

RC橋脚の非線形応答特性を考慮した 地震動エネルギーに基づく地震動強度指標

松崎裕¹・笠原康平²・根本賢斗³・鈴木基行⁴

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非会員 東北大学 工学部建築・社会環境工学科 (同上)

⁴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

従来、地震時における交通機関の運転規制の判断、構造物の被災率評価や耐震安全性評価に用いる地震動強度指標としては、地動最大加速度・速度等の地震動振幅の最大値、弾性応答加速度・速度、速度応答スペクトルを多くの構造物の固有周期が属する0.1秒から2.5秒まで積分したSI値¹⁾等が研究上も実務上も広く用いられてきた。しかしながら、こうした構造物の応答特性を反映していない地震動振幅の最大値や、弾性応答に基づく地震動強度指標では、構造物が強非線形応答を示す地震動群に対しては、地震動強度と最大応答変位・被災率の関係に大きなばらつきが介在する²⁾問題点がある。地震動強度指標は、外力である地震動と、地震動が対象構造物に入力された場合の応答、あるいは応答に対応した損傷度を結び付ける役割を果たすものであり、合理的な地震動強度指標の構築は地震作用と構造物の応答・損傷度を適切に対応付ける重要かつ根幹的な要素技術である。近年、強震動予測や構造部材の変形性能評価において、その予測・推定精度の向上が図られている中で、構造物の非線形応答の支配的要因を明らかにするとともに、地震動強度と構造物の非線形応答の対応関係を精緻化することの意義は大きい。

近年、構造物の非線形応答に顕著な影響を及ぼすことから地震動の位相特性が注目されている^{3), 4)}。地震動特性としての位相特性と構造物の応答特性を考慮して、非線形最大応答変位を推定することも一つの方法であるが、位相特性と構造物の応答変位の関係の定量的評価が必要となる。一方で、地震動に

よる入力エネルギーと地震応答の関係も研究^{5), 7)}がなされているが、地震動エネルギーは、入力地震動特性と構造物の応答特性の両者を反映している。従って、地震動エネルギーを用いることで、より構造物の応答に対応した地震動強度指標の構築がなされると期待される。

本研究では、地震動エネルギーの観点から構造物の非線形最大応答変位とよく整合した地震動強度指標を構築する。さらには、構築した地震動強度指標をRC橋脚の非線形最大応答変位の評価に適用し、その精緻化を試みる。

2. 地震動エネルギーに基づく地震動強度指標

地震動に対する1自由度系の振動方程式は式(1)のように表せる。

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + R = -ma \quad (1)$$

ここに、 m は質点の質量、 c は粘性減衰係数、 R は復元力、 u は地盤に対する相対変位、 a は地震動加速度である。

本研究では、井上ら⁵⁾の研究を参考に、非線形応答にとって重要となる変位が一方方向に継続して増加する、図-1に示す変位の正負が異なる最大値から最大値に至るまでの1/2周期における地震動エネルギーに着目する。 t から $t+\Delta t$ までの時刻帯内における単位質量当たりの地震動エネルギー E は式(2)のように表せる。

$$E(T, t, \Delta t) = - \int_t^{t+\Delta t} a(s) v(T, s) ds \quad (2)$$

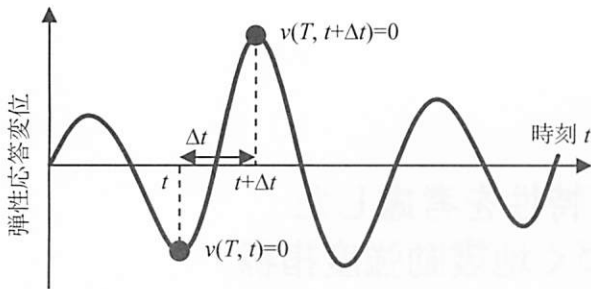


図-1 弾性応答変位の時刻歴と Δt の定義

表-1 解析対象とした RC 橋脚の諸元(橋軸方向)

