

H/V スペクトル比の基本構造

中村 豊 (SDR、東工大大学院)

Basic Structure of the H/V Spectral Ratio

Yutaka Nakamura (SDR, Tokyo Institute of Technology)

Abstract: The H/V spectral ratio is overviewed from its origin to the application for practical disaster prevention. The H/V spectral ratio was found from the strong motion records at various sites in Japan. On the soft ground, horizontal motion is larger than vertical motion. On the other hand, on the hard ground, both horizontal and vertical motions are similar to each other both on the maximum value and waveform. The H/V spectral ratio shows the amplification characteristics by the multiple reflections of the SH wave at least around F_0 , and shows the characteristics contaminated by the Rayleigh wave around $2F_0$.

1. はじめに

H/V スペクトル比による増幅特性の推定法は1986年に初めて提案した(中村ほか1986)が、なかなか受け入れられなかった。ロマプリエタ地震後の常時微動調査に利用した結果、卓越振動数や増幅特性が実際の被害と明瞭な対応関係を示すことから外国で注目され始めた。その後、多くの研究者により、推定法の追試や数値シミュレーションなどが行われ、その有効性が確認されてから世界中で使われるようになってきている。

しかし、「H/V スペクトル比は Rayleigh 波の特性を示すものだから、固有振動数は的確に推定できるが、そのピークは増幅倍率ではない」との誤った認識が広まっている。

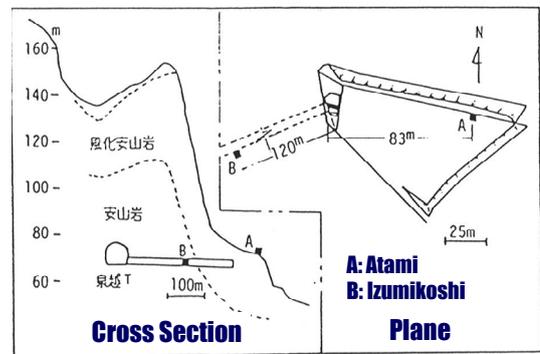
もともと、H/V スペクトル比は、Rayleigh 波の影響を除去する方法として考案されたものである。これは、表層地盤内の重複反射による増幅作用が地震被害に大きな影響を与えているとの認識のもと、常時微動では Rayleigh 波の影響が大きく重複反射による増幅作用を乱す場合が多い状況に鑑みて提案したものである。

ここでは、あらためて、H/V スペクトル比の生い立ちや基本構造を概説するとともに、耐震性評価などへの応用例について述べることにする。

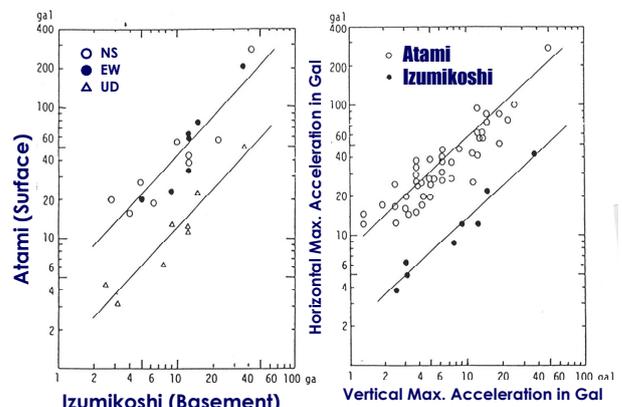
2. H/V スペクトル比の生い立ち

様々な地震をさまざまな地点で観測記録した数多くの強震波形を見ていて、以下のような特性に気づいた。すなわち、軟弱な地盤では水平動が上下動に較べて大きく、堅固な地盤では水平動と上下動が同程度の振幅で波形特性も類似している。

