

(36) 気象庁強震計記録の統計解析によるやや長周期揺れやすさの抽出

茨城大学工学部 ○井上涼介, 篠原哲也
熊谷 高, 小林浩二

1. はじめに 大型石油タンクなど各種の長周期構造物の現行の耐震基準は、対象地点によって、地域別補正係数として数割程度の差をつけているが（例えば自治省告示第119号）、岡田・鏡味（1978）による気象庁各官署のやや長周期揺れやすさ \bar{X}_i は0.49~4.79と、地点によって10倍もの範囲で変化することから（なお以下において、地点名の後の括弧内の数字は岡田らによる \bar{X}_i の値を表すものとする）、対象地点直下のやや深い地下構造（堆積盆地など）を考慮に入れた基準の策定が急務となっている。本研究では、気象庁強震計による記録を用い、Kamiyama et al. (1986)による速度応答スペクトルの重回帰モデル（気象庁マグニチュード M_J 、震央距離 Δ 、震源深さ D 、ダミー変数、の諸項より成るもの）に基づいて、須原ほか(1987)の試みの拡張として、新潟、東京、横浜、秋田などの揺れやすい観測点（ちなみに消防庁資料によれば、新潟市、横浜市、秋田市における容量1万kl以上のタンクの基数はそれぞれ46, 206, 11）を含む合計10観測点のやや長周期帯域における周期別揺れやすさを評価することを試みたので、以下にその概要を報告する。

2. 87型電磁式強震計記録の解析 本解析では、気象庁配布のMTに収録されている最近の2ヶ年間の地震の87型デジタル強震計記録（鉢嶺1990）のうち、主に関東地方近辺で起きた27地震（ $M_J=4.7\sim 7.1$ 、 $D=0.0\sim 122.8\text{km}$ ）の銚子(0.76)、東京(2.00)、横浜(2.00)の3観測点の記録を通過帯域0.05~0.5Hzの帯域フィルターに通したもの（ただし水平成分のみ）を用いた（表1、図1）。記録の選定に当たっては、震源の深いもの、振幅レベルの小さいもの（フィルター通過後のレベルが100分の数gal以下）、トリガー方式によって継続時間が短くなっているもの、などは除いた。速度応答スペクトルは、以下のように計算した。まず、水平2成分をRadial, Transverse両成分（以下R, T成分と略す）に変換し、次に大型の石油タンクを想定して減衰定数 $h=0.1\%$ として両成分の S_v 、およびそれらの自乗和平方根（以下、 $\sqrt{R^2+T^2}$ 成分の S_v と略す）を求めた。その際、入力加速度記録の継続時間は、多くの場合トリガー時点から約200~350秒間程度であった。本研究では、Kamiyamaらによる重回帰モデル（震源を点で近似し、観測点下の地盤項をダミー変数の係数で評価するモデル）を用いて S_v を統計解析した。またその際、銚子を基準観測点とした。具体的には、第 i 観測点の速度応答スペクトル S_v^i を次式

$$\log S_v^i(T, h) = a(T, h) \cdot M_J - b(T, h) \cdot \log \Delta - c(T, h) \cdot D + d(T, h) + \sum_{j=1}^{n-1} A_j(T, h) \cdot \delta_{ij}$$

ここに、 δ_{ij} （クロネッカーのデルタ）はダミー変数で、 $A_j(T, h)$ はその偏回帰係数、 n は観測点総数を、それぞれ表す

によって表されるものとする。ここで、偏回帰係数 $A_1(T, h)$ は、他の説明変数を一定としたときの基準観測点（この地点を $i=n$ とする）に対する観測点 i の $\log S_v^i$ の差を表す。従って、 $10^{A_1(T, h)}$ が基準点に対する S_v の比を表すことになり、この係数を、その観測点の相対的な周期別揺れやすさの指標とみなすことができる。以下に各偏回帰係数の推定値を70%の信頼区間の幅をつけて示す。ここで、いま重回帰モデルの誤差が正規分布するものと仮定すれば、各偏回帰係数は t 分布に従うが（例えば久米ほか1987）、 t 分布は自由度が無限大のとき正規分布に収束し、このとき【平均値±標準偏差】の間の面積が約68%になることを勘案して、70%という区間を設定した。図2(a)~(c)に、偏回帰係数 a 、 b 、 c の周期別変化（ $\sqrt{R^2+T^2}$ 成分、以下特に断らなければこの成分を表す）を示す。まず a は、ほぼ一定で1付近であるが、このことは M が増えたと S_v が周期によらず約10倍になることを示している。次に b は、周期10数秒以下ではほぼ一定で1前後の値をとっているが、このことは Δ が2倍になると S_v が約1/2になることを示している。ちなみに、この値

