

高速道路沿線における常時微動観測結果の H/Vスペクトル比を利用した地震動推定

久美田岳¹・丸山喜久¹・山崎文雄²・浜田達也³・金子謙一郎³

¹学生会員 東京大学大学院工学系研究科社会基盤工学専攻 (〒113-8656 東京都文京区本郷七丁目3-1)

²正会員 工博 東京大学生産技術研究所 (〒153-8505 東京都目黒区駒場四丁目6-1)

³正会員 日本道路公団試験研究所保全研究室 (〒194-8508 東京都町田市忠生一丁目4-1)

高速道路沿線の地震動分布を把握する方法としては、約20km間隔で設置された地震計の観測記録を空間補間する方法、地盤データを基に重複波理論により推定する方法などが考えられるが、精度やボーリングデータを必要とする点などで問題がある。そこで、近傍における地震記録と常時微動の水平鉛直スペクトル比(H/V)のみから地震動推定を行う手法が提案された。本研究では東北自動車道沿線において数キロメートル間隔の常時微動観測を行い、そのうち数地点においては建物内外、道路盛土上下において二点同時観測を行って観測される地震動に対する建物や道路盛土の影響を検討した。また、常時微動のH/Vスペクトル比を用いる推定法からそれらの地点における地震動推定を試みた。

Key Words : *microtremor, expressway, seismic motion, transfer function, K-NET, horizontal-to-vertical (H/V) Fourier spectrum ratio*

1. はじめに

高速道路には地震発生直後の迅速な地震情報の収集による効果的な地震時通行規制の実施を目的として、管理事務所建物内などに地震計が設置されており、これらの地震計によって記録された最大加速度を指標として地震時通行規制が実施されている。現在、旧型の最大加速度のみを記録する地震計に代わって設置が進んでいる地震計は、SI値や計測震度、加速度波形なども記録可能な新型地震計であり、その設置密度は高速道路延長約20kmに対して1ヶ所の割合に達している。これらの地震計から得られる地震記録を有効に活用し、さらに地震観測点間における地震動の詳細な推定が可能になれば、今後、より効率的な地震防災対策を行うことが可能になるものと考えられる。

図-1にJH鹿沼インターチェンジ(IC)とK-NET鹿沼の各地震観測点における、2000年7月21日に発生した茨城県沖を震源とする地震の地震記録NS成分の加速度波形と5%減衰の加速度応答スペクトルを示す。これらの二地点は、地点間の距離がおおよそ5kmと非常に近接した地点でありながら、加速度応答スペクトルの卓越周期に大きな違いがあり、異なった震動特性を持っていることが分かる。このようにそれぞれの地点は固有の震動特性を持っていると考えられるため、各地点における地震動を推定する際には、それらを考慮することが必要であると考えられる。

地盤による地震動の増幅特性を評価するために、中村¹⁾は常時微動のH/Vフーリエスペクトル比が擬似的にS波伝達関数を表すという理論を提案した。常時微動が主として実体波で構成されているという考えから、H/V比をとることによって表面波の影響を取り除くことができると主張している^{1),2)}。そこで、丸山³⁾は近傍における地震記録と常時微動の水平鉛直スペクトル比(H/V)のみから地震動推定を行う手法を提案した。本研究では、東北自動車道沿線における数キロメートル間隔の常時微動観測を行ってH/Vスペクトル比を求めて考察を行い、またその結果を用いて地震動の推定を行う。

2. 常時微動の水平鉛直(H/V)スペクトル比

(1) 常時微動観測

常時微動観測位置を図-2に示す。2000年8月24、25日に東北自動車道沿線において、佐野藤岡IC・栃木IC・鹿沼IC・宇都宮ICのJH観測点4ヶ所、高速道路沿線20ヶ所、K-NET鹿沼の計25ヶ所について常時微動観測を行った。JH観測点のうち2ヶ所については建物内外、高速道路沿線のうち6ヶ所については道路盛土上下において二点同時観測を行った。測定機器は(株)東京測振のサーボ型速度計SPC-35Nを用い、サンプリング周波数100Hzで5分間、一点につき水平2成分、鉛直1成分の3成分を測定した。図-2には本推定に利用した3地震の震源位置も示している。