そこで、強震記録の最大値について水平と上下の比



(a) Site Location



(b) Comparisons between maximum values

Fig. 1 Characteristics of Strong Motion

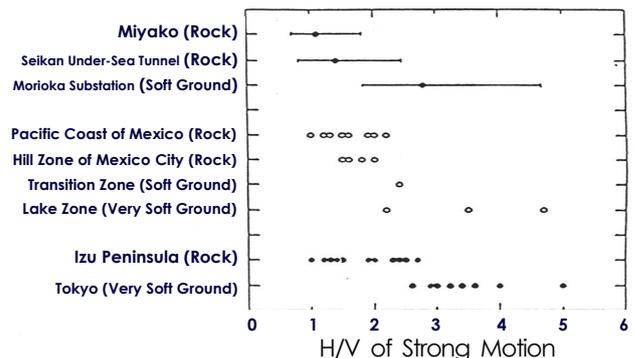


Fig. 2 Comparison between Sites and H/V

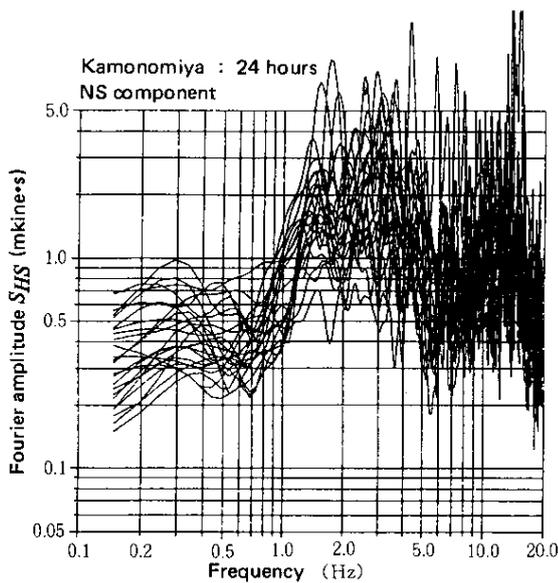
をとり、地盤の硬軟や増幅倍率と比較してみた。Fig.1とFig.2に比較結果の一例を示す。こうして、最大地震動の水平上下比と、地盤の硬軟や増幅倍率との間には、強い相関があることがわかった。

さらに、いつでもどこでも計測できる微動に対してH/Vスペクトル比を算定することで、Fig.3に示すように、誰がいつ分析しても同じ卓越振動数が安定して推定できること、また増幅度がだまかに推定できること、これらの特性は計測時間帯や計測時期には関係せず安定していること、などを確認した。

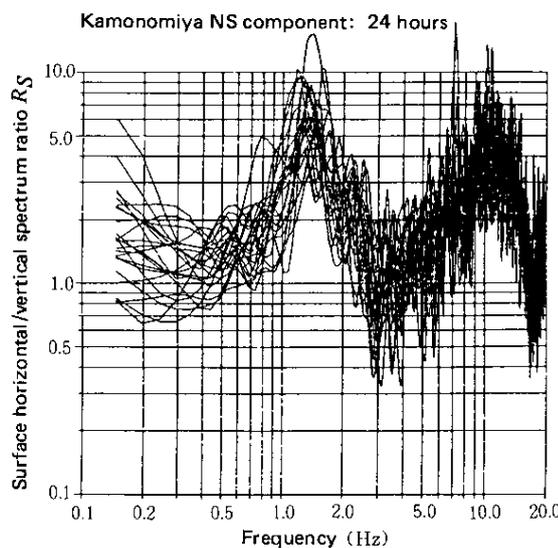
それまでの常時微動分析は、分析者の勘と経験に頼るやや特殊なものであった。しかし、H/Vスペクトル比により、誰がやっても同じ分析結果が得られるようになり、また、それまで社会活動が低下した深夜など

の時間帯に限られていた常時微動計測が、いつでも行えるようになったのである。

ももとの経緯から考えると、常時微動のみならず地震動に対しても、このような性質をもっていることは当然で、最初の論文でも、1985年ミチョアカン地震のメキシコシティでの記録を使って、地震動の増幅倍率とH/Vスペクトル比が概ね一致することを指摘している (Fig. 4)。さらに、その後、地震動記録や微動測定記録を用いて、これらのH/Vスペクトル比が相互に類似し、増幅特性とも概ね一致していることを確認している (Fig. 5)。さらに、強震記録のH/Vスペクトル比を時系列的に算定し、表層地盤の非線形化の様子を時系列的に追跡する可能性についても検討している (中村・渡辺 1995)。



