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

秦 吉弥¹・湊 文博²・常田 賢一³・青木 伸一⁴・鋤田 泰子⁵・小山 真紀⁶

¹ 正会員 大阪大学助教 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

² 学生会員 大阪大学学生 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

³ フェロー会員 大阪大学教授 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

⁴ フェロー会員 大阪大学教授 大学院工学研究科 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1)

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

⁵ 正会員 神戸大学准教授 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 正会員 岐阜大学准教授 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

静岡県沿岸域は、南海トラフ巨大地震において非常に大きな強震動の作用だけでなく巨大津波の来襲が予想されており、強震動作用中の避難困難時間と強震動作用後の避難所要時間をそれぞれ評価しておくことは重要である。そこで本稿では、まず、静岡県沿岸域の既存強震観測点を対象にした南海トラフ巨大地震による強震動予測を実施し、避難困難時間を評価した。次に、強震動予測地点から周辺の避難所までを対象にした歩行計測実験を行うことで、避難所要時間を評価した。最後に、避難困難時間と避難所要時間の関係性に基づいて、静岡県沿岸域が有する津波避難パフォーマンスの現状に関して議論を行った。

Key Words : tsunami evacuation, strong motion estimation, walking experiment, time management

1. はじめに

静岡県沿岸域(図-1 参照)は、近未来に発生が懸念されている南海トラフ巨大地震において巨大津波の来襲が予想¹⁾されている。一方で、南海トラフ巨大地震の想定震源域の近傍に位置していることから(図-1 参照)、非常に大きな強震動の作用が予想²⁾されており、津波来襲前の強震動の作用が住民等の津波避難行動に大きな影響を及ぼすことも考えられる。強震動作用中に避難行動をとることが困難な時間(いわゆる避難困難時間)を評価しておくことは、当該地域における津波来襲時間から避難困難時間ならびに避難所要時間をそれぞれ差し引いた避難余裕時間を算定し、津波避難施設の新設に関する具体的な根拠とする際などに有効³⁾である。

この点に関して著者ほか⁴⁾は、駿河湾沿岸の相良地区および松崎地区における既存強震観測点を対象に、南海トラフ巨大地震による強震動作用中の避難困難時間の評価を行い、評価手法の違いが避難困難時間の算定結果に

及ぼす影響について定量的な検討を行っている。しかしながら、検討対象とした地域が駿河湾沿岸の僅か2地点に留まっているだけでなく、避難困難時間と避難所要時間の関係性などについても言及されていない。

そこで本稿では、特別セッションの指定課題である「静岡県沿岸域における海岸保全」を考える上で、静岡県沿岸域内において津波来襲予想地域⁵⁾に位置している既存強震観測点(計 14 地点: 図-2 参照)を対象に、南海トラフ巨大地震における強震動シミュレーションを実施し、強震動の作用が津波避難に及ぼす影響について検討を行うとともに、避難困難時間と避難所要時間の関係性についても同時に言及した。

具体的には、まず、現地踏査の結果に基づいて対象とする既存強震観測点を選定し、選定地点における地盤震動特性を評価した。次に、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実施し、選定した地点相当地に作用する強震動を予測するとともに、気象庁計測震度ならびに避難困難時間についても同時に算定した。さ

表-1 静岡県沿岸域における選定観測点と選定避難所の一覧

観測点コード	観測点名
SMD	SK-net下田市東本郷（下田市役所）
MTZ	SK-net賀茂郡松崎町宮内（松崎町役場）
NIZ	SK-net賀茂郡西伊豆町仁科（西伊豆町役場）
TOI	SK-net伊豆市土肥（伊豆市土肥支所）
HDA	SK-net沼津市戸田（沼津市民窓口事務所）
NMD	SK-net沼津市御幸町（沼津市役所）
TGU	田子の浦-S（田子の浦港）
SMZ	清水-S（清水港）
YID	SK-net焼津市本町（焼津市役所）
SGR	SK-net牧之原市相良（牧之原市相良庁舎）
OMZ	東京大学地震研究所御前崎（御前崎市下御前）
HMT	KiK-net浜松（遠州灘海浜公園）
MSK	SK-net浜松市西区舞阪町舞阪（舞阪総合事務所）
ARI	KiK-net新居（湖西市新居町新居）

