

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 25 日現在

機関番号：13701

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26289143

研究課題名(和文) 海溝型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の解明

研究課題名(英文) Strong Motion Simulation for Trough Faults and Damage Mechanism of Structures  
Focusing on Strong 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・教授

研究者番号：60115863

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 10,800,000円

研究成果の概要(和文)：海溝型巨大地震を対象として、強震動予測法開発と、地震動の継続時間に依存する構造物の損傷メカニズムの解明に焦点を当てて検討した。震度予測式と、予測震度を条件とした継続時間の条件付予測式とを統合して、震度・継続時間の一貫した経験的予測体系を構築した。強震継続時間が長い地震動が作用した場合の河川堤防や道路盛土などの土構造物を対象として地盤の液状化を考慮した地震応答解析(有効応力解析)を行い、解析手法の適用性を検討した。また、骨組構造モデルを用いてT型コンクリート橋脚をモデル化し、強震継続時間が短い地震波と、長い地震波に対する応答計算を行った。

研究成果の概要(英文)：A strong motion prediction technique was developed, including the long period ground motion due to each individual local region. The study was focussed on the long period-spectral characteristic derived from deep ground configuration of region, which is generally verified in strong ground motion records. The technique was applied to the Noubi Plain of the Kanto, Tokai, and Osaka districts.

The research was extended to the breakthrough on the relation between the ground motion duration and fatal damage of several types of structures. The strong degree of dependence of soil structures on the ground motion duration was quantitatively demonstrated.

研究分野：地震防災、強震動予測、地盤震動解析

キーワード：強震動予測 地震動の継続時間 構造物の損傷履歴 地盤の液状化解析 南海トラフの巨大地震

## 1. 研究開始当初の背景

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。

甚大な被害を被る地域が比較的狭い内陸直下地震に対して、断層規模のきわめて大きな海溝型巨大地震に対する防災・減災事業を実行するにあたり考慮しなければならない点は、第一に「地震動が非常に長い強震継続時間となることに起因する大きな被害が発生する」ことであり、第二に「それらの被害が著しく広域に及ぶ」ことの2つと考えられる。強い揺れが長く続くと、地盤の液状化に起因する土構造物の崩壊、基礎構造の著しい変動が顕著に現れ、また、固有周期が長く減衰の小さい長大橋梁等の応答が著しく増大することになる。

このような継続時間の影響については、現在のスペクトル強度を基礎とした設計指針にはほとんど取り入れられていない現状にある。逼迫性が極めて高いとされる海溝型地震を対象とした様々な地震防災事業が実施されているが、とくに第一の点による被害の拡大について具体的な検討を早急に実施し、その成果を防災実務に反映させることがきわめて重要である。

## 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である。地震動の最大強さ、スペクトル特性に加えて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、設計地震外力に強震動継続時間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最大級の海溝型地震である南海トラフ巨大地震を対象とし、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または鋼橋梁、等の構造形式に的を絞って検討し、強震動継続時間を設計地震力に組み入れる手法を提案する。

## 3. 研究の方法

本研究の目的は、海溝型地震による地震動の特徴「3~5分程度におよぶ非常に長い強震継続時間を有する地震動」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被害関数モデルを提案する。設計実務への応用を視野に入れ、以下の検討を実施した。

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。ここでは、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)に拡張する。断層の破壊伝播のパターン(ディレクティビティ効果等)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、内陸直下地震による強震記録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。

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り、破壊または応答値の進展が時刻歴でどのような挙動となるの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検討した。

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を二つの地震動情報から簡便に推定する手法を検討した。

近年その手法が確立されつつある地域地震危険度解析の結果に上記検討結果を組み入れる方法論について検討した。地震危険度解析では、年超過確率に対応する地震動強度レベルが算定されるが、その地震動強度に対応する地震像、すなわち、そのような地震動強度をその地域に与える地震の規模(M)と断層までの距離(R)に関する情報が同時に得られる。したがって、このMとRより、 $\frac{M}{R}$ で定義される強震動継続時間を算定し、これまで“地震動強度”のみを対象としてきた地震危険度解析に“継続時間”の情報も組み入れることを検討する。とくに海溝型巨大地震の影響の大きい地域における地震危険度解析をより有効で現実的なものとすることを目標とした。

#### 4. 研究成果

上記の研究方法により、研究代表者、研究分担者により得られた主な研究成果について以下に示す。

(1) 長い強震継続時間と地域固有の長周期

地震動を含む地震動推定法の開発〔杉戸、久世〕

関東、東海、関西地域において断層規模が大きな地震が発生すると、それぞれ固有の周期がある程度卓越する強震動となることを、それぞれの地域において得られた多くの強震記録において確認することができた。これまでの研究代表者らによる強震動に対してそれぞれの周波数成分の補正值として適用する予測手法を開発した。また、当該地域の長大構造物の耐震化検討における検討波として採用された。

