津波避難困難時間の算定を目的とした 強震動の評価—山形県酒田市飛島を例として—

山内 政輝¹・秦 吉弥²・鍬田 泰子³・小山 真紀⁴・中嶋 唯貴⁵

¹ 学生会員 大阪大学 大学院工学研究科 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1)

E-mail: myamauchi@civil.eng.osaka-u.ac.jp

² 正会員 大阪大学 大学院工学研究科 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1)

E-mail: hata@civil.eng.osaka-u.ac.jp

³ 正会員 神戸大学 大学院工学研究科 (〒657-8501 兵庫県神戸市灘区六甲台町1)

E-mail: kuwata@kobe-u.ac.jp

⁴ 正会員 岐阜大学 流域圏科学研究センター (〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸1-1)

E-mail: maki_k@gifu-u.ac.jp

⁵ 正会員 北海道大学 大学院工学研究院 (〒060-8628 北海道札幌市北区北13条西8丁目)

E-mail: nakashima@eng.hokudai.ac.jp

山形県酒田市から北西に約40kmの日本海に浮かぶ飛島は、想定地震が発生した際、約五分で巨大津波の来襲が予想されている。そこで本稿では、まず、島内の津波来襲予想地域において常時微動計測を高密度に実施し、得られた記録に基づき地盤震動特性を評価した。次に、評価した地盤震動特性とアスペリティモデルを組合せた強震波形状計算を実施し、強震動作用中の避難困難時間を算定した。最後に、津波来襲時間と避難困難時間の関係性を踏まえて、強震動の作用が津波避難に及ぼす影響について言及した。

Key Words : strong motion, tsunami evacuation, time management, Sea of Japan, Tobishima

1. はじめに

南海トラフ巨大地震の震源域では、震度6強～震度7の非常に大きな強震動の作用が予想¹⁾されている。一方で、震源域近くの沿岸部では、南海トラフ巨大地震の発生後数分で巨大津波の来襲も予想¹⁾されており、上述した強震動の作用が住民等の津波避難に影響を及ぼすことが予想される。この点に関して著者ほか²⁾は、2011年東北地方太平洋沖地震による津波来襲地域での観測地震動の作用が津波避難に及ぼした影響について検討を行うために、強震動作用中の避難困難時間の算定を試みている。また、著者ほか³⁾⁸⁾は、南海トラフ巨大地震の発生によって津波の早期来襲が予想されている静岡県³⁾⁴⁾・和歌山県⁵⁾⁶⁾・高知県⁷⁾・宮崎県⁸⁾の沿岸域を対象として、津波来襲予想地域において強震動を高密度に予測し、強震動の作用が津波避難に及ぼす影響について検討を行っている。さらに、著者ほか⁹⁾は、1993年北海道南西沖地震の巨大津波の早期来襲により甚大な被害が発生した北海道奥尻島青苗地区を対象に本震時に作用した強震動を推定し、推定地震動に基づいた避難困難時間を算定している。

上述した一連の先行研究²⁾⁹⁾では、我が国の太平洋沿岸における津波来襲地域・来襲予想地域を主に対象フィ

ールドとしていること、強震動を対象とした断層モデル¹⁾が既に提案・評価されていることから対象フィールドでの強震動の推定・予測が比較的容易であること、などが大きな特徴として挙げられる。これを言い換えれば、日本海沿岸における津波来襲予想地域を対象とした検討は、これまで十分に行われているとは言い難い。

日本海に浮かぶ有人離島である山形県酒田市飛島(図-1参照)は、その直下に震源域を有する想定地震(以後、飛島直下地震と呼ぶ)が発生した場合、約五分で巨大津波の来襲が予想¹⁰⁾されている。そこで本稿では、国土交通省¹⁰⁾が津波伝播や遡上の計算において採用した特性化震源モデルを強震動予測に援用することで、強震動継続時間を踏まえた避難困難時間に関する定量的な評価を実施し、強震動の作用が津波避難に及ぼす影響について詳細な検討を行った結果を報告する。

