

常時微動のH/Vスペクトル比を用いた 地震動推定法の提案

丸山 喜久¹・山崎 文雄²・本村 均³・浜田 達也³

¹学生会員 東京大学大学院社会基盤工学専攻 (〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)

²正会員 工博 東京大学生産技術研究所 (〒153-8505 東京都目黒区駒場4-6-1)

³正会員 日本道路公団試験研究所保全研究室 (〒194-8508 東京都町田市忠生1-4-1)

日本道路公団では、1995年兵庫県南部地震以降、地震発生直後に地震情報を集めて効果的な地震時通行規制を行うことを目的とし、高速道路料金所の管理事務所に新型地震計を増設し、現在、沿線約20kmに1ヶ所の割合で設置されている。しかしながら、この地震計の数は、高速道路全体の地震動分布を把握するのに充分であるとはいえない。そこで本研究では、常時微動と地震動の水平鉛直スペクトル比 (H/V) が良く似た振幅形状を示すことを利用して、近傍の地震記録と常時微動観測結果のみから地震動推定を行い、実測値と比較してその精度を検証した。この方法を利用することで、高速道路に沿った連続的な地震動分布の推定が可能になると期待される。

Key Words: microtremor, earthquake ground motion, H/V spectrum ratio, expressway, accelerometer

1. はじめに

地震動分布の推定は、地震発生前の構造物の設計や防災体制の整備、発生直後の被害推定や緊急対応などに重要であり、地震工学における重要な課題として研究が行われている。1995年兵庫県南部地震では、被害情報が早期に把握できなかったために、その後の救助活動や、復旧活動に大きな支障をきたした^{1), 2)}。その反省から、現在では様々な機関が地震計ネットワークを整備しており^{3), 4)}、その中には非常に高密度なものも存在する。これらのネットワーク内では、より正確な地震動分布を推定することが可能になると期待される。

日本道路公団 (JH) が管轄する高速道路では、地震発生直後に早期段階での地震情報を集めて効果的な地震時通行規制を行うことを目的とし、管理事務所などに地震計を設置している。この地震計が記録した最大加速度を指標として、地震時通行規制を実施している。兵庫県南部地震以降、より詳細な揺れの情報を集めるために、JHはSI値や計測震度も測れ

る新型地震計を大幅に増設した⁷⁾。このため、最近の地震による通行規制の頻度が増加するとともに、通行規制を行ってもその後の点検などで通行に支障がないことが判明するケースが多く、現行の通行規制基準には改善の必要性があると思われる。そこで、高速道路に沿った地震動分布の推定を行うことで、今後の通行規制基準の見直しに役立てることが出来るものと期待される。

高速道路に沿った地震動推定手法としては、山崎ら⁸⁾が、Kriging法に基づく空間補間法を提案している。ここでは、地震動観測値をその地点の増幅率⁹⁾で割って基盤面に引き戻し、Krigingによる確率的な空間補間を行い、再び増幅度を乗じて地表面における地震動推定値とするものである。ここでの増幅率は、距離減衰式¹⁰⁾⁻¹²⁾の地点係数から求められるもので、表層地盤の分類を国土数値情報の地形・地質分類を用いて行っている。国土数値情報には、約1km四方の表層の平均的なデータが入っているので、この方法は広域の地震動分布の概略推定¹³⁾には有効と考えられるが、より高い精度で地震動の分布が必要

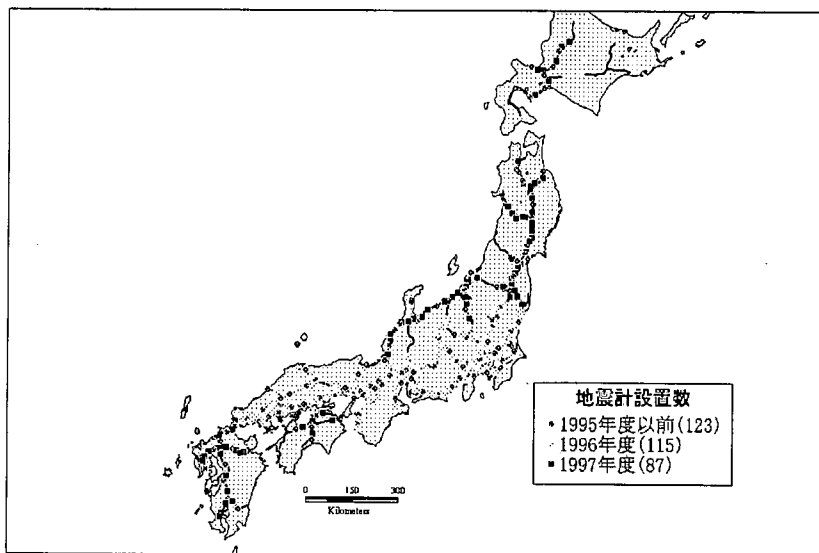


図-1 JHの地震計ネットワーク

な場合には、充分な信頼性を持つとはいいがたい。

そこで本研究では、常時微動観測結果と近傍の地震動記録のみを用いて、地盤情報には頼らない地震動推定を試みる。中村¹⁴⁾によって提案された常時微動の水平鉛直比スペクトル(H/V)が、擬似的にS波伝達関数を表すという理論は、常時微動が主として実体波で構成されるという考えに立って、H/Vを計算することにより表面波の影響を取り除くことができる^{14),15)}。一方、時松・宮寺¹⁶⁾や大町ら¹⁷⁾は、H/V比が安定する根拠について、常時微動には表面波(レイリー波)が卓越しているためであるとしている。

このように、常時微動に含まれる波動の種類については未だ議論の余地があるが、本研究ではこの議論はあまり行わずに、常時微動と地震動のH/Vスペクトル比がよく似た振幅形状を示す^{18),19)}ことを利用して、地震動推定を行う。具体的には、JH地震観測点とその近傍のK-NET地震観測点で常時微動観測を行い、これらの2点での常時微動のH/Vスペクトル比の比を近似的な伝達関数とみなすことで、K-NET観測点における地震記録から、JH観測点における地震動を推定し、実際の地震観測記録との比較を行う。

2. JHの地震計ネットワークと観測記録

JHでは、兵庫県南部地震をきっかけとした地震防

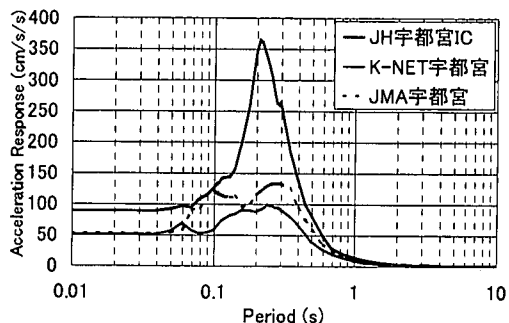


図-2 宇都宮IC周辺の観測点の加速度応答スペクトル
(1998年6月24日茨城県南部地震EW成分)

