

(10) 気象庁1倍強震計記録による長周期地震動特性の検討

東京大学工学部 正員 ○ 篠 泉
 東京大学生産技術研究所 正員 片山 恒雄

1. まえがき 長周期構造物に対する耐震設計に関連して周期2~20秒程度の長周期地震動が工学的に注目されるところとなったが、その特性を解明するための基礎資料として気象庁1倍強震計(振子の固有周期5~6秒)などの低倍率変位地震計の記録が収集・数値化されるようになった。本研究は、篠・片山¹⁾により数値化されたマグニチュード7以上の6地震の際に得られた気象庁1倍強震計の91記録(水平178成分、上下87成分)に関して統計解析を行い、長周期地震動の工学的特性を検討したものである。

2. 解析対象とした数値化データ 解析に用いた91記録は表1に示す6地震に際して55の気象庁観測点で得られた。1地点あたり1~4記録が数値化されている。表2は、記録の得られた地震のマグニチュードと観測点の震央距離に関して適当に定めた範囲及び観測点近傍の地下構造(以降、単に地下構造とよぶ)によるクラスの各組合せに該当する数値化データの水平成分数を示したものである。なお、地下構造によるクラス分けは主として岡田・鏡味²⁾が水平変位記録より求めた各地点でのやや長周期の揺れやすさに基づいて行っており、SC1、SC2、SC3の順に地下構造による増幅効果がより大きい地点となる。データの分布にかなり偏りが認められる。

表1 解析対象地震とその記録数

3. 数値化記録の工学的特性 地震

動の特性値として最大振幅、応答スペクトル及び継続時間に着目する。統計解析における説明変数としては、マグニチュードM、震央距離Δ(km)及び地下構造によるクラスを用いることにする。ただし、岡田・鏡味の揺れやすさは周期1~7秒程度の地動の地下構造による増幅特性を反映したものに過ぎないため時間領域での地動特性(最大振幅、継続時間)に関する解析では用いないことにした。

最大振幅Pの一般的特性を知るため次式のように距離減衰式を仮定して最小自乗法による当てはめを行った。

$$\log_{10} P = \alpha - \beta \cdot \log_{10} \Delta + \gamma \cdot M \dots \dots (1)$$

その結果得られた係数α、β、γの値を表3に示す。上下、水平ともにマグニチュードの影響は加速度、速度、変位の順に、震央距離の影響は逆の順に大きくなる。最大

振幅の概略値を把握するために、上式を用いてM=7~7.9、Δ=100~400 km(全記録の約3/4がこの範囲で得られた)における推定値を求めたが、その変域も表3に示した。

応答スペクトルの検討においては、近似的に加速度フーリエスペクトルに等しいという有用性を持つ非減衰速度応答スペクトルを用いた。スペクトル値SV(cm/s)と各説明変数の間に次のような関係式を仮定し、周

地震No.	地震名	発生年月日	M _J	記録地点数	数値化成分数			
					水平	上下	合計	
EQ1	北 美 濃	1961.8.19	7.0	12	24	11	35	
EQ2	新 潟	1964.6.16	7.5	22	44	20	64	
EQ3	十 勝 沖	1968.5.16	7.9	20	38	20	58	
EQ4	十勝沖余震	1968.5.16	7.5	12	23	11	34	
EQ5	日本海中部	1983.5.26	7.7	19	38	19	57	
EQ6	日本海中部余震	1983.6.21	7.1	6	11	6	17	
				合 計	91	178	87	265

表2 水平成分データの分布

地震マグニチュード	地下構造のクラス	震央距離 (km)							合 計
		0-100	100-200	200-300	300-400	400-500	500-600	600-700	
7.2	SC1	4	2						6
	SC2	8	2						10
	SC3	2	9	6	2				19
7.3	SC1		8	4	2				14
	SC2		7	12	6				25
	SC3		4	12	6	2	2	2	28
7.6	SC1			14					14
	SC2			2	2	4	2	2	12
	SC3			2	2	2	4	2	12
7.9	SC1		2	8	7			2	19
	SC2		1	2	6				9
	SC3			2	2		2	4	10
合 計		14	35	64	35	8	10	12	178