2. 断層モデルの構築

図-1に構築した飛島直下地震の断層モデルと飛島の位置関係、および表-1にモデルパラメータの一覧をそれぞれ示す。以下、表-1の上から記載順に、パラメータの設

定根拠について述べる。

まず、巨視的パラメータである断層の走向および傾斜については、日本海における大規模地震に関する調査検討会¹⁰⁾による津波を対象とした断層モデルの形状に関する特性値をそれぞれ採用した。次に、微視的パラメータであるアスペリティに関する諸量(地震モーメント、長さ、幅、ライズタイム)については、飛島に近い日本海域を震源とする歴史地震である1983年日本海中部地震の特性化震源モデル(アスペリティモデル)の値¹¹⁾を採用した。アスペリティと破壊開始点の配置(図-1参照)については、現行の港湾基準¹²⁾を参考にアスペリティの破壊が飛島に向かって進展するような(具体的には、試行錯誤により後述する予測地震動に基づく瞬間計測震度の継続時間が比較的長くなるような)配置を採用し、アスペリティの中心深さは10kmとした。最後に、その他のパラメータ(Q 値(地震基盤上での地震動の減衰を表す値)、密度、せん断波速度、破壊伝播速度)についても、1983年日本

図-1 日本海離島の飛島とその直下地震の断層モデル

図-2 飛島内における常時微動H/Vスペクトルの比較

海中部地震の特性化震源モデル(アスペリティモデル)の値¹¹⁾を採用した。

3. 高密度常時微動計測の実施

飛島の津波来襲予想地域内において避難困難区域を具体的に抽出するためには、避難困難時間と避難所要時間の評価に関する基点は共通とすべきである。地盤震動特性を考慮して避難困難時間を評価するためには、常時微動計測の実施が必要不可欠であることから、微動計測点を共通の基点として採用する。

常時微動計測は、飛島で予想される津波来襲地域(計93地点)¹⁰⁾および島内唯一の既存強震観測点であるJMA飛島(図-3参照)¹³⁾においてそれぞれ実施した。写真-1に常時微動計測状況の一例を示す。計測期間は、2016年9月5～6日の二日間である。計測は主に昼間に実施し、同型の七台の微動計(ともに白山工業(株)製の一体型微動探査兼地震計機器¹⁴⁾)を採用した。計測機器の諸元については、文献14)を参照されたい。計測方向は水平二成分と鉛直成分の計三成分であり、後述する常時微動H/Vスペクトルの計算では、水平二成分の平均をとった。計測時間は、一計測点あたり約30分間の単点計測とした。

常時微動H/Vスペクトルの計算処理方法¹⁵⁾としては、まず、微動の加速度時刻歴に対して0.1Hzのハイ・パス

表-1 設定した断層モデルパラメータの一覧

	Asperity-1	Asperity-2	Asperity-3
Strike (deg.)	200	185	202
Dip (deg.)	45	45	45
Seismic moment (Nm)	1.32×10^{20}	1.32×10^{20}	0.88×10^{20}
Length (km)	17.5	17.5	17.5
Width (km)	17.5	17.5	17.5
Rise time (s)	1.40	1.40	1.40
Partition number	$3 \times 3 \times 3$	$3 \times 3 \times 3$	$3 \times 3 \times 3$
Q value		$114 \times f^{0.92}$	
Density (kg/m ³)		3.1×10^3	
Shear wave velocity (km/s)		3.9	
Rupture velocity (km/s)		3.12

写真-1 飛島での常時微動計測状況の一例

フィルターを施し、雑振動が比較的小さい163.84秒の区間を七区間抽出し、フーリエスペクトルの計算を行い、バンド幅0.05HzのParzen Windowで平滑化した後に、H/Vスペクトルを算出し、七区間の平均をとった。評価振動数の範囲としては、使用した微動計測器の性能¹⁴⁾などを考慮して0.2～10Hzとした。

