

## 入力エネルギーに基づく非線形応答に対応した地震動強度指標の提案

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

### 1. はじめに

地震発生時における構造物の広域被害把握，構造物の耐震安全性評価や交通施設の運転規制において，地震動強度指標は大きな役割を担っている．従来用いられてきた指標である地動最大加速度，計測震度，加速度応答スペクトルやSI値等について構造物の応答との相関性に関する研究がなされている<sup>1), 2)</sup>が，これらの指標には構造物の非線形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が存在している．一方で，地震時に構造物に入力される瞬間的なエネルギーが構造物の応答に大きく影響することが指摘<sup>3)</sup>されており，入力エネルギーを考慮することで構造物の地震応答をより精緻に推定できると考えられる．

本研究では地震動加速度と構造物の応答速度の両者に基づいて評価される入力エネルギーに着目し，新しい地震動強度指標を提案する．さらには，提案指標をRC橋脚の応答塑性率の評価に適用し，既往の地震動強度指標との比較を行う．

### 2. 入力エネルギーに基づく地震動強度指標

#### (1) 入力エネルギーの定義

井上<sup>3)</sup>の瞬間入力エネルギーの考え方にに基づき，地震動作用下で構造物に入力される地震動エネルギーを式(1)のように定義する．

$$E(T, t, \Delta t) = - \int_t^{t+\Delta t} a(s)v(T, s)ds \quad (1)$$

ここに， $a$ は地震動の加速度， $T$ は構造物の固有周期， $v$ は固有周期 $T$ の構造物の弾性応答速度である．時刻 $t$ および $t+\Delta t$ は，構造物の弾性応答時刻歴を示した図-1において弾性応答速度がゼロになる時刻であり，式(1)の積分範囲は1/2周期に対応する．従って， $E(T, t, \Delta t)$ には構造物の応答増分に影響する地震動入力エネルギーの継続時間が反映されている．

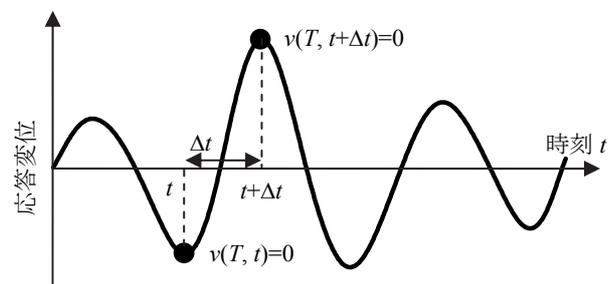


図-1 弾性応答変位の時刻歴と $\Delta t$ の定義

#### (2) 提案する地震動強度指標

式(1)で算定される入力エネルギー時刻歴の最大値に着目する．

$$S_E(T) = \max. \{ |E(T, t, \Delta t)| \} \quad (2)$$

式(2)で評価される構造物の固有周期 $T$ と最大入力エネルギー $S_E$ の関係を示した入力エネルギースペクトルにおいて，式(3)に示すように，構造物の非線形応答に影響を及ぼす固有周期帯において最大入力エネルギーを平均化したものを本研究で提案する地震動強度指標 $I_{SE}$ とする．

$$I_{SE} = \frac{1}{(r-1)T_y} \int_{T_y}^{rT_y} S_E(T) dT \quad (3)$$

ここに， $T_y$ は構造物の降伏時固有周期， $r$ は後述するRC橋脚の応答塑性率と提案指標の関係における決定係

キーワード：地震動強度指標，入力エネルギー，非線形応答，固有周期，RC橋脚

連絡先：〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-06 TEL：022-795-7449 FAX：022-795-7448

