



Title	2003年十勝沖地震の地震記録に見られる 地盤の非線形応答に関する研究
Author(s)	三輪田, 吾郎; 高井, 伸雄; 清水, 学; 笹谷, 努; 前田, 宣浩; 山本, 明夫
Citation	北海道大学地球物理学研究報告, 73, 195-205
Issue Date	2010-03-19
DOI	10.14943/gbhu.73.195
Doc URL	http://hdl.handle.net/2115/44474
Type	bulletin (article)
File Information	73_18_p195-205.pdf



[Instructions for use](#)

2003 年十勝沖地震の地震記録に見られる 地盤の非線形応答に関する研究

三輪田吾郎^{*1}・高井 伸雄・清水 學^{*2}・笹谷 努

北海道大学大学院工学研究科

前田 宜浩^{*3}

北海道大学大学院理学研究院

山本 明夫

応用地質株式会社

(2010 年 1 月 8 日受理)

A study on nonlinear site response appeared on strong ground motions
during the 2003 Tokachi-oki earthquake

Goro MIWADA・Nobuo TAKAI・Gaku SHIMIZU・Tsutomu SASATANI

Graduate School of Engineering, Hokkaido University

Takahiro MAEDA

Faculty of Science, Hokkaido University

and

Akio YAMAMOTO

Oyo Corporation

(Received January 8, 2010)

Nonlinear site response was observed at TKCH 07 in Toyokoro and HKD 109 in Urakawa during the mainshock (M_j 8.0) and the largest aftershock (M_j 7.1) of the 2003 Tokachi-oki Earthquake. At TKCH 07, peak ground acceleration (PGA) was smaller than PGA at the other strong motion station in Toyokoro. At HKD 109, the accelerogram shows a characteristic spiky waveform. Due to this spiky wave, large PGA was observed compared to the other stations in Urakawa, although PGA at HKD 109 was smaller than PGA at JMA Urakawa station during the main shock and smaller aftershocks.

^{*1} 現所属：株式会社大林組, Obayashi Corporation

^{*2} 現所属：福島県庁, Fukushima Prefectural Office

^{*3} 現所属：カリフォルニア大学サンタバーバラ校, University of California, Santa Barbara

I. はじめに

一般に地盤の非線形応答時には、工学的基盤に入力された地震動から予測される地表面の加速度よりも、観測される加速度は減少する。一方、これとは逆に地盤の非線形応答時に観測された地震動の加速度が、予測される地表面の加速度を大きく上回る事例も報告されている。2003年9月26日4:50に十勝沖を震源とする2003年十勝沖地震 ($M_j 8.0$) が発生し、同日6:08に最大余震 ($M_j 7.1$) が発生した。本地震は1996年以降に高密度観測網が全国で整備されて、初めてのM8クラスの大地震であり、北海道を中心に広範囲に亘る観測点で強震記録が得られた。2003年十勝沖地震については、地盤の非線形応答に関する論文も報告され（例えば、山田・他、2004；山本、2006），強震動による非線形応答を議論するための良好な地震記録が数多く観測された地震であった。そこで本研究では、北海道内の強震観測点で生じた地盤の非線形応答の解釈の為、2003年十勝沖地震群での各強震観測点における地震記録を精査し、特に選別した数観測点で非線形応答の強震動への影響を検討した。

II. 2003年十勝沖地震による非線形応答発生観測点

地盤の非線形応答発生の要因の一つは工学的基盤からの強震動入力である。Fig. 1に示した全道での2003年十勝沖地震本震・最大余震の震度分布図より日高～十勝～釧路地方にかけて計測震度5を超える強震動が観測されおり、大局的にこの地域で地盤の非線形応答が発生した可能性を指摘することが出来る。

地震記録より地盤の非線形応答を調べる方法の一つに、S波の地表／地中のスペクトル比を取り、弱震によるスペクトル比との比較で卓越周波数の低周波帯への移動を検討する方法がある。

