

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 25 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24760360

研究課題名(和文) RC橋脚の非線形応答特性を反映した地震動強度指標の開発と地震時損傷リスクの定量化

研究課題名(英文) Development of a seismic intensity measure considering nonlinear response of reinforced concrete bridge columns and its application to the seismic risk analysis

研究代表者

松崎 裕 (MATSUZAKI, Hiroshi)

東北大学・工学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：10506504

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,000,000円

研究成果の概要(和文)：構造物が強非線形応答を示す地震動群に対して、既往の地震動強度指標と非線形最大応答変位との関係が大きくばらつくことは、地震時被害把握や耐震性評価における大きな課題である。本研究では、地震動特性と構造物の応答特性の両者を反映した地震動エネルギーに基づいて、構造物の非線形応答特性を反映させた地震動強度指標を構築した。さらには、提案する地震動強度指標をRC橋脚の非線形最大応答変位の推定に適用し、RC橋脚の力学的特性に関わらず、提案指標は非線形最大応答変位との間で、既往の地震動強度指標に比べて高い相関性を有することを示した。

研究成果の概要(英文)：There are large uncertainties in estimating the peak nonlinear response displacement of structures by typical seismic intensity measures. A seismic intensity measure based on seismic energy considering nonlinear response was proposed in this study. It was shown that the proposed intensity measure has better agreement with the peak nonlinear response displacement of reinforced concrete bridge columns.

研究分野：地震工学

キーワード：地震動強度指標 非線形応答 地震動 最大応答変位 RC橋脚

1. 研究開始当初の背景

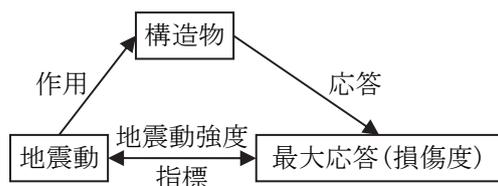


図-1 地震動強度指標の役割

1995年の兵庫県南部地震以降、全国を網羅する強震観測網の整備・強化が急速に進み、得られる強震記録群を震災対策に有効利用できる環境が整ってきた。地震災害は他の災害に比べて被害が同時に広範囲に及ぶ特徴があるが、こうした全国に密に網羅された強震観測点のデータを解析することで、地震直後における被害状況の迅速な把握および速やかな復旧活動が図られることが期待される。これに対して、現在、地震直後に即時に得られる計測震度に基づく震度情報は、災害時における初動体制の必要性判定にも用いられているものの、震度7であっても全く被害が認められないなど、計測震度に基づく震度と構造物の被害状況の不整合が問題視されている。これは、図-1に示す地震動強度指標の役割を考えた際に、計測震度は、その算定時に構造物の地震時挙動の特性が十分に考慮されておらず、地震直後の被害把握や初動体制の必要性判定に用いる指標に要求される、構造物の損傷度に直結する地震動強度指標になっていないからである。前記したような強震記録の地震直後における工学的有効活用を図るためには、第一段階の基礎的検討として、構造物の損傷度に直結した地震動強度指標について検討する必要がある。

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、弾性応答速度を多くの構造物の固有周期が属する0.1sから2.5sまで積分したSI値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は地震動強度を迅速に算定できる利点を有する一方で、構造物が強非線形応答を示す地震動群に対しては、構造物の損傷進展に伴う長周期化の影響や地震動の非定常性の影響が反映されていないために、地震動強度と非線形最大応答変位との関係に大きなばらつきが介在する問題点がある。構造物が強非線形応答を示し、相応の損傷度となるような大きな地震動に対してこそ、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が必要不可欠である。

2. 研究の目的

本研究では、構造物の非線形応答の大小を決定する要因の解明を図るとともに、構造物の非線形最大応答変位とより整合した地震動強度指標を構築することを目的とする。さらには、構築した地震動強度指標を様々な降伏水平震度、固有周期を有する1自由度系にモデル化できる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。