図-2は、JMA 飛島(図-1 参照)における常時微動 H/V スペクトルと、飛島の津波来襲予想地域内(93 地点)の常時微動 H/V スペクトルを重ね合せたものである。図-2に示すとおり、津波来襲予想地域の H/V スペクトル(周波数ごとの平均値およびその標準偏差の分布)と JMA 飛島における H/V スペクトルの比較において、両者の特徴(ピーク周波数やスペクトル形状など)が良い一致を示している。すなわちこれは、JMA 飛島における地盤震動特性が津波来襲予想地域のほぼ全域の地盤震動特性として代表できる可能性が高いことを示唆するものである。

図-3は、常時微動H/Vスペクトル(図-2参照)のピーク周波数を地形図上にプロットしたものである。図-3に示すとおり、常時微動H/Vスペクトルの差異(図-2参照)に起因して、ピーク周波数の分布においても一定のパラツキが確認できる。図-4、図-5、図-6は、飛島を対象とした産総研地質図¹⁶⁾、山形表層地質図¹⁷⁾、地形区分図¹⁷⁾で

ある。図-3に対して図-4・図-5・図-6を比較すると、評価した常時微動H/Vスペクトルのピーク周波数の差異に対する地形や地質の違いについて明らかな関係性を読み取ることはできない。

よって本稿では、JMA飛島におけるサイト増幅特性(地震基盤～地表：図-7参照)¹⁸⁾とサイト位相特性に基づいて飛島での強震動予測を実施することとした。ここに、サイト位相特性については、JMA飛島での観測記録の中で、飛島直下地震の震源域¹⁰⁾の比較的近くで2011年3月12日4時47分に発生した秋田県沖を震源とする気象庁マグニチュード6.4の地震(Phase-EQ：図-1参照)によってJMA飛島で得られた観測地震動(図-8参照)を採用した。

4. 強震動予測の手法

本稿では、構築した飛島直下地震の断層モデル(2.参照)と経験的サイト増幅・位相特性を考慮した強震波形計算手法¹⁹⁾の組合せに基づき強震動を推定した。当該計算手法¹⁸⁾では式(1)により統計的グリーン関数を生成する。

$$A(f) = S(f) \cdot P(f) \cdot G(f) \cdot \frac{O(f)}{|O(f)|_p} \quad (1)$$

図-3 常時微動 H/V スペクトルのピーク周波数の分布

図-5 山形応用地質研究会¹⁷⁾による飛島の地質区分

図-4 産業技術総合研究所¹⁶⁾による飛島の地質分布

図-6 山形応用地質研究会¹⁷⁾による飛島の地形区分

ここに、 $A(f)$ は地表における統計的グリーン関数のフーリエ変換で複素数、 $S(f)$ は中小地震の震源特性²⁰⁾で実数、 $P(f)$ は伝播経路特性²⁰⁾で実数、 $G(f)$ はサイト増幅特性(図-7参照)で実数、 $O(f)$ は中小地震観測記録(図-8参照)のフーリエ変換で複素数、 $|O(f)|_p$ はその絶対値に対してバンド幅0.05HzのParzen Windowを適用したものである。

式(1)からわかるように、本手法では、統計的グリーン関数のフーリエ振幅は震源特性・伝播経路特性・サイト特性の積として求め、統計的グリーン関数のフーリエ位相としては現地で得られた中小地震記録のフーリエ位相を用いる。式(1)をフーリエ逆変換し、経験的グリーン関数法と同様の重ね合わせを行うことで、大地震による波形が求まる。なお、Parzen Window(添字 p)は因果性を満足する地震波を生成する目的で用いられている¹⁹⁾。

なお、図-1に示すように、飛島は、想定震源域の極近傍(直上)に位置していることから、想定地震時に地盤が非線形挙動を示す可能性が高いと考えられる。そこで本稿では、表層地盤の非線形挙動の効果を考慮してグリーン関数を補正する方法²¹⁾を採用し、S波速度の低下率を表すパラメータ v_1 (非線形性の影響が大きいほど低下)と堆積層における平均的な減衰定数の増分を表すパラメータ v_2 (非線形性の影響が大きいほど増加)をそれぞれ設定した。具体的には、JMA飛島とK-NETいわきのサイト増幅特性¹⁸⁾²²⁾が比較的類似していることから(図-7参照)、2011年東北地方太平洋沖地震によるK-NETいわきでの実績値($v_1=0.90, v_2=0.01$)²¹⁾を採用した。

