

令和 2 年 7 月 7 日現在

機関番号：13701

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2017～2019

課題番号：17H03297

研究課題名（和文）多重震源地震による強震動予測法開発と継続時間に依存する構造物の損傷メカニズム解明

研究課題名（英文）Ground motion simulation for multi-fault event and mechanism of structural fatal damage due to ground motion duration

研究代表者

杉戸 真太（SUGITO, MASATA）

岐阜大学・流域圏科学研究センター・特任教授

研究者番号：60115863

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 12,800,000円

研究成果の概要（和文）：近い将来必ず来襲すると予測されている海溝型巨大地震による地震動の工学的特徴は、強い揺れの継続時間が3～5分にまでなること、そして、広域にわたって高震度域になることが認識されており、各地で推定または観測される震度値に対して被害の程度がより基大になることが予測されている。地震動の最大強さ、スペクトル強度に加えて複数回の強い地震動外力、さらには強震継続時間が非常に長いことによる構造物の損傷度、被災のメカニズムを、構造種別毎に定量的に算定し、構造物の設計地震外力の設定や広域の地震被害想定において、等価な強震動継続時間の概念を導入する方法を提案することが本研究の目的である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、(1)内陸直下地震としては複数の活断層による連動型地震、(2)断層が極めて大きく複数のアスペリティを有する最大級の南海トラフ巨大地震、の2つのケースを対象とし、複数回の衝撃的震動、ならびに強い揺れの継続時間の影響が著しい液状化地盤における土構造物、固有周期が長く減衰の小さい大規模なRCや鋼橋梁、一般の木造家屋の構造形式に的を絞って検討し、地震動の特性を設計地震力に組み入れる手法を検討した。近い将来における発生が危惧される海溝型地震においては、太平洋側の広い地域で強い地震動が数分継続するため、本研究で得られた知見が各種構造物の耐震化に大きく貢献すると考えられる。

研究成果の概要（英文）：The engineering characteristics of ground motions generated by the Huge Nankai Trough Earthquake are (1) the ground motion duration is very long like 3 to 5 minutes, and (2) the ground motion is very strong over the extremely broad area. From here onwards, we discover the overwhelming destructions.

The objectives of our research are concentrated on (1) the definition of equivalent seismic load for the ground motion duration, (2) the damage index or the duration which depends strongly on the structural material, and (3) the definition of damage index which can be applied for integrated damage prediction.

研究分野：強震動予測、都市地震防災

キーワード：強震動予測 強震動の継続時間 都市地震防災 液状化被害予測 構造物の強度特性

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

我が国では、これまでに著しい地震災害が発生するごとに脆弱な構造形式の構造物が大きな被害を受け、また、電気、ガス、水道に代表されるライフライン施設の復旧の長期化が指摘され、被災の大きかった構造形式の耐震基準が高められ、ライフライン施設の復旧期間の短縮化を強く意識した施設整備が検討され実行されてきた。

ここ数十年において発生した地震災害の中で最も社会的影響の大きかったものは、1995年兵庫県南部地震である。内陸直下地震の震源近傍での強大な地震動は、それまでの耐震基準のレベルを大きく超えるもので、それまでのあらゆる構造物の基準レベルを極めて大きく変更するものであったといえる。

兵庫県南部地震に加えてさらに大きな影響を与えられた特徴的な地震災害として、2011年東北地方太平洋沖地震がある。断層規模が数百キロにも及び、断層が主にプレート沈み込み帯にあるために、大津波による甚大な被害を発生させた地震である。断層規模が極めて甚大なため、強い地震動の継続時間が3~5分にいたることで、このために発生する被災事例も新しく認識された。長い揺れによる緩い砂地盤の甚大な液状化現象である。また、長い揺れに起因する住宅等の倒壊被害である。

以上のように、近年のめざましい経済発展を遂げた我が国は、先の兵庫県南部地震で断層近傍において強烈な強震動を生じさせる内陸直下地震による震災を経験した。この震災を受けて、様々な社会基盤施設の耐震基準が見直され、とくにタイプ（内陸直下型）地震による強大な地震荷重に対しても崩壊を免れるレベルの設計思想が一般化した。一方、2011年東北地方太平洋沖地震による震災を受け、近い将来における発生確率が極めて高いとされるタイプ（海溝型）地震による地震荷重についても、とくに短周期域での設計地震荷重が見直されている。