3. 研究の方法

構造物の地震応答は、地震動時刻歴の形状を支配している地震動の位相特性によって大きく変化することが既往の研究によって明らかにされている。そこで、研究開始当初は、地震動の位相特性を反映させることで非線形最大応答変位の推定に伴うばらつきを低減できる可能性がある点に着目した。具体的には、地震動の位相特性として、群遅延時間の標準偏差が構造物の非線形応答に及ぼす影響を定量的に評価することを試みたが、広範囲固有周期帯への適用は困難であった。そこで、最終的には、地震動特性と構造物の弾性応答特性の両者を考慮して算定される地震動エネルギーに着目して、構造物の非線形応答特性を反映させることで、地震動強度指標を構築することとした。

4. 研究成果

(1) 地震動エネルギーの定義

地震動エネルギーを用いて構造物の非線形最大応答変位との対応関係を考える際には、エネルギーを算定する際の時間積分の範囲が重要である。本研究では、非線形応答にとって重要となる一方向に継続して変位が増加する、図-2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した。

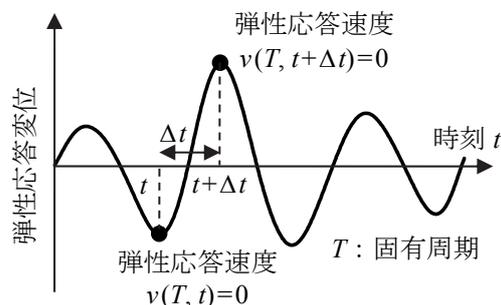
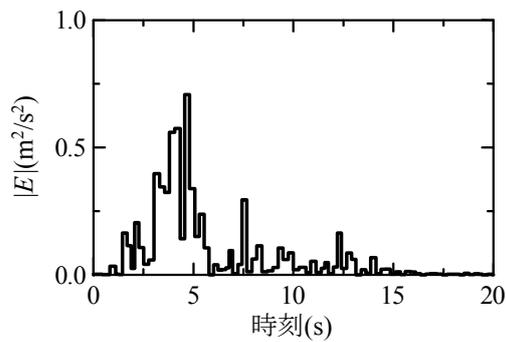


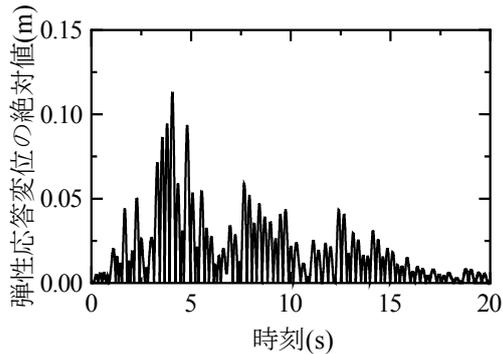
図-2 地震動エネルギー算定の時間積分の範囲 Δt の定義

(2) 地震動エネルギーと構造物の弾性応答の関係

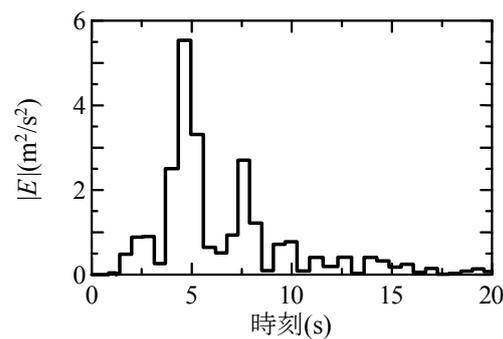
非線形応答変位の推定に先立って、図-2の時間積分の範囲における地震動エネルギー E と構造物の弾性応答の関係について検討した。その結果の例を図-3に示す。地震動エネ



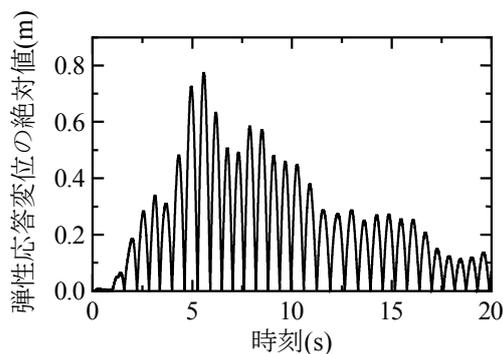
(a) 地震動エネルギーの絶対値の時刻歴 ($T=0.5s$)