期毎に回帰分析を行った。

$$\log_{10} SV = \alpha - \beta \cdot \log_{10} \Delta + \gamma \cdot M + \delta \cdot D_1 + \epsilon \cdot D_2 \dots (2)$$

ここに α 、 β 、 γ 、 δ 、及び ϵ は回帰係数である。 D_1 、 D_2 は地下構造によるクラスを表すダミー変数で、 $(D_1, D_2) = (1, 0)$ はSC1、 $(0, 1)$ はSC2、 $(0, 0)$ はSC3の各クラスに対応する。スペクトルの概略値を知るため上式を用いて $M = 7 \sim 7.9$ 、 $\Delta = 100$

~ 400 km、SC1 \sim 3での推定値を求め、さらに周期2 \sim 20秒における相乗平均を計算するとその範囲は水平動で2 \sim 37cm/s、上下動で0.6 \sim 39cm/sであった。最大振幅と同様上下動が水平動を上回ることもあることが判る。

図1は式(2)の距離減衰に関する係数 β を、図2はマグニチュードに関する係数 γ を周期に対して示したものである。最大振幅に関する解析結果からの予想に反して β 、 γ ともに中間周期帯域でもっとも小さくなる。このことは、速度が対象周期範囲内の中間帯域の地動特性を必ずしも反映していないことを示唆している。ごく短周期を除けば上下動は水平動よりもマグニチュード及び震央距離の影響が大きく長周期ほどその差が広がる傾向にある。地下構造の影響を定量的に把握するため、式(2)より次式で表されるクラス間の比を計算し周期に対して示したのが図3である。

$$SV(SC2)/SV(SC1) = 10^{C1}, \quad SV(SC3)/SV(SC1) = 10^{C2} \dots (3)$$

ここに $SV(SC1)$ 、 $SV(SC2)$ 、 $SV(SC3)$ はそれぞれSC1、SC2、SC3の地点でのスペクトルであり、また $C1 = (\epsilon - \delta)$ 、 $C2 = -\delta$ である。長周期ほど地下構造の違いによる差異は小さいが、これは主に岡田・鏡味の揺れやすさを地下構造のクラス分けに用いたことに起因するものと考えられる。水平動の応答スペクトル振幅が、周期2 \sim 8秒の帯域で4倍程度、周期8 \sim 14秒の帯域で2倍程度SC1とSC3の地点では異なることが認められる。

各地震時の地動特性を検討するために、式(2)においてMに関する項を除いた距離減衰式を地震毎に当てはめてみた。図4はSC1(地下構造の影響が最小)の地点において予想される水平動応答スペクトルを示したものである。推定は各地震の平均震央距離で行った。多くの地震のスペクトルに卓越周期が存在するが、そのなかでも日本海中部地震の10秒近辺のピークは際立っている。また新潟地震などではコーナー周期の存在が認められる。図5は、水平動の距離減衰に関する係数 β を周期に対してプロットしたものである。日本海中部の本余震では短周期及び長周期側で距離減衰が際立って大きい。十勝沖の余震及び日本海中部の本余

表3 最大振幅の距離減衰式の係数と概略値

最大振幅	成分	回帰係数(式(1))			重相関係数	概略値
		α	β	γ		
変位 (cm)	水平	-2.625	0.282	0.512	0.4512	1 \sim 8
	上下	-5.451	0.976	1.075	0.6618	0.3 \sim 13
速度 (cm/s)	水平	-0.772	0.503	0.326	0.3774	1 \sim 7
	上下	-3.269	1.010	0.780	0.5658	0.3 \sim 8
加速度 (cm/s ²)	水平	0.311	0.837	0.313	0.4725	2 \sim 13
	上下	-1.780	1.260	0.682	0.4922	0.5 \sim 13

