

超過確率法による性能明示型設計のリスク分担分析

○中央大学 学生会員 原本隆一
中央大学 正会員 佐藤尚次

1. はじめに

近年の我が国の土木・建築構造物の設計法の動きは、性能設計の導入が広がっている。これは国際標準化への対応によるものが大きい。性能設計とは、「原則として規定した性能を満足し、かつ自らそれを証明すれば、どのような内容の設計も許容される設計法であり、それさえ満足すれば今までにない新たな考え方に基づく斬新な設計が可能になる」¹⁾ものであり、従来の仕様規定型設計より設計の自由度が大きくなる設計法である。

片出・香月らは、性能設計の類型中の性能明示型設計を代表するものとして図-1に示す要求性能マトリックスを示した²⁾。これは作用因子側の地震動の発生頻度が確率で示されているため構造物の要求性能を理解しやすく、設計技術者と発注者の対話がしやすいという利点があるとされる。その一方で、抵抗強度側の表現は抽象的であり曖昧さが残っているとし、結果的に、本質的な性能指標である破壊確率のコントロールも明確でないとした。さらに、図-2に示す P_{sf} で表現される設計者の瑕疵担保責任発生確率を、優先的にコントロールすべき設計自由度と考えて、破壊確率への影響を考察している。

一方、本研究では抵抗強度側についても分野ごとの事情の違いはあるにせよ、一定の非超過確率を確保した設計がなされるという立場に立っている。

著者の佐藤は、文献³⁾において、作用効果と抵抗強度の超過・非超過確率の組み合わせから破壊確率 P_f を求め、設計のメニュー化を提案しているが、ここではさらに、瑕疵担保責任が発生する確率 P_{sf} も併せて従属変数として求め、片出・香月らの提示する議論とすり合わせをはかるものである。ここで、瑕疵担保責任とは契約上では安全としていた設計作用のレベル以下の作用のもとで破壊が起こってしまう事を言う。

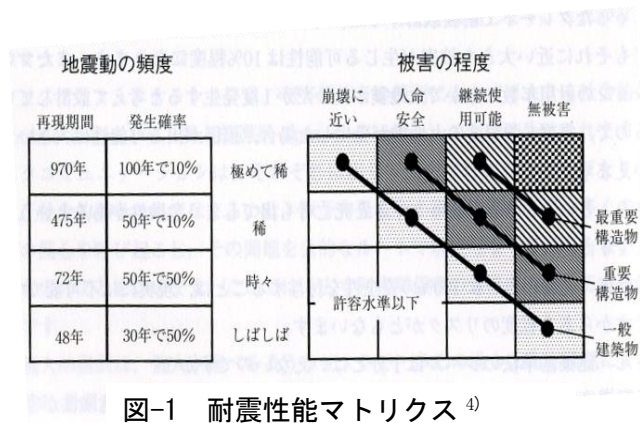


図-1 耐震性能マトリックス⁴⁾

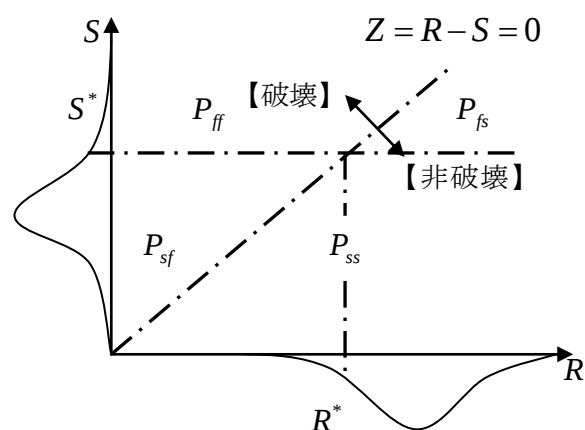


図-2 荷重効果と抵抗強度の確率分布と限界状態

2. 研究の手法

片出・香月らの文献²⁾にならって、性能関数 $Z=R-S<0$ のときに構造物破壊が起こる条件と、前記の瑕疵担保責任発生確率 P_{sf} を同時に図-2に表す。

ここで、 $S=S^*$ と $Z=R-S=0$ で囲まれる4つのエリアを次のように定義する。

P_{ss} ：契約では安全とし、事実安全となる確率

P_{ff} ：契約では破壊とし、事実破壊となる確率

P_{fs} ：契約では破壊としたが、事実は安全となる確率

P_{sf} ：契約では安全としたが、事実は破壊する確率
(設計者の瑕疵担保責任が発生する確率)

キーワード：性能明示型設計、性能マトリックス、超過確率、瑕疵担保

連絡先：東京都文京区春日 1-13-27 中央大学理工学部土木工学科 tel.03-3817-1816

超過確率法を用いて任意に $P_r[S \geq S^*] = e_s$ と $P_r[R \leq R^*] = e_r$ から β (供用期間中の目標信頼性指標) を次式より求め、破壊確率 $P_f = \Phi(-\beta)$ を導く。

$$-\beta = \frac{\Phi^{-1}(e_r)\sigma_R + \Phi^{-1}(e_s)\sigma_S}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}}$$

