

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 3 年 6 月 3 日現在

機関番号：14501

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2020

課題番号：17K06533

研究課題名（和文）大阪平野で励起される表面波による線状土木構造物の耐震評価

研究課題名（英文）Seismic evaluation of linear civil engineering structures by surface waves excited in the Osaka Plain

研究代表者

鎌田 泰子（Kuwata, Yasuko）

神戸大学・工学研究科・准教授

研究者番号：50379335

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,700,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、大阪平野で励起される表面波の震動特性を明らかにするために、大阪市福島区の地震観測点の周辺に3台の地震計を設置し、2017年10月より24時間連続観測を開始した。研究期間中に2018年の大阪府北部の地震や2021年の福島沖の地震において全ての地震計で強震動を観測することができた。大阪府北部の地震では、震源から南西方向に観測点は位置するが、震源方向よりもやや東よりの方向から表面波が到来しており、東側に南北に走る上町断層帯の影響を強く受けていることが明らかになった。さらに、表面波によるひずみは実体波によるひずみとほぼ同程度になっていることがわかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

日本のガスや水道、下水道などの埋設管路の耐震基準を横断的に見れば、地震波動による埋設管の影響評価に用いる地盤ひずみの算出過程において、想定している地震波動は実体波や表面波で統一性がなく、波の伝播速度も指針によって異なる。表面波が励起されやすい平野においては、地震時には表面波による地盤ひずみは無視できないと考えられるが、本研究で行った地震観測によって表面波に起因する地盤ひずみの特徴を踏まえることができた。

研究成果の概要（英文）：In this study, in order to clarify the seismic characteristics of surface waves excited in the Osaka Plain, three seismographs were near the seismograph in Fukushima-ku, Osaka City and continuous observation was started for 24 hours since October 2017. The seismic ground motions were observed with all the seismographs in the 2018 northern Osaka earthquake and the 2021 earthquake off Fukushima. In the earthquake in the northern Osaka Prefecture, the seismographs are located in the southwest direction from the epicenter, but surface waves arrived from a direction slightly east of the epicenter, and are strongly influenced by the Uemachi fault zone running north and south on the east side. Furthermore, it was found that the ground strain due to surface waves is almost the same as the that due to body waves.

研究分野：地震工学

キーワード：大阪平野 地震観測 地盤ひずみ 表面波 埋設管

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

## 1. 研究開始当初の背景

研究開始当初には、以下に挙げる課題が研究背景にあった。

### (1)表面波による地震被害

2007年新潟県中越沖地震の際は、震源から225km離れた関東のある超高層ビルで卓越周期7秒前後の長周期の表面波が大きな後揺れとして到来し、ビルが共振を起こして大きく揺れ、エレベータ内に人が閉じ込められるなどの影響が出た。2004年に紀伊半島南東沖で発生した地震では、大阪平野で周期6~7秒程度の長周期の表面波が卓越し、長い継続時間を持つ長周期の地震動が観測された。将来的に発生が危惧されている南海トラフ巨大地震時には大阪平野内で長周期の表面波が励起することが予想され、表面波が土木構造物に少なからず影響を与える。

### (2)線状構造物の耐震評価の余地

一方向に長く敷設された橋梁や管路などの線状構造物には、その軸方向に沿って地震波が伝播する場合、表面波は実体波に比べて伝播速度が遅いため、ひずみが大きくなる可能性がある。高圧ガス導管の耐震設計ではレイリー波による地盤ひずみ算出方法の理論体系が示されているが、ローカルな地域の地盤構造や振動特性を反映したものにはなっていない。

### (3)大阪平野の震動特性

一般に、群速度が極小（エアリー相）となる波長で表面波が卓越するが、大阪平野内でも基盤深さが異なり、各所で卓越する表面波の周期特性も異なる。とくに、大阪平野には平野の形成上、局所的に基盤構造が入り組んだ地域がある。大阪平野には道路や鉄路、地中配管などの線状土木構造物が多く張り巡らされているため、地震時に励起される表面波の特性を明らかにして、土木構造物との空間的な関係を把握できれば、事前の耐震補強対策だけでなく事後の優先的な被害把握にもつながる。

## 2. 研究の目的

盆地構造を形成している大阪平野では、将来的に発生が危惧されている南海トラフ巨大地震が発生すれば平野内で長周期の表面波が励起され、さらにそれが盆地内に留まり、揺れが長時間継続することが予想される。これらの背景のもと、本研究は、大阪平野で励起される表面波の特性を明らかにして、地震時における表面波による線状土木構造物の地震応答への影響を明らかにすることを目的としている。