は一樣無限の等方性弾性体中における実体波の距離減衰の指数に等しい。最後に c は、各周期とも正の値をとっており7秒付近にピークがあるが、これは震源が浅い程（特に7秒付近で） S_v の値が大きくなることを示している。このピークは表面波の励起に関係したものである（この解釈は b の値と必ずしも整合しないが、詳しい検討は今後の課題としておく）。次に、図3(a)、(b)に銚子を基準とした東京、横浜の周期別揺れやすさ $10^{A_1(T)}$ を示す。東京で周期約4~7秒付近、横浜で周期約5秒付近にピークがあり、両地点とも周期10数秒以上では2前後の値をとっているが、このピークは観測点下の地下構造に関係したものと考えられる。また表3に岡田らの \bar{X}_1 と本解析による周期4秒における揺れやすさ $10^{A_1(4)}$ を示す。ここで、岡田らが \bar{X}_1 を求める際に使用した9595成分の卓越周期（最大振幅を与える周期）の頻度分布のピークは4秒付近であったので、この両者を比較してみた。同表の第3、4列より、両者は数割以内の差で比較的良く一致していることがわかる。次に、各偏回帰係数に対する東京での予測スペクトルを示す。図4は、 Δ 、 D を一定とし、 M を変えた場の予測スペクトル（ T 成分）を示す。田中ほか(1978)は、大森式長周期地震計などによって東京で観測された19地震の記録（ $M_J=6.1\sim 8.3$ 、 Δ は約100km以上）から、予測フーリエ加速度スペクトル（ T 成分）を求めたが（田中ほかFig.15）、これを弱減衰の速度応答スペクトルと同一視することにして図4と比較すると、両者は $M=6.0\sim 7.0$ の範囲において、振幅レベル、形状ともに良い一致を示している。最後に、本手法の有効性を検討するため、一例として、東京での24記録から表1においてNo.19の地震（ $M_J=5.7$ ）の記録を抜いて求めた回帰式からこの地震の予測スペクトルを求め、70%予測区間の幅をつけて実測値と比べたものを図5に示す。同図より、この地震に関しては、各パラメータが他の地震それの間にある（内挿による予測）こともあってか、予測値と実測値はよく一致している。

3. 1倍変位強震計記録の解析 対象地点は、北から根室、札幌、函館、秋田、盛岡、仙台、新潟の7観測点、使用データは、東北太平洋岸沖の7地震（ $M_J=6.7\sim 7.9$ 、図6、表2）における1倍強震計による33記録水平66成分である（表2）。なお、これらのデータはすべて茨城大学工学部で数値化されたものである。対象地点のうち新潟(2.95)は、過去において、1964年新潟地震（ $M_J=7.5$ ）と1983年日本海中部地震（ $M_J=7.7$ ）の2度にわたり、石油タンクが液面揺動による被害を受けている。また札幌(1.07)は、揺れやすさの標準的な地点であり、他の地点の相対的な揺れやすさを求める際の基準点とした。応答スペクトルを計算する際の入力加速度の継続時間は一般に数分程度であるが、原記象紙上で振幅が十分に小さくなるまでの長さに応じて数値化しているために、記録よってまちまちである。また、減衰定数 h は、石油タンクを想定して2. と同様に0.1%とした。なお、数値化データは各種の補正の際に、ノイズの除去のために2. と同一の帯域フィルターに通している。本解析では2. の重回帰モデルにより、速度応答スペクトルを統計解析した。結果であるが、まず偏回帰係数 a 、 b 、 c の周期別変化について、 a 、 b は2. とほぼ同様の傾向を示したが、 c は、周期約10秒以下の大部分の周期で負の値をとっている。この点は2. の結果と逆になっており、その解釈は今後の課題としておく。次に、札幌を基準とした各観測点の周期別揺れやすさ $10^{A_1(T)}$ を図7(a)~(f)に、またここで周期4秒の揺れやすさの値を岡田らの \bar{X}_1 の値と比較したものを表4に、それぞれ示す。同表より、両者の値はよく対応していることがわかる。図7の各図において、信頼区間の幅が2. の図3より大きいのは、2. に比べデータ数が少ないためである。

