

## 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の開発および振動台実験による最大応答変位推定精度の検証

Development and evaluation of seismic intensity measure considering nonlinear response of RC bridge columns based on shaking table experiments

東北大学大学院工学研究科土木工学専攻 助教 松崎 裕

### (研究計画ないし研究手法の概略)

#### 1. はじめに

従来、地震時における構造物の被災率評価・運転規制の判断や、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ほとんど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<sup>1)</sup>など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、地震動強度と被災率の関係に大きなばらつきが介在する<sup>2)</sup>問題点がある。地震動強度指標は、**図-1**のように、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、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応答の対応関係を精緻化することの意義は大きい。

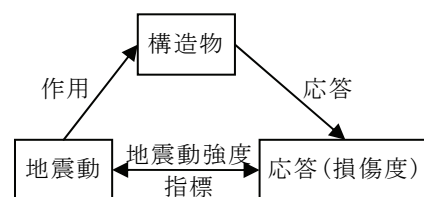


図-1 地震動強度指標の役割

**図-1**において、地震動特性に着目して地震動強度指標を構築する場合に関連する既往の研究としては、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に着目されている<sup>例えば3), 4)</sup>。また、地震動による入力エネルギーと地震応答の関係も研究がなされている<sup>例えば5), 6)</sup>。構造物の応答特性に着目して地震動強度指標を構築する場合には、弾性応答指標や、複数の指標の組み合わせ<sup>例えば7), 8)</sup>による構築が検討されている。しかしながら、いずれの地震動強度指標も、構造物の非線形応答を十分に説明できていないのが現状である。

本研究では、RC橋脚の非線形応答特性を反映した地震動強度指標を開発し、それを非線形動的解析および振動台実験により検証することで、耐震安全性評価の精緻化や将来的には地震直後の迅速な広域被害把握を図ることを目的とする。以下では、本研究手法の概略として、RC橋脚の非線形応答特性を反映させた地震動強度指標、振動台実験による検証方法について概説する。

#### 2. RC橋脚の非線形応答特性を反映させた地震動強度指標

##### (1) 最大地震動入力エネルギーと非線形応答による長周期化を考慮した地震動強度指標

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。

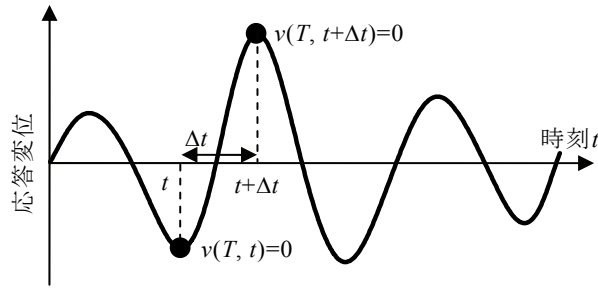


図-2 弾性応答変位の時刻歴と $\Delta t$ の定義

表-1 解析対象としたRC橋脚

	A橋脚	B橋脚	C橋脚
橋脚高さ(m)	10.0	13.2	20.5
等価質量(ton)	806.1	915.2	1260.5
降伏剛性に対応した固有周期(s)	0.48	0.57	0.77
水平耐力(MN)	4.78	5.90	7.65
降伏変位(mm)	34.9	53.4	91.9

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

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<sup>5)</sup>と同様に、固有周期の半周期に対応する瞬間的な地震動入力エネルギーに着目する。図-2に示す $t$ から $t+\Delta t$ までの時間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。

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

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入力エネルギー $E$ における最大値を $S_E(T)$ 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入力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、 $T_y$ 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入力エネルギーを平均化することで、非線形応答時の長周期化が構造物の非線形応答に及ぼす影響を考慮している。

## (2) 解析対象RC橋脚および入力地震動

解析対象としたRC橋脚は道路橋示方書<sup>9)</sup>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、本検討では、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。本検討では、非線形応答が生じるような地震動群を対

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)

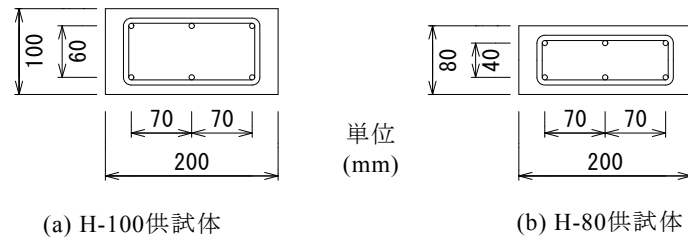


図-3 RC橋脚供試体の断面図

象とした地震動強度と構造物の非線形最大応答変位の関係性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、多様な特性を有する地震動が含まれている。