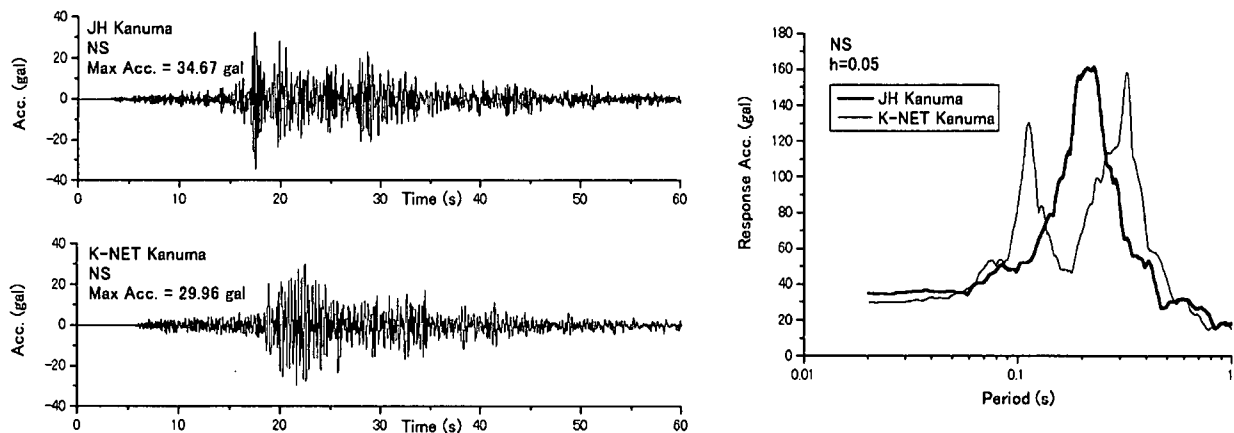


図-1 鹿沼ICとK-NET鹿沼における2000年7月21日茨城県沖地震NS成分の加速度波形と加速度応答スペクトル

(2) フーリエスペクトルのH/V比

観測を行った常時微動については、5分間すなわち30000個のデータを3000個ずつ10分割し、それぞれに1096個の後続のゼロをつけた4096個のデータに関して高速フーリエ変換を行い、バンド幅0.4HzのParzenウィンドウで平滑化したフーリエスペクトルを求めた。10区間それぞれについてH/Vスペクトル比を計算し、それらの相乗平均をその地点における常時微動のフーリエスペクトルのH/V比とした。

地震動については、主要動部1分間すなわち6000個のデータに関して同様の操作を行い、観測地点における地震動のフーリエスペクトルのH/V比を求めた。

図-3は東北自動車道沿線のJH観測点4地点（佐野藤岡IC、栃木IC、鹿沼IC、宇都宮IC）において、2000年7月21日の茨城県沖地震の地震動観測記録と、地震計位置における常時微動観測記録のフーリエスペクトルH/V比を比較したものである。ここではEW成分とNS成分について相乗平均を計算している。

この図より、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。ここでは1地震記録のみを用いた比較であるが、地震動と常時微動のH/Vスペクトル比の振幅形状の類似については他にも報告がなされており^{3),4)}、Yamazaki and Ansary⁵⁾は、地震動のH/Vフーリエスペクトル比が、地震によらず地点ごとに安定していることを、加速度フーリエスペクトルと近似関係にある速度応答スペクトルの距離減衰式から確認している。