災強化対策の一環として、高速道路沿線約20kmピッチ(料金所ごとに1ヶ所の割合)で地震計の整備を進めた。既設の123ヶ所の地震計に加えて、96年度に101ヶ所、97年度に87ヶ所の新型地震計を設置した(図-1)。新型地震計は、最大加速度に加えて、SI値、計測震度がオンラインで収集されるとともに、ICカードに加速度波形も記録される。また、既設の地震計も1999年度に新型のものに更新した。JH管轄の高速道路では、これらの地震計の記録した最大加速度が80Gal以上になると通行止め、50Gal以上で速度規制という地震時通行規制を実施している。

しかしながら、JHの地震観測点の中には、他機関の設置した周辺の地震計の記録と比較して、記録に大きな違いのある観測点もいくつか見られる。例として、図-2にJH宇都宮インターチェンジ(IC)で

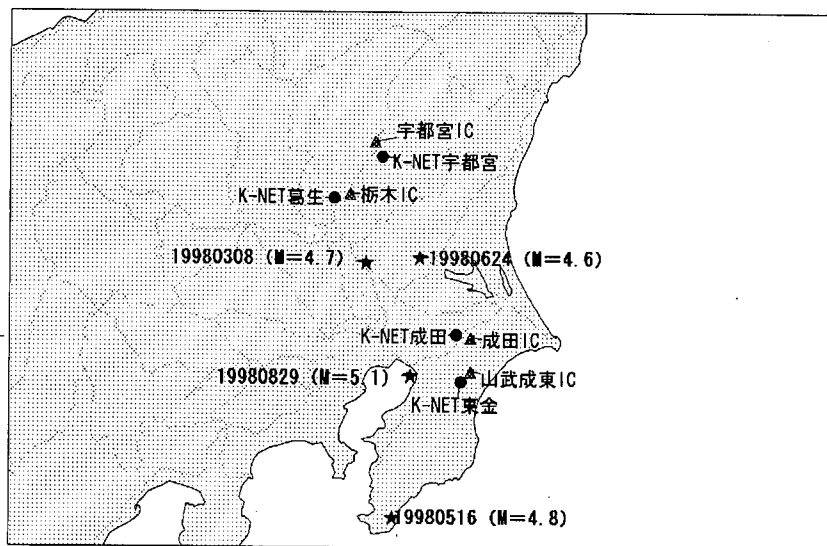


図-3 常時微動観測地点と解析に用いた地震の震源位置

の地震記録とその周辺の K-NET 宇都宮、気象庁 (JMA) の宇都宮観測点での地震記録の 5%減衰の加速度応答スペクトルを示す。これより、JH 宇都宮 IC の加速度応答スペクトルは、K-NET や気象庁のものと比較すると大きな違いがあることが分かる。JH 宇都宮 IC における地震記録の加速度応答スペクトルは、周期 0.2 秒付近に顕著なピークが存在し、比較的近く(距離 7km 程度以内)にある K-NET や気象庁の記録には見られない。JH 宇都宮 IC におけるこのような特徴は、他の地震に関しても見られるため、地点固有の震動特性を表しているものと考えられる。

JH 宇都宮 IC における地震計は、高速道路の管理事務所建物の 1 階床に設置されている。周辺環境は田畑であり、建物は盛土上に建てられており、N 値 50 程度の支持基盤まで長さ 5m-10m 程度の杭で支えられている。一方、K-NET 宇都宮の地震計の設置位置は小高い山の上であり、硬い地盤である。宇都宮における地震記録の違いは、このような地盤条件の違いによるものと考えられる。著者らは、これらの 2 地点に関して PS 検層データをもとに地盤モデルを作成し地盤震動解析を行った。また、盛土上と原地盤上で、常時微動観測も実施した。その結果、JH 宇都宮 IC における震動特性が、とくに短周期(約 0.25 秒)において、盛土の影響で揺れが増幅されることが確認された。

このように、地震計による観測値が代表すると考えられるのは、ごく狭い範囲の同じような地形・地盤条件の場所である。近傍にあっても、地形・地盤

条件に大きな差があれば、地震記録には違いが生じる。現在、JH が設置している地震計は高速道路沿線約 20km に 1 ヶ所の割合であり、これらの地震計の記録のみから高速道路本線約 20km の地震動分布を詳細に推定するのは困難である。したがって、地形・地盤条件の変化を考慮し、地点ごとの揺れやすさを踏まえた、高速道路に沿った地震動分布推定手法の確立が必要である。そこで本研究では、常時微動観測結果を利用した地震動推定手法の提案を行う。

3. 常時微動と地震動の水平鉛直スペクトル比 (H/V) の比較

(1) 常時微動観測

常時微動観測は図-3 に示す 8 地点について実施した。この図には、解析に用いた 4 地震の震源位置も示している。関東地方に設置されている JH 観測点のうち、周辺の他機関の地震記録と比較して違いの大きい東北自動車道の宇都宮 IC、栃木 IC、東関東自動車道の成田 IC、千葉東金道路の山武成東 IC の 4 ヶ所と、これらにそれぞれ最も近接した K-NET 観測点 4 ヶ所で微動観測を行った。観測は 3 分間とし、サンプリング周波数は 100Hz、水平 2 成分、鉛直 1 成分の 3 成分を測定した。測定機器は、(株)東京測振の SPC-35E を使用した。

(2) 地震動のH/V スペクトル比

常時微動観測を行ったK-NET観測点4ヶ所に関して、地震動のH/V スペクトル比を計算した。解析は、各地点で10地震を選び、主要動部30秒間に関し、バンド幅0.4HzのParzenウィンドウで平滑化した3成分の加速度フーリエスペクトルを計算し、それらから次式でH/V スペクトル比を計算した。

$$|R_{surface}(f)| = \sqrt{|F_{EW}(f)| |F_{NS}(f)|} / |F_{UD}(f)| \quad (1)$$

ここで、 $R_{surface}$ は地震動のH/V スペクトル比、 F は(地表面)地震動の加速度フーリエスペクトルである。図-4にK-NET宇都宮における計算された水平成分、鉛直成分の加速度フーリエスペクトル(振幅)を示す。解析では、10地震を無作為に選んでおり、地震の規模が様々であるため、水平・鉛直成分ともフーリエ振幅には大きなばらつきが見られる。しかし、これらの比である地震動のH/V スペクトル比を計算すると、図-5のように振幅形状が安定する。Yamazaki and Ansary²⁰⁾は、この理由を加速度フーリエスペクトルと近似関係のある速度応答スペクトルの距離減衰式より説明している。