ただし、 Φ は標準正規分布の累積分布関数

$$\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{t^2}{2}} dt$$

次に、作用側の超過確率 e_s と信頼性指標 β を用いて瑕疵担保確率 P_{sf} を求める。手法としては単純モンテカルロシミュレーション (SMC) を用いることとした。

今回は $P_r[S \leq S^*]$ かつ $P_r[Z \leq 0]$ として瑕疵担保責任の確率をカウントして求めるプログラムを作った。ただし、作用、抵抗それぞれの標準偏差は $\sigma_S=1, \sigma_R=1$ ($\theta=45^\circ$) とする。

3. 結果と考察

設計供用期間を 50 年とすると、表-1 での $e_s=5\%$ は 970 年の再現期間に相当し、10%は 475 年の再現期間に相当する。また 22.2%と 39.5%は 200 年および 100 年再現期間に相当する。表-1 に計算した破壊確率を示す。また表-2 には表-1 の作用効果の超過確率 e_s と信頼性指標 β の組み合わせに対する瑕疵担保責任の確率を示す。

設計作用値の超過確率に加えて構造物の抵抗強度の設計値の非超過確率をも表現し、それらの組み合わせで破壊確率を求めることができた。これにより一層具体的な性能明示型設計法を導けたことになると思われる。

また、表-1 の破壊確率に対して表-2 に示す瑕疵担保責任の確率を e_s 、 β の組み合わせによって導けたことから、破壊確率の中の瑕疵担保責任が発生する確率が占める割合を知ることができる。

瑕疵担保の発生というのは、 $S \leq S^*$ である作用が発生する条件 $(1-e_s)$ のもとで、それよりも R の実現値が下回っているのであるから、 $(1-e_s)$ と e_r の積と相関性が高く、また P_f とも相関性が高いように予想される

表-1 超過確率と破壊確率の関係

$e_r(\%)$	$e_s(\%)$	β	$P_f(\%)$	$e_r(\%)$	$e_s(\%)$	β	$P_f(\%)$
0.1	5.0	3.348	0.041	5.0	5.0	2.326	1.000
0.1	10.0	3.091	0.100	5.0	10.0	2.069	1.926
0.1	22.2	2.726	0.320	5.0	22.2	1.704	4.416
0.1	39.5	2.373	0.881	5.0	39.5	1.351	8.828
1.0	5.0	2.808	0.249	10.0	5.0	2.069	1.926
1.0	10.0	2.551	0.537	10.0	10.0	1.812	3.496
1.0	22.2	2.186	1.440	10.0	22.2	1.447	7.389
1.0	39.5	1.833	3.338	10.0	39.5	1.095	13.687

表-2 超過確率・信頼性指標と瑕疵担保責任の確率

$e_r(\%)$	$e_s(\%)$	β	$P_{sf}(\%)$	$e_r(\%)$	$e_s(\%)$	β	$P_{sf}(\%)$
0.1	5.0	3.348	0.004	5.0	5.0	2.326	0.371
0.1	10.0	3.091	0.007	5.0	10.0	2.069	0.531
0.1	22.2	2.726	0.010	5.0	22.2	1.704	0.729
0.1	39.5	2.373	0.010	5.0	39.5	1.351	0.797
1.0	5.0	2.808	0.058	10.0	5.0	2.069	0.883
1.0	10.0	2.551	0.079	10.0	10.0	1.812	1.234
1.0	22.2	2.186	0.116	10.0	22.2	1.447	1.671
1.0	39.5	1.833	0.134	10.0	39.5	1.095	1.793

が、この点はさらに議論が必要である。

4. おわりに

今回の計算によって、発注者は想定する地震動の発生確率と要求する構造物の耐震性の確率の組み合わせにより、その構造物の破壊確率を認識したうえで発注することができることになる。

また、作用側の超過確率 e_s と信頼性指標 β から瑕疵担保責任の確率を求めることができたので、施工者側は瑕疵担保責任を負うリスクもどの程度あるか考慮に入れることができると思われる。

参考文献

- 1) 土木学会 土木構造物荷重指針連合小委員会 構造工学シリーズ 18：性能設計における土木構造物に対する作用の指針，2008.3
- 2) 片出 亮，香月 智：分担リスク概念に基づく目標信頼性指標決定法の提案，土木学会第 62 回年次学術講演会 2007.9
- 3) 佐藤 尚次：超過確率に基づく構造設計の確率論的基礎，350 号土木学会論文集 1984.10
- 4) 社団法人 日本建築学会：事例に学ぶ建築リスク入門，技報堂出版 2007