5. 予測結果とその応用

図-9(a),(b)に飛島直下地震時の飛島(JMA飛島)における推定地震動(水平動)の加速度時刻歴を示す。一方で、図-9(c)は、飛島(JMA飛島)における強震動作用中の避難困難時間である。避難困難時間は、予測地震動の加速度波形(図-9(a),(b)参照)において瞬間計測震度(水平二成分合成)²³⁾の時刻歴を計算し(図-9(c)参照)、先行研究²⁴⁾による知見を参考に、瞬間計測震度が4.0を下回るまでの連続時間とした。図-9(c)に示すように、想定地震時

における飛島(JMA飛島)での避難困難時間は、136sと算定され、飛島では強震動の作用によりおよそ二分強にわたって住民等が避難行動に移ることができない可能性が高いことが読み取れる。すなわちこれは、上述したとおり想定地震による飛島への津波来襲時間は約五分と予想¹⁰⁾されていることから、そのうち約半分は津波避難困難時間によって占められる、言い換えれば、住民等が避難のために本来持ち合わせている時間の約半分が強震動の作用によって失われることを示唆するものである。

図-10は、常時微動計測地点(図-3参照)から計測地点最近に位置する避難地点(高台等の既存施設)までの避難所要時間の分布である。避難所要時間は、ウォーキング実験(図-10 枠内写真参照)²⁵⁾を実施し、得られた結果に基づいて評価した。ここに、避難困難時間の経過後すぐに避難を開始する確率は低いものの、その確率の推定は現状困難であるため、本稿では先行研究の知見²⁶⁾に基づき避難所要時間に避難開始時間を含めていない。ウォーキング実験の実施内容については文献 25)を参照されたい。なお、今後の課題の一つとして、年齢差や障害者への配慮等、避難パターンのバリエーションを追加していく必要があると考えている。津波来襲時間の五分と津波避難困難時間の二分強を考慮して(津波来襲時間から避難困難時間を差し引いて)、図-10において避難所要時

図-7 JMA飛島¹⁸⁾とK-NETいわき²²⁾におけるサイト増幅特性

図-8 サイト位相特性の評価に用いたJMA飛島での観測地震動(2011/03/12 04:47 M_w 6.4)の加速度時刻歴

図-9 飛島直下地震による飛島での推定地震動(同図(a),(b))と瞬間計測震度の時刻歴に基づく避難困難時間の評価(同図(c))

図-10 ウォーキング実験に基づく避難所要時間の分布

間が三分以上(オレンジ色・赤色)の地域は、主に海岸に近い地域を中心に比較的広範囲に及んでいるのが確認ができ、これらの地域を中心に今後何らかの津波避難施設(津波避難タワーなど)を新設する必要性が示唆される。

6. まとめ

本研究では、日本海に浮かぶ山形県酒田市の飛島を対象フィールドとし、飛島直下の想定地震が発生した場合に、強震動の作用が津波避難に及ぼす影響について常時微動計測結果などに基づいて検討を行った。その結果、飛島における津波来襲時間は約五分と予想されているのに対して、飛島(JMA飛島)における強震動作用中の避難困難時間は136s(二分強)と算定され、約半分が津波避難

