

既存RC 橋脚の耐震安全性の均一化に関する確率論的考察

東北大学 正会員 秋山 充良 東北大学 フェロー 鈴木 基行
 鹿島建設(株) 正会員 松中 亮治 東北大学 正会員 土井 充

1. はじめに

複数の限界状態から構成される破壊事象から構造系としての破壊確率を算定する構造系信頼性評価法と逐次2次計画法(SQP法)に基づく構造最適化手法を組み合わせることで、設計対象構造系が目標破壊確率を満足し、かつ特定の目的関数を最小化(最大化)する中で構造設計を行うフローを構築した。そして、現行規準により耐震設計されたRC橋脚毎の保有安全性のばらつきを提案手法に基づき均一化することを試みた。

2. 信頼性理論を用いた構造最適化手法

信頼性理論と構造最適化手法を組み合わせた設計問題は、以下のように定式化される。

$$\text{find } \{\mathbf{D}\} \quad (1) \quad \text{and } W = W(\{\mathbf{D}\}) \rightarrow \min \quad (3)$$

$$\text{such that } Pf_{sys} = Pf_{sys}(\{\mathbf{D}, \mathbf{X}, \mathbf{Z}\}) \leq Pf_{all} \quad (2) \quad D_i^l \leq D \leq D_i^u \quad (4)$$

ここに、 \mathbf{D} ：設計変数、 \mathbf{X} ：耐力や応答値などを表す確率変数、 \mathbf{Z} ：橋脚高さなど確定値とみなせる変数、 D_i^l, D_i^u ：設計変数の上下限值、 Pf_{sys} ：構造系信頼性評価法より算定される破壊確率¹⁾、 Pf_{all} ：目標破壊確率。

式(1)~(4)で明らかのように、式(2)の確率値に基づく制約条件を除き、通常の最適化手法を用いることで、目的関数 W を最小化する設計変数ベクトル \mathbf{D} を決定できる。そこで、本論文の中では、制約条件付き最小化問題の解法として、最も有力な手法の一つであるSQP法²⁾を用いた。

3. 破壊確率値に基づく既存RC橋脚の耐震安全性の均一化

(1) 解析対象RC橋脚

桁橋を支持する2つの単柱式RC橋脚(単柱A、単柱Bと略)と連続ラーメン橋脚(RC橋脚で橋梁Aと略)に対し、道路橋示方書のタイプ地震動に対する照査を過不足なく満足するように設計した。各橋脚の断面諸量を表-1に示した。表-1には、後述する限界状態式から計算される各橋脚の破壊確率も併記してある。

(2) 限界状態式、目的関数および制約条件の設定

橋脚躯体の地震時安全性照査は、橋軸方向、橋軸直角方向ともに、せん断破壊、変形性能、残留変位に対して行う。そこで、破壊確率算定のための限界状態式 g_i を以下のように定義した($i=1\sim 3$:橋軸方向、 $i=4\sim 6$:橋軸直角方向)。

$$\text{せん断破壊: } g_i = \alpha_1 V_C + \alpha_2 V_S - \alpha_3 V_{act}, \quad (i=1,4) \quad (5)$$

$$\text{変形性能: } g_i = \alpha_4 \delta_U - \alpha_5 \delta, \quad (i=2,5) \quad (6)$$

$$\text{残留変位: } g_i = \delta_{Ra} - C_R(\alpha_5 \delta - \delta_y), \quad (i=3,6) \quad (7)$$

ここに、 V_C 、 V_S ：帯鉄筋以外および帯鉄筋が受け持つせん断耐力、 V_{act} ：作用せん断力、 α_1 、 α_2 、 α_3 ： V_C 、 V_S および V_{act} の算定に伴うばらつきを考慮する係数、 δ_U ：終局変位、 δ ：エネルギー一定則より推定される応答変位、 α_4 ：終局変位算定過程に含まれるばらつきを考慮する係数、 α_5 ：動的解析結果との差を考慮する補正係数、 δ_{Ra} ：許容残留変位、 C_R ：残留変位比応答スペクトル、 δ_y ：降伏変位。