(a) A 24-hours Change in Horizontal Spectrum



(b) A 24-hours Change in H/V Spectral Ratio

Fig. 3 Stability of H/V Spectral Ratio

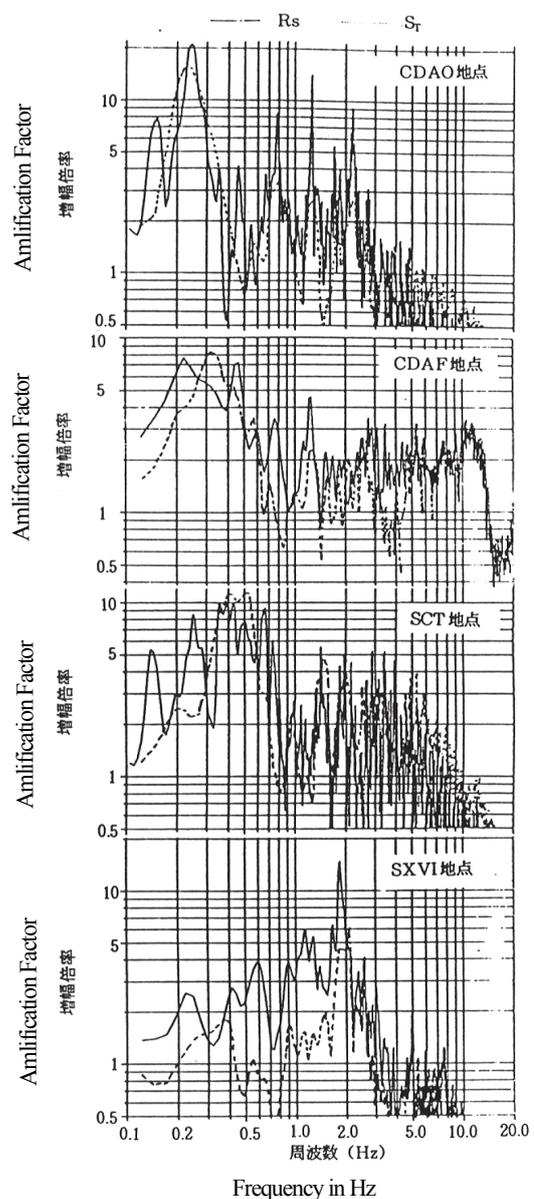
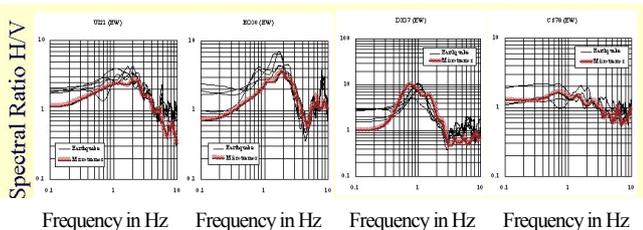
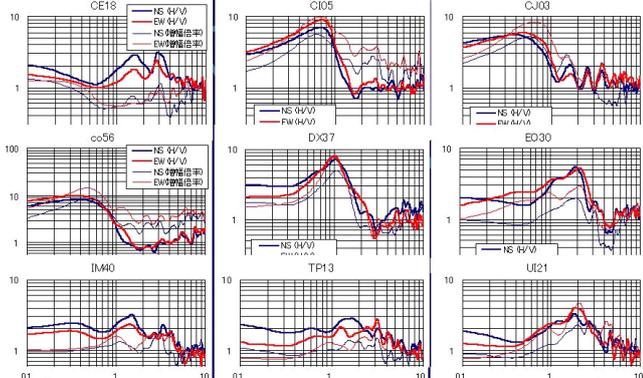


Fig. 4 Comparisons between Spectral Ratios H/V(R_s) and H/H(S_r) at Mexico City



(a) Comparison H/V of microtremor and Strong Motion



(b) Comparison H/V and H/H of Strong Motion

Fig. 5 Relation between H/V of Strong Motion, H/V of Microtremor and H/H of Strong Motions

3. H/V スペクトル比の基本構造

堅固な均質地盤では、特定の方向成分の振幅が大きくなるような偏りが発生する理由がない。あらゆる周波数帯域であらゆる方向に同じような振幅で振動していると考えるのが素直である (Fig. 6)。

