

## (16) 変位地震計記録による長周期地震動の工学的特性の解析

東京大学大学院 学生員 ○孫 泉  
東京大学生産技術研究所 正員 片山 恒雄

1. まえがき 近年、構造物の長大化、大型化が進み長大吊橋、超高層ビルなどの長周期構造物が数多く建設されるようになった。これら長周期構造物の耐震設計において適切な入力地震動を設定するには、周期2秒から20秒程度の地震動特性を把握する必要があるが、従来の加速度強震記録では5秒程度が有効に含まれる周期成分の上限であり、この目的には不適當である。そこで Ewing地震計による1923年関東地震の記録を初めとして、低倍率変位地震計の記録が工学的に注目されるようになってきた(1)。今までに最もまとまった数の変位記録を扱った研究は田中・吉沢・大沢によるもの(2)で、関東地震以後のマグニチュード6以上の29地震による東京における記録を数値化し解析している。本研究は、マグニチュード8程度の大地震によって得られた比較的多くの変位地震計記録を解析し、周期2~20秒程度の地震動特性を検討したものである。なお、本論文では周期2~20秒程度の地震動を、従来、工学で対象としている地震動との違いを配慮して、長周期地震動とよぶことにする。

2. 対象とした地震記録 気象庁1倍強震計(振子の固有周期5~6秒)は、長周期地震動を記録するために適当な計器特性を有する変位地震計の一つである。そこで、1倍強震計による良好な記録の多い1968年十勝沖地震(M=7.9)に注目し、震央距離200~400kmにある気象庁の地震観測所14点に設置された1倍強震計で得られた変位記録を解析することにした。Fig.1は各観測所の位置を示したものである。

14地点における上下動14成分、水平動27成分の変位記録を数値化し、適切な補正(円弧補正や計器特性の補正など)を施して解析の基礎資料とした。ただし、補正の際に、数値化時に混入する誤差を考慮して、周期2秒以下及び20秒以上の成分を除去した。数値化・補正の方法の詳細は文献(3)を参照されたい。

3. 変位地震計記録の基本的特性 数値化した41成分のうち水平変位記録の27成分に関して検討する。

Fig.2は、各記録の変位、速度及び加速度の最大振幅を、震央距離に対して示したものである。変位、速度、加速度とも距離との間に明瞭な系統的関係は認められない。最大振幅の概略値を知るため、27水平成分の最大振幅を平均すると、最大変位7.44cm、最大速度5.15cm/s、最大加速度9.16cm/s/sが得られた。従来の加速度強震記録で認められる相対的大小関係とは異なり、最大変位の大きさに比べて最大速度・加速度が小さい。このことは、対象周期の違いによる地震動特性の相違を示唆しているものと考えられる。

長周期地震動の振動数特性を知るため、対象変位記録の有効周期範囲2~20秒に対してフーリエスペクトルを計算した。ただし、加速度のフーリエスペクトルは近似的に非減衰速度応答スペクトルに置き換えることができるという工学的有用性を考慮して、加速度のフーリエスペクトルを求めた。各記録のフーリエスペクトルは多くが周期に無関係にほぼ一定の振幅を示すため、周期2~20秒の平均振幅で各記録のフーリエ振幅を代表させることにする。Fig.3はフーリエスペクトルの2~20秒における平均振幅を震央距離に対して示したものである。距離に

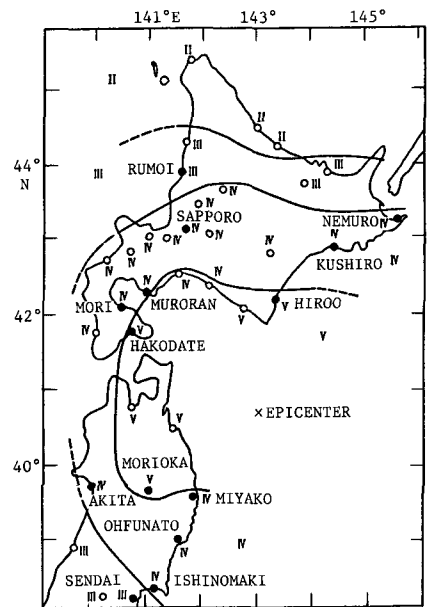


Fig.1. Locations of Recording Stations and JMA Intensities at Various Places.