	A 橋脚	B 橋脚	C 橋脚
等価質量(ton)	784.1	1050.4	1260.5
降伏剛性に対応した固有周期(s)	0.50	0.69	0.77
降伏耐力(MN)	4.3	6.1	7.7
降伏変位(mm)	35.6	69.6	91.9

表-2 入力地震動群の一覧

地震	観測点
1978 年 Tabas 地震	Tabas
1994 年 Northridge 地震	Rinaldi, Sylmar
1995 年 兵庫県南部地震	JMA 神戸海洋気象台, JR 鷹取駅
1999 年 集集地震	TCU068
2000 年 鳥取県西部地震	KiK-net 日野
2003 年 三陸南地震	K-NET 牡鹿
2003 年 十勝沖地震	K-NET 広尾, K-NET 直別
2004 年 新潟県中越地震	川口町川口, KiK-net 長岡, K-NET 小千谷, K-NET 十日町
2007 年 能登半島地震	K-NET 穴水
2007 年 新潟県中越沖地震	K-NET 柏崎
2011 年 東北地方太平洋沖地震	KiK-net 芳賀, K-NET 銚田, K-NET 仙台(本震および 2011 年 4 月 7 日の余震)

ここに、 T は固有周期、 $v(T, s)$ は固有周期 T の構造物の弾性応答速度である。

式(2)により算定される時刻歴の地震動エネルギー E の絶対値としての最大値を $S_E(T)$ とし、固有周期 T の関数として式(3)のように評価する。

$$S_E(T) = \max. \{ |E(T, t, \Delta t)| \} \quad (3)$$

式(3)に基づいて算定される最大地震動エネルギーに基づく地震動強度指標を式(4)のように定義する。

$$I_{SE} = \frac{1}{(r-1)T_y} \int_{T_y}^{rT_y} S_E(T) dT \quad (4)$$

ここに、 r は後述するように、多数の地震動群に対する回帰分析により決定されるパラメータであり、

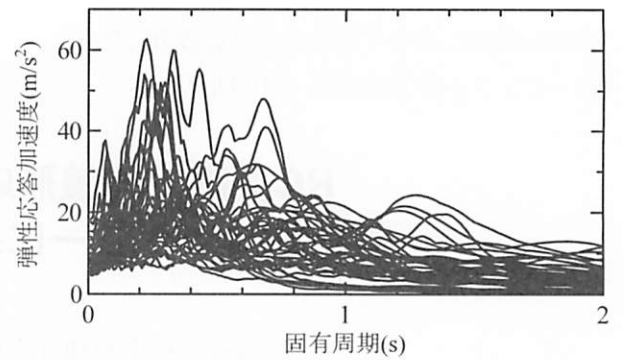
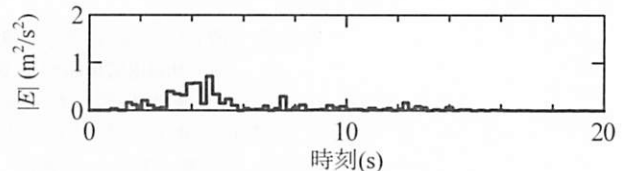
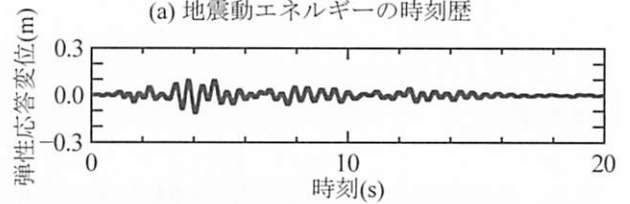


図-2 入力地震動群の加速度応答スペクトル(5%減衰)