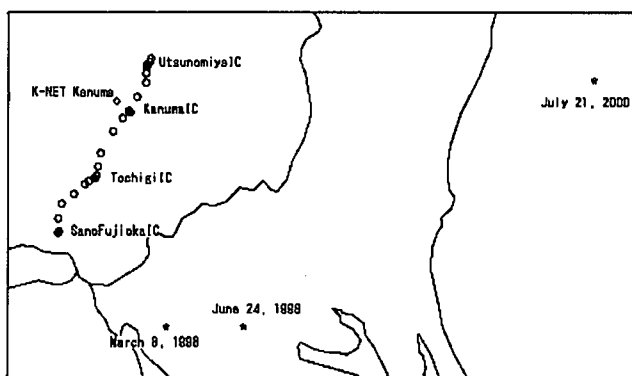


図-2 常時微動観測地点と使用した地震の震源位置

(3) 建物・道路盛土の影響

JH観測点4ヶ所のうち、佐野藤岡IC・鹿沼ICの2ヶ所については建物内地震計位置と建物屋外において常時微動の二点同時観測を行った。鹿沼ICにおける観測結果についてフーリエスペクトル（図-4(a)）、フーリエスペクトルのH/V比、 H_{in}/H_{out} 比・ V_{in}/V_{out} 比・ $(H_{in}/V_{in})/(H_{out}/V_{out})$ 比（図-5(a)）を示す。水平成分として建物軸方向・直交方向の2成分の観測を行ったが、両者に明確な差異が認められなかったため相乗平均を計算して水平成分として扱った。

振動源の影響で建物内外でフーリエスペクトルの振幅形状は異なる（図-4(a)）が、H/V比を取ることで影響が除去される。H/H比は1から外れているが、V/V比も同様な形状であるため、 $(H/V)/(H/V)$ 比は周期1秒以下ではほぼ1であり（図-5(b)）、観測記録に及ぼす建物の影響は小さいと考えられる。

