

規格基準の将来動向に関する 2、3の話題

森下 正樹 Masaki MORISHITA
核燃料サイクル開発機構

解説 記事

1. はじめに

原子力発電設備の構造健全性に係る規格基準としては、その代表例としてASME Boiler and Pressure Vessel Code, Sec. III (Rules for Construction of Nuclear Power Plant Components) 及び Sec. XI (Rules for Inservice Inspection of Nuclear Power Plant Components) がある。我国においても、日本機械学会から、設計・建設規格及び維持規格などが対応する規格基準として発行されており、民間規格の活用の観点から、実際の規制に適用するための環境整備が進められている。⁽¹⁾

ASME規格は数十年の歴史を持つが、近年では、いわゆるリスクインフォームド技術を全面に取り入れる規格改訂の検討や作業が精力的に進められている。一方、我国においても、設計から運転までを包括的に管理して安全裕度の最適化を可能とすることを目的とした、システム化規格の概念に関する検討が行われている。⁽²⁾

本稿では、このような、規格基準の質的な高度化に

繋がるこれらの動向について概観することとし、今回はASME規格におけるリスクインフォームド技術の適用の具体例として、配管の設計規格への適用が検討されているLoad Resistance Factor Design (LRFD 荷重耐力係数法と訳される) を中心に述べる。

2. ASME規格におけるリスク技術

ASME規格におけるリスクインフォームド技術の適用は、ISI規格であるSec. XIにおいて先行的に行われてきた。すでに、リスクに基づくISI対象機器の分類や検査手法の選択の方法が、コードケースとして発行されている。⁽³⁾

一方、設計基準であるSec. IIIは、現在は確定論的な設計手法を用いている。設計に含まれる種々の不確かさ(荷重条件、材料特性、解析精度、製作精度など)は、発生応力と許容値の不等式である設計方程式における、単一の設計係数(安全裕度)によって処理されている。このような設計手法は、もちろんこれまでの実績があり、信頼性の高いものであるが、設計で保障

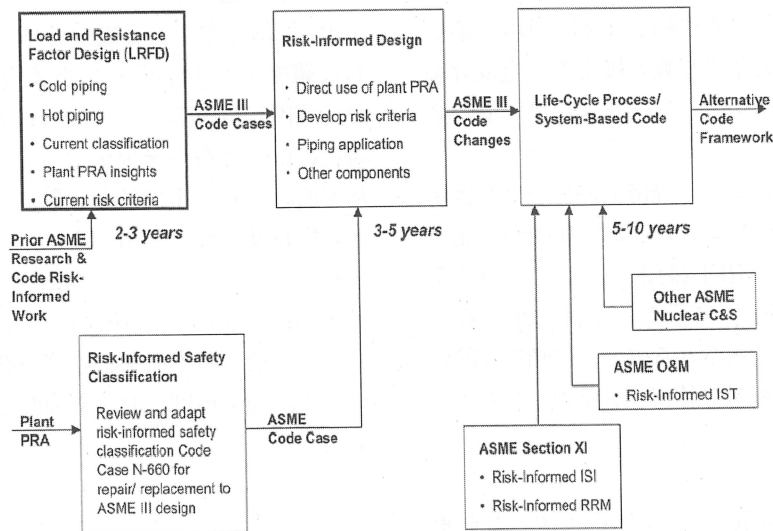


図-1 ASME規格高度化の長期ビジョン

される信頼性のレベルは必ずしも一定ではなく、概して過剰に保守的になる傾向がある。

そこで、将来的にはSec. XIと一体化してプラントのライフサイクル全般を体系的にカバーする規格を作り上げることを視野に入れて、いわゆるリスクインフォームド技術に基づいたSec. IIIの抜本的な改訂が構想されている。図-1は、その全体構想を示すものである。(4)、(5)

その第一歩として、Sec. IIIクラス2/3配管の一次荷重(内圧、自重、地震荷重)に対する設計にLRFDを適用するための検討が進められている。(6)

3. LRFDの概要

確率論に基づく構造信頼性理論は古くから研究されており、教科書も多数出版されている。(7) 一方、LRFDに基づく構造基準も、建築(8)や海洋構造物(9)その他において実用されている。これらの構造基準において、LRFDの利点は、構造物の終局状態における挙動を把握したうえで、各種の荷重の不確かさを陽に取り入れた合理的な設計を可能とする点にある。

