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

湊 文博¹・秦 吉弥²・山田 雅行³・楢田 泰子⁴・
小山 真紀⁵・中嶋 唯貴⁶・常田 賢一⁷

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: fminato@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 (株)ニュージェック 技術開発グループ (〒531-0074 大阪府大阪市北区本庄東2-3-20)

E-mail: yamadams@newjec.co.jp

⁴ 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

⁵ 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

⁶ 北海道大学 大学院工学研究院 (〒060-8628 札幌市北区北13条西8)

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

⁷ フェロー会員 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: tokida@civil.eng.osaka-u.ac.jp

本稿では、1993年北海道南西沖地震における青苗地区での強震動を推定し、強震動作用中の避難不可能時間を評価した結果について報告する。具体的には、青苗地区において高密度常時微動計測を行い、得られた結果に基づき同地区内の既存強震観測点(K-NET青苗)などにおける地盤構造を評価した。そして、K-NET青苗(沿岸域の低地)およびJMA松江(山域の高地)を対象地点としてサイト増幅・位相特性を評価した。次に、経験的サイト増幅・位相特性を用いた強震動評価手法と特性化震源モデルの組合せを用いて、本震時にK-NET青苗およびJMA松江に作用した地震動を推定した。最後に、推定地震動による瞬間計測震度の時刻歴を計算することで、K-NET青苗およびJMA松江での強震動作用中の避難困難時間を比較検討した。

Key Words : strong motion, tsunami evacuation, instantaneous instrumental seismic intensity, microtremor measurement, observation station, site effect

1. はじめに

2011年東北地方太平洋沖地震($M_w9.0$)の発生を受け、南海トラフにおいても、 $M_w9.0$ 程度の巨大地震(以後、南海トラフ巨大地震と呼ぶ)を想定した強震動の予測が内閣府¹⁾により行われている。その予測結果によれば、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されている。一方で、内閣府²⁾によれば、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が予想されており、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。

この点に関して秦ほか^{3,4)}は、2011年東北地方太平洋沖地震の強震動の作用によって、南三陸町志津川や宮古市田老の街地(津波来襲域)に存在していた構造物が、巨大津波来襲前の強震動の作用によって何らかの損傷を被っていた可能性を示唆している。さらに著者ほか^{5,6)}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る和歌山県串本町を対象として、津波来襲予想地域において強震動の高密度予測を行い、得られた予測地震動に基づいて瞬間計測震度^{7,8)}を算定し、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。

津波避難困難地域(津波到達時間までに津波浸水区域から高台等の安全な場所に避難することが困難な地域)

の設定^{9,10,11)}の観点によれば、南海トラフ巨大地震では地震発生後数分で巨大津波の来襲が予想されている(津波到達時間が非常に短い)のに対して、2011年東北地方太平洋沖地震では地震発生後に沿岸域に津波が到達するまで数十分程度を要している(津波到達時間が比較的長い)ため、南海トラフ巨大地震を対象とした防災・減災対策に2011年東北地方太平洋沖地震の実績を安易に転用することはできない。一方で、我が国で近年発生した大規模地震の中で地震発生後に津波の早期来襲が確認されている地震の一つとして、1993年北海道南西沖地震が挙げられる。1993年北海道南西沖地震では、震源域に近い奥尻島を中心に津波などによる甚大な被害が発生し、その中でも奥尻島南端部に位置する奥尻町青苗(以後、青苗地区と呼ぶ：図-1参照)では、本震発生後約5分で巨大津波(波高10m程度)が来襲し、奥尻島の中でも特に甚大な被害が報告^{12,13)}されている。

そこで本稿では、1993年北海道南西沖地震における青苗地区での強震動を推定し、強震動作用中の避難不可能時間⁹⁾を評価した結果について報告する。具体的には、まず、青苗地区において高密度常時微動計測を行い、K-NET青苗¹⁴⁾における地盤構造が同地区内における沿岸域(嵩上げ前の低地)の地盤構造と類似している可能性が高いこと、JMA松江¹⁵⁾における地盤震動特性が同地区内における山域(高地)の地盤震動特性と類似していること、をそれぞれ確認した。そして、K-NET青苗とJMA松江を対象地点としてサイト増幅・位相特性を評価した。次に、経験的サイト増幅・位相特性を用いた強震動評価手法^{16,17)}と1993年北海道南西沖地震の特性化震源モデル¹⁸⁾の組合せを用いて、本震時にK-NET青苗(沿岸域の低地)およびJMA松江(山域の高地)に作用した地震動を推定した。最後に、推定地震動による瞬間計測震度の時刻歴を計算することで、K-NET青苗およびJMA松江での強震動作用

