

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 17 日現在

機関番号：21401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420556

研究課題名(和文) 損傷状態を陽な形で評価する次世代耐震診断法のための地震時最大応答推定手法の開発

研究課題名(英文) Development of maximum seismic response estimation method for damage level evaluable next generation seismic evaluation method

研究代表者

西田 哲也(NISHIDA, Tetsuya)

秋田県立大学・システム科学技術学部・教授

研究者番号：40315627

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：せん断破壊型部材と曲げ破壊型部材の混在する既存鉄筋コンクリート造・鉄骨鉄筋コンクリート造建築構造物を対象とし、地震動によるエネルギーの入力過程を考慮した地震時最大応答推定手法の構築を目標として、サブストラクチャ・オンライン実験と最大瞬間入力エネルギーの推定に関する解析的検討を行った。実験結果の検討から、地震応答時の瞬間入力エネルギーと最大応答変位および履歴性状との関係を把握した。解析的検討の結果、地震動の継続時間と、最大瞬間入力エネルギーと総入力エネルギーとの比の関係、弾性時の総入力エネルギースペクトルから弾塑性応答時の総入力エネルギーが推定可能であることを確認した。

研究成果の概要(英文)：To construct the maximum seismic response estimation method considering the input process of energy due to ground motions for existing reinforced concrete structures / steel reinforced concrete structures, substructure pseudo-dynamic tests and analytical studies on the estimation of the peak momentary input energy were carried out. The relationship between the momentary input energy and the maximum seismic response displacement and the influence of the hysteresis characteristics on the momentary input energy were obtained by the pseudo-dynamic tests. The relationship between the duration of the ground motion and the ratio of the peak momentary input energy to the total input energy was confirmed by the analytical studies. And the results of the analytical studies showed that the total input energy of elasto - plastic response can be estimated from the total input energy spectrum of elastic response.

研究分野：建築構造

キーワード：鉄筋コンクリート造 せん断破壊型部材 応答推定 瞬間入力エネルギー オンライン地震応答実験

1. 研究開始当初の背景

(1) 近年、建築物の耐震化が進むにつれ、地震時に著しい損傷が発生する建築物や倒壊に至る建築物の割合は低くなりつつあり、地震後の被害調査の経験等から使用者の要求は「倒壊する/しない」から「損傷する/しない」あるいは「地震後に使用できる/できない」というように変化してきていることがわかる。これまで日本国内では既存不適格建築物の耐震診断・耐震改修が精力的に行われているが、その耐震診断法は基本的に建築物の保有する強度と変形能力の積を指標とする評価が行われており、この手法では地震時の最大変形量が不明であるため、地震時の損傷状態を評価することが不可能である。今後、前述の使用者の要求に答えていくためには、新築建築物の耐震性能評価法の1つとして採用されている地震時の最大応答を推定する手法(等価線形化法)などを用いた損傷状態が評価できる次世代耐震診断法が必要である。

(2) 申請者らの1人は、この等価線形化法により既存RC造・SRC造建築構造物の地震時最大応答の推定を試みてきた。その過程で、せん断破壊する部材(以下、せん断破壊型部材と表記)と曲げ破壊する部材(以下、曲げ破壊型部材と表記)が混在する既存建築物の地震応答は、地震応答スペクトルが同一であっても位相特性により大きく異なり、特に継続時間の短い地震動に対しては、既往の等価線形化法による推定値は過大評価となる可能性があることが明らかとなった。この原因は、せん断破壊が生じる点を超えて応答する際、等価線形化法ではせん断破壊型部材の寄与分を無視して推定しているためである。せん断破壊型部材が破壊するか、否かは建築物の損傷状態に大きく影響するため、耐震診断法への適用に対して無視できない問題となる。

(3) 応答推定精度を改善するための1つの方法として、井上らにより提唱されている「瞬間入力エネルギー」に基づく地震時最大応答推定手法が考えられる。この方法は、最大応答変位が生じる半ループでの履歴吸収エネルギーを直接的に評価する方法であるため、せん断破壊型部材の寄与分を適切に評価できる可能性がある。しかしながら、「瞬間入力エネルギー」に基づく地震時最大応答推定手法を既存建築物に適用する際、現状では以下の課題が存在する。