このような特徴的な2つのタイプの地震による災害に対応して設計地震外力がより厳しいものに修正されてきているが、2016年4月に発生した熊本県での内陸直下地震では、2日間に2つの断層破壊が生じ、同一地点で震度7を2度経験した地域では、初めの震動で弱体化した構造物が2度目の震動で倒壊するという現象も観測されている。

以上のことより、今後も十分にあり得る2つの入力パターン、すなわち、(1)衝撃的な強い地震動が複数回来襲、(2)強い震動レベルの地震動が長く継続する、に対応する設計地震動荷重の設定法についての検討が必要とされている。

2. 研究の目的

近い将来必ず来襲すると予測されている海溝型巨大地震による地震動の工学的特徴は、強い揺れの継続時間が3~5分にまでなること、そして、広域にわたって高震度域になることが認識されており、各地で推定または観測される震度値に対して被害の程度がより甚大になることが予測されている。地震動の最大強さ、スペクトル強度に加えて複数回の強い地震動外力、さらには強震継続時間が非常に長いことによる構造物の損傷度、被災のメカニズムを、構造種別毎に定量的に算定し、構造物の設計地震外力の設定や広域の地震被害想定において、等価な強震動継続時間の概念を導入する方法を提案することが本研究の目的である。

ケーススタディとして、(1)内陸直下地震としては複数の活断層による連動型地震、(2)断層が極めて大きく複数のアスペリティを有する最大級の海溝型地震である南海トラフ巨大地震、の2つのケースを対象とし、複数回の衝撃的震動、ならびに強い揺れの継続時間の影響が著しい液状化地盤における土構造物、固有周期が長く減衰の小さい大規模なRC(補強コンクリート)または鋼橋梁、一般の木造家屋の構造形式に的を絞って検討し、複数の地震外力条件を設計地震力に組み入れる手法を検討した。

3. 研究の方法

与えられた断層パラメータに基づく加速度時刻歴地震動波形をシミュレーションする手法については、主として防災科学研究所等の地震動観測網による記録をベースにして開発した。また、種々の強震動特性のモデル特性についても多くの強震記録を分析することにより得た。各種構造形式による構造物モデルにおける地震応答特性、とくに長い継続時間に対応する非定常応答特性については、震動実験により得られた結果をもとに、応答のモデル特性を検討した。さらに、非線形応答特性を与えた構造系の応答挙動を数値解析により分析して、モデル化を行った。

4. 研究成果

本研究では、複数の内陸断層破壊による地震動(複数の高震度地震動)や、断層規模が極端に大きな海溝型地震による地震動(3~5分程度におよぶ長い強震継続時間の地震動)についてその予測手法を確立し、スペクトル強度を設計外力とする設計指針に複数の高震度入力や強震動

継続時間の影響を定量的に組み入れる方法を提案するとともに、想定地震に対する地域防災の実務に活用できる等価計測震度値を外力とする被害関数モデルを提案した。具体的に以下の検討を実施し、成果が得られた。

(1)海溝型巨大地震による強震動を様々な地点において算定する手法を開発した。これまでに、申請者らによって開発され、多くの自治体において使用実績のある強震動予測法(EMPR)を基本モデルとし、大規模地震の場合に顕著にみられる地域特有の深い基盤構造に依存する長周期地震動を含めて予測できる手法(EMPR-HB)に拡張してきた。断層の破壊伝播のパターン(ディレクティブティ効果等)と着目点との関係、表層地盤条件等の強震継続時間への影響、また、通常の内陸直下地震と比較して地震動強度と継続時間の2つの要素がどのように異なるのか等、地震工学的観点から検討した。さらに、速度応答に基づく閾値超過継続時間スペクトルの評価を行った。