(3) 常時微動と地震動のH/V スペクトル比の比較

常時微動観測によって得られた3分間の速度波形から、比較的安定していると思われる20秒間の記録を抜き出し、地震動の場合と同様にバンド幅0.4HzのParzenウィンドウで平滑化した速度フーリエスペクトルを求め、これら4区間の相乗平均を計算した。これらを用いて式(1)により、H/V スペクトル比を求めた。K-NET観測点4ヶ所とJH観測点2ヶ所について、常時微動と地震動のH/V スペクトル比を比較したものを図-6に示す。

これより、常時微動のH/V スペクトル比と地震動のH/V スペクトル比の振幅形状が、よく似ていることが確認できる。ただし、ここでのK-NET観測点の地震動H/V スペクトル比は10地震の相乗平均を示している。JH観測点については、地震記録が少ないために、各地点で2または3地震の相乗平均である。

常時微動に含まれる波については、前述の通り、実体波が卓越するという説と、表面波(レイリー波)が主体であるとの説がある。仮に、常時微動が主として実体波であれば、地震動の主要動も実体波であることから、常時微動と地震動のH/V スペクトル比の振幅形状がよく似てくることは容易に理解できる。また、仮に常時微動にレイリー波が卓越するとして

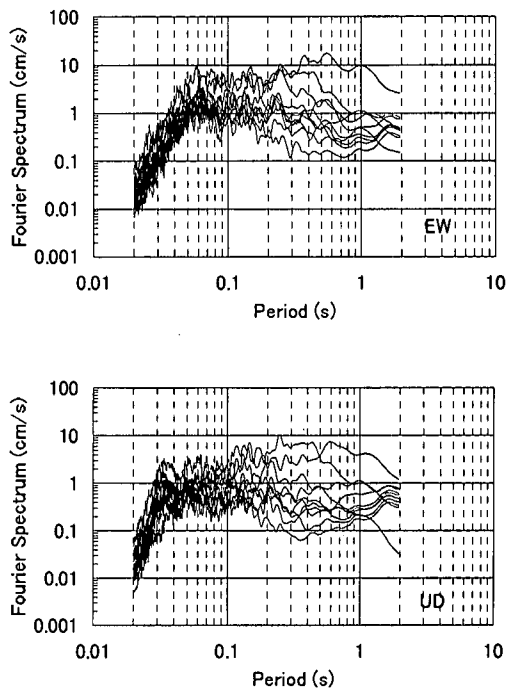


図-4 K-NET 宇都宮における地震動加速度フーリエスペクトル(上EW成分、下UD成分)

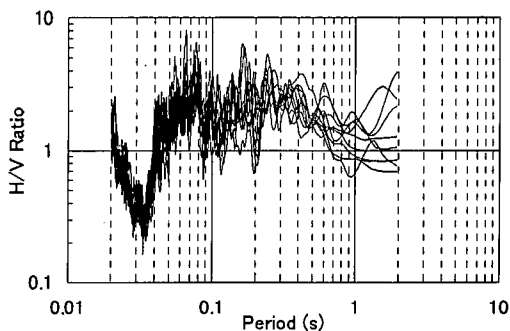


図-5 K-NET 宇都宮における地震動H/V スペクトル比

も、通常速度構造の地盤の多くでレイリー波基本モードのH/V 振幅比のピーク周期とS波卓越周期がほぼ等しい¹⁷⁾ことから、常時微動と地震動のH/V スペクトル比の振幅形状が似てくるものと考えられる。

本研究でも、PS 検層データに基づき1次元地盤モデルを作成し、常時微動のH/V スペクトル比と露頭基盤に対するS波伝達関数、レイリー波基本モードのH/V 振幅比の比較を行ったところ、それぞれのピーク周期が比較的一致してくることが確認できた(図-7)。また、堀家ら¹⁸⁾も常時微動のH/V スペク

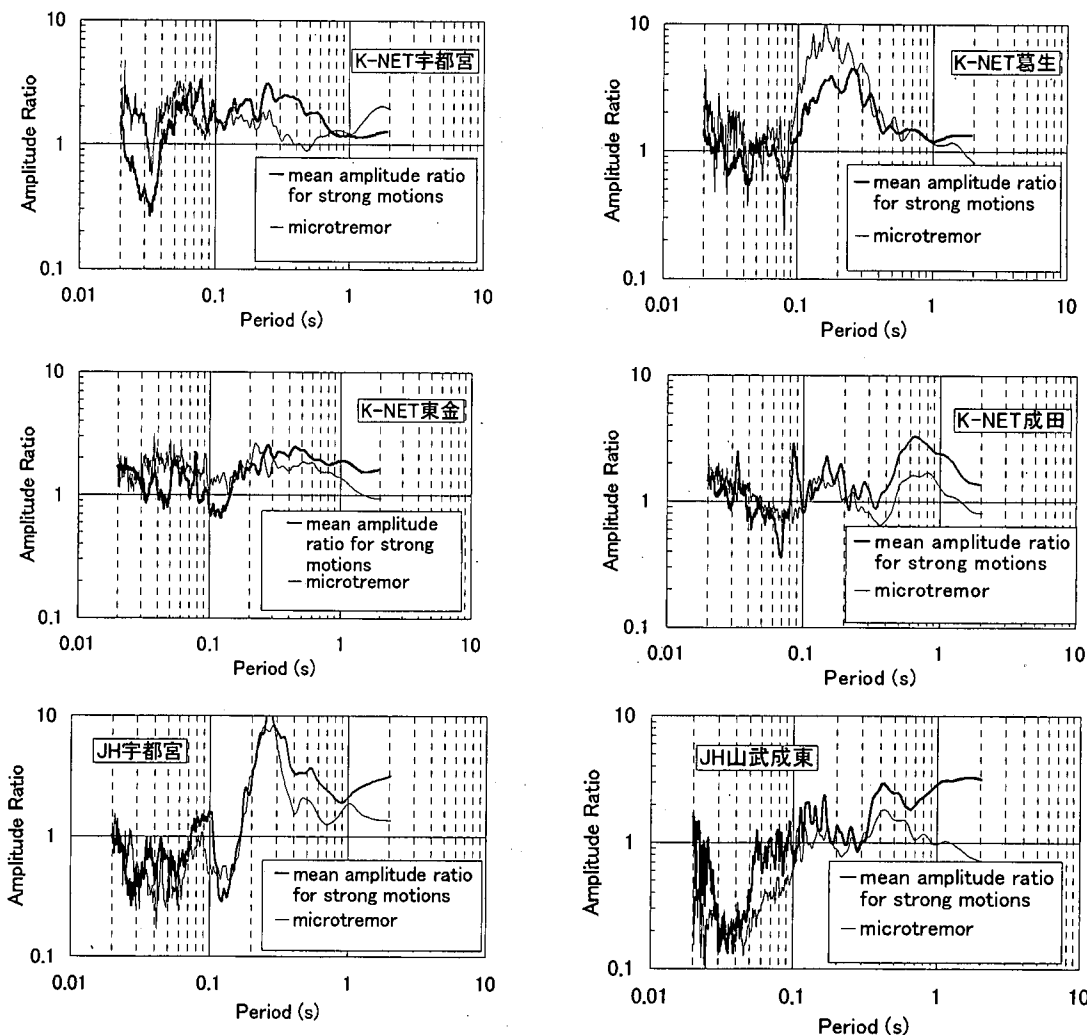
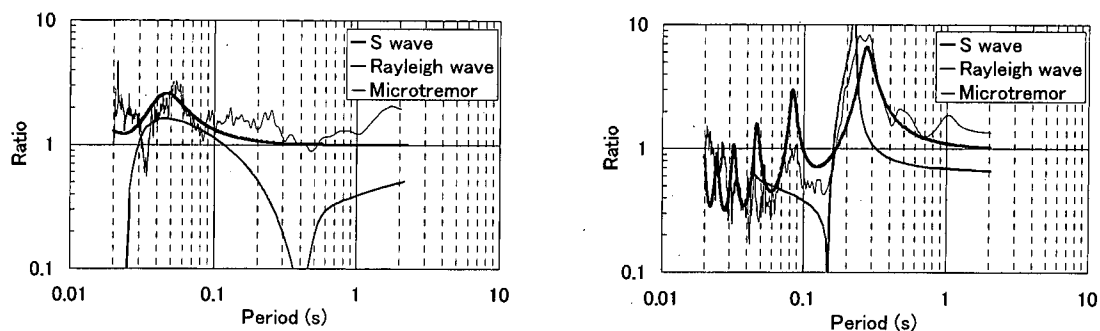