4. あとがき 気象庁強震計記録から求めた速度応答スペクトルにKamiyamaらの重回帰モデルを適用して、10観測点におけるやや長周期・周期別揺れやすさを抽出した。今後の課題として、(1)対象地点、解析する地震の数を増やすこと、(2)各地点で地震を伝播経路別（震源域別）にわけたときに有意な差が出るか検討すること、(3)3. に関連して高感度の59型電磁式地震計の記録も数値化すること、(4)87型地震計の小振幅記録に含まれるノイズレベルを検討すること、(5)より密なアレー記録（東京近辺などにおける他機関による記録）を用いて、対象波長、地下構造などとアレー間の波形特性の相関などの関係を調べること、(6)巨大地震に対しては震源の多重性を考慮に入れること、(7)堆積盆地のパラメータを取り入れること、(8)堆積盆地の伝達関数が統計的に推定されたら、解析的手法（数値シミュレーションを含む）により関数形の説明を試みること、などが挙げられる。

[謝辞] 87型、および1倍強震計の記録を提供された鉢嶺氏ほか気象庁各官署の方々に厚くお礼申し上げます。なお、本研究に関し、文部省科学研究費(平成元年度・重点領域研究・No.01601033, 平成2年度・一般研究C・No.02650321)、および危険物保安技術協会の資金援助を受けた。

[参考文献] 1)鉢嶺(1990),地震学会ニュースレター, Vol.2 No.2, p.37. 2)自治省(1983):自治省告示第119号,官報. 3)自治省消防庁(1990):市町村別タンク設置数量表,内部資料. 4)Kamiyama M. et al.(1986), Soil and Foundations, Vol.26, pp.16-32. 5)久米ほか(1987):回帰分析,岩波書店. 6)岡田・鏡味(1978),日本建築学会論文報告集,第267号, pp.140-171. 7)須原(1987),茨大工・卒論. 8)田中ほか(1979),地震研究所彙報, Vol.54, pp.629-655.

[表]

表1 解析データの地震諸元・震央距離(87型強震計)

気象庁MTの地震番号	地震名	発震年月日	震央位置(度・分)	マグニチュード(M _J)	震源深さD(km)	震央距離Δ(km)		
						銚子	東京	横浜
05	房総半島南部	1988. 8. 12	N35 06, E139 52	5.3	69.4	-----	66.4	-----
06	山梨県東部	1988. 9. 5	N35 30, E138 59	5.6	29.6	-----	-----	61.2
07	銚子付近	1988. 9. 26	N35 33, E141 11	5.8	35.7	-----	-----	138.8
08	埼玉県西部	1988. 9. 29	N35 55, E139 11	5.0	15.0	-----	57.4	68.1
11	茨城県南西部	1989. 2. 19	N36 01, E139 55	5.6	55.3	91.6	39.2	68.4
12	銚子付近	1989. 3. 6	N35 42, E140 43	6.0	55.7	14.3	86.5	99.9
15	伊豆半島東方沖	1989. 7. 5	N34 59, E139 07	4.7	2.4	-----	97.2	70.1
16	伊豆半島東方沖	1989. 7. 7	N34 59, E139 08	5.2	4.5	-----	97.3	70.0
17	伊豆半島東方沖	1989. 7. 9	N34 60, E139 07	5.5	3.4	-----	97.0	70.0
18	伊豆半島東方沖	1989. 7. 14	N34 59, E139 06	4.8	0.0	-----	97.7	70.8
19	伊豆大島近海	1989. 10. 14	N34 49, E139 30	5.7	21.2	-----	98.6	69.5
21	三陸東方はるか沖	1989. 11. 2	N39 51, E143 03	7.1	0.0	-----	546.3	574.8
27	茨城県南部	1989. 11. 25	N35 57, E140 07	4.6	76.0	-----	43.7	-----
29	茨城県東方沖	1989. 12. 9	N36 36, E141 05	5.6	45.6	97.1	155.6	-----
41	茨城県東方沖	1990. 2. 12	N36 24, E141 01	5.3	38.3	75.1	138.7	163.1
44	伊豆大島近海	1990. 2. 20	N34 42, E139 16	6.5	17.0	185.3	118.3	89.2
45	伊豆大島近海	1990. 2. 20	N34 39, E139 13	5.1	8.7	-----	125.2	96.1
48	東海地方南方はるか沖	1990. 3. 12	N33 25, E138 44	5.4	49.0	-----	-----	238.9
53	茨城県北部	1990. 5. 3	N36 26, E140 37	5.2	58.0	-----	113.1	140.3
60	銚子付近	1990. 6. 1	N35 39, E140 44	6.0	59.3	16.0	88.2	99.9
61	神奈川県	1990. 6. 5	N35 33, E139 12	5.4	122.8	152.2	53.0	-----
65	茨城県南部	1990. 7. 4	N36 02, E140 07	5.1	76.0	75.0	51.0	78.9
68	福島県東方沖	1990. 7. 28	N37 07, E142 12	5.2	4.3	193.9	269.8	294.2
71	茨城県東方沖	1990. 8. 5	N36 24, E141 07	5.8	39.1	77.1	145.4	169.3
72	箱根付近	1990. 8. 5	N35 12, E139 06	5.1	13.6	-----	80.4	57.1
75	九十九里沿岸付近	1990. 8. 23	N35 21, E140 24	5.4	50.0	60.6	69.0	67.8
76	九十九里沿岸付近	1990. 8. 23	N35 22, E140 24	5.2	49.5	-----	69.1	68.5