6つの限界状態式より式(2)の Pf_{sys} を算定する際の各確率変数の条件を表-2に示した。各値は、材料強度のばらつきや実験結果に基づき提案された耐力算定式の持つばらつきなどから評価されたものである。

式(3)に相当する目的関数は、終局曲げモーメント M_{do} をせん断力換算した値とせん断耐力 V の線形和が最小になる時を最適な設計状態と考え定義した。この時、RC橋脚の最適化問題は以下のように定式化される。

表-1 橋脚の断面諸量

	単柱A (高さ7.5m)	単柱B (高さ15m)	橋梁A (高さ14m)
固有周期(sec)*)	0.57 0.54	1.09 1.00	0.68 0.55
断面寸法(m)	3.0×3.2	4.5×5.0	4.0×6.0
軸方向鉄筋	D22-78本	D29-122本	D22-228本
帯鉄筋	D16@150	D16@150	D16@100
中間帯鉄筋	D16@150	D16@150	D16@100
帯鉄筋比	橋軸方向	0.17%	0.16%
	直角方向	0.18%	0.18%
破壊確率 Pf_{sys}	1.23×10^{-1}	2.05×10^{-1}	4.80×10^{-2}

*)降伏剛性を用いて算定(上段：橋軸方向、下段：直角方向)
 地盤種別は 種地盤を想定

Key Words：信頼性理論，構造最適化手法，RC橋脚，耐震設計，耐震性能

連絡先：〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉06 Tel：022(217)7447 Fax：022(217)7448

$$\text{find } \{\mathbf{D}\} = \{M_{do}, V\} \quad (8)$$

$$\text{such that } Pf_{sys} = Pf_{sys}(\{\mathbf{D}, \mathbf{X}, \mathbf{Z}\}) \leq Pf_{all} \quad (9)$$

$$\text{and } W = V + \frac{M_{do}}{h_a} \rightarrow \min \quad (10)$$

$$M_{c,d0} \leq M_{do}, V \leq V^u \quad (11)$$

ここに、 h_a ：橋脚高さ、 $M_{c,d0}$ 、 V^u ：曲げモーメントの下限值およびせん断耐力の上限値。

道路橋示方書に基づき耐震設計された橋梁 A の構造系としての破壊確率 Pf_{sys} は、表 - 1 に示す通りである。そこで、式(9)で与えられる目標破壊確率 Pf_{all} として、この橋梁 A の破壊確率 Pf_{sys} を与えることで単柱 A および単柱 B の最適設計を行い、構造物間の保有安全性レベルの整合を試みた。設計フローを図 - 1 に示した。図 - 1 に示す通り、SQP 法より次のステップの耐力値が決定されると、橋脚諸元のうち、軸方向鉄筋量と帯鉄筋量をパラメータにとり、その耐力値を満足するように鉄筋量を修正しているため、式(10)に基づき目的関数を最小化することは、使用鉄筋量の最小化を図っているとも言える。

(3) 解析結果

道路橋示方書に基づき試設計された際の各耐力値から、最適設計を行い、橋梁 A と同一の安全性を保有させるために必要となる耐力の増加率を算定した結果が図 - 2 である。過不足なく示方書の規準を満足するような同じコンセプトのもとで設計を試みても、構造系としての安全性を確率的に評価した場合には、表 - 1 に示すような保有安全性の差が生じる。現状では、目標破壊確率を設定するまでには至っておらず、また、道路橋示方書に基づき試設計された状態から、最適化によって得られる断面諸量の変更分は一律に決まるわけではないため、図 - 2 に示す単柱毎の耐力増加率に一般性はない。しかしながら、破壊確率値に基づいて現行規準により耐震設計された構造物間の保有安全性のばらつきを整合させると、この程度の断面諸量の変更が必要になる場合が確認された。