せん断破壊型部材の繰り返しによるエネルギー吸収を適切に評価しうる履歴モデルが存在しないため、最大応答変位が生じる半ループにおけるせん断破壊型部材の履歴吸収エネルギーを精度よく評価できない。

地震動の特性により、最大応答変位が生じる半ループに至るまでに、せん断破壊型部

材にてせん断破壊が生じるか否かが大きく異なるため、地震動によるエネルギーの入力過程(=瞬間入力エネルギーの入力過程)を適切に評価する必要がある。

(4) 近年の断層モデルによる地震動評価において、統計的グリーン関数法で用いられる波形合成式をフーリエ変換することで、平均的な応答スペクトルを直接的に評価する手法が提案されている。この手法に従えば、対象建築物に入力されるサイト波について、応答スペクトルのみならず位相特性をも、震源モデルの特性から直接的に評価できると考えられる。従って、(3)の、の問題を解決することができれば、震源モデルの特性から既存RC造・SRC造建築構造物の最大応答変位を直接的に推定しうる手法が、構築可能であると考えられる。

2. 研究の目的

本研究の目的は、せん断破壊型部材と曲げ破壊型部材の混在する既存RC造・SRC造建築構造物を対象とし、地震動によるエネルギーの入力過程を考慮した地震時最大応答推定手法の構築を最終目標として、1) せん断破壊型部材と曲げ破壊型部材とが混在した建築物を対象としたサブストラクチャ・オンライン地震応答実験により、地震動の位相特性(直下型・海洋型)の違いによる既存RC造・SRC造建築構造物の最大応答に至るまでの地震応答性状を検討すること、2) 地震動の「位相差分スペクトル」と構造物への「瞬間入力エネルギーの時刻歴」の関係を検討し、地震終了時までの総入力エネルギーと位相差分スペクトルから、構造物が最大応答点に至るまでのエネルギーの入力過程を推定すること、3) これらに基づき、瞬間入力エネルギーに基づくせん断破壊型部材と曲げ破壊型部材が混在する既存RC造・SRC造建築物の地震時最大応答推定手法の構築として推定手順の流れを整理することである。

3. 研究の方法

(1) サブストラクチャ・オンライン実験

実験で想定する振動モデルは、図1に示すようなせん断破壊型部材と曲げ破壊型部材とが並列に設置されたせん断1質点系モデルである。試験体は、破壊性状の異なる2体のRC造柱試験体とし、ひとつはせん断降伏が先行する柱(RCS試験体)もうひとつは曲げ降伏が先行する柱(RCM試験体)とした。柱断面寸法は両試験体で同一の300mm×300mmとし、柱内法寸法は、RCS試験体で600mm、RCM試験体で1100mmとした。両試験体でせん断補強筋量は同一とし、柱内法寸法と主筋量、柱軸力により、2つの破壊性状の異なる試験体を設計した。RCS試験体では、せん断降伏後の急激な耐力低下に対して安定した加力制御を補償するため、試験体の加力方向両側面に平バネ2枚(以後、

補剛バネと呼ぶ)を設置した。質点重量は1000kNとし、内部粘性減衰は、本実験では耐力低下域までの応答を扱うため、扱いが容易な初期剛性比例型減衰(1%)を採用した。各加力装置は、水平油圧ジャッキ1台と鉛直油圧ジャッキ3台を用いて、試験体に逆対称曲げせん断力を作用させた。応答計算より算出される目標水平変位へ、水平ジャッキをデジタル式変位計により制御し、鉛直ジャッキ3本によって上スタブの回転を拘束すると同時に一定軸力に制御した。油圧ジャッキが目標値に到達した時点で、各油圧ジャッキに設置したロードセルによる荷重値を応答計算にフィードバックし、逐次数値計算を行った。なお、RCS試験体ではロードセルの荷重値から補剛バネの負担せん断力を差し引いた値を応答計算に使用した。