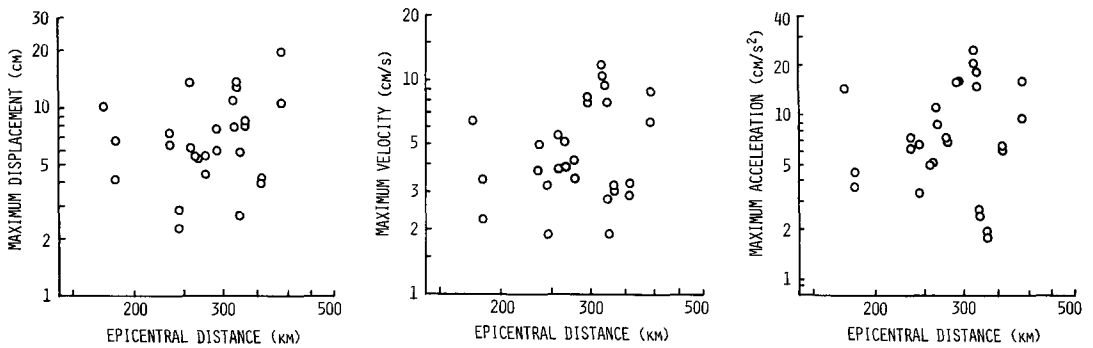


Fig.2. Peak Displacements, Peak Velocities and Peak Accelerations for the 27 Horizontal Records Obtained by the JMA Strong-Motion Seismograph.

ともなうフーリエ振幅の系統的な変化は見られない。したがって、最大振幅と同様にして27水平成分のフーリエ振幅の概略値は各記録の平均フーリエ振幅の平均でとらえることができ、19cm/sとなる。

対象記録のフーリエスペクトルが周期によってどう変わるかを調べるため、各記録のフーリエスペクトルから周期ごとに平均振幅を計算しFig.4に示した。平均フーリエスペクトルは、周期7~13秒あたりで振幅が若干小さくなることを除けば、2~20秒の周期範囲ではほぼ振幅一定とみなすことができる。

**4. 長周期地震動に対する地下構造の影響** 地表における地震動の特性は、対象とする地震の震源過程を初めとして多くの因子に支配されるが、ここでは観測点近傍の地下構造が長周期地震動に及ぼす影響に注目して検討する。

長周期地震動は地下数百mから十数kmにわたる地下構造により影響を受けると考えられるが、本論文で対象とする記録が得られた14観測点の近傍の地下構造に関する情報はほとんどない。そこで便宜的に岡田・鏡味(4)による「やや長周期での地盤の揺れやすさ」を各観測点近傍での地下構造の特性を表す指標として用いることにした。この「揺れやすさ」とは、数多くの地震について日本各地の気象庁観測所における記録の最大振幅を相互に比較することで求められた相対的な量で、主に1倍強震計の記録を使用していることから、1~7秒程度の周期成分に影響を及ぼす各観測点近傍の地下構造の特性を表すものと考えられることができる。

Fig.5は各水平記録の加速度フーリエスペクトルから2~7秒、7~13秒及び13~20秒における平均振幅を求め震央距離に対して示したものである。3つの周期範囲に分けて平均振幅を求めたのは、周期の違いに対して地下構造の及ぼす影響の相違を見るためである。図中、各平均フーリエ振幅を記録地点での「揺れやすさ」によって分類した3つのClassで区別して示した。Class 1、2、3の順に、より揺れやすい地点での平均フーリエ振幅となる。Fig.5(a)及び(b)では、各平均フーリエ振幅が観測点近傍の地下構造のClassに応じて3つのグループに分かれ、各Classごとにフーリエ振幅と震央距離の間に系統的關係が認められる。Class 1に属する地点のフーリエ振幅値に対するClass 3に属する地点の値の比を求めると、周期2~7秒では約4、周期7~13秒では2.4程度となる。一方、Fig.5(c)より周期13~20秒におけるフーリエ振幅には各地点近傍の地下構造を考慮しても明瞭な関係は見い出せない。「揺れやすさ」には地震波の13~20秒の周期成分に影響を及ぼすよ

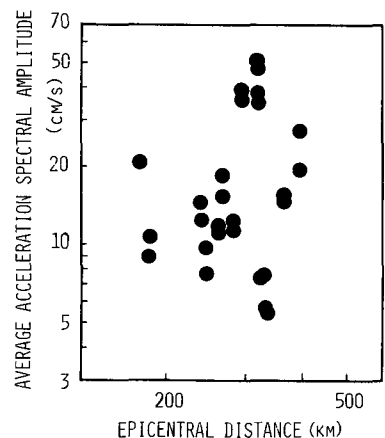


Fig.3. Average Amplitudes of Fourier Acceleration Spectra in the Period Range of 2-20 s for the 27 Horizontal Records.

