

短期間の臨時地震観測に基づくサイト増幅特性の広域・高密度評価に関する新しい試み — 高知県南国市の沿岸域を例として —

秦 吉弥¹・中嶋 唯貴²・大川 雄太郎³・山内 政輝⁴

¹ 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

² 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)

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

³ 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

⁴ 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

本稿では、南海トラフ巨大地震において強震動の作用と津波の早期来襲が予想されている高知県南国市の沿岸域において高密度地震観測(計51地点)を臨時実施し、得られた観測記録を用いてサイト増幅特性を広域かつ高密度に評価した結果について報告する。その際、臨時地震観測を比較的短期間で済ませること、およびサイト増幅特性の評価精度を確保することを目的として、沿岸域周辺の既存強震観測点の近傍においても臨時地震観測を同時実施した。評価した沿岸域におけるサイト増幅特性は今後の強震動予測への利活用が可能であるとともに、提示したサイト増幅特性の評価プロセスは他地域への応用が期待できる。

Key Words : *temporary earthquake observation, site amplification factor, permanent station*

1. はじめに

2011年東北地方太平洋沖地震(M_w 9.0)の発生を受け、南海トラフにおいても、同程度の巨大地震(南海トラフ巨大地震と呼ぶ)を想定した強震動や津波の評価がそれぞれ行われている。この点に関して、中嶋・岡田¹⁾は、高知県南国市の津波来襲予測地域(以後、対象地域と呼ぶ：図-1参照)において、強震動と巨大津波の複合災害を想定した人的被害の推定手法を提案している。その提案手法において、予測される強震動の作用が津波避難に及ぼす影響に関する検討²⁾は、重要な検討項目の一つである。一般的に、強震動を予測する際、対象地点の地震動の特性は震源特性・伝播経路特性・サイト増幅特性の三つの要素からなると考える。この三つの要素の中でサイト増幅特性は、大規模地震の諸量に依存せず、対象とする地点における固有の地盤特性であると考えられ、十分な調査・観測などを行うことで、強震動の予測精度の向上が期待できる要素^{3,4)}である。

サイト増幅特性を精度良く評価するための手法の一つとして、臨時地震観測に基づく手法⁵⁾が挙げられる。当

該手法は、サイト増幅特性の高精度評価が期待できる反面、臨時観測期間が中小地震の発生状況に大きく依存するため、大規模地震後の余震観測を除いて、一般的に評価に至るまで長期間に及ぶことも少なくない。さらに、臨時地震観測に基づく手法は、スペクトルインバージョンに基づく手法⁶⁾とスペクトル比に基づく手法⁷⁾に大別できる。前者の手法を仮に採用した場合には、比較的規模の大きな地震による記録が必要不可欠となり、観測期間が長期に及ぶ可能性が高い。一方で、後者の手法を採用した場合にも、中小地震による記録が一般に複数必要となり、観測期間が長期に及ぶ可能性を有している。

上述した背景を踏まえ、本稿では、短期間の臨時地震観測によって得られた記録に基づき、サイト増幅特性を精度良く評価することを試みた結果について報告する。具体的には、対象地域内(計51地点)ならびに周辺の既存強震観測点の近く(計2地点)において臨時地震観測をそれぞれ実施した。そして、得られた地震観測記録に対してスペクトル比に基づく手法を適用することで、対象地域内に広域かつ高密度に設けた臨時観測点(51地点)ごとのサイト増幅特性を評価し、その適用性を確認した。

2. 高密度臨時地震観測

図-2 および図-3 に対象地域(津波来襲予想地域⁸⁾)および南国市役所周辺(津波非来襲予想地域⁸⁾)に設けた臨時地震観測点(地震アレー観測地点)の分布を示す。図-2 および図-3 に示すように、対象地域内に計 51 地点の臨時地震観測点を設けた。さらに、1.で述べたとおり、短期間でサイト増幅特性を比較的精度良く評価することを試みるため、二つの既存強震観測点(K-NET 土佐山田⁹⁾と南国市役所¹⁰⁾)の周辺にも臨時地震観測点を設けた。アレー観測の期間は、[イ]2015年8月17日～8月30日の約14日間(対象地域内の20地点：図-2参照)、[ロ]2015年8月30日～9月13日の約15日間(対象地域内の31地点：図-2参照)、[ハ]2015年8月17日～9月13日の約28日間(K-NET 土佐山田(図-1参照)周辺および南国市役所(図-1および図-2参照)周辺)である。