中の避難不可能時間を比較検討した。

2. 高密度常時微動計測

(1) 常時微動計測の実施

常時微動計測は、青苗地区における低地(津波来襲地域)153地点および高地(津波非来襲地域)72地点の計225地点(図-2参照)において実施した。写真-1に常時微動計測状況の一例を示す。計測期間は、2015年9月3～8日の計6日間である。計測は主に昼間に実施し、同型の6台の微動計(6台ともに白山工業(株)製の一体型微動探査兼地震計機器¹⁹⁾)を採用した。計測機器の諸元については、文献¹⁹⁾を参照されたい。計測方向は水平2成分と鉛直成分の計3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2成分の平均をとった。計測時間は、1計測点あたり約30分間の単点計測とした。

(2) H/Vスペクトルの評価

常時微動H/Vスペクトルの計算処理方法²⁰⁾としては、

図-2 青苗地区における常時微動計測地点の分布

図-1 1993年北海道南西沖地震の断層モデル¹⁸⁾と青苗地区

写真-1 青苗地区での常時微動計測状況の一例

まず、微動の加速度時刻歴に対して0.1Hzのハイ・パスフィルターを施し、雑振動が比較的小さい163.84秒の区間を7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、7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¹⁹⁾などを考慮して0.2~10Hzとした。

図-3および図-4は、青苗地区に設けた72地点(高地)および153地点(低地)における常時微動H/Vスペクトルをそれぞれ重ね合わせたものである。図-3に示すとおり、高地全体のH/VスペクトルとJMA松江(図-5参照)での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)が非常に良い一致を示していることから、JMA松江と青苗地区(高地)における地盤震動特性が類似している可能性が高いことが示唆される。一方で、図-4に示すとおり、K-NET青苗(津波来襲地域内(本稿での低地内)に位置する一地点：図-5参照)におけるH/Vス

ペクトルに対して、低地全体(計153地点)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)を比較すると、ピーク周波数やスペクトル形状などの特徴が明らかに異なっていることが読み取れる。また、図-3と図-4の比較では、低地と高地におけるH/Vスペクトル(周波数ごとの平均値の分布)に着目すると、0.2~10Hzの周波数帯域における全体的なスペクトル形状にそれほど大きな差異は見受けられないものの、低地ではスペクトル形状が比較的滑らか(ピーク周波数の読み取りがやや困難)であるのに対し、高地では7~8Hz付近に明らかなピーク周波数が確認できることから、低地と高地では地盤構造(主に工学的基盤以浅の表層地盤の特性)が異なっ

図-3 常時微動H/Vスペクトルの比較 (高地)

図-4 常時微動H/Vスペクトルの比較 (低地)

図-5 奥尻島青苗地区の既存強震観測点

図-6 常時微動H/Vスペクトルのピーク周波数の分布

いるものと推察できる。

図-6は、常時微動H/Vスペクトル(図-3および図-4参照)のピーク周波数を地形図上にプロットしたものである。なお、常時微動H/Vスペクトル比の横軸が対数軸表示となっているため(図-3および図-4参照), 1~10Hzを対数軸上で9等分したものを色分け表示の境界値として採用している。図-6に示すとおり、低地と高地における全体的なピーク周波数の分布についても明らかな違いは確認できない。なお、0.2~10Hzの周波数帯域におけるH/Vスペクトルのピーク値の分布においても同様に、低地と高地において明らかな違いを確認することはできな

かったことを付記しておく。一方で、高地の72地点、低地の153地点の中でもH/Vスペクトルのバラツキが比較的大きいことから、同じ高地内もしくは同じ低地内においてもH/Vスペクトルの特徴に応じたゾーニング(例えば、DGS値の採用²¹⁾²²⁾²³⁾など)の可能性が残されていることを付記しておく。

