

RC橋脚の非線形応答特性を考慮した地震動強度指標 に関する基礎的研究

松崎 裕¹・笠原 康平²・鈴木 基行³

¹正会員 博(工) 東北大学助教 大学院工学研究科土木工学専攻
(〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-06)

²学生会員 東北大学 大学院工学研究科土木工学専攻 (同上)

³フェロー会員 工博 東北大学教授 大学院工学研究科土木工学専攻 (同上)

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。

従来、地震による構造物の被災率の評価、構造物の耐震安全性評価や交通機関の運転規制の判断に用いる地震動強度指標としては、地動最大加速度等の地震動の最大振幅、計測震度、加速度応答スペクトルやSI値等の弾性応答に基づく指標が用いられてきた。しかしながら、これらの地震動強度指標には構造物の非線形の地震応答特性が反映されていないため、構造物の被災率との乖離や大きなばらつきの介在が避けられず、地震直後の迅速な被害把握に直接的に活用できるものではない。このように、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。一方で、近年の研究により、弾性加速度応答スペクトルが等しい地震動時刻歴であっても、群遅延時間で表される地震動の位相特性の違いにより、構造物の非線形応答は大きな影響を受けることが指摘されている¹⁾。地震動強度指標に位相特性を考慮することで、構造物の非線形応答特性を適切に反映させられると考えられる。

そこで、本研究では、地震動の振幅特性だけでなく、非線形応答に影響を及ぼす位相特性についても考慮した上で、非線形最大応答変位をより精緻に推

定できる地震動強度指標を提案するとともに、既往の強震記録群を用いた動的解析により、提案した地震動強度指標に基づくRC橋脚の非線形最大応答変位の推定精度に関する基礎資料を得ることを目的とする。さらには、前記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考慮した提案指標に基づいて、フラジリティ曲線を評価することを試みる。

2. 非線形応答特性を考慮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。

$$I_{NL}(T_y) = \overline{S_a}(T_y) \cdot \overline{\sigma}_{igr}^\alpha(T_y) \quad (1)$$

ここに、 T_y はRC橋脚の降伏剛性を用いて算定される固有周期であり、 α は定数、 $\overline{S_a}(T_y)$ および $\overline{\sigma}_{igr}^\alpha(T_y)$ は、それぞれ構造物の非線形応答に主たる影響を及ぼす固有周期帯における地震動の振幅特性および位相特性を表し、式(2)および式(3)により算定する。

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

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

ここに、 N は、着目した周期帯における振動数成分の成分数であり、 μ_{igr} は同周期帯における群遅延時

表-1 対象とした強震記録群

地震	波形数
1995年兵庫県南部地震	4
2000年鳥取県西部地震	6
2001年芸予地震	4
2003年三陸南地震	10
2003年十勝沖地震	4
2004年新潟県中越地震	6
2007年能登半島地震	4
2007年新潟県中越沖地震	16
2008年岩手・宮城内陸地震	6
2011年東北地方太平洋沖地震	42
合計	102

間 t_{gr} の平均値であり、式(4)により算定される。

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

式(1)における定数 α は、強震記録群を入力して得られる最大応答変位 D_{max} と整合するように、式(5)の定数 A および α の組み合わせとして同定される。

$$D_{max} = A \cdot I_{NL} \quad (5)$$

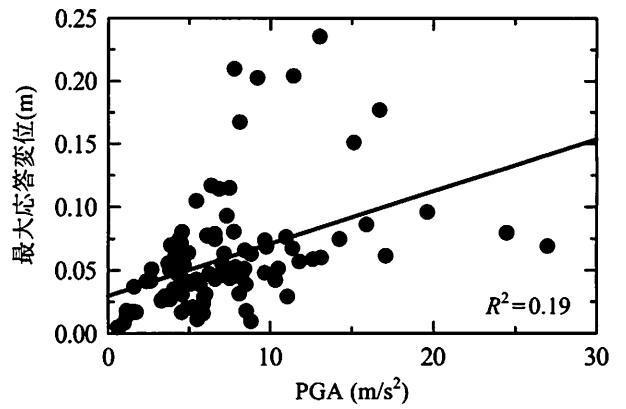
以上のように、提案指標は構造物の非線形応答に影響を及ぼす固有周期帯における弾性応答加速度の平均値と、同周期帯に対応する成分波の継続時間を支配する群遅延時間の標準偏差の両者を反映した指標である。