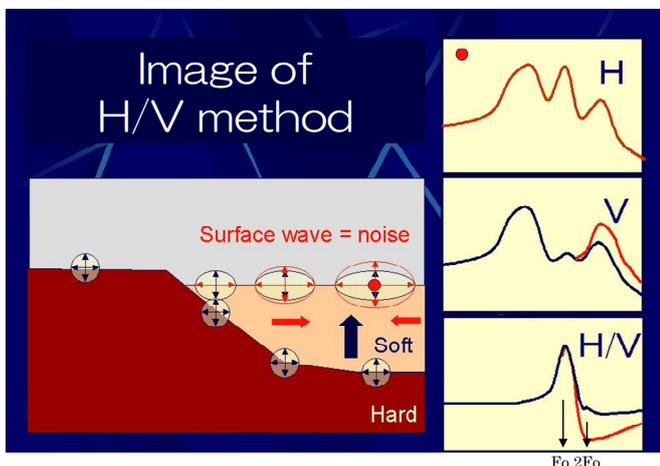


Fig. 6 Image of H/V method

軟弱な表層地盤が堅固な地盤上に堆積している状況下では、水平動の増幅現象が重要となる。水平動が大きく増幅される周波数帯域では上下動の増幅はほとんどないと考えられる。

一方、こうした地盤では、表面を伝わる Rayleigh 波の存在が問題になる。地震災害は主として実体波で生じ、Rayleigh 波による被害はあったとしても二次的なものに過ぎない。つまり、実体波のエネルギーが軟弱表

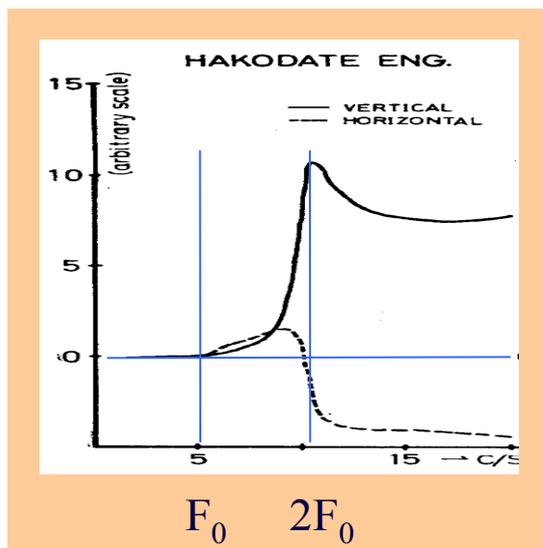


Fig.7 An Example of Horizontal and Vertical Components of Rayleigh wave modified after Nogoshi et.al. (1972)

層に捕捉されて振幅が増大する現象、いわゆる重複反射現象による地震動の増幅現象が極めて重要となる。この観点からすると、Rayleigh 波の存在はノイズであり、この影響を除去する必要がある。

表層地盤内を伝搬する Rayleigh 波に対して、表層地盤はハイパスフィルタとして考えることができる (Fig.7)。つまり、表層地盤の 1 次固有振動数 (F_0) 以下では Rayleigh 波は概ね伝わらない。そして群速度が最小となる周波数 (概ね $2F_0$) で最大のエネルギーを伝達することができる。したがって、 F_0 付近については、SH 波の重複反射の影響が主体的と考えられる。

Rayleigh 波の存在を見極めるには基盤と地表の上下動を比較すればよい (Fig. 6)。対象とする周波数帯域は、水平動の増幅域 F_0 周辺である。上下動が重複反射作用で増幅される周波数は、 $v_p/v_s \times F_0$ と考えられる。注目される軟弱な表層地盤では、 v_s が 50m/s~200m/s 程度であるのに対して、 v_p は水の水速度 (1500m/s) に近い 1000m/s 前後となる。つまり、上下動が増幅される周波数は、 F_0 の 5 倍から 20 倍となる。これに対して、Rayleigh 波の最大エネルギー伝達周波数は概ね $2F_0$ であるから、 F_0 の 3 倍程度までの帯域では、地表の上下動が基盤に較べて相対的に大きければ Rayleigh 波の影響が大きいと判断できる。

地表と基盤で同時に微動を計測して、実際に両者のスペクトル比を計算すると、多くのピークが現れる。以前は、分析者の“勘と経験”に頼って、表層地盤の固有振動数に対応する周波数を読み取っていた。これでは、恣意性が強くせいぜい参考値にしかならない。これらのピークの中から目的のものを的確に抽出するには、余分な Rayleigh 波の影響を除去する必要がある。

