

(56) 基準露頭観測点に基づく水平動及び上下動の回帰分析

(株)熊谷組 正員 ○阿部 健一 降旗 富雄 吉谷 進治

1. はじめに

著者等は、花崗岩サイトにおいて鉛直アレー地震観測システムを設置し、岩盤内とその露頭で観測された地震波の特性について調査を行っている¹⁾。本サイトは、図-1の観測点配置に示す高密度アレー地震観測システム KASSEMの露頭の1観測点である宮城県柴田町の花崗岩サイト(S-4地点)であり、地中の健岩部($V_p=2400\text{m/s}$)に地震計を追加設置し、1991年8月以降観測を継続している。設置以来、観測された10地震の記録を用いて本サイトの地中健岩部(S-4D)に対する露頭(S-4)の増幅率並びに各観測点での上下/水平のスペクトル比について、非弾性の成層地盤にSV波が斜め入射するSilvaの手法²⁾による解析と比較検討を行った。さらに、この結果得られた本サイトの健岩部が露頭であるとした時の増幅率を基準として与え、KASSEMの他の岩盤露頭観測点のデータと合わせて、水平動及び上下動について減衰0%の速度応答スペクトルの回帰分析を行った。

その結果、水平動より求まる震源スペクトル、Q値及び上下動の回帰結果と合わせて得られる基盤点(健岩部の仮想露頭へ変換)の上下/水平スペクトル比について検討し、1)震源加速度フーリエスペクトルは、スペシクバリアモデルによるスペクトルと対応が良く、また、2)基盤点の上下/水平スペクトル比はSV波入射を仮定した理論スペクトル比で説明が出来ることが分かった。

2. 基準露頭観測点における増幅率と上下/水平スペクトル比

対象とした地震の諸元は、表-1の1992年1月～1993年1月までの間に観測されたNo29～No38の10個の地震である。

観測波は、水平動においてS波の立ち上がりから文献3)に示す(1)式により得られる継続時間 T_d 秒を対象とし、上下動も水平動と同一区間とした。

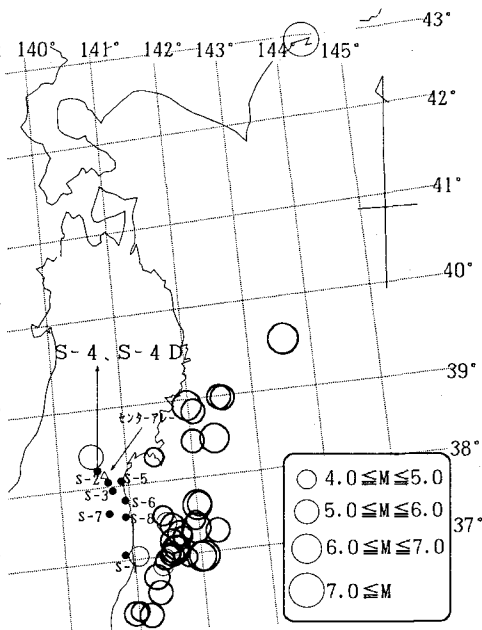
$$T_d = 10^{0.31M - 0.774} \quad \text{----- (1)}$$

さらに、水平動は、震源方向と震源直角方向に変換し、SV波入射の仮定と対比させるため、上下動と合わせて震源方向の波を解析対象とした。

S-4DからS-4の増幅率並びに両観測点での上下/水平のスペクトル比を求めるに際して、(1)式で得られる区間に対して減衰0%の速度応答スペクトルを対象とした10地震について求めた。観測波から得られる増幅率は、水平及び上下方向にたいして、S-4/S-4Dの速度応答スペクトルの比として求め、上下/水平のスペクトル比は、S-4及びS-4D地点での速度応答スペクトルの比として計算した。

一方、解析では、基盤を半無限弾性体とし基盤より上層を非弾性成層地盤として扱ったSilvaの手法を用いて同様に増幅率とスペクトル比を求めた。この時、解析モデル物性値は本サイトの深度50Mまでの地盤調査結果¹⁾に基づいて表-2のように設定した。ここで、GL-25M以深を半無限基盤とした地盤モデルを標準地盤モデルとし、東北地方の深部地盤構造⁴⁾に基づいて、深度4Km以深の $V_p=6\text{Km/s}$ の層を半無限基盤とした地盤モデルを深部地盤モデルとした。また、 Q_s 値は、文献5)から $V_p/32$ とし、 Q_p は $5Q_s$ とした。