図-7~図-12は、(イ)旧地形図(1896年)、(ロ)旧地形図(1990年)、(ハ)現地形図²⁴⁾、(ニ)上空写真(本震直後)²⁵⁾、(ホ)上空写真(現在)、(ヘ)産総研地質図²⁶⁾を青苗地区に対して示したものである。図-6に対して図-7~図-12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

図-7 旧地形図 (1896年)

図-8 旧地形図 (1990年)

図-9 現地形図²¹⁾

図-10 上空写真 (本震直後)²²⁾

図-11 上空写真 (現在)

図-12 産総研地質図²³⁾

波数に対する土地利用状況の変化および地形改変状況 (図-7, 図-8, 図-9参照), 津波来襲・未来襲の実績 (図-10および図-11参照), 地質の違い (図-12参照) について,

図-13 K-NET青苗 (津波来襲地域・非嵩上げ区域)における計測H/Vスペクトルと理論H/Vスペクトルの比較

嵩上げ前 (K-NET青苗)

嵩上げ後

図-14 青苗地区における嵩上げ前後の表層地盤モデル

明らかな関係性を読み取ることはできない。

低地と高地において常時微動H/Vスペクトルの特性に明瞭な差異が表れていない要因の一つとして, 低地 (津波来襲地域) では6m程度の改良土による表層地盤の嵩上げが本震後に行われており²⁷⁾, 嵩上げされていない低地箇所 (K-NET青苗付近) 以外は高地と低地において常時微動H/Vスペクトルの特性に明瞭な差異が見受けられないこと (図-6参照), および嵩上げされていない低地箇所に位置するK-NET青苗ではピーク周波数が局所的に低下する傾向が確認できること (図-4参照), などを考慮すれば, 当該嵩上げが低地における常時微動H/Vスペクトルの特性 (ピーク周波数やスペクトル形状など) に大きな影響を及ぼしている可能性が示唆される。そこで, 図-6において, 低地 (津波来襲地域) における嵩上げ区域と非嵩上げ区域における常時微動H/Vスペクトルのピーク周波数に着目すると, 嵩上げ区域に対して非嵩上げ区域 (K-NET青苗周辺) では, ピーク周波数が明らかに低周波側に分

図-15 青苗地区 (津波来襲地域・嵩上げ区域)における計測H/Vスペクトル (平均±標準偏差) と理論H/Vスペクトルの比較

図-16 青苗地区 (津波来襲地域・嵩上げ区域)における代表7地点での計測H/Vスペクトルと理論H/Vスペクトルの比較

布している。

(3) 地盤構造モデルの評価

図-13は、K-NET青苗で得られた常時微動H/Vスペクトル(図-4参照)に対して、K-NET青苗における一次元地盤モデル(図-14(左)参照)に基づく理論H/Vスペクトル²⁸⁾を重ね合わせたものである。ここに、理論H/Vスペクトルは、基本モードのレイリー波の楕円率に基づいており、高次モードやラブ波の寄与については考慮していない。K-NET青苗の一次元地盤モデルは、当該地点において行われた20m以浅を対象とした地盤調査結果²⁹⁾に基づいて作成した。20m以浅の地盤情報については、K-NET青苗に隣接する公共施設での地盤調査結果を転用した。図-13に示すとおり、計測H/Vスペクトルと理論H/Vスペクトルを比較すると、ピーク周波数よりも高周波数側では再現性が若干低下しているものの、ピーク周波数付近ならびにピーク周波数よりも低周波数側では、両者が比較的良好一致を示している。これは、設定したK-NET青苗における工学的基盤以浅の地盤構造モデル(図-13(左)参照)に一定の適用性があることを示唆するものである。

図-15は、適用性を確認したK-NET青苗における一次

図-17 奥尻島青苗地区の既存強震観測点における地質状況²⁹⁾

元地盤モデルに対して、6mの改良土による嵩上げを考慮した地盤構造モデル(図-14(右)参照)に基づいて理論

表-1 特性化震源モデルの断層モデルパラメータの一覧

Parameters	Asperity-1	Asperity-2
Strike (deg.)	200	160
Dip (deg.)	30	60
Seismic moment (Nm)	1.0×10^{19}	6.0×10^{19}
Length (km)	8.0	16.0
Width (km)	8.0	16.0
Rise time (sec)	0.6	1.3
Partition number	$4 \times 4 \times 4$	$4 \times 4 \times 4$
Source location/depth	N42.782, E139.180 / 35km	
Q value	$Q = 114 f^{0.92}$	
Density (kg/m ³)	3.1×10^3	
Shear wave velocity (km/s)	3.9	
Rupture velocity (km/s)	3.2