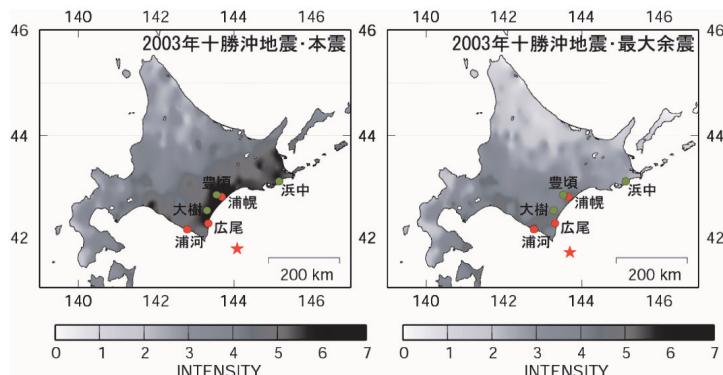


Fig. 1. Maps of the intensity distribution during the 2003 Tokachi-oki earthquake in Hokkaido (Left map: Mainshock, Right map: Largest aftershock).

山本（2006）はこの方法を用いてボアホール強震観測網を全国に布く基盤強震観測網（KiK-net）より得られた地震記録から、2003年十勝沖地震により北海道内で地盤の非線形性が現れた観測点をまとめている。山本（2006）はスペクトル比卓越周波数の低周波数側への移行が見られた観測点としてKiK-net浜中（KSRH 10）、豊頃（TKCH 07）、大樹（TKCH 08）の3観測点を挙げている。3観測点の位置を図示したFig. 1よりこれらの観測点が本震での強震域に位置していることが分かる。またTKCH 07での本震及び余震群のS波地表／地中のスペクトル比を描いたFig. 2からは、卓越周波数が余震時の1Hz付近から低周波数側へ移行し、高周波成分が低減するなど、非線形応答時の特徴が現れている。

一方、ボアホール観測を行っていない地表のみの強震観測点で非線形応答を確認する手法には、S波部分のH/Vスペクトル比をとり、弱震動時のH/Vスペクトル比との比較で、スペクトル比高周波成分の低減などから地盤の非線形応答を推定する方法が知られている（Wen et al., 2006）。本研究においても強震ネットワーク（K-NET）観測点での強震記録にH/Vスペクトル比法を適用し、各観測点での非線形応答発生の有無を確認した。解析では地盤の非線形応答が強震動の入力により発生することを鑑みて、北海道の各K-NET観測点の内、2003年十勝沖地震・本震において水平合成100 gal以上の最大地動加速度（PGA）を記録した観測点を対象とした。条件に当てはまる観測点は49点存在した。本震のS波部分のH/Vスペクトル比と比較するための弱震動には2003年1～8月までに各観測点で観測された地震を用いた。この内、本震又は最大余震時に卓越周波数が低周波数側へ移行する傾向が最も顕著に見られた3観測点、K-NET浦幌（HKD 091）、広尾（HKD 100）、浦河（HKD 109）のS波部分のH/Vスペクトル比をFig. 3に示す。HKD 091、HKD 100では本震時にそれぞれ計測震度6.0、5.8を記録し、卓越周波数の

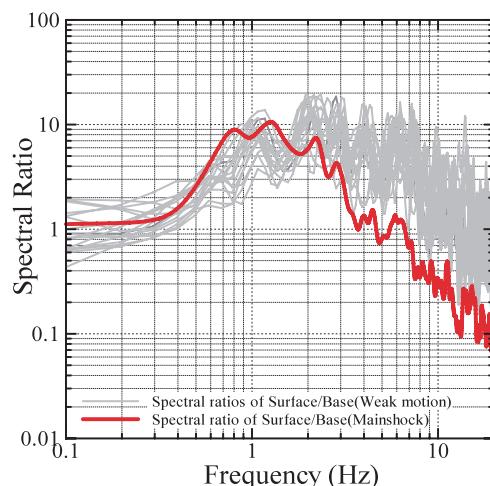


Fig. 2. Spectral ratios of ground surface motions to downhole motions at TKCH 07 (Base: GL=100 m, Transverse) from the 2003 Tokachi-oki earthquake sequence.