観測及び理論解に基づく増幅率と上下/水平のスペクトル比は、図-2～図-5に示す結果となる。これらの図において太い実線は、観測から得られたスペクトル比であり10地震の平均値を与えている。一方、実線は、深



部地盤モデル、破線は、標準地盤モデルによる解析結果を示している。
いずれの地盤モデルも、入射基盤において30度の入射角を与えSV波入射
とした場合である。

増幅率(S-4/S-4D)については、入射角依存が少なくモデル化の違いに
よる差が0.02から0.03秒付近で現れ、この付近のピークが、深部地盤モ
デルで下がり、上下動では、逆に上がり細かな山、谷が見られるように
なる。全体として深部地盤モデルの方が観測結果を良く現している。上
下/ 水平のスペクトル比について、S-4Dでは、深部地盤モデルの方が細
かな山、谷が見られるが傾向に大きな差はなく、いずれも観測結果と良
く一致している。一方、S-4 では、深部地盤モデルに細かな山、谷があ
ることを考慮しても標準モデルでは存在しない谷部が0.05から0.09秒に
存在し、観測結果との一致度は標準モデルより良くなっている。この谷
部は、標準モデルで入射角の比較的小さい範囲(20度程度まで)に存在
し観測結果と傾向は合うが比の値が小さく評価されている。深部で30度
で入射すると地表付近でスネルの法則から20度程度になり観測結果の上
下/ 水平のスペクトル比を説明するためには、深部構造を考慮し層境界
でS波、P波の入射反射をくりかえさせた方が良いことを示唆している。

3. 回帰分析とその考察

対象とした地震は、表-1のなかで震源深さが60Km以下とし(表-1
の○印33個の地震)、回帰分析は得られた記録のS波の直達区間の減衰
0%の速度応答スペクトルSV₀を用いた。ただし、このSV₀の計算区
間は地震のマグニチュードMに応じて次のようにした。

M ≥ 6.0 : S波の立ち上がりから15.0秒

M < 6.0 : S波の立ち上がりから10.0秒

SV₀の計算は、長周期側でも精度の保証されるフーリエ計算法によ
り行った。この時水平動は、方向性の影響を軽減するためにNSとEW
の2成分のベクトル和とし、上下動は水平動と同一区間で計算した。

回帰分析の定式化に際しては、観測点のS波の加速度フーリエスペ
クトルは、震源、伝播経路、観測点近傍の地盤特性の線形結合で表現でき
ると仮定した岩田、入倉³⁾に従い、SV₀が加速度フー

$$SV_{0ij}(t) = S_i(t) * G(R_{ij}) * e^{-3.14 * R_{ij} / (t * V_s * Q_s(t))}$$

$$* AF_j(t) \quad \text{-----} (2)$$

ここでSV_{0ij}(t): j 観測点での i 番目の地震のSV₀,
S_i(t) : i 番目の地震の震源スペクトル項, G(R_{ij})
: 幾何減衰項でR_{ij}は j 観測点での i 番目の地震の震源
距離, AF_j(t): j 番目の観測点の増幅率, V_s と
Q_s(t) : 伝播経路の平均的なS波速度とS波のQ値を与
えている。この内、幾何減衰項のG(R_{ij})は、M. O r
d a z 等⁷⁾に従ってR_{ij}が100Km 以下のときは、1/
R_{ij}とし、100Km 以上のときは、(100 R_{ij})^{-1/2}とし
て表面波混入の影響について配慮した。