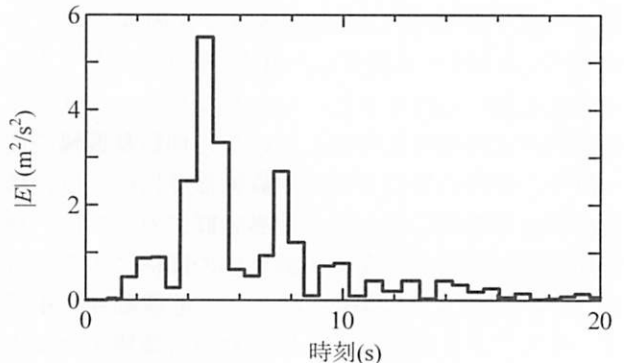


(a) 地震動エネルギーの時刻歴

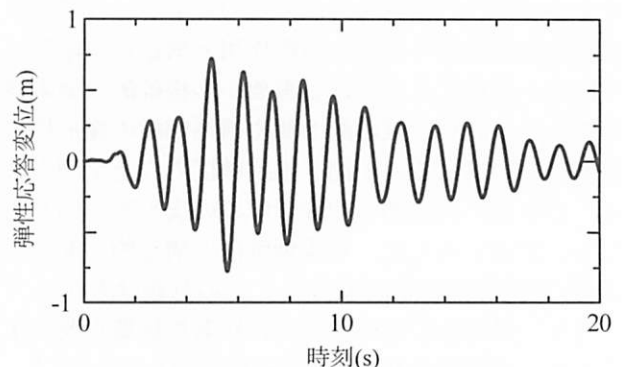


(b) 弾性応答変位の時刻歴

図-3 固有周期 $T=0.5s$ の場合の地震動エネルギーと弾性応答変位の関係



(a) 地震動エネルギーの時刻歴



(b) 弾性応答変位の時刻歴

図-4 固有周期 $T=1.2s$ の場合の地震動エネルギーと弾性応答変位の関係

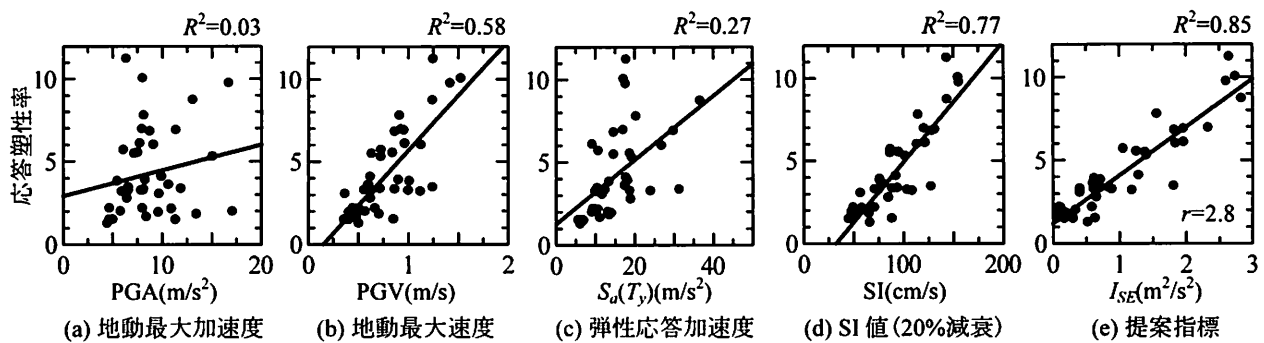


図-5 A 橋脚の応答塑性率と地震動強度指標の関係

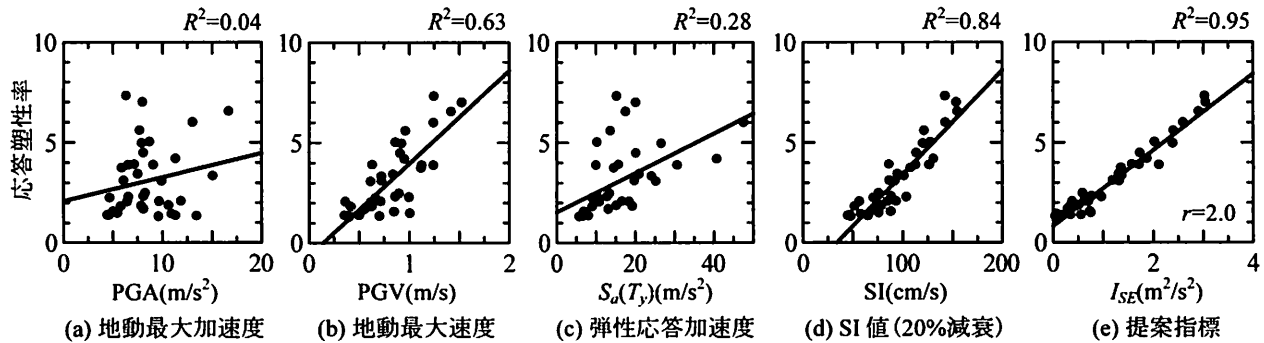


図-6 B 橋脚の応答塑性率と地震動強度指標の関係

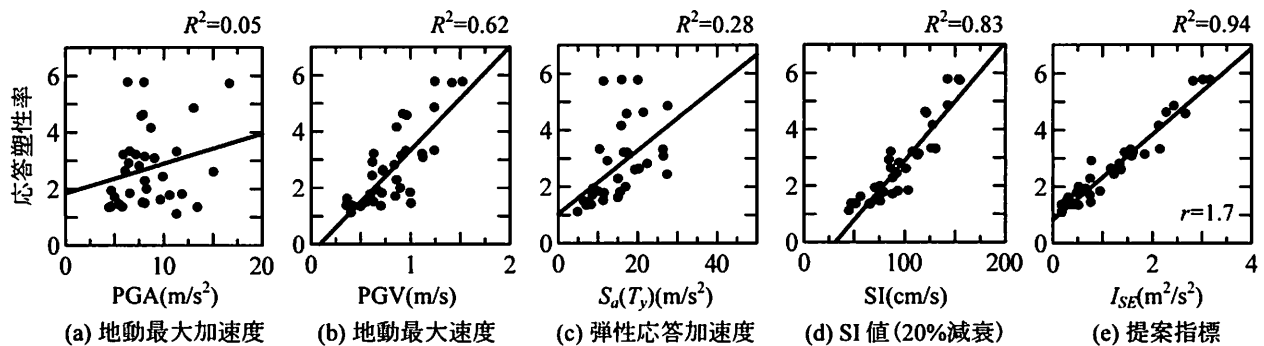


図-7 C 橋脚の応答塑性率と地震動強度指標の関係

T_y は降伏剛性に対応した固有周期である。固有周期 T_y から rT_y までの範囲の最大地震動エネルギーを平均化することで、非線形応答に伴う固有周期の長周期化が構造物の非線形応答に及ぼす影響を考慮する。

