

複数の限界状態を有する鋼製橋脚の信頼性評価

中央大学大学院 学生会員 菊地 武志
中央大学 正会員 佐藤 尚次

1. はじめに

近年の設計法に関する研究の進展により、不確定要因を信頼性理論の助けのもとに確率的に取り扱うことのできる信頼性設計法を設計基準にするということに合意が形成されつつある。さらに実際の構造物は複数の限界状態を有しており、個々の限界状態のもつ「構造物への影響」、「被害の社会的、経済的影響」を明確にする性能設計が求められている。しかし、従来型の許容応力度設計法で設計された構造物も社会には多く存在しているし、この設計法が完全に使われなくなったわけではない。

そこで本研究では、許容応力度設計法(A.S.D.法)で設計された構造物のさまざまな限界状態に着目し、信頼性解析により安全性評価を行うことを目的とする。また設計に多様な選択肢を与えるため、それぞれの限界状態に目標破壊確率を設定し安全性の評価・検討を行う。

2. 対象構造物のモデル化

図-1 に示すような鋼製門型ラーメン橋脚(R.F.P.)、鋼製単柱型橋脚(S.P.)を本研究の対象構造モデルとする。構造モデルの各諸元を表-1 に示す。

構造解析のための骨組モデルと着目点を図-2 に示す。各着目点における断面決定は、それぞれ得られた断面力に対して独立に行うものとし、梁、柱の各着目点間で断面変化するものとした。なお梁部、柱部の断面形状は補剛材を有しない正方形断面を考え、降伏以前には局部座屈は生じないものと仮定した。用いる鋼材は SM490Y 材とした。

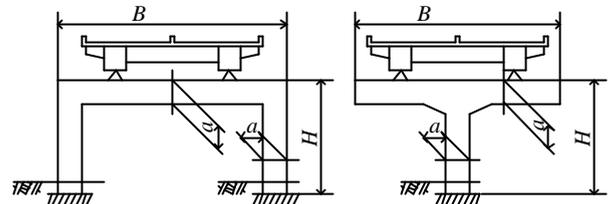


図-1 対象構造モデル

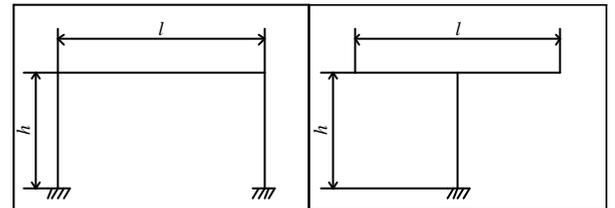


図-2 骨組モデルと着目点

3. 許容応力度設計法による板厚の算出

構造物に作用する荷重は死荷重(D)、活荷重(L)、地震荷重(E)のみとし、各設計荷重の値を文献をもとに設定し、表-2 に示す。なお地震荷重に関しては、水平震度 $k_h = 1/980$ (は応答加速度)をすべての構造物に対して一律に与え、上部工反力および橋脚自重にこれを乗じて地震荷重とした。これらの荷重が作用するもとの、道路橋示方書に示される照査式により断面寸法の決定を行う。板厚の算出結果を表-3 に示す。

4. 許容応力度設計法の安全性評価

A.S.D.法で設計された構造物に対し、表-4 に示すモデル化した実荷重を作用させ、モンテカルロシミュレーション法により破壊確率を算出する。また限界状態を断面破壊、座屈、過度な変形とする。

4.1 限界状態関数の設定

断面破壊を表す限界状態関数を以下に示す $Z_{(Y)}$ 、座屈を表す限界状態関数を $Z_{(B)}$ 、過度な変形を表す限界状

表-1 構造モデルの諸元
(単位 m)

橋脚全高	H	10.0
橋脚全幅	B	20.0
橋脚高さ	h	9.14
橋脚幅	l	18.28
梁柱幅	a	1.72

表-2 設計荷重

死荷重反力 R_d	5522.0(kN)
活荷重反力 R_l	1578.0(kN)
応答加速度	245.0(Gal)

表-3 板厚算出結果

R.F.P.			S.P.		
部	厚	(mm)	部	厚	(mm)
柱基部	t_1	22	柱基部	t_1	31
柱上部	t_2	31	柱上部	t_2	31
梁隅角部	t_3	28	梁隅角部	t_3	49
梁中央部	t_4	21	梁端部	t_4	22

表-4 荷重モデルの分布パラメータ

	distribution	μ	
R_d	Const.	5798.1(kN)	-
R_l	Gumbel	1230.0(kN)	62.73(kN)
	Weibull	78.1(Gal)	44.4(Gal)

keyword : 信頼性解析, 性能設計, 限界状態, 鋼製橋脚

連絡先: 〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27 設計工学研究室 tel : 03(3817)1816 E-mail : take707@kc.chuo-u.ac.jp

態関数を $Z_{(D)}$ で与える .

$$Z_{(Y)}=1-|P/P_y|-|M/M_y|, \quad Z_{(B)}=1-|P/P_y|-|M/M_p|/\{1-|P/P_e|\}, \quad Z_{(D)}=1-$$

ここに , P_y : 降伏軸力 , M_y : 降伏曲げモーメント , M_p : 全塑性曲げモーメント

P_e : オイラーの座屈荷重 , t : たわみの規定値

4.2 破壊確率の算出

各着目点で限界状態関数が $Z < 0$ となった場合 , その着目点が破壊したということとなり , 100 万回のシミュレーションより破壊確率が算出される . 断面破壊の破壊確率を $P_{f(Y)}$, 座屈の破壊確率を $P_{f(B)}$, 過度な変形の破壊確率を $P_{f(D)}$ として算出結果を表-5 に示す .