(b) 弾性応答変位の絶対値の時刻歴 ($T=0.5s$)



(c) 地震動エネルギーの絶対値の時刻歴 ($T=1.2s$)



(d) 弾性応答変位の絶対値の時刻歴 ($T=1.2s$)

図-3 兵庫県南部地震 JR 鷹取駅 NS 成分を入力した場合における地震動エネルギーと弾性応答変位の各絶対値の時刻歴の比較

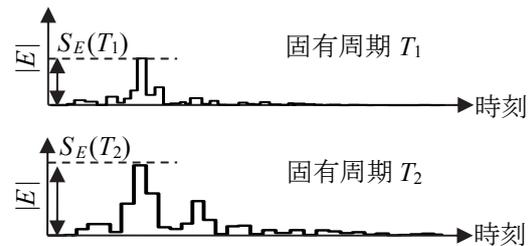
ルギーが最大となる時刻と弾性応答変位が最大となる時刻が対応している。また、地震

動エネルギーと弾性応答変位のそれぞれの絶対値としての最大値の関係については、異なる固有周期間で両者の比率がよく対応していることが確認される。以上を踏まえ、弾性最大応答変位の推定の観点では、地震動エネルギーの絶対値の最大値に着目すればよいことが確認される。

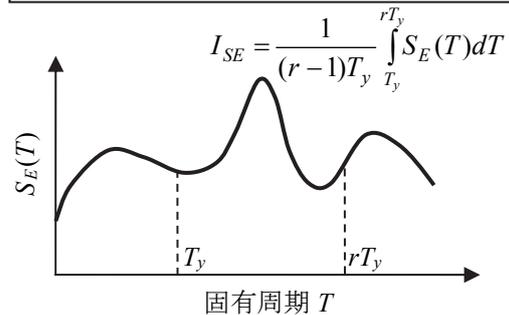
(3) 地震動エネルギーに基づく構造物の非線形最大応答変位の推定手法

構造物の非線形最大応答変位の推定においては、降伏剛性に対応した固有周期だけでなく、非線形応答が生じて長周期化した際の固有周期における地震動エネルギーも相応の大きさを有するか否かが、非線形最大応答変位の大小を決定すると考えられる。そこで、図-4 に本研究の提案手法の概要を示すように、各固有周期に対応して算定される最大地震動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て、構造物の非線形応答特性を反映させた。

①固有周期 T に対応した地震動エネルギーの絶対値 $|E|$ の最大値 $S_E(T)$ を算定する。



②非線形応答に影響のある固有周期帯における地震動エネルギーの絶対値の最大値を平均化したものを地震動強度指標とする。



※ r の値は多数の強震記録群に対する応答と整合するように予め同定しておく。

図-4 提案地震動強度指標の算定の流れ

本研究では、既往の観測記録から多様な強震記録群を選定し、それらの強震記録群に対して、図-4における非線形応答に影響を及ぼす固有周期帯に関するパラメータ r を同定する。大地震直後に、被災率を推定する際は、同定された r を用いることで地震時に構造物に生じた最大応答変位を推定することを想

定している。既往の構造物の応答特性を反映させていない指標などに比べて、若干の計算量の増加はあるものの、構造物の非線形応答を支配する幾つかのパラメータに基づく簡易な指標によって非線形最大応答変位をより精度よく推定することを意図している。