なお、固有周期と地震動エネルギーが最大となる時刻の関係が非線形最大応答変位に及ぼす影響についても別途検討したが、明確な傾向は確認できなかったため、本研究では、1/2周期における地震動エネルギー時刻歴の絶対値の最大値について、非線形地震応答に影響を及ぼす固有周期帯で平均化したものを地震動強度指標とした。

3. 解析対象RC橋脚と入力地震動群

解析対象とした RC 橋脚は道路橋示方書⁸⁾に基づいて設計された II 種地盤上の RC 橋脚である。それらの諸元を表-1 に示す。なお、本研究では、橋軸方

向のみを解析対象とした。

入力地震動群の一覧を表-2 に示す。本研究では、非線形応答が生じるような地震動群を対象として地震動強度と構造物の非線形最大応答変位の関係を評価することが主目的のため、対象 RC 橋脚に非線形応答を生じさせるような国内外で観測された強震記録として、水平2成分、20地点の合計40成分を選定した。これらの入力地震動は、Northridge地震、兵庫県南部地震、集集地震における幾つかの強震記録のように、パルス状の波形が卓越した大きな非線形応答を生じさせる地震動もあれば、東北地方太平洋沖地震における地震動のような非常に継続時間の長い地震動、短周期卓越型地震動など、図-2 に示す入力地震動群の加速度応答スペクトルからも明らかであるが、多様な特性を有する地震動が含まれている。