文献(10)によれば、信頼性理論に基づく手法は、4つのレベルに分類することができ、それぞれの概要と特長は以下のようなものである。

LEVEL 1: 部分安全係数 (partial safety factor) の使用により、信頼度を間接的に評価。

LEVEL 2: 確率変数を正規分布に従うと仮定、その統計的性質を平均値と標準偏差により定義。信頼度指標 β (後出) を使用。正規分布以外の分布も扱える改良型もある。

LEVEL 3: 多変量の結合確率密度を陽に使用。系としての評価や時間依存型変数も扱える。定量評価のために数値積分やシミュレーションコードが必要となる。

LEVEL 4: 上記のいずれかと、経済面のデータを併用する。最大利益や最小コストの定量評価が可能。

上記の定義によれば、LRFDはLEVEL 2に該当するが、その背景にはLEVEL 4に示される目的がある。

以下、LRFDにおいて活用される確率、信頼性理論の基本的な事項と部分安全係数の算出法を整理しておく。

3-1) 破損確率

信頼性理論に基づく構造設計では強度 (R) と荷重 (L) を確率変数として取り扱う。この場合、構造要

素の破損確率 (P_f) と信頼度 (R_c) はそれぞれ下式で与えられる。これは、古典的信頼性理論において応力-強度モデル (Stress-strength model) と呼ばれるもので(11)、その基本的概念は図-2に模式的に示される。

$$P_f = P(R < L) \quad (1)$$

$$R_c = P(R > L) = 1 - P_f \quad (2)$$

いま、強度と荷重の確率密度関数をそれぞれ $f_R(x)$ 及び $f_L(x)$ とすると、破損確率は、荷重が強度を超える確率として、次式で表される。

$$P_f = \int_{-\infty}^{\infty} F_R(x) f_L(x) dx \quad (3)$$

ここで、 $F_R(x)$ は強度の累積確率分布関数で、

$$F_R(x) = \int_{-\infty}^x f_R(\xi) d\xi \quad (4)$$

である。

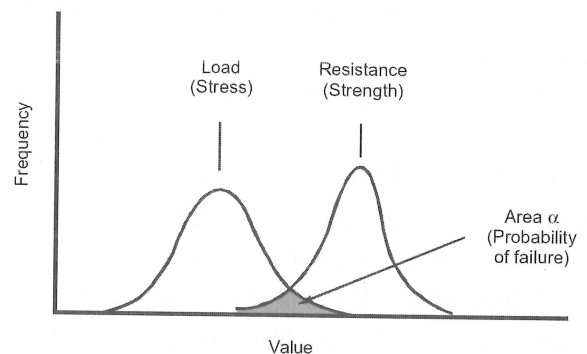


図-2 強度と荷重の分布に基づく破損確率

3-2) 信頼度指標

上記(3)式による破損確率は、強度と荷重の具体的な確率分布形が既知であるときに計算可能であるが、実際にはそのような場合は多くない。このような場合には、分布形を仮定することなく、強度と荷重の基本的統計量(平均値と分散)のみに基づいて評価できる信頼度指標 β が用いられることが多い。これは、いわゆる二次モーメント法 (First Order Second Moment, FOSM) と呼ばれるものである。

まず、最も基本的な、強度と荷重の2変数の場合について、安全裕度 (M) を強度と荷重の差として定義する。(12)

$$M = R - L \quad (5)$$

信頼度指標 β は、 L と R がそれぞれ正規分布に従

い、かつ互いに独立であるとき、

$$\beta = \frac{\mu_R - \mu_L}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_L^2}} \quad (6)$$

によって定義される。

ここで、

- μ_R : 強度 R の平均値
- μ_L : 荷重 L の平均値
- σ_R : 強度 R の標準偏差
- σ_L : 荷重 L の標準偏差

である。

また、 L と R がそれぞれ正規分布に従い、かつ互いに独立である場合には、破損確率と信頼度指標の間に次の関係が成り立つ。

$$P_f = \Phi(-\beta) \text{ or } \beta = -\Phi^{-1}(P_f) \quad (7)$$

ただし、 $\Phi(\cdot)$ は累積標準正規分布関数。

より一般的な多変数 (例えば荷重の種類が複数である場合) が扱える方法として、改良二次モーメント法 (Advanced First Order Second Moment, AFOSM) がある。AFOSMでは、構造の破損に寄与する因子 (例えば、強度 R と荷重 L_1, L_2, L_3, \dots) を X_1, X_2, \dots, X_n とし、破損限界を次式のように表す。