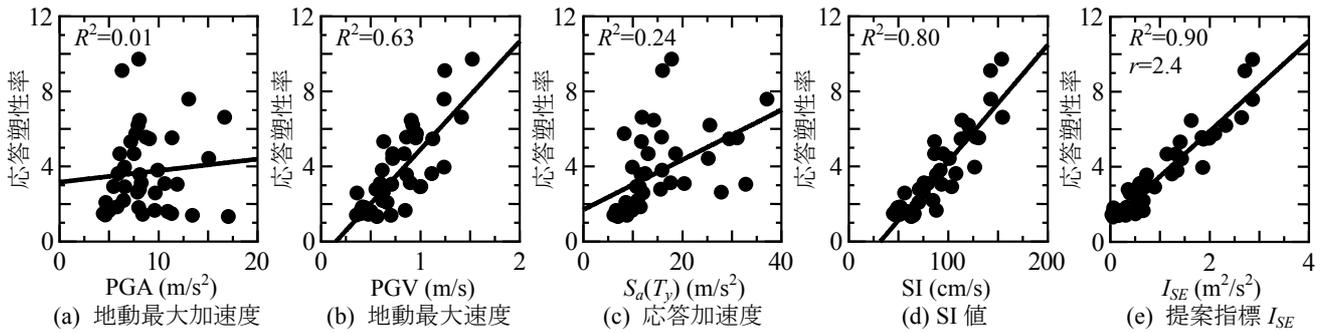


図-2 地震動強度指標と橋脚 B の応答塑性率の相関関係

数  $R^2$  が最大となるように定めた。

3. 解析対象 RC 橋脚と入力地震動群

現行の道路橋示方書<sup>4)</sup>に基づいて設計された II 種地盤上における 5 基の RC 橋脚を対象とした。固有周期は 0.5 秒～0.8 秒程度に分布している。入力地震動群としては、防災科学技術研究所の K-NET および KiK-net, 気象庁の強震観測網および米国 PEER の NGA データベースから対象橋脚が塑性化するような強震記録全 40 波を収集した。

4. 既往の地震動強度指標との比較

橋脚 B を例として、武田型モデルにより算定される RC 橋脚の応答塑性率と、地動最大加速度 PGA, 地動最大速度 PGV, 固有周期  $T_y$  における応答加速度  $S_a(T_y)$ , SI 値(減衰定数 20%), 提案指標  $I_{SE}$  の各地震動強度指標の関係を図-2 に示す。また、5 基の橋脚に対する地震動強度指標と応答塑性率の関係における決定係数  $R^2$  を表-1 に示す。地震動振幅の観点で瞬間的な強度を表す PGA と PGV とでは、PGV の方が構造物の非線形応答との対応はよいものの、十分な相関性は有していない。また、構造物の応答速度を広い固有周期帯で平均化した SI 値は決定係数が 0.7～0.8 程度となっている。一方で、提案指標  $I_{SE}$  ではどの固有周期の橋脚に対しても、決定係数  $R^2$  が 0.8～0.9 程度となっており、応答塑性率との相関性について改善が図られている。

5. まとめ

本研究で得られた結論を以下に示す。

- 1) 地震動加速度と構造物の弾性応答速度の積について、応答変位の増分に対応する 1/2 周期にわたって積分して得られる入力エネルギー時刻歴の最大値に着目した。そして、最大入力エネルギーを構造物の非線形応答に影響を及ぼす固有周期帯において平均化したものを地震動強度指標として提案した。
- 2) 固有周期の異なる RC 橋脚 5 基の応答塑性率と各地震動強度指標の相関性について検討し、提案指標は既往の指標に比べて固有周期の長短に関わらず、構造物の非線形応答と高い相関性を有することを示した。

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)および公益財団法人前田記念工学振興財団平成 25 年度研究助成(研究代表者：松崎裕)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, 米国 PEER の NGA データベースにおける強震記録を使用しました。ここに記して関係各位に謝意を表します。

参考文献

- 1) Padgett, J. E., Nielson, B. G. and DesRoches, R.: Selection of optimal intensity measures in probabilistic seismic demand models of highway bridge portfolios, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 37, No. 5, pp. 711-725, 2008.
- 2) Yakut, A. and Yilmaz, H.: Correlation of deformation demands with ground motion intensity, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 134, No. 12, pp. 1818-1828, 2008.
- 3) 井上範夫, 堀則男, 中村孝也：RC 構造物の応答に対する地震動のエネルギー入力性状の影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 19, No. 2, pp. 531-536, 1997.
- 4) 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, 2012.

表-1 地震動強度指標と RC 橋脚の応答塑性率の関係における決定係数  $R^2$

	橋脚 A (0.48s)	橋脚 B (0.57s)	橋脚 C (0.57s)	橋脚 D (0.68s)	橋脚 E (0.77s)
PGA	0.04	0.01	0.03	0.05	0.05
PGV	0.54	0.63	0.54	0.61	0.62
$S_a$	0.34	0.24	0.31	0.32	0.28
SI	0.67	0.80	0.70	0.82	0.83
$I_{SE}$	0.79	0.90	0.82	0.93	0.94

※括弧内の数値は固有周期  $T_y$  を表す。