図-6 常時微動と地震動の H/V スペクトル比の比較



(a) K-NET 宇都宮

(b) JH 宇都宮 IC

図-7 常時微動の H/V スペクトル比と Rayleigh 波基本モード H/V スペクトル比、S 波伝達関数の比較

トル比は地震動のものと同じかやや小さいことを示しており、ある程度の誤差を認めれば、ほぼ同じであ

ると考えてよいとしている。しかし、常時微動に含まれる波動の種類や周期によってその近似度は変わ

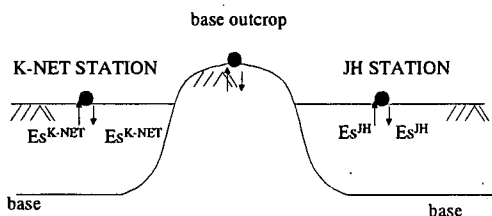


図-8 共通基盤を有する2地点の地盤モデル

表-1 JH宇都宮ICの地盤モデル

土質区分	密度 (t/m ³)	S波速度 (m/s)	P波速度 (m/s)	層厚 (m)
新規盛土	1.9	265	636	1.9
旧地表面				0.9
軽石				0.7
ローム	1.4	119	233	2.55
軽石				0.55
ローム				0.55
工学基盤	2.1	731	1610	∞

ると考えられるので²¹⁾, 今後とも議論が必要である。

4. 常時微動による地震動推定

以上に述べたように、常時微動の H/V スペクトル比と地震動の H/V スペクトル比の振幅形状が比較的よく似ていることを利用し、常時微動観測結果と近傍の地震記録を利用し、常時微動観測点における地震動の推定を行う。本研究では、近傍の K-NET 観測点における地震記録から、JH 観測点における地震動を推定し、JH 観測点における実測の地震記録と比較を行い、その精度の確認を行う。

本手法の理論を以下に示す。まず、図-8 のような地盤構造を仮定する。すなわち、K-NET 観測点と JH 観測点の基盤面が共通であると仮定する。2つの観測点が近傍であることから、解析を行った地震の震源との位置関係（図-3）を見ても、震源距離や伝播経路に大きな違いはないものと考えられ、このような仮定をすることで、基盤面の入射地震動は共通のものと考えられる。そこで、K-NET 観測点の地表面における、地震動の（複素）H/V フーリエスペクトル比は、式(2)のように書ける。

$$R_{surface}^{K-NET} = (A_H^{K-NET} / A_V^{K-NET}) R_{reference} \quad (2)$$

ここで、 A_H 、 A_V は、それぞれ水平成分、鉛直成分の露頭基盤に対する地表面の（複素）伝達関数である。また、 $R_{reference}$ は露頭基盤面における地震動（複素）H/V フーリエスペクトル比である。また、常時微動の H/V スペクトル振幅比と地震動 H/V 比の振幅形状がよく似ていることから、式(3)のように書ける。

$$r_{H/V}^{K-NET} = |R_{surface}^{K-NET}| \quad (3)$$

同様に考えれば、JH 観測点における地表面の地震

表-2 K-NET宇都宮の地盤モデル

土質区分	密度 (t/m ³)	S波速度 (m/s)	P波速度 (m/s)	層厚 (m)
表土	1.57	190	515	2.3
岩盤	1.66	420	1830	2.7
工学基盤	1.55	605		∞

動の（複素）H/V スペクトル比と常時微動の H/V スペクトル比の関係も式(4)、(5)のように書ける。

$$R_{surface}^{JH} = (A_H^{JH} / A_V^{JH}) R_{reference} \quad (4)$$

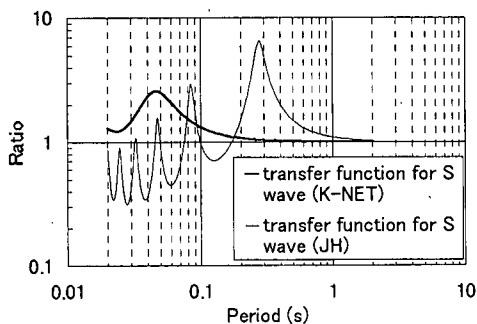
$$r_{H/V}^{JH} = |R_{surface}^{JH}| \quad (5)$$

