

目標信頼性指標決定法に関する一考察

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、仕様設計から性能設計へ急速に移行しつつある。これを受けて、「港湾の施設の技術上の基準・同解説」¹⁾等、幾つかの基準類が改訂され、その中には信頼性に基づく性能規定化が行われている。そこで本研究は、性能設計法の背景にある二つの概念、すなわち、性能規定型設計法と性能明示型設計法の相違点について言及したうえで、性能明示型のリスクコミュニケーション能力の利点と、性能規定型のリスク定量化能力の利点を共に活かしながら、構造設計における目標信頼性指標を技術基準作成者等が主体的に設定する方法について提案するものである。

2. 性能明示型設計と性能規定型設計

正確な技術知識を有しない市民に対して構造物の性能をわかり易く明示したうえで、選択肢を与えて合意形成を図ることを目的とした性能設計法として、カリフォルニア構造技術者協会は、図-1 に示す性能マトリクス²⁾の一例を提案した。図-1 における構造物の有する限界状態は、図-2 に示す一般的な構造における弾塑性の荷重変形関係に対応づけられている。また、図-1 の縦軸の荷重には、その荷重の発生頻度を表すパラメータとして、再現期間を用いている。この中で示されている性能明示型の要求性能は、技術的な専門知識がなくても構造物を設計するための要求性能が理解しやすく、かつ、明示された性能群を選択肢として与えられたならば、選択という行為を通して使用者がリスク分担を選択していることを承知させやすいが、目標信頼性指標を決定することができない。

一方、表-1 は ISO2394 の付属書に示されている目標信頼性指標の一例であり、表-2 に示す破壊確率と一対一の関係になっている。ここでは、目標信頼性指標を構造物の重要度に応じて大きくする考え方が示されているが、この性能規定型設計法においては、破壊に対応する限界状態が、構造の弾塑性応答のどのような状態に対応するかについて定義が不明確であり、図-1 の性能明示型のような合意や対話は難しい。

このように、性能明示型設計と性能規定型設計は、リスク管理面と対話性において長短を併せ持っている。

3. 提案型目標信頼性指標決定法

提案手法は、性能明示型設計と性能規定型設計の両方の利点を活かしながら目標信頼性指標を導出しようとするものであり、2つの性能設計の概念を組み合わせた図-3 の区分図を基礎として目標信頼性指標の導出法を構築する。すなわち、図-1 に示す性能マトリクスを例として、設計技術者と使用者との間で、ある限界状態を任意の確率荷重値に対して保証するよう設計することが合意された場合の荷重と抵抗の確率変数場における事象区分は、図-3 に示す次の4つの事象になる。

表-1 ISO2394 による目標信頼性指標 (ライフタイム)の例

Relative costs of safety measures	Consequences of failure			
	small	some	moderate	great
High	0	1.5	2.3	3.1
Moderate	1.3	2.3	3.1	3.8
Low	2.3	3.1	3.8	4.3

表-2 β と P_f の関係

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

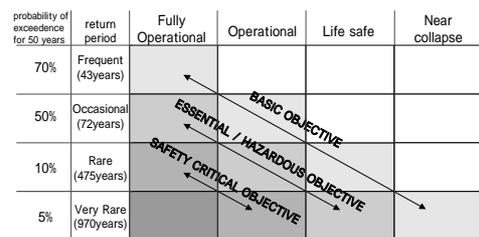


図-1 性能マトリクスの一例(Vision2000)

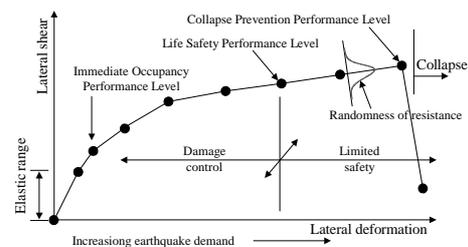


図-2 多段階限界状態の例(Vision2000)

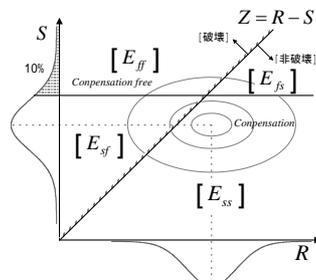


図-3 提案手法のリスク分担概念図

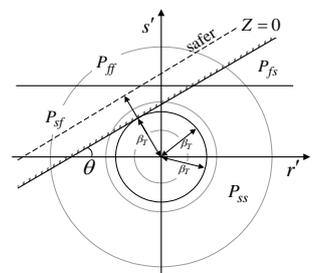


図-4 標準正規確率密度関数場における区分

- E_{ss} : 契約上安全とし、事実安全となる事象。
- E_{ff} : 契約上破壊とし、事実破壊となる事象。
- E_{fs} : 契約上破壊としているが、非破壊となる事象。
- E_{sf} : 契約上安全としたにも関わらず事実は破壊することであり、設計者の瑕疵担保責任が生ずる事象。