また、AF_j(t) は基準となる観測点の増幅率F(t) を用いて次のように定義する。

表-1 地震諸元

No	地震		震源地(度分)		深さ	規模
	年月日		北緯	東経	km	M
①	84.06.26	37	31	141	35	50
②	84.10.23	37	09	141	31	47
③	84.10.25	37	17	141	40	53
④	84.10.27	37	48	141	58	47
⑤	84.11.20	37	06	141	37	44
⑥	84.12.19	37	08	141	34	44
⑦	85.03.11	36	27	141	01	47
⑧	85.04.27	37	17	142	14	16
⑨	85.05.11	37	06	141	36	45
⑩	85.07.29	37	04	141	15	52
⑪	85.08.12	37	42	141	54	52
⑫	85.09.13	37	34	141	55	42
⑬	85.09.25	38	08	142	01	48
⑭	85.10.13	36	40	141	19	44
⑮	86.02.12	36	25	141	05	44
⑯	86.02.24	37	08	141	49	34
⑰	86.03.02	38	28	142	19	33
⑱	86.11.29	36	24	141	11	42
⑲	86.12.01	38	52	142	08	51
⑳	87.01.21	38	36	142	08	50
㉑	87.02.06	36	56	141	56	30
㉒	87.02.06	36	58	141	54	35
㉓	87.03.01	37	16	141	40	53
㉔	87.04.07	37	18	141	52	44
㉕	87.04.20	37	30	141	36	52
㉖	87.04.23	37	05	141	37	47
㉗	87.04.30	37	10	141	30	50
㉘	87.05.12	38	52	142	08	50
㉙	92.01.22	38	25	140	32	121
㉚	92.03.29	36	53	141	21	67.6
㉛	92.04.02	37	27	141	02	74
㉜	92.06.01	36	40	141	16	43.8
㉝	92.07.18	39	23	143	40	0
㉞	92.10.07	37	33	141	30	76
㉟	92.11.05	38	09	141	45	52.8
㊱	92.12.28	38	56	142	33	33.5
㊲	92.12.31	38	56	142	34	32
㊳	93.01.15	42	51	144	23	107

表-2 S-4 地点の解析用地盤モデル物性値

標準地盤モデル				深部地盤モデル			
深さ 観測点	ρ [t/m ³]	V_s [m/s]	V_p [m/s]	$Q_s / 32$			
				Q_s	Q_r	Q_s	Q_r
S-4							
● 0.0	2.51	1.150	2.950	36	180	36	180
18.5	2.58	1.930	3.930	60	300	60	300
23.5							
S-4-D	2.65	2.400	4.500	75	375	75	375
● 25.0	2.65	2.400	4.500			75	375
(1.000)	(2.65)	(3.000)	(5.500)			94	470
(4.000)	(3.00)	(3.300)	(6.000)				

(注)・() 内の値は深部地盤モデル の場合を示す。

・ は解析用地震波入射点以下の層を示す。

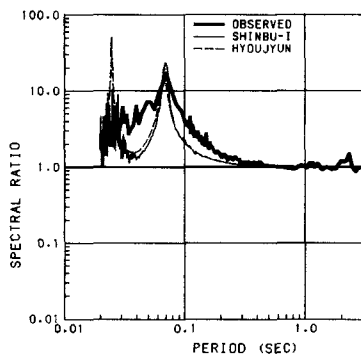


図-2 S-4/S-4D水平スペクトル比

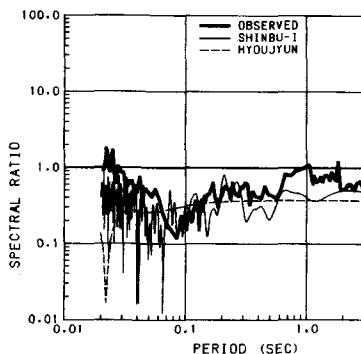


図-4 S-4 上下/水平スペクトル比

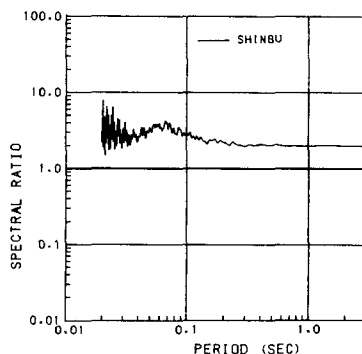


図-6 S-4 増幅率(水平)

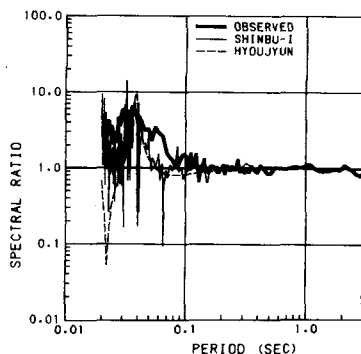


図-3 S-4/S-4D上下スペクトル比

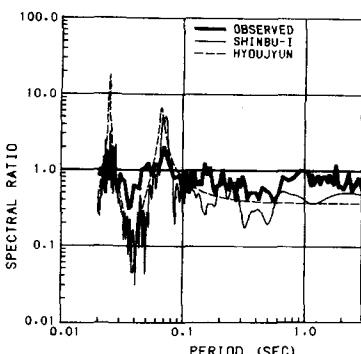


図-5 S-4D上下/水平スペクトル比

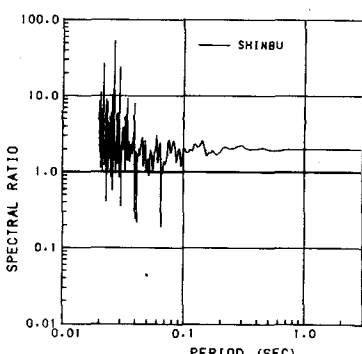


図-7 S-4 増幅率(上下)