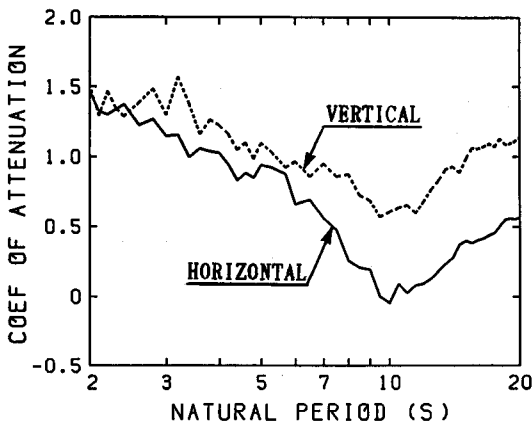


図1 応答スペクトルの距離減衰式の係数 β

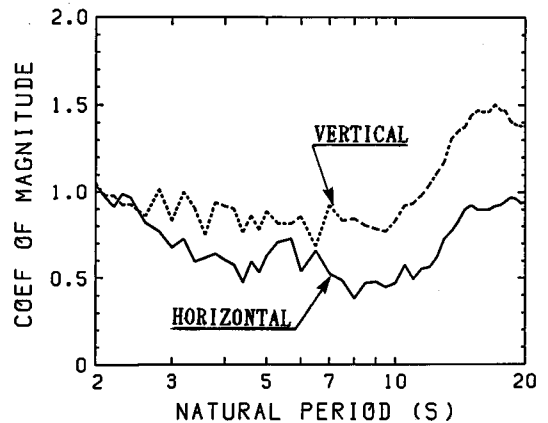


図2 応答スペクトルの距離減衰式の係数 γ

震では、中間周期帯域において減衰が小さめとなるが、このことが図1で見られる中間帯域における低減衰の主因の1つと考えられる。

加速度及び変位の継続時間Dの一般的特性を調べるため、次のような関係式を仮定し当てはめてみた（継続時間としてはTrifunac・Brady³⁾の定義した全パワーの90%が含まれる区間長を用いた）。

$$D = a + b \cdot \Delta + c \cdot M \quad \dots (4)$$

ところが得られた係数 a, b, c のうちcが、予想に反して上下・水平動の加速度・変位のいずれの場合も負の値となった。この原因としてマグニチュード最大の十勝沖地震の記録の数値化時間長が他の地震のものより短かめであったことなどが考えられる。そこで、式(4)のMに関する項を除いた関係式を用いて距離依存性を検討した。図6は回帰分析の結果得られた関係式を示したものである。全般的に、上下動よりも水平動、加速度よりも変位の方が継続時間は長い。距離にともなう変化の割合は加速度が変位よりやや大きい。

4. 際立った地動の観測された地点 地震毎に求めた水平動の応答スペクトルの距離減衰式による推定値と実測値を比較し、次の2条件のいずれかを満たす記録の得られた地点を選別した：(1) 平均的に実測値が推定値より σ （推定値の標準誤差）分以上大きい、(2) いずれかの周期において実測値が推定値を2 σ 分以上上回る。選別された地点は次の2種類に分けられた：(1) 地下構造によるクラスがSC3に属する地点のなかでも際立って大きな地動を記録した地点：新潟、大阪、酒田、(2) 約8秒以上の長周期成分が地下構造により大きく増幅されるため岡田・鏡味の揺れやすさを用いた地下構造のクラス分けが適当でない地点：金沢、札幌、高田、稚内。

同様な検討を継続時間についても行うと、東京、新潟（ともにSC3に属する）では平均より極めて長い地動が観測されたことがわかった。

5. 加速度強震計記録との比較 SMAC型強震計に代表される加速度強震計の記録と1倍強震計記録とを周期2~4秒におけるスペクトル振幅に関して比較した。図7は1倍強震計の水平記録より求めた速度応答スペクトル（減衰定数は0.05）の周期2~4秒における平

