 年に 1 回生じると考えられる。
- ・ 安全停止地震 (SSE : Safe Shutdown Earthquake)
ASME BPV コードの使用限界 D で使用される。この地震は典型的には 1000 年に 1 回生じると考えられる。

原子炉配管用荷重組み合わせの議論においては、他の学協会のコード等が参考にされ、次の各条件のそれぞれに対して推奨案が出されている。

- ・ 一般条件 (配管が自らの重量を支持できることを保証)
 - ・ 運転条件 (ASME BPV コードの使用限界 A)
 - ・ 過渡荷重条件 (ASME BPV コードの使用限界 B)
 - ・ 緊急荷重条件 (ASME BPV コードの使用限界 C)
 - ・ 事故荷重条件 (ASME BPV コードの使用限界 D)
- また、それぞれの条件における破損クライテリアについて検討がなされている。そして、これらの議論に基づいて、LRFD に用いる配管の限界状態関数についても、上記の各条件について推奨案を示している。

LRFD 法を実際に適用するためには、荷重、強度に関わる各変数の確率分布特性が必要である。ASME の

中間報告書においては以下のような項目について部分的に検討されている。

- ・ 配管の典型的な材料のリストと、それらに対する降伏応力や極限強度等のデータ、確率分布特性
- ・ 配管の幾何学的パラメータ（直径や肉厚等）の確率分布特性に関するデータ
- ・ 配管の自重や、原子炉冷却材の密度等に関するデータ
- ・ 地震荷重の確率論的特性に関するデータ

例えば、「配管の直径の統計的性質は標準偏差の2倍が±公差に等しい正規分布に従うものとする。」とある。

LRFDに限らず、確率論的手法においては、データの収集は非常に重要なタスクであり、既存のプラントにおけるデータ採取、あるいは実験室試験を行っていくことの重要性について主張されている。

4. LRFD手法の利点

従来の決定論的手法である許容応力設計に対するLRFD手法の利点については、例えば N 種類の荷重が作用している構造物に対する式(1)と式(2)を比較することにより理解できる。すなわち、許容応力設計に対応する式(1)においては荷重 $1 \sim N$ に対しての余裕を見込むために、それぞれの荷重について大きな値を用いる必要があった。その結果として過剰な裕度が生じることが容易に想像できる。

これに対してLRFD手法に対応する式(2)においては荷重 $1 \sim N$ が「同時に大きな値を取る確率は非常に低い」ことを考慮して、それぞれの荷重に対しての荷重係数を定めることになり、結果として異なる荷重間のバランスのとれた合理的な安全性の確保が可能になる。全体として、次のようなベネフィットがあることが理解できる。

- ・ 荷重、強度、劣化機構における不確かさへの対処法を与える。
- ・ 鋼材のグレードのような材料に関する適合性と信頼性を与える。
- ・ 既にLRFD手法を導入している他産業の基準との整合性を与えることができる。
- ・ 資源の効果的かつ経済的な利用に結びつく。
- ・ 特に、配管に対するLRFD手法の適用により、横揺れ防止策の定量的軽減によってコストの削減が見込まれる。実際、建築構造に対するLRFD適用

の経験では、3～5%のコスト削減が示されている。

- ・ プラント運転中の診断・保守の軽減により、全寿命中のコスト削減は、更に大きな期待が可能である。

5. まとめ

本論文では、原子力分野におけるLRFD手法の適用可能性について検討する目的で、手法の概念、利点を明らかにし、ASMEにおける検討状況について紹介した。これらの利点を現実のものとするために、今後実施されるべき項目としては以下が挙げられる。

- ・ 現時点では一次荷重についてのみ検討されているがこれに疲労や熱荷重を組み合わせること。
- ・ 材料の機械的性質の実験室試験と、プラントでの寸法や公差の測定等のデータ収集。
- ・ 荷重強度の確率変数間の感度解析と相関効果。
- ・ 信頼性レベルの目標範囲の確認。
- ・ LRFDフォーマットに用いる局所安全係数の計算。
- ・ 目標信頼性レベル、耐力係数、荷重係数を取りまとめた配管用LRFD指針と規則の試案。
- ・ 荷重耐力係数の使用法をユーザに例示する為の設計例。

将来、日本の原子力発電プラントに適用される可能性も考慮しつつ、今後もASMEにおけるLRFD手法における議論と動向に注目していく必要がある。

謝辞

本研究は平成16年度に原子力発電株式会社からの委託研究により実施された成果の一部である。委託元の関係者には、ご教示いただきましたことに感謝の意を表します。

参考文献

- [1]ASME Special Working Group, “Interim Research Report Development of Reliability-Based Load and Resistance Factor Design (LRFD) Methods for Piping”, ASME, April 6, 2005
- [2]普遍学国際研究所, “確率論を利用した原子炉設計に関する検討 (原子炉配管のLRFD手法)”, 2005