

関西大学工学部

学生員○片岡宏文

関西大学大学院

学生員 小山和裕

関西大学総合情報学部

正会員 古田 均

関西大学工学部

正会員 堂垣正博

1. まえがき

構造物を設計する場合、これまでは初期コストを主に重視してきた。近年では、建設後の維持管理費など、供用中にかかる費用をも含めた総費用すなわちライフサイクルコスト（以下、LCC と称す）の最小化が構造設計には重要となる。ここでは、建設時の初期コストと地震リスクとの関係に注目し、両コストの総和を求め、総期待費用最小化の原則に基づいた構造設計を試みる。

2. 総期待費用最小化

耐震性を考えた構造設計の場合、その耐震性能を向上させようと思えば、建設時の初期コストは上昇する。その分、地震リスクは押さえられる。一方、耐震性能を低く設定すれば、初期コストは下がるものの、地震時の危険度は高まる。すなわち、構造物の耐震性能と地震リスクには、トレードオフの関係が存在する。そのため、最適な構造設計を考える場合には、地震リスクのコスト化が必ず必要になる。ここでは、構造物の設計における総期待費用最小化の評価を

$$C_T = C_c + C_f P_f \quad (1)$$

で行う。ここに C_T は総コスト、 C_c は初期コスト、 C_f は破壊時損失コスト、 P_f は地震時の破壊確率である。

3. 解析モデル

図-1 に示す単柱形式の鋼製橋脚を解析対象とし、橋脚の柱高を $h=10\text{m}$ とする。断面形状としては、正方形の無補剛箱形断面で、 $b_f=b_w=2,000\text{mm}$ 、 $t_f=t_w=42\sim70\text{mm}$ とする。上部構造の反力に相当する鉛直荷重として、 $P=10.84\text{MN}$ を設定する。さらに、地震荷重に相当する水平力 H が作用するものとする。使用鋼材は SM490Y 材とし、降伏点応力 $\sigma_y=353\text{MPa}$ 、ヤング率 $E=206\text{GPa}$ 、単位体積重量 $\rho=77\text{kN/m}^3$ である。

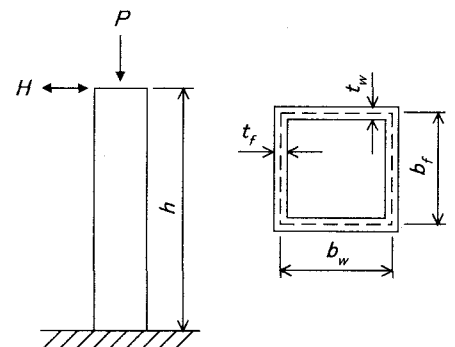


図-1 解析モデル

4. 信頼性理論による破壊確率の算定

構造設計に地震効果を考える場合、地震荷重の不確定さを勘案する必要がある。すなわち、地震荷重を確率量で表現する必要がある。ここでは、地震荷重の確率モデルを作成するにあたって、必要降伏強度スペクトルに注目した。

(1) 限界状態関数の設定

限界状態関数をつぎのように設定する。すなわち、

$$Z = H_{\max} - H_n \quad (2)$$

ここに、 $H_{\max}$ は構造物の地震時保有水平耐力で確定量とする。 H_n は確率量で表される地震荷重である。限界状態関数が $Z>0$ となれば構造物は安全で、 $Z\leq 0$ となれば構造物は危険である。

(2) 必要降伏強度スペクトル

静的解析結果によって算定した目標塑性率 μ_r 、構造物の固有周期 $T=0.1\sim 5.0(\text{sec})$ 、地震動強度 $A_{\max}=300\sim 1000(\text{gal})$ 、I 種・II 種・III 種の地盤種、減衰定数 0.05、復元力特性の 2 次剛性比がゼロを用い、必要降伏強度スペクトルを算定した。入力地震動には、道路橋示方書の標準地震入力波形を用いた。必要降伏強度を確率量で表現するため、必要降伏強度の標準値を算定し、実測値と標準値とのばらつきを確率量で表現する。