### 3. 振動台実験に用いたRC橋脚供試体および入力地震動

振動台実験に用いた RC 橋脚供試体の断面図を図-3 に示す。軸方向鉄筋と帯鉄筋のそれぞれについて D6 異形鉄筋を用いている。以降では、断面高さ 100mm と 80mm の供試体をそれぞれ H-100, H-80 と呼称する。H-100, H-80 のそれぞれは安定的な曲げ挙動を示すように設計されており、H-100 の降伏剛性に対応する固有周期は 0.13 秒、降伏変位は 4.7mm であり、H-80 の降伏剛性に対応する固有周期は 0.19 秒、降伏変位は 7.0mm である。フーチング上面から地震時における水平方向慣性力作用位置までの距離は、H-100 が 700mm, H-80 が 765mm である。H-100 および H-80 のそれぞれに対して、1995 年兵庫県南部地震における JMA 神戸海洋気象台記録 NS 成分と JR 鷹取駅記録 EW 成分を入力地震動とした。なお、相似則を考慮して、地震動の時間軸は観測記録に対して 0.25 倍に縮小して入力した。

#### (実験調査によって得られた新しい知見)

### 4. 地震動強度指標とRC橋脚の応答塑性率の相関性

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

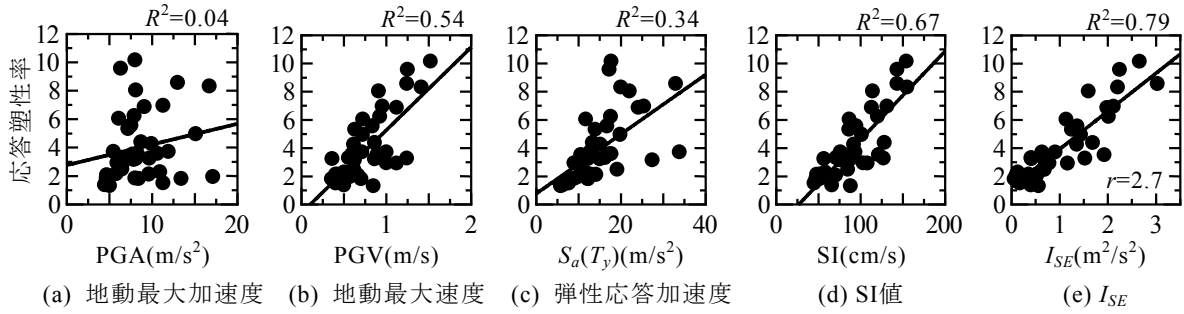


図-4 A橋脚における地震動強度指標と応答塑性率の関係

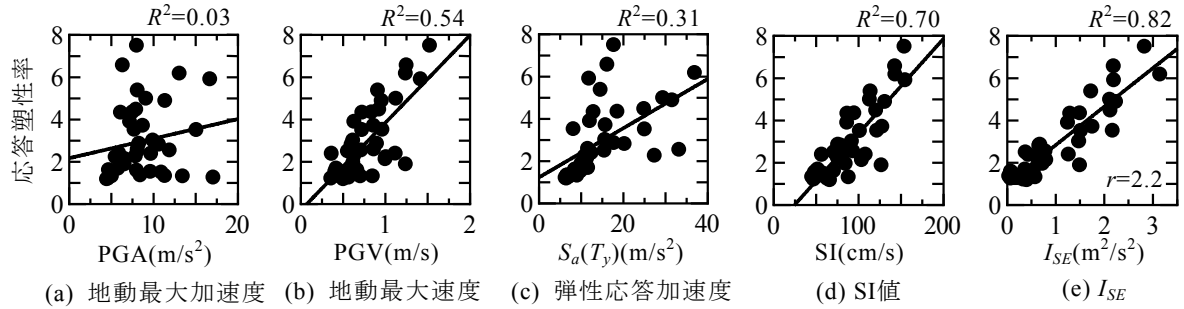


図-5 B橋脚における地震動強度指標と応答塑性率の関係

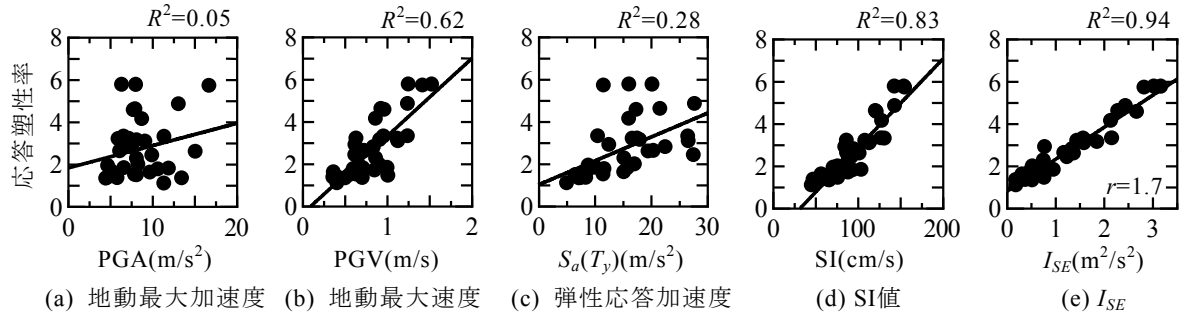


図-6 C橋脚における地震動強度指標と応答塑性率の関係

震動強度指標と、Takeda型モデル<sup>10)</sup>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-4～図-6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0.5～0.6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なされているが、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。ISE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 $R^2$ が概ね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。

