



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

湊, 文博 ; 秦, 吉弥 ; 山田, 雅行 ; 常田, 賢一 ; 鋤田, 泰子 ; 魚谷, 真基

(Citation)

土木学会論文集A1 (構造・地震工学) , 71(4):I_123-I_135

(Issue Date)

2015

(Resource Type)

journal article

(Version)

Version of Record

(Rights)

©2015 公益社団法人 土木学会

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/90003288>



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

湊 文博¹・秦 吉弥²・山田 雅行³・常田 賢一⁴・鋤田 泰子⁵・魚谷 真基⁶

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

⁵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

⁶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: muotani@civil.eng.osaka-u.ac.jp

本稿では、南海トラフ巨大地震において巨大津波の来襲が懸念されている和歌山県串本町の街地・平地を対象地域として選定し、強震動の作用が津波避難に及ぼす影響について基礎的な検討を行った。その際、強震動シミュレーションの実施に先立ち、対象とした津波来襲地域(1.06km²)において525地点に及ぶ常時微動計測を行い、得られたH/Vスペクトルに基づきサイト増幅特性を評価することで、南海トラフ巨大地震による対象地域での強震動の高密度予測を行った。その結果、サイト増幅特性の差異に主に起因して、対象地域内において予測される地震動の特性に有意な差異が見受けられること、強震動の作用が津波避難に及ぼす影響が比較的大きいことなどが明らかとなった。

Key Words : microtremor H/V spectrum, site amplification factor, strong motion, tsunami evacuation, instantaneous instrumental seismic intensity, sandbank ground

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概ね1kmメッシュ毎に行われている¹⁾。和歌山県串本町は、以下に示す4つの理由により、南海トラフ巨大地震時に非常に大きな強震動の作用が予想される。第一に、図-1に示すように、想定震源域の近傍に位置¹⁾していること(震源特性の影響)、第二に、街地・平地(津波来襲地域: 図-2参照)の大部分が砂洲地盤で構成²⁴⁾されていること(サイト特性の影響)、第三に、歴史地震(1946年南海地震)において強震動による被害が串本では比較的大きかったことが報告⁵⁾されていること、第四に、想定南海地震($M_8.4$)の推定地震動による建物の深刻な被害が

予想⁶⁾されていること、などがその理由である。

一方で、和歌山県串本町の街地・平地では、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⁷⁾されており、上述した強震動の作用による構造物の破壊・損傷などが住民等の津波避難⁸⁾に影響を及ぼすことも考えられる。この点に関して秦ほか^{9,10)}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にある構造物が、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。しかしながら、串本町における地域防災計画¹¹⁾や津波防災対策基本計画¹²⁾では、構造物の被災や地震動の継続時間などが津波避難に及ぼす影響について、詳細な検討が十分に行われているとは言いがたいのが現状である。したがって、我が国の太平洋沿岸部の津波来襲域における強震動の詳細な評価¹³⁻¹⁵⁾は非常に重要で

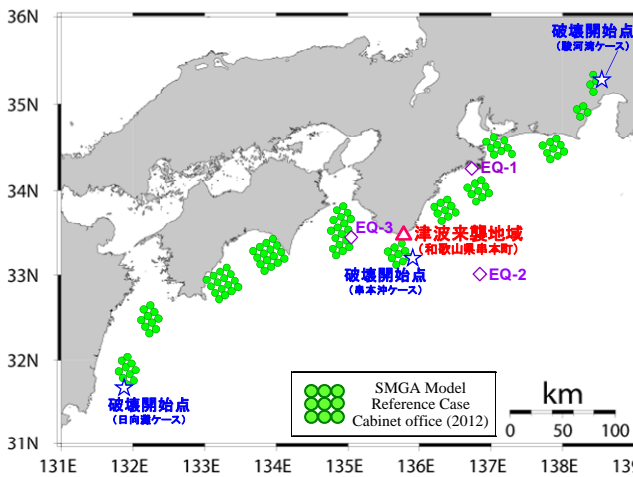


図-1 南海トラフ巨大地震の震源域¹⁾と串本町

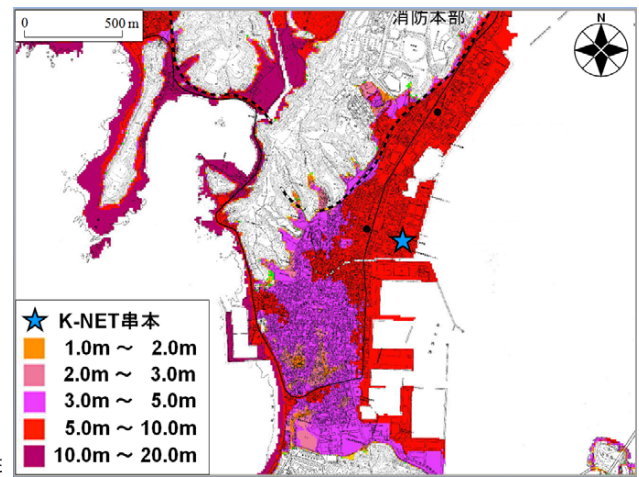


図-2 串本町内における津波来襲予想地域⁷⁾



図-3 串本町における土地利用現況図²⁴⁾

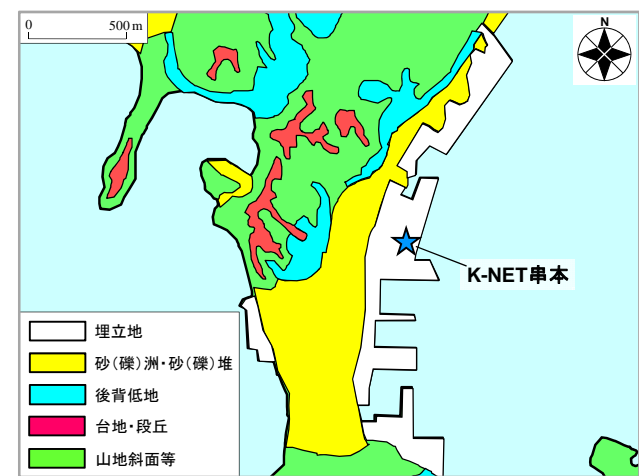


図-4 串本町における土地利用図²⁵⁾



図-5 串本町における地形分類図²⁴⁾

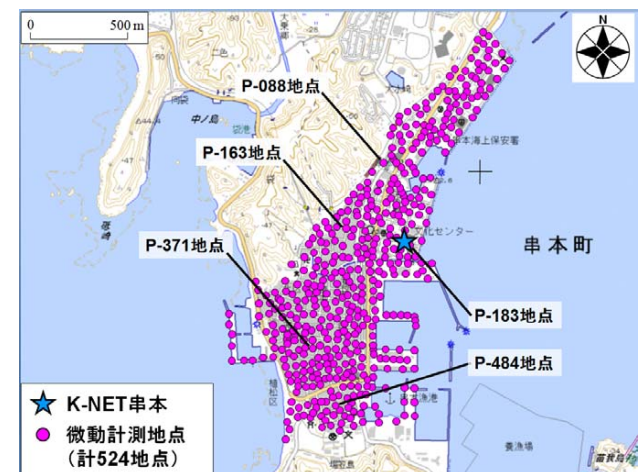


図-6 津波来襲地域における高密度常時微動計測^{16),17)}

ある。

そこで本稿では、南海トラフ巨大地震による和歌山県串本町の津波来襲地域において強震動の高密度予測を行った。具体的には、まず、串本町の津波来襲地域において高密度の常時微動計測^{16),17)}を実施し、得られた常時微

動H/Vスペクトルに基づいてサイト増幅特性を評価¹⁸⁾した。次に、評価したサイト増幅特性と、南海トラフ巨大地震によるSMGAモデル¹⁾を用いて、強震動シミュレーション^{19,21)}を行い、串本町の津波来襲地域に作用する強震動を微動計測点ごとに高密度予測した。最後に、予測