表2 解析データの地震諸元・震央距離(1倍強震計)

地震名	発震年月日	震央位置(度・分)	マグニチュード(M _J)	震源深さD(km)	震央距離Δ(km)						
					根室	札幌	函館	秋田	盛岡	仙台	新潟
三陸沖本震	1960. 3. 21	N 39 48, E 143 24	7.2	20.0	-----	-----	-----	-----	-----	275.9	432.0
十勝沖本震	1968. 5. 16	N 40 44, E 143 35	7.9	9.0	333.4	-----	265.1	316.8	234.9	358.3	500.6
十勝沖第一余震	1968. 5. 16	N 41 25, E 143 35	7.5	26.0	309.9	220.4	179.6	299.8	238.2	388.6	508.1
十勝沖第二余震	1968. 6. 12	N 39 25, E 143 08	7.2	31.0	480.6	430.6	332.7	262.6	171.3	-----	392.7
宮城県沖本震	1978. 2. 20	N 38 45, E 142 12	6.7	50.0	-----	-----	-----	-----	-----	-----	290.8
宮城県沖本震	1978. 6. 12	N 38 09, E 142 10	7.4	48.0	643.7	548.9	423.9	250.2	192.7	-----	275.3
三陸はるか沖本震	1989. 11. 2	N 39 49, E 143 01	7.1	0.0	-----	384.6	291.1	-----	159.2	253.2	405.2

表3 各観測点の周期4秒付近の揺れやすさ(87型強震計)

	岡田・鏡味(1978)の揺れやすさ		本研究所による揺れやすさ $10^{0.1(A)}$ ($\sqrt{R^2+T^2}$ 成分)
	揺れやすさ \bar{X}_1	$\bar{X}_1/(\bar{X}_1)_0^*$	
銚子(基準点)	0.76	1	1
東京	2.00	2.63	2.85
横浜	2.00	2.63	3.46

*) 基準点の \bar{X}_1 に対する相対値

表4 各観測点の周期4秒付近の揺れやすさ(1倍強震計)

	岡田・鏡味(1978)の揺れやすさ		本研究所による揺れやすさ $10^{0.1(A)}$ ($\sqrt{R^2+T^2}$ 成分)
	揺れやすさ \bar{X}_1	$\bar{X}_1/(\bar{X}_1)_0^*$	
根室	0.47	0.44	0.24
札幌(基準点)	1.07	1	1
函館	0.79	0.74	0.70
秋田	1.74	1.63	2.48
盛岡	0.63	0.59	0.59
仙台	1.20	1.12	1.20
新潟	2.95	2.76	3.86

[図]



図1 震央と観測点(87型強震計)