図-1 南海トラフ巨大地震の震源域と静岡県沿岸域

らに、強震動予測地点から周辺の指定避難場所までの所要時間に関する歩行計測実験を行うことで、避難所要時間を評価した。最後に、避難困難時間に対する気象庁計測震度の関係性、および避難困難時間に対する避難所要時間の関係性についてそれぞれ検討・考察を行うことで、静岡県沿岸域が有する津波避難パフォーマンスの現状に関して基礎的な検討を行った。

2. 選定観測点におけるサイト増幅特性の評価

本研究では、以下に示す条件を全て満足する南海トラフ巨大地震の想定震源域近く・静岡県沿岸域内にある既存強震観測点を机上検討により抽出した。

- ・南海トラフ巨大地震の発生直後に津波の早期来襲が予想されている地域¹⁾に位置していること
- ・公的機関による既存の強震観測点であること
- ・2009年8月11日5時7分に発生した駿河湾を震源とする気象庁マグニチュード6.5の地震(以後、2009年駿河湾の地震と呼ぶ(図-2内に☆印で示すサイト位相

図-2 静岡県沿岸域における選定観測点の分布

図-3 サイト増幅特性(地震基盤～地表)の比較

特性評価地震))による記録が得られていること

上記の机上検討において抽出した既存強震観測点に対して現地踏査(図-2の枠内写真の一例参照)を行い、特殊な環境下(例えば、当該地点相当において予想されている津波来襲高¹⁾よりも現地踏査によって確認した観測点設置の標高が局所的に高い地点など)にある観測点を適宜除外した。その結果、図-2および表-1に示すとおり、本稿において取り扱う静岡県沿岸沿いの既存強震観測点(計14地点)を選定した(以後、選定観測点と呼ぶ)。

図-3は、選定観測点におけるサイト増幅特性の比較である。ここに、本稿でのサイト増幅特性は、いずれも地震基盤～地表相当の地盤震動特性を表している。KiK-net観測点であるHMTおよびARIについては、既存のもの⁵⁾を転用した。一方で、HMTおよびARI以外の選定観測点については、2009年駿河湾の地震による観測記録(図-4参照)に基づいて算定した。具体的には、対象観測点とその周辺のK-NET観測点で同時に得られた2009年駿河湾の地震による観測記録を対象に、伝播経路特性^{6,7)}の違いを考慮したフーリエスペクトルの比率(対象観測点/K-

図-4 2009年駿河湾の地震における選定観測点での同時観測記録(サイト位相特性として採用した地震加速度波形)の比較

NET観測点)を計算し、この比率をK-NET観測点における既存のサイト増幅特性⁵⁾に掛け合わせることで、サイト増幅特性を算定した。

図-3に示すように、サイト増幅特性の特徴(任意の周波数帯における地震動の増幅割合、ピーク周波数、スペクトル形状など)が選定観測点ごとに顕著な差異が見受けられ、静岡県沿岸域における地盤震動特性は一様であるとは言い難い。これは、南海トラフ巨大地震時に、静岡県沿岸域に作用する強震動の特性にも大きな違いが生じる可能性が高いことを示唆するものである。

3. 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²⁾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2)を参照されたい。なお、 Q 値については、佐藤・巽による推定値⁷⁾を採用した。本稿では、この震源モデルにおいて破壊開始点の位置を駿河湾(以後、東側ケースと呼ぶ)もしくは串本沖(以後、西側ケースと呼ぶ)にそれぞれ配置⁴⁾した(図-1参照)。

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⁸⁾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

図-5 水平二成分の予測地震動(同図(a), (b)参照)に基づく避難困難時間の算定例(同図(c)参照)

図-6 避難困難時間の分布(駿河湾ケース)

図-7 避難困難時間の分布(駿河湾ケース)

数, $P(f)$ は伝播経路特性⁶⁾で実数, $G(f)$ はサイト増幅特性(図-3参照)で実数, $\alpha(f)$ 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, $|\alpha(f)|$ 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⁹⁾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二成分への分散を表す係数である $PRITIN$ ⁹⁾水平二成分ともに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⁸⁾. 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 $\alpha(f)$)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), 2009年駿河湾の地震によって選定観測点(計14地点: 図-2参照)において同時

に得られた地震波形(図-4参照)を東側ケースおよび西側ケースにおいて共通採用した. 図-4に示すように, 選定観測点毎の波形形状に差異が確認できることから, 予測強震動の波形形状にも差異が生じる可能性が示唆される.