(2) 震度・継続時間の一貫した経験的予測体系の構築〔能島〕

距離減衰式に基づく震度予測式と、予測震度を条件とした継続時間の条件付予測式とを統合して、震度・継続時間の一貫した経験的予測体系を構築した。具体的には、予測震度の不確定性を考慮して、震度継続時間の予測値の期待値および標準偏差の近似解を確率論的に定式化した。この経験的予測スキームを2014年長野県神城断層地震に適用し、予測精度に関する検証を行った。観測震度に基づく継続時間予測値は実測値と相関が高いことと、距離減衰式による予測震度に基づく継続時間予測値はばらつきが大きくなるが残差に偏りが無いことを示した。また予測震度を介さない震度継続時間予測モデルを構築して予測結果を比較し、提案スキームの有効性を示した。

(3) 有効応力解析で用いる土の構成モデルの具備すべき条件の検討〔渦岡〕

強震継続時間が長い地震動が作用した場合の河川堤防や道路盛土などの土構造物を対象として地盤の液状化を考慮した地震応答解析(有効応力解析)を行い、解析手法の適用性を検討するとともに、有効応力解析で用いる土の構成モデルの具備すべき条件について検討した。

2011年東北地方太平洋沖地震の影響を受

けた宮城県北上川橋浦地区の河川堤防の被災事例を対象に再現解析を行った。東日本大震災時に北上川左岸 5.70km 地点の河川堤防では、堤内側ではほとんど沈下がなかった一方、河川側は大きく沈下し、堤防天端にて約 80cm の段差が発生した。堤防の地震動による変状を把握するため、地震応答解析を行った。なお、解析コードは LIQCA および FLIP を使用し、両者の解析結果を比較した。両者の結果は、変形においてほぼ同様の結果を得た。

#### (4) 繰り返し履歴による鋼材の耐力低下メカニズムの解明〔北原〕

海溝型巨大地震による長時間継続地震動を受ける鋼製橋脚を対象とし、数十回から百回オーダーにおよぶ繰り返し履歴による最大耐力後の繰り返し耐力低下に関して、数値解析的検討により検討した。その結果、最大耐力履歴後の弾性範囲の繰り返し変異履歴を受けることにより、局部座屈の進展や、鋼材の繰り返しによる降伏曲面の変化などの影響により、耐力低下が生じるメカニズムを明らかにした。

この際、幅厚比パラメータや細長比パラメータに関しては、局部座屈が生じやすいようなパラメータの断面形状の場合、耐力低下の度合いが大きいこと、また、材料の繰り返し劣化を高精度に評価できる構成則を用いた場合、実験結果と解析結果の対応が良いことなども明らかにした。

#### (5) 地震動外力の各種特性と構造物の耐震挙動との関係の定量的検討〔北原〕

RC 構造物を対象とした地震応答解析を通じて、継続時間や周期特性といった地震動の特性と構造物の耐震挙動との関連を調べる研究を継続的に行っている。例えば、高さの異なる単柱形式の RC 橋脚を対象に、入力地震動 124 波形による地震応答解析を行い、計測震度ごとの耐震挙動、地震動の継続時間がその耐震挙動に及ぼす影響について検討した。その結果、地震動の継続時間と構造物の損傷

度に明瞭な相関は見られなかったものの、継続時間の長い地震動のグループの破壊確率は短いグループより高くなることが分かった。また、耐力（剛性）低下を考慮した復元力モデルを用いることで、応答塑性率や破壊確率はやや上昇するものの、履歴エネルギーは減少する傾向にあることが分かった。

#### (6) 長い強震継続時間の地震外力による RC 構造系の応答挙動に関する検討〔伊津野〕

強震継続時間が長い地震に対する構造物の応答特性について基本的な検討を行うため、2011 年東北地方太平洋沖地震時に K-NET で観測された築館、日立、仙台の記録を用い、バイリニア型 1 自由度系システムの地震応答について検討した。築館記録は短周期で最大加速度が大きい波形、仙台記録は最大速度が大きい波形、日立記録は他の 2 記録が 2 回大きな強震区間があるのに対して 1 回だけ大きく揺れる波形である。降伏耐力として構造物の質量×重力加速度の  $a$  倍を設定することにし、 $a=0.2, 0.5, 1.0, \infty$ （＝線形）の 4 種類を考えた。初期固有周期は、0.1～2.0 秒の間 0.1 秒間隔で 20 種類設定した。その結果、塑性化することにより、どの初期固有周期を持つ構造系でも最大加速度応答は小さくなるものの、最大変位応答は必ずしも大きくなるとは限らなかった。一般的に、継続時間が短い地震波に対する応答では、大きな変位応答を示した時点で大きく塑性域に入り、その後は小さな地震加速度となるため、塑性化しやすい降伏耐力の低い構造系の方が最大変位応答が大きくなりやすい。それに対して継続時間が長い地震に対する応答では、塑性化が発生する時点より後でも大きな地震加速度が来る場合もあり、その際に塑性化によって共振しにくい固有周期に変化している構造系の応答が小さくなることがあった。逆に、塑性化によってより大きく共振する可能性もあり、精緻な地震動予測の重要性は、継続時間の短い地震よりも高いと言える。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計6件)