ここで、式(3)と式(5)の比を取って、式(2)、(4)を用いると、式(6)のようになる。

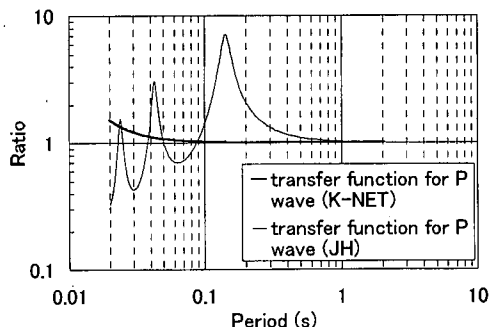
$$r_{H/V}^{J/K} = \frac{|R_{surface}^{JH}|}{|R_{surface}^{K-NET}|} = \frac{|A_H^{JH} / A_V^{JH}|}{|A_H^{K-NET} / A_V^{K-NET}|} = \frac{|E_s^{JH} / E_p^{JH}|}{|E_s^{K-NET} / E_p^{K-NET}|} \quad (6)$$

ここで、 E_s は地震動の水平成分フーリエスペクトル、 E_p は鉛直成分フーリエスペクトルである。式(6)では、図-8 のような地盤構造を仮定しているために、2地点に共通の露頭基盤面の地震動 H/V スペクトル比 $R_{reference}$ が消去されている。

そこで、表-1と表-2に示す JH 宇都宮 IC と K-NET 宇都宮の PS 検層データに基づいて作成した地盤モデルを利用し、式(6)の水平成分伝達関数比と鉛直成分伝達関数比について検討を行う。これらの地盤モデルを用いて1次元地震応答解析も行っており、実際の地盤に近いものであることを確認している。これらの地盤モデルを利用し、露頭基盤に対する2点の水平成分および鉛直成分伝達関数をそれぞれ計算した（図-9）。ここで、一般的な速度構造を有する成



(a) S波伝達関数



(b) P波伝達関数

図-9 JH宇都宮ICとK-NET宇都宮のS波およびP波伝達関数

層地盤においては、波線理論²²⁾によって、S波、P波ともに鉛直下方から地表面に到達するので、水平成分はS波、鉛直成分はP波が支配的であると考えた。これより、JH宇都宮ICのS波の卓越周期は約0.3秒、K-NET宇都宮のS波卓越周期は約0.05秒である。また、P波伝達関数のピーク周期はS波のピーク周期よりも短い。

次に、K-NETを分母に、JHを分子に取った伝達関数同士の比をS波およびP波について計算し図-10に示す。これより、S波伝達関数比のピーク周期付近では、P波伝達関数比が1に近いことがわかる（同様の議論は中村¹⁵⁾も行っている）。このことから、S波の卓越する周期付近では、式(6)は式(7)のように近似できる。

$$r_{H/V}^{J/K} \sim \left| \frac{E_s^{JH}}{E_s^{K-NET}} \right| \quad (7)$$

すなわち、2点間の常時微動のH/Vスペクトル比の比が、2点間の地震動の水平成分フーリエスペクトル比に近似できるものと考えられる。図-11にS波伝達関数比とP波伝達関数比の比（提案手法）とS波伝達関数比の関係を示す。ここまで議論してきたように、本研究の提案手法は2点間のS波伝達関数比の1次ピーク周期付近では、その値がほぼ等しいことが確認できる。ここで2地点間の微動の水平動同士のスペクトル比を用いないのは、検討対象としている短周期の微動が交通振動などの人工振源が原因であるので、H/Hの比では地点の振動レベルの影響に大きく支配されるからである。もちろん、2地点がごく近傍にあり、微動の振動源も共通であるような場合は、2地点間の微動のH/H比を用いることもできる。

以上の議論に基づいて、JH観測点の地震動を近傍

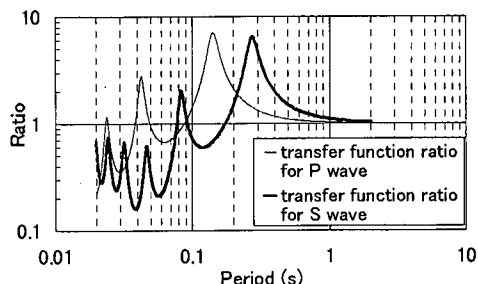


図-10 S波およびP波の伝達関数比

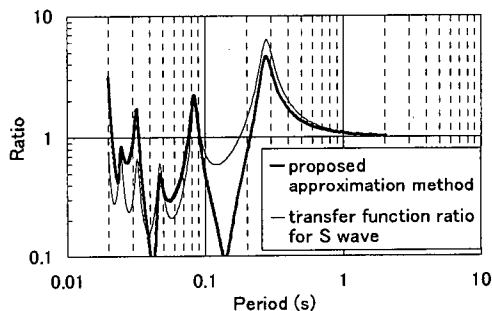


図-11 提案手法と2点間S波伝達関数比の比較

のK-NET観測点の地震記録と常時微動観測結果から次の2通りの方法で推定を行う。

(1) スペクトル推定

一般に、無減衰の速度応答スペクトルと加速度フーリエスペクトル E_s は次の近似関係がある²³⁾。

$$E_s \approx S_v^{\omega-0.0} \quad (8)$$

また、速度応答スペクトル S_v と加速度応答スペクトル S_a は ω を円振動数として、以下の近似関係²³⁾

が成り立つ。

$$S_v \approx \frac{1}{\omega} S_A \quad (9)$$

これら2つの近似関係を利用し、K-NET観測点の地震記録の加速度応答スペクトルから2点間の常時微動 H/V スペクトル比の比を利用し、JH観測点における加速度応答スペクトルを次式で推定する。

$$S_A^{JH \text{ predicted}} = S_A^{K-NET} r_{H/V}^{J/K} \quad (10)$$

ここで式(10)は、式(8)の近似が無減衰の速度応答スペクトルに対するものなので、本来は無減衰の加速度応答スペクトルについて成り立つ近似である。しかし、両辺に加速度応答スペクトルの項があるので、一般によく使われる5%減衰の加速度応答スペクトルについても成り立つと仮定している。

(2) 波形推定

K-NET観測点とJH観測点が近傍であることから、K-NET観測点の地震記録とJH観測点の地震記録の位相が等しいと仮定すると、波形の推定も可能となる。K-NET観測点で記録された地震動の主要動30秒間のフーリエスペクトル(振幅)に、2点間の常時微動 H/V スペクトル比の比(実数)を乗じ、JH観測点におけるフーリエスペクトルを式(11)より推定する。

$$E_S^{JH \text{ predicted}} = E_S^{K-NET} r_{H/V}^{J/K} \quad (11)$$

ここで得られた値をフーリエ逆変換することでJH観測点における加速度波形が推定できる。もちろんここで用いた2地点で位相が同じという仮定は、厳密なものではないが、第1近似としては許されよう。計算は微動計の固有周期が約1秒であることを考慮して、振動数領域で0.5Hzから20Hzの範囲について行った。