そこで、地表面と基盤の水平動の比 $R (=A_{hs}/A_{hb}$: 増幅特性) に及ぼす Rayleigh 波の影響を、地表面と基盤の上下動の比 $E (=A_{vs}/A_{vb})$ で見積もり、以下のように補正して増幅特性 A_m を推定した。

$$\begin{aligned}
 A_m &= R / E \\
 &= (A_{hs} / A_{hb}) / (A_{vs} / A_{vb}) \\
 &= (A_{hs} / A_{vs}) / (A_{hb} / A_{vb})
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

つまり、地表と基盤のそれぞれの H/V スペクトル比の比によって、より確からしい増幅特性が推定できる。さらに、基盤の H/V スペクトル比が広い周波数範囲で概ね 1.0 となる観測事実を考慮すると、結局、表層地盤の増幅特性は、次のように地表だけの測定で推定できることになる。

$$A_m \cong (A_{hs} / A_{vs})
 \tag{2}$$

これがいわゆる H/V スペクトル比である。

現在、微動測定の結果から算定される H/V スペクトルは、Rayleigh 波の特性を示すとされることが多い。そこで、Rayleigh 波の H/V スペクトルについて検討する。Fig. 8 に種々の条件下での Rayleigh 波の H/V スペクトルを $F_0 (=Cs/4h)$ で規格化して示す。これによると、そのピークは F_0 にある。しかし、このピークは、Fig. 7 に示したように、上下動振幅が相対的に小さいか、0 (ゼロ) であることに起因している。つまり、ここ

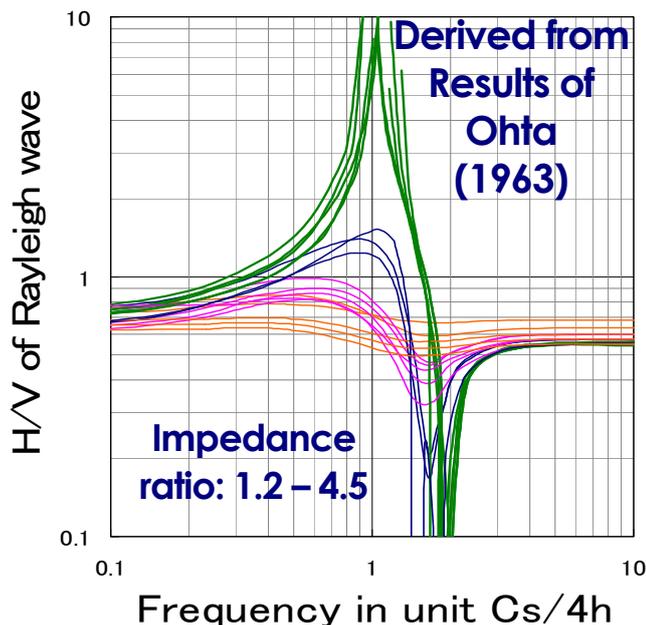


Fig. 8 H/V of Rayleigh waves for two layered ground

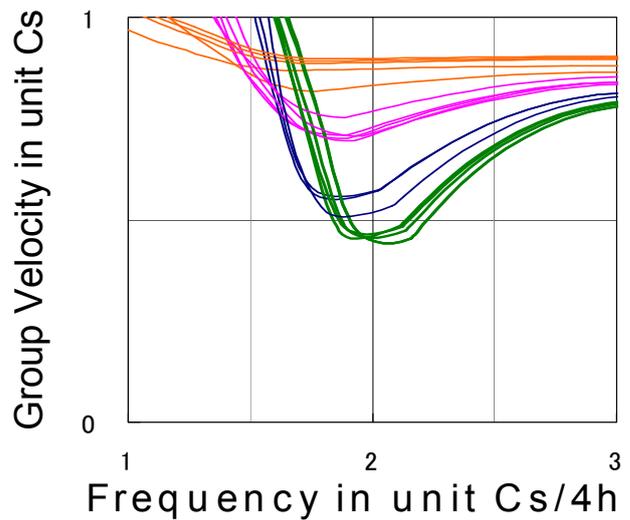


Fig. 9 Group velocities of Rayleigh waves

には Rayleigh 波のエネルギーはないのである。群速度が最小となる Airy 相は、Fig. 9 に示すように、ほぼ $2F_0$ にあり、ここで Rayleigh 波のエネルギーは最大となることがわかる。微動の H/V スペクトル比にみられるトラフは、概ねピーク周波数の 2 倍の周波数に位置しており、これは Rayleigh 波の影響と考えてよいであろう。

