

不確定要因を考慮した周辺単純支持板の終局強度 RSM を用いた評価法に関する研究

株式会社ハルテック 正会員 ○ 岑山 友紀 大阪市立大学大学院 正会員 北田 俊行
 大阪市立大学大学院 正会員 松村 政秀 大阪市立大学大学院 正会員 山口 隆司

1. 研究の背景および目的

近年、橋梁構造物の設計では、許容応力度設計法から限界状態設計法への移行が活発に行われている。限界状態設計法では、不確定量を確率変数として扱い、構造物の安全性を評価する。そのため、設計変数の統計データを基に、強度および荷重を確率的に評価し、構造物の安全性を合理的に評価できる手法が求められている。そこで、本研究では、初期たわみおよび鋼材の降伏点を不確定量として扱い、一様圧縮変位を受ける周辺単純支持板の終局強度評価に対する RSM (Response Surface Method) の適用性について検討している。

2. 対象モデルと限界状態関数

対象モデルは、一辺の長さが l 、板厚が t で、アスペクト比 α が 1.0 の一様圧縮変位を受ける周辺単純支持板とした。評価手法の検討に重点を置き、残留応力は考慮していない。不確定量として初期たわみおよび鋼材の降伏点を対象として、これらの確率変数をそれぞれ X_1 および X_2 とし、板厚 t を変化させて、弾性座屈、弾塑性座屈および塑性座屈が支配的な領域、すなわち、幅厚比パラメータ R が 0.3, 1.0 および 1.6 の場合を対象とした。限界状態関数 $g(x)$ は、式(1)により定義した。ここで、 σ_u は鋼材の降伏点 F_y を公称値とし、初期たわみの最大値を道路橋示方書で規定される最大許容たわみ $\varepsilon_{\max}(=l/150)$ とした場合の周辺単純支持板の終局強度である。これを道路橋示方書で規定される安全率 1.7 で除した値を 1 つの限界状態として、不確定量を考慮した終局強度のこの限界状態からの変化量によって限界状態関数 $g(x)$ を定義している。この限界状態を超える確率、すなわち破壊確率 P_f を求めることでこの限界状態に対する安全性を評価する。

$$g(x) = f(\varepsilon, \sigma_y) - \sigma_u / 1.7 \quad (1)$$

本解析で用いた、初期たわみ ε および降伏点 σ_y の確率

分布特性を表-1 に示す。

3. RSM による終局強度評価

3.1 評価手法

限界状態を超過する破壊確率 P_f を求める手法として、RSMを用いた。RSMの手順を図-1 に示す。RSMにおけるサンプリングポイントの選択方法には、CCD(Conventional Central composite Design method)を用いた。本手法による解の妥当性を検証するために、モンテカルロシミュレーション(MCS)も行った。RSMでは、はじめに、 $f(\varepsilon, \sigma_y)$ の近似関数 $f(x)$ の関数形を定める必要がある。本研究では、 $R=0.3$ および 1.6 の場合に対して式(2)を用いた。 $R=1.0$ の場合は、初期たわみが大きくなると終局強度が低下し、ある程度以上の初期たわみになると終局強度が一定となる点を考慮し、式(3)を用いた。

$$f(x) = a + bX_1 + cX_2 + dX_1^2 + dX_2^2 \quad (2)$$

$$f(x) = a + bX_1 + cX_2 + cX_1^{-2} + dX_2^2 \quad (3)$$

サンプリングポイントは 9 点(平均値(μ_i)と平均値まわりの点($\mu_i \pm f_i \sigma_i$, 本研究では $f_i=1, 2$ または $\sqrt{2}$))とし、これら 9 点に対して FEM 解析を行う。さらに、その結果を用いて最小二乗法 (LSM) に

表-1 不確定量の確率分布特性¹⁾

確率変数	分布特性	分布形状	平均値 μ	標準偏差 σ	変動係数 V
最大初期たわみ X_1	ε (mm)	Normal	0.16	0.28	1.73
降伏点 X_2	σ_y (N/mm ²)	Normal	293.8	23.50	0.08