図-18 サイト増幅特性(地震基盤～地表)の比較

図-19 フーリエスペクトル比(JMA松江/K-NET青苗)の比較

H/Vスペクトルを計算した結果である。図-15に示すように、低地(主に嵩上げ区域)における計測H/Vスペクトルの平均±標準偏差の範囲内に理論H/Vスペクトルが概ね一致していることが読み取れる。さらに、図-16に示すように、低地における嵩上げ考慮の理論H/Vスペクトルに対して、低地の代表点(スペクトルの特性が比較的近い計測点)における計測H/Vスペクトルが比較的良い一致を示していることが確認できる。

これらは、嵩上げを考慮した地盤構造モデル(図-14(右)参照)が一定の適用性を有している可能性だけでなく、K-NET青苗における地盤構造モデル(図-14(左)参照)が本震前における低地全体(青苗地区の津波来襲地域全体)の地盤特性として代表できる可能性も高いことを同時に示唆するものである。

3. サイト特性の評価

2.(2)および2.(3)で得られた知見に基づき、青苗地区の低地の津波来襲地域(沿岸域)における地盤震動特性を代表している可能性が高いK-NET青苗、および青苗地区の高地の津波来襲地域(山域)における地盤震動特性と非常に高い類似性を有するJMA松江をそれぞれ選定し、両観測点でのサイト増幅・位相特性を評価した。

図-5および図-17に青苗地区における上空写真および地質図²⁶⁾をK-NET青苗・JMA松江の位置情報とともに示

す。図-5に示すように、K-NET青苗は沿岸域の低地に設置されているのに対し、JMA松江は山域の高地に設置されている。強震観測点の設置地域に起因して、図-17に示すように地質状況も異なっていることから、両観測点間での地盤震動特性の差異が予測される。

図-18は、K-NET青苗におけるサイト増幅特性³⁰⁾とJMA松江におけるサイト増幅特性(ともに地震基盤～地表)を比較したものである。JMA松江におけるサイト増幅特性は、JMA松江とK-NET青苗で同時に得られた中小地震観測記録を対象に、両地点の距離の違いによる補正³¹⁾³²⁾を考慮した水平二成分合成のフーリエスペクトルの比率(JMA松江/K-NET青苗：図-19参照)を計算し、この比率をK-NET青苗における既存のサイト増幅特性³⁰⁾に掛け合わせることによって評価³³⁾した。図-18に示すとおり、評価対象とする周波数帯域(0.2～10Hz)においてK-NET青苗におけるサイト増幅特性がJMA松江におけるサイト増幅特性を大幅かつ全周波数帯で上回っており、1993年北海道南西沖地震時に沿岸域の低地(K-NET青苗)に作用した地震動は、山域の高地(JMA松江)に作用した地震動よりも非常に大きかったことが示唆される。

図-20は、北海道南西沖を震源とする小地震(2013/12/25 02:12 M_{4.4}：図-1参照)におけるK-NET青苗とJMA松江での観測地震動の加速度時刻歴を比較したものである。ここに、当該小地震を後述するサイト位相特性の評価地震として採用した理由の一つとしては、本震と当該小地震のサイト位相特性がJMA寿都¹⁵⁾において比較的類似していること(サイト位相特性の類似性を評価する手法³⁴⁾を用いて確認した結果)が挙げられる。図-20に示すとおり、K-NET青苗とJMA松江では震源からの距離がほぼ同等であるにもかかわらず(図-1および図-5参照)、サイト増幅特性の差異(図-18参照)などに起因して、JMA松江よりもK-NET青苗のほうが加速度振幅が大きく、地震動の継続時間も長くなっている。さらに、サイト増幅特性とサイト位相特性の相関性³⁵⁾により、上述した両観測点間におけるサイト増幅特性の違い(図-18参照)に関連して、サイト位相特性(波形形状：図-20参照)にも有意な差異が確認できる。