困難時間によって占められる、言い換えれば、住民等が避難のために本来持ち合わせている時間の約半分が強震動の作用で失われる可能性が高いことが明らかとなった。

今後は、日本海に浮かぶ他の離島に対しても同様のアプローチを適用していきたいと考えている。

謝辞：常時微動計測の実施にあたっては、飛島の住民の皆様などにご多大のお世話になりました。本研究の遂行にあたり、公益財団法人鹿島学術振興財団2015・2016年度研究助成「地域特性を考慮した津波避難困難区域の抽出～強震動予測と歩行実験によるハイブリッド評価～」の一部を使用しました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 南海トラフの巨大地震モデル検討会：南海トラフの巨大地震モデル検討会(第二次報告)，内閣府防災情報ホームページ，2012。(最終閲覧日：2017年4月27日)
- 2) 湊文博，秦吉弥，藤木昂，山田雅行，鉦田泰子，小山真紀，中嶋唯貴，常田賢一：津波避難困難時間に影響を及ぼす強震動の周波数帯域に関する基礎的検討，第36回地震工学研究発表会講演論文集，土木学会，Paper No.923, 2016.
- 3) 秦吉弥，湊文博，山田雅行，鉦田泰子，小山真紀，中嶋唯貴，常田賢一：強震動作用中の津波避難困難時間に関する評価精度とその向上策—南海トラフ巨大地震における駿河湾沿岸域を対象として—，構造工学論文集，土木学会，Vol.62A, pp.259-272, 2016.
- 4) 秦吉弥，湊文博，常田賢一，青木伸一，鉦田泰子，小山真紀：南海トラフ巨大地震における静岡県沿岸域での推定地震動の作用が津波避難に及ぼす影響，土木学会論文集B3，Vol.72, No.2, pp.I_1-6, 2016.
- 5) 湊文博，秦吉弥，山田雅行，常田賢一，鉦田泰子，

