常時微動観測による地盤の揺れやすさリスク 評価法に関する研究

中村 友紀恵¹・原 忠²・山田 雅行³

1学生会員 高知大学 総合人間自然科学研究科 (〒783-8502 高知県南国市物部乙 200)

E-mail:u.nori.kei.321@gmail.com

²正会員 高知大学教授 防災推進センター (〒783-8520 高知県高知市曙町 2-5-1)

E-mail:haratd@kochi-u.ac.jp

³正会員 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 丁目 3 番 20 号) E-mail:yamadams@newjec.co.jp

発生確率の高い南海トラフ地震では西日本一帯で甚大な被害が予測され、太平洋沿岸では強い揺れと津 波の発生が懸念されている.高知県は約8割を山地が占め、人口・産業が平野部に集中する.一方、頻発 する風水害やそれに伴う河川の氾濫により軟弱な地盤で形成された箇所が多く、揺れや津波避難など地震 防災対策を検討するにあたり、地盤の脆弱性や揺れやすさを把握する必要がある.本研究では、揺れと津 波の複合災害が懸念される複数の自治体を対象に常時微動観測を行い、H/V スペクトルの卓越周期とピー ク振幅による分析から地盤の堆積構造を推定した.さらに、得られた結果をコンターで表現し、対象地域 地盤の揺れやすさリスクを面的に評価する方法を提案し、その妥当性をH/V スペクトル比の積分値で評価 した.

Key Words: microtrenor, H/V sprctral ratio, shaking hazard, risk evaluation

1. はじめに

近年,世界的に地震活動が活発化している.我が国に おいても、2011年東北地方太平洋沖地震、2016年熊本 地震などマグニチュードが7を上回る大地震が発生して おり、西日本一帯では南海トラフ地震による甚大な被害 が予測されている¹⁾.2016年熊本地震では、2度の強い 揺れにより家屋の倒壊が多発し、熊本市西区や益城町中 心部では海岸埋立地や河川氾濫部において液状化による 被害も顕著にみられた²⁾.

一般的に、地震の揺れの強弱は震源からの距離³や 地盤の脆弱性に依存することが知られている⁴⁾.特に 平野部に広く分布する軟弱地盤地域では、地点のわずか な違いにより地盤の成層構造が大きく異なり、地震動の 増幅は局所的に異なるが、建設年代の古い埋立の履歴や 地盤造成など表層の局所的な地盤の改変は、土地条件図 や地形地質分類図で示された大局的な情報のみでは判断 できない.

通常地盤の堆積構造を把握するには、ボーリングなど の原位置試験から判断する場合が多い.ボーリングコア の詳細な分析や標準貫入試験結果との併用により、精度 の良い地盤構造の分析が可能であるが、平野部全域を包 括するような面的な地盤構造の把握には費用や調査期間 の点から適切性に欠ける.

常時微動観測は、どのような場所においても観測可能 な特徴を有し、1~20Hz 程度の微小振幅を計測すること で地盤の堆積構造を判断することが可能である⁵.

常時微動 HV スペクトル比の活用は中村[®]により提唱され,地盤の増幅特性の評価に関して多くの研究者が 観測・検証を実施している^{例えば 7 ®}.長尾ら[®]は,常時 微動 HV スペクトル比と地震動 HV スペクトル比のピ ーク値がほぼ一致することを明らかにし,常時微動 HV スペクトル比の卓越周期・ピーク振幅を地盤特性の評価 に用いること示している.原らは^{10,11,12},土地条件の 異なる地域を対象とした常時微動観測を行い,地盤の堆 積構造の違いによる揺れやすさリスクを HV スペクト ル比の卓越周期とピーク振幅で整理している.

本研究は、はじめに高知県内の土地条件の異なる複数 の海岸平野部を対象に常時微動観測を行い、得られた HV スペクトル比の卓越周期とピーク振幅の関係から地 盤の堆積構造を推定する.つづいて、常時微動観測結果 と地盤種別との関係から、軟弱地盤の揺れやすさのリス

クを5段階に判定する方法を試みる.最後に提案方法の 妥当性を検証するため、HV スペクトル比の積分値を求 め、リスク評価結果との関係性を比較する.

