

免震支承とRC橋脚基部に多重非線形を考慮した道路橋の耐震信頼性評価に関する一考察

九州大学大学院 学生会員○高森 麻有美 九州大学大学院 正会員 松田 泰治
九州大学大学院 フェロー 大塚 久哲

1. はじめに

信頼性設計は、様々な不確定要因のもとで構造物の耐用期間中に起こる破壊などの不都合な現象をどの程度の発生確率に収めたらよいかという概念に基づいている。つまり、不都合な事象の発生確率(以下、破壊確率と略す)を目標とする値以下にすることにより安全性を保障する設計法である。本研究では、この破壊確率の簡易な算定法として弾性解析でよく扱われている2次モーメント法とPNET法が、免震支承と橋脚基部を考慮した多重非線形系にも適用可能であるかをモンテカルロシミュレーション法の結果と比較し、検証した。今回は導入として、桁、免震支承、RC橋脚からなる道路橋を解析対象に免震支承とRC橋脚基部に関する非線形パラメータの不確定性に着目した。

2. 解析モデル

解析対象としたのは、I種地盤A地域・支承固定の耐震条件で断面設計された橋脚-基礎系と高減衰積層ゴム支承からなる3径間鋼桁免震橋の1橋脚で、その解析モデルを図-1に示した。免震橋梁は鋼桁と高減衰積層ゴム支承および鉄筋コンクリート製の単柱式橋脚(直接基礎)から構成される。鋼桁は桁の重心位置で集中質量とし、フーチングを含むRC橋脚は二次元はり要素でモデル化した。免震支承は、バイリニア型の水平ばねで置き換え、鉛直方向は剛とした。橋脚基部の二次元はり要素の非線形性は武田モデルで考慮した。フーチング下端には地盤ばねを考慮し、道路橋示方書に基づき水平ばね・鉛直ばねおよび回転ばねでモデル化した。検討用の入力地震動は平成14年度版道路橋示方書V(耐震設計版)の標準波より、タイプII-I-1 JMAKOB E OBS.NSを用いた。入力地震動に関してもばらつきを考慮することができるが、今回は非線形の不確定構造パラメータを考慮した場合に破壊確率の簡易な算定法が適用できるかを目的としているため、確定入力とし1波のみを用いた。

3. RC 橋脚の安全性評価

図-2に示した安全性検討フローに従い、RC橋脚の地震時における安全性評価を行った。

3-1. 不確定構造パラメータ

構造パラメータのうち、非線形パラメータである橋脚基部の梁部材および免震支承の水平ばねの初期剛性、降伏変位、剛性低下率の不確定性を考慮した(表1参照)。実験データなどから変動係数は10%とした。表-1中の変動係数は、解析後の実際の値であり、第一降伏点から第二降伏点間の剛性低下率を剛性低下率(1)、第二降伏点以降の剛性低下率を剛性低下率(2)としている。試行回数は1000で、ばらつきは正規分布を仮定した。免震支承水平ばねに考慮した構造パラメータのばらつきを図-3に示す。なお各パラメータ間の相関は考慮していない。

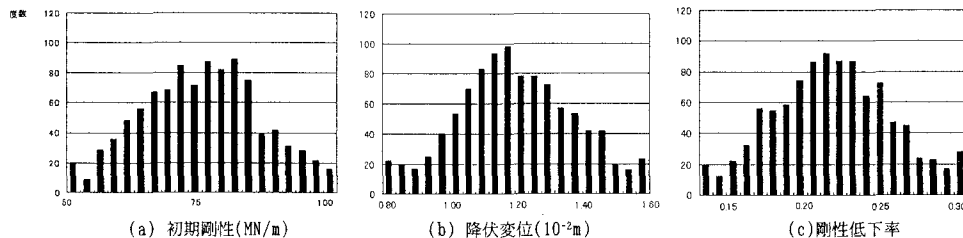


図-3 構造パラメータのばらつき「免震支承水平ばね(要素番号 101)」

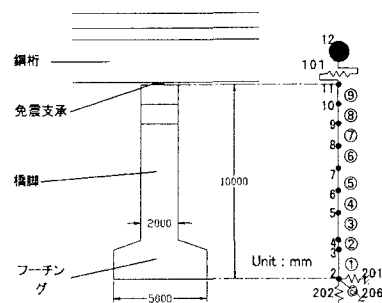


図-1 解析モデル

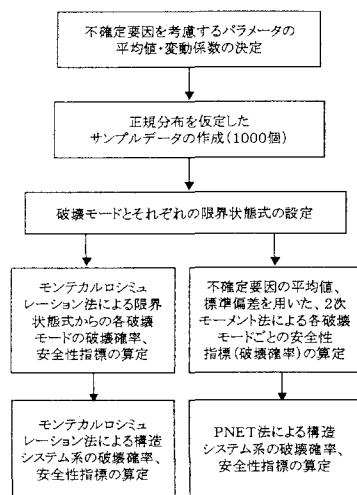


図-2 RC橋脚の安全性検討のフロー

表-1 不確定パラメータ

不確定要素	確率分布パラメータ	
	平均値	変動係数(%)
免震支承 水平ばね	初期剛性(KN/m)	74551
	降伏変位(m)	0.0116
	剛性低下率	0.211
橋脚基部 非線形梁	第一降伏点曲率	9.66×10^{-5}
	第二降伏点曲率	0.00109
	剛性低下率(1)	0.251
	剛性低下率(2)	0.000433
		10.3