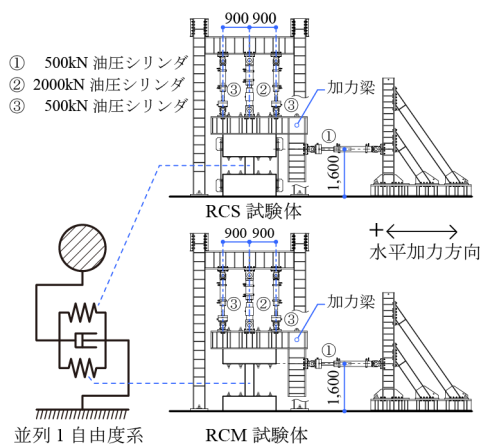


図1 オンライン実験加力装置

(2) 最大瞬間入力エネルギーの推定

第1ステップとして、観測された地震動の位相差分に着目して、フーリエ振幅を周波数に依存せず一定値となる模擬波(位相波)を作成して、これと元の観測地震動を用いた1自由度系の弾性応答解析を実施し、最大瞬間入力エネルギーと総入力エネルギーの比率を算定して比較した。これにより、エネルギーの入力過程が位相差分により概ね捉えられるかを検討した。

第2ステップとして、定常ホワイトノイズ地動に対する応答に着目し、Rosenbluethによる理論式を用いて、最大瞬間入力エネルギーと総入力エネルギーの比率をホワイトノイズ地動の継続時間と弾性1自由度系の固有周期の関数として定式化した。加えて、地震動の位相差分の頻度分布から有効継続時間を定義し、これを用いて最大瞬間入力エネルギーと総入力エネルギーの比率を推定して応答計算結果と比較し検証した。

第3ステップとして、曲げ破壊型部材のみにより構成されているRC造建築物を対象として、降伏点を越えて応答する際の固有周期の伸びを考慮した有効周期を定義し、第2ステップで提案した推定式の適用性を検証した。加えて、曲げ破壊型部材のみにより構成

されているRC造建築物の最大応答が、地震動のフーリエ振幅スペクトルのみから定まる総入力エネルギースペクトルと位相差分より定まる有効継続時間から、最大瞬間入力エネルギーを介して推定可能であることを検証した。

以上のステップと並行して、せん断型部材と曲げ型部材の混在した既存7層SRC造建築物モデルを用いた非線形応答解析を実施し、等価線形化法による最大応答の推定精度と位相差分の関係について検討した。

4. 研究成果

(1) サブストラクチャ・オンライン実験

実験には図2に示す4つの地震波を使用した。これらは工学的基盤上の告示スペクトルに対応した模擬地震波で、繰り返し数のみが異なっている。実験結果より得られた荷重変位関係を図3に示す。いずれもせん断部材の降伏後の耐力低下が見られ、また地震波の入力過程の違いにより、最大応答が大きく異なることがわかる。