写真-1 常時微動計測の実施状況の一例^{16),17)}

写真-2 常時微動計測に用いた6台の計測機器^{16),17)}

地震動に基づく瞬間計測震度^{22),23)}などの地震動指標値を算定することによって、強震動の作用が津波避難に及ぼす影響について考察した。

2. 高密度常時微動計測

(1) 検討対象地域の設定

和歌山県串本町の図-6に示す地域を常時微動を実施する地域に設定した。設定にあたっては、次の条件を課した。

- 1) 南海トラフ巨大地震において津波の来襲が予想されている地域(和歌山県地震・津波被害想定検討委員会⁷⁾による「巨大津波来襲予想地域」：図-2参照)
- 2) 国土交通省国土政策局国土情報課による土地利用現況図²⁴⁾において「小都市(住宅・商業地等)」に分類されている地域(図-3参照)
- 3) 国土地理院土地利用図²⁵⁾において「埋立地・砂(礫)洲・砂(礫)堆」に分類されている地域(図-4参照)
- 4) 国土交通省国土政策局国土情報課による地形分類図²⁴⁾において「人工改変地・砂洲」に分類されている地域(図-5参照)

この地域の計525地点(検討対象地域に唯一設置されている既存強震観測点であるK-NET串本²⁶⁾を含む：図-6参照)において常時微動計測を実施した。検討対象地域の面積は、約1.06km²となり、概ね45m四方に1つの微動計測点を設けたことになる。この微動計測点の設置密度は、既往研究(他サイト(串本町以外)を対象にした高密度常時微動計測²⁷⁾)よりも十分に高密度であることを付記しておく。

(2) 常時微動計測の実施

写真-1に検討対象地域での常時微動計測状況の一例を

示す。計測期間は、2014年3月6～8日、2014年5月7～11日、2014年6月7～8日の3期間である。計測は主に昼間に実施し、写真-2に示すように同型の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²⁸⁾)を採用した。計測機器の諸元については、文献²⁸⁾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1時間の単点計測とした。

(3) H/Vスペクトルの計算

図-7は、K-NET串本(既存強震観測点)に対する検討対象地域内での常時微動H/Vスペクトルの比較を示す。常時微動H/Vスペクトルの計算処理方法としては、まず、微動の加速度時刻歴に対して0.1Hzのハイ・パスフィルターを施し、163.84秒の区間(雑振動(望ましくないノイズ等)が小さい163.84秒間)を10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で平滑化したのちに、H/Vスペクトルを算出し、10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²⁹⁾などを考慮して0.2～10Hzとした。ここに、全525地点における詳細な位置情報および常時微動H/Vスペクトルの一覧については、文献¹⁶⁾の付録図を参照されたい。

(4) 常時微動H/Vスペクトルの分析・評価

図-7に示すとおり、同じ検討対象地域内においても常時微動H/Vスペクトルに有意なバラツキが確認でき、検討対象地域内における地盤震動特性が一樣であるとはいえない。すなわち、秦ほか²⁹⁾により既に設定されている南海トラフ巨大地震によるK-NET串本サイト相当の強震動を、検討対象地域内における強震動として代表させることができないことが示唆される。

図-8は、検討対象地域内における常時微動H/Vスペクトル(図-7参照)のピーク周波数を地形図²⁹⁾上にプロットしたものである。また、図-9には、現在(2011年8月)と約100年前(1913年4月)の地形図を重ね合わせたものを示す。さらに、図-10には、深部地下構造(工学的基盤以深の地盤)に着目した産業技術総合研究所による地質分類図³⁰⁾を検討対象地域とその周辺について示す。図-8と図-9を比較すると、南東側の埋立地では比較的低帯域のピーク周波数、北東側の埋立地では比較的高帯域のピーク周波数をそれぞれ示しており、埋立地盤の層厚が南東側では比較的厚く、北東側では比較的薄いことが示唆される。この示唆は、K-NET串本における既往のボーリング調査結果(図-11参照)³¹⁾にも顕著に表れている。一方で、図-8と図-10を比較すると、N1の堆積岩類で構成される地域のピーク周波数は比較的高周波帯域(概ね4~10Hz付近)に分布しているのに対し、Hの堆積岩類で構成される(洪積層・沖積層が分布する範囲)地域のピーク周波数は比較的低周波帯域(概ね2.5~4Hz付近)に分布し

ているのが読み取れる。また、南東側の埋立地とその周辺(図-9参照)では、さらに低周波帯域(概ね1~2.5Hz付近)のピーク周波数を有している。

図-12は、K-NET串本サイトおよびP-183地点(K-NET串本最近傍の微動計測地点：図-6参照)で得られた常時微動H/Vスペクトルに対して、K-NET串本における1次元地盤モデル(図-11参照)に基づく理論H/Vスペクトル³²⁾を重ね合わせたものである。図-12に示すように、K-NET串本サイトでの計測H/Vスペクトルと理論H/Vスペクトルの一致度が低くなっており、K-NET串本でのボーリング実施地点が強震計設置地点と必ずしも一致していないことが一要因であると考えられる((独)防災科学技術研究所、串本町役場、近隣住民などとの私信による)。一方で、P-183地点での計測H/Vスペクトルと理論H/Vスペクトルは比較的良好一致を示していることから、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)は、工学的基盤以浅の地盤構造の影響を受けているものといえる。

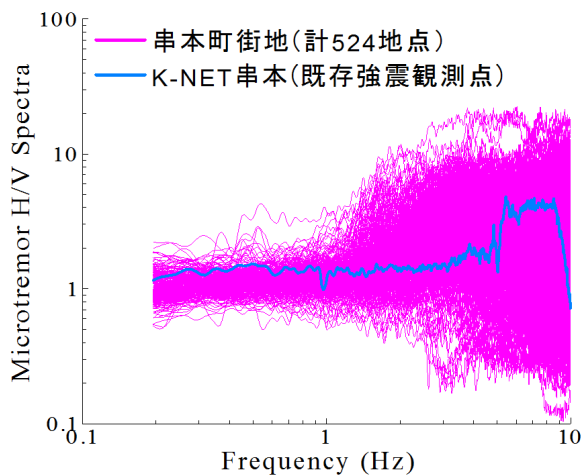
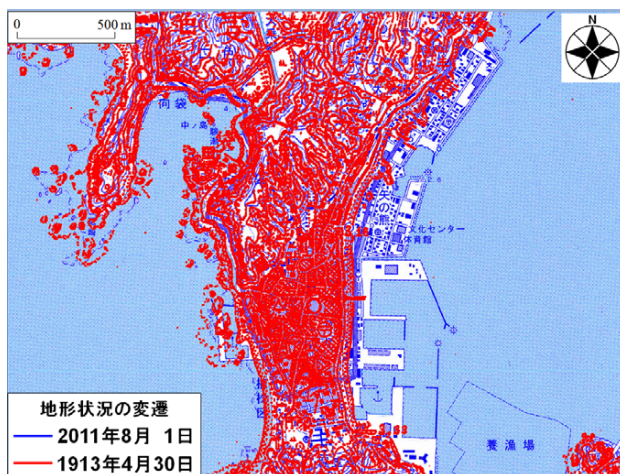


