

構造信頼性の指標に関する欧米比較

防衛大学校 ○学生会員 片出 亮 正会員 香月 智

1. 緒言

近年、土木構造物の設計法を取り巻く環境は、国際標準、説明責任、環境・景観対応などの観点によって大きく変化しており、いわゆる性能規定化の方向へ向かいつつある。これを受けて、「港湾施設の技術上の基準・同解説」<sup>1)</sup>は改訂され、その中には信頼性に基づく性能規定化が行われている。本研究は、信頼性設計で最も重要となる目標信頼性指標を、欧米基準と比較するとともに、事業者と使用者たる国民とのリスク分担の側面から決定する方法について提案するものである。

2. Eurocode-0, ISO2394, Vision2000<sup>2)</sup>およびコードキャリブレーション

信頼性設計法<sup>3)</sup>は、構造物の保有する性能を破壊確率で評価しようとするものであり、この概念に基づくと、「重要な構造物は、破壊確率を小さくする」という、Eurocode-0 や ISO2394 に見られる手法が出来上がる。表-1は、Eurocode-0 に示されている目標信頼性指標の参考値である。これは、安全性レベルを信頼性指標によって管理しようとするものであり、破壊による影響度を安全性レベル向上の費用と対比して安全性レベルを差別化しようとするものである。また、表-3は、ISO2394 に例示されている目標信頼性指標であるが、これは正規確率分布を前提とした場合に、表-2に示す破壊確率と一対一の関係にあるものである。これによると、破壊によってもたらされる影響が小さく、安全対策が高くつく構造物では供用期間中の破壊確率を50%とするのに対し、破壊影響が大きく対策費があまり高くはない場合には、 $10^{-5}$ 程度とすることが示されている。ただし、ここでは、破壊の定義は述べられておらず、構造物への重要性の如何に関わらず、同一の規定によるものと考えられる。一方、米国技術者協会(SEAOC)により示された性能マトリクスでは、図-1, 2に示すように、構造物の弾塑性応答を念頭に置いて破壊限界を多段階に定義した上で、供用期間中に発生する荷重の大きさを頻度区分して、重要な構造物ほど同一荷重に対してより弾性応答に近い限界状態に対応させることを示している。この際、荷重軸には再現確率値と対応させることによって、それを超過する荷重に対しては、構造物が限界値内で応答することを保証できないことを暗黙に示している。よって、この選択肢の提示と、使用者による選択は説明責任と使用者のリスク受容に基づく合意が可能となるため、性能を明示する設計法を理解し易くしている。

もう一つの最も実現性の高い目標信頼性指標の決定法は、港湾基準改定においても用いられたコードキャリブレーションに基づく方法である<sup>4)</sup>。これは、図-3に示すように、過去の基準を満足した実存構造物の有する信頼性指標のばらつきを求めた上で、その平均値などを目標信頼性指標とするものである。なお、一般的に設計基準の実用化を図るには、部分係数法に目標信頼性指標がブレイクダウンされ、この時点で、設計条件により設計結果が有する信頼性指標にばらつきが生じることになるが、図-3に示すように、そのばらつき

表-1 Urocode-0による目標信頼性指標の参考値

安全対策 相対コスト	使用限界 状態	終局限界状態 破壊による影響度		
		小	中	大
高	1.0	2.8	3.3	3.8
中	1.5	3.3	3.8	4.3
低	2.0	3.8	4.3	4.8

表-2  $\beta$ と $P_f$ の関係

$P_f$	$10^{-1}$	$10^{-2}$	$10^{-3}$	$10^{-4}$	$10^{-5}$	$10^{-6}$	$10^{-7}$
$\beta$	1.3	2.3	3.1	3.7	4.2	4.7	5.2

表-3 ISO2394による目標信頼性指標例(ライフタイム)

安全性対策の 相対コスト	破壊の影響			
	小	時々	中	大
高	0	1.5	2.3	3.1
中	1.3	2.3	3.1	3.8
低	2.3	3.1	3.8	4.3

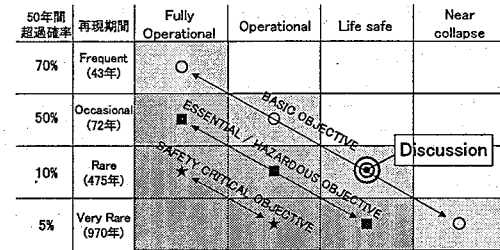


図-1 性能マトリクスの一例(Vision2000)