今後、地震動の位相特性と地震動エネルギーの時刻歴の関係など、非線形応答変位が大きくなる要因との関係を含めて検討していく必要がある。

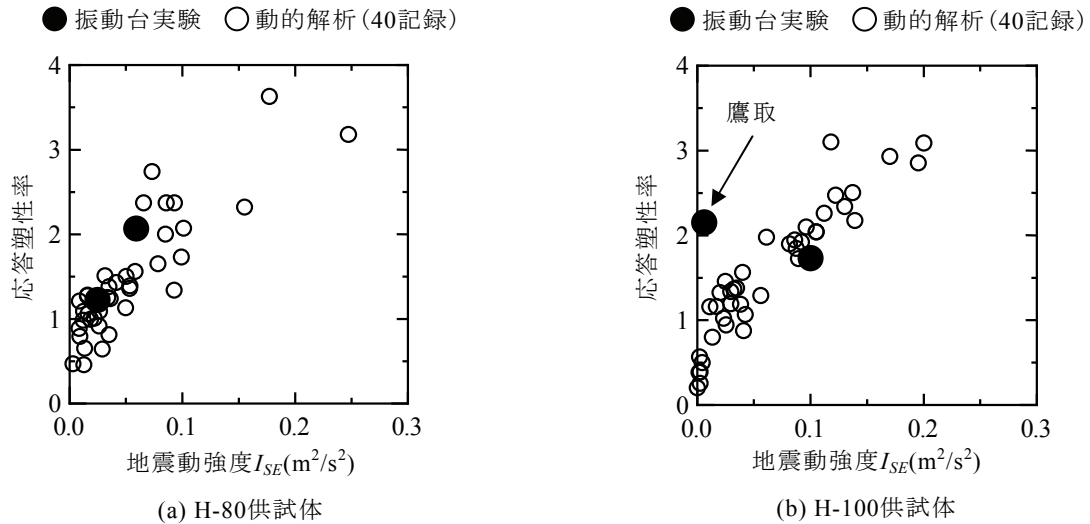


図-7 振動台実験による検証

## 5. 振動台実験による検証

振動台実験においてRC橋脚供試体に実際に入力された地震動として、フーチング上で計測された地震動を式(2)の地震動加速度 $a$ として、地震動強度と振動台実験による応答塑性率の関係を比較したものを図-7に示す。図-7には、表-2に示した強震記録40記録について時間軸を0.25倍に縮小した上で、塑性化した場合のみを対象に回帰パラメータ $r$ を決定し、Takeda型モデルによる応答塑性率(減衰定数2%)と比較したのも合わせて示している。図-7(b)において、40記録に対する動的解析結果に比べて、1ケースだけ振動台実験結果が大きく離れているのは、鷹取駅記録に対する結果であるが、このように片側に塑性化進展が卓越する場合には課題が残る。しかしながら、振動台実験で得られた応答塑性率と地震動強度 $I_{SE}$ の関係のばらつきは、Takeda型モデルに基づく非線形動的解析で得られる応答塑性率と地震動強度 $I_{SE}$ の関係のばらつきの中に概ね埋もれており、安定的な曲げ挙動となるRC橋脚では、 $I_{SE}$ を地震動強度指標として用いれば、十分な精度でRC橋脚の非線形最大応答を推定できることが確認される。

今後は、地震作用後の構造物の固有周期からの構造部材の損傷度や地震作用の逆推定、本震後に余震を受ける構造物の耐震性評価などへの応用が期待される。

## 6. 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て、動的解析および振動台実験によってその適用性を検証した。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入力エネルギーの時刻歴最大値に着目し、その最大地震動入力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、非線形動的解析および振動台実験により検証した結果、片側に非線形応答が卓越する振動台実験結果の再現性には課題を残すものの、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

本研究において、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) 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.
- 7) Baker, J. W. and Cornell, C. A.: Vector-valued intensity measures for pulse-like near-fault ground motions, Engineering Structures, Vol. 30, pp. 1048-1057, 2008.
- 8) Bojorquez, E., Iervolino, I., Reyes-Salazar, A. and Ruiz, S. E.: Comparing vector-valued intensity measures for fragility analysis of steel frames in the case of narrow-band ground motions, Engineering Structures, Vol. 45, pp. 472-480, 2012.
- 9) 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.
- 10) 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.

## ( 発表論文 )

- 1) 松崎裕, 笠原康平, 鈴木基行: 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, 第16回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, pp. 47-50, 2013.
- 2) 松崎裕, 笠原康平, 鈴木基行: 地震動の位相特性の反映による地震動強度指標の高度化に関する基礎的研究, 土木学会第33回地震工学研究発表会講演論文集, 3-556, 2013.