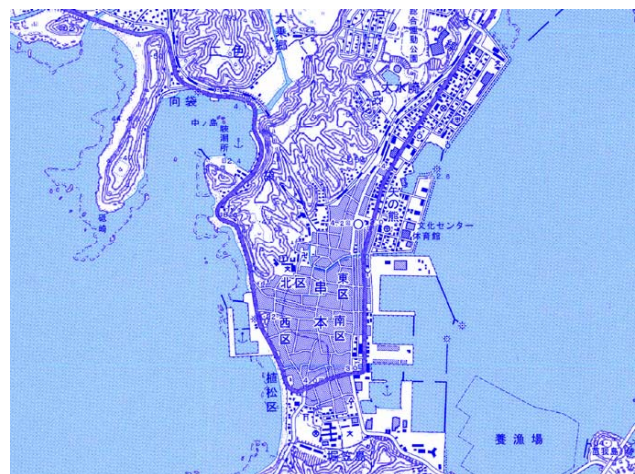
図-7 常時微動H/Vスペクトルの比較^{16),17)}



図-8 検討対象地域におけるピーク周波数の分布^{16),17)}



(a) 新旧地形図の比較



(b) 現在の地形図状況

図-9 検討対象地域における新旧地形図の比較^{25),39)}



図-10 検討対象地域における地質分類³⁰⁾

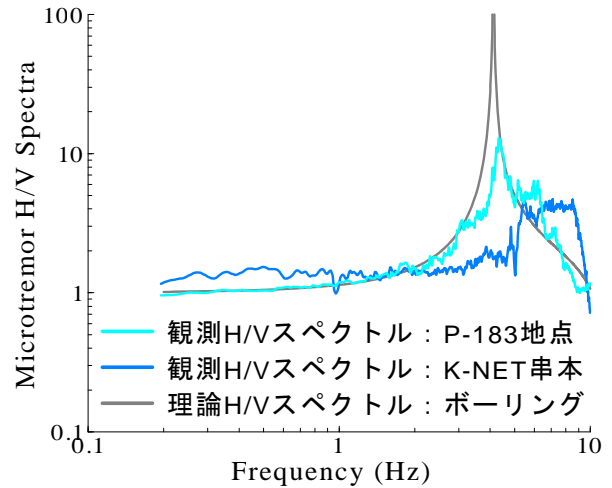


図-12 H/V スペクトルによる観測値と理論値の比較¹⁸⁾

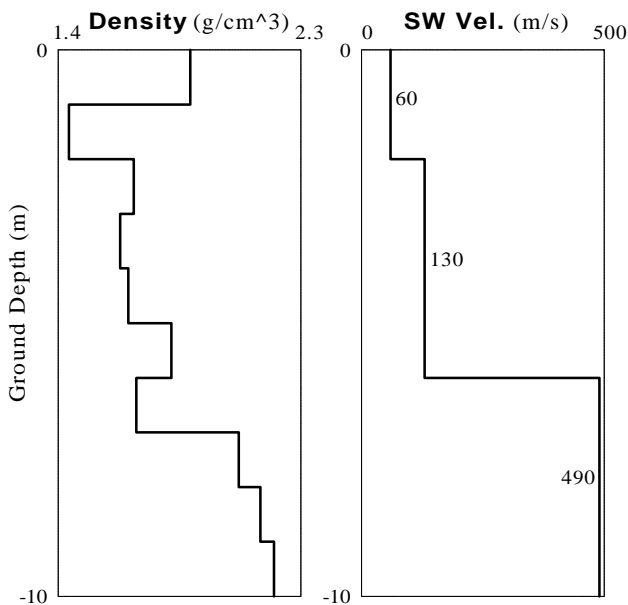
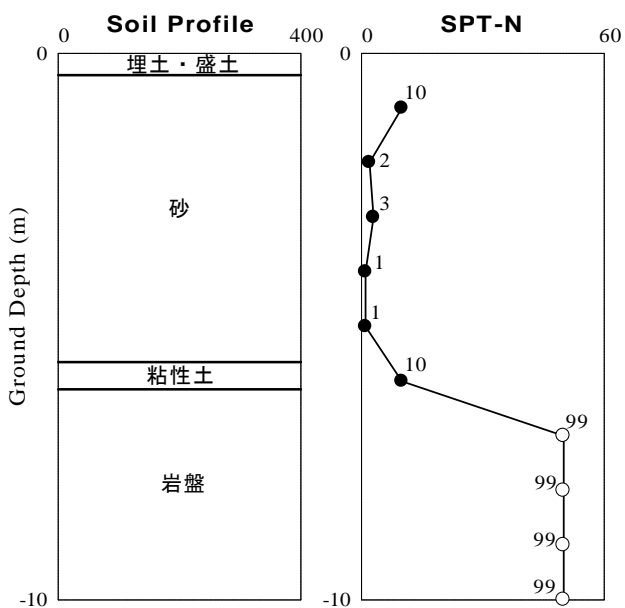


図-11 K-NET 串本付近でのボーリング調査による地盤構造³⁰⁾

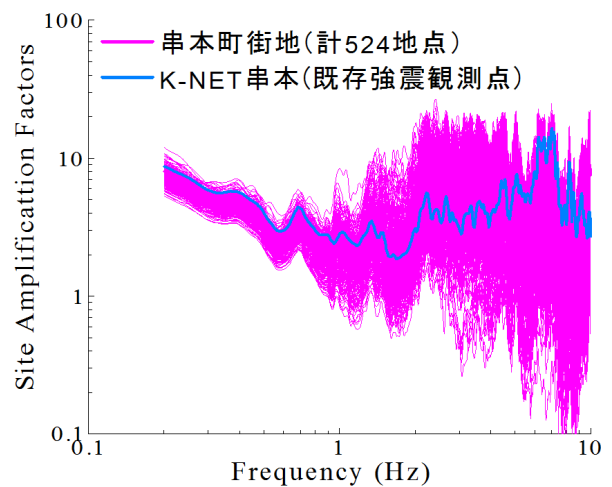


図-13 サイト増幅特性(地震基盤～地表)の比較¹⁸⁾

3. サイト増幅特性の評価

(1) 常時微動H/Vスペクトルに基づいた補正

2.(4)で述べたとおり、同じ検討対象地域内においても常時微動H/Vスペクトルの特性に差異が見受けられる。既往の研究³³⁻³⁵⁾では対象地域内に複数の強震観測点が存在していたために地盤震動特性に関するゾーニングが可能であったが、本稿で対象とする串本町の津波来襲地域では強震観測点はK-NET串本の1つしか存在しないため、ゾーニングを施すことができない。そこで、検討対象地域内における既存強震観測点(K-NET串本)と常時微動計測地点(計524地点)での常時微動H/Vスペクトルの比較(図-7参照)に基づき、K-NET串本における既存のサイト増幅特性(図-13参照)³⁰⁾に対して、常時微動H/Vスペクトルのピーク周波数やピーク振幅などの違いに着目した経験的補正³⁷⁾もしくは微修正³⁸⁾を加えることによって、常時微動計測地点(計524地点: 図-6参照)におけるサイト増幅特性を評価した。ここに、全525地点における詳細