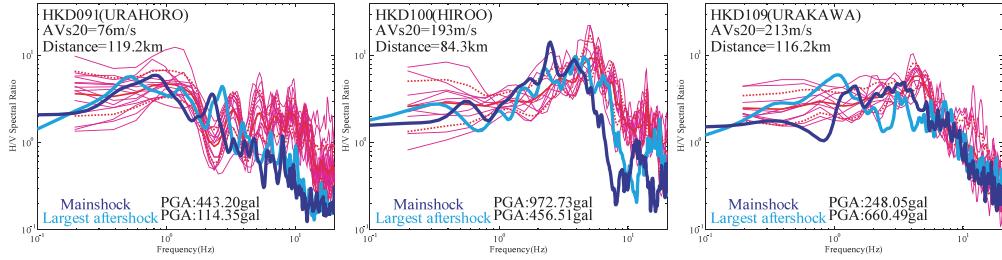


Fig. 3. S-wave H/V spectral ratios from the 2003 Tokachi-oki earthquake and weak motions at HKD 091, HKD 100 and HKD 109.

低周波数側への移動も本震で大きくなっている。HKD 109 では最大余震時に震度 5.9 を記録し（本震震度 5.2），非線形性の特徴も本震と比べ最大余震により明瞭に現れている。

III. 非線形応答発生観測点での地下構造の推定

K-NET, KiK-net 観測点において発生したと考えられる地盤の非線形応答を地盤増幅特性等より検討する為，観測点付近での地下構造の推定を行った。

地盤の非線形性を示したボアホール観測点の内，TKCH 07 では既に清水・他（2005）により S 波速度構造が推定されている。地表の地震記録のみから地盤の非線形性を判断した K-NET 観測点についても地下構造を推定すべく，ここでは Fig. 3 の 3 観測点の内，代表例として HKD 109 において S 波速度構造探査を行った。Fig. 4 に示した浦河町強震観測点 HKD 109 と浦河-G（港湾地域強震観測）の近傍において微動探査及び表面波探査を実施した。微動探査では各観測点近傍で 4 ~ 6 サイズ（半径 2 ~ 33 m）のアレー観測を実施した。表面波探査は各観測点近傍で 1 ~ 2 回実施した。得られた微動記録の内，安定した区間を選び空間自己相関法 [SPAC 法，岡田（1997）] より用いて Rayleigh 波の位相速度の分散曲線を推定した（Fig. 5 丸印）。各サイズの

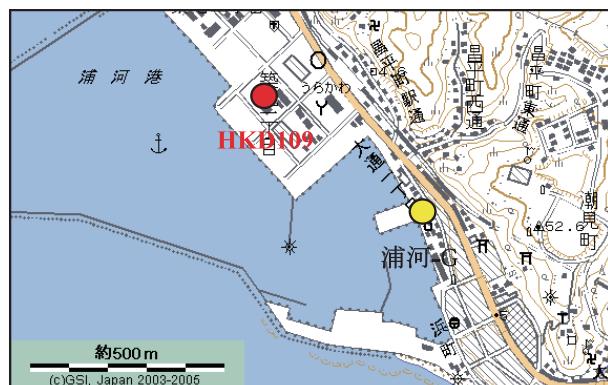


Fig. 4. Strong motion stations in Urakawa.

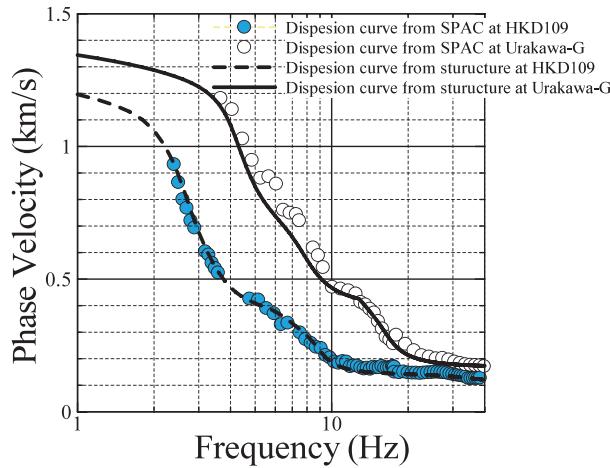


Fig. 5. Observed and theoretical dispersion curves of Rayleigh waves at HKD 109 and Urakawa-G.