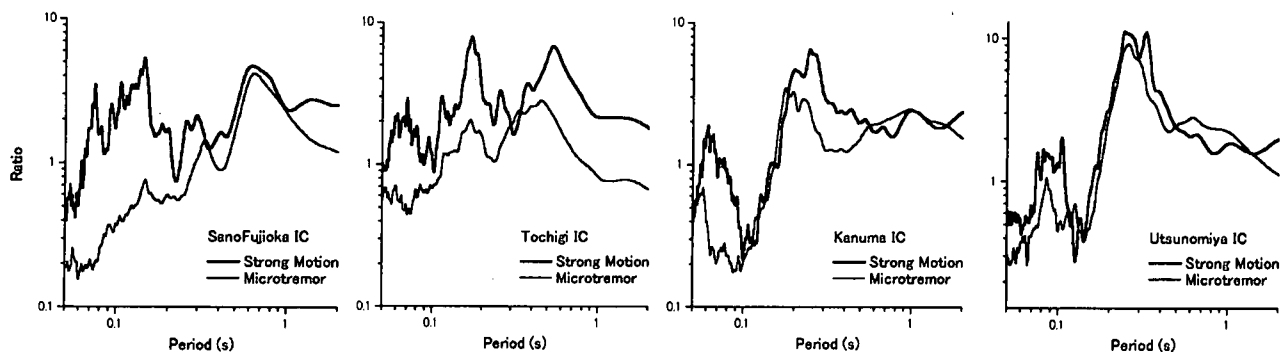
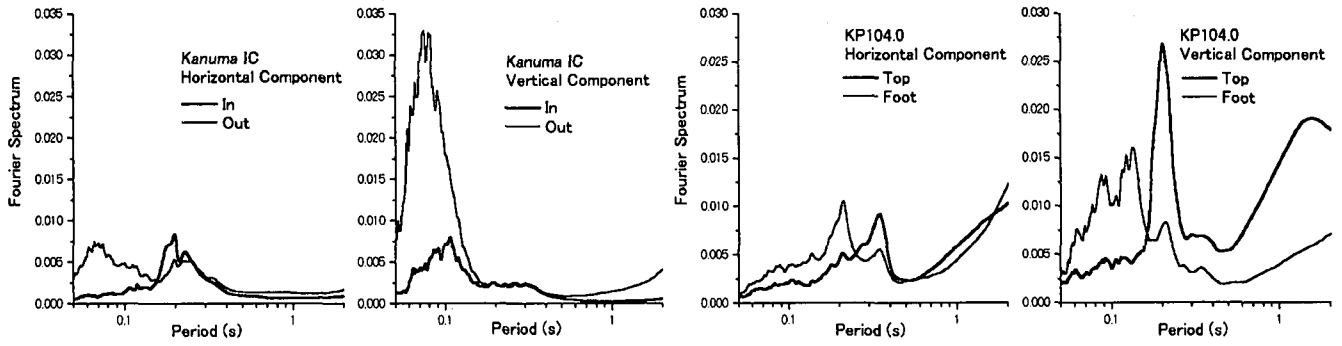
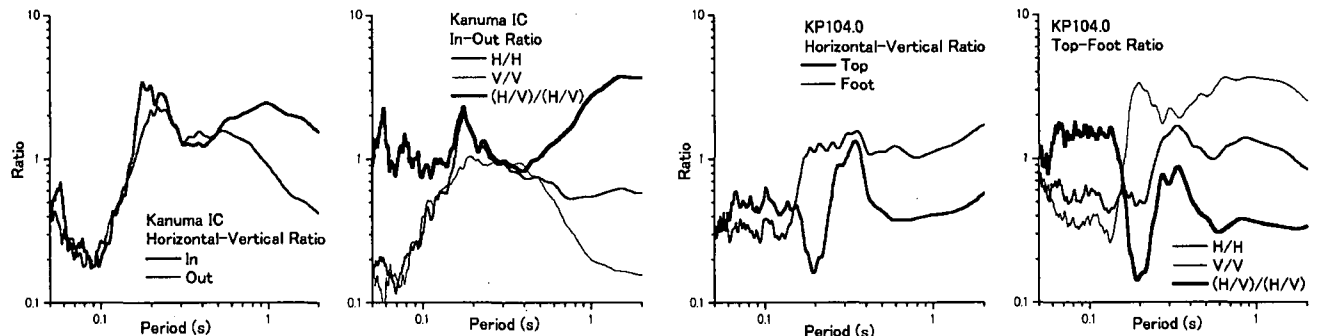


図-3 JH観測点における2000年7月21日茨城県沖地震と常時微動のフーリエスペクトルH/V比の比較



(a) 鹿沼ICにおける建物内外の比較 (b) KP104.0における道路盛土上下の比較
図-4 常時微動のフーリエスペクトル



(a) 鹿沼ICにおける建物内外の比較 (b) KP104.0における道路盛土上下の比較
図-5 常時微動のフーリエスペクトルH/V比とH/H比・V/V比・(H/V)/(H/V)比

高速道路沿線の常時微動観測位置20ヶ所のうち5ヶ所については道路盛土の上下、1ヶ所においては道路切土の上下において二点同時観測を行った。宇都宮IC近傍の地点KP104.0（宇都宮5C-BOX）における観測結果についてフーリエスペクトル（図-4(b)）、フーリエスペクトルのH/V比、 H_{top}/H_{foot} 比・ V_{top}/V_{foot} 比・ $(H_{top}/V_{foot})/(H_{top}/V_{foot})$ 比（図-5(b)）を示す。水平成分として道路軸方向・直交方向の2成分の観測を行ったが、両者に大きな差異が認められなかったため相乗平均を水平成分として扱った。

これより、道路盛土の上下では水平成分よりも鉛直成分についてフーリエスペクトルの振幅形状の違いが見られ（図-4(b)）、その結果H/V比は全体的に盛土下において大きな値をとり、H/H比を見ると盛土上では盛土下より長周期領域で揺れやすい傾向にあるが、V/V比の方により大きくその傾向が見られるため、 $(H/V)/(H/V)$ 比を見ると盛土上より盛土下の方が長周期領域で揺れやすいという結果を示している（図-5(b)）。