つまり、H/V スペクトル比は、Fig. 6 に示すように、少なくとも F_0 周辺では SH 波の重複反射による増幅特性を現し、 $2F_0$ 付近では Rayleigh 波によって乱された特性を現す。Rayleigh 波の影響が少ない場合には、H/V スペクトル比によって、重複反射による増幅特性が 1 次のみならず 2 次などについても的確に推測できることになる。

こうしたことは、Bonnetfoy-Claudet et.al.(2006)の数値解析によっても確認できる。もっとも彼らの解釈では、H/V スペクトル比が Rayleigh 波の性質によることが確認されたとしている。しかし、示されている図は彼らの意に反して、上述の説明を裏付けるものとなっており、数値シミュレーションによっても、H/V スペクトル比のピーク付近は SH 波の重複反射の特性を示し、トラフ付近は Rayleigh 波の特性を示しているのである。

4. 地震防災への応用

H/V スペクトル比によって、微動でも地震動でも、その地点の少なくとも 1 次の固有振動数とそれに対応する増幅特性を推定できることがわかった。そこで、この情報を基に、表層地盤の層厚を推定したり、表層地盤や構造物の壊れやすさ指数 (K 値) を定義する。

(1) 表層厚さ

表層厚さ h は、通常、表層内の S 波伝播速度 v_s およ

び表層地盤の固有振動数 F_g から次のように求められる。

$$h = v_s / (4F_g) \quad (3)$$

しかし、表層地盤のS波伝播速度は場所によって千差万別であり、固有振動数が判明しただけでは表層厚さを推定するのは難しい。それに対して基盤内のS波伝播速度は概ね一定していると考えられる。少なくともある程度広い地域内では大きな変動はないと考えら

れる。そして、表層地盤の増幅倍率 A_g はほぼ表層地盤と基盤のインピーダンス比 $\mu (=v_b r_b / v_s r_s)$ に等しい。そこで、未知の密度比を1と仮定して、 $v_s = v_b / A_g$ を上式に代入して、次式を得る。

$$h = v_b / (4A_g F_g) \quad (4)$$

東海道新幹線沿線地盤について検討した結果、概ね $v_b = 600\text{m/s}$ 、とすればよいことがわかった。これにより、増幅倍率がわかれば、表層地盤のS波伝播速度を大まかに見積もることができ、固有振動数と併せれば、その層厚も推定できることになる。Fig. 10は、東海道新幹線沿線のボーリング調査による表層厚さと微動のH/Vスペクトル比から $v_b = 600\text{m/s}$ を仮定して推定した表層厚を比較したもので、概ね一致している。

(2) 壊れやすさ指数K値

地震被害は、変形に伴う歪が限界を超えて部材が損傷した場合に発生し、構造体としての安定を欠けば崩落に到る。そこで、歪に着目した耐震性指標を作成した。壊れやすさに関する値と言うことで、 K 値と名付けた。

工学基盤における地震動最大加速度と K 値を掛けると、構造物毎に着目する部位の歪が 10^{-6} （マイクロストレイン、 μstrain ）を単位に大まかに推測できるような K 値（ $\mu\text{strain}/\text{Gal}$ ）を定義する。こうした K 値は、さまざまな種別の構造物や地盤に対して定義することができる。これまでに、地盤に対する K_g 値、盛土に対する K_s 値、ラーメン高架橋に対する K_b 値、建築物に対する K_d 値などがあり、脱線に対する危険度 K_d 値も定義している。

例えば、地盤に対する K_g 値は次のように定義される。

$$K_g = A_g^2 / F_g \quad (5)$$

ここに、 F_g と A_g はH/Vスペクトル比から推測される固有振動数とその増幅倍率である。例えば、基盤における最大地震動加速度が 100Gal で K_g 値が 20 （ $\mu\text{strain}/\text{Gal}$ ）であったとき、当該表層地盤には $2000\mu\text{strain}$ のせん断歪が生じると推測され、何らかの地盤被害が発生している可能性がある判断される。Fig. 11は、ロマプリエタ地震で液状化などの被害が生じたマリーナ地区での常時微動測定結果から推定した K_g