破壊確率の算出において , 断面破壊 , 座屈の各限界状態に対してはいずれの構造形式に対しても着目点 t が , また過度な変形限界状態においてはいずれの構造形式の場合も柱上部の水平変位が支配的となった .

表-5 破壊確率の算出結果

	$P_{f(Y)}$	$P_{f(B)}$	$P_{f(D)}$
R.F.P.	1.21×10^{-4}	2.4×10^{-5}	5.33×10^{-4}
S.P.	5.25×10^{-3}	2.69×10^{-3}	6.98×10^{-4}

5. 目標破壊確率による評価

各限界状態に対し目標破壊確率 $P_f^*=1.0 \times 10^{-3}$, 1.0×10^{-4} を設定しそれを満足する板厚を決定する . その状態でその他の限界状態の破壊確率を算出する . なお本章では荷重組合せ D+L+E について述べることにする . またいずれの構造形式 , いずれの限界状態に対しても算出される破壊確率に最も影響を与えたのは柱基部の板厚 t_1 を変化させたときであったため t_1 と P_f の関係のみを記す .

断面破壊限界状態に目標破壊確率 $P_{f(Y)}^*=1.0 \times 10^{-3}$ と設定すると R.F.P. では A.S.D.法により算出された板厚 t_1 を 3mm 薄い 19mm にすることができる . またこの状態で過度な変形限界状態の破壊確率が 26 倍にもなる . S.P. では 1.0×10^{-3} の破壊確率をもたせるためには 11mm 厚くしなければならず , それによる破壊確率の変化は大きいもので座屈限界の 1/7.8 倍である (表-6a)

座屈限界に対し $P_{f(B)}^*=1.0 \times 10^{-3}$ と設定すると R.F.P. では 5mm 薄い 17mm にすることができるが , 過度な変形限界の破壊確率が $P_{f(D)}=1.67 \times 10^{-1}$ と極端に大きくなってしまふ . S.P. では 36mm とすることで 1.0×10^{-3} が確保でき , それぞれの限界状態の破壊確率の変化はおよそ 1/2.7 倍である . (表-6b)

過度な変形限界に $P_{f(D)}^*=1.0 \times 10^{-3}$ を設定すると R.F.P. では A.S.D.法により算出された値 $t_1=22(\text{mm})$ で良いということを得る . また S.P. では 1.0×10^{-3} の破壊確率をもたせるためには 1mm 薄くできるという結果を得る . (表-6c)

6. まとめ

本研究では A.S.D.法で設計された 2 種類の橋脚に対し , 断面破壊と座屈 , 過度な変形という限界状態を考慮し , 破壊確率による評価を行った . A.S.D.法は構造形式や限界状態により安全性にばらつきが生じるということを示した . またそれぞれの限界状態に目標破壊確率を設定し , それによる板厚の算定を行い , 構造形式間あるいは限界状態間の安全性を評価した . これによると A.S.D.法は構造形式を問わず , 過度な変形限界状態に対しほぼ 1.0×10^{-3} の破壊確率を保有しているということを示した .

参考文献 : HDL 委員会報告書 , 阪神高速道路の設計荷重体系に関する調査研究 , 1986 年 12 月

白木 渡ら , 多くの限界状態を有する構造システムの最適信頼性設計法 , 構造工学論文集 , 1991 年 3 月

表-6 目標破壊確率の設定による板厚とその他の限界状態の破壊確率の変化

a 断面破壊

	$P_{f(Y)}^*$	t_1 (mm)	$P_{f(B)}$	$P_{f(D)}$
R.F.P.	1.0×10^{-3}	19	1.54×10^{-4}	1.39×10^{-2}
	1.21×10^{-4}	22	2.4×10^{-5}	5.33×10^{-4}
	1.0×10^{-4}	23	1.5×10^{-5}	4.47×10^{-4}
S.P.	5.25×10^{-3}	31	2.69×10^{-3}	6.98×10^{-4}
	1.0×10^{-3}	42	3.45×10^{-4}	1.03×10^{-4}
	1.0×10^{-4}	55	2.4×10^{-5}	1.5×10^{-5}

b 座屈

	$P_{f(B)}^*$	t_1 (mm)	$P_{f(Y)}$	$P_{f(D)}$
R.F.P.	1.0×10^{-3}	17	1.84×10^{-3}	1.67×10^{-1}
	1.0×10^{-4}	20	3.33×10^{-4}	4.12×10^{-3}
	2.4×10^{-5}	22	1.21×10^{-4}	5.33×10^{-4}
S.P.	2.69×10^{-3}	31	5.25×10^{-3}	6.98×10^{-4}
	1.0×10^{-3}	36	1.82×10^{-3}	2.78×10^{-4}
	1.0×10^{-4}	49	2.50×10^{-4}	4.0×10^{-5}

c 過度な変形

	$P_{f(D)}^*$	t_1 (mm)	$P_{f(Y)}$	$P_{f(B)}$
R.F.P.	1.0×10^{-3}	22	1.21×10^{-4}	2.4×10^{-5}
	1.0×10^{-4}	34	1.0×10^{-6}	$< 1.0 \times 10^{-6}$
S.P.	1.0×10^{-3}	30	6.47×10^{-3}	3.44×10^{-3}
	6.98×10^{-4}	31	5.25×10^{-3}	2.69×10^{-3}
	1.0×10^{-4}	43	7.29×10^{-4}	2.81×10^{-4}