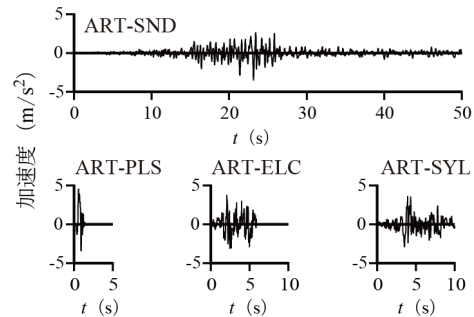


図2 オンライン実験・入力波

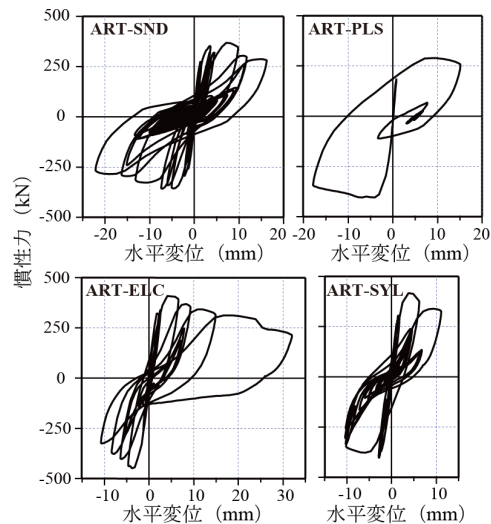


図3 オンライン実験・慣性力-変位関係

架構の半サイクル応答時間(t)に入力されるエネルギーを瞬間入力エネルギー(E)と定義した。図4は、各実験の E 時刻歴を示す。また図5は応答変位が更新された t における、 E と応答変位との関係であり、高い相関が確認できる。このことから、 E から最大応答変位が推定する本研究目的の妥当性が実験的に明らかになった。ただし、

せん断部材のみの半サイクル応答時間での履歴吸収エネルギーについて見ると、図6のように、分布のバラツキが大きくなっている。同図に示す Type ~ は半応答履歴の変位振幅の偏りを示すパラメータで、Type I は片押し型の履歴形状、Type II は両振幅型の履歴形状を表し、Type III はその中間的な形状を意味する。これを見ると、経験変位が増大するにつれて、片振幅的な応答から両振幅的な応答履歴に移行するよう見える。これは、応答サイクルが増えるにつれて、せん断部材の履歴特性特有のスリップ性状が増すことが要因のひとつである。Eを用いた最大応答推定を行う場合、塑性率が2~3(6~9mm)の範囲では、履歴形状は、おおよそ Type I に近い形状で、それ以上の塑性率の場合は、Type II と評価することが妥当であると推察される。しかしその詳細については、今後さらに検討が必要である。

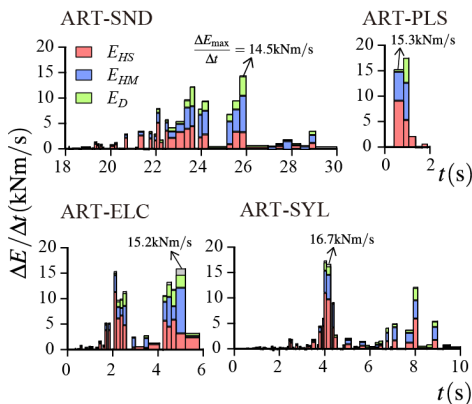


図4 瞬間入力エネルギー時刻歴

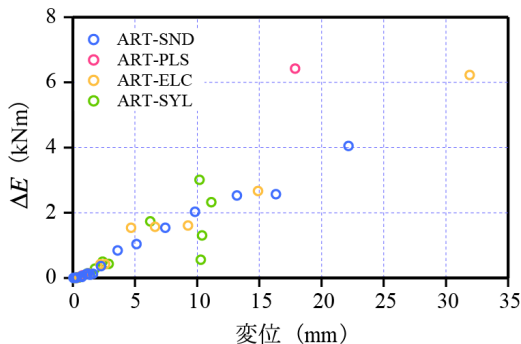


図5 変位更新時における E と応答変位の関係

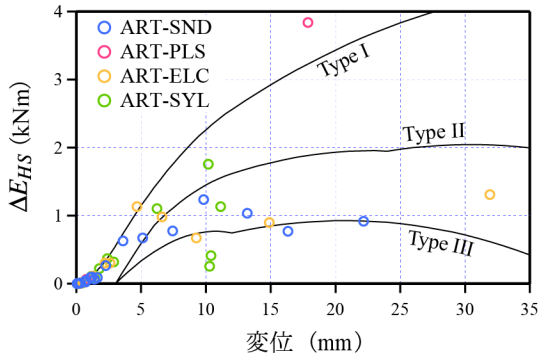


図6 せん断部材の履歴吸収エネルギーの性状

図7には、後述の数値解析による最大瞬間入力エネルギーの推定に関する検討ステップ2におけるRosenbluethによるピークファクター理論式との比較を示す。一般に地震終了時までに入力される総入力エネルギーは、地震動の速度応答スペクトルと類似した性状を示すため、地震動のスペクトル特性が与えられれば総入力エネルギーの推定が可能とされている。これに本知見を加えれば、地震動経過中の瞬間入力エネルギー E が推定可能であり、最大応答変位も可能であることが示唆される。ただし、実験結果より逆解析した各変数値は、理論的変数値の十分に整合しておらず、まだ詳細な検討が必要である。