5. 推定地震動と観測記録の比較

本研究の手法を用いて、JH観測点における地震動を推定し、実際の観測記録との比較を行う。

(1) 宇都宮 IC

K-NET宇都宮における1998年6月24日の地震記録を用いて、JH宇都宮ICの地震動を推定した。波形推定によって推定された加速度波形と観測記録の

加速度波形の比較を図-12に示す。K-NET宇都宮における記録の位相をそのまま利用しているが、かなりの精度で推定ができています。図-13にスペクトル推定によって得られた加速度応答スペクトルと波形推定で得られた加速度波形から計算した加速度応答スペクトル、地震記録の加速度応答スペクトルを比較する。波形推定による結果は、EW成分に関しては非常にいい近似度であり、NS成分に関しては推定値がやや大きい。また予想に反して、スペクトル推定の方が波形推定によるものより近似度が低い結果となった。とくに両成分ともスペクトル推定から推定された加速度応答スペクトルは、周期0.1秒以下の短周期成分に関して精度が悪くなっていることが分かる。この原因については、式(9)の加速度応答スペクトルと速度応答スペクトルの近似関係が、短周期成分に関して精度が悪いためであることを確認している(図-14)。

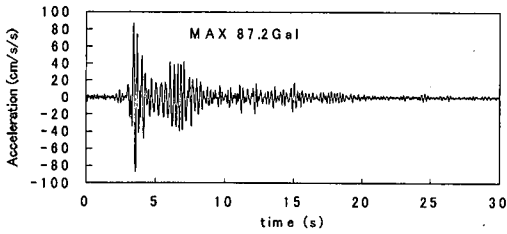
また、式(9)の近似関係を使わず、式(8)の無減衰の速度応答スペクトルとフーリエスペクトルの近似関係を利用し、式(12)からJH宇都宮ICにおける無減衰の速度応答スペクトルを推定した。

$$S_v^{JH \text{ predicted}} = S_v^{K-NET} r_{H/V}^{J/K} \quad (12)$$

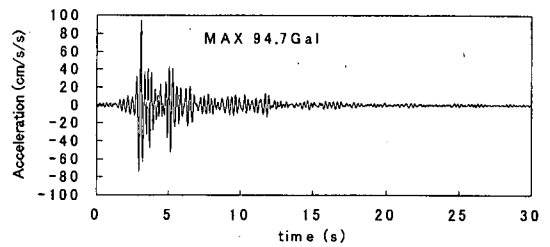
地震記録から計算した無減衰速度応答スペクトルと推定された無減衰速度応答スペクトルを図-15に示す。図-15より、無減衰速度応答スペクトルは短周期成分も精度よく推定できていることがわかる。したがって、スペクトル推定の短周期成分の精度の低下は、式(9)によるものであると確認できる。

(2) 山武成東 IC

K-NET東金における1998年8月29日の地震記録を用いて、JH山武成東ICの地震動を推定した。図-16に波形推定によって推定された加速度波形と実際の地震記録との比較を、図-17に波形推定とスペクトル推定によって推定された地震動と実際の地震記録を加速度応答スペクトルで比較した。これらより、JH山武成東ICでの観測記録と比較して、かなりの精度で推定ができていたことが確認できる。波形推定による加速度応答スペクトルと観測記録の短周期成分が非常に近い値を示しており、最大加速度がよい精度で推定できていることと対応している。この例でも、スペクトル推定による加速度応答スペクトルは、周期0.1秒以下の短周期成分で推定の精度が悪く、この方法による近似の限界を示している。

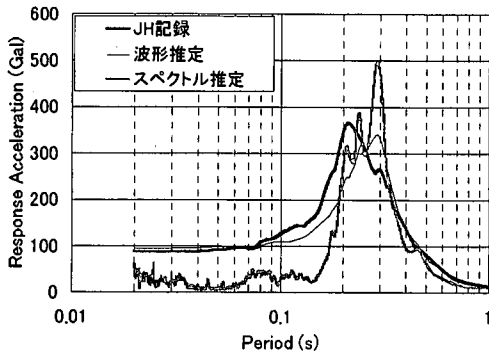


(a) 観測 EW

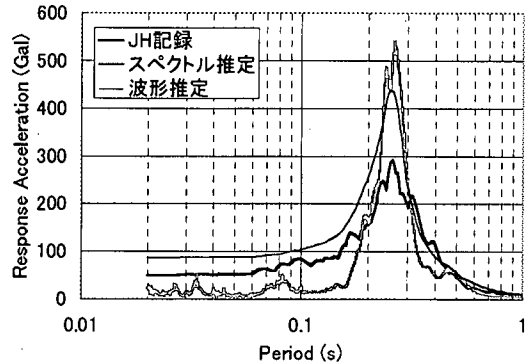


(b) 推定 EW

図-12 JH 宇都宮 ICにおける観測地震動と推定地震動の比較 (1998 年 6 月 24 日茨城県南部地震)



(a) EW 成分



(b) NS 成分

図-13 JH 宇都宮 ICにおける観測地震動と推定地震動の加速度応答スペクトル (5%減衰) の比較

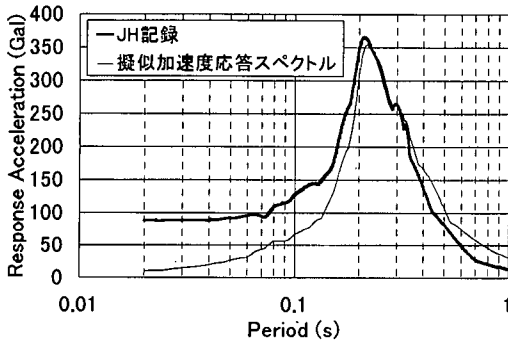


図-14 JH 宇都宮 ICにおける加速度応答スペクトルと式 (9) より計算した擬似加速度応答スペクトルの比較 (5%減衰)