$$g(X) = g(X_1, X_2, \dots, X_n) = 0 \quad (8)$$

変数 X を正規化 ($x_i = (X_i - \mu_i) / \sigma_i$) すると、関数 $g(x_1, x_2, \dots, x_n)$ は n 次元空間における曲面を表すが、この曲面と原点との距離が最小となる曲面上の点を $P(x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*)$ とするとき、その距離を信頼度指標 β として定義する。すなわち、

$$\beta = (x_1^{*2} + x_2^{*2} + \dots + x_n^{*2})^{1/2} \quad (9)$$

(8) 式において、 $X_1=R, X_2=L_1, X_3=L_2, \dots$ と置き換えると、強度 R 、荷重 $L_i, i=1, 2, \dots$ の組に対する信頼度指標は、(9) 式と同様にして、

$$\beta = (R_1^{*2} + L_1^{*2} + L_2^{*2} + \dots + L_n^{*2})^{1/2} \quad (10)$$

で与えられる。⁽⁶⁾

図-3はAFOSMにおける信頼度指標の決定法を2次元の場合について模式的に示したものである。⁽¹⁰⁾

3-3) 部分安全係数⁽⁶⁾

従来の設計 (基準) による破損の制限は、一般形式

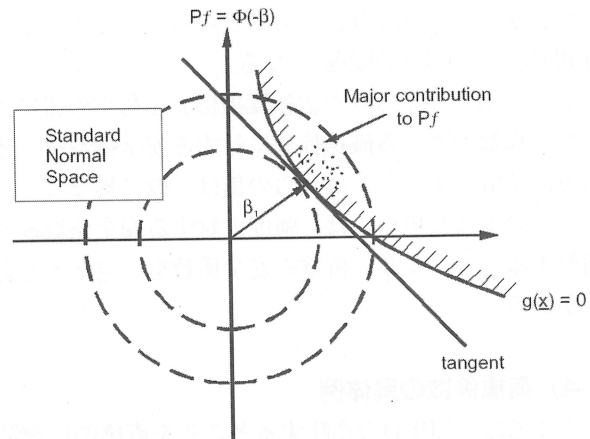


図-3 破損限界曲面と信頼度指標⁽¹⁰⁾

として以下のように表される。

$$\frac{R}{FS} \geq \sum_{i=1}^m L_i \quad (11)$$

ここで、 R は強度、 L_i は荷重成分、 FS は設計係数 (安全係数)。強度や荷重に関する不確かさ、ばらつきを単一の係数 FS によって考慮する。各々の因子が持つ不確かさがそれぞれ異なることの影響は、従って、この方法では取り入れることができない。

一方、LRFDでは、考慮すべき荷重の各々に設計係数 (>1) を乗じたうえでそれらの線形和をとり、これと、やはり設計係数 (<1) を乗じた強度との不等式を満足することを設計要求とする。

$$\phi R_n \geq \sum_{i=1}^m \gamma_i L_i \quad (12)$$

ここで、 ϕ は強度係数、 R_n は公称 (設計) 強度、 L_i と γ_i はそれぞれ番目の荷重成分及び対応する荷重係数である。

強度と各荷重成分に個別の係数を与えることによって、これらの不確かさや発生頻度などが信頼性に与える影響を個別に評価したうえで設計において考慮することが可能となる。

これらの係数の平均値は、一般形で表せば、(10) 式により求めた β を与える強度 R^* と L_i^* から、以下により決定することができる。

$$\phi = \frac{R^*}{\mu_R} \quad (13)$$

$$\gamma_i = \frac{L_i^*}{\mu_{L_i}} \quad (14)$$

規格基準において部分安全係数を規定する際には、上記の一般形から出発し、現在の設計のプラクティス

と整合する信頼度を与えるものとなっているか、という視点からの較正が必要となる。

また、ある与えられた信頼度指標 β と荷重の組に対して、複数の異なる破損様式に対する安全係数を上述の方法で計算すると、これらの値は一般に異なってくる。そのような場合には、強度に対する安全係数 ϕ を調整することにより、荷重の安全係数を一定とする必要がある。