(2)継続時間の影響が著しいと考えられる2つのタイプの構造形式、すなわち、液状化地盤における土構造物と固有周期が長く減衰の小さい大規模なRCまたは鋼橋梁等に的を絞って、破壊または応答値の進展が時刻歴でどのような経過をたどるかについて検討した。また、これらの構造形式に対する強震動の破壊力をその“強度”と“継続時間”の二つにより表現することを試みた。

(3)自治体の地震被害想定で重要な検討事項となる(a)一般の木造家屋構造、多くの土木構造物の構造形式である(b)RC構造、非線形領域に達した後もある程度剛性が保たれる(c)鋼構造、さらに、継続時間の影響が著しいと考えられる(d)液状化地盤における土構造物、を対象とし、それぞれの構造形式の被害レベルの推定手法を、内陸型直下地震と海溝型巨大地震の二つのケースに分けて提案した。地震外力としては計測震度値を採用するが、内陸直下地震では連動するケースのそれぞれの計測震度値の組み合わせ震度(等価震度)を提案するとともに、海溝型巨大地震では、強震動の継続時間も外力として取り入れる手法を検討した。

(4)地震動特性の把握は地震工学における基本的な課題であり、地震動分析・被害分析には不可欠な情報である。そこで地震動波形に含まれる種々の情報損失が少なく、地震動の工学的特性を的確に捉えた地震動指標として、地震動経時特性に着目した特徴量を提案した。具体的には、正規化加速度累積パワー曲線(Husid Plot)より算出した99次元特徴ベクトルと、複数の正規分布の合成で近似する混合正規分布モデル(2~8次元)による地震動波形の包絡線近似を提案した。提案した手法を観測記録に適用した結果、種々の地震動特性を維持したまま次元縮約が可能であることを確認した。さらに時間-周波数解析への拡張として、99次元特徴ベクトルの考えを非定常パワースペクトルに適用した周期別特徴ベクトルを算出し、表面波分散性について考察した。

(5)構造物の非線形応答に強震動継続時間が及ぼす影響について、数値解析的な検討を行った。約4万の波形をほぼ同じ加速度応答スペクトルを持つよう修正した上で非線形1自由度系に入力し、平均的な応答とばらつきを計算した。その結果、応答には継続時間の長短によって平均的な応答に違いが見られたが、個々の波形による最大応答値が大きくばらつき、継続時間の影響が大きいとは言えなかった。

(6)余震を含む長時間継続地震動を模擬した非排水繰返しせん断試験を対象として、張らの繰返し弾塑性モデルの適用性について検討した。対象とした実験は仙頭らの行った非排水繰返し中空ねじりせん断試験である。この実験では現場の状態に近づけるために初期せん断応力作用の下で、主要動と後続の余震を模擬した小さな繰返しせん断を与えている。張らの構成モデルでは振幅の小さい余震に対するせん断ひずみを過大に評価した。強震継続時間の長い振動に対して地盤の材料パラメータの設定も含めた土の構成モデルの適用性のさらなる検討が必要である。

複数回の強震動に対する地盤の再液状化を遠心模型実験で再現した。飽和した砂質土の傾斜地盤を対象として、複数回の強震動を用いて繰返し加振した。その結果、液状化後に同レベルの地震動で加振した場合には再液状化が確認され、その挙動は最初の液状化挙動と同様であった。また、加振前後でのCPT試験の結果にも明確な違いはみられなかった。地盤条件や加振条件を変えたさらなる検討が必要である。

(7)2016年熊本地震では数日のうちに震度7が2回、震度6弱以上で7回、震度5強以上では11回もの強震が観測された。このような短期間で複数回の強震を連続して受ける既設の鋼製橋脚を対象として、前震・本震・余震の3回程度の連続強震を履歴することによる繰返し耐荷性状、特に耐力低下に関して複合非線形有限要素解析によって検討を行った。その結果、鋼製橋脚の局部座屈の進展が生じやすい幅厚比パラメータや径厚比パラメータが大きな断面形状ほど繰返し耐力低下が著しいこと、また、後続の強震の入力強度が小さくなるよりも、入力強度が同じ連続強震を受ける場合、また各強震サイクルにおいて繰返し変位履歴の回数が多いほど耐力低下の影響が大きいことなどが明らかとなった。さらに鋼材の材料構成則として修正二曲面モデルとバイリニアモデルの比較も行った。