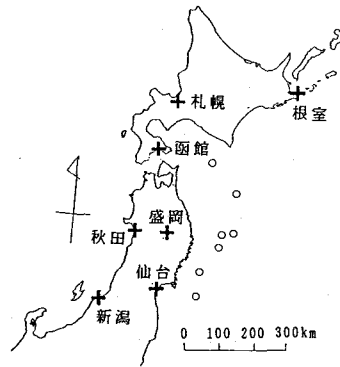


図6 震央と観測点(1倍強震計)

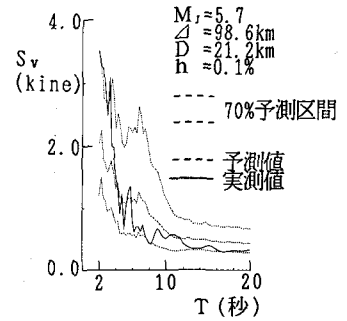


図5 東京における予測 S_v と実測 S_v (No.19の地震)

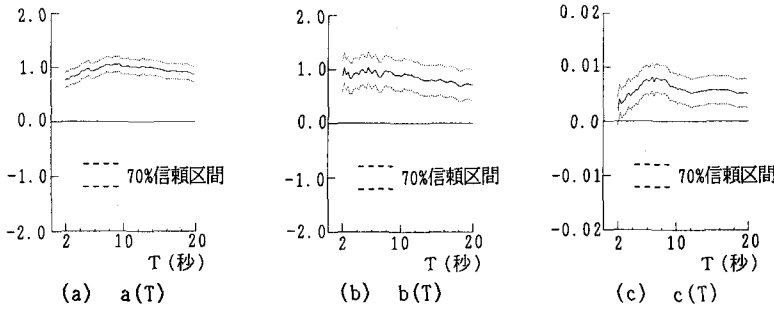


図2 (a)~(c) 偏回帰係数 $a(T) \sim c(T)$
(87型強震計, $\sqrt{R^2+T^2}$ 成分)

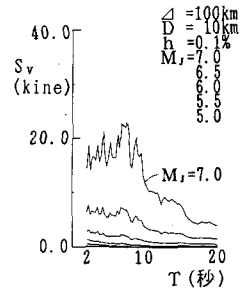


図4 東京における予測 S_v (T成分)

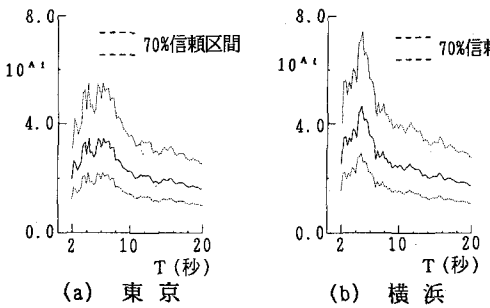


図3 (a), (b) やや長周期揺れやすさ $10^{A_i(T)}$
(銚子を基準とした値, $\sqrt{R^2+T^2}$ 成分)

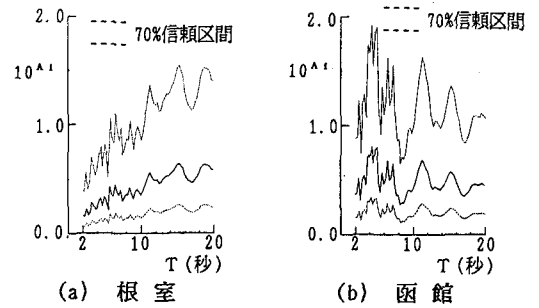


図7 (a)~(f) やや長周期揺れやすさ $10^{A_i(T)}$
(札幌を基準とした値, $\sqrt{R^2+T^2}$ 成分)

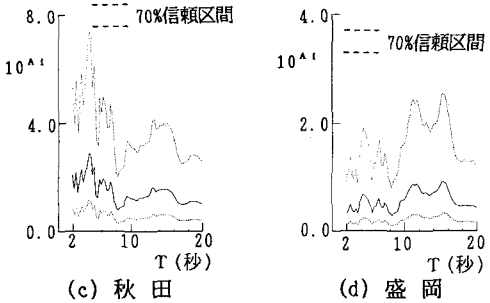


図7 (a)~(f) やや長周期揺れやすさ $10^{A_i(T)}$ (続き)
(札幌を基準とした値, $\sqrt{R^2+T^2}$ 成分)