3-4) 荷重係数の具体例

ここでは、LRFDの意味するところを直感的に理解するための具体例として、建築分野の設計基準⁽¹³⁾における従来法とLRFDによる荷重係数の取扱を対比して示す。

まず、従来法による設計基準では、設計で考慮すべき種々の荷重の組合せを、例えば以下のように与える。

$$\sum_{i=1}^m L_i = \text{下記組合せのうち最大値}$$

$$\begin{aligned} & D + L' \\ & (D + L' + W) \times 0.75 \\ & (D + L' + E) \times 0.75 \\ & D - W \\ & D - E \end{aligned}$$

ここで、 D 、 L' 、 W 、 E はそれぞれ死荷重、全活荷重、風荷重、及び地震荷重。全活荷重は、 $L' = L + (L_r \text{ or } S \text{ or } R)$ 、ただし、

- L : 居住者による活荷重
- L_r : 屋根に作用する活荷重
- S : 雪荷重
- R : 雨荷重

また、係数0.75は1.33の逆数で、風荷重あるいは地震荷重と活荷重を同時に考慮する場合の許容応力の割増し(1/3)に対応するもの。

従来法では供用中の荷重に係数を乗じることはせず、強度にのみ安全係数を考慮する。活荷重は死荷重と比較して不確かさが大きく、従って予測精度も劣るが、個々の荷重に対する信頼度を均一にすることが不可能であるのは明らかである。

一方、LRFDでは、荷重の組合せは、個々の荷重に対する係数を用いて、例えば以下のように規定する。

$$\sum_{i=1}^m \gamma_i L_i = \text{下記組合せのうち最大値}$$

$$\begin{aligned} & 1.4D \\ & 1.2D + 1.6L + 0.5(L_r \text{ or } S \text{ or } R) \\ & 1.2D + 1.6(L_r \text{ or } S \text{ or } R) + (0.5L \text{ or } 0.8W) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & 1.2D + 1.3W + 0.5L + 0.5(L_r \text{ or } S \text{ or } R) \\ & 1.2D \pm 1.0E + 0.5L + 0.2S \\ & 0.9D \pm (1.3W \text{ or } 1.0E) \end{aligned}$$

各荷重に乗ずる係数は(考慮すべき破損様式毎に定められる強度係数と組合せたうえで)、個々の荷重あるいはそれらの組合せに対する信頼度(破損確率)が一定となるよう定めることが可能となる。例えば、不確定性が相対的に大きく予測精度の低い荷重に対する係数は相対的に高い値を、また発生頻度の低い荷重に対しては相対的に低い値を与える。

また、例えば供用期間が30年と50年の場合で風荷重や地震荷重に対する係数を変化させる、といった形で、信頼性を保障すべき期間の考慮も可能となる。

ただ、上記の考え方を具体的に展開して設計基準としての係数を定めるためには、個々の荷重の統計的性質などに関する多大な研究や経験が求められる。

4. 各種構造物の目標信頼度⁽¹⁰⁾

(6)式あるいは(10)式によって定義される信頼度は破損確率と一対一に対応する。従って、目標信頼度は許容破損確率と等価である。

図-4は建築、橋梁、船舶など種々の構造物に関する基準において定められている目標信頼度を整理したものであるが、⁽¹⁰⁾それぞれの構造物の破損がもたらす影響度合いとの関係において、コンセンサスとしてどの程度の破損確率が許容されているか、という視点で興味深い。以下、この文献における記述を抜粋してみると(信頼度と破損確率を明確に区別していないことに注意願いたい)：

- ・ 各種建築基準による一般建築の目標信頼度は建築形式、使用目的、荷重(死荷重、活荷重、風、地震など)によって変わる。地震時の要求信頼度(survival、倒壊しないこと)は、 5×10^{-2} と、かなり低い。
- ・ 一方、地震以外の場合の破損に対しては、その影響度合い(consequence)により、深刻な影響を与える場合は 7×10^{-5} 、極めて深刻な影響の場合は 1×10^{-5} といった許容破損確率が設定されている。
- ・ 船舶では、破損様式や破損の影響により、 $10^{-3} \sim 10^{-5}$ 辺りが目標とされている。海洋構造物の場合は、 10^{-4} 程度が一般的。
- ・ パイプラインの目標信頼度は内容物(石油かガス