(8)ラーメン形式鉄道高架橋を対象に、せん断耐力の劣化に着目した RC 橋脚の地震応答解析を行った。近年発生した連続した地震動を含む数種類の地震動を入力地震動とし、RC 橋脚の高さをパラメトリックに変化させて破壊形態への影響を調べた。

その結果、せん断破壊先行型の(せん断余裕度が1を下回る)橋脚においても曲げせん断破壊が生じる場合があることがあった。また、曲げせん断破壊先行型の橋脚において、曲げせん断破壊が生じるケースが特に計測震度の高い領域で多く見られた。連続した地震動(前震+本震)を入力した場合、本震の影響により、余震作用時の破壊形態の変化や新たな破壊(曲げせん断破壊)が発生するケースが見られた。地震動による差異に関しては、卓越周期の大きいものほど塑性率は高く、継続時間の長いものほど履歴エネルギーは大きくなる傾向にあった。

(9)長野県内の主要活断層を対象に、M6.5相当の中規模地震のシミュレーションを行った。具体的には、断層長さを10kmに固定し、断層線上に沿って地震動を発生させ、地域における震度曝露人口の違いを相互に比較して、長野県内において中小地震による被害リスクの高い地域を抽出した。また、自治体レベルの広域震度予測を行うシステムを開発するため、現在の地震観測点に加えて、観測点を増設すべき箇所を地域の人口分布を考慮して最適配置する手法を考案した。

さらに、国内外、特に発展途上国において地盤のボーリングデータが十分に得られない場合に備え、微動アレー探査を行うことによって、地下のVs速度構造を推定する方法を検討した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計11件（うち査読付論文 9件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 山本大喜・能島暢呂	4. 巻 Vol.74, No.4
2. 論文標題 地震動要素としてのパルス波がもたらす作用に着目した強震動特性の評価法	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 土木学会論文集A1	6. 最初と最後の頁 I_1023-I_1034
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) doi.org/10.2208/jscejsee.74.I_1023	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 能島暢呂・久世益充	4. 巻 Vol.74, No.4
2. 論文標題 KL変換と離散コサイン変換による応答スペクトルのモード分解と合成	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 土木学会論文集A1	6. 最初と最後の頁 I_237-I_248
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) doi.org/10.2208/jscejsee.74.I_237	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 久世益充・能島暢呂	4. 巻 Vol.75, No.X
2. 論文標題 地震動特性の特徴ベクトルを用いた類似波形の抽出手法	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 土木学会論文集A1	6. 最初と最後の頁 搭載決定
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 福江清久・伊津野和行	4. 巻 40-2
2. 論文標題 材料の損傷に基づく下水道施設の耐震性能照査に関する基礎的研究	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 コンクリート工学年次論文集	6. 最初と最後の頁 811-816
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 佐々木孝雄, 古本吉倫, 暮目智沙, 大庭哲也	4. 巻 -
2. 論文標題 Development of wide-area seismic intensity prediction system using	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 第13回物理探査学会国際シンポジウム	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 能島暢呂, 久世益充	4. 巻 17
2. 論文標題 KL展開による地震動の経時特性のモード分解と合成	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 日本地震工学会論文集	6. 最初と最後の頁 5_21, 5_37
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 5610/jaee.17.5_21	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 能島暢呂, 久世益充, 高島拓也	4. 巻 17
2. 論文標題 地震動の経時特性の特徴抽出と階層的クラスター分析による分類	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 日本地震工学会論文集	6. 最初と最後の頁 2_128, 2_141
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 5610/jaee.17.2_128	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 久世益充, 能島暢呂, 高島拓也	4. 巻 Vol.73, No.4
2. 論文標題 地震動経時特性の特徴抽出と自己組織化マップによる評価	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 土木学会論文集A1S	6. 最初と最後の頁 I-558I, I-567
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 2208/jscejseee.73.I_558	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 秋原一帆、伊津野和行	4. 巻 Vol.11
2. 論文標題 平成28年熊本地震による通潤橋の地震応答と耐震補強に関する研究	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 歴史都市防災論文集	6. 最初と最後の頁 71、78
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 伊津野和行、石田優子、藤本将光、深川良一	4. 巻 Vol.73、No.4
2. 論文標題 通潤橋の地震応答特性に関する研究	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 土木学会論文集A1	6. 最初と最後の頁 1-1、1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 2208/jscejsee.73.1_1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yoshinori Furumoto, Ayaka Wada, Tetsu Machida, Taichi Watanabe and Michelle Bong	4. 巻 PaperID: 2017-01-11- 0059
2. 論文標題 Optimum Arrangement of Seismic Intensity Monitoring Points for Immediate	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 IGNITE- AICCE17 (Penang)	6. 最初と最後の頁 CD
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計10件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 1件)