これを標準正規確率変数場に変換すると図-4 のようになり、4つの事象に対して対応する確率が定義できる。

$$P_{ss} = P(E_{ss}) \tag{1-a}$$

$$P_{ff} = P(E_{ff}) \tag{1-b}$$

$$P_{fs} = P(E_{fs}) \tag{1-c}$$

$$P_{sf} = P(E_{sf}) \tag{1-d}$$

ここで、 P_{ss} : 明示性能と事実が安全となる確率、 P_{ff} :

キーワード：目標信頼性指標、合意形成、性能マトリクス、分担リスク

連絡先 〒神奈川県横須賀市走水 1-10-20 防衛大学校 建設環境工学科 TEL: 046-841-3810 FAX: 046-844-5913

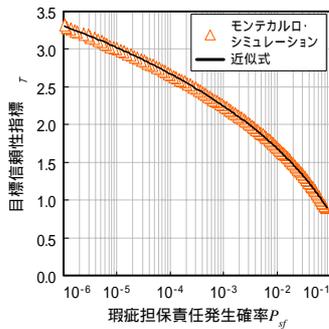


図-5 近似式と数値計算結果

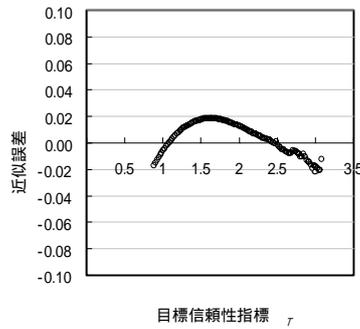


図-6 近似誤差

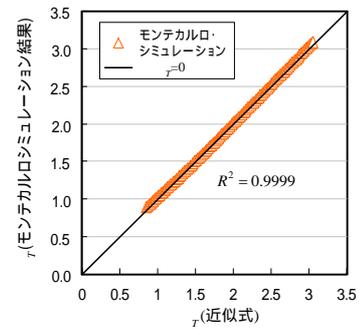


図-7 一致係数分析

明示性能と事実が破壊となる確率, P_{fs} : 明示性能は破壊としているが, 事実は安全となる確率, P_{sf} : 瑕疵担保責任発生確率.

この時, 限界状態は θ の傾きを有する直線となる.

$$\theta = \tan^{-1}(\sigma_R/\sigma_S) \quad (2)$$

ここで, $\sigma_R(\sigma_S)$: 抵抗力 (荷重効果) の標準偏差.

提案手法は, 瑕疵担保責任発生確率をやや主観的に意思決定し, 対応する信頼性指標決定法を求めるものである. 図-4に示す4つの領域は, 完全排反事象であるため, 性能明示型の合意形成をしたとすると, 契約上の破壊確率と目標信頼性指標決定法による破壊確率について次の2条件が成立する.

$$P_{ff} + P_{fs} = P_{fA} \quad (3-a)$$

$$P_{sf} + P_{ff} = \Phi(-\beta_T) \quad (3-b)$$

ここで, Φ : 標準正規確率の累積積分関数.

P_{sf} を意志決定すると, 目標信頼性指標 β_T 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 θ, P_{fA} および β_T を多数の条件下で与えて, 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.

$$\beta_T = f(P_{sf}, P_{fA}, \theta) \quad (4-a)$$

$$= g_1(P_{sf}, P_{fA}) - g_3(P_{sf}, P_{fA}, \theta) / g_2(P_{sf}, P_{fA}, \theta) \quad (4-b)$$

ここで,

$$g_1(P_{sf}, P_{fA}) = a_1 \tilde{P}_{sf} + b_1 P_{fA} \quad (4-c)$$

$$g_2(P_{sf}, P_{fA}, \theta) = a_2 \tilde{P}_{sf}^2 + b_2 P_{fA}^2 + c_2 \theta^2 + d_2 \tilde{P}_{sf} P_{fA} + e_2 P_{fA} \theta + f_2 \tilde{P}_{sf} \theta + g_2 \tilde{P}_{sf}^2 + h_2 P_{fA} + i_2 \theta + j_2 \quad (4-d)$$

$$g_3(P_{sf}, P_{fA}, \theta) = a_3 \tilde{P}_{sf}^2 + b_3 P_{fA}^2 + c_3 \theta^2 + d_3 \tilde{P}_{sf} P_{fA} + e_3 P_{fA} \theta + f_3 \tilde{P}_{sf} \theta + g_3 \tilde{P}_{sf}^2 + h_3 P_{fA} + i_3 \theta + j_3 \quad (4-e)$$

ただし, $\tilde{P}_{sf} = \sqrt{-\ln P_{sf}}$.