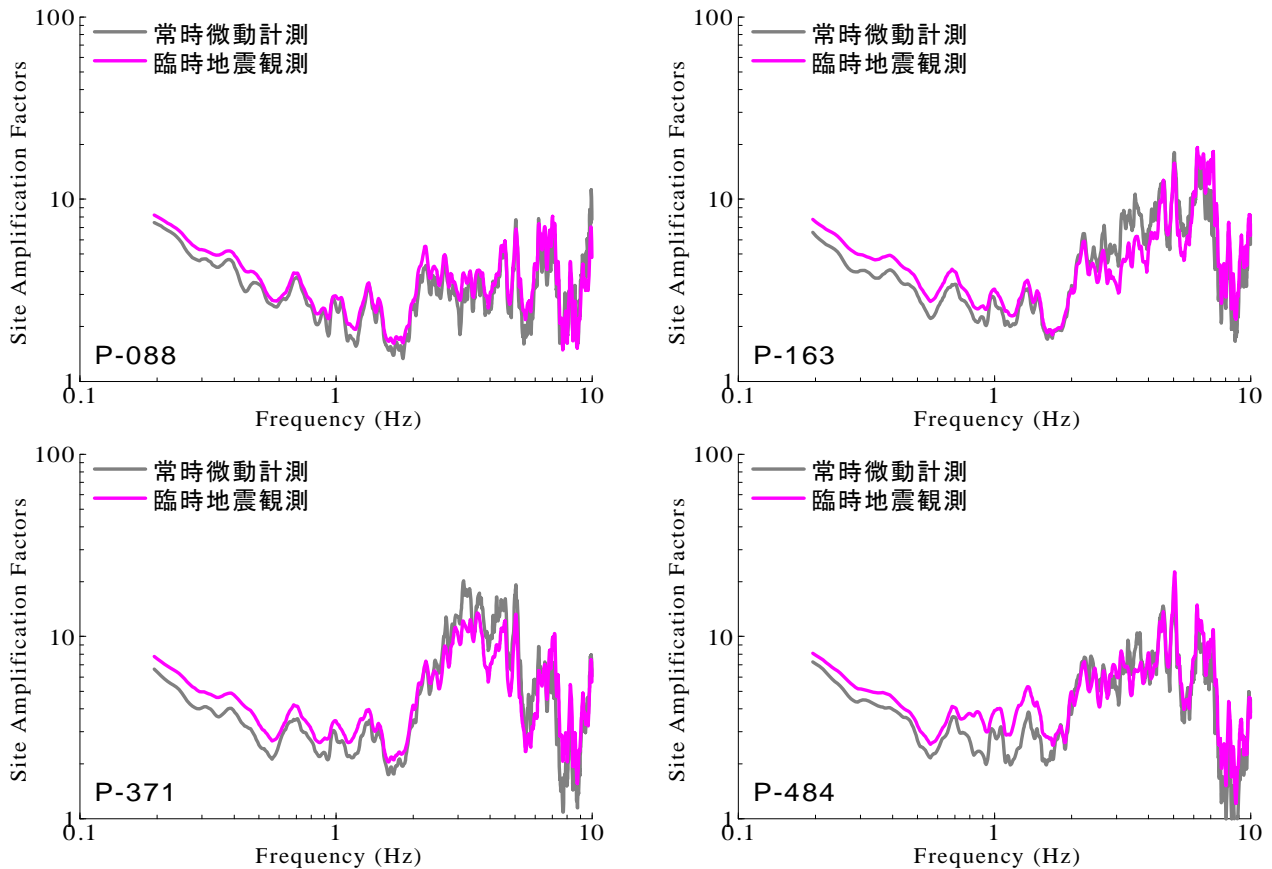


図-14 代表4地点における常時微動計測と臨時地震観測に基づくサイト増幅特性(地震基盤～地表)の比較³⁹⁾

な位置情報およびサイト増幅特性(地震基盤～地表)の一覧については、文献16)の付録図を参照されたい。

図-13にサイト増幅特性の評価結果を示す。図-13に示すように、検討対象地域内におけるサイト増幅特性がばらつく傾向にあり、その傾向は高周波数帯域に至るほどより顕著に表れている。これは、南海トラフ巨大地震時に検討対象地域内に作用する地震動の特性が大きく異なってくる可能性が高いことを示唆するものである。

(2) 臨時地震観測による適用性確認

3.(1)で評価した常時微動 H/V スペクトルに基づくサイト増幅特性の適用性を確認するため、検討対象地域内の4地点(P-088, P-163, P-371, P-484 地点：図-6 参照)において、臨時の地震観測³⁹⁾を行った。地震観測システムは、先行研究⁴⁰⁾と同様であり、地震計は(株)東京測振製サーボ型加速度計(SV-355T)およびデータロガーは白山工業(株)製(LS-7000XT)を使用し、観測方向は N-S, E-W, U-D の3成分、サンプリング周波数は 100Hz、トリガー加速度レベルは設定せず、常時観測を継続するシステムとした。観測期間は、2014年3月10～30日の20日間である。その結果、安芸灘を震源とする地震(2014/03/14 02:07 80km M_j 6.1：以後、2014年安芸灘地震と呼ぶ)による記録を、K-NET 串本と当該4地点において同時に得る

ことができた。

図-14は、常時微動 H/V スペクトルに基づいて評価したサイト増幅特性(図-13 参照)と 2014年安芸灘地震による観測記録に基づいて評価したサイト増幅特性を、当該4地点において比較したものである。地震観測に基づくサイト増幅特性(地震基盤～地表)は、当該4地点(P-088, P-163, P-371, P-484 地点)と K-NET 串本で同時に得られた 2014年安芸灘地震による観測記録を対象に、両地点の距離の違いによる補正⁴¹⁾⁴²⁾を考慮した水平2成分合成のフーリエスペクトルの比率(P-088, P-163, P-371, P-484 地点/K-NET 串本)を計算し、この比率を K-NET 串本における既存のサイト増幅特性(地震基盤～地表)³⁹⁾に掛け合わせることで評価⁴³⁾した。なお、距離の違いによる補正としては、幾何減衰に関する補正と非弾性減衰⁴⁴⁾に関する補正を行い、非弾性減衰を表す Q 値は、Petukhin ほか⁴²⁾による近畿地方を対象に同定された Q 値を適用した。

図-14に示すとおり、常時微動計測と臨時地震観測に基づくサイト増幅特性が比較的良い一致を示しており、常時微動 H/V スペクトルに基づいて経験的に評価したサイト増幅特性(図-13 参照)は、一定の適用性を有していることが示唆される。



図-15 気象庁計測震度の分布 (駿河湾ケース) ²¹⁾

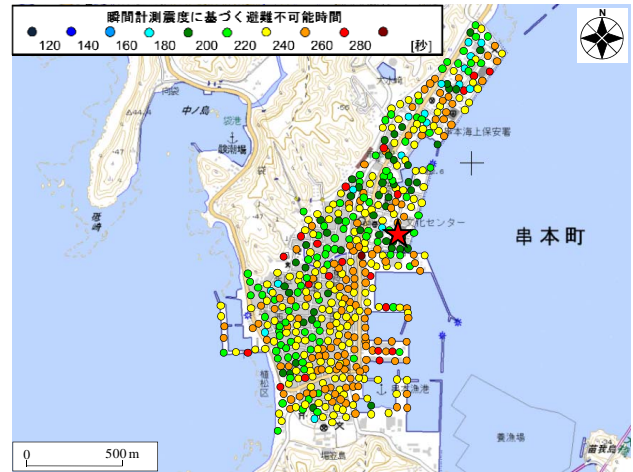


図-18 避難不可能時間の分布 (駿河湾ケース)

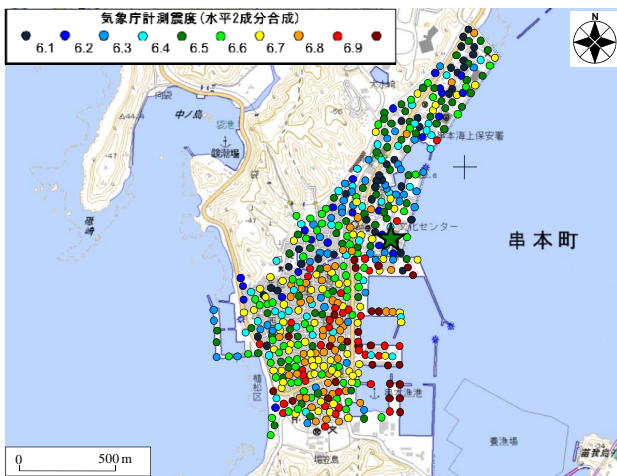


図-16 気象庁計測震度の分布 (串本沖ケース) ²¹⁾

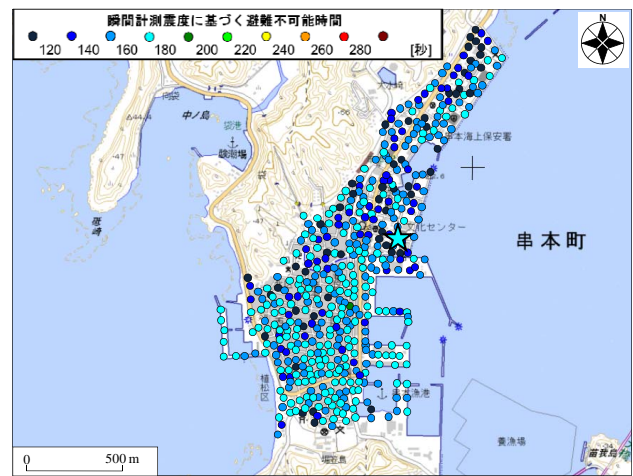


図-19 避難不可能時間の分布 (串本沖ケース)

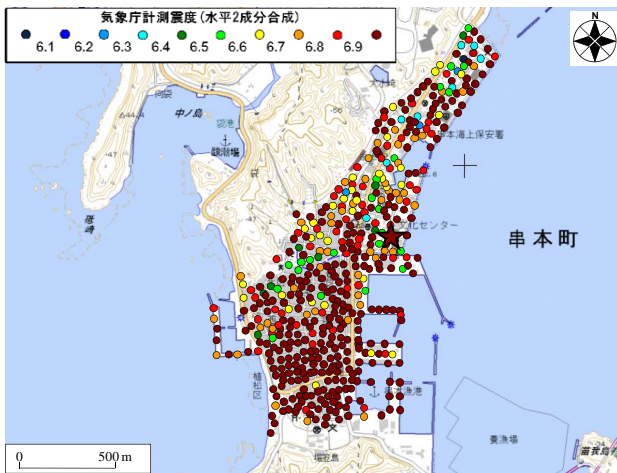


図-17 気象庁計測震度の分布 (日向灘ケース) ²¹⁾

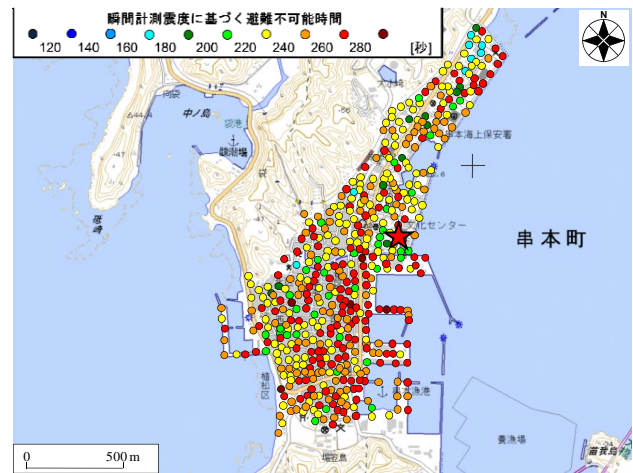


図-20 避難不可能時間の分布 (日向灘ケース)