4. 青苗地区での強震動の評価

1993年北海道南西沖地震の当時、奥尻島には強震観測点が設置されていなかったため、本震観測記録に対して補正を施す方法³⁶⁾によって、青苗地区における本震時の地震動を推定することは困難である。そこで本稿では、既往の研究成果³⁷⁾⁴⁰⁾をもとに構築された野津¹⁸⁾による1993年北海道南西沖地震の特性化震源モデル(アスペリ

図-20 サイト位相特性(北海道南西沖の小地震)の比較

図-21 1993年北海道南西沖地震による推定地震動と瞬間計測震度の時刻歴に基づく避難不可能時間の評価(K-NET青苗)

ティモデル)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^{16,17)}の組合せを用いて、青苗地区における本震時の地震動を推定した。

図-1に特性化震源モデル(アスペリティモデル)と青苗地区の位置関係、表-1に震源モデルパラメータの一覧を示す。このモデルは、港湾地域の強震観測点⁴⁾である小樽-G、室蘭-G、函館-Fでの本震観測記録の速度波形およびフーリエ振幅スペクトルを一定の精度で評価可能なモデルである。

一方で、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^{16,17)}では、まず式(1)により統計的グリーン関数を生成する。

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

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³⁾で実数、 $P(f)$ は伝播経路特性³²⁾で実数、 $G(f)$ はサイト増幅特性(図-18参照)で実数、 $O(f)$ は青苗地区での小地震観測記録(2013年12月25日に発生した北海道南西沖を震源とする地震($M_j 4.4$: 図-1参照)によるK-NET青苗もしくはJMA松江での観測記録(図-20参照))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¹⁷⁾。

図-21(a),(b)および図-22(a),(b)は、1993年北海道南西沖地震におけるK-NET青苗およびJMA松江での推定地震動(水平動)の加速度時刻歴である。図-21(a),(b)および図-22(a),(b)に示すように、両観測点間におけるサイト増幅特性の差異(図-18参照)およびサイト位相特性の差異(図-20参照)に起因して、K-NET青苗のほうがJMA松江よりも加速度振幅も大きく、地震動の継続時間も長くなっている。

図-21(c)および図-22(c)は、K-NET青苗およびJMA松江における本震時の避難不可能時間である。避難不可能時間は、予測地震動の加速度波形(図-21(a),(b)および図-22(a),(b)参照)において瞬間計測震度(水平2成分合成)⁷⁾の時刻歴を計算し(図-21(c)および図-22(c)参照)、先行研究⁸⁾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。ここに、上述した経験的サイト増幅・位相特性を考慮した強震波形計算手法^{16,17)}に基づいた統計的グリーン関数法による予測地震動には、位相波(図-20参照)の時刻遅れが入力されているため、本来、震源(破壊開始点: 図-1参照)からの絶対時刻とはならない。なお、避難不可能時間の原点として、緊急地震速報等による覚知時間あるいは初期微動の覚知時間などを採

図-22 1993年北海道南西沖地震による推定地震動と瞬間計測震度の時刻歴に基づく避難不可能時間の評価(JMA松江)

用することも考えられるが、既往の研究成果⁴²⁾によれば、緊急地震速報や初期微動によって避難を開始するとは考えにくい。そこで本検討では、破壊開始点に最も近い陸地(奥尻島内の稲穂地区)において同じサイト位相波を用いて予測した地震動との相対時間を予測地震動の時刻歴(図-21および図-22の時間軸)として採用⁵⁾した。

図-21(c)および図-22(c)に示すように、JMA松江(山城)では避難不可能時間が極端に短くなっているのに対し、K-NET青苗(沿岸域)では避難不可能時間が比較的長くなっており、両観測点間での避難不可能時間の差異が顕著に表れている。具体的には、津波来襲の恐れがない山城に位置するJMA松江よりも、1993年北海道南西沖地震(および1983年日本海中部地震)による津波来襲地域(沿岸域)に位置するK-NET青苗のほうが、強震動作用中の避難不可能時間が30秒程度長くなっている。すなわちこれは、津波避難困難地域の設定(1.参照)などにおいて、サイト特性(地盤震動特性)の差異に起因した強震動作用中の避難不可能時間の違いを考慮する必要性が高いことを示唆するものである。