2. 地盤の揺れやすさリスク評価の方法

(1) 対象地での常時微動観測

常時微動観測は白山工業株式会社製微動計 JU210 を用 いた. 各地点 11 分間の観測を行い、得られたデータか らH/Vスペクトル比を算出した.

(2) H/V スペクトル比の算出

HV スペクトル比の算出は、40.96秒間のデータを5区 間抽出し、その平均値とした.水平成分に関しては、直 交する2成分 (NS, EW) の相乗平均とした.

(3) 卓越周期・ピーク振幅の読み取り

算出した HV スペクトル比の振幅と周期が最も卓越 する周期と振幅を読み取った.最大相当のピークが1つ 以上ある場合は長周期側のピークを読み取ることで地盤 の揺れやすさリスクを算出する際の最大のリスクを想定 した.



図-1 地盤分類図(上:従来法,下:提案法)



図-2 コンター図のイメージ

(4) 地盤の堆積構造の推定

H/V スペクトル比の卓越周期とピーク振幅を読み取る ことで地盤の堆積構造を推定する. 周期は長周期成分が 卓越し、ピーク振幅が大きい地盤ほど軟弱地盤で、周期 は短周期成分が卓越し、ピーク振幅が小さいほど堅固な 地盤であることが分かっている13.本報では0.6秒以上 の周期を長周期とし、軟弱地盤と推定される地盤で揺れ やすい、0.2 秒未満の周期を短周期とし、堅固な地盤と 推定される地盤で揺れにくいものと判断する.

(5) 地盤の揺れやすさリスク評価方法

得られた常時微動観測結果に基づき地盤の揺れやすさ リスク評価を試みた、 簡便な地盤の分類法の一例として、 原ら¹⁴⁾ が提案する道路橋示方書耐震設計の地盤種別を 考慮する H/V スペクトル比の卓越周期とピーク振幅の Type 別9段階分類法(図-1)がある.この地盤分類法は 土木構造物の設計への利用を目的としているため、地域 住民の意識啓発を目的とした地盤の評価方法としては情 報量が多い、そこで、本研究では地盤の分類方法を9段 階から5段階に見直し、地盤分類が1~5になるに従い 地盤の揺れやすさリスクが 1~5 へと高くなり、地盤の 揺れやすさリスクが低いものを青色、高いものを赤色と した. さらに、これらの結果をコンターで表した(図-2). コンター図は OGIS2.16.2 を用いて逆距離荷重補間 (IDW 法) により作成した. コンター図で表すことに より常時微動 H/V スペクトル比で得られた点のデータ を面的で表すことが可能となる. 地盤の揺れやすさリス クを面的に表すことにより地域の局所的な地盤の変化を 表すことができ, 揺れやすさマップや住宅の耐震化促進 等の地震防災対策に役立てることが期待される.

3. 対象とする地域での常時微動観測

(1) 調査対象地の選定

常時微動観測の調査対象地は人口が密集する複数の平 野部のうち、南海トラフ地震発生時に大きな揺れ、建物 被害、その後の津波襲来による複合的な災害が懸念され ている高知県内の中土佐町(久礼地区,上ノ加江地区,



図-3 高知県調査対象地



図-4 常時微動観測地点と土地分類図(国土地理地図に加筆¹⁵)

土佐市,香南市を対象とした.なお,土佐市は波介川の 氾濫が多発する地域も対象としている(図-3).

(2)調査対象地の概要

a)中土佐町

高知県の中西部に位置し、土佐湾に面する中土佐町は、 久礼地区、上ノ加江地区、大野見村が合併し現在の中土 佐町に至る.常時微動観測の調査対象地は海岸沿いに面 している久礼地区と上ノ加江地区をとした.久礼地区は 西部に山地が広がり、東部に近づくにつれて三角州と砂 洲・砂堆が広がっている.上ノ加江地区は山地より海岸 部に近づくにつれて砂洲・砂堆が広がっている.