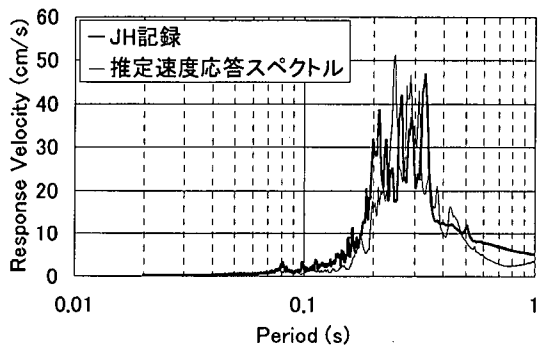
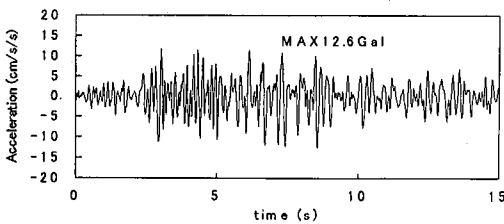
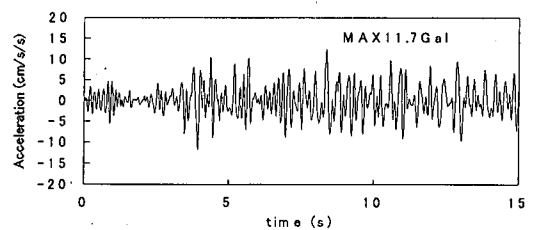


図-15 JH 宇都宮 ICにおける観測地震動と推定地震動の速度応答スペクトルの比較 (0%減衰)



(a) 観測 EW



(b) 推定 EW

図-16 JH 山武成東 ICにおける観測地震動と推定地震動の比較 (1998 年 8 月 29 日東京湾地震)

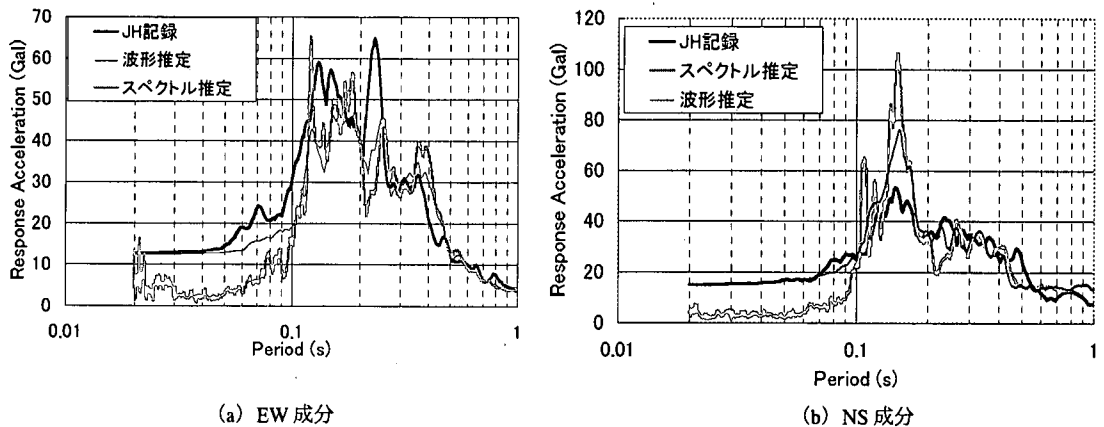


図-17 JH 山武成東 IC における観測地震動と推定地震動の加速度応答スペクトル (5%減衰) の比較

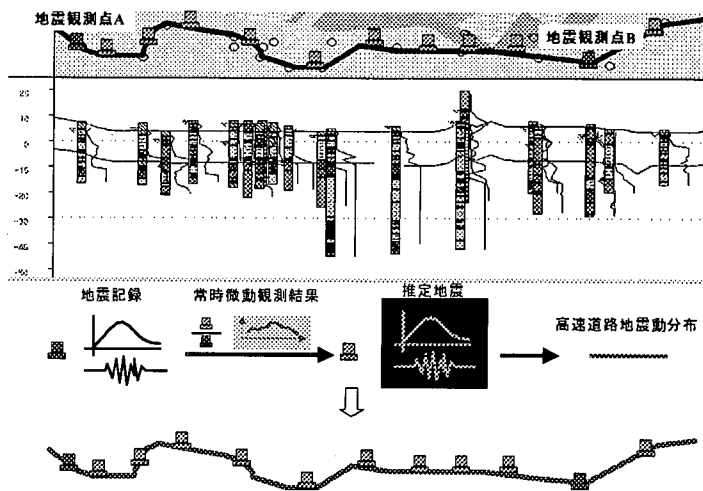


図-18 高速道路に沿った地震動推定のイメージ

6. 高速道路の地震動分布推定手法

現状の通行規制基準である最大加速度 80Gal という基準で、通行規制を実施しても、近年では、被害が発生していない場合が大半である。また、高速道路構造物は、兵庫県南部地震以降、耐震補強を進めており、最大加速度 80Gal という小さな地震では通行に支障のあるような被害は発生しないものと考えられる。また、JH が設置している地震計の数は高速道路に沿った詳細な地震動分布を把握するのに、十分な数であるとはいいたい。そこで、高速道路に沿った地震動分布を連続的に推定する手法が必要となる。

本研究で提案する方法は、常時微動の H/V スペクトル比を利用するものである。この方法はボーリングデータなどの地盤情報を使用していないので、地盤調査の行われていない地点でも常時微動観測を行

えば、地震動推定が可能である。また一般に、ボーリングなどの地盤調査が行われていても、地震応答解析に十分な深度まで調査が行われている場合は少ない。しかしながら、本手法はこのような問題も地盤情報を使わないために生じてはこない。

図-18 に示すように、高速道路に設置されている地震計の間を系統的に常時微動観測を行うことで、本手法を用いれば、高速道路に沿った地震動分布の推定が非常に簡便に可能になる。しかし、その際に既存のボーリングデータや地質図などから、大局的な地盤構造に変化がないかを調べることは重要である。提案手法は、図-8 のような地盤構造を仮定し、基盤面での入射地震動を共通のものと考えている。このため、仮に近傍の地点でも基盤面に大きな違いがあれば、本手法では地震動が推定できない場合もある。実際に、栃木 IC における地震動を約 10km 離れた K-NET 葛生の地震記録を用いて推定をすると、

推定の精度が非常に悪かった。表層地質図²⁴⁾で栃木 IC 周辺の基盤面を確認したところ、栃木 IC と K-NET 葛生でかなり異なっていることが分かった。このため、この 2 点間には地層構成の不連続面などが存在し、共通の入射地震動が仮定できないものと考えられる。このように、地震動推定の精度を下げないためにも、既存ボーリングデータや地質図などから、大局的な地盤構造の確認は必要がある。