(4) 解析条件

様々な力学的特性を有する RC 橋脚群への適用性を検討するために、降伏水平震度 k_{hy} を 0.4、0.5、0.6、0.7 と変化させ、降伏剛性に対応した固有周期 T_y についても、0.5s、0.8s、1.1s、1.4s と変化させて検討を行った。地震動強度指標との間で比較対象とする RC 橋脚の非線形最大応答変位は非線形動的解析に基づいて算定した。非線形動的解析に際しては、対象 RC 橋脚を 1 自由度系にモデル化した上で、RC 橋脚の水平荷重-水平変位の骨格曲線にバイリニア曲線、履歴曲線に Takeda 型モデルを使用し、Newmark β 法 ($\beta=1/4$) を用いた。非線形動的解析の際の減衰定数については、Takeda 型モデルにより履歴減衰が考慮されることを踏まえて 2% と設定した。

(5) 提案する地震動強度指標と RC 橋脚の応答塑性率の関係

降伏水平震度および降伏剛性に対応した固有周期に応じて同定された図-4 における r の値を表-1 にまとめて示す。基本的な特性としては、降伏水平震度が増加する程、RC 橋脚に生じる非線形応答変位としては低減し、長周期化の程度が減少することから、 r の値も小さくなっていることが確認される。また、固有周期が 1.1s や 1.4s の場合、降伏水平震度が 0.4 と小さい場合を除いて r の値が 1.1 ~ 1.5 程度となっている。これは、固有周期 1s を超える領域では、エネルギー一定則よりも変位一定則の適用性が高まり、弾性応答と非線形応答がよく対応するようになることを反映していると考えられる。

表-1 降伏水平震度、固有周期に対応して同定された r の値

		降伏剛性に対応した固有周期			
		0.5s	0.8s	1.1s	1.4s
降伏水平震度	0.4	3.5	2.0	2.2	1.8
	0.5	3.0	2.0	1.2	1.5
	0.6	2.7	1.7	1.2	1.3
	0.7	2.4	1.6	1.1	1.3

地動最大速度、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(減衰定数 5%)および弾性応答速度(減衰定数 5%)、SI 値(減衰定数 20%)、本研究で提案した I_{SE} 値(評価に用いる弾性応答変位は減衰定数 5%で算定)の

表-2 地震動強度指標と RC 橋脚の応答塑性率との関係に関する決定係数

	$k_{hy}=0.6$ $T_y=0.8s$	$k_{hy}=0.5$ $T_y=1.1s$
地動最大速度	0.70	0.66
弾性応答加速度	0.47	0.80
弾性応答速度	0.34	0.67
SI 値	0.87	0.70
提案指標 I_{SE}	0.95	0.92

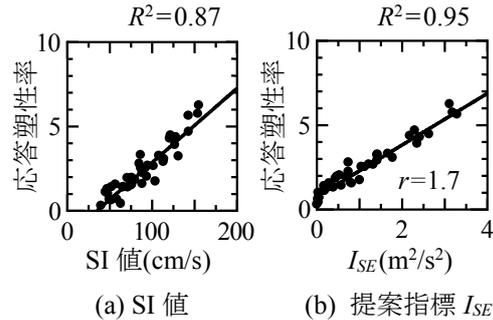


図-5 $k_{hy}=0.6$ 、 $T_y=0.8s$ の場合の地震動強度指標と応答塑性率の関係

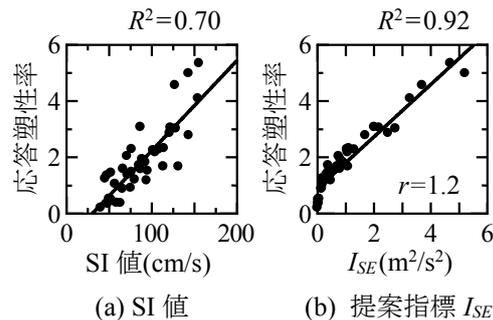


図-6 $k_{hy}=0.5$ 、 $T_y=1.1s$ の場合の地震動強度指標と応答塑性率の関係

各地震動強度指標と、Takeda 型モデルに基づく非線形動的解析によって得られる非線形最大応答変位を降伏変位で除した応答塑性率の関係について検討した結果の例を表-2 に示す。地震動振幅の最大値である最大速度、弾性応答に基づく指標である弾性応答加速度・速度、SI 値は、応答塑性率との相関性が不十分であるか、あるいは RC 橋脚の特性を表す降伏水平震度や降伏剛性に対応した固有周期に依存して、応答塑性率との相関性が大きく変化している。