南海トラフ地震での被害予測¹⁶ L2) は海岸沿いに面 している久礼地区,上ノ加江地区において,建物総数 8732 棟に対して揺れによる建物被害は 1746 棟,津波に よる建物被害は 3650 棟.人的被害は人口 7011 人に対し て建物倒壊による死傷者数 115 人,津波による死者数 225 人との甚大な被害が想定されている.過去の災害履 歴も詳細に残っており,1707 年の宝永地震(マグニチ ュード 8.6)では 20m余りの津波が襲来し,海岸平野部 のほぼ全域が流失したという記録もある.

b)土佐市

高知県のほぼ中央に位置する土佐市は、仁淀川下流の 右岸を占め、土佐市内部を流れる波介川付近を三角州、 海岸沿いは砂洲・砂堆が広がっている.

南海トラフ地震での被害予測¹⁷⁾(L2)は建物棟数 19084棟に対して揺れによる建物被害は1300棟,津波に よる建物被害 3100棟.人的被害は人口 30009人に対し て建物倒壊による死傷者数 90人,津波による死者数 2400人との甚大な被害が想定されている.1854年の安 政地震(マグニチュード8.4)での被害は,倒壊 3082棟, 半壊 9274棟,11mの津波が襲来し家屋流失 3202棟,死 者 372人であった.波介川の氾濫に関しては昭和 50年 の台風5号による氾濫をはじめ,記録的な集中豪雨や台 風の度に堤防の決壊等による氾濫の報告がされている.

c)香南市

高知県の東部に位置する香南市は,西部に物部川,中 部に香宗川,東部に夜須川が流れている.香南市の北東 部は山地が広がり,物部川の左岸側は扇状地,香宗川流 域は海岸平野,海岸沿いには砂洲・砂堆が広がっている.

南海トラフ地震での被害予測¹⁸⁾ (L2) は建物棟数 21400棟に対して揺れによる建物被害は 4800棟,津波に よる建物被害は 4200棟.人的被害は人口 33563 人に対 して建物倒壊による死傷者数 310人,津波による死者数 2000人との甚大な被害が想定されている.1946年の昭 和南海地震(マグニチュード 8.0)では香南市の市域に おいて,堤防・護岸の決壊や地盤沈下が広範囲にわたり 生じたことが報告されている.

(3) 常時微動観測地点

常時微動観測の観測点を図-4に示す.

a)中土佐町

中土佐町の観測地点数は久礼地区(a-1)で 129 地点, 上ノ加江地区(a-2)で 98 地点の合計 232 点でる.住宅 密集地を中心に 50mメッシュに 1 地点,それ以外は 250 mメッシュに 1 地点の常時微動観測を行った.

b)土佐市

土佐市の観測地点数は 106 点, 仁淀川・海岸部沿いを 中心に常時微動観測を行った.

c)香南市

香南市の観測地点は 221 点,住宅密集地や主要な道路 を中心に 250m メッシュに 1 地点の常時微動観測を行った.

(4) 常時微動観測結果

常時微動観測結果の代表例を図-5 に示す.常時微動 観測結果代表例の選定は近隣にボーリングデータが存在 する地点から選定している.

a)山地

HV スペクトル比の卓越周期はおおよそ 0.2 秒以下の 短周期成分が卓越しピーク振幅も1倍に近い値を示して いる.これはボーリングデータから読み取ることのでき る,硬質な礫層の下層に岩盤が存在しているためと考え られる

b)段丘

H/V スペクトル比は山地と比べピーク振幅にばらつき はあるものの, 0.1~0.2 秒程度の短周期成分が卓越する



図-5 観測結果の代表例とボーリングデータ

傾向である.段丘の周辺は河川で囲まれているため,河 成段丘と考えられる.ボーリングデータから硬質な礫層 の上層部に砂混じり礫層,礫混じりシルト層が堆積して いる.ピーク振幅のばらつきは段丘による砂混じり礫層, 礫混じりシルト層の層厚の違いが起因しているものと推 察される.