4. 強震動の評価

(1) 震源モデルと強震波形計算手法

南海トラフ巨大地震による地震動の推定には、内閣府南海トラフの巨大地震モデル検討会¹⁾によるSMGAモデ

ル(基本ケース)を採用した。図-1に静岡県駿河湾～宮崎県日向灘のサブイベント(12個のSMGAで構成)と津波来襲地域の位置関係を示す。モデルパラメータの詳細については、文献1)を参照されたい。なお、 Q 値については、Petukhin¹⁾ほかによる推定値⁴²⁾を採用した。本稿では、図-1

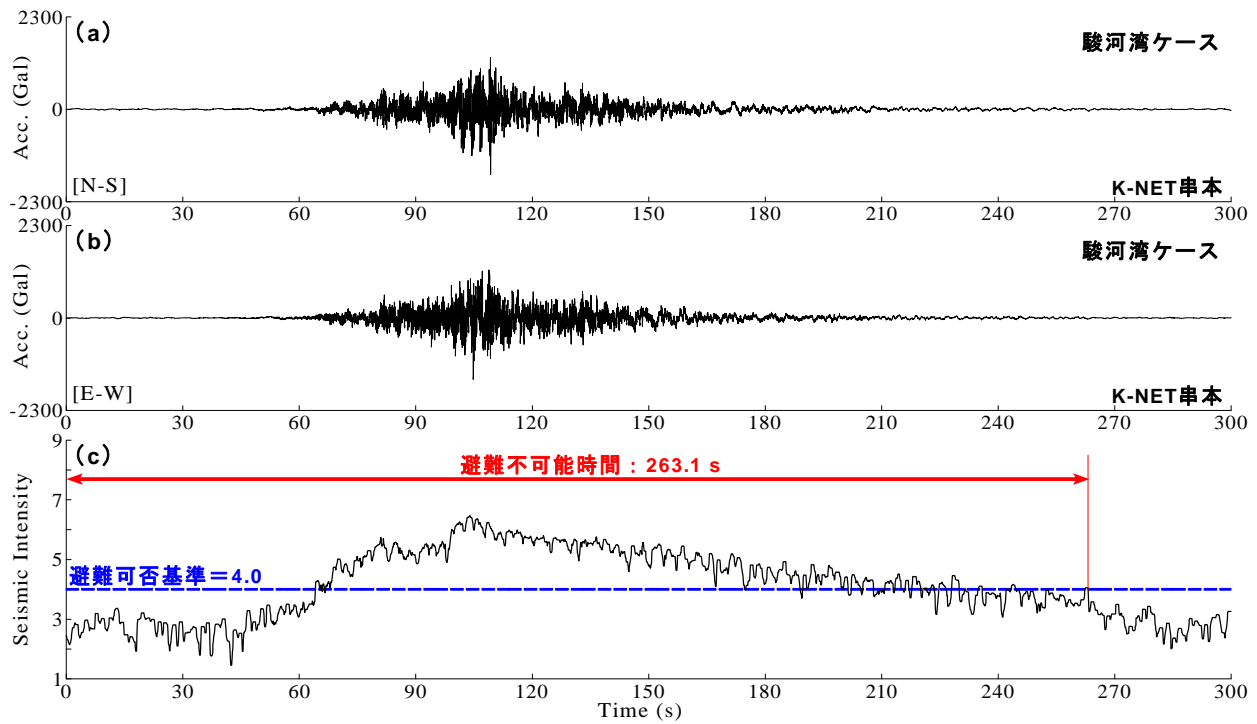


図-21 瞬間計測震度の時刻歴に基づく避難不可能時間の算定例(駿河湾ケース)

に示すとおり、この震源モデルにおいて、破壊開始点の位置を、①駿河湾(以後、駿河湾ケースと呼ぶ)、②串本沖(以後、串本沖ケースと呼ぶ)、③日向灘(以後、日向灘ケースと呼ぶ)に配置した計3ケースを設定した。

本研究では、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⁴⁴⁾⁴⁵⁾を適用した。この方法では、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、 $S(f)$ は小地震の震源スペクトルで実数、 $P(f)$ は伝播経路特性⁴⁰⁾で実数、 $G(f)$ はサイト増幅特性(図-7参照)で実数、 $O(f)$ は津波来襲地域での中小地震観測記録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。震源特性を計算する際、ラディエーション係数⁴¹⁾としては、全方位への平均値である0.63を用いた。また、地震動エネルギーの水平2成分への分散を表す係数である $PRITIN$ ⁴⁰⁾は、水平2成分ともに0.71とした。

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⁴⁶⁾を行うことで、大地震による波形が求まる。なお、Parzen Window(式(1))において添

字 p で表示)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⁴⁵⁾。

サイト位相特性(式(1))における中小地震観測記録のフーリエ変換 $O(f)$ の取り扱いについては、入射角およびback azimuthが各サブイベントとできるだけ共通となるように(堆積層が地震動の位相に及ぼす影響をより適切に考慮できるように)選定した。具体的には、サイト増幅特性とサイト位相特性の相関性⁴⁷⁾を全地点において考慮するのは非常に困難であるため、図-1に示すように、①駿河湾ケースではEQ-1(2000/10/31 01:42 39km三重県南部を震源とする地震 $M_j5.7$)、②串本沖ケースではEQ-2(2004/09/05 19:07 38km 三重県南東沖を震源とする地震 $M_j7.1$)、③日向灘ケースではEQ-3(2001/03/02 07:30 42km 和歌山県南方沖を震源とする地震 $M_j4.0$)によって、K-NET串本で得られた観測波形を津波来襲地域内の微動計測点(524地点)において共通採用した。なお、既往研究の成果⁴⁸⁾を参考に海溝型地震による波形の時間軸の伸縮補正は実施していない。ここで、サイト位相特性の要素地震(EQ-1, EQ-2, EQ-3)の選定方法としては、対象としている串本町の津波来襲地域に作用する強震動として比較的大きな影響を及ぼすサブイベントの近傍で発生した中小地震を選定した(駿河湾ケースおよび日向灘ケース)。ただし、串本沖ケースでは、串本町の津波来襲地域からほぼ直下に位置する南部のサブイベントが強震動の生成に最も大きな影響を及ぼすものの、当該サブイベント内およびその周辺で発生した中小地震による記録がK-NET串本で得られていないため、既往の研究成果²⁰⁾も