5. まとめ

本稿では、高密度常時微動計測の結果などに基づいて、1993年北海道南西沖地震において青苗地区に作用した地震動を推定した。得られた知見を以下に示す。

- (1) 青苗地区における高密度常時微動計測の結果によれば、低地(津波来襲地域)と高地(津波非来襲地域)では常時微動H/Vスペクトルの特性にそれほど大きな差異は見受けられない。
- (2) 青苗地区の低地(嵩上げ区域を除く津波来襲地域)と高地(津波非来襲地域)において常時微動H/Vスペクトルの特性に明らかな差異は確認できない。この主要因は、本震後に低地で行われた6m程度の嵩上げの影響が考えられる。
- (3) 同じ低地(津波来襲地域)においても嵩上げ区域と非嵩上げ区域では常時微動H/Vスペクトルのピーク周波数に明らかな差異があり、嵩上げ区域に対して非嵩上げ区域(K-NET青苗周辺)ではピーク周波数が低周波側(1~2Hz付近)に分布し、スペクトル形状も明らかに異なっている。
- (4) 計測H/Vスペクトルと理論H/Vスペクトルの比較に基づき設定したK-NET青苗における工学的基盤以浅の地盤構造モデルは、本震前(嵩上げ前)における低地全体(青苗地区の津波来襲地域全体)の地盤特性として代表できる可能性が高い。
- (5) 青苗地区の高地全体の常時微動H/Vスペクトルに対して山地域に位置するJMA松江の常時微動H/Vスペクトルが非常に良い一致を示していることから、青苗地区の高地全体における地盤震動特性はJMA松江の地盤震動特性と類似している。
- (6) 津波来襲の恐れがない山城(高地)に位置するJMA松

江よりも、1993年北海道南西沖地震による津波来襲地域(沿岸域:低地)に位置するK-NET青苗のほうが、本震時の強震動作用中の避難不可能時間が30秒程度長かったものと推定される。

- (7) 津波避難困難地域の設定などにおいて、サイト特性(地盤震動特性)の差異に起因した強震動作用中の避難不可能時間の違いが津波避難に大きな影響を及ぼす可能性が高く、この違いを津波防災において適宜考慮していく必要がある。

今後は、本稿で得られた知見を踏まえ、地盤震動特性の違いによる強震動作用中の避難不可能時間の時間差を考慮した津波避難困難地域の設定方法の技術開発を進めていきたいと考えている。