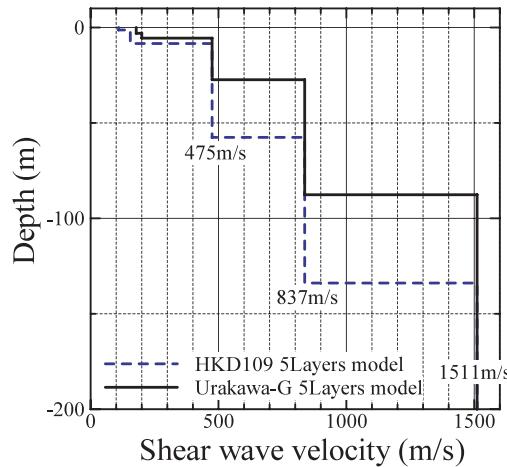


Fig. 6. Determined S-wave velocity structures at HKD 109 (blue line) and Urakawa-G (black line).

アレーにより推定された位相速度の分散曲線を、有効波長や SPAC 係数を考慮し接続した。約 20 Hz 以上では表面波探査により推定された位相速度の分散曲線を用いている。求めた Rayleigh 波の位相速度の分散曲線から、地盤の S 波速度構造を推定する際には、遺伝的アルゴリズムによる離散化的逆解析手法（中山・他, 1995）を適用した。速度構造は 5 層から成り、下層の 3 層は同速度と仮定した。推定した S 波速度構造を Fig. 6 に示す。Fig. 6 より 2 観測点では 10 m 以浅の最表層の構造と $V_S \sim 500$ m/s の層での層厚に差が見られる。

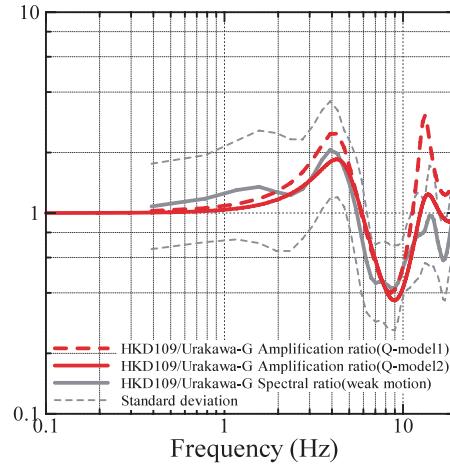


Fig. 7. Amplification ratios of HKD 109 to Urakawa-G, Q-model 1 and Q-model 2.

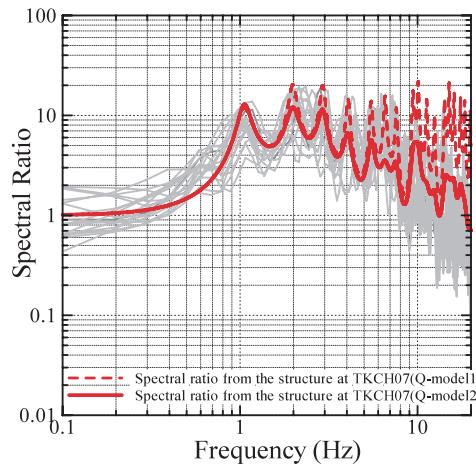


Fig. 8. Spectral ratios of Surface to Base at TKCH 07, Q-model 1 and Q-model 2.

IV. 浦河町・豊頃町における地震記録の詳細な検討

3章で推定したS波速度構造より1次元重複反射理論に基づくPropagator Matrix法を用いてHKD 109, TKCH 07での地盤增幅特性の検討と、弱震及び2003年十勝沖地震での強震記録シミュレーションを行った。HKD 109では最近距離に位置する浦河-Gに対する增幅特性を、TKCH 07では地中観測点に対する增幅特性をそれぞれ計算した(Fig. 5, 7, 8赤・破線)。HKD 109についてはS波速度構造を5層と仮定したが、シミュレーションの結果、第3～5層への地震動入力による波形・スペクトルの差は小さく、3層(約10m以浅)までの表層が2観測点間の地盤

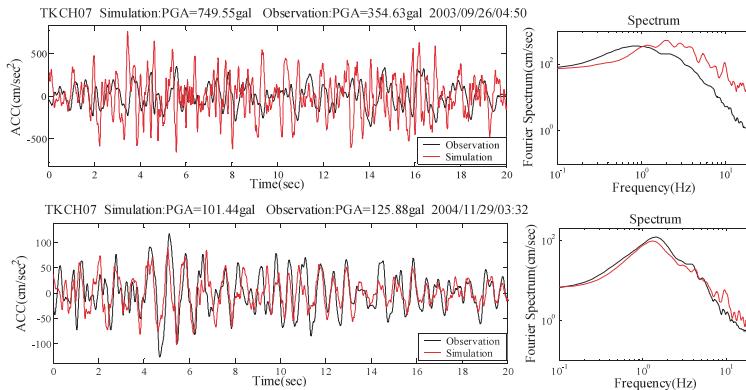


Fig. 9. Simulated accelerograms at TKCH 07 from the 2003 Tokachi-oki earthquake and the weak motion (2004/11/29 M_j 7.1).