4. 結論

(1) 構造系信頼性評価法と SQP 法に基づく構造最適化手法を組み合わせることで、目標破壊確率を満足し、かつ特定の目的関数を最小化(最大化)する中で構造設計を行うフローを構築した。(2) 現行示方書のもとでは、構造物毎の安全性が均一化されてなく、耐震安全性に大きな差がある構造物を設計する可能性に留意する必要がある。今後、本研究で提示したような確率論的手法を反映させることで、改善していく必要があると思われる。

参考文献 1) 鈴木基行, 秋山充良, 山崎康紀: 構造系の信頼性評価法および RC 橋脚の耐震設計への適用に関する研究, 土木学会論文集, No.578/V-37, pp.71-87, 1997. 2) ASNOP 研究会編: 非線形最適化プログラミング, 日刊工業新聞社, 1991.

表 - 2 各確率変数の分布形およびパラメータ

限界状態式での記号	確率分布	確率分布パラメータ	
		平均値	変動係数
V_C	正規分布	耐力算定式	10.0%
V_S	正規分布	耐力算定式	8.0%
V_{act}	正規分布	曲げ耐力より逆算	4.6%
α_1	正規分布	1.02	8.2%
α_2	正規分布	1.22	14.5%
α_3	正規分布	1.00	30.0%
δ_U	正規分布	道示による変形能評価	6.1%
δ	正規分布	材料一定則より推定	30.0%
α_4	正規分布	1.16	25.0%
α_5		動的解析結果への補正	(確定値)
δ_{Ra}		(橋脚高さ)/100	(確定値)
δ_y	正規分布	降伏変位算定値	8.2%
C_R	正規分布	残留変位比応答スリット(=0.6)	50.0%

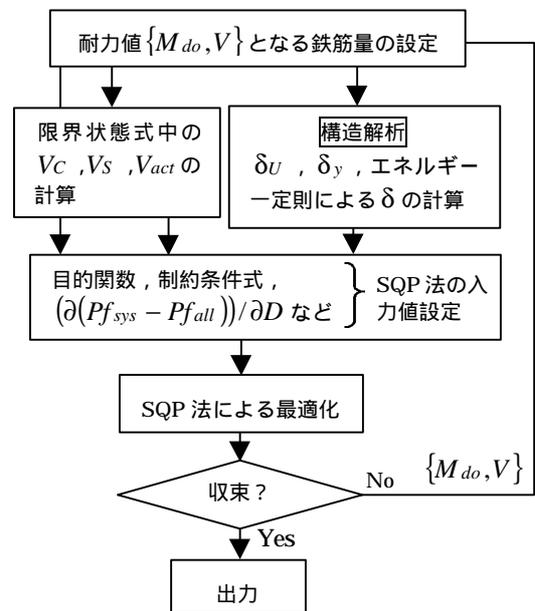


図 - 1 単柱式 RC 橋脚の設計フロー

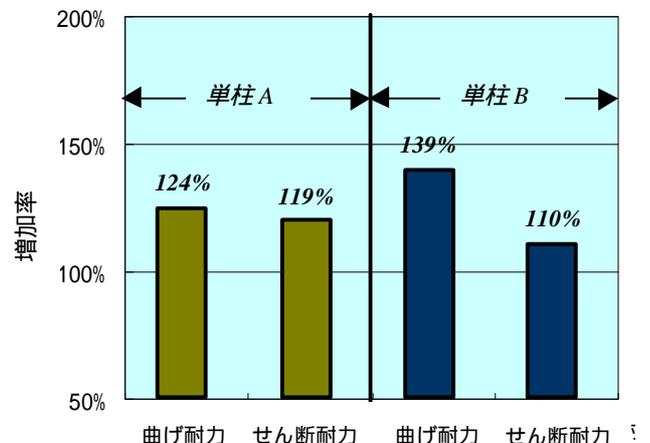


図 - 2 橋梁 A と安全性を整合させるのに必要な耐力増加率