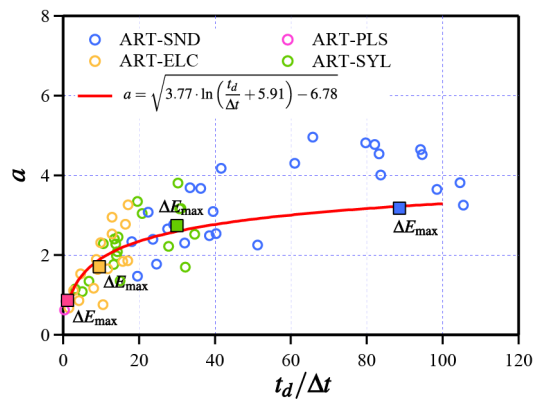


図7 ピークファクター理論との比較

(2) 最大瞬間入力エネルギーの推定

以下、検討の各ステップで得られた成果を記す。

第1ステップ(平成26年度)では、観測波から位相波を作成して、両者を入力とした弾性1自由度系の弾性応答解析を実施し、最大瞬間入力エネルギーと総入力エネルギーの比率を算定して比較した。その結果、位相波を入力としたときの最大瞬間入力エネルギーと総入力エネルギーの比率は、元の観測波を入力としたときと概ね対応し、フーリエ振幅の影響が比較的小さいことを示した。加えて、地震動の継続時間が長くなるにつれて、最大瞬間入力エネルギーの総入力エネルギーに対する比が小さくなることを示した。

第2ステップ(平成27~28年度)では、既往の岩崎らの研究成果をもとに、Rosenbluethによる理論式を用いて、最大瞬間入力エネルギーと総入力エネルギーの比率をホワイトノイズ地動の継続時間と弾性1自由度系の固有周期の関数として定式化した。次いで、推定式の精度をホワイトノイズ地動を用いた弾性応答解析結果により検証した。その結果、ここで定式化された推定式により、ホワイトノイズ地動の継続時間を考慮して最大瞬間入力エネルギーと総入力エネルギーの比を評価可能であることを示した。次いで、地震動の位相差分を時間換算した群遅延時間の頻度分布に着目して、群遅延時間の累積頻度分布が16%から84%の間

の時間を有効継続時間を定義し、これを推定式で用いることで観測地震動と位相波を入力したときの最大瞬間入力エネルギーの比率を推定した。その結果、観測地震動ならびに位相波に対しても、ここで定義した有効継続時間を用いることで最大瞬間入力エネルギーと総入力エネルギーの比率を推定可能であることを示した(図8~10)。

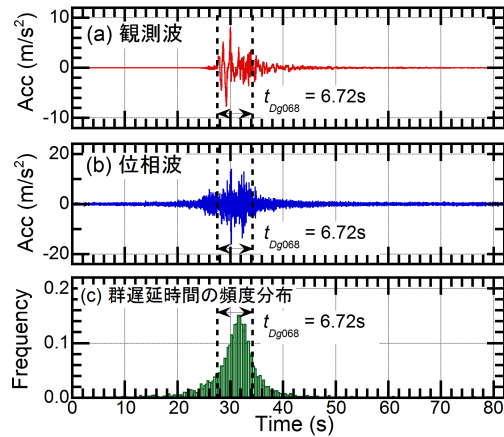


図8 観測波・位相波と群遅延時間の頻度分布 (1995年兵庫県南部地震FKI-NS記録)

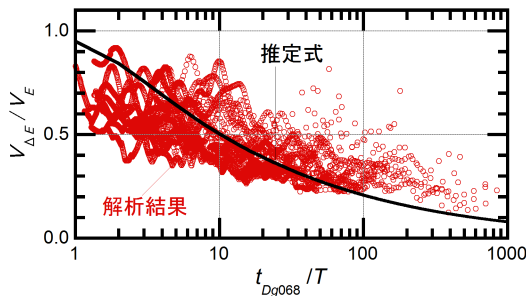


図9 最大瞬間入力エネルギーの比率の推定結果 (観測波)