増幅の差に大きな影響を及ぼしていると考え、計算には3層構造を用いた。またHKD 109の入射波には浦河-Gの地表記録より計算した入射波（はぎとり波）を用いた。両観測点ともに10 Hz程度までは、地盤の増幅比又はスペクトル比が弱震時のスペクトル比とほぼ一致する一方、10 Hz以上の高周波帯で過大な値を算出している。これは地盤の減衰係数Q値を、散乱減衰のみ考慮する式とした為である。小林・他（1999）は散乱減衰に加え、高周波帯で支配的な内部減衰を考慮に入れたQ値式を提案しており、本研究においても同式を用いた。計算結果をFig. 5, 7, 8に示す（赤・実線）。両図より高周波帯で、弱震時のスペクトル比と良い一致が得られていることが分かる。Fig. 9に示したTKCH 07での加速度波形のシミュレーション結果より、弱震時には非常に精度良く波形の再現が出来ていることが分かる。非線形応答が発生したと推定される本震時ではシミュレーションに比べ観測記録のスペクトルが高周波帯でレベルダウンしている。Fig. 10のHKD 109での加速度波形のシミュレーション結果においても、100 gal以下の弱震では精度良く波形・スペクトルの再現が可能であるのに対し、地震動が本震レベルに達するとTKCH 07と同様、再現が難しくなる。その傾向は最大余震時により顕著になっている。

HKD 109の最大余震での加速度記録のNS成分を示したFig. 11では、Fig. 10では明瞭に現れなかった特異なスパイク状の波形が周期的に現れている。これはTransverse成分と凡そ直交となるNS方向に、この波形の指向性があるためである。Bonilla et al. (2005)は、このスパイク状の波形が加速度記録に現れた場合の記録の特徴を通常の非線形応答記録と比較している。比較結果をまとめたTable 1の分類より、HKD 109では最大余震時にサイクリックモビリティを伴う、通常とは異なる非線形応答が起こったと推察される。

1993年釧路沖地震（ M_j 7.5）においても港湾地域強震観測（釧路-G）で、Fig. 11に示したHKD 109の波形と同様のスパイク状波形が観測された（Fig. 12）。地表記録ではS波部のみならず後続波部分（20 sec以降）にもスパイク状波形が現れており、サイクリックモビリティによる加速度波形の特徴をよく示している。通常の非線形応答時のスペクトル比（TYPE 1, Fig. 2）とサイクリックモビリティを伴う非線形応答時のスペクトル比（TYPE 2, Fig. 13）を比較すると、余震時の1 Hz付近の卓越周波数が本震時には低周波数側へ移行し、高周波成分が低減するなど、