4. 避難困難時間と気象庁計測震度の関係

図-5(a), (b)には, 強震動予測結果の一例として, 東側ケースにおけるSGRでの予測地震動(水平動)の加速度波形を示す. 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地震動指標値として, 気象庁計測震度および避難困難時間^{9), 10)}をそれぞれ算定した. 具体的には, 水平二成分合成による瞬間計測震度⁹⁾の時刻歴を計算し(図-5(c)の一例参照), 時刻歴内での最大値を気象庁計測震度, 瞬間計測震度が最初に4.0を上回り・最後に4.0を下回るまで(先行研究^{4), 10)}による知見を参考に設定)の連続時間を避難困難時間とそれぞれ定義した. 図-6および図-7には, 東側ケースおよび西側ケースにおける静岡県沿岸沿いでの強震動作用中の避難困難時間の分布を示す.

図-6および図-7に示すように, 各選定観測点でのサイ

ト増幅・位相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)の差異などに起因して、避難困難時間は静岡県沿岸沿いの選定観測点ごとに一様であるとは言い難く、東側ケースではTGU, SMZ, HMT, MSK, ARIにおいて、西側ケースではHMT, MSKにおいてそれぞれ避難困難時間が比較的長くなっている。よって、静岡県沿岸沿いにおける各々の選定観測点が位置する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。特に、HMTおよびMSK付近では、南海トラフ巨大地震の発生シナリオに関わらず、津波避難に関するリスクが比較的高いことが読み取れる。一方で、図-6と図-7を比較すると、西側ケース(図-7参照)よりも東側ケース(図-6参照)のほうが、静岡県沿岸沿いの避難困難時間が全体的に長く算定される傾向にある。

図-8(左)は、予測強震動に基づく避難困難時間(図-6および図-7参照)に対応する気象庁計測震度の関係である。図-8(左)に示すとおり、避難困難時間が長くなるにつれて気象庁計測震度が大きくなる傾向が読み取れる。気象庁計測震度は構造物等の被災程度に関する評価指標の一種であるため、この傾向は、静岡県沿岸域において強震動作用中の避難困難時間が比較的長時間に及ぶ場合、構造物等の被災が強震動作用後の津波避難行動にも大きな影響を及ぼす可能性が高いことを示唆するものである。

5. 避難困難時間と避難所要時間の関係

静岡県沿岸沿いの選定観測点(津波来襲予想地域の中

心付近に位置しており、対象地域を概ね代表していると考えられる地点)から周辺の指定避難場所までの歩行時間(避難所要時間)に関する計測実験を行った。その際、表-1に示すように、地方自治体における津波ハザードマップ等を参考に、津波来襲予想高に対して十分な余裕を有する避難場所を、選定観測点ごとにそれぞれ選定した(以後、選定避難場所と呼ぶ)。歩行計測実験は、本稿の第一著者(35歳男性)を被験者とし、被験者が通常通りの歩行を行った。なお、選定観測点から周辺の選定避難場所までの歩行計測実験を10回繰返し、その平均を避難所要時間として採用した。その結果、計140回に及ぶ平均歩行速度として72m/minが得られた。

図-8(右)は、予測強震動に基づく避難困難時間(図-6および図-7参照)に対応する避難所要時間の関係である。

図-8(右)に示すとおり、避難所要時間に対する避難困難時間の割合(避難困難時間:避難所要時間)に着目すると、概ね1:0.5ならびに1:1以下となる選定観測点は8/28(29%)、および概ね1:2以下となる選定観測点は19/28(68%)となっており、静岡県沿岸域では避難所要時間に対して避難困難時間が一定の割合を占めていることが読み取れる。