ここに、同時観測(アレー観測)を採用したのは、観測地点で得られる同じ地震記録を用いて、サイト増幅特性を評価(3.で後述)することで、観測点間のサイト増幅特性の差異を直接的に評価するためである。地震観測システムは、既往研究¹¹⁾を参考に構築した。具体的には、地震計は加速度計(一体型微動探査兼地震計機器¹²⁾もしくはボアホール型地震計¹³⁾を採用し、データロガーは白山工業(株)製LS-7000XTを共通採用した。また、観測条件として、サンプリング周波数は100Hz、観測方向は三成分(N-S, E-W, U-D方向)とし、トリガー加速度レベルは設定せずに常時観測を継続するシステムを採用した。

その結果、日向灘を震源とする地震(2015/08/26 07:51 30 km M_j 5.2 : EQ-1(図-1参照)と以後呼ぶ)による観測記録が対象地域内20地点(図-2参照)とK-NET 土佐山田周辺・南国市役所周辺の計22地点で同時に得られた。一方で、四国沖を震源とする地震(2015/09/02 16:07 34km M_j 4.5 : EQ-2(図-1参照)と以後呼ぶ)による観測記録が対象地域内31地点(図-2参照)とK-NET 土佐山田周辺・南国市役所周辺の計33地点で同時に得られた。なお、既存強震観測点(K-NET 土佐山田・南国市役所)では、EQ-1およびEQ-2による観測記録が残されていない。

3. サイト増幅特性の評価

図-4は、対象地域内に広域かつ高密度に設けた臨時地震観測点(P-01～51：図-2参照)ごとのサイト増幅特性、スペクトルインバージョンに基づく手法により評価された既存のK-NET土佐山田におけるサイト増幅特性¹⁴⁾、およびスペクトル比に基づく手法により評価された既存の南国市役所におけるサイト増幅特性¹⁵⁾を重ね合わせたもの

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。対象地域内におけるサイト増幅特性は、二つの臨時観測点(P-01～51とK-NET土佐山田周辺)で同時に得られたEQ-1もしくはEQ-2による観測記録に基づいて評価した。具体的には、同時観測記録を対象に、距離の違いによる補正^{16,17)}の違いを考慮したフーリエスペクトルの比率(P-01～51/K-NET土佐山田周辺：図-5参照)を計算し、この

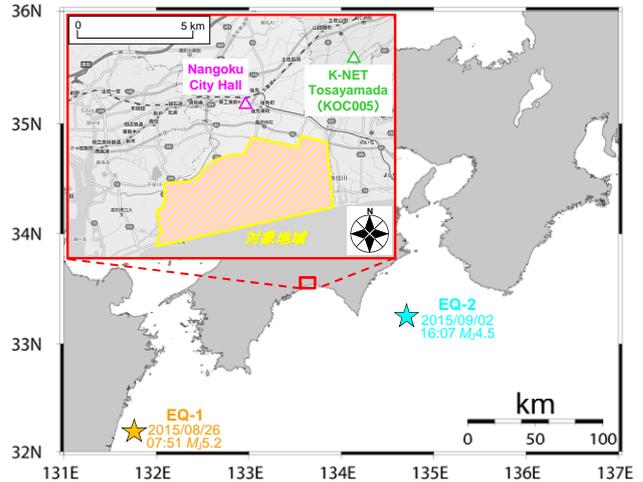


図-1 南国市沿岸域とその周辺観測点で得られた地震イベント

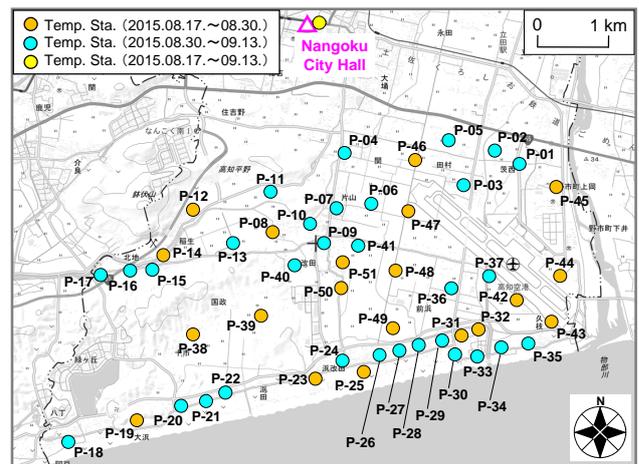


図-2 臨時地震観測点の分布(地形図に加筆)

