

RC 橋脚の非線形応答特性を反映した地震動強度指標に基づくフラジリティ曲線の算定

東北大学 正会員 ○松崎 裕  
 東北大学 学生会員 笠原 康平  
 東北大学 フェロー会員 鈴木 基行

1. はじめに

作用をいかなる指標に基づいて定量的に評価するのかは、構造設計やリスク評価において、極めて重要な課題である。特に、地震被害は広域にわたって同時多発的に発生する特徴を有することから、地震直後における広域被害の迅速かつ適切な把握を図るためには、構造物の損傷程度に影響を与える最大応答変位とよく対応した地震動強度指標が必要である。一方で、構造物の地震時最大応答変位を評価する際のばらつきは極めて大きく、耐震設計や地震損傷リスク評価における主要な不確定要因の一つである。本研究では、こうした構造物の非線形地震応答の評価に介在する不確定性を低減することを目的とした基礎的検討として、RC 橋脚の非線形地震応答特性を反映した地震動強度指標に基づいて、フラジリティ曲線を評価することを試みる。

2. RC 橋脚の非線形応答特性を反映した地震動強度指標

構造物の非線形応答特性を反映させるため、地震動の振幅特性と位相特性を考慮した式(1)の指標  $I_{NL}$  を提案する。

$$I_{NL}(T_y) = \bar{S}_a(T_y) \cdot \bar{\sigma}_{igr}^\alpha(T_y) \quad (1)$$

$$\bar{S}_a(T_y) = \frac{1}{T_y} \int_{T_y}^{2T_y} S_a(T) dT \quad (2)$$

$$\bar{\sigma}_{igr}(T_y) = \frac{\sigma_{igr}(T_y)}{T_y} = \frac{1}{T_y} \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{T_y \leq T \leq 2T_y} \{t_{gr}(T) - \mu_{igr}\}^2} \quad (3)$$

$$\mu_{igr} = \frac{1}{N} \sum_{T_y \leq T \leq 2T_y} t_{gr}(T) \quad (4)$$

ここに、 $\bar{S}_a$ は構造物の降伏時固有周期 $T_y$ から $2T_y$ の範囲の固有周期 $T$ における応答加速度 $S_a(T)$ の平均値、 $\bar{\sigma}_{igr}$ は同固有周期帯における群遅延時間 $t_{gr}$ の標準偏差を降伏時固有周期 $T_y$ で除した値、 $N$ は同固有周期帯における成分数、 $\alpha$ は定数である。つまり、提案指標 $I_{NL}$ は構造物の非線形応答に影響を及ぼす固有周期帯における振幅特性としての応答加速度の平均値と、位相特性としての群遅延時間の標準偏差の両者を反映した指標となっている。

3. 解析対象橋脚および解析手法

解析対象とするのは、表-1に示す諸元を有する道路橋示方書<sup>1)</sup>に基づいて設計されたI種地盤上のB種の橋を支持するRC橋脚である。フラジリティ曲線は、橋軸方向のみを対象に、耐震性能2の限界状態に対応する変位<sup>1)</sup>を超過する最大応答変位が生じる確率として、材料物性のばらつき<sup>2)</sup>や限界状態に対応する変位評価の際のばらつき<sup>3)</sup>を考慮したモンテカルロ・シミュレーション(以下、MCS)に基づいて評価した。仮定した統計量と確率分布形を表-2に示す。RC橋脚の地震応答は、バイリニア型の骨格曲線を有するTakeda型モデルに基づいて水平荷重-水平変位の履歴特性をモデル化し、Newmark  $\beta$ 法( $\beta=1/4$ )を用いた動的解析により評価した。

表-1 解析対象 RC 橋脚の諸元

上部構造の質量	633 ton
断面寸法	5000 mm×2300 mm
橋脚高さ	10 m
使用鉄筋	SD345-D32, D16
軸方向鉄筋比	1.26 %
横拘束筋体積比	0.53 %

表-2 仮定した統計量と確率分布形<sup>2),3)</sup>

	平均値	変動係数	確率分布形
コンクリート圧縮強度	28.2 N/mm <sup>2</sup>	10 %	正規分布
鉄筋の降伏強度	414 N/mm <sup>2</sup>	7 %	正規分布
鉄筋の弾性係数	2.0×10 <sup>5</sup> N/mm <sup>2</sup>	1%	正規分布
耐震性能2の限界状態に対応する変位 <sup>1)</sup>	道路橋示方書 <sup>1)</sup> による計算値	16.1 %	正規分布

キーワード：地震動強度指標，RC 橋脚，非線形応答，フラジリティ曲線

連絡先：〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-06 TEL：022-795-7447 FAX：022-795-7448