このような傾向はこの地点に限らず、道路盛土上下において二点同時観測を行った5地点すべてについて見られた。その原因としては常時微動の水平成分と鉛直成分の伝播特性の違いが考えられ、新井⁶⁾は走行している自動車を振動源とする常時微動の距離減衰特性について、鉛直成分については振源距離が大きくなるほど振幅値が減少するのに対して、水平成分についてはレイリー波やラブ波の1波長（ともに20-25m程度）以内では、振源距離とともに振幅値も増大し、それ以降では振幅値は現象するという観測結果を報告している。

3. 常時微動による地震動推定

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から、常時微動観測地点における地震動の推定を行う。

丸山³⁾が提案した推定手法では、推定を行う地点と地震観測点の基盤面が共通であり、基盤面に入射する地震動も共通であると仮定する。地震観測点（Seismic Station）の地表面における地震動のフーリエスペクトルH/V比 $R_{surface}^{SS}$ は次式のように書ける。

$$R_{surface}^{SS} = (A_H^{SS}/A_V^{SS}) \cdot R_{reference} \quad (1)$$

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伝達関数、 $R_{reference}$ は露頭基盤面における地震動のフーリエスペクトルH/V比である。常時微動と地震動の振幅形状の類似から、以下を仮定する。

$$|R_{surface}^{SS}| \approx r_{H/V}^{SS} \quad (2)$$

常時微動観測点（X）においても同様の関係が成立すると言えるから、常時微動のフーリエスペクトルのH/V比同士の比 $r_{H/V}^{X/SS}$ は次の式(3)のように書ける。

$$r_{H/V}^{X/SS} \approx \frac{R_{surface}^X}{R_{surface}^{SS}} = \frac{A_H^X/A_V^X}{A_H^{SS}/A_V^{SS}} = \frac{E_S^X/E_P^X}{E_S^{SS}/E_P^{SS}} \quad (3)$$

ここで E_S 、 E_P はそれぞれ水平成分、鉛直成分の地震動フーリエスペクトルである。共通の基盤面入射地震動を仮定しているため $R_{reference}$ は消去される。

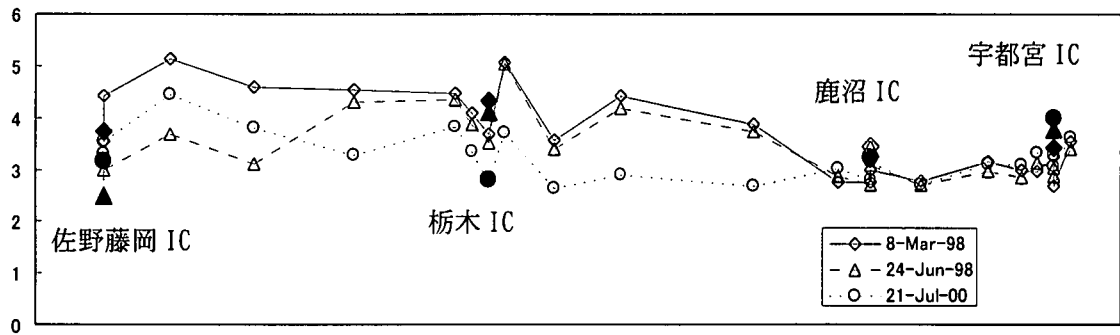


図-6 常時微動観測結果を用いた東北自動車道沿線における3地震についての計測震度推定値
(黒点は観測値, 白抜き点は本手法を用いて推定された値)