1. Masumitsu KUSE, Masata SUGITO, Estimation of strong motion generation area based on acceleration records during the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, Proc. of the 16th World Conference on Earthquake Engineering, Santiago, Chili, January 2017.
2. 久世益充・能島暢呂・高島拓也: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、土木学会論文集 A1S、Vol.73、No.4、2017。(掲載決定)
3. 能島暢呂・久世益充:震度継続時間予測モデルの実地震に対する適用と検証、土木学会論文集、Vol.72、No.4、2016年。
4. 能島暢呂・高島拓也:累積パワーに基づく地震動継続時間の等価振幅レベルに関する考察、日本地震工学会論文集、第16巻、第6号、2016年。
5. 能島暢呂・久世益充:震度継続時間予測モデルの実地震に対する適用と検証、土木学会論文集、Vol.72、No.4、2016年。
6. Ishikawa, H., Saito, K., Nakagawa, K., Uzuoka, R.: Liquefaction analysis of a damaged river levee during the 2011 Tohoku earthquake, Proc. of the 14th Int. Conference of International Association for Computer Methods and Recent Advances in Geomechanics, IACMAG, Kyoto, Sept. 2014.

[学会発表](計13件)

1. 高島拓也・能島暢呂・久世益充、発表標題: クラスタ分析による地震動の経時特性の分類、土木学会第71回年次学術講演会、東北大学、2016。
2. 久世益充・能島暢呂・高島拓也、自己組織化マップを用いた地震動の経時特性の考察、土木学会第71回年次学術講演会、東北大学、2016。
3. 北原武嗣、大谷友香、岸祐介、葛西昭: 連続した複数回強震や長時間地震を想定した繰返し振幅による鋼製橋脚の耐力低下、第19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、2016。
4. Masumitsu KUSE, Masata SUGITO: Estimation of the strong motion generation area based on the acceleration envelope of records from the

2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, the Tenth Pacific Conference on Earthquake Engineering, Sydney, Australia, 2015.

5. 久世益充・杉戸真太: 東京湾周辺における周期数秒レベルの長周期地震動特性の評価と地震動算定、第35回地震工学研究発表会、東京、2015。
6. 能島暢呂・久世益充: 震度継続時間の予測モデルの2014年長野県神城断層地震への適用と検証、第70回土木学会年次学術講演会、岡山、2015。
7. 久世益充・中野克哉・杉戸真太: 東京湾周辺における長周期地震動特性評価と地震動算定、第70回土木学会年次学術講演会、岡山、2015。
8. 久世益充・中野克哉・杉戸真太: 東京湾周辺における長周期地震動特性評価と地震動算定、第70回土木学会年次学術講演会、岡山、2015。
9. 久世益充・杉戸真太・奥村正樹: 大阪湾周辺における周期数秒レベルの地震動特性評価と地震動予測、土木学会第69回年次学術講演会、豊中、2014
10. Masumitsu KUSE and Masata SUGITO: Simulation of Earthquake Ground Motion Focusing on Deeper Subsurface Structure of Local Region, 10th U.S. National Conference on Earthquake Engineering, Anchorage, Alaska, 2014.
11. Ishikawa, H., Saito, K., Nakagawa, K., Uzuoka, R.: Liquefaction analysis of a damaged river levee during the 2011 Tohoku earthquake, 14th Int. Conference of International Association for Computer Methods and Recent Advances in Geomechanics, IACMAG, Kyoto, 2014.
12. Tsuboi, S., Ohsumi, T., Uzuoka, R., Sento, N.: Applicability of effective stress analysis for prediction of deformation during strong motion with long duration, 14th Int. Conference of International Association for Computer Methods and Recent Advances in Geomechanics, IACMAG, Kyoto, 2014.
13. 坪井仙一、渦岡良介、仙頭紀明: 強震継続時間の長い地震動に対する繰返し弾塑性構成モデルの適用性: 第2回地盤工学から見た堤防技術シンポジウム、東京、2014。

## 6. 研究組織

(1)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・教授  
研究者番号：60115863

(2)研究分担者

能島 暢呂 (NOJIMA, Nobuoto)  
岐阜大学・工学部・教授  
研究者番号：20222200

久世 益充 (KUSE, Masumitsu)  
岐阜大学・流域圏科学研究センター・准教授  
研究者番号：30397319

伊津野 和行 (IZUNO, Kazuyuki)  
立命館大学・理工学部・教授  
研究者番号：90168328

渦岡 良介 (UZUOKA, Ryosuke)  
徳島大学・理工学研究部・教授  
研究者番号：40333306

北原 武嗣 (KITAHARA, Takeshi)  
関東学院大学・理工学部・教授  
研究者番号：00331992

岩本 政巳 (IWAMOTO, Masami)  
名古屋工業大学・工学系研究科・准教授  
研究者番号：60232716

古本 吉倫 (FURUMOTO, Yoshinori)  
長野工業高等専門学校・環境都市工学科・教授  
研究者番号：90303510