7. 結論

常時微動観測に基づく水平鉛直スペクトル比と近傍の地震記録を用いて、地震計の設置されていない地点での地震動を推定する手法を提案した。

対象とする余り離れていない 2 地点の基盤面が共通であれば、入射地震動がほぼ等しいと仮定できる。常時微動の H/V スペクトル比と地震動の H/V スペクトル比の振幅形状が近似していることを利用して、2 点間の常時微動の H/V スペクトル比の比が、2 点間の地震動水平成分フーリエ振幅比に近似できることを示した。この性質を利用して、常時微動観測に基づく、波形推定およびスペクトル推定の 2 つの地震動推定法を提案した。

K-NET 観測点における地震記録と常時微動観測結果に基づいて、近傍の JH 観測点の加速度波形をよび応答スペクトルを推定すると、実際の記録と比較して、かなりの精度で推定が可能であることが確認できた。とくに短周期成分に関しては、波形推定が高い近似を示すのに対し、スペクトル推定は精度の低下が目立った。

現在、高速道路に設置されている地震計の数は、沿線約 20km に 1 カ所の割合であり、高速道路全体の地震動分布を把握するには、十分な数であるとはいいがたい。本研究の手法はボーリングデータなどの地盤情報に頼らないものであるため、高速道路に設置されている地震計の間で系統的に常時微動観測を行えば、かなりの精度で地震動分布の推定が可能になるものと考えられる。また、現在の指標である最大加速度 80Gal という小さな地震動レベルでは、高速道路構造物に被害が生じないことから、高速道路に沿った地震動分布推定が可能になると、通行規制基準の見直しにも適用できるとと思われる。

参考文献

1) 山崎文雄：リアルタイム地震防災システムの現状と展

望，土木学会論文集，No.577/I-41，pp. 1-15，1997。

- 2) 太田裕：リアルタイム地震防災について一期待と課題一，建築防災，No. 222，pp.2-7，1996。
- 3) 翠川三郎，阿部進：横浜市における細密震度分布の即時評価，第 10 回日本地震工学シンポジウム，Vol.1，pp. 3467-3432，1998。
- 4) 山崎文雄：リアルタイム地震防災のための地震動モニタリング，第 1 回リアルタイム地震防災シンポジウム論文集，pp. 5-12，1999。
- 5) 杉田秀樹：道路及び河川施設における地震防災システムの現状，第 1 回リアルタイム地震防災シンポジウム論文集，pp. 31-36，1999。
- 6) 清水善久，小金丸健一，中山涉，山崎文雄：超高密度リアルタイム防災システム－SUPREME－の開発，第 4 回都市直下地震災害シンポジウム論文集，pp. 415-418，1999。
- 7) 山崎文雄，山内洋志，本村均，浜田達也：高速道路の地震観測値に基づく通行規制基準の検討，第 25 回地震工学研究発表会講演論文集，pp.1045-1048，1999。
- 8) 山崎文雄，大西淳一，田山聡，高野辰雄：高速道路構造物に対する地震被害推定式の提案，第 10 回日本地震工学シンポジウム論文集，Vol. 3，3491-3496，1998。
- 9) 大西淳一，山崎文雄，若松加寿江：気象庁地震記録の距離減衰式に基づく地点増幅特性と地形分類との関係，土木学会論文集，No.626/I-48，pp. 79-91，1999。
- 10) Molas, G.L. and Yamazaki, F.: Attenuation of Earthquake Ground Motion in Japan Including Deep Focus Events, Bulletin of the Seismological Society of America, 85 (5), pp. 1343-1358, 1995。
- 11) Molas, G.L. and Yamazaki, F.: The Effect of Source Depth and Local Site to the Attenuation Characteristics of Response Spectra, 第 23 回地震工学研究発表会講演概要，pp. 69-72，1995。
- 12) Shabestari, K.T. and Yamazaki, F.: Attenuation of JMA Intensity Based on JMA-87-Type Accelerometer Records, 第 2 回都市直下地震災害総合シンポジウム論文集，pp. 153-156，1997。
- 13) 松岡昌志，翠川三郎：国土数値情報を利用した広域震度分布予測，日本建築学会構造系論文報告集，第 447 号，pp. 51-56，1993。
- 14) 中村豊：常時微動に基づく地震動特性の推定，鉄道総研報告，Vol.2，pp.18-27，1988。
- 15) Nakamura, Y.: Clear Identification of Fundamental Idea of Nakamura's Technique and its Applications, 12th World Conference on Earthquake Engineering, CD-ROM, 2000。
- 16) 時松孝次，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，第 439 号，pp.447-448，1992。
- 17) 大町達夫，紺野克昭，遠藤達哉，年縄巧：常時微動の水平動と上下動のスペクトル比を用いる地盤周期推定方法の改良と適応，土木学会論文集，No.489/I-27，

- pp.251-260, 1994.
- 18) 堀家正則, 趙伯明, 竹内吉弘: 微動から推定された地盤特性の信頼性の観測的検討, 第 10 回日本地震工学シンポジウム論文集, pp. 989-994, 1998.
 - 19) 大熊裕輝, 山崎文雄, 松岡昌志, 原田隆典: 宮崎県の強震観測点における地盤特性, 第 4 回都市直下地震災害総合シンポジウム論文集, pp. 459-462, 1999.
 - 20) Yamazaki, F. and Ansary, M.A.: Horizontal-to-vertical Spectrum Ratio of Earthquake Ground Motion for Site Characterization, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol.26, pp.671-689, 1997.
 - 21) 趙伯明, 堀家正則, 竹内吉弘, 藤原広行: 微動から推定された地盤特性に関する数値的検討, 第 10 回日本地震工学シンポジウム論文集, pp. 983-988, 1998.
 - 22) 宇津徳治, 嶋悦三, 吉井敏剋, 山科健一郎: 地震の事典, 朝倉書店, 1996.
 - 23) 大崎順彦: 地震動のスペクトル解析入門, 鹿島出版会, 1976.
 - 24) 通産省: 地質図幅

(2000. 5. 18 受付)

ESTIMATION OF STRONG MOTION DISTRIBUTION USING THE H/V SPECTRUM RATIO OF MICROTREMOR

Yoshihisa MARUYAMA, Fumio YAMAZAKI, Hitoshi MOTOMURA
and Tatsuya HAMADA

In order to gather earthquake information at an early stage and to establish an efficient traffic control just after an earthquake, Japan Highway Public Corporation (JH) has been developing a new seismometer network along their expressways since the 1995 Kobe Earthquake. However the number of seismometers is not large enough to grasp the detailed distribution of the strong ground motion along the expressways. In this study, using the horizontal-to-vertical (H/V) spectrum ratios of microtremor and seismic records at a neighboring site, the seismic motions at the microtremor observation points were predicted. This method does not use borehole data and can be applicable to the estimation of earthquake ground motion, especially for expressway networks.