## 3. 研究の方法

本研究では、大阪平野で励起される表面波による線状土木構造物の耐震評価を行うために、以下の方法で研究を行う。

- (1) 大阪平野における地震観測点の設置
- (2) 観測記録による表面波の伝播特性の分析
- (3) 大阪平野の地盤ひずみの評価と地中構造物の耐震評価

## 4. 研究成果

### (1)地震観測体制の構築

本研究で対象とする大阪平野は、北側を北摂山地、東側を生駒山地と金剛山地、南側を和泉山脈、西側を大阪湾に囲まれており、北東-南西方向に約55km、北西-南西方向に約28kmのほぼ楕円形をなす低平地である。大阪平野は沖積低地が中心であり、周囲の山地は大阪平野の基盤をなす花崗岩類などから構成されている。

既往研究において地震時に顕著な表面波が確認されていた関西地震観測協議会の地震観測点福島(FKS)の周辺に、3台の地震計を設置して地震観測を開始した。図1にFKS周辺の地震計の設置位置を示す。OSA、OSBはそれぞれ福島小学校、海老江東小学校に設置し、OSCは海老江下水処理場に設置した。こ

これらの設置場所により、それぞれの地震計は、OSA、OSB、FKSで半径約600mの三角形アレイを、OSC、OSB、FKSで半径約700mの三角形アレイを形成し、多方向から入射する波形の分析が可能になった。OSA、OSBは2017年9月から、OSCは2017年10月から観測を開始した。

本研究で使用する地震計は(株)東京測振の速度型地震計CV-910である。検出器はサーボ速度計(VSE-11)で、サンプリング周波数は100Hzである。新たに(株)jaLab製のロガーAK-2を外付けし、GPSによって時刻を同期させた。24時間連続観測している記録は、IT強震計サーバアプリケーションを介して1分間の記録毎にネットワーク経由でサーバに送信され、リアルタイムで観測を確認することができる。



図1 地震計の設置箇所

## (2) 観測記録による表面波の伝播特性の分析

2018年6月18日7時58分、大阪府北部の北緯34.8度、東経135.6度、深さ約13kmを震源とする $M_j6.1$ の地震が発生した。本地震には逆断層型と横ずれ断層型の断層が混在し、複数の断層が連動して活動したものみられる。浅野らによると、断層1(走向 $351^\circ$ 、傾斜 $50^\circ$ )と断層2(走向 $52^\circ$ 、傾斜 $77^\circ$ )の2枚の断層面を仮定した震源過程を推定している。断層1は主に逆断層として破壊し、断層2は主に右横ずれ断層として破壊し、震源付近から南西に向かって破壊が進展する傾向を示している。

地震計を設置後、本地震で地震動が観測され、4箇所の観測点では最大速度が $12\sim 18\text{cm/s}$ で、計測震度は4.3から4.4であった。本震の観測記録を用いて、非定常スペクトル解析を行い、励起される表面波の特徴を整理した。一例として図2は本震のOSAにおけるEW成分の非定常スペクトルを示す。時刻 $t=4.6\text{s}$ のP波到達から短周期成分にコンターを確認できるが、 $t=10\text{s}$ 近くから $t=80\text{s}$ 近くまで周期2秒近くに表面波らしい分布を確認することができた。また、他の3観測点のスペクトルの特徴も類似していた。明瞭な振幅をもつ表面波の継続時間は、70秒程度であった。

本震によって大阪平野で励起された表面波の到来方向の推定を行うために、観測波に対してセンブリンス解析を行い、到来方向及び位相速度を推定した。センブリンス解析は複数の波形のコヒーレンスを示すもので、着目する周波数帯のバンドパスフィルタ波形に対して行う。本研究では、図1の非定常スペクトルの分布から $0.1\sim 0.5\text{Hz}$ のバンドパスフィルタの速度波を用いた。

実体波と表面波がほぼ近い時刻に到来している本地震の地震動においては、NS、EW成分にはそれらが混在し、また表面波中のレイリー波とラブ波の判別も困難である。そこで、まず、UD成分の速度波( $0.1\sim 0.5\text{Hz}$ バンドパスフィルタ)においてセンブリンス解析を行い、実体波到達以降のレイリー波の到来方向から表面波の震動特性を調べた。その結果、P波到達時、S波到達時の位相速度は $3.5\text{km/s}$ から $1.4\text{km/s}$ 程度に分布し、到来方向も $N30\sim 50^\circ E$ になっていた。しかしその後 $0.8\sim 0.7\text{km/s}$ の位相速度で $N72\sim 76^\circ E$ から安定して到来していた。震源から地震計までの方位は $N50\sim 51^\circ E$ にあり、実体波の到来方向と整合的であるが、表面波と考えられる時間帯の到来方向がやや東方向から入射していた。