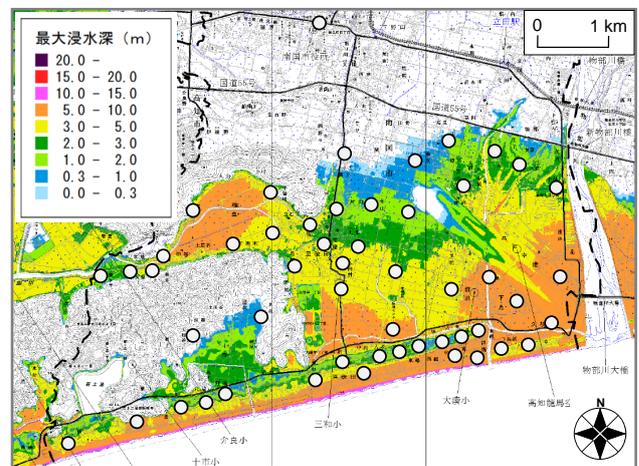


図-3 臨時地震観測点の分布(津波浸水予想図⁸⁾に加筆)

比率をK-NET土佐山田における既存のサイト増幅特性に掛け合わせることによって評価した。

図-4に示すように、サイト増幅特性の特徴の一つとしてピーク周波数が概ね3~4Hz付近および6~7Hz付近にそれぞれあるものの、スペクトル形状などの他の特徴は臨時地震観測点ごとに大きく異なっており、対象地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おいて対象地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。

ここに、上記で評価した対象地域内(P-01~51)のサイト増幅特性に関する適用性について考察を行う。図-6は、観測地震動により算定されたフーリエスペクトルの比率(南国市役所/K-NET土佐山田)を、[A]2011~2015年の地震(ただし、EQ-1およびEQ-2を含まない)による数多く記録に基づく既存強震観測点同士のケース(Case_A)、[B]EQ-1による記録に基づく臨時地震観測点同士のケース(Case_B)、[C]EQ-2による記録に基づく臨時地震観測点同士のケース(Case_C)についてそれぞれ比較を行ったものである。図-6に示すように、Case_Aのスペクトル比(平均)に対してCase_BおよびCase_Cのスペクトル比は、表示周波数帯域(0.2~10Hz)において比較的良い一致を示している。これらの一致度は、対象地域における臨時地震観測点同士(P-01~51とK-NET土佐山田周辺)のスペクトル比(図-5参照)に関する適用性を示唆するものである。すなわち、Case_Aのように複数の地震による観測記録に基づいてスペクトル比(サイト増幅特性)を評価することが本来望ましいが、現地での観測条件などの都合上、Case_BやCase_Cのように一つの地震による観測記録に基づいてスペクトル比(サイト増幅特性)を評価する場合には、既存強震観測点でこれまでに数多く得られている記録に基づいて算定された平均的なスペクトル比に対する類似性を予め確認することで、比較的短期間の臨時地震観測によってサイト増幅特性が一定の精度により評価可能になると考えられる。その際、二つ以上の既存強震観測点(ともに対象とする地域・地点の周辺に位置)において同時に得られた記録が必要となるが、K-NET/KiK-net観測点⁹⁾以外の強震観測点¹⁰⁾で得られた中小地震による記録は一般的に早期公開されないため、本稿のように既存強震観測点の周辺に臨時地震観測点を設けることが有効である。

