

材料特性を考慮した橋脚モデル応答の不確定性分析

東京大学 学生会員 ○中村 俊敬
 東京大学 正会員 蘇 迪
 東京大学 正会員 長山 智則

1. 研究背景と目的

現行の道路橋の設計基準は部分係数設計法が導入され、信頼性理論の設計水準レベル1に相当する¹⁾が、地震時の損傷や破壊を伴う非線形性の強い構造物の応答の不確定性の評価には不十分だと考えられる。本研究では材料特性、特にコンクリートと鉄筋の強度のばらつきに着目し、構造物の地震時の応答の不確定性について、数値モデルを用いて分析する。

2. 研究対象：縮小橋脚モデル

本研究では高橋ら(2016)が行った E-ディフェンスにおける振動台実験²⁾を参考に、東京大学コンクリート研究室が開発した FEM 解析ソフトウェア「COM3D」を用いて、縮小 RC 橋脚の数値モデルを作成した(図 1)。コンクリートはひび割れに応じた剛性低下モデル、鉄筋はトリリニアモデルを用い、全要素を RC 要素でモデル化した。このように作成したモデルの要素数は 3970、節点数は 5100 である。

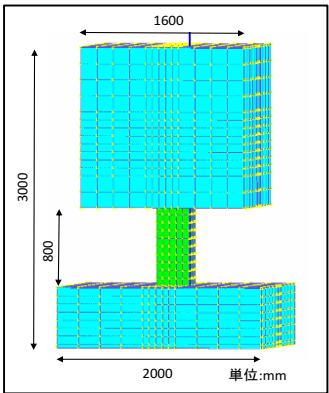


図 1 作成したモデル

材料特性として、強度のばらつきに着目して考察する。コンクリート圧縮強度、および鉄筋の降伏強度と引張強度は振動台実験における材料試験結果の平均値(μ)と標準偏差(σ)を用い、それぞれ正規分布を仮定した乱数(Z)を用いた式 1 により 30 ケース設定した(表 1)。 X が新たに作成した材料強度である。

$$X = \mu + \sigma \times Z \quad \cdots (1)$$

また入力した地震動は、鷹取波のうち主要な振動を含む 6 秒間を抽出し入力波とした。

表 1 材料強度の平均値、標準偏差、変動係数

材料特性	Ave. (MPa)	Std. (MPa)	Cov. (%)
コンクリート圧縮強度	40.31	1.27	3.16
鉄筋降伏強度	366.75	7.07	1.93
鉄筋引張強度	541.44	4.70	0.87

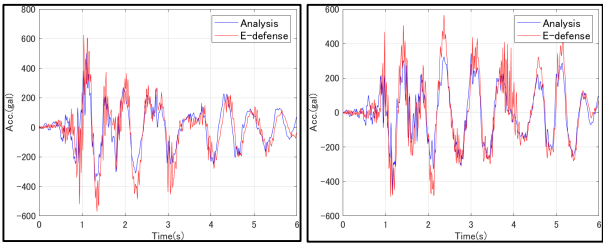
3. 分析手法

検討した応答指標は重錘部中央における加速度、変位、残留変位、および柱下部のひずみ、柱の最大曲率や曲率靱性率、変位靱性率である。曲率は水平 2 方向の合成値である。靱性率(X_D)は解析における最大値(X_{max})を、降伏時の曲率・変位(X_y)で割ることで求めた(式 2)。橋脚の降伏は、ひずみが鉄筋の降伏強度に達したと定義する。本研究の計算では、降伏時刻は 1.06 秒であった。

$$X_D = X_{max} / X_y \quad \cdots (2)$$

それぞれの応答指標について、頻度分布形状の推定を行った。検討した分布形状は正規分布、対数正規分布、ガンマ分布、グンベル型極大値分布、グンベル型極小値分布である。これらの分布について最尤推定法によりパラメータ推定を行ったのち、各指標において尤度が最大となる分布を選択した。

4. モデルの妥当性の検証



(a) X 方向 (b) Y 方向

図 2 数値解析と振動台実験の加速度応答の比較
数値解析と振動台実験の加速度応答の時刻歴を図

キーワード 地震、信頼性設計、非線形解析、材料特性、不確定性

連絡先 〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1 東京大学工学系研究科社会基盤学科 TEL 03-5841-4739