震源から観測点までの深部地盤構造を参照したところ、その経路には上町断層帯を横断している(図3)。震源方向から入射してきた実体波に対して表面波がやや東よりから到来したのは、表面波が励起されるときに上町断層によって地震動が回折して到達したと考えられる。また、本研究で設置している地震計の地震動は、その東側にある上町断層の影響を強く受けることが考えられる。

さらに、レイリー波のRadical方向として $N74^\circ E$ 方向からの水平波とそれに直交するTransverse方向(ラブ波に相当)の水平波について再度センブリンス解析を行い、先にラブ波が到来し、その後レイリー波が遅れて到来したことを確認した。

## (3) 大阪平野の地盤ひずみの評価と地中構造物の耐震評価

各観測点の測線方向に各観測点での地動速度を時間積分して変位を求め、2点間の変位差を測線距離で除することで測線方向の軸ひずみを算出した。図4は一例として、OSB-FKS測線( $N69^\circ E$ )の軸ひずみを示している。図中のObserved waveは $0.1\text{Hz}$ 以下のローカットフィルタを施したものの、 $0.1\sim 0.5\text{Hz}$  bandpassは表面波を意識して抽出したものである。いずれの図においても $t=9\text{s}$ 付近において、観測波がバンドパス波よりも大きな振幅を示し、これは実体波によるひずみといえる。しかし、それ以降の両者のひずみはほぼ同じであることから、実体波到達以降のひずみは表面波の伝播によって生成されたひずみといえる。これらの結果から、実体波によるひずみの方が全て大きいわけではなく、表面波によるひずみと同じ程度になることがわかった。また、本研究から表面波による地盤ひずみの方が方向によっては大きくなることも示唆された。盆地構造内の場所によって表面波の影響が大きくなる場合も考えられるため、継続した観測、分析が必要といえる。

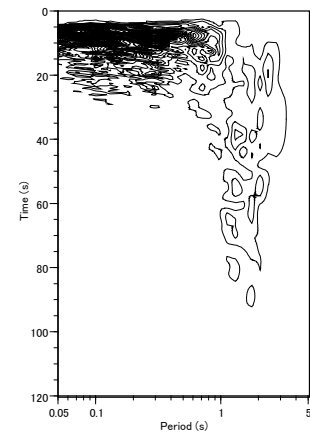


図2 大阪府北部の地震におけるOSAの非定常スペクトル(本震:EW成分)

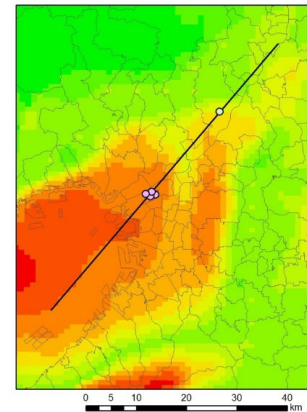


図3  $V_s=2900\text{m/s}$ の地下構造

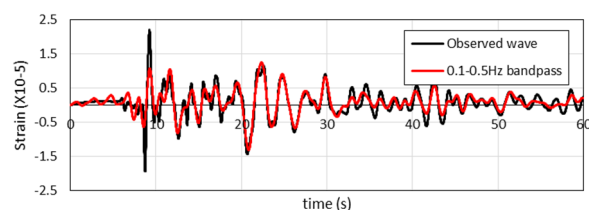


図4 OSB-FKS測線( $N69^\circ E$ )の軸ひずみ

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Kiyono, J., Takahashi, Y., Tobita, T., Kuwata, Y., Goto, H. and Okumura Y.	4. 巻 FS2021-E-0002
2. 論文標題 RECONNAISSANCE REPORT ON THE EARTHQUAKE IN OSAKA-FU HOKUBU ON JUNE 18, 2018	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 JSCE Journal of Disaster FactSheets	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 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 鎌田泰子, 小松秀晃
2. 発表標題 大阪府北部の地震における大阪平野での表面波の震動特性
3. 学会等名 2019年度土木学会関西支部年次学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 鎌田泰子, 水上昌信
2. 発表標題 線状構造物へ作用する地盤ひずみ評価のための大阪平野における表面波の特性分析
3. 学会等名 日本地震工学シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 鎌田泰子, 小松秀晃
2. 発表標題 大阪府北部の地震における大阪平野での表面波の震動特性
3. 学会等名 2019年度土木学会関西支部年次学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 水上昌信、楢田泰子、後藤浩之、福島康宏
2. 発表標題 大阪平野における高密度地震観測システムの構築
3. 学会等名 平成30年度 土木学会関西支部年次学術講演会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 土木学会地震工学委員会	4. 発行年 2019年
2. 出版社 報光社	5. 総ページ数 476
3. 書名 2018年北海道胆振東部地震・大阪府北部の地震 被害調査報告書	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------