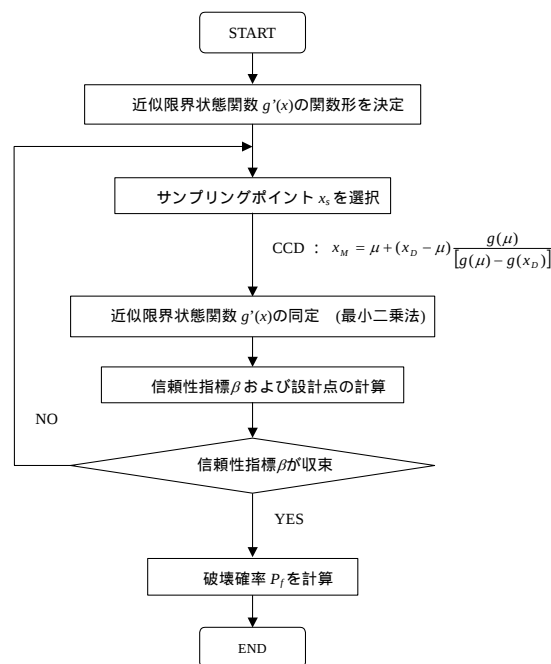


図-1 RSM のフローチャート

キーワード 信頼性指標, 破壊確率, 終局強度評価法, 周辺単純支持板, RSM(Response Surface Method)

連絡先: 〒558-8585 大阪市住吉区杉本町 3-3-138 大阪市立大学大学院工学研究科橋梁工学分野 TEL06-6605-2735

より近似関数 $f(x)$ を同定し，限界状態関数である式(1)において，FORMまたはSORMにより信頼性指標 β を求める．この過程を信頼性指標 β が収束するまで繰り返し計算を行う．信頼性指標 β が収束後，破壊確率 P_f を求める．

3.2 結果と考察

幅厚比パラメータ $R=1.0$ の場合を一例とし，MCSにより得られた終局強度 σ_u のヒストグラムを対象とした限界状態 $\sigma_u/1.7(=100.6\text{N/mm}^2(R=1.0))$ のと併せて図-2 に示す．初期たわみ，降伏点，および終局強度の確率分布特性を表-2 に，RSMにおける収束過程を表-3 に示す．さらに，MCSの結果とCCDによる収束状況を図-3 に示す．また， $R=0.3, 1.0$ ，および 1.6 の場合について，MCSとRSMとの結果の比較を表-4 に示す．MCSでは，3,000 回のシミュレーション解析を行い，算出した終局強度 σ_u の平均値および標準偏差を正規分布と仮定し，破壊確率を求めた．表-4 より，RSMにより，十分精度良く，破壊確率が評価されていることがわかる．ただし，MCSにおいて信頼性指標 β が7 から 8 の範囲では，少なくとも 10^{13} 回のシミュレーションが必要であるとされており²⁾，3,000 回のシミュレーションでは，設定している限界状態を超過する事象は生じず，シミュレーション回数が絶対的に少ない．さらに，その力学的挙動が複雑な場合，破壊面を数式化することは難しい．一方，RSMによると極めて少ないシミュレーション回数で，わずかな時間と労力により，十分な精度を有する破壊確率 P_f を得ることができた．以上のように設計点付近での近似面を作成して破壊確率 P_f を求めるRSMは非常に有効であると考えられる．

国内外の代表的な設計基準で目標とされる信頼性指標 β は 3.8 程度であり，本研究で得られた信頼性指標は，その 2 倍近い値となり，限られた検討結果ではあるが，道路橋示方書の安全率はかなり安全側を見込んで設定されていると判断することができる．

4. 結論

RSM では MCS に比べて，極めて少ないシミュレーションにより破壊確率を求めることができた．またその結果は，MCS をもとに算定した破壊確率と良い一致を示し，RSM により十分な精度で破壊確率を求めることができた．さらに，RSM では，厳密な限界状態関数を規定する必要がないことから，この点においても非常に有効である．