$$A F_j(t) = F(t) * 10^{A_j(t)} \quad \dots \dots \dots (3)$$

このとき、 $10^{A_j(t)}$ は基準観測点とそれ以外の観測点の増幅率の比を表す。

(2) 式を線形モデルで回帰分析を行うために、神山等⁸⁾ が用いたダミー変数 δ_j を導入して両辺の常用対数を取り次式のように定式化する。

$$\log S V_{0ij}(t) = \log S_i(t) + \log G(R_{ij}) - 1.36 R_{ij}/t Q_s(t) V_s + \log F(t) + \sum_{j=1}^{N-1} A_j(t) \delta_j \quad (4)$$

さらに、震源スペクトル項 $S_i(t)$ は、マグニチュード M_i を説明変数として導入して次式のように表す。

$$\log S_i(t) = a(t) M_i + c(t) \quad \dots \dots \dots (5)$$

(4) 式と(5)式より、説明変数を M_i 、 R_{ij} 、 δ_j とし、回帰係数を $a(t)$ 、 $c(t)$ 、 $Q_s(t)$ 、 $A_j(t)$ とする次式で回帰分析を行う。

$$\log S V_{0ij}(t) = a(t) M_i + c(t) + \log G(R_{ij}) - 1.36 R_{ij}/t Q_s(t) V_s + \log F(t) + \sum_{j=1}^{N-1} A_j(t) \delta_j \quad \dots \dots \dots (6)$$

神山等⁸⁾は、 $F(t)$ に基準増幅率として定数2を与えたが、岩盤露頭には風化の影響が含まれるので、ここでは露頭サイトS-4地点での増幅率の検討結果に基づき、本サイトの健岩部($V_s = 2400\text{m/s}$)が露頭していると仮定したときに、健岩部露頭にたいするS-4地点の増幅率を $F(t)$ に与える。この増幅率は深部地盤を考慮した時に30度で入射した場合のものであり、図-6及び図-7に示すとおりである。増幅率については、入射角の依存性は少なく、入射角は上下/水平スペクトル比に大きな影響を及ぼすことからS-4サイトでこのスペクトル比を説明できる30度とした。

得られた回帰係数の内、 $a(t)$ 、 $c(t)$ 、 $Q_s(t)$ と重相関係数は、図-8～図-11に示す。いずれの図も実線は水平動で点線が上下動による結果である。これらの回帰係数は、(6)式から明らかなように仮想基盤スペクトルの構