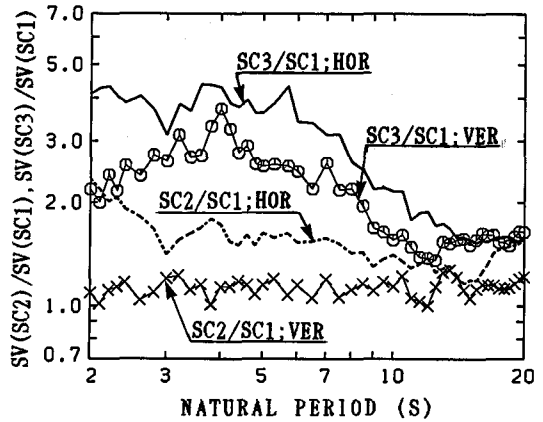


図3 応答スペクトルに及ぼす地下構造の影響

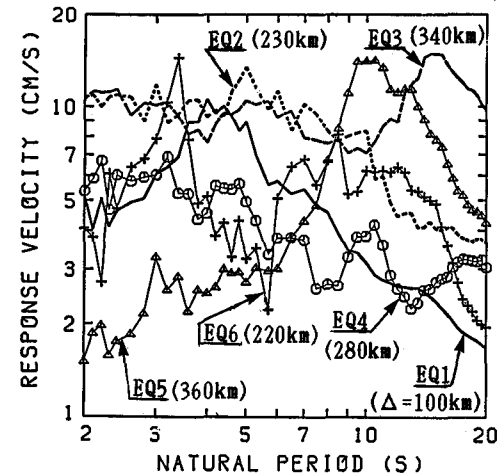


図4 各地震の平均震央距離で推定される水平動応答スペクトル（EQ1~6は表1を参照）

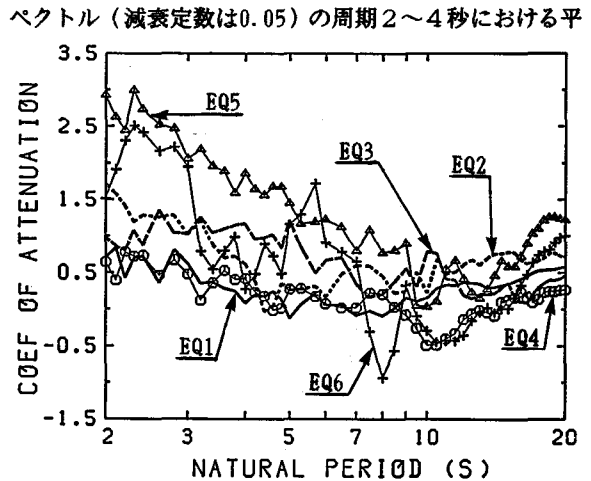


図5 各地震の水平動応答スペクトル距離減衰式の係数β

均振幅に対するSMAC型強震計記録の平均応答スペクトル振幅の比を示したものである。ただし、SMAC型強震計記録の応答スペクトルは、片山・岩崎・佐伯⁴⁾により求められた加速度応答スペクトルに関する推定式を当式決定に用いたデータが得られた震央距離の範囲内で適用しさらに近似的な関係を使って速度応答に変換して求めたものである。震央距離200km以内では両者はほぼ整合しているが、それ以上の距離となるとSMAC型強震計記録のスペクトルが1倍強震計のものを上回ることが多い。スペクトル比全体の相乗平均は1.75である。全般的に、日本海中部地震の場合に他の地震よりもスペクトル比が大きめとなっている。

図6には、神山⁵⁾の求めた加速度強震計の水平記録の継続時間に関する関係式による推定値も示されている。推定は、震源深さを全地震の平均深さHとおき行った。1倍強震計及び加速度強震計で捕らえられる地動の継続時間からみた相違が直感的によく理解される。

6. むすび マグニチュード7以上の6地震の際に気象庁1倍強震計によって得られた91変位記録の統計解析から長周期地震動(周期2~20秒)の工学的特性について以下の諸点が明らかになった。