1. 発表者名 山本大喜・能島暢呂
2. 発表標題 構造物へのエネルギー入力に着目したパルス波の衝撃的效果の評価
3. 学会等名 第37回地震工学研究発表会講演論文集
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 能島暢呂・久世益充
2. 発表標題 地震動の水平成分の軸回転が振幅・継続時間特性に及ぼす影響
3. 学会等名 第15回日本地震工学シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 久世益充・竹村怜弥・杉戸真太
2. 発表標題 常時微動観測によるごく表層付近の地盤特性推
3. 学会等名 地域安全学会梗概集
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 久世益充・能島暢呂
2. 発表標題 離散コサイン変換による応答スペクトルのモー
3. 学会等名 土木学会第73回年次学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 須藤遼，北原武嗣，大谷友香，葛西昭
2. 発表標題 修正二曲面モデルを用いた長時間地震による鋼製橋脚の耐力低下に関する研究
3. 学会等名 関東学院大学理工 / 建築・環境学部研究報
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Nojima, N.
2. 発表標題 Development of Evaluation Methods for Duration of Earthquake Motions
3. 学会等名 Proceedings of the 18th ASEP、International Convention (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 肥前大樹、上野勝利、渦岡良介
2. 発表標題 余震を考慮した非排水繰返しせん断試験に対する弾塑性構成モデルの適用性
3. 学会等名 第52回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 能島暢呂・久世益充
2. 発表標題 KL展開による地震動の経時特性のモード解析
3. 学会等名 土木学会第72回年次学術講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 久世益充・能島暢呂
2. 発表標題 カーネル密度推定と混合正規分布モデルによる地震動波形の包絡線近似
3. 学会等名 土木学会第72回年次学術講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 能島暢呂・LE QUANG DUC・久世益充
2. 発表標題 シナリオ地震動予測地図のばらつきと空間相関を反映した地震動分布シミュレーション
3. 学会等名 日本自然災害学会学術講演会
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

研究紹介（杉戸真太） http://www.green.gifu-u.ac.jp/~sugito/ 研究紹介（能島暢呂） https://www1.gifu-u.ac.jp/~nojima/menu.htm 研究紹介（久世益充） https://www1.gifu-u.ac.jp/~kuse/

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	北原 武嗣 (KITAHARA TAKESHI) (00331992)	関東学院大学・理工学部・教授 (32704)	
研究分担者	能島 暢呂 (NOJIMA NOBUOTO) (20222200)	岐阜大学・工学部・教授 (13701)	
研究分担者	久世 益充 (KUSE MASUMITSU) (30397319)	岐阜大学・流域圏科学研究センター・准教授 (13701)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	渦岡 良介 (UZUOKA RYOSUKE) (40333306)	京都大学・防災研究所・教授 (14301)	
研究分担者	岩本 政巳 (IWAMOTO MASAMI) (60232716)	名古屋工業大学・工学（系）研究科（研究院）・准教授 (13903)	
研究分担者	伊津野 和行 (IZUNO KAZUYUKI) (90168328)	立命館大学・理工学部・教授 (34315)	
研究分担者	古本 吉倫 (FUROMOTO YOSHINORI) (90303510)	長野工業高等専門学校・環境都市工学科・教授 (53601)	