ここで, 式(3)の水平成分(S波)伝達関数比 $|E_s^x/E_s^{ss}|$ と鉛直成分(P波)伝達関数比 $|E_p^x/E_p^{ss}|$ について, S波伝達関数比のピーク周期付近ではP波伝達関数比は1に近い^{2),3)}から, S波の卓越する周期付近では式(3)は次式のように近似できる。

$$r_{H/V}^{x/ss} \approx \left| \frac{E_s^x}{E_s^{ss}} \right| \quad (4)$$

すなわち, 二点間の常時微動のH/Vスペクトル比の比が二点間の地震動の水平成分フーリエスペクトル比を近似しているものと考えられる。

これらの点における地震記録の位相が等しいと仮定すると, 波形の推定が可能になる。地震観測点で記録された地震動の主要動部のフーリエスペクトルに, 二点間の常時微動H/Vスペクトル比を乗じることにより, 常時微動観測点における地震動の水平成分フーリエスペクトルを次式のように推定する。

$$E_s^{x, \text{estimated}} \approx E_s^{ss} \cdot r_{H/V}^{x/ss} \quad (5)$$

(5)式で得られた値をフーリエ逆変換することで, 常時微動観測点における加速度波形を推定することができる。もちろん二地点における地震動の位相が等しいという仮定は厳密に成り立つものではない。常時微動観測に用いた速度計の固有周期が約1秒であることを考慮して, 計算は周期領域で0.05秒から2秒の範囲について行った。

JH観測点4ヶ所における地震記録を用いて, 高速道路沿線20ヶ所の地震動の加速度波形推定を行った。推定した地震は1998年3月8日と6月24日の茨城県南部を震源とする地震と2000年7月21日の茨城県沖を震源とする地震であるが, 1998年の2地震については鹿沼ICの地震計が最大加速度表示のみの旧型地震計であったため3ヶ所における地震記録から推定している。

推定した加速度波形から, 各地点における最大加速度, SI値, 計測震度を計算した。高速道路沿線における計測震度の推定値を図-6に示す。推定値と近傍の観測点における観測値との誤差は概ね±1の範囲である。この推定の精度については検討の余地があるものの, 観測された地震記録から地震時通行規制を行う際には, 観測点と観測点間の地点における地盤の震動特性を考慮することが重要であると考えられる。

4. まとめ

東北自動車道沿線の25ヶ所で常時微動の観測を行った。JH観測点4ヶ所における地震記録と常時微動のフーリエスペクトルのH/V比を計算し, 振幅形状が似ていることを確認した。JH観測点の建物内外における二点同時観測結果から, 観測された地震動に対する建物の影響はほとんどないと考えられることが分かった。道路盛土の上下における二点同時観測結果から, 盛土下の方が盛土上よりも揺れやすいという推定結果が得られたが, 常時微動の水平成分と鉛直成分の伝播特性の違いについて考慮しなければならなかったことが分かった。また, 常時微動のH/Vスペクトル比を用いた地震動推定手法を用いて高速道路沿線の地震動分布を推定し, 計測震度を計算した。その結果, 周囲と比較して揺れやすい地点, 揺れにくい地点が存在するものの, 推定値と近傍の観測点における観測値との誤差は概ね±1の範囲であることが分かった。

本手法を用いることで高速道路沿線の地震観測点間における常時微動観測から容易に地震動の推定が可能であり, 推定の精度を高めることによって今後の地震防災に活用できるものと考えられる。

参考文献

- 1) 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.
- 2) Nakamura, Y.: Clear Identification of Fundamental Idea of Nakamura's Technique and its Applications, 12th World Conference on Earthquake Engineering, CD-ROM, 2000.
- 3) 丸山喜久, 山崎文雄, 本村均, 浜田達也: 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, 土木学会論文集, No.675, I-55, pp.261-272, 2001.
- 4) 大熊祐輝, 松岡昌志, 山崎文雄: 宮崎県における地震観測記録と常時微動を用いた地震動測定, EDM Technical Report, No.12, 2001.
- 5) 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.
- 6) 新井洋: 単一走行自動車による地盤振動の伝播特性に関する研究, 第35回地盤工学研究発表会講演集, pp.2355-2356, 2000.