これらの既往の指標のうち、応答塑性率と相関性の高い SI 値と比較する形で提案指標と応答塑性率の関係を図-5 および図-6 に示す。SI 値については、固有周期が 1.1s の場合には応答塑性率との相関性を表す決定係数 R^2 が 0.70 まで低下しており、表-2 にまとめた他の既往の地震動強度指標と同様に、固有周期への依存性が認められる。一方、本研究で提案した地震動強度指標の場合には、い

ずれの場合においても、決定係数 R^2 が 0.9 程度以上となっており、RC 橋脚の降伏水平震度や固有周期に関わらず、非線形最大応答変位との間で高い相関性を有していることが確認される。なお、降伏水平震度と降伏剛性に対応した固有周期の組み合わせに対して 1 つの r の値だけで、それぞれの組み合わせにおいて広範囲な応答塑性率を説明できている。非線形応答変位が大きくなることは、すなわち固有周期の長周期化を意味しており、非線形応答変位を大きくする原因となる固有周期帯と、結果として生じる非線形最大応答変位の割線剛性に対応する固有周期の関係について、興味深い示唆を与えている。

近年、構造部材の変形性能評価に関する知見が充実し、従来よりも高い精度で変形性能を評価できるようになってきた。本研究で提案した地震動強度指標を用いることで、応答変位についてもより高い精度で評価することができるようになる。このように、部材の応答と変形性能の両者についてより精緻に評価できるようになることは、構造物の地震時損傷リスクを適切に把握し、合理的な対策を行うための礎として位置付けられる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 2 件)

- ① 松崎裕、笠原康平、根本賢斗、鈴木基行：RC 橋脚の非線形応答特性を反映させた地震動エネルギーに基づく地震動強度指標に関する基礎的研究、構造工学論文集、査読有、Vol. 61A、2015、273-281
- ② Matsuzaki, H., Kasahara, K., Nemoto, K. and Suzuki, M.: Seismic intensity measure in consideration of nonlinear response of reinforced concrete columns, Proceedings of the Fourth International Symposium on Life-Cycle Civil Engineering, 査読有, 2014, 1771-1778

[学会発表] (計 7 件)

- ① 笠原康平、根本賢斗、松崎裕、鈴木基行：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、土木学会第 69 回年次学術講演会、2014 年 9 月 10 日、大阪大学豊中キャンパス(大阪府・豊中市)
- ② 松崎裕、笠原康平、根本賢斗、鈴木基行：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、第 17 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、2014 年 7 月 1 日、土木学会(東京都・新宿区)
- ③ 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、2013 年 10 月 24 日、東京大学生産技術研究所(東京都・目黒区)

- ④ 笠原康平、松崎裕、鈴木基行：RC 橋脚の非線形応答特性を反映させた地震動強度指標の提案、土木学会第 68 回年次学術講演会、2013 年 9 月 4 日、日本大学生産工学部津田沼キャンパス(千葉県・習志野市)
- ⑤ 松崎裕、笠原康平、鈴木基行：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、土木学会第 68 回年次学術講演会、2013 年 9 月 4 日、日本大学生産工学部津田沼キャンパス(千葉県・習志野市)
- ⑥ 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、2013 年 7 月 17 日、土木学会(東京都・新宿区)
- ⑦ 笠原康平、長谷川俊、上田博之、松崎裕、鈴木基行：振動台実験に基づく RC 橋脚の地震動強度と最大応答変位の関係に関する研究、平成 24 年度土木学会東北支部技術研究発表会、2013 年 3 月 9 日、東北大学川内キャンパス(宮城県・仙台市)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

松崎 裕 (MATSUZAKI, Hiroshi)
東北大学・大学院工学研究科・助教
研究者番号：10506504