うな深部の地下構造の特性が反映されていないためかもしれない。

**5. 既往の研究成果との比較** 2~4秒程度の周期成分に限れば、1倍強震計によっても加速度強震計によってもひずみなく記録できると考えられるが、この周期範囲において両者の記録を比較してみる。Table 1は、固有周期2~4秒程度における減衰定数0.05のときの応答スペクトル値を1倍強震計による変位記録及び加速度強震記録から求めて示したものである。変位記録については、27水平成分の平均値、加速度強震記録については、3種類の回帰式に1968年十勝沖地震のマグニチュード7.9と変位記録の得られた14地点の平均震央距離284kmを代入して求めた予測値を示した。ただし、加速度強震記録の速度応答値SVと変位応答値SDは、加速度応答値SAより近似的な関係を使って求めている。米国で得られた加速度強震記録を用いたTrifunac・Anderson(7)の予測値は、変位記録のスペクトル値と比べて全般的にかなり小さい。一方、日本の強震記録をデータとした片山・岩崎・佐伯(5)及び建設省土木研究所(6)の予測値は、変位記録のスペクトル値と同程度の値であり、固有周期にともなってスペクトル値が変化する傾向も合致する。

田中ら(2)は、東京での変位記録を基にして加速度フーリエ振幅が周期1~8秒の範囲でほぼ一定となることを指摘し、周期2~8秒の平均フーリエ振幅A(cm/s)とマグニチュードM及び震央距離Δ(km)の関係式

$$\log A = 0.738 M - 0.892 \log \Delta - 2.186$$

を提案した。Fig.5(a)にM=7.9のときに上式で予測されるAをΔに対して示してある。上式で予測されるフーリエ振幅値は、本論文で対象とした変位記録のうちの比較的揺れやすい地点での値に対応している。

**6. むすび** 1968年十勝沖地震(M=7.9)により震央距離200~400kmの地点で得られた気象庁1倍強震計の記録の解析から長周期地震動(周期2~20秒程度)の特性に対して以下の諸点が明らかになった。

- (1) 地震動の最大振幅等は対象とした震央距離の範囲ではあまり距離によって変化しない。
- (2) 2~20秒の周期における加速度フーリエ振幅は、大局的にはほぼ一定とみなせる。
- (3) 観測点近傍の地下構造によって、周期2~13秒程度における平均的な加速度フーリエ振幅は、2~4倍程度は異なる可能性がある。

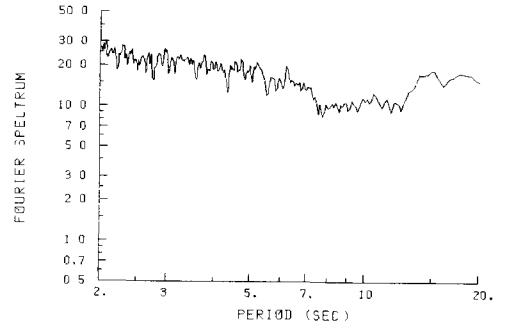


Fig.4. Average Fourier Acceleration Spectrum Computed from the 27 Horizontal Records.

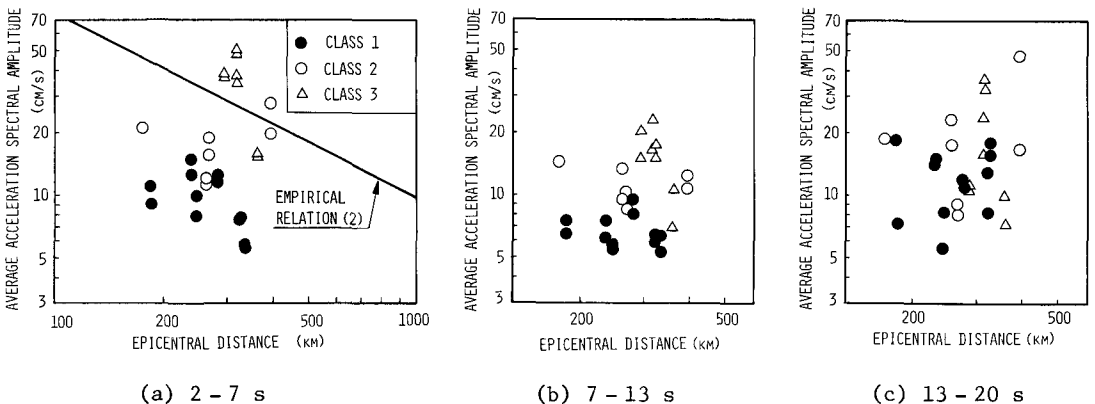


Fig.5. Relations between the Subsurface Structure and Average Amplitudes of Fourier Acceleration Spectra in Three Period Ranges for the 27 Horizontal Records.