なお、本研究では、構造物の非線形応答に主たる影響を及ぼす周期帯を降伏時固有周期からその2倍の範囲と設定した。これは、i)変形性能の違いなどを考慮して算定範囲を変えた場合であっても、靱性率4程度の一般的なRC橋脚を想定した場合には、降伏時固有周期から2倍の範囲の周期成分で概ね非線形応答によく対応することが予備検討により確認されたこと、ii)大地震直後の広域被害推定への適用も念頭に、パラメータ数を限定した上で、簡易かつある程度の精度で非線形応答を推定することを意図したことによる。

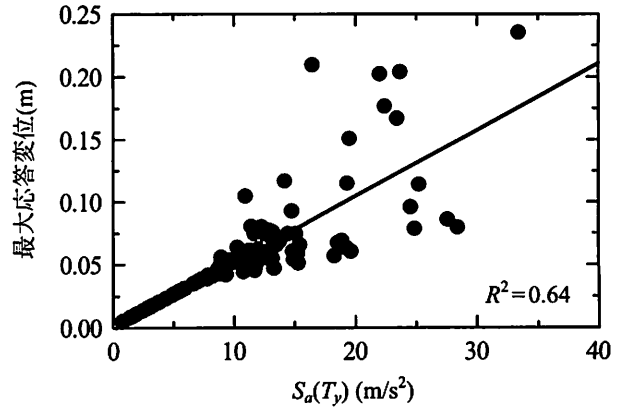
3. 既往の地震動強度指標との比較

(1) 入力地震動群

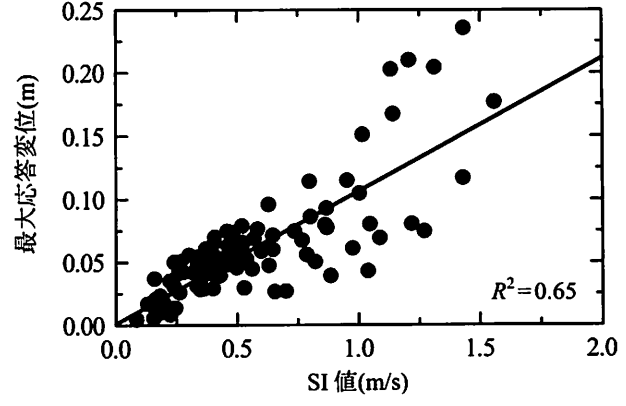
提案指標 I_{NL} と非線形最大応答変位との関係を確認するため、解析対象として参考文献2)に記載のRC橋脚を用いて、既往の指標との比較を行った。その際、式(1)における定数 α は、近年、防災科学技術研究所のK-NETおよびKiK-netと気象庁の強震観測網で観測された表-1に示す合計102波形の水平成分の強震



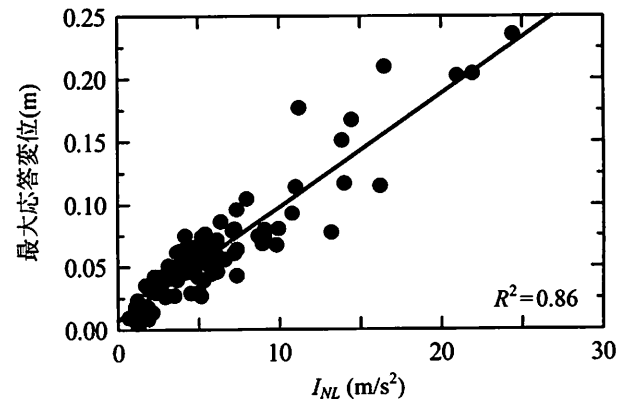
(a) 地動最大加速度 PGA



(b) 降伏時固有周期における弾性応答加速度 $S_a(T_y)$



(c) SI 値(減衰定数 20%)



(d) 提案指標 I_{NL}

図-1 各地震動強度指標と最大応答変位の関係

表-2 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-3 仮定した統計量と確率分布形^{4), 5)}

	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 ²	10 %	正規分布
鉄筋の降伏強度	414 N/mm ²	7 %	正規分布
鉄筋の弾性係数	2.0×10 ⁵ N/mm ²	1%	正規分布
耐震性能 2 の限界状態 に対応する変位 ³⁾	道路橋示方書 ³⁾ による計算値	16.1 %	正規分布