この式の形については, 次元の正規確率を求める近似式の形を参考に決定した. また, 各係数は最適化手法である Particle Swarm Optimization を用いて決定した. 得られた係数は, 表-3 に示すとおりであり, 適用範囲は, $P_{fA} \geq 0.5, 10^{-7} \leq P_{sf} \leq 10^{-1}, 0.087 \leq \theta \leq 0.785$ である. 図-5 に $\theta=0.524[\text{rad}], P_{fA}=0.1$ の場合におけるモンテカルロシミュレーションで得られる結果と, 近似曲線を比較した結果を示す. 図-5 より近似曲線はモンテカルロシミュレーションで得られる結果と良く一致していることがわかる. また, 算定式とモンテカルロシミュレーションによる結果の誤差を比較してみると, 図-6 に示すように, 最大誤差でも 0.02 であ

表-3 係数表

係数名	a_i					b_i				
係数	1.54					1.40				
係数名	a_2	b_2	c_2	d_2	e_2	f_2	g_2	h_2	i_2	j_2
係数	1.19	5.87	8.25	14.9	-2.83	-3.39	2.08	10.6	-0.56	-1.46
係数名	a_3	b_3	c_3	d_3	e_3	f_3	g_3	h_3	i_3	j_3
係数	-0.23	-0.81	6.42	0.39	2.56	2.92	1.66	5.15	-8.9	2.38

表-4 瑕疵担保責任発生確率と目標信頼性指標

P_{fA} (%)	P_{sf} (%)	θ ($\sigma_R : \sigma_S$)			
		45.0° (1:1)	26.6° (1:2)	18.4° (1:3)	
0.1	β_T	2.67	2.20	1.93	
	P_{ff} / P_{fs}	0.27/0.37	1.29/1.39	2.58/2.68	
	0.5	β_T	2.26	1.90	1.70
		P_{ff} / P_{fs}	0.70/1.20	2.37/2.87	3.96/4.46
	1.0	β_T	2.05	1.75	1.59
		P_{ff} / P_{fs}	1.03/2.03	3.01/4.01	4.59/5.59
2.5	β_T	1.73	1.52	1.41	
	P_{ff} / P_{fs}	1.65/4.15	3.93/6.43	5.43/7.93	
5.0	β_T	2.12	2.00	1.72	
	P_{ff} / P_{fs}	1.20/1.30	2.18/2.28	4.17/4.27	
	1.0	β_T	1.91	1.55	1.37
		P_{ff} / P_{fs}	1.79/2.79	5.06/6.06	7.53/8.53
	2.5	β_T	1.60	1.32	1.19
		P_{ff} / P_{fs}	2.98/5.48	6.84/9.34	9.20/11.70
5.0	β_T	1.32	1.13	1.04	
	P_{ff} / P_{fs}	4.28/9.28	7.92/12.92	9.92/14.92	

り, 設計基準で採用される目標信頼性指標は小数点第1位以下の丸めた数字となることから, 十分な精度であると思われる. また, 図-7 に示す相関関係を見てみると, 決定係数は $R^2=0.9999$ であり, 適用範囲内では概ね適切な目標信頼性指標の算出が可能であることがわかる. したがって, 式(4)を用いれば, 構造設計技術者が自ら瑕疵担保責任発生確率を意思決定することにより, 表-4 のように目標信頼性指標を導出することが可能となる.

4. 結論

本研究は, リスクコミュニケーションに適した性能明示型設計法の概念と, 構造物の保有性能を明確に規定できる性能規定型設計法の両方の特徴を生かした目標性能決定を, 構造技術者と使用者とのリスク分担の観点に立脚して行う方法について提案した.

参考文献

- (社)日本港湾協会: 港湾施設の技術上の基準・同解説, 1999.
- SEAOC Vision 2000: Performance based seismic engineering of buildings, 1995. 4.