4. サイト増幅特性の特徴

図-7は、サイト増幅特性の指標の一つであるSAF(Site Amplification Factor)値¹⁹⁾を、対象地域内の計51地点(P-01

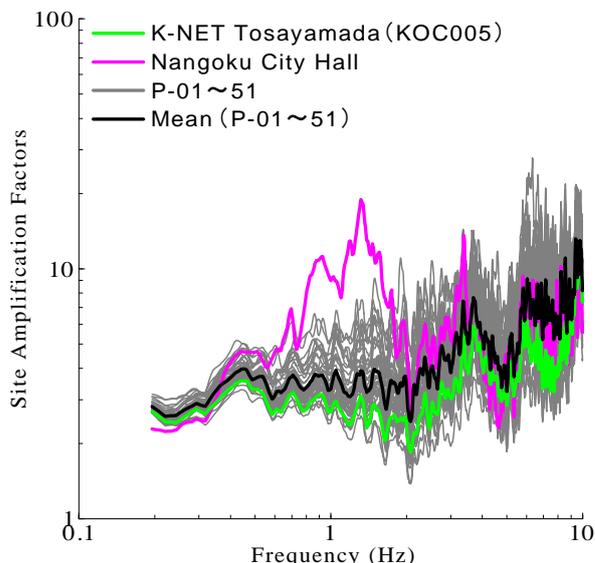


図-4 サイト増幅特性(地震基盤~地表)の比較

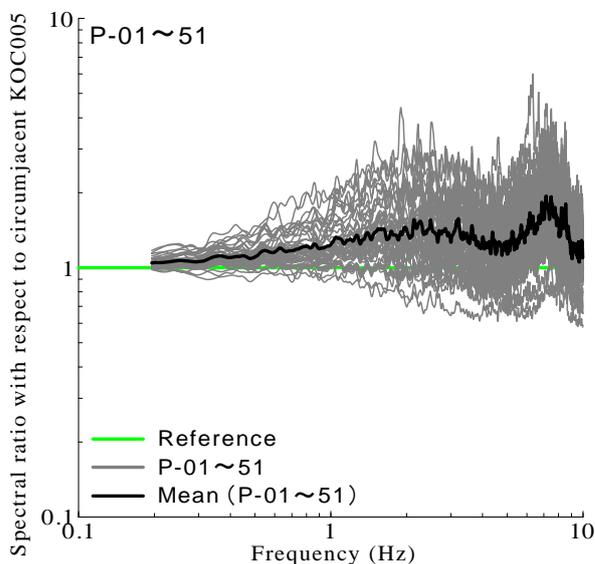


図-5 スペクトル比の比較(対象地域内)

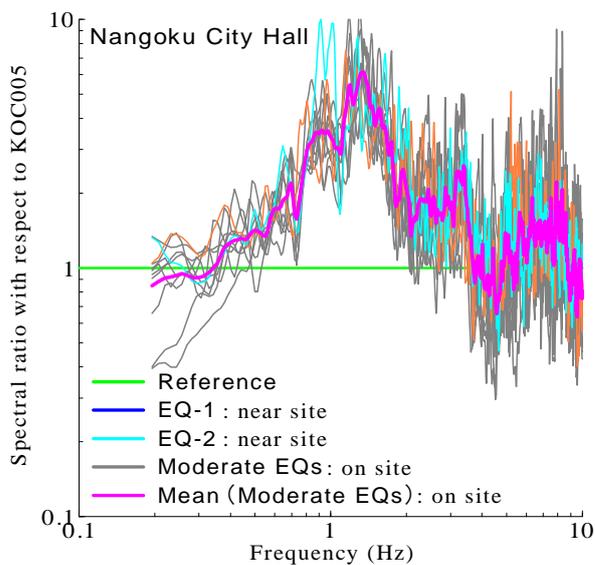


図-6 スペクトル比の比較(南国市役所)

～51)についてプロットしたものである。SAF値は、サイト増幅特性の二深度間(基準地盤Bと地震動推定深度G)における比率の常用対数を取り、所定の周波数範囲内において積分した値であり、既往のDGS値²⁰⁾を参考に次式で表される。

$$SAF = \sum \log \left(\frac{G(f)}{B(f)} \right) \cdot \Delta f \quad (1)$$

ここに、 $B(f)$ は任意の周波数帯における地震基盤でのサイト増幅特性の値(=1(固定値))、および $G(f)$ は任意の周波数帯における地盤地表面でのサイト増幅特性の値である。本検討では、積分区間となる周波数範囲として、強震動作用中の避難困難時間に比較的大きな影響を及ぼす周波数帯域²¹⁾の区間(0.3-2Hz)を採用した。

図-7に示すように、対象地域内におけるSAF値の分布が一様とはなっておらず、対象地域西側よりも東側のほうがSAF値が比較的大きな値を示す傾向があり、高知空港南側ではSAF値が特に大きな値を示している。

図-8、図-9、図-10、図-11は、①国土地理院旧地形図、②産総研地質図²²⁾、③国交省表層地質図²³⁾、④国交省地形分類図²³⁾による区分に対して、対象地域に設けた51地点に及ぶ臨時地震観測点の位置情報(P-01～51：図-2参照)を同じ図郭上で重ね合わせたものである。図-7と図-8～図-11を比較すると、各種分類図(図-8～図-11参照)の中で、評価したサイト増幅特性(図-7参照)に対して明らかな関係性を示すものを読み取ることはできない。すなわち、既存資料に基づいた机上検討だけでは、対象地域での地盤震動特性に関するゾーニングなどが非常に困難であることを裏付ける結果が得られた。