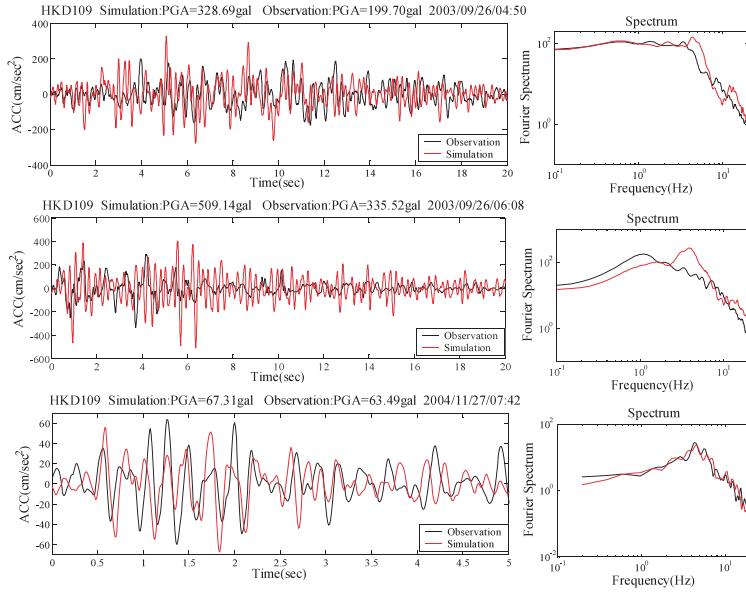


Fig. 10. Simulated Accelerograms at HKD 109 from the 2003 Tokachi-oki earthquake (Mainshock and Largest aftershock) and the weak motion (2004/11/27 M_j 5.6).

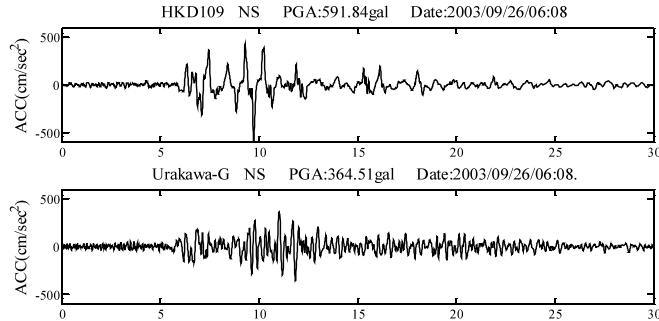


Fig. 11. Accelerograms (NS) at HKD 109 and Urakawa-G from the Largest aftershock of the 2003 Tokachi-oki earthquake.

Table 1. Two types of nonlinear site response. (after Bonilla et al., 2005)

	Type I Shear modulus reduction	Type II Cyclic mobility
	Indirect	Direct
Observation in accelerogram	• a shift of the fundamental frequency of the transfer function to longer period	• spiky waveform • spiky waveform • a pronounced change in frequency content that occurs during or immediately after strong shaking
PGA	Reduction	Increase
Amplification	Reduction	Increase

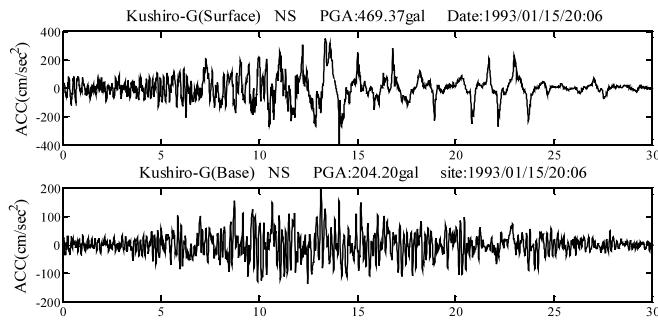


Fig. 12. Accelerograms (NS) of Surface and Base station at Kushiro-G from the 1993 Kushiro-oki earthquake.

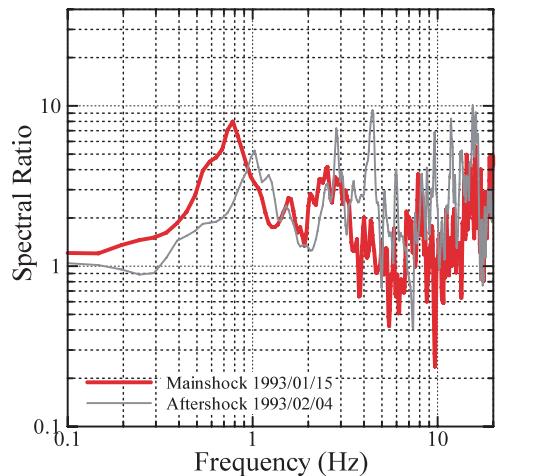


Fig. 13. Spectral ratios of ground surface motions to downhole motions at Kushiro-G (Base: GL-77 m, Transverse) from the 1993 Kushiro-oki earthquake sequence.