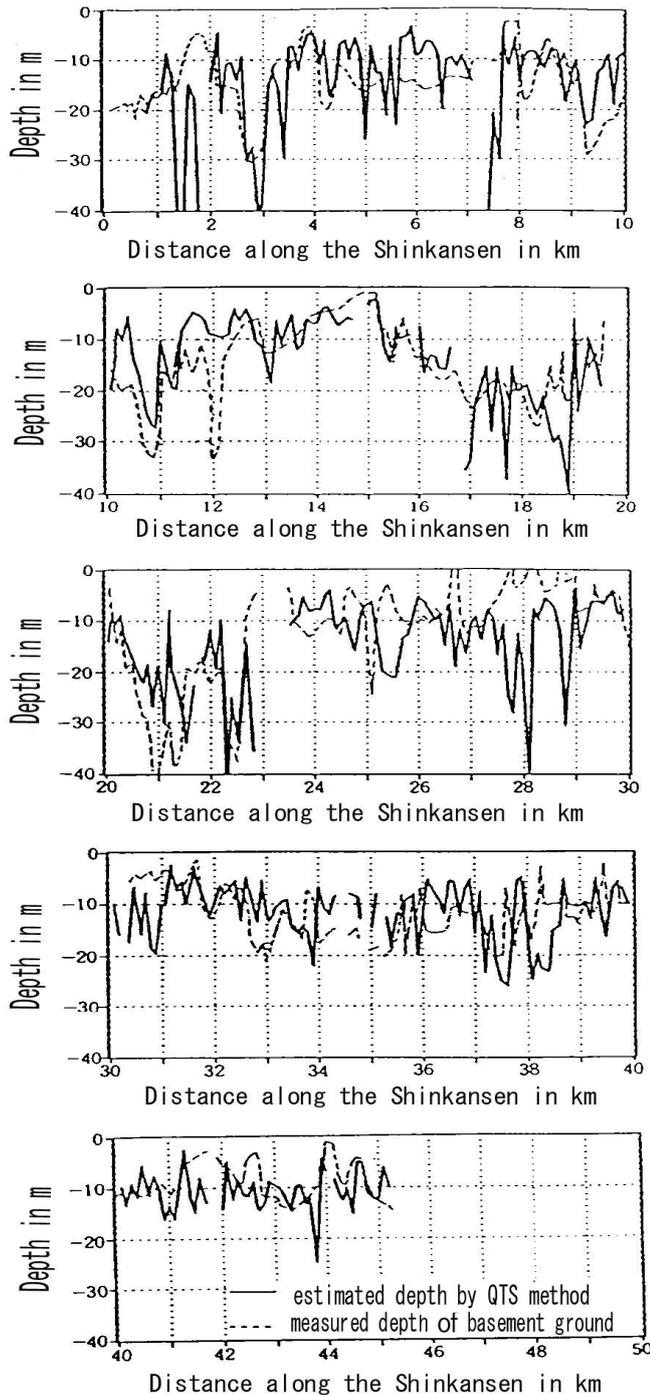


Fig. 10 Comparison between estimated depth and measured one (after Nakamura et. al.1990)

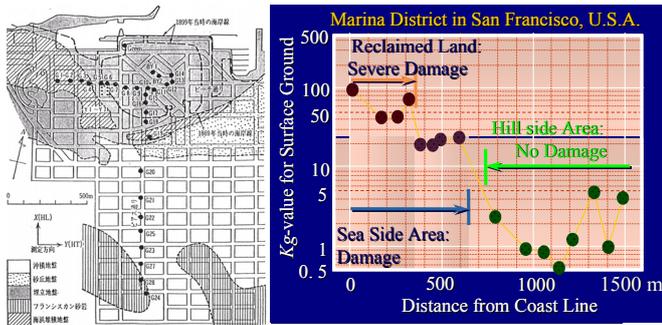


Fig. 11 K_g values measured after the 1989 Loma Prieta Earthquake

値の変化を示している。海岸線から概ねピアス通り沿いに山頂付近までの変化を示している。大きな被害を受けた埋立地マリナ住宅地では大きな K_g 値となっているが、地盤が堅固で被害が全くなかった傾斜地などでは小さな K_g 値にとどまっているのがわかる。