2により比較する。高周波成分は若干ずれることがあるが、応答の傾向を捉えており、モデルの妥当性は示されている。本研究では応答のばらつきを分析するという目的から、十分対応できると考えた。

5. 材料非線形特性によるばらつきの進展

図3はX方向相対変位応答30ケースの時刻歴である。鉄筋の降伏時刻(1.06秒)直後は変動係数が0.45%であるのに対し、地震動によってひび割れなどの損傷が進むにつれ、変動係数の値は1.42%、2.44%と大きくなった。また図4に示すように、分布形状の歪みも解析が進むにつれ大きくなり、選択された形状もそれぞれ順に正規分布、対数正規分布、グンベル型極大値分布と異なる結果となった。これにより、RC橋脚の地震時応答について、ひび割れが進むにつればらつきは大きくなり、その分布形状は大きく変化することが示された。

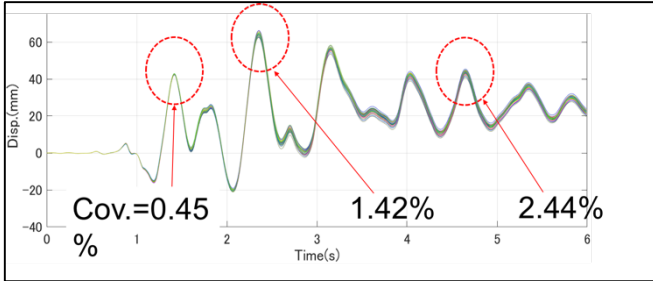
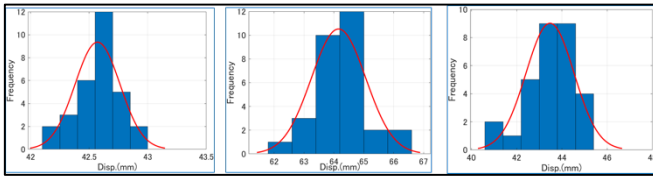


図 3 X 方向相対変位応答時刻歴 (30 ケース)



(a) t=1.42s (b) t=2.36s (c) t=4.65s

図 4 図 3 内の各時刻におけるヒストグラム

6. 分布推定結果と変動係数の比較

コンクリートおよび鉄筋の30ケースについて、各応答の分布推定結果および変動係数の値を表2・表3に示す。材料特性において正規分布を仮定したにもかかわらず、選択された多くの分布は正規分布とは異なる分布形状を示し、またその形状は指標によって様々に異なることが示された。また材料特性のばらつきはコンクリートの方が大きいにもかかわらず、Y方向の加速度と変位、最大曲率の指標において鉄筋の変動係数が大きい結果となった。このことか

ら応答のばらつきに対して、鉄筋の与える影響が大きいことが示唆された。

表 2 応答の分布推定結果

指標	コンクリート	鉄筋
X 加速度	極小値分布	極小値分布
Y 加速度	極大値分布	極大値分布
X 変位	対数正規分布	対数正規分布
Y 変位	極小値分布	正規分布
ひずみ	正規分布	正規分布
最大曲率	対数正規分布	極小値分布
曲率靱性率	極大値分布	正規分布
変位靱性率	対数正規分布	正規分布
残留変位		正規分布

表 3 応答の変動係数

指標	コンクリート	鉄筋
X 加速度	0.64%	0.57%
Y 加速度	0.47%	0.88%
X 変位	1.39%	1.11%
Y 変位	1.06%	1.58%
ひずみ	7.93%	6.91%
最大曲率	1.61%	1.99%
曲率靱性率	3.63%	2.02%
変位靱性率	2.29%	1.57%
残留変位		3.66%

7. 結論

コンクリートと鉄筋それぞれの材料特性のばらつきを考慮した地震時の非線形応答の不確定性について、各指標の分布形状ならびに変動係数の値は様々に異なり、材料特性が正規分布にも関わらず多くの指標で正規分布ではない複雑な形状となることが分かった。また一つの指標についても、損傷の進展によってそのばらつきと分布は大きく変化することが示された。変動係数の値から幾つかの指標において鉄筋の影響が強いことも示された。

参考文献

1)道路橋示方書・同解説 I 共通編, 日本道路学会, 2017

2)高橋良和, 小林望, 縮小 RC 橋脚模型 16 体の一斉振動実験に基づく地震応答特性の定量的評価, 土木学会論文集 A1(構造・地震工学), Vol72, No. 1, 176-191, 2016