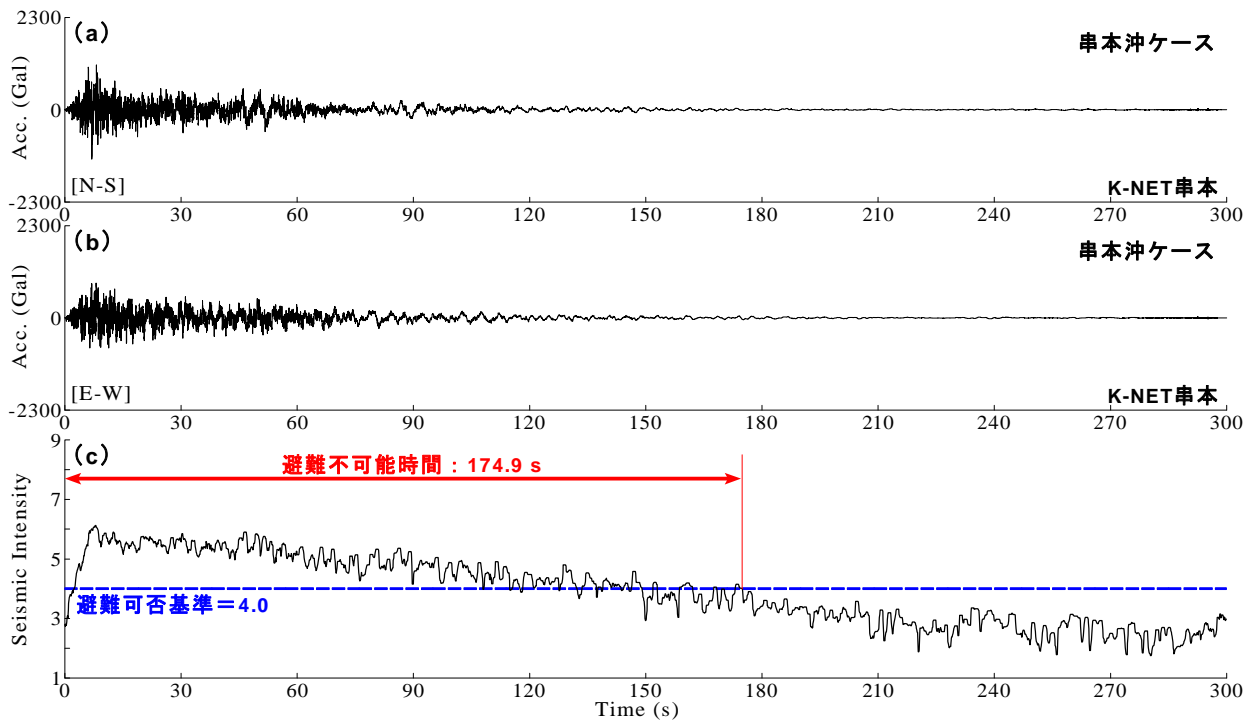


図-22 瞬間計測震度の時刻歴に基づく避難不可能時間の算定例(串本沖ケース)

考慮して、沖合遠方を震源とするEQ-2を採用した。

(2) 強震動予測結果

図-15、図-16、図-17は、①駿河湾ケース、②串本沖ケース、③日向灘ケースにおける串本町の検討対象地域での予測地震動の分布である。ここでは、SMGAモデルを震源モデルとして採用しているため、一定の信頼性があると考えられる気象庁計測震度⁴⁹⁾の分布に着目した。なお、SMGAモデルは、震度の再現に主眼を置いた特性化震源モデルであり¹⁵⁰⁾、全ての地震動指標値の再現に適した断層モデルであるとは言い難い面もあることを付記しておく。

図-15、図-16、図-17に示すとおり、串本沖ケース、駿河湾ケース、日向灘ケースの順に気象庁計測震度の値が大きくなる傾向がある。また、評価したサイト増幅特性の差異(図-7参照)に起因して、検討対象地域において本震時に予測される強震動の特性に有意な差異が見受けられる。ここに、南海トラフの巨大地震モデル検討会による既往の研究成果¹⁾では、検討対象地域全域にわたって(検討対象地域に該当する第三次地域の格子メッシュでは)一様に震度7と予測されているものの、本研究成果では、検討対象地域の震度分布は一様となっておらず、震度7が予想される地域は南部に比較的集中する傾向にある。ここで、得られた計測震度の分布(図-15、図-16、図-17参照)に対する建物被害について考察を加えると、既往の大規模地震に基づく震度と建物被害率の関係⁵¹⁾によれば、駿河湾ケース(図-15参照)および串本沖ケース

(図-16参照)では、北部地域では計測震度が6.1~6.5程度であることから建物被害率は10~30%となるのに対して、砂洲地盤で構成される南部地域では計測震度が6.5~7.0程度であることから建物被害率は30~60%と推察される。一方で、日向灘ケース(図-17参照)では、対象とした津波来襲地域のほぼ全域にわたって計測震度が7.0程度の値を示しており、建物被害率は60%前後になると推察される。このように串本町の津波来襲地域では、津波来襲前の強震動の作用により深刻な建物被害が発生することが予想され、建物被害が避難行動に与える影響⁵²⁾⁵³⁾は無視し得ないと考えられ、これらの影響について今後検討を行ってきたいと考えている。

図-18、図-19、図-20は、①駿河湾ケース、②串本沖ケース、③日向灘ケースにおける串本町の検討対象地域での強震動作用中の避難不可能時間の分布である。避難不可能時間は、図-21、図-22、図-23に一例を示すように、予測地震動の加速度波形において瞬間計測震度²²⁾(水平2成分合成)の時刻歴を計算し、先行研究²³⁾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。なお、採用したこの基準値(瞬間計測震度4.0)は、2000年6月~2009年9月に我が国で発生した内陸地殻内地震およびスラブ内地震のほかプレート境界地震についても適用性が検討されており²³⁾、一定の信頼性があるものと考えられる。しかしながら、本稿で取り扱っている南海トラフ巨大地震や2011年東北地方太平洋沖地震などのM9クラスのプレート境界の巨大地震は対象に含まれておらず²³⁾、プレート境界で発生する巨大地震に対する基

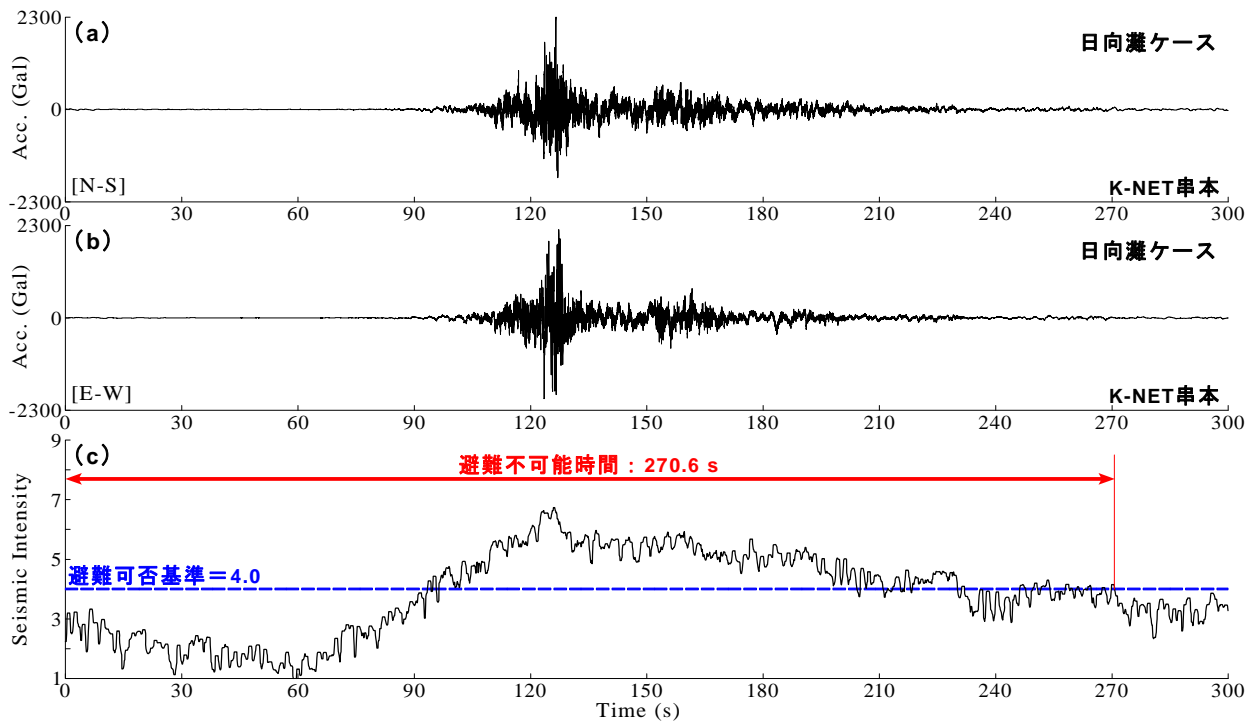


図-23 瞬間計測震度の時刻歴に基づく避難不可能時間の算定例(日向灘ケース)

準値(瞬間計測震度4.0)の適用性については議論の余地が残されており、今後の検討課題の一つとしたい。

ここに、4.(1)で紹介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^{44,45)}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(EQ-1, EQ-2, EQ-3)によってK-NET串本で得られた観測波の時刻遅れが入力されているため、本来、震源(破壊開始点)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用することも考えられるが、既往の研究成果^{8,54)}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(例えば、図-21、図-22、図-23の時間軸)として採用した。なお、震度の算定に適したSMGAモデルを用いていることから、図-21、図-22、図-23において同図(a)、(b)の推定地震動の加速度時刻歴に基づいて算定した瞬間計測震度の時刻歴(同図(c))とその最大値(気象庁計測震度の値)には一定の信頼性があるものと考えられる。