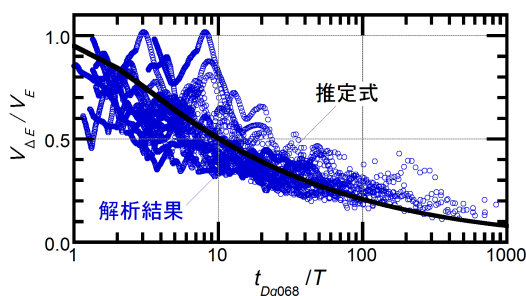


図10 最大瞬間入力エネルギーの比率の推定結果 (位相波)

第3ステップ(平成28年度)では、曲げ破壊型のRC造建築物をモデル化した1自由度系を対象として有効周期を定義し、これを用いることで弾性時の総入力エネルギースペクトルから弾塑性応答時の総入力エネルギーが概ね推定可能であることを確認した。(図11)次いで、第2ステップで検証した推定式に対し、固有周期を有効周期に読み替えることで、弾塑性応答時の最大瞬間入力エネ

ルギーが推定できることを示した(図12)。最後に、地震動のフーリエ振幅スペクトルのみから定まる総入力エネルギースペクトルと位相差分より定まる有効継続時間から、最大瞬間入力エネルギーを介して、曲げ破壊型のRC造建築物をモデル化した1自由度系弾塑性最大応答が推定可能であることを検証した(図13)。

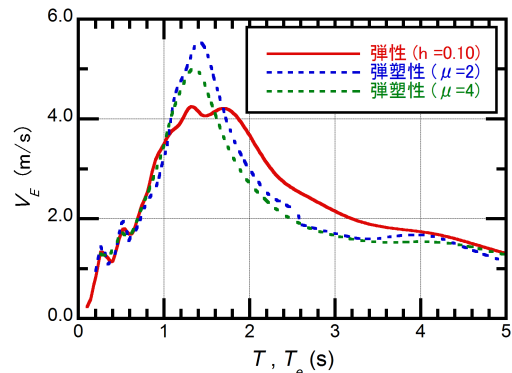


図11 弾塑性応答時の総入力エネルギーの推定 (1995年兵庫県南部地震FKI-NS記録)

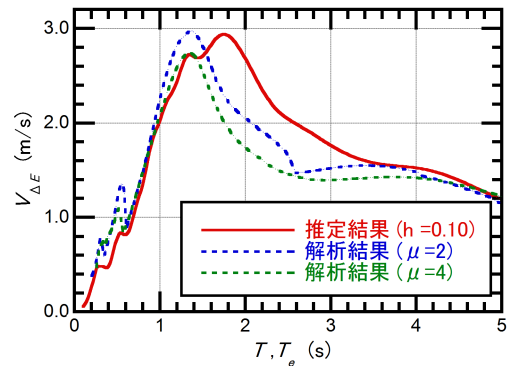


図12 弾塑性応答時の最大瞬間入力エネルギーの推定 (1995年兵庫県南部地震FKI-NS記録)

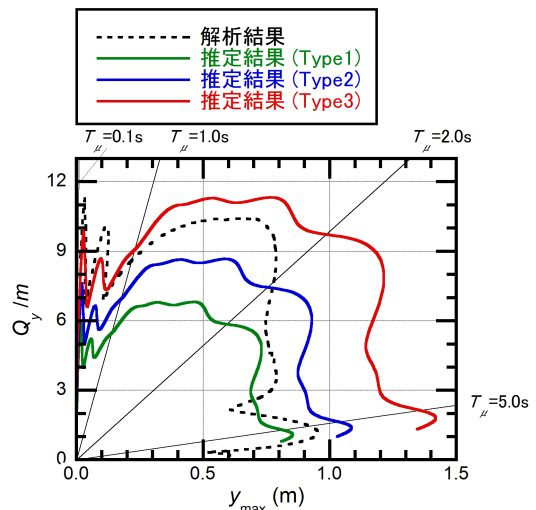


図13 弾塑性1自由度系の最大応答の推定 (1995年兵庫県南部地震FKI-NS記録: 塑性率2)