非線形応答時の特徴を示すが、Fig. 2 ではこの卓越周波数でのスペクトル比が低減するのに対して、Fig. 13 では増幅しており、地表面での増幅に明確な差異が現れている。ボアホール観測を行っていない HKD 109 については、地中観測点に代わり浦河-G を用いてスペクトル比を計算した (Fig. 14)。浦河-G は工学的基盤面までの深さが HKD 109 に比べ浅く、S 波速度も大きいので (Fig. 6)，擬似的に工学的基盤と見なせると考えた。Fig. 14 より、2003 年十勝沖地震・最大余震では、1993 年釧路沖地震・本震と同じく、卓越周波数でのスペクトル比が低周波数側に移動し、増幅していることが分かる。

V. ま と め

2003 年十勝沖地震における北海道内の各強震観測点で S 波の地表／地中スペクトル、S 波

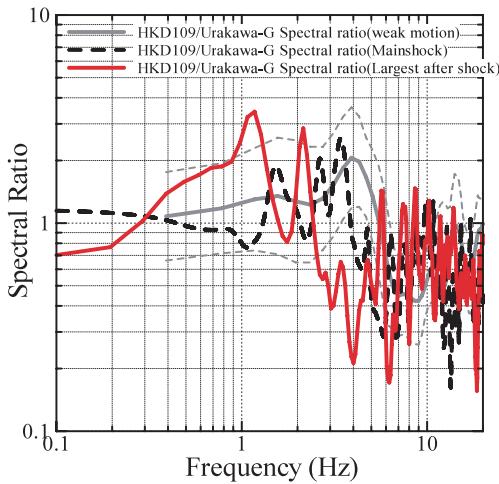


Fig. 14. Spectral ratios of HKD 109 to Urakawa-G from the 2003 Tokachi-oki earthquake sequence and moderate earthquake.

部分の H/V スペクトル比をとり、地盤の非線形応答性状を示した観測点を抽出した。抽出した強震観測点の内、K-NET 浦河と KiK-net 豊頃での S 波速度構造を推定し、弱震及び 2003 年十勝沖地震本震・最大余震での強震記録のシミュレーションを行った。2 観測点での地盤の非線形挙動時には、シミュレーション結果と比べ、高周波帯でのスペクトルの低下等の特徴が共通して見られた。最大余震時の HKD 109 においては、TKCH 07 を含め他の非線形応答発生観測点で現れない、大加速度を伴うスパイク状の特異な波形が現れた。これはサイクリックモビリティを伴う非線形応答が発生した為で、通常の地盤の非線形応答とは地盤增幅特性に明確な差があった。以上の非線形応答時の違いを踏まえ、今後は 2003 年十勝沖地震による各観測点での非線形応答時の観測記録の再現が課題であると考える。

謝辞 K-NET, KiK-net, 港湾地域強震観測、気象庁のデータ及び国土地理院の地図を使用しました。記して感謝いたします。

文 献

- Bonilla L.F., R.J. Archuleta and D. Lavallee, 2005. Hysteretic and Dilatant Behavior of Cohesionless Soils and Their Effects on Nonlinear Site Response: Field Data Observations and Modeling, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **95**, 2373-2395.
- 小林喜久二・久家英夫・植竹富一・真下貢・小林啓美, 1999. 伝達関数の多点同時逆解析による地盤減衰の推定その 3 Q 値の基本式に関する検討, 日本建築学会学術講演梗概集 (中国), 253-254.
- 岡田廣, 1997. 微動探査法 物理探査ワンデーセミナー, 物理探査学会.
- 清水学・高井伸雄・笛谷努: 十勝川下流域における地下構造と強震動特性(2), 2005. 浅部 S 波速度構造の推定と增幅特性の検討, 日本建築学会大会学術梗概集 B-2, 267.

- Wen K. L., T.M. Chang, C. M. Lin and H. J. Chiang, 2006. Identification of Nonlinear Site Response Using the H/V Spectral Ratio Method, *Terr. Atmos. Ocean. Sci.*, **17**, 533–546.
- 山田有孝・三浦賢治, 2004. 平成15年(2003年)十勝沖地震におけるKiK-net厚真記録の非線形シミュレーション解析, 日本建築学会大会学術梗概集, 755–756.
- 山本明夫, 2006. 地盤の非線形応答が地震動に与える影響及びその予測に関する研究, 北海道大学大学院理学研究科博士論文.
- 山中浩明・石田寛, 1995. 遺伝的アルゴリズムによる位相速度の逆解析, 日本建築学会構造系論文集, **468**, 9–17.