本研究では，2 つの不確定量を確率変数として設定した．実際の問題では，さらに多くの不確定量を考慮する必要があるため，今後は，多くの不確定量を含み，より複雑な構造形式を対象に RSM の適用性を検討する必要がある．

参考文献 1) 例えば，日本鋼構造協会関西地区連絡会，関西地区委員会 IDM 委員会：鋼橋部材の形状初期

不整と耐荷力の統計学的研究，JSSC，Vol.16，No.170，pp.10-43，1980.4.，2) Brodning, W.C.，Diederich, F.W. and Parker, P.S.：Structural optimization and design based on a reliability design criteria，Jornal of Spacecraft，Vol.1（1），pp.56-61，1964

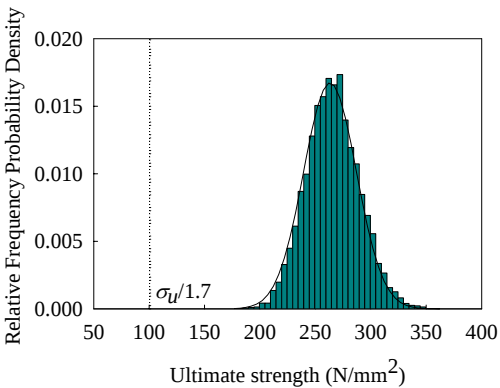


図-2 MCS の結果

($R=1.0$ ，シミュレーション回数 $n=3,000$)

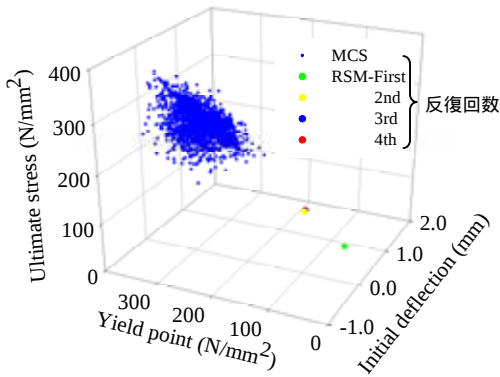


図-3 MCS と RSM の結果の比較

表-2 MCS の結果のまとめ ($R=1.0$)

反復回数	確率分布特性	平均値	標準偏差	変動係数
		μ	σ	V
最大初期たわみ	ε (mm)	0.162	0.279	1.723
降伏点	σ_y (N/mm ²)	294.030	23.588	0.080
終局強度	σ_u (N/mm ²)	263.226	23.801	0.090

表-3 RSM の収束状況 ($R=1.0$)

目標地 反復回数	信頼性指標 β	破壊確率 P_f	設計点		δ
			X_1	X_2	
First	10.489	4.953×10^{-26}	0.433	48.35	1.049
2nd	7.477	3.828×10^{-14}	0.377	119.0	0.166
3rd	7.465	4.185×10^{-14}	0.404	119.5	0.102
4th	7.460	4.378×10^{-14}	0.436	120.0	0.061

表-4 MCS と RSM の結果の比較

幅厚比 パラメータ R	計算法	信頼性指標 β	破壊確率 P_f	設計点		δ	誤差(%)
				X_1	X_2		
0.3	MonteCalroSimulation	6.657	1.408×10^{-11}	-	-	-	-
	CCD-SORM	6.651	1.468×10^{-11}	0.161	137.5	0.078	0.1
1.0	MonteCalroSimulation	6.832	4.209×10^{-12}	-	-	-	-
	CCD-SORM	7.460	4.378×10^{-14}	0.436	120.0	0.061	9.2
1.6	MonteCalroSimulation	6.937	2.008×10^{-12}	-	-	-	-
	CCD-SORM	6.964	1.668×10^{-12}	0.215	130.2	0.013	0.4