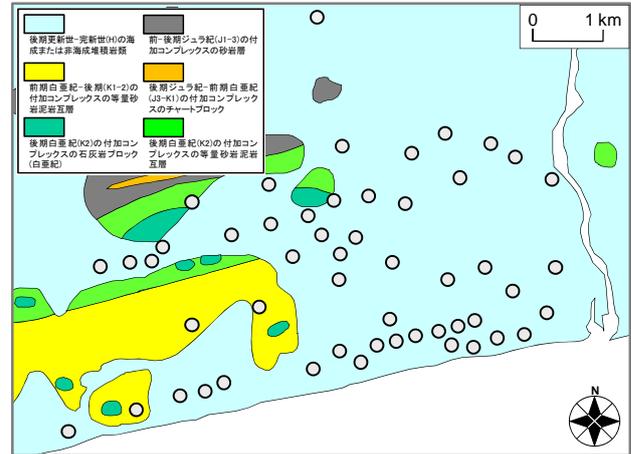


図-9 臨時地震観測点の分布(産総研地質図²²⁾に加筆)

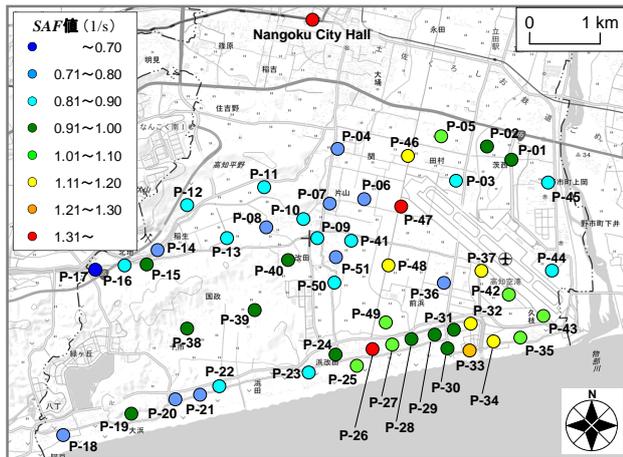


図-7 対象地域内におけるSAF値の比較

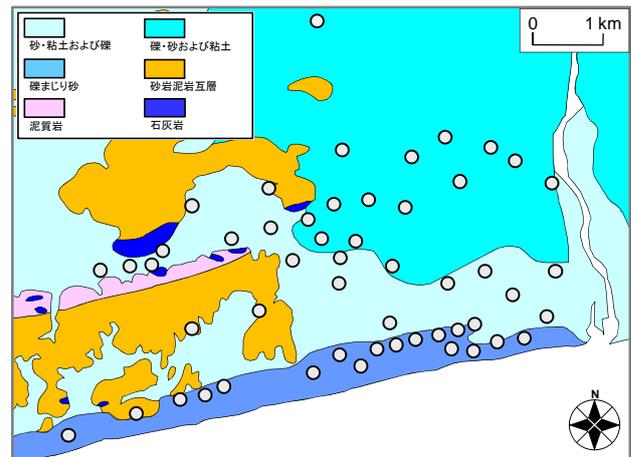


図-10 臨時地震観測点の分布(表層地質図²³⁾に加筆)

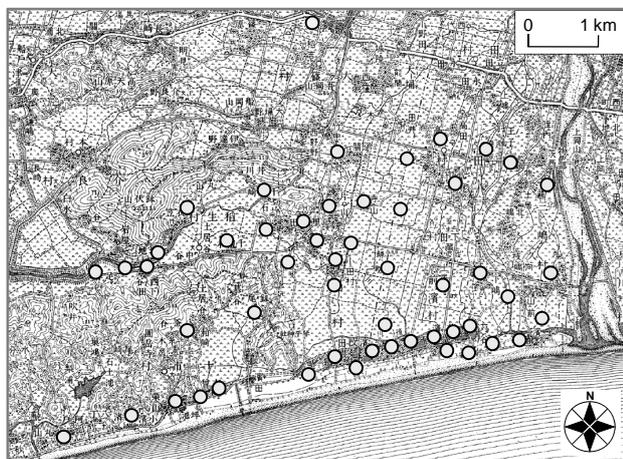


図-8 臨時地震観測点の分布(旧地形図に加筆)