Table 1. Comparison of Response Spectra of the Tokachi-Oki Records Obtained by the JMA Strong-Motion Seismograph and Those Predicted by Existing Empirical Relations Based on Accelerograms.  
(M=7.9, Δ=284 km, Horizontal, Damping=0.05)

	Average of 27 Components			Katayama et al. (5)				Public Works Research Institute (6)			Trifunac and Anderson (7)			
	Period (sec)			* GC	Period (sec)			* GC	Period (sec)		* GC	Period (sec)		
	2	3	4		2	3	4		2	3		1.56	2.63	4.45
SA (cm/s <sup>2</sup> )	33.6	23.2	16.4	1	29.3	24.0	20.2	1	11.6	7.93	1	5.08	2.45	0.991
				2	43.6	34.0	26.1	2	49.0	17.9	2	7.43	3.75	1.58
				3	52.3	36.4	31.0	3	72.1	30.4	3	10.9	5.78	2.52
				4	54.8	34.0	24.6							
SV (cm/s)	10.1	11.4	11.0	1	9.32	11.5	12.9	1	3.70	3.79	1	1.26	1.03	0.702
				2	13.9	16.2	16.6	2	15.6	8.57	2	1.85	1.58	1.12
				3	16.6	17.4	19.7	3	23.0	14.5	3	2.70	2.42	1.79
				4	17.4	16.2	15.6							
SD (cm)	3.39	5.25	6.62	1	2.97	5.47	8.19	1	1.18	1.81	1	0.313	0.430	0.497
				2	4.42	7.74	10.6	2	4.96	4.09	2	0.458	0.660	0.793
				3	5.30	8.30	12.6	3	7.31	6.94	3	0.670	1.01	1.27
				4	5.55	7.74	9.96							

\* Classifications of Ground Condition are defined in each respective paper (5-7).

(4) 加速度強震記録から予測される応答スペクトルの2~4秒程度における大きさは、1倍強震計記録による1968年十勝沖地震の2~4秒程度におけるスペクトル特性とほぼ整合している。

謝辞：本研究は、自治省消防庁から土木学会に依頼された「屋外貯蔵タンクの耐震安全性検討のための入力地震波の要位特性に関する調査」のため、土木学会エネルギー土木委員会内に設置された屋外貯蔵タンク耐震安全性小委員会（委員長 奥村敏恵 東京電機大学）による調査活動の一環として行われたものである。解析対象とした1968年十勝沖地震による気象庁1倍強震計の記録は、井上涼介氏（茨城大学）が個人的に収集していたものであり、その数値化作業は、建設省土木研究所において川島一彦氏（同研究所地震防災部振動研究室）の監督のもとで行われた。また、井上涼介氏には、解析の途中でも多くの示唆を得た。以上記して深甚なる謝意を表す。

#### <参考文献>

- (1) 森岡敬樹：1923年関東大地震の地動，日本建築学会論文報告集，No.289， pp.79~91，1980。 (2) 田中貞二・吉沢静代・大沢胖：やや長周期帯域における強震動の特性～長周期低倍率地震計記録の解析～，地震研究所報，Vol.54， pp.629~655，1979。 (3) Katayama, T., Shino, I., and Omori, S.: Characteristics of the 1968 Tokachi-Oki Earthquake Records Obtained by the JMA's Low-Magnification Displacement Seismograph, Report No.83-01, Seismic Disaster Prevention Engineering Laboratory, Institute of Industrial Science, University of Tokyo, 1983。 (4) 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，No.267， pp.29~38，1978。 (5) 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，No.275， pp.29~40，1978。 (6) 川島一彦・相沢興・高橋和之：最大地震動および地震応答スペクトルの統計解析，第6回日本地震工学シンポジウム講演集， pp.305~312，1982。 (7) Trifunac, M.D., and Anderson, J.G.: Preliminary Empirical Models for Scaling Absolute Acceleration Spectra, Report No.77-03, Department of Civil Engineering, University of Southern California, 1977。