

東京および近隣の長周期地震動による応答継続時間について