謝辞: 本研究では、(国研)防災科学技術研究所K-NETおよび気象庁JMAによる地震観測波形データを使用しました。高密度常時微動計測の実施にあたっては、青苗地区の住民の皆様等に大変お世話になりました。公益財団法人鹿島学術振興財団2015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)、強震断層モデル編—強震断層モデルと震度分布について—、内閣府防災情報ホームページ、2012。 http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/model/pdf/20120829_2nd_report05.pdf (last accessed: 2016/01/25)
- 2) 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)、津波断層モデル編—津波断層モデルと津波高・浸水域等について—、内閣府防災情報ホームページ、2012。 http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/model/pdf/20120829_2nd_report01.pdf (last accessed: 2016/01/25)
- 3) 秦吉弥, 秋山充良, 高橋良和, 後藤浩之, 野津厚, 幸左賢二：スーパーアスペリティモデルと経験的サイト増幅・位相特性を考慮した 2011 年東北地方太平洋沖地震による南三陸町志津川での強震動の評価, 土木学会論文集 B3, Vol.69, No.2, pp.161-166, 2013.
- 4) 秦吉弥, 野津厚, 山田雅行, 常田賢一, 青木伸一：余震観測に基づく 2011 年東北地方太平洋沖地震による宮古市田老の防潮堤沿いでの強震動評価, 土木学会論文集 B3, Vol.70, No.2, pp.936-941, 2014.
- 5) 湊文博, 秦吉弥, 山田雅行, 常田賢一, 鉾田泰子, 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.123-135, 2015.
- 6) 秦吉弥, 湊文博, 常田賢一, 小山真紀, 鉾田泰子, 山田雅行：強震動予測および歩行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—, 土木学会論文集 B3, Vol.71, No.2, pp.671-676, 2015.
- 7) Kuwata, Y. and Takada, S.: Instantaneous instrumental seismic intensity and evacuation, *Jour. of Natural Disaster Science*, Vol.24, No.1, pp.35-42, 2002.
- 8) 鉾田泰子, 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.
- 9) 国土交通省都市局 都市安全課・街路交通施設課：津波防災まちづくりの計画策定に係る指針(第 1 版), 日本都市計画学会・土木学会協力, 国土交通省ホームページ, 2013。 <http://www.mlit.go.jp/common/001000488.pdf> (last accessed: 2016/01/25)
- 10) 和歌山県地震・津波被害想定検討委員会：和歌山県の津波避難困難地域と津波対策について, 和歌山県総務部危機管理局総合防災課ホームページ, 2014。 <http://www.pref.wakayama.lg.jp/prefg/011400/tunamitaisaku.html> (last accessed: 2016/01/25)
- 11) 沖縄県知事公室防災危機管理課：沖縄県津波避難困難地域について, 沖縄県庁ホームページ, 2014。 <http://www.pref.okinawa.jp/site/chijiko/bosai/tsunamihinan/tsunamihinankonnann.html> (last accessed: 2016/01/25)
- 12) 土木学会耐震工学委員会：1993 年北海道南西沖地震震害調査報告, 499p., 1997.
- 13) 日本建築学会：1993 年釧路沖地震災害調査報告・1993 年北海道南西沖地震災害調査報告, 497p., 1995.
- 14) Aoi, S., Kunugi, T. and Fujiwara, H.: Strong-motion seismograph network operated by NIED: K-NET and KiK-net, *Jour. of Japan Association for Earthquake Engineering*, Vol.4, No.3, pp.65-74, 2004.
- 15) 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.
- 16) 古和田明, 田居優, 岩崎好規, 入倉孝次郎：経験的サイト増幅・位相特性を用いた水平動および上下動の強震動評価, 日本建築学会構造系論文集, No.512, pp.97-104, 1998.
- 17) 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.
- 18) 野津厚：1993 年北海道南西沖地震(M7.8)の特性化震源モデル, 港湾空港技術研究所地震防災研究領域ホームページ, 2015。 http://www.pari.go.jp/bsh/jbn-kzo/jbn-bsi/taisin/sourcemodel/somodel_1993hokkaido.html (last accessed: 2016/01/25)
- 19) 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講演論文集, pp.227-229, 2006.
- 20) 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.2, pp.83-90, 2015.
- 21) Hata, Y., Nozu, A. and Ichii, K.: Variation of earthquake ground motions within very small distance, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol.66, pp.429-442, 2014.
- 22) 秦吉弥, 秋山充良, 高橋良和, 後藤浩之, 野津厚, 一井康二：SPGA モデルと経験的サイト増幅・位相特性を考慮した 2011 年東北地方太平洋沖地震における