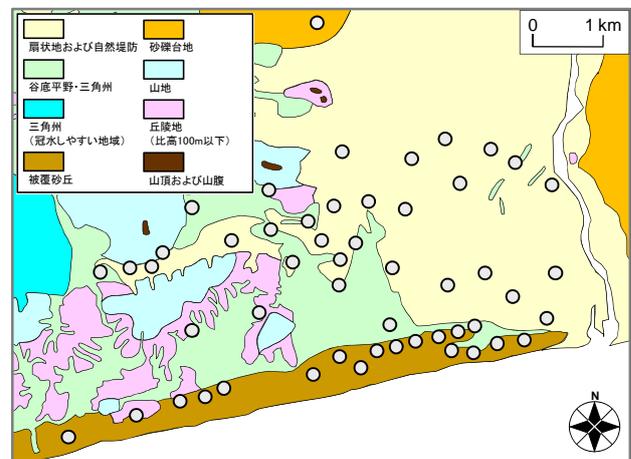


図-11 臨時地震観測点の分布(地形分類図²³⁾に加筆)

5. まとめ

本稿では、南海トラフ巨大地震時に津波の早期来襲が予想されている高知県南国市の沿岸域において臨時地震観測を広域かつ高密度に行い、得られた結果に基づいて当該地域におけるサイト増幅特性を評価した。得られた知見を以下に示す。

- (1) 中嶋・岡田(2015)によって地震動と津波の複合災害を考慮した人的被害の推定が行われている南国市の沿岸域では、臨時地震観測(計51地点)により得られた記録に基づいて評価したサイト増幅特性(特にスペクトル形状)に有意な差異が確認できる。
- (2) 沿岸域におけるサイト増幅特性(地震基盤～地表)は、地形や地質による机上分類に対して、明らかな関係性を見出すことはできない。

一方で、短期間の臨時地震観測によって得られた記録に基づいてサイト増幅特性を一定の精度で評価するための方策を、以下に整理して述べる。

- (3) 対象とする地点の周辺に位置する複数の既存強震観測点を選定し、対象とする地点と選定観測点の近くにおいてそれぞれ臨時地震観測を開始する。
- (4) 上記(3)で選定した複数の強震観測点同士でこれまでに(臨時地震観測の実施前までに)得られている数多くの観測地震動に対してスペクトル比を各々計算するとともに、その平均を算定する。
- (5) 上記(3)において得られた観測地震動に対する選定観測点(もしくは選定観測点近く)でのスペクトル比を、中小地震が発生する度に計算する。
- (6) 上記(4)の平均スペクトル比に対する上記(5)のスペクトル比の比較を行い、類似性を確認する。仮に、類似性が確認できた場合には上記(3)の臨時地震観測を終了し、類似性が確認できなかった場合には上記(3)の臨時地震観測を継続する。
- (7) 上記(6)において類似性が確認できるきっかけとなった地震イベントにおける対象とする地点でのスペクトル比(対象とする地点/選定観測点(もしくは選定観測点近く))を計算し、これに選定観測点における既存のサイト増幅特性を掛け合わせることによって、対象とする地点におけるサイト増幅特性を評価する。

上記の一連の手順を踏むことによって、対象とする地点におけるサイト増幅特性の評価に関して短期間化を図ることができる。さらに、数多くの臨時地震観測点を同時に設けることで、サイト増幅特性の評価に関する高密度化や広域化などを図ることも期待できる。今後は、南国市以外の地域を対象に、同様のアプローチを採用することで適用事例を増やしていきたいと考えている。