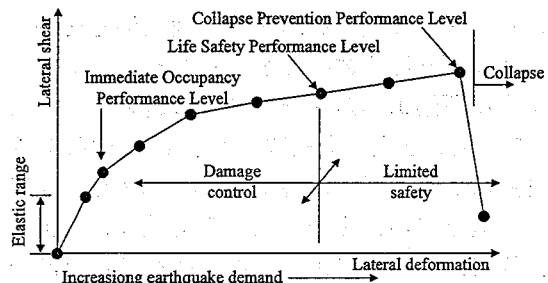


図-2 多段階限界状態の例(Vision2000)

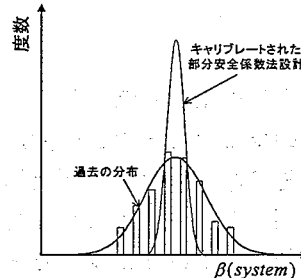


図-3 コードキャリブレーション

を小さくすることができる。

3. 設計者の分担リスクに基づく信頼性指標

前述の3つの手法は、目標信頼性指標に関して述べているものの、信頼性設計法の理論体系的観点から眺めると、やや異なるものである。いま、図-1で◎印で示した限界状態を例に説明すると、構造に働く作用を $S$ 、構造の抵抗を $R$ としてそれぞれのばらつきを前提とし

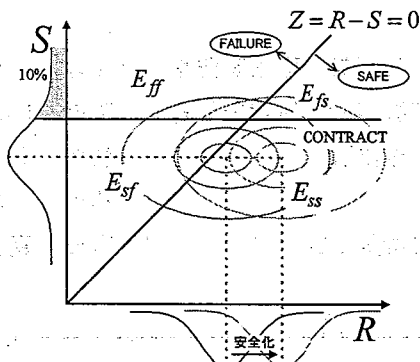


図-4 事象区分

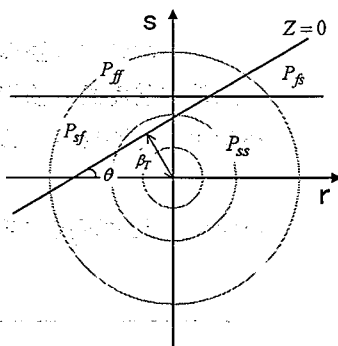


図-5 標準正規確率空間における区分

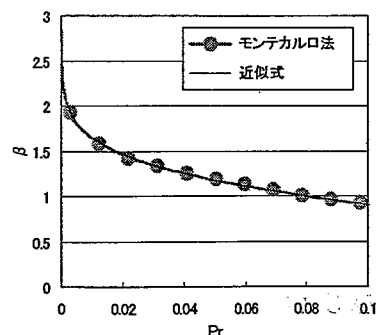


図-6 目標信頼性指標算出式と MC 結果の近似度

( $P_{ff} + P_{fs} = 10\%$ ,  $\theta = 0.524rad$ )

た事象区分図を図-4に示す。まず、破壊限界状態

$$Z = R - S = 0 \quad (1)$$

を境界として、左上半分の破壊状態と右下の安全（非破壊）状態に区分される。その上で、図-2に基づく契約では、ある作用より小さな作用に対して、構造が安全であることを保証している。このため、この構造に起こりうる事象は、次の4つに分けられる。

- $E_{ss}$  : 契約上安全とし、事実安全。
- $E_{ff}$  : 契約上破壊とし、事実破壊。
- $E_{fs}$  : 契約上破壊とし、事実は安全。
- $E_{sf}$  : 契約上安全としたにも関わらず、事実は破壊。

これを次式によって正規化すると図-5のようになる。

$$s = (S - \bar{S}) / \sigma_S, r = (R - \bar{R}) / \sigma_R \quad (2)$$

ここで  $\bar{S}$  ( $\bar{R}$ ) :  $S$  ( $R$ )の平均,  $\sigma_S$  ( $\sigma_R$ ) :  $S$  ( $R$ )の標準偏差。