Hirofumi KATAOKA, Kazuhiro KOYAMA, Hitoshi FURUTA, and Masahiro DOGAKI

必要降伏強度の標準値を算定するにあたっては、道路橋示方書の標準加速度応答スペクトルを参考にし、その確率モデルに対数正規分布を仮定した。すなわち、対数正規分布の確率密度関数は、つぎのようである。

$$f_{H_n}(x) = \frac{1}{\sigma_{\ln(x)} \sqrt{2\pi}} \frac{1}{x} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln(x) - \mu_{\ln(x)}}{\sigma_{\ln(x)}} \right)^2 \right] \quad (3)$$

ここに、 $\mu_{\ln(x)}$ は必要降伏強度の標準値、すなわち確率変数 $\ln(x)$ に対する標準偏差 $\sigma_{\ln(x)}$ が算出できれば、必要降伏強度の確率モデルは算出できる。

4.3 破壊確率の評価法

地震荷重を確率モデルで表したため、 Z は確率変数となる。変数 Z の確率分布を図-2 に示す。図中、 β は信頼性指標で、確率変数 Z の平均値 μ_z と標準偏差 σ_z から算定できる。

$$\beta = \frac{\mu_z}{\sigma_z} \quad (4)$$

さらに、破壊確率 P_f と信頼性指標 β の関係は、標準正規分布関数 Φ を用いれば、

$$P = \Phi(-\beta) \quad (5)$$

である。

5. 総コストの算定

本研究における解析条件をつぎのように設定する。まず、構造物の設置地盤をⅡ種地盤、想定地震動をタイプⅡ地震動、地動最大加速度を 800gal とする。ここでは、地震リスクを算定するにあたり、破壊時損失コストを初期建設費用とした。初期建設時にかかる各種費用を表-1 に示す。

表-1 をもとに、各断面における初期コストを算定した。

さらに、各構造物の破壊確率より地震リスクを算定した。そ

の両コストを合わせた総コストが最小となる断面が最適な耐震性能をもつ構造物である。算定結果を図-3 に示す。

図-3 から明らかなように、耐震性能を向上させようと思えば、初期コストは増加する。その代わりに、地震リスクは減少する。両コストを合わせた総コストの考察から、地震による危険性を少なくするために耐震性能を高くしてもコスト面から見ると、合理的な設計であるとは言い難い。そこで、総期待費用最小化原則をもとに最も合理的な断面を探索した結果、板厚 $t=51\text{mm}$ の断面が最適であることがわかった。

6. あとがき

総期待費用最小化の原則のもと、構造物の初期コストとリスク費用の総和が最小となる構造設計を試みた。総期待費用最小化原則のもとに、近年重視されてきた LCC の概念で問題が解決できると考える。さらに、建設後の維持管理費などを加えることで、より合理的な構造設計ができる。

参考文献 1) 日本道路協会編：道路橋示方書・同解説，Ⅴ耐震設計編，丸善，1996-12。 2) 後藤秀典：信頼性理論に基づく鋼製橋脚の耐震性能照査法，土木学会第 57 回年次学術講演会，I-394，pp.787-788，2002-9。

3) 佐藤尚次：構造計画・設計の総合化と期待総費用最小化原則，確率・統計的意思決定に関するシンポジウム論文集，土木学会，pp.11-16，1998-12。

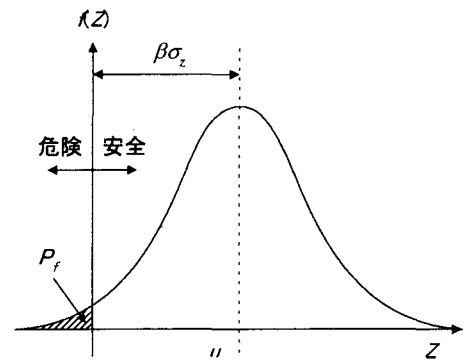


図-2 確率変数 Z の分布形

表-1 初期コスト

項目	単位	単価
SM490Y	t	97,585
塗装	m ²	1,700
輸送費	t	9,000
架設費	t	91,100

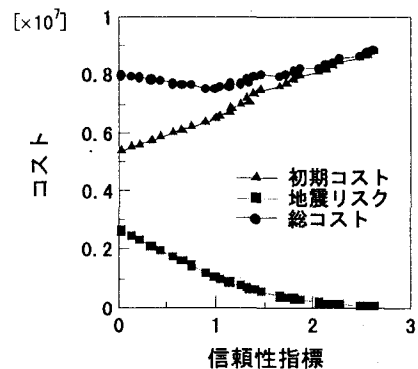


図-3 信頼性指標と LCC