(1) 応答スペクトルへのマグニチュード・震央距離の影響は中間周期帯域でもっとも小さい。このような傾向は最大振幅の解析では認められなかった。(2) 周期2~14秒の帯域における水平動の非減衰応答スペクトル振幅は観測点近傍の地下構造によって2~4倍程度異なりうる。(3) 日本海中部地震の際の水平地動は周期10秒程度の成分が非常に卓越する、短周期成分の減衰が極めて速い、など6地震のなかでも特異な性質を有する。(4) 新潟、大阪、酒田の各地では際立った大振幅の水平地動が観測された。また、東京、新潟で極めて長時間の水平地動が記録された。(5) SMAC型加速度強震計の水平記録から予測される速度応答スペクトル(h=0.05)の周期2~4秒における平均振幅は1倍強震計記録から求められたスペクトル振幅より平均的に7割以上大きい。

おわりに本研究の一部は昭和61年度文部省科学研究費補助金(奨励研究(A), 61750427)により行ったことを付記する。

[参考文献] 1) 篠泉・片山恒雄: 気象庁1倍強震計記録の数値化データ、土木学会第40回年次学術講演会、I-411, 1985。 2) 岡田成幸・鏡味洋史: 日本各地におけるやや長周期の地盤特性の定量評価の試み、日本建築学会論文報告集、第267号、1978。 3) Trifunac, M. D. and Brady, A. G.: A Study on the Duration of Strong Earthquake Ground Motion, Bull. Seism. Soc. Am., Vol. 65, No. 3, 1975。 4) 片山恒雄・岩崎敏男・佐伯光昭: 地震動加速度応答スペクトルの統計解析、土木学会論文報告集、第275号、1978。 5) 神山真: 地盤の影響を考慮した震動継続時間およびその関連パラメータの統計解析、土木学会論文集、第350号/I-2, 1984。

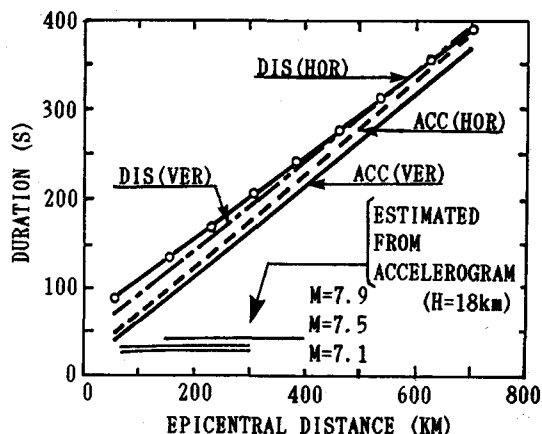


図6 1倍強震計記録及び加速度強震計の水平記録⁵⁾の継続時間(Hは全地震の平均震源深さ)

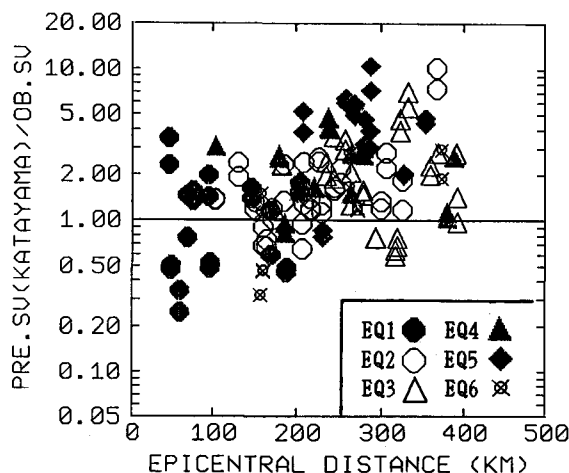


図7 1倍強震計記録より求めた水平動速度応答スペクトル(減衰0.05)の周期2~4秒の平均振幅に対する加速度強震計記録に基づく片山ら⁴⁾の予測スペクトル振幅の比