- 長町高架橋での地震動とフラジリティカーブの評価, 構造工学論文集, 土木学会, Vol.60A, pp.214-227, 2014.
- 23) 湊文博, 秦吉弥, 常田賢一, 楢田泰子, 小山真紀, 植田裕也: 常時微動計測および臨時地震観測の高密度化に基づく南海トラフ巨大地震における和歌山県広川町津波来襲予想地域での強震動の評価, 第 35 回地震工学研究発表会講演論文集, 土木学会, Paper No. 740, 2015.
- 24) 国土交通省国土地理院: 地理院地図(電子国土 Web), 2015. <http://www.gsi.go.jp/> (last accessed: 2016/01/25)
- 25) 越村俊一, 萱場真太郎: 1993 年北海道南西沖地震津波の家屋被害の再考—津波被害関数の構築に向けて—, 日本地震工学会論文集, Vol.10, No.3, pp.87-101, 2010.
- 26) (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. <https://gbank.gsj.jp/geonavi/> (last accessed: 2016/01/25)
- 27) 例えば, 北海道立寒地住宅都市研究所: 平成 5.6 年に発生した北海道における地震被害調査報告, 調査研究報告, No.59, pp.33-189, 1995.
- 28) Haskell, N. A.: The dispersion of surface waves on multi-layered media, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.43, No.1, pp.17-34, 1953.
- 29) 大井昌弘, 藤原広行: 地盤情報の統合化と提供—ジオ・ステーション—, 地盤工学会誌, Vol.61, No.6, pp. 8-9, 2013.
- 30) 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.
- 31) 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.
- 32) 佐藤智美, 巽誉樹: 全国の強震記録に基づく内陸地震と海溝性地震の震源・伝播・サイト特性, 日本建築学会構造系論文集, No.556, pp.15-24, 2002.
- 33) 日本港湾協会: 港湾の施設の技術上の基準・同解説(上巻), 国土交通省港湾局監修, pp.336-341, 2007.
- 34) 秦吉弥, 中村晋, 野津厚: 本震観測記録を利用した地震動推定手法の精度とその向上策—2008 年岩手・宮城内陸地震における震源域を対象として—, 土木学会論文集 A1, Vol.69, No.2, pp.186-205, 2013.
- 35) 澤田純男, 盛川仁, 土岐憲三, 横山圭樹: 地震動の位相スペクトルにおける伝播経路・サイト特性の分離, 第 10 回日本地震工学シンポジウム論文集, pp. 915-920, 1998.
- 36) 例えば, Hata, Y., Nozu, A. and Ichii, K.: A practical method to estimate strong ground motions after an earthquake based on site amplification and phase characteristics, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.101, No.2, pp.688-700, 2011.
- 37) Nakanishi, I., Kodaira, S., Kobayashi, R., Kikuchi, M. and Kasahara, M.: The 1993 Japan Sea earthquake: quake and tsunamis devastate small town, *EOS Trans. Am. Geophys. Union*, Vol.74, No.34, pp.377-379, 1993.
- 38) Mendoza, C. and Fukuyama, E.: The July 12, 1993, Hokkaido-Nansei-Oki, Japan, earthquake: Coseismic slip pattern from strong-motion, *Journal of Geophysical Research*, Vol.10, No.B1, pp.791-801, 1996.
- 39) 今西和俊, 池田岩音, 佐藤魂夫: 経験的グリーン関数法による 1993 年北海道南西沖地震の破壊過程, 地震, 第 2 輯, 第 48 号, pp.365-373, 1995.
- 40) 壇一男, 宮腰淳一, 八代和彦: 経験的グリーン関数法による 1993 年北海道南西沖地震の札幌および秋田における地震記録の再現—強震動予測のための震源モデルの特性化手法の検証—, 日本建築学会構造系論文集, No.554, pp.53-62, 2002.
- 41) Nozu, A.: Current status of strong-motion earthquake observation in Japanese ports, *Jour. of Japan Association for Earthquake Engineering*, Vol.4, No.3, pp.79-83, 2004.
- 42) 土肥裕史, 奥村与志弘, 小山真紀, 湯浅亮, 清野純史: コミュニティにおける津波避難初期過程のシミュレーションモデルの開発, 土木学会論文集 B2, pp. L1356-1360, 2014.

(2015.10.26受付, 2016.1.25修正, 2016.2.20受理)

STRONG MOTION EVALUATION IN TSUNAMI ATTACK AREA, AONAE DISTRICT, OKUSHIRI ISLAND, JAPAN FOR THE 1993 SOUTHWEST HOKKAIDO EARTHQUAKE BASED ON MICROTREMOR MEASUREMENTS WITH HIGH DENSE SPATIAL LOCATION

Fumihito MINATO, Yoshiya HATA, Masayuki YAMADA, Yasuko KUWATA,
Maki KOYAMA, Tadayoshi NAKASHIMA and Ken-ichi TOKIDA

During the 1993 Southwest Hokkaido Earthquake, not only strong motion but also huge tsunami is attacked in Aonae District, Okushiri Island, Japan. In this study, first, microtremor measurements with high density were carried out in the tsunami attack area. Seismic waveforms at sites of present strong motion station in the tsunami attack and non-attack area were then estimated based on the characterized source model considering site amplification and phase effects. Using non-evacuation time based on the time history of instrumental seismic intensity, finally, the effect of the strong motion attack on tsunami evacuation was discussed.