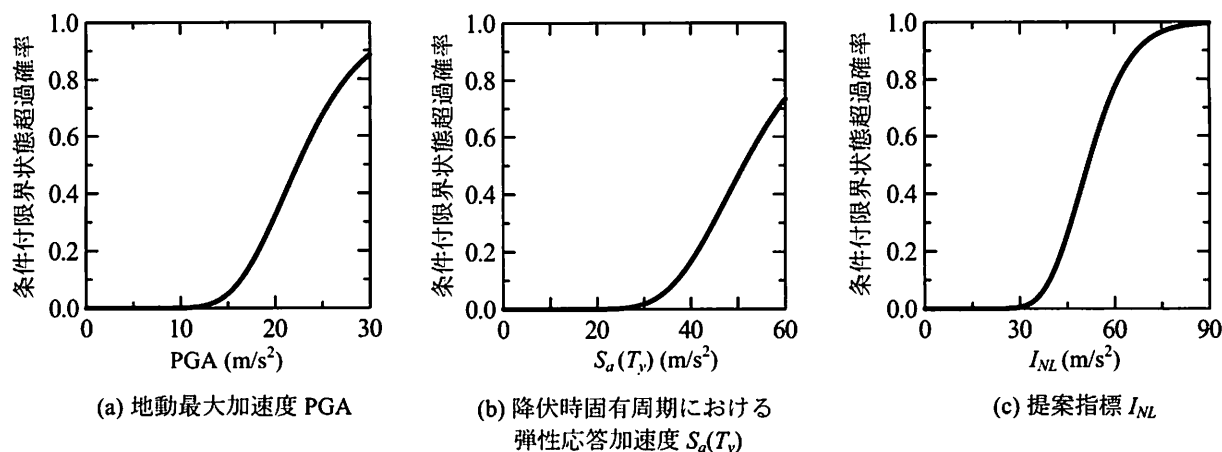


図-2 フラジリティ曲線

記録群を用いた。強震記録群を選定する際には、卓越周期帯などの振幅特性や、群遅延時間の標準偏差の観点で位相特性が大きく異なり、多様な特性を有する地震動群となるように選定した。

(2) 既往の地震動強度指標との比較

図-1は、地動最大加速度、降伏時固有周期における弾性応答加速度(減衰定数5%)、SI値(減衰定数20%)、提案指標 I_{NL} を横軸に、バイリニア型の骨格曲線を有するTakeda型モデルに基づく非線形時刻歴応答解析から求められる最大応答変位を縦軸にとり、各指標と最大応答変位の相関性を示したものである。それぞれの決定係数 R^2 値は、地震動の振幅情報のみが考慮された地表最大加速度および計測震度が指標の場合には0.4を下回る非常に低い相関性を示したのに対し、構造物の弾性応答特性を考慮した弾性応答加速度およびSI値では0.65程度を示しており、改善が図られている。構造物の非線形地震応答特性を反映した提案指標 I_{NL} では、決定係数が0.86とさらに高い相関性を示しており、構造物の非線形最大応答変位によく対応していることが確認される。

4. 提案指標に基づくフラジリティ評価

(1) 解析対象橋脚とそのモデル化

解析対象とするのは、表-2に示す諸元を有する道

路橋示方書³⁾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³⁾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⁴⁾や限界状態に対応する変位評価の際のばらつき⁵⁾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-3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 β 法($\beta=1/4$)を用いた動的解析により評価した。

(2) フラジリティ曲線の算定法と入力地震動群

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。

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弾性応答加速度、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⁶⁾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。

(3) フラジリティ曲線の比較

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-2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弾性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。

5. まとめ

本研究では、RC橋脚の非線形地震応答特性を反映させるために、構造物の非線形応答に影響を及ぼす周期帯における地震動の振幅特性として弾性加速度応答スペクトルの平均値、位相特性として群遅延時間の標準偏差の両者を考慮した新たな地震動強度指標を提案した。本研究における解析では、解析条件が限られており、今後、様々な諸元に対する検討が必要であるが、以下の知見が得られた。

- 1) 強震記録群を用いた動的解析に基づいて、既往の指標に比較して、提案指標はより精緻にRC橋脚の非線形最大応答変位を推定できることを示した。
- 2) 非線形応答特性を反映した提案指標をフラジリティ評価に用いることで、最大応答変位推定時のばらつきが低減することに伴って、フラジリ

ティ曲線の傾きがより急になることが示された。

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)の助成により実施されました。また、防災科学技術研究所K-NETおよびKiK-net，気象庁により観測された強震記録を使用しました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 坂井公俊，室野剛隆：位相特性の変化が構造物の非線形応答に与える影響把握のための基礎的検討，土木学会論文集A1，Vol. 68，No. 4，pp. I_67-I_78，2012.
- 2) 社団法人 日本道路協会：道路橋の耐震設計に関する資料，丸善出版，1997.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 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.