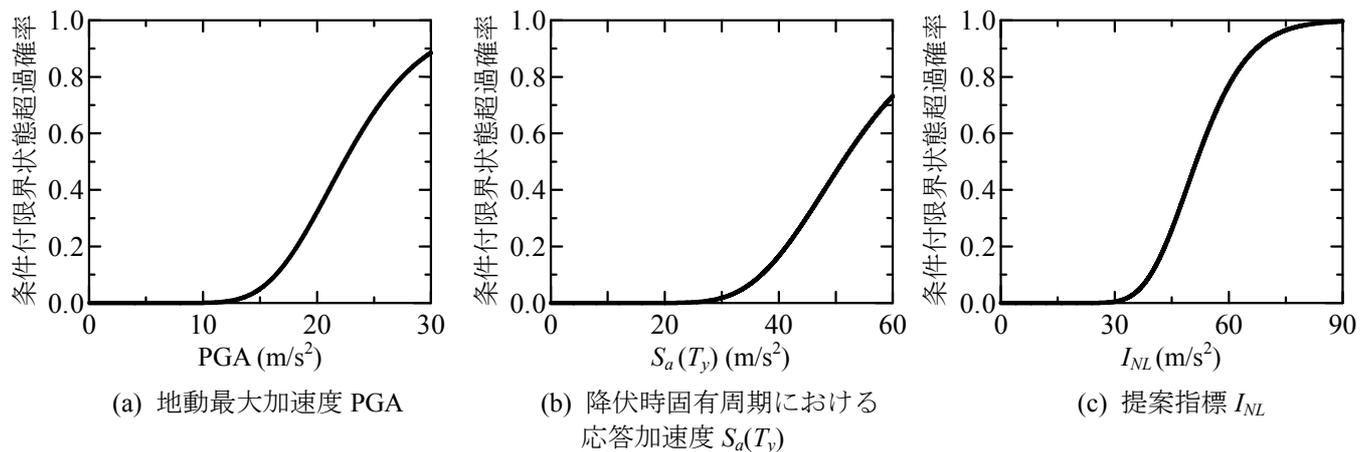


図-1 フラジリティ曲線

条件付限界状態超過確率と各地震動強度指標の対応関係であるフラジリティ曲線は、地震動強度を変化させて離散的に条件付限界状態超過確率を算定したものが対数正規分布により良好に近似されることを確認した上で、対数正規近似を行って算定した。

#### 4. 地震動強度指標と入力地震動群

フラジリティ曲線の算定における地震動強度指標としては、構造物の振動特性が反映されていない地動最大加速度、構造物の降伏時固有周期における応答加速度、提案指標  $I_{NL}$  の3種類を用いた。前記したように、解析対象地盤はI種地盤であり、地表面では工学的基盤と同等の地震動が作用するものとして、澤田ら<sup>4)</sup>の手法を用いて、各地震動強度指標において所定の値となるように地震動振幅を調整して、位相特性の異なる地震動群をMCSの必要回数分だけ発生させた。

#### 5. フラジリティ曲線

各地震動強度指標を対象として算定したフラジリティ曲線を図-1に示す。構造物の振動特性が未考慮である地動最大加速度や弾性応答特性のみを考慮した応答加速度の場合に比較して、構造物の非線形応答特性が反映されている提案指標の場合には最大応答変位の推定精度が向上して、最大応答変位のばらつきが有意に小さくなることを反映して、フラジリティ曲線の傾きがより急になっていることが確認される。

#### 6. まとめと今後の課題

本研究では、構造物の非線形地震応答の評価に介在する不確定性を低減することを目的とした基礎的検討として、RC橋脚の非線形地震応答特性を反映した地震動強度指標に基づいて、現行の道路橋示方書によって設計されたRC橋脚のフラジリティ曲線を算定することを試みた。今後、既存不適格構造物も含めた様々な諸元を有する構造物群で検討を行い、地震損傷リスクの定量化に関する基礎データの収集を図るとともに、地震応答評価および地震損傷リスクの定量化における主要な不確定要因の同定や合理化を図っていく必要がある。

**謝辞：**本研究の一部は、科学研究費若手研究(B)(課題番号：24760360、研究代表者：松崎裕)および東北大学災害科学国際研究所特定プロジェクト研究(研究代表者：鈴木基行)の助成により実施されました。ここに記して謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 社団法人 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V耐震設計編，丸善出版，2012。
- 2) 足立幸郎，運上茂樹：材料強度等のばらつきが鉄筋コンクリート橋脚の地震応答特性に及ぼす影響，JCIコンクリート構造系の安全性評価研究委員会報告書・論文集，pp. 367-374，1999。
- 3) Junichi SAKAI and Jun-ichi HOSHIKUMA: EVALUATION OF DUCTILITY CAPACITY OF REINFORCED CONCRETE BRIDGE COLUMNS CONSIDERING PLASTIC HINGE DEVELOPMENT, Proceedings of the International Symposium for Bridge Earthquake Engineering in Honor of Retirement of Professor Kazuhiko Kawashima, pp. 73-88, 2013.
- 4) 澤田勉，平尾潔，辻原治，三神厚：最大地動の距離減衰式に基づく工学的基盤地震動のシミュレーション手法，土木学会論文集，No. 682/I-56，pp. 311-322，2001。