図-18、図-19、図-20に示すとおり、震源(破壊開始点)が津波来襲地域の近傍にある串本沖ケースでは、避難不可能時間が極端に短くなっている。一方で、駿河湾ケースおよび日向灘ケースでは、避難不可能時間が比較的長くなる傾向にあり、日向灘ケースにおいてその傾向が顕著に表れている。また、津波来襲地域内での高密度常時

微動計測に基づくサイト特性が避難不可能時間に及ぼす影響に目を向けると、常時微動H/Vスペクトルのピーク周波数(サイト増幅特性のピーク周波数)が比較的低周波数帯域(1~4Hz付近)にある砂洲地盤や埋立地盤で構成される区域(図-8および図-10参照)では、気象庁計測震度に基づく比較(図-15、図-16、図-17参照)ほど明瞭ではないものの、避難不可能時間が比較的長くなる傾向が読み取れる。

すなわち、津波来襲地域内でのサイト増幅特性の差異や南海トラフ巨大地震の発生シナリオ(破壊開始点)の差異によって、検討対象地域が有する津波避難パフォーマンスには、有意な差異があることが示唆される。

5. まとめ

本稿では、南海トラフ巨大地震時に津波の来襲が予想される和歌山県串本町の街地・平地において高密度常時微動計測を行い、当該地域での地盤震動特性を評価した。そして、評価した地盤震動特性を用いて南海トラフ巨大地震を対象とした強震動シミュレーションを行うことで、当該地域に作用する強震動を高密度に予測した。得られた知見を以下に示す。

- (1) 和歌山県串本町の津波来襲予想地域では、常時微動H/Vスペクトルに有意なバラツキが確認できることから、地盤震動特性が一樣であるとは言い難い^{16,17)}。
- (2) 和歌山県串本町の津波来襲予想地域では、地質区分

と常時微動 H/V スペクトルによるピーク周波数が良い対応を示し、最も新しい堆積岩類で構成される地域のピーク周波数は、比較的低周波帯域(概ね 2.5~4Hz 付近)に分布しており、工学的基盤以浅の地盤特性が常時微動 H/V スペクトルのピーク周波数やスペクトル形状に大きな影響を及ぼしている^{16),17)}。

- (3) 常時微動 H/V スペクトルに基づいて評価したサイト増幅特性(地震基盤～地表)は、和歌山県串本町の津波来襲予想地域において有意なバラツキが確認でき、高周波帯域ほどバラツキの度合いが大きい^{16),17)}。
- (4) 常時微動 H/V スペクトルと臨時地震観測記録に基づいて評価したサイト増幅特性(地震基盤～地表)は、和歌山県串本町の津波来襲予想地域内の 4 地点において比較的良好一致を示す¹⁸⁾。
- (5) 串本町の津波来襲予想地域では、同地域内での地盤震動特性の差異に起因して、本震時に予測される気象庁計測震度等の強震動の特性が大きく異なる^{20),21)}。
- (6) 串本町の津波来襲予想地域では、同地域内での地盤震動特性の差異や南海トラフ巨大地震の発生シナリオの差異によって、同地域が有する津波避難パフォーマンス(瞬間計測震度の時刻歴に基づく避難不可能時間)に有意な差異が存在する。

今後は、本稿で得られた強震動の作用による避難不可能時間と、津波到達予想時間⁵⁹⁾やウォーキング実験⁵⁹⁾により得られた指定避難場所までの避難時間を組合せることによって、串本町の検討対象地域内での津波避難困難地区の抽出に関する相対的もしくは絶対的な評価を行うことで、新たな津波避難場所(津波避難タワー等)の設置検討⁵⁷⁾などに役立てていきたいと考えている。

本論文の内容のうち、常時微動計測の実施については地震工学研究発表会¹⁶⁾および Kansai Geo-Symposium 2014¹⁷⁾にて、サイト増幅特性の評価については日本地震工学シンポジウム¹⁸⁾にて、強震動の評価については Kansai Geo-Symposium 2013²⁰⁾および地盤工学シンポジウム²¹⁾にてそれぞれ発表済みであるが(ともに非査読論文として発表済みであるが)、本稿はそれらを再構成し、強震動の作用が津波避難に及ぼす影響に焦点を当てて詳述したものである。

謝辞：本研究では、(独)防災科学技術研究所K-NETによる地震観測波形データを使用させていただきました。高密度常時微動計測の実施にあたっては、串本町の住民の皆様大変お世話になりました。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

- ル編一強震断層モデルと震度分布について一，内閣府防災情報ホームページ，2012. (last accessed: 2015/03/02)
- 2) 串本町史編さん委員会：串本町史(通史編)，第一法規出版，1071p., 1995.
- 3) 串本町史編さん委員会：串本町史(史料編)，第一法規出版，1094p., 1988.
- 4) 穴倉正展，前杵英明，越後智雄，小俣雅志，郡谷順英，渋谷典幸：南海トラフ沿いの和歌山県串本町で検出された完新世イベント堆積物，日本地球惑星科学連合連合大会 2013 年大会予稿集，Paper No.SSS31-35, 2013.
- 5) 建設院第一技術研究所：昭和二十一年十二月二十一日東南海地震調査報告，建設院第一技術研究所概報，第十六号，昭和二十三年六月，1948.
- 6) 包那仁満都拉，川瀬博：強震ネットワークデータから構築した広周波数帯域統計的グリーン関数とその南海地震への応用，日本地震工学学会論文集，Vol.7, No.2, pp.80-95, 2007.
- 7) 和歌山県地震・津波被害想定検討委員会：「南海トラフの巨大地震」及び「東海・東南海・南海 3 連動地震による津波浸水想定について，和歌山県総務部危機管理局総合防災課ホームページ，2013. (last accessed: 2015/03/02)
- 8) 小笠原敏記，中畑摩耶，松林由里子，堺茂樹：2011 年東北地方太平洋沖地震における住民避難行動に関する現地調査一和歌山県串本町を対象として一，土木学会論文集 B3，Vol.69, No.2, pp.L_37-42, 2013.
- 9) 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.L_161-166, 2013.
- 10) 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.L_936-941, 2014.
- 11) 串本町防災会議：串本町地域防災計画，395p., 2011.
- 12) 太田和良，西田治彦，玉川純次：串本町総合的津波対策の取り組みについて，地域安全学会論文集，No.8, pp.307-314, 2006.
- 13) 秦吉弥，常田賢一，谷本隆介：2011 年東北地方太平洋沖地震における宮城県井土浦での強震動および地盤沈下量の推定，地盤と建設，地盤工学会，Vol.31, No.1, pp.63-71, 2013.
- 14) 秦吉弥，常田賢一，嶋川純平：サイト増幅特性の差異に着目した 2011 年東北地方太平洋沖地震における波板海岸駅～吉里吉里駅付近での地震動の評価，第 17 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講演論文集，土木学会，pp.155-160, 2014.
- 15) 秦吉弥，谷本隆介，常田賢一，館川逸朗：河川堤防における強震動および津波の複合影響に関するハイブリッド解析，土木学会論文集 A1，Vol.70, No.4, pp.L_369-383, 2014.
- 16) 湊文博，秦吉弥，山田雅行，常田賢一，魚谷真基：超高密度常時微動計測に基づく和歌山県串本町における津波来襲地域での地盤震動特性の評価，第 34 回地震工学研究発表会講演論文集，土木学会，Paper No. 580, 2014.