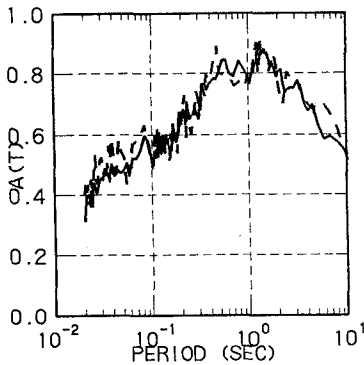


図-8 回帰係数 $a(t)$

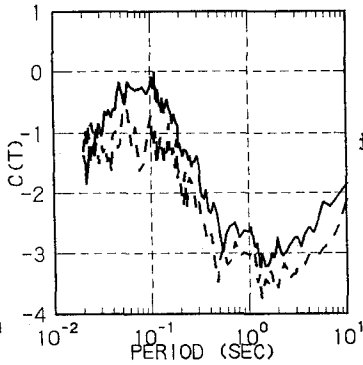


図-9 回帰係数 $c(t)$

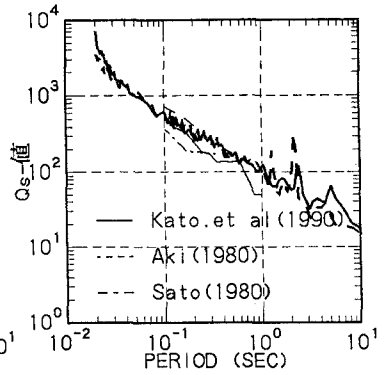


図-10 回帰係数 $Q_s(t)$

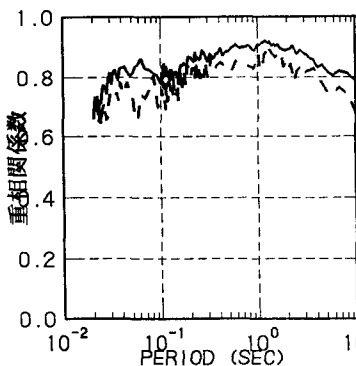


図-11 重相関係数

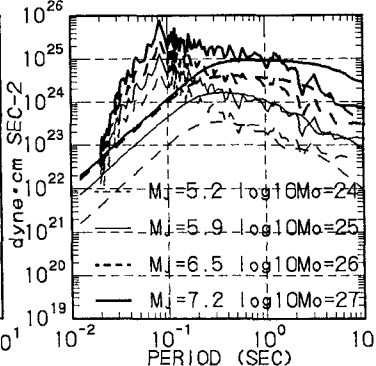


図-12 震源スペクトル

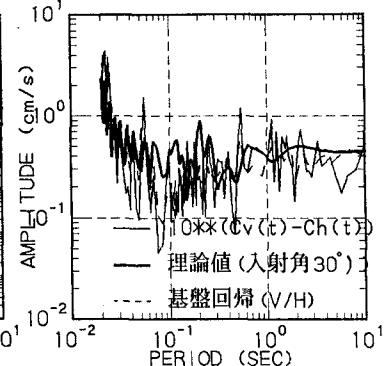


図-13 上下/ 水平スペクトル比

成因子を与えるもので、 $a(t)$ と $Q_s(t)$ が上下動水平動とも一致する傾向が認められた。また、重相関係数も0.8は得られ回帰結果は良好な結果となっている。ここで、 $Q_s(t)$ の水平動と上下動の一致の傾向は、解析がS波直達区間を対象としているので当然の結果であり、これを、既往の研究結果⁹⁾と比較しても同一の傾向となり、図-10の結果はこの地域の Q_s 値を与えていると言える。

次に、水平動から得られた $a(t)$ と $c(t)$ を用いて加速度震源スペクトル $f^2 M_0$ を求めたのが、図-12である。これは、 $f^2 M_0 = 4\pi \rho V_s^3 / (2\pi)^2 R(\theta, \phi)$:ここで ρ は密度で 2.7 g/cm^3 、 V_s はS波速度で $3.7 \times 10^5 \text{ cm/s}$ 、 $R(\theta, \phi)$ はラジェーション係数で文献6)より0.63とした。この図に文献10)に与えるスパイクバリアモデルによる $f^2 M_0$ も示した。回帰結果を用いて理論震源スペクトルと対比する場合、スペクトルの長周期側に地震モーメントを同程度できる精度が必要である。ここでは、回帰に用いた記録の精度が数秒～10秒である為、同レベルの地震動の結果を直接比較した。両者の比較では回帰結果の方が0.08秒をピークとする山がみられるが、バリアモデルの要素地震のコーナー周期より単周期側のスペクトルのフラット部の地震規模に対応した変化は一致している。

図-13は、仮想基盤における上下/ 水平スペクトル比と $10^{C_v(t) - C_h(t)}$ (v は上下 h は水平を表す)を対比したが、基盤での上下/ 水平スペクトル比は M による依存性がなくまた両者は良く一致し、回帰結果での上下動と水平動の差はほぼ $c(t)$ の差に集約していると言える。差を生じる要因として入射角が有り、深部地盤モデルで30度で入射する場合の仮想基盤表面での上下/ 水平スペクトル比も図中に示すが、回帰結果の比と良く合う。従って、仮想基盤における上下/ 水平スペクトル比は深部地盤構造と平均的な入射角で決まると考えられる。

[参考文献] 1): 阿部他、土木学会第47回年次学術講演会概要集、pp782-783、2): W. SILVA(1976): B. S. S. A., Vol 66, No5, pp1539-1554、3): 電気技術基準調査委員会(1987): 原子力発電所耐震設計技術指針、p60、4): 田(1967): 日本周辺海域の地殻構造、地震、20、(4)、pp131-134、5): 日本建築学会(1987): 地震荷重—その現状と将来の展望、p119、6): 岩田、入倉(1986): 地震 第2輯 第39巻 pp579-593、7): M. ORDAZ et al (1992): B. S. S. A., Vol. 82, No. 1, pp24-43、8) 神山(1985): 地盤の強震動特性とその予測に関する研究 p15、9): 加藤他(1990): 第8回日本地震工学シンポジウム 論文集、pp169-174、10): A. S. PAPAGEORGIOU(1988): B. S. S. A., Vol. 78, No2, pp509-529