- 魚谷真基：高密度常時微動計測に基づく和歌山県串本町における南海トラフ巨大地震の強震動評価と津波避難に及ぼす影響，土木学会論文集 A1，Vol.71，No.4，pp.I_123-135，2015.
- 6) 湊文博，秦吉弥，常田賢一，鉦田泰子，小山真紀，植田裕也：高密度常時微動計測・臨時地震観測に基づく南海トラフ巨大地震における和歌山県広川町での津波避難不可能時間算出のための強震動評価，土木学会論文集 A1，Vol.72，No.4，pp.I_68-81，2016.
 - 7) 秦吉弥，中嶋唯貴，湊文博，鉦田泰子，小山真紀，常田賢一：高密度臨時地震観測に基づく南海トラフ巨大地震における高知県南国市津波来襲予想地域での強震動の予測，第 36 回地震工学研究発表会講演論文集，土木学会，Paper No.920，2016.
 - 8) 湊文博，秦吉弥，村上啓介，山田雅行，鉦田泰子，小山真紀，中嶋唯貴，常田賢一：高密度臨時地震観測に基づく南海トラフ巨大地震における宮崎市沿岸部での津波避難困難時間算出のための強震動予測，地域安全学会論文集，No.29，pp.53-62，2016.
 - 9) 湊文博，秦吉弥，山田雅行，鉦田泰子，小山真紀，中嶋唯貴，常田賢一：高密度常時微動計測に基づく 1993 年北海道南西沖地震における奥尻島青苗地区での強震動と避難不可能時間の評価，土木学会論文集 A1，Vol.72，No.4，pp.I_884-894，2016.
 - 10) 国土交通省：日本海における大規模地震に関する調査検討会報告書，国土交通省ホームページ，43p.，2014. http://www.mlit.go.jp/river/shinngikai_blog/daikibojishinc-housa/ (最終閲覧日：2017 年 4 月 27 日)
 - 11) 野津厚：1983 年日本海中部地震(M7.7)の特性化震源モデル，(国研)海上・港湾・航空技術研究所港湾空港技術研究所地震防災研究領域ホームページ，2015. (最終閲覧日：2017 年 4 月 27 日)
 - 12) (公社)日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説[上巻]，国土交通省港湾局，pp.336-341，2007.
 - 13) Nishimae, Y.: Observation of seismic intensity and strong ground motion by Japan Meteorological Agency and local governments in Japan, *Jour. of Japan Association for Earthquake Engineering*, Vol.4, No.3, pp.75-78, 2004.
 - 14) 先名重樹，安達繁樹，安藤浩，荒木恒彦，飯澤清典，藤原広行：微動探査観測システムの開発，第 115 回物理探査学会学術講演会論文集，pp.227-229，2006.
 - 15) 秦吉弥，湊文博，山田雅行，常田賢一，魚谷真基：和歌山県串本町における高密度常時微動計測，物理探査，Vol.68，No.1，pp.83-90，2015.
 - 16) (国研)産業技術総合研究所：地質図表示システム(地質図 Navi)，地質調査総合センターホームページ，2013. (最終閲覧日：2017 年 4 月 27 日)
 - 17) 長澤一雄，大場總，阿部龍市：飛島の地質と地形について，山形応用地質，Vol.27，pp.64-74，2007.
 - 18) 秦吉弥，山内政輝，鉦田泰子，小山真紀，中嶋唯貴，大川雄太郎，湊文博，常田賢一：離島の津波来襲予想地域を対象としたサイト増幅特性の評価に関する試み，日本地震工学会第 12 回年次大会梗概集，Paper No.P4-38，2016.
 - 19) 野津厚，長尾毅，山田雅行：経験的サイト増幅・位相特性を考慮した強震動評価手法の改良—因果性を満足する地震波の生成—，土木学会論文集 A，Vol.65，No.3，pp.808-813，2009.
 - 20) Boore, D. M.: Stochastic simulation of high-frequency ground motions based on seismological models of the radiated spectra, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.73, No.6A, pp.1865-1894, 1983.
 - 21) 若井淳，野津厚：2011 年東北地方太平洋沖地震の際に見られた表層地盤の非線形挙動の概略的傾向，港湾空港技術研究所資料，No.1272，2013.
 - 22) 野津厚，長尾毅，山田雅行：スペクトルインバージョンに基づく全国の強震観測地点におけるサイト増幅特性とこれを利用した強震動評価事例，日本地震工学会論文集，Vol.7，No.2，pp.215-234，2007.
 - 23) Kuwata, Y. and Takada, S.: Instantaneous instrumental seismic intensity and evacuation, *Journal of Natural Disaster Science*, Vol.24, No.1, pp.35-42, 2002.
 - 24) 鉦田泰子，齊藤栄：瞬間計測震度を用いた揺れ最中の避難行動可能時間の定量化，日本地震工学会論文集，Vol.10，No.5，pp.52-65，2010.
 - 25) 湊文博，秦吉弥，常田賢一，鉦田泰子，山田雅行，魚谷真基：ウォーキング実験に基づく津波避難困難地域の評価—和歌山県串本町を例として—，地域安全学会梗概集，No.35，pp.17-20，2014.
 - 26) 湊文博，秦吉弥，中嶋唯貴，小山真紀，鉦田泰子，山田雅行，常田賢一：避難余裕時間に基づく津波避難困難区域の抽出手法に関する適用性の評価—1993 年北海道南西沖地震による奥尻島青苗地区を例として—，土木学会論文集 B3，Vol.72，No.2，pp.I_509-514，2016.

(2017.2.2 受付)

PREDICTION OF STRONG MOTION AND DIFFICULT TIME FOR TSUNAMI EVACUATION IN TOBISHIMA, SAKATA CITY, JAPAN

Masaki YAMAUCHI, Yoshiya HATA, Yasuko KUWATA,
Maki KOYAMA and Tadayoshi NAKASHIMA

During a large scale scenario earthquake, huge tsunami with early travel time is struck in Tobishima, Sakata City, Japan. In this study, ground shaking characteristics in the tsunami attack area were evaluated using microtremor measurement with high density. The strong motions in Tobishima were then estimated based on the asperity models considering the ground shaking characteristics. Furthermore, the difficult time for tsunami evacuation during the earthquake was calculated using instantaneous instrumental seismic intensity. Finally, we discussed the influence of the strong motion on the tsunami evacuation based on the relationship between the travel time and the difficult time.