か)、海上か陸上か、また陸上の場合には周辺の人口密度などにより変わる。陸上ガスラインの場合、典型的な目標信頼度は $10^{-4} \sim 10^{-6} / \text{km} \cdot \text{年}$ 。

・原子力は他産業と比較して最も高い信頼度 (10^{-7} , $\beta = 5.2$) を目標としている。

などである。

原子力設備の構造物が、極めて高い信頼度を目標として設計されていることがわかる。

5. まとめ

ASME規格では、リスクインフォームド技術の積極的な活用により信頼性と合理性の両立を可能とする規格の高度化の検討が盛んである。本稿では、Sec. IIIの配管設計への適用が検討されているLRFDを中心に、これらの動向の一端を概観した。

参考文献

1. 原子力発電施設の技術基準の性能規定化と民間規格の活用に向けて、平成14年7月22日、原子力安全・保安部会 原子炉安全小委員会
2. 朝田泰英、システム化規格－その基本構想－、フォーラム保全学、Vol. 1, No. 1 (2002)、57-66
3. 例えば、ASME Code Case N-560, Alternative Examination Requirements for Class 1, Category B-J Piping Welds, ASME, 1998
4. Gimpe, R.E. and Balkey, K.R., ASME Nuclear Codes & Standards Risk Management Strategic Plan, Proc. 11th ICONE, Tokyo, 2003.
5. Hill, R., and Nutt M.M., Risk Informed Life Cycle Plant Design, Proc. 11th ICONE, ICONE11-36465, Tokyo, 2003
6. Ayyub, B.A, Hill, R.S., Balkey, K.R., Development of Reliability-based Load and Resistance Factor Design Methods for Piping, Proc. 11th ICONE, ICONE11-36577, Tokyo, 2003
7. 例えば、P.トフークリステンセン他、室津義定監訳、構造信頼性－理論と応用、シュプリンガフェアラーク東京、1986.
8. AISC, Load and Resistance Factor Design, Manual of Steel Construction, 1994.
9. API, Draft Recommendation Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms - Load and Resistance Factor Design, API PR2A-LRFD, 1989.
10. Methods, Applications and Software for Structural Reliability Assessment, Report No. SL/WEM/R/M8663/5/01/C, Corus UK Limited, 2001.
11. 例えば、日本材料学会編、機械・構造系技術者のための実用信頼性工学、153、養賢堂
12. Hasofer, A.M. and Lind, N.C., Exact and Invariant Second-moment Code Format, J. Engineering Mechanics Div., ASCE, 100(EM1)111-121, (1974)
13. Essentials of LRFD, <http://www.AISC.org>

(平成15年 8月 14日)

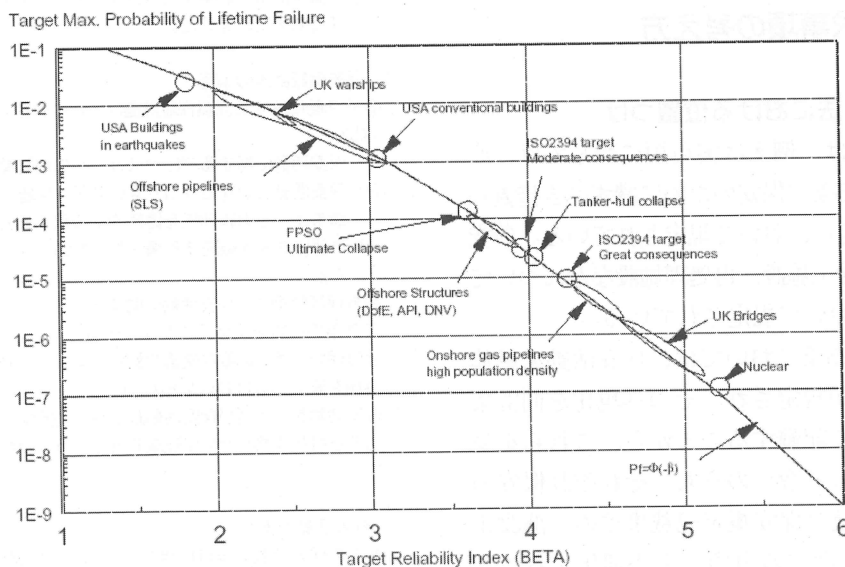


図-4 各種構造物の目標信頼度⁽¹⁰⁾