c) 砂洲·砂堆

HV スペクトル比は卓越周期がおよそ 04 秒~0.6 秒の 長周期成分が卓越する. ピーク振幅もばらつきがあるも のの山地や段丘に比べ高い値となる. ボーリングデータ は地表面の埋立土の下に砂礫が堆積し,その下の層には 粘土や火山灰土が堆積している. シルトや粘土などの軟 弱層が厚く堆積しているため, HV スペクトル比は長周 期成分が卓越したと推察される.

d)三角州

HV スペクトル比の卓越周期は概ね 0.3~0.6 秒と幅広 い周期を示し、ピーク振幅もばらついた. 卓越周期に関 しては土地分類図から盛土が確認される地域では 0.5 秒 以上の長周期成分が卓越した. ボーリングデータから三 角州は主にシルトと礫を含む層が厚く堆積する. 礫混じ りシルト層と岩盤とのコントラストに起因して HV ス ペクトル比の大きなピーク振幅が生じたと考えられる.

(5) 地盤の揺れやすさリスク評価結果

図-6 に地盤の揺れやすさリスク評価結果を示す. コ ンター図で表すことで土地分類との比較や地盤の堆積構 造の局所的な変化が把握できるようになった.



図-6 地盤の揺れやすさリスク評価結果

a) 中土佐町

久礼地区,上ノ加江地区の両方に共通して山地とそれ 以外の箇所では地盤の揺れやすさリスクの大小がはっき りとわかる.特に久礼地区に着目すると,地形分類図の 三角州と砂洲・砂堆では三角州が地盤の揺れやすさリス ク4と高い値を示し,地盤の堆積構造の違いを表してい る.また,住宅が密集している海岸平野では地盤の揺れ やすさリスクが局所的に変化していることから同じ地形 分類上でも地盤の堆積構造の違いがあることが確認でき る.

b) 土佐市

土佐市は地形の特徴と山地のデータ数が少ないため, 地形分類上山地に分類される箇所でも地盤の揺れやすさ リスク3程度の評価となる部分が見られる. 三角州と砂 洲・砂堆は山地よりも地盤の揺れやすさリスクが高い値 を示している.

C) 香南市

香南市は山地・段丘で地盤の揺れやすさリスクが低い 値を示している.特に山地では地盤の揺れやすさリスク が概ね2以下を示した.海岸平野部や砂洲・砂堆では山 地に比べ,地盤の揺れやすさリスクが3以上の高い値を 示した.地盤の揺れやすさリスク最大の5を示す箇所も 見られ,同じ地形分類上でも地盤の堆積構造の違いがあ ることが確認できる.

4. 地盤の揺れやすさリスク評価と妥当性の検証

(1) 妥当性の検証方法

地盤の揺れやすさリスクの5段階判定法の妥当性の検証 するため、HV スペクトル比の積分値と5段階の地盤の 揺れやすさリスクを比較したものである. HV スペクト ル比の積分値は地震動強さを表す PSI 値¹⁹⁾ を参考とし た. HV スペクトル比の積分値の算出にあたっては、5 段階の地盤の揺れやすさリスクと地震動強さとの関係性 を検証することを目的としたため、常時微動観測の結果 40.96 秒のうち H/V スペクトル比のピークが見られる 0.1 ~10 秒を積分値に設定し、(1)式に従い、速度波形の 自乗の時間積分の平方根とした. さらに、卓越周期のば らつきの影響を考慮し、地盤種別に用いられている T< 0.2 (s) , 0.2≦T<0.6 (s) , 0.6 (s) ≦T において、それ ぞれ 0.5, 0.75, 1の重み付けした値を HV スペクトルの 積分値と定義した.計算結果地盤の揺れやすさリスクの 値が大きくなるほど地震強さが大きくなることを表して いる.