地盤に関する K_g 値をはじめとする、さまざまな構造物に対応する K 値と被害の関連性の高さについても、われわれはもとより多くの国・地域の研究者により、実際の地震被害との対比において確認されている。われわれによる例を Fig. 12 に示す。

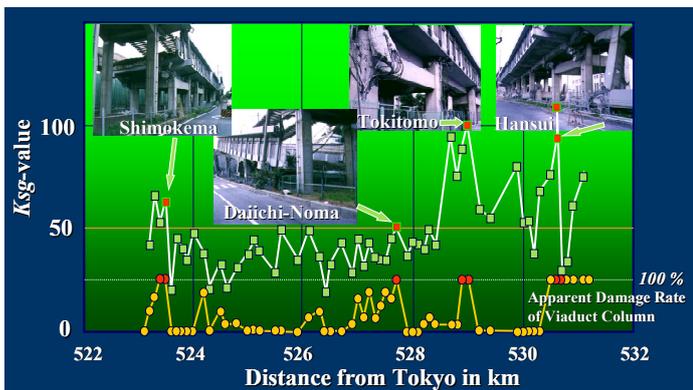


Fig.12 Comparison K_{sg} value and actual damage caused by the 1995 Kobe Earthquake

5. おわりに

以上、地震動記録をみていて思いついた H/V スペクトル比について概説するとともに、その応用例として、壊れやすさ指数 K 値群のうち、地盤の壊れやすさ（液化化しやすさ）を表す K_g 値をはじめ、実例をいくつか紹介した。地震被害と K 値群の対比をみると、両者の相関は高いものがあり、 K 値で事前に危険箇所を抽出することは可能であると思われる。構造物の健全度を K 値でデータベース化しようとしているところもあると聞いている。H/V スペクトル比については既に多くのところで利用されている。今後は、 K 値群を用いて耐震性を調査する方法が普及し、都市の耐震性向上に

少しでも寄与できれば幸いである。

参考文献：

- 太田 裕：2層構造における Rayleigh 波の位相速度と振幅分布 ($\lambda \neq \mu$ の場合)、地震、Vol. 2, No. 16, pp.12-25, 1963.
- 野越三雄、五十嵐 亨：微動の振幅特性 (その2)、地震 2、16、pp.26-40、1971.
- 中村 豊、斉藤明夫：強震記録に基づいた表層地盤の加速度増幅特性と最大加速度の推定、第17回地震工学研究発表会講演概要集、pp.25-28、1983.7.
- 中村 豊、上野 眞：地表面での常時微動測定による表層地盤の振動特性の推定、土木学会第41回年次学術講演会講演概要集、I-417、pp.833-834、1986.11.
- 中村 豊、佐溝昌彦：強震観測データを用いた表層地盤の地震動特性の推定、第20回地震工学研究発表会講演概要集、pp.133-136、1989.9.
- NAKAMURA, Y.: A Method for Dynamic Characteristics Estimation of Subsurface using Microtremor on the Ground Surface, Quarterly Report of RTRI, Vol.30, No.1, pp.25-33, 1989.1.
- 中村 豊、渡辺保宣：強震記録に基づいた地盤非線形化分析—手法と事例—、第23回地震工学研究発表会後援概要集、pp.285-288、1995.7.
- NAKAMURA, Y.: Real-Time Information Systems for Seismic Hazards Mitigation UrEDAS, HERAS and PIC, QR of RTRI, Vol.37, No.3, pp.112-127.1996.11.
- NAKAMURA, Y.: Seismic Vulnerability Indices for Ground and Structures using Microtremor, World Congress on Railway Research in Florence, Italy, 1997.11.
- NAKAMURA, Y.: Clear Identification of Fundamental Idea of Nakamura's Technique and its Applications, 12WCEE, 2656, Auckland, New Zealand, 2000.7.
- SATO, T., SAITA, J., NAKAMURA, Y.: Evaluation of the Amplification Characteristics of Subsurface using Microtremor and Strong Motion – the Studies at Mexico City, 13th WCEE, Vancouver, Canada, 2004.8.
- Bonnefoy-Claudet, S., Cornou, C., Bard, P.-Y., Cotton, F., Moczo, P., Kristek, J. and Fah, D.: H/V ratio: a tool for site effects evaluation. Results from 1-D noise simulations, Geophys. J. Int., Vol. 167, pp. 827-837, 2006.