4. 地震動強度指標とRC橋脚の非線形応答の関係

まず、式(2)により算定される地震動エネルギーの時刻歴と、弾性応答変位の時刻歴の関係について、1995年兵庫県南部地震JR鷹取駅記録NS成分を例に図-3および図-4に示す。地震動エネルギーが最大となる時刻と応答変位が最大となる時刻が対応している。また、固有周期の違いに対応して、地震動エネルギーの大きさと弾性応答の最大値の関係についてもよく対応していることが確認される。

次に、非線形応答に着目する。地動最大加速度PGA、地動最大速度PGV、降伏剛性に対応した固有周期 T_y における弾性応答加速度 $S_a(T_y)$ (減衰定数5%)、SI値(減衰定数20%)、本研究で検討した I_{SE} 値(減衰定数5%)の各地震動強度指標と、Takeda型モデル⁹⁾に基づく非線形動的解析(減衰定数2%)によって得られる応答塑性率の関係を図-5～図-7に示す。図中には、地震動強度とRC橋脚の応答塑性率との間に線形関係が成立すると仮定して描いた回帰直線も合わせて示している。いずれも、塑性化したもののみを対象に、点をプロットし、また回帰直線を描いている。

地震動振幅の最大値であるPGAとPGVを比較すると、一般的に指摘されているように、PGVの方がPGAよりも構造物の応答塑性率との相関性が高いが、PGVと応答塑性率の相関性は0.6程度と十分とは言えない。設計コードにおける地震動の規定にも用いられる弾性応答加速度については、PGAに比べれば構造物の弾性応答特性が反映されている点で改善は図られているが、PGVよりも劣る相関性しか有していない。構造物の基本的な弾性応答特性に加えて、幅広い固有周期帯の影響が考慮されているSI値では応答塑性率との相関性が大きく向上している。 I_{SE} 値の場合には、対象RC橋脚の固有周期の長短に寄らず、決定係数 R^2 が0.8以上となっており、SI値よりもさらに高い相関性を有していることが確認される。

5. おわりに

本研究では、構造物の非線形応答に対応した地震動強度指標の構築を図り、それをRC橋脚の非線形地震応答の評価に適用した。本研究で得られた主な知見を以下に示す。

- 1) 構造物の固有周期の半周期における地震動エネルギー時刻歴の絶対値の最大値に着目し、その最大地震動エネルギーを降伏剛性に対応した固有周期からある範囲で平均化することで、構造

物の非線形地震応答特性を反映した地震動強度指標を構築した。

- 2) 構築した地震動強度指標をRC橋脚の非線形地震応答の評価に適用し、非線形動的解析により検証した結果、既往の地震動強度指標に比べてRC橋脚の非線形最大応答変位との間で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)により実施しました。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) Housner, G. W.: Intensity of Earthquake Ground Shaking near the Causative Fault, Proceedings of the 3rd WCEE, pp. 94-115, 1965.
- 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) 佐藤忠信, 室野剛隆, 西村昭彦: 観測波を用いた地震動の位相スペクトルのモデル化, 土木学会論文集, No. 640/I-50, pp. 119-130, 2000.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 井林康, 中沢正利, 尾坂芳夫, 鈴木基行: 地震入力総エネルギーおよび地震入力単位エネルギーを考慮したRC橋脚の損傷度評価法の提案, 土木学会論文集, No. 676/V-51, pp. 1-11, 2001.
- 7) 中村晋, 室野剛隆, 芦谷公稔: 地震動のエネルギー的評価指標に基づく非線形地震応答の推定に関する基礎的研究, 土木学会論文集, No. 710/I-60, pp. 399-411, 2002.
- 8) 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.
- 9) Takeda, T., Sozen, M. A. and Nielsen, N. N.: Reinforced concrete response to simulated earthquakes, Journal of the Structural Division, ASCE, Vol. 96, No. 12, pp. 2557-2573, 1973.