ここに、津波避難困難区域の設定等¹⁾では、避難所要時間は地域特性が考慮された変動の時間、避難困難時間は地域特性が考慮されていない一律の時間としてそれぞれ取り扱われているのが現状である。しかしながら、図-8(左)および図-8(右)による知見を踏まえれば、静岡県沿岸域における津波防災(海岸保全)を考える上で、避難所要時間だけでなく避難困難時間についても対象とする地域特性を考慮して適切に設定する必要性が示唆される。

図-8 避難困難時間と気象庁計測震度の関係 (同図(左)), 避難困難時間と避難所要時間の関係 (同図(右))

6. まとめ

本研究では、静岡県沿岸域の津波来襲予想地域を対象に、南海トラフ巨大地震における強震動作用中の避難困難時間と強震動作用後の避難所要時間をそれぞれ評価した。以下に得られた知見を示す。

- (1) 南海トラフ巨大地震において静岡県沿岸域の津波来襲予想地域に作用する強震動の特性(気象庁計測震度や避難困難時間)は一樣と見なすことはできない。
- (2) 避難困難時間と気象庁計測震度には概ね正の相関が確認できることから、避難困難時間が比較的長時間に及ぶ場合、構造物等の被災が強震動作用後の避難行動にも大きな影響を及ぼす可能性が高い。
- (3) 避難所要時間に対して避難困難時間は一定の割合を占めていることから、静岡県沿岸域における津波防災を考える上で、避難所要時間だけでなく避難困難時間についても対象とする地域の特性を考慮して適切に設定する必要性が高い。

今後は、本稿で取り扱っていない津波来襲予想時間も含めたより詳細な検討を実施することで、静岡県沿岸域における津波防災に貢献していきたいと考えている。

謝辞：本研究では、首都圏強震動総合ネットワーク(静岡県 SK-net)、港湾地域強震観測、東京大学地震研究所、(国研)防災科学技術研究所 K-NET/KiK-net による地震観測波形データを使用しました。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。

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)、津波断層モデル編—津波断層モデルと津波高・浸水域等について一、内閣府 HP, 2012. (last accessed: 2016/03/27)
- 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)、強震断層モデル編—強震断層モデルと震度分布について一、内閣府 HP, 2012. (last accessed: 2016/03/27)
- 3) 秦吉弥, 湊文博, 常田賢一, 小山真紀, 鉦田泰子, 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一、土木学会論文集 B3, Vol.71, No.2, pp.L 671-676, 2015.
- 4) 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一、構造工学論文集, 土木学会, Vol.62A, 2016.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) Kuwata, Y. and Takada, S.: Instantaneous instrumental seismic intensity and evacuation, *Journal of Natural Disaster Science*, Vol.24, No.1, pp.35-42, 2002.
- 10) 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.
- 11) 例えば, 稲田健二：和歌山県の津波避難困難地域と津波対策について, 平成 27 年度近畿地方整備局研究発表会論文集, 防災・保全部門 No.11, 2015.

(2016.2.4 受付)

EFFECTS OF ESTIMATED STRONG MOTION ON TSUNAMI EVACUATION IN COASTAL AREAS, SHIZUOKA PREFECTURE, JAPAN, DURING A SCENARIO EARTHQUAKE WITH M_w 9.0 ALONG THE NANKAI TROUGH

Yoshiya HATA, Fumihiro MINATO, Ken-ichi TOKIDA,
Shin-ichi AOKI, Yasuko KUWATA and Maki KOYAMA

During a scenario earthquake with M_w 9.0 along the Nankai Trough, not only strong motion but also huge tsunami is predicted in Shizuoka Prefecture, Japan. In this study, first, seismic waveforms at station sites for ground motion observation in the coastal area were estimated based on the SMGA models considering local site effects. Using non-evacuation time based on the time history of instrumental seismic intensity, the effect of the estimated strong motion on tsunami evacuation was then discussed. Finally, in order to evaluate evacuation time from the strong motion estimation sites to designated refuge places, walking experiments were carried out. The constructed relationship between the evacuation time and the non-evacuation time will be useful for conventional seashore preservation in Shizuoka Prefecture.