なお、これと並行して実施したせん断型部材と曲げ型部材の混在した既存7層SRC造建築物モデルを用いた非線形応答解析を実施した(平成26~27年度)。その結果、継続

時間の短い地震動に対する最大応答は等価線形化法による推定結果と比べて著しく小さくなる傾向となる一方、継続時間の長い地震動に対する最大応答は等価線形化法による推定結果に近くなることを示した。加えてその理由として、継続時間の短い地震動に対する応答では最大応答変位の生じる半サイクルでせん断型部材の大半が破壊する傾向にあるのに対し、継続時間の長い地震動に対する応答では最大応答の生じる以前にせん断型部材の大半の破壊が生じる傾向にあるためであることを示した。

(3) 最大応答推定の流れ

瞬間入力エネルギーに基づくせん断破壊型部材と曲げ破壊型部材が混在する既存RC造・SRC造建築物の地震時最大応答推定手法の構築として推定手順の流れを以下のように整理した。

STEP 1 : 入力地震動のフーリエスペクトルから、総入力エネルギースペクトルを推定

STEP 2 : 入力地震動のフーリエスペクトルから、有効継続時間を評価

STEP 3 : 固有周期で無次元化した有効継続時間と減衰定数から、最大瞬間入力エネルギーを推定

STEP 4 : 構造物に最大応答が生じる半ループまでに入力されるエネルギーを推定

STEP 5 : 構造物でせん断破壊が生じるまでの片押しでのひずみエネルギーを算定

STEP 6 : STEP 4 の入力エネルギーと STEP 5 のひずみエネルギーの比較により、せん断破壊の有無を判定

STEP 7 : せん断破壊の有無に応じて最大瞬間入力エネルギーから最大応答変位を推定

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計9件)

藤井賢志、菅野秀人、西田哲也、観測地震動の位相をシフトさせて作成した模擬地震動を用いた既存中層SRC造建築物の応答推定精度の検証、コンクリート工学年次論文集、査読有、Vol.38、No.2、2016、pp.823-828

菅野秀人、藤井賢志、櫻井真人、西田哲也、せん断部材と曲げ部材が混在する鉄筋コンクリート造架構の擬似動的実験に基づくエネルギー応答性状に関する検討、コンクリート工学年次論文集、査読有、Vol.38、No.2、2016、pp.895-900

菅野秀人、櫻井真人、藤井賢志、西田哲也、せん断柱と曲げ柱からなる並列1自由度系モデルの擬似動的実験、コンクリート工学年次論文集、査読有、Vol.37、No.2、2015、pp.673-678

[学会発表](計8件)

喜田修平、藤井賢志、継続時間を考慮した線形1自由度系への最大瞬間入力エネルギー

の推定、日本地震工学会大会-2016、2016年9月26日、高知工科大学

藤井賢志、喜田修平、地震動の位相特性が構造物への最大瞬間入力エネルギーに与える影響 その1 位相特性に基づく地震動の継続時間の評価、日本建築学会大会(関東)、2015年9月4日、東海大学
喜田修平、藤井賢志、地震動の位相特性が構造物への最大瞬間入力エネルギーに与える影響 その2 位相特性に基づく継続時間と最大瞬間入力エネルギーの関係、日本建築学会大会(関東)、2015年9月4日、東海大学

6. 研究組織

(1) 研究代表者

西田 哲也 (NISHIDA, Tetsuya)
秋田県立大学・システム科学技術学部・教授
研究者番号：40315627

(2) 研究分担者

藤井 賢志 (FUJII, Kenji)
千葉工業大学・創造工学部・教授
研究者番号：20397029

菅野 秀人 (KANNO, Hideto)
秋田県立大学・システム科学技術学部・准教授
研究者番号：20336449

櫻井 真人 (SAKURAI, Masato)
秋田県立大学・システム科学技術学部・助教
研究者番号：60710184