信頼性指標  $\beta$  は、図-5における ( $Z=0$ ) に対する原点からの距離である。図-4において、安全な構造を設計するとは、抵抗値の確率分布を右側にシフトさせることであり、これは図-5において、 $\beta$  を大きくすることに対応している。この図より、Vision2000型の契約を行ったとしても、設計における真の安全性を約束したことにはならないことがわかる。ただし、構造物の破壊事象が2つに区分され、事象ごとの保証責任が異なることになる。すなわち、

$E_{fs}$  : 基本的に無保証、ただし公共構造では再建コスト ( $C_{rc}$ )。

$E_{ff}$  : 再建コスト+利用者の失った受益効用 ( $C_{rc} + C_e$ )。よって事業主体が負うライフサイクルコスト ( $LCC$ ) は次式となる。

$$LCC = C_i + P_{ff} C_{rc} + P_{sf} (C_{rc} + C_e) \quad (3)$$

ここで、 $C_i$  : 初期建設費用,  $C_{rc}$  : 再建コスト,  $C_e$  : 保証責任費用。

図-5において、4つの確率は、完全排反事象確率である。仮に、市民との合意形成を図-1のような形態で行ったものとする、( $P_{ff} + P_{fs}$ ) が与条件となるので、

表-4 係数表 (近似式)

$A_1$	$B_1$	$C_1$	$D_1$	$E_1$	$F_1$	$G_1$	$H_1$	$I_1$	$J_1$
0.81	-0.95	1.07	3.51	3.77	-2.22	1.16	1.02	4.84	0.01
$A_2$	$B_2$	$C_2$	$D_2$	$E_2$	$F_2$	$G_2$	$H_2$	$I_2$	$J_2$
-0.16	0.45	1.74	-0.02	2.17	0.37	1.22	0.30	0.01	0.84
$A_0$	$B_0$								
1.75	-0.96								

$P_{sf}$  を意志決定すると、目標信頼性指標  $\beta_r$  を決定できることになる。ただし、正規確率分布関数の特性により、厳密な数式化は出来ない。そこで、予め  $P_{sf}, \theta$  を逐次変化させた上で、モンテカルロ法により  $P_{sf}$  を求め、近似式を求めた。すなわち、

$$\beta_r = (A_0 T_1 + B_0 T_2) - \frac{A_1 T_1^2 + B_1 T_2^2 + C_1 T_3^2 + D_1 T_1 T_2 + E_1 T_2 T_3 + F_1 T_3 T_1 + G_1 T_1 + H_1 T_2 + I_1 T_3 + J_1}{A_2 T_1^2 + B_2 T_2^2 + C_2 T_3^2 + D_2 T_1 T_2 + E_2 T_2 T_3 + F_2 T_3 T_1 + G_2 T_1 + H_2 T_2 + I_2 T_3 + J_2} \quad (4)$$

ただし、 $T_1 = \sqrt{-\ln P_{sf}}$ ,  $T_2 = P_{ff} + P_{fs}$ ,  $T_3 = \theta$  [rad] であり、適用範囲は、 $P_{ff} + P_{fs} \leq 0.5$ ,  $0.01 \leq P_{sf} \leq 0.1$ ,  $0.087 \leq \theta \leq 0.785$  である。なお、各係数の具体的な数値は表-4に示すものである。

図-6に  $P_{ff} + P_{fs} = 10\%$  において、 $\theta = 0.524$  ( $30^\circ$ ) とした場合の式(4)の推定式とモンテカルロシミュレーションの結果を示す。これより式(4)は、モンテカルロシミュレーションで得られる曲線とほぼ一致することがわかる。

#### 4. 結論

本研究において、構造物等を設計する際、事業者と使用者たる国民とのリスク分担の考え方にに基づき、事業主体の保証責任を基準として、目標信頼性指標を算出することが可能であることを示した。

#### 参考文献

- 1) (社)日本港湾協会：港湾施設の技術上の基準・同解説, 1999.
- 2) SEAOC Vision 2000: Performance based seismic engineering of buildings, 1995. 4.
- 3) 星谷 勝, 石井 清：構造物の信頼性設計, 鹿島出版会 1986.
- 4) 長尾 毅：ケーソン式防波堤の外的安定に関する信頼性設計法の適用, 土木学会論文集, No.689/I-57, pp.173~183, 2001. 10.