- 17) 湊文博, 秦吉弥, 山田雅行, 常田賢一, 魚谷真基: 常時微動 H/V スペクトルに基づく和歌山県串本町での地盤震動特性の評価, *Kansai Geo-Symposium 2014* 論文集, 地盤工学会, Paper No.3-4, 2014.
- 18) 湊文博, 秦吉弥, 山田雅行, 常田賢一, 魚谷真基: 超高密度常時微動計測に基づく和歌山県串本町における津波来襲地域でのサイト増幅特性の評価, 第 14 回日本地震工学シンポジウム論文集, 日本地震工学会, pp.3689-3697, 2014.
- 19) 野津厚: 南海トラフの地震 ($M_w9.0$) を対象とした SPGA モデルによる強震動評価事例, *土木学会論文集 A1*, Vol.69, No.4, pp.I 872-888, 2013.
- 20) 秦吉弥, 山田雅行, 野津厚: SPGA モデルに基づく南海トラフ巨大地震 ($M_w9.0$) による和歌山県串本町での強震波形の評価, *Kansai Geo-Symposium 2013* 論文集, 地盤工学会, No.4-3, pp.129-134, 2013.
- 21) 湊文博, 秦吉弥, 山田雅行, 常田賢一, 鉢田泰子, 魚谷真基: サイト特性を考慮した南海トラフ巨大地震による和歌山県串本町における津波来襲地域での強震動の超高密度予測, 第 59 回地盤工学シンポジウム論文集, 地盤工学会, pp.395-402, 2014.
- 22) Kuwata, Y. and Takada, S.: Instantaneous instrumental seismic intensity and evacuation, *Journal of Natural Disaster Science*, Vol.24, No.1, pp.35-42, 2002.
- 23) 鉢田泰子, 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.
- 24) 国土交通省国土政策局: 5 万分の 1 都道府県土地分類基本調査(那智勝浦・串本), 国土政策局国土情報課ホームページ, 2003. (last accessed: 2015/03/02).
- 25) 国土交通省国土地理院: 土地利用調査データの閲覧・ダウンロード, 地理院地図(電子国土 Web) ホームページ, 2013. (last accessed: 2015/03/02).
- 26) 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.
- 27) 例えば, 大石佑輔, 久保篤規, 高橋宏和, 山品匡史: 高密度常時微動観測から推定される高知平野の表層地盤構造, 日本地球惑星科学連合連合大会 2014 年大会予稿集, Paper No.SSS35-P10, 2014.
- 28) 先名重樹, 安達繁樹, 安藤浩, 荒木恒彦, 藤原広行: 微動探査観測システムの開発, 日本地球惑星科学連合連合大会 2006 年大会予稿集, Paper No.S111-P002, 2006.
- 29) 国土交通省国土地理院: 地理院地図(電子国土 Web), 2015. (last accessed: 2015/03/02)
- 30) 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. (last accessed: 2015/03/02)
- 31) 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. 8-11, 2013.
- 32) 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.
- 33) 秦吉弥, 酒井久和, 野津厚, 一井康二, 丸山喜久, 角田光法: 経験的サイト増幅・位相特性を考慮した強震動推定手法に基づく既往の大規模地震における鳴瀬川堤防沿いでの強震動の評価, 第 32 回地震工学研究発表会講演論文集, 土木学会, Paper No.2-240, 2012.
- 34) 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.
- 35) 秦吉弥, 酒井久和, 静間俊郎, 野津厚, 一井康二, 丸山喜久: サイト特性を考慮した推定地震動に基づく河川堤防の通行機能に着目した被害関数の評価—大規模地震による鳴瀬川堤防の被災を例に—, 第 34 回地震工学研究発表会講演論文集, 土木学会, Paper No.576, 2014.
- 36) 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.
- 37) 長尾毅, 山田雅行, 野津厚: 常時微動 H/V スペクトルを用いたサイト増幅特性の経験的補正方法に関する研究, *構造工学論文集*, 土木学会, Vol.56A, pp.324-333, 2010.
- 38) 秦吉弥, 常田賢一, 林健二: 常時微動 H/V スペクトルを用いたサイト増幅特性の評価に関する試み, *地盤と建設*, 地盤工学会, Vol.31, No.1, pp.125-131, 2013.
- 39) Hata, Y. and Yamada, M.: Evaluation of site amplification and phase effects in Kushimoto Town, Wakayama Prefecture, Japan, *Proc. of 2nd European Conference on Earthquake Engineering and Seismology*, Paper No.631, Istanbul, Turkey, 2014.
- 40) 例えば, 秦吉弥, 一井康二, 常田賢一, 柴尾享, 山田雅行, 満下淳二, 小泉圭吾: アレー計測を利用した道路盛土の地震応答特性の評価, *地盤の環境・計測技術に関するシンポジウム 2010* 論文集, 地盤工学会, pp.21-26, 2010.
- 41) 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.
- 42) Petukhin, A., Irikura, K., Ohmi, S. and Kagawa, T.: Estimation of Q -values in the seismogenic and aseismic layers in the Kinki Region, Japan, by elimination of the geometrical spreading effect using ray approximation, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.93, No.4, pp.1498-1515, 2003.
- 43) 例えば, (社)日本港湾協会: 港湾の施設の技術上の基準・同解説(上巻), 国土交通省港湾局監修, pp.336-341, 2007.
- 44) 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.
- 45) 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.
- 46) 入倉孝次郎, 香川敬生, 関口春子: 経験的グリーン関数を用いた強震動予測方法の改良, *日本地震学会*

秋季大会講演予稿集, No.2, B25, 1997.

- 47) 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.
- 48) 長尾毅, 山田雅行, 野津厚: 設計用入力地震動評価における位相特性の補正方法に関する研究, 土木学会論文集 A1, Vol.68, No.4, pp.I_13-19, 2012.
- 49) Nishimae, Y.: Observation of seismic intensity and strong ground motion by Japan Meteorological Agency and local governments in Japan, *Jour. Japan Association for Earthquake Engineering*, Vol.4, No.3, pp.75-78, 2004.
- 50) Miyake, H., Iwata, T. and Irikura, K.: Source characterization for broadband ground-motion simulation: Kinematic heterogeneous source model and strong motion generation area, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.93, No.6, pp.2531-2545, 2003.
- 51) 例えば, 境有紀, 額綱一起, 神野達夫: 建物被害率の予測を目的とした地震動の破壊力指標の提案, 日本建築学会構造系論文集, No.555, pp.85-91, 2002.
- 52) 水谷武司: 2011 年東北地方太平洋沖地震の津波による人的被害と避難対応, 防災科学技術研究所主要災害調査, 第 48 号, pp.91-104, 2012.
- 53) 照本清峰: 津波避難行動と浸水危険性に関する地域住民の認識と津波避難対策の課題—和歌山県海南市を事例に一, 自然災害科学, Vol.32, No.3, pp.261-278, 2013.
- 54) 土肥裕史, 奥村与志弘, 小山真紀, 湯浅亮, 清野純史: 津波避難初期過程におけるコミュニティのシミュレーションモデルの構築, 土木学会第 69 回年次学術講演会講演概要集, I-350, pp.699-700, 2014.
- 55) 湊文博: 強震動と津波避難に関するハイブリッド評価—南海トラフ巨大地震による和歌山県串本町を例として一, 第 4 回サイエンスインカレ研究発表会要約集, 文部科学省, pp.24, 2015.
- 56) 湊文博, 秦吉弥, 常田賢一, 飯田泰子, 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一, 地域安全学会梗概集 No.35, pp.17-20, 2014.
- 57) 例えば, 北出悟士, 馬場研介: 広村堤防からみる津波避難タワーの有効性について—和歌山県串本町串本地区を参考にして一, 災害復興研究, 関西学院大学災害復興制度研究所, 第 3 号, pp.189-193, 2011.

(2014. 11. 2 受付, 2015. 3. 2 修正, 2015. 3. 3 受理)

HIGH DENSITY PREDICTIONS OF STRONG MOTION IN TSUNAMI ATTACK AREA, KUSHIMOTO TOWN, WAKAYAMA PREFECTURE, JAPAN DURING A SCENARIO EARTHQUAKE WITH $M_w9.0$ ALONG THE NANKAI TROUGH BASED ON THE SMGA MODELS CONSIDERING LOCAL SITE EFFECTS

Fumihiro MINATO, Yoshiya HATA, Masayuki YAMADA,
Ken-ichi TOKIDA, Yasuko KUWATA and Masaki UOTANI

During a scenario earthquake with $M_w9.0$ along the Nankai Trough, not only strong motion but also huge tsunami is predicted in Kushimoto Town, Wakayama Prefecture, Japan. In this study, first, based on the empirical relationship between microtremor H/V spectrum and site amplification factor, the site amplification factors from seismic bedrock to ground surface at the 525 sites in the tsunami attack area were evaluated. Seismic waveforms in the area were then predicted with very high density based on the SMGA models considering the empirical site amplification factors. Using the detailed distribution of several indices due to the predicted seismic waveforms, finally, we discussed the influence which the action of the strong motion has on tsunami evacuation.