謝辞：高知県震度情報ネットワークシステムによって得られた南国市役所での地震観測波形データを高知県および南国市よりご提供していただきました。(国研)防災科学技術研究所が管理するK-NET土佐山田によって得られた地震観測波形データを利用しました。臨時地震観測などの実施にあたっては、南国市の住民・関係者の皆様に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) 中嶋唯貴, 岡田成幸: 震動及び津波の複合災害を想定した人的被害推定手法の提案, 日本建築学会北海道支部研究報告集, No.88, pp.101-104, 2015.
- 2) 秦吉弥, 湊文博, 山田雅行, 鎌田泰子, 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.
- 3) 後藤浩之, 澤田純男: 地震動予測の現状と課題, 地盤工学会誌, Vol.60, No.3, pp.10-11, 2012.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 例えば, 秦吉弥, 門田浩一, 矢部正明, 池田隆明: スペクトルインバージョンに基づくサイト増幅特性に関する評価—2016年熊本地震による大分県内の被災地を例として—, 地盤工学会誌, Vol.65, No.10, 2017. [掲載決定]
- 7) 例えば, 中尾吉宏, 片岡正次郎: 平成28年熊本地震の余震観測に基づくサイト増幅特性の分析, 第20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.251-256, 2017.
- 8) 南国市: 津波浸水予想図(南海トラフの巨大地震による震度分布・津波浸水予測について(第二弾)), 危機管理課ホームページ, 2013. (last accessed: 2017/09/05)
- 9) Aoi, S., Kunugi, T., and Fujiwara, H.: Strong-motion seismograph network operated by NIED: K-NET and KiK-net, *Journal of Japan Association for Earthquake Engineering*, Vol.4, No.3, pp.65-74, 2004.
- 10) 西前裕司: 気象庁・地方公共団体における震度観測および強震観測について, 日本地震工学会大会—2003梗概集, pp.特58-59, 2003.
- 11) 秦吉弥, 後藤浩之, 吉見雅行, 古川愛子, 盛川仁, 池田隆明, 香川敬生: 高密度臨時地震観測に基づく益城町の市街地における地盤震動特性の広域評価, 第60回地盤工学シンポジウム論文集, 地盤工学会, pp.165-172, 2016.
- 12) 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.
- 13) 秦吉弥, 野津厚, 中村晋, 高橋良和, 後藤浩之: 拡張型サイト特性置換手法に基づく2011年東北地方太平洋沖地震による新幹線橋梁被災地点での地震動の

- 推定, 第 14 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.227-234, 2011.
- 14) 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.
 - 15) 秦吉弥, 中嶋唯貴, 湊文博, 鉦田泰子, 小山真紀, 常田賢一: 短期間の臨時地震観測によりサイト増幅特性を広域評価する試み—南海トラフ巨大地震における高知県南国市の津波来襲予想地域を例として—, 第 51 回地盤工学研究発表会講演概要集, pp.1899-1900, 2016.
 - 16) 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.
 - 17) 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.
 - 18) 例えば, Nishimae, Y.: Observation of seismic intensity and strong ground motion by Japan Meteorological Agency and local governments in Japan, *Journal of Japan Association for Earthquake Engineering*, Vol.4, No.3, pp.75-78, 2004.
 - 19) Hata, Y., Ueda, Y., Minato, F., Ikeda, T., Fukushima, Y., Tokida, K. and Yoshida, T.: Evaluation of 'SAF value' at reclaimed land in residential area based on seismic array observation with very high dense spatial location, *Proc. of the 5th International Symposium on the Effects of Surface Geology on Seismic Motion*, Taipei, Taiwan, Paper No. P125A, 2016.
 - 20) 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.
 - 21) 湊文博, 秦吉弥, 鉦田泰子, 小山真紀, 中嶋唯貴: 津波避難困難時間に影響を及ぼす地震動の周波数帯域に関する基礎的検討, 地域安全学会論文集, No.31, 2017. [掲載決定]
 - 22) (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. (last accessed: 2017/09/05)
 - 23) 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(高知), 国土政策局国土情報課ホームページ, 2003. (last accessed: 2017/09/05)

(2017.9.6 受付)

**EVALUATION OF SITE AMPLIFICATION FACTORS
WITH VERY HIGH DENSITY AND WIDE AREA
IN COASTAL NANGOKU CITY, KOCHI PREFECTURE, JAPAN,
BASED ON TEMPORARY SEISMIC OBSERVATION WITH SHORT PERIOD**

Yoshiya HATA, Tadayoshi NAKASHIMA, Yutaro OKAWA and Masaki YAMAUCHI

In order to evaluate site amplification factor with high accuracy, seismic observation at a site of interest is very important. In general, however, obtainment of the observation records takes long periods. Thus, we approached the evaluation of site amplification factors at 51 sites in coastal area, Nangoku City, Japan, based on the temporary seismic observation with short period. The proposed workframe in this study will be useful for evaluation of site amplification factor with high accuracy and short period. The evaluated site amplification factors in the coastal area can also contribute to future estimation for strong motion.