表-2 各破壊モードの破壊確率
(a) 免震支承(設計変位)

モンテカルロシミュレーション法					
限界値(cm)	20	18	16	14	13.8
破壊確率	0	0	0	0.227	0.337
安全性指標	-	-	-	0.75	0.42
2次モーメント法					
限界値(cm)	20	18	16	14	13.8
破壊確率	1.90×10^{-8}	4.81×10^{-8}	0.011	0.245	0.298
安全性指標	5.50	3.90	2.29	0.69	0.53

(b) 橋脚基部非線形梁(曲率)

モンテカルロシミュレーション法	
破壊確率	0.253
安全性指標	0.66
2次モーメント法	
破壊確率	0.268
安全性指標	0.62

表-3 システム系の破壊確率

システム系	
モンテカルロシミュレーション法	
破壊確率	0.447
安全性指標	0.13
PNET法	
破壊確率	0.382~0.513(0.447)
安全性指標	0.13

3-2. 限界状態式

ある破壊モードにおける限界値をR, 応答値をSとすると, 限界状態式は以下のように表せる.

$$Z = R - S \quad (1)$$

本研究では道路橋脚の終局限界状態の照査項目として免震支承と橋脚に * PNET 法は上限値~下限値(平均値)を示している
着目し, 免震支承のせん断ひずみおよび橋脚塑性ヒンジ部の曲率を取り上げた. ここで, 免震支承の限界状態は, 橋の動的耐震設計¹⁾の健全度レベル4に定められた「支承の変形がゴムのせん断ひずみで250%に達したとき」とした. これに基づき, 免震支承におけるせん断ひずみ250%相当の設計変位を算定し, 限界状態式を設定した. 橋脚の限界状態は, 支承部と同じく同書¹⁾の健全度レベル4に定められた「下端の塑性ヒンジ部においてコンクリートの圧縮緑ひずみが終局ひずみ ϵ_{cu} (=0.002)に達したとき」とした. このひずみに基づき非線形梁要素における終局ひずみ相当の曲率を算定し, 限界状態式を設定した. ここでは応答値Sを正規分布に従う確率変数として扱った.

3-3. 各破壊モードの破壊確率の算定

2次モーメント法とモンテカルロシミュレーション法(試行回数1000回, 以下MC法と略す)を用い, 各破壊モードの破壊確率と安全性指標を算定した. 解析結果を表-2に示す. 免震支承の限界値を設計変位20cmとしたときはMC法では破壊が起こらなかった. そこで限界値を, 18cm, 16cm, 14cmと小さくして算定を行ったところ, 14cmの時点から破壊が始まったので13.8cmのもう1ケースを追加した. 実際に破壊が発生した2ケースでMC法と2次モーメント法を比較すると, 免震支承の破壊確率は約90%, 安全性指標は約80%から90%の精度で一致していた. 橋脚基部非線形梁においても破壊確率がMC法で0.253, 2次モーメント法では0.268, 安全性指標についてはMC法を用いて得られた数値は0.66, 2次モーメントでは0.62と非常に近い値を得た. よって, 2箇所に非線形を考慮した場合においても2次モーメント法が適用できることが示されたといえる. また, 免震支承, 橋脚基部非線形梁の両者とも, 限界値を健全度レベル4に設定して信頼性評価を行ったが, 安全性指標 β で比べると, 免震支承の β は橋脚基部非線形梁の9倍程度大きな値をとった. 現行の設計法では, 橋脚基部より支承部のほうに安全側の設計になっていることが示された. 免震支承を14cmの設計変位でとしたときに, 両者の安全性がほぼ同等のものとなった.

3-4. システム系の破壊確率

橋脚システム系の安全性評価をMC法とPNET法を用いて行った. 道路橋を対象とした今回の場合では, 免震支承が橋脚基部のどちらか一方が壊れた時点で橋梁システム系が破壊するとした. ここでは免震支承の設計変位が14cmのときのシステム系の破壊確率の算定を行った. ただし, 免震支承と橋脚基部の破壊の相関については完全独立とした. 結果を表-3に示す. 両手法から算出した破壊確率, 安全性指標はほぼ同値となった. 免震支承のみ, または橋脚基部のみ破壊した単独破壊ケース数に比べて, どちらも破壊した複合破壊ケースが少なかったため, 両手法間の誤差が非常に小さくなったものと考えられる.

4. まとめ

本研究では, 免震橋脚を対象として非線形応答解析における既存の破壊確率算定法の適用性を検証した. タイプIIの1波のみに対して行った, 限定的な条件から得られた知見を以下に示す.

- 2次モーメント法により算出した免震支承と橋脚基部の破壊確率は, MC法の破壊確率とよく一致し, 多重非線形においても簡易法である2次モーメント法が適用できる可能性が示唆された.
- タイプIIの1波に対し, 免震支承, 橋脚基部非線形梁の両者とも限界値を健全度レベル4に設定して信頼性評価を行ったが, 免震支承の安全性指標は橋脚基部非線形梁の9倍程度大きな値をとった. 現行の設計法では, 橋脚基部より支承部のほうに安全側の設計になっていることが示された. 設計変位レベルで20cmから14cmに下げたときに, 両者の安全性がほぼ同等となった.
- PNET法により算出した橋脚システム系の破壊確率はMC法の破壊確率とよく一致し, 多重非線形においても簡易法であるPNET法が適用できる可能性が示された.

参考文献 1) 大塚久哲: 橋の動的耐震設計, 土木学会, 2003