HVスペクトル比の積分値

$$= \sqrt{\int_{0.1}^{10} V^2(t) dt}$$
 ... (1)



図-7 H/V スペクトル比の積分値の算出結果

(2) H/V スペクトル比の積分値算出結果

HV スペクトル比の積分値の算出結果の平均値を中土佐町,土佐市,香南市で比較したものを図-7に示す.

図-7 は縦軸に HV スペクトル比の積分値(平均値)を とり、横軸に地盤の揺れやすさのリスク 1-5 を示してい る.中土佐町、土佐市、香南市を比較すると地盤の揺れ やすさリスクが1から5へ高くなるにしたがって、地盤 の揺れやすさリスク評価結果の平均値は上場し、その傾 向は類似した.地盤の揺れやすさリスク5が香南市の1 地点のみであるため、今後のデータ蓄積が必要ではある が地盤の揺れやすさリスク評価方法が概ね妥当であると 示唆された.地盤の揺れやすさリスクが小さいものほど HV スペクトル比の積分値の平均値のばらつきは小さく、 地盤の揺れやすさリスクが大きくなるほど HV スペク トル比の積分値の平均値のばらつきも大きくなる. HV スペクトル比の積分値はピーク振幅の影響を受けやすい ため、リスクが高くなるにしたがい軟弱層の複雑な地盤 の堆積構造の違いが結果に影響したと推察する.

5. まとめ

次期南海トラフ地震の発生に備え,常時微動観測を用 いた地盤の堆積構造の推定を行った.得られた結果より 従来の地盤分類法をベースに,地震防災対策に特化した よりシンプルな地盤の揺れやすさリスク評価方法を提案 し,その妥当性を検証した.その結果以下の主要な知見 が得られた.

(1) 常時微動観測結果

中土佐町,土佐市,香南市で行った常時微動観 測の結果は、地形分類ごとに有意な差が見られた. 土地分類上,堅固な地盤であるほど HV スペクト ル比の卓越周期・ピーク振幅は短周期成分が卓越 し軟弱な地盤であるほど HV スペクトル比の卓越 周期・ピーク振幅は長周期成分が卓越する結果と なったが、ピーク振幅はばらつきが多く同一な土 地分類上でも地盤の堆積構造の違いがあることが 分かった.

(2) 地盤の揺れやすさのリスク評価

常時微動観測により得られた HV スペクトル比 の卓越周期・ピーク振幅を用いて簡易な地盤の揺 れやすさのリスク評価をコンター図で表すことで 地盤を面的に評価することが可能となり,軟弱な 地盤が堆積している箇所のうち,特に地盤の揺れ やすさリスクが高いと推定される箇所が明確とな った.

(3) 妥当性の検証

地震動強さを表す PSI 値を参考にした H/V スペク

トル比の積分値を用いて地盤の揺れやすさリスク 評価方法の妥当性を検証したところ地盤の揺れや すさリスクが大きくなるにつれて HV スペクトル 比の積分値の平均値も高くなった.また,地盤の 揺れやすさリスクが小さいものほど地域ごとの HV スペクトル比の積分値のばらつきが少なく,リス クが高くなるにつれたばらつきも大きくなった. 地盤の揺れやすさリスク 5 を示したのが香南市に1 地点のみであることを考慮する必要があるが,HV スペクトル比の積分値の平均値の上昇傾向も類似 したことから地盤の揺れやすさリスク評価方法が 概ね妥当であることが示唆された.

今後は他の地域でも常時微動観測を行うことで地盤の リスク評価のデータを蓄積し、地盤の揺れやすさリスク 5の精査と評価方法の精度向上を図る予定である。

謝辞:常時微動観測の実施では中土佐町,南国市,土佐市,香南市,(株)ニュージェック・竹澤請一郎氏, 伊藤佳洋氏,羽田浩二氏,森田真弘氏,八木悟氏, 藤野義範氏,深津宗祐氏,(株)第一コンサルタン ト・北村暢章氏(元高知大学),高知県庁・石川諒 氏(元高知大学)にご協力いただいた.関係者に謝 意を表します.

参考文献

- 南海トラフ巨大地震の対策について(最終報告),平 成28年5月,中央防災会議,防災対策推進検討会議,南海ト ラフ巨大地震対策ワーキンググループ.
- 原他:平成 28 年, 熊本地震で被災した液状化地盤の特徴, 日本地盤工学会年次大会,2016.
- Joyner, W.B. and Boore, D.M : Recent Developments in strongmotion attenuation relationships, Proc. UJNR 28th Joint Meeting of United States-Japan Panel on Wind and Seismic Effects, Gaithersburg, pp.101-115.1996.
- Seed, R. B., Dickenson, S. E., and Idriss, I. M.: Principal geotechniacl aspects of the 1989 Loma Prieta earthquake, Soils, and Foundations, Vol.31, No.1, pp.1-26, 1991.
- 5) 太田裕:金井清先生(本会名誉会員) のご逝去を悼ん で,公益社団法人日本地震学会,Vol.20,No.2,2008.
- 6) 中村豊:常時微動観測に基づく表層地盤の地震動特性の 推定,鉄道総研報告, Vol.2, No.4, pp.18-27, 1988.
- 時松考次, 宮寺泰生: 短周期微動に含まれるレイリー波の 特性と地盤構造の関係, 日本建築学会構造系論文報告集, No. 439, pp.81-87, 1992.
- 8) 先名重樹,翠川三郎,若松加寿江:常時微動のH/Vスペク トル比と地形・地盤分類を用いた スペクトル増幅率の推 定,日本地震工学会論文集,第8巻,第4号,pp.1-15,2008.

- 長尾毅,山田雅行,野津厚:常時微動 H/V スペクトルを構成 する波動成分に関する一解釈,土木学会論文集, Vol. 68, pp. 48-62,2012.
- 原忠,久保篤規,北村暢章,山田雅行,竹澤請一郎,羽田浩二, 西原三登:常時微動観測による堆積地盤の揺れやすさの 推定,第47回地盤工学研究発表会,pp.1689-1690,2012.
- 原忠,石川諒,山田雅行,竹澤請一郎,伊藤佳洋,羽田浩二: 常時微動観測に基づく海岸平野部の地盤の堆積構造の推 定,平成26年度地盤工学会四国支部技術研究発表会,2014.
- 原忠,石川諒,山田雅行,竹澤請一郎,伊藤佳洋:常時微動観 測に基づく地盤の堆積構造の推定,第50回地盤工学会研究 発表会,2015.

- 長尾毅,山田雅行,野津厚:常時微動 HV 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, Vol.56A, pp. 324-333, 2010.
- 14) 原忠,北村暢章,山田雅行,竹澤請一郎,羽田浩二,八木悟,宮田稔久:地形分類に着目した常時微動観測と考察,第49回地盤工学研究発表会,2014.
- 15) 国土地理院:平成28年10月,土地条件図,高知.
- 16) 中土佐町地域防災計画,平成27年3月,中土佐町防災会議.
- 17) 土佐市地域防災計画,平成28年3月,土佐市防災会議.
- 18) 香南市地域防災計画,平成27年9月,香南市防災会議.
- 19) 野津厚,井合進:岸壁の即時被害推定に用いる地震動指標 に関する一考察,第28回関東支部技術研究発表会講演概要 詩集,土木学会関東支部,pp. 18-19,2001.

STUDY ON RISK EVALUATION METHOD FOR GROUND SHAKING HAZARD BY MICROTREMOR OBSERVATION

Yukie NAKAMURA, Tadashi HARA and Masayuki YAMADA

In this study, microtremor observation was carried out for local governments where the natural disasters caused by multiple orgins such as earthquake shaking and tsunami were worried, and the sedimentary structure of the ground was estimated by the predominant period and the corresponding peak amplitude of microtremor H/V spectal ratio. In addition, we proposed the risk evaluation method of ground shaking hazard and illustrated contour maps for spatial distribution of the evaluated risk. The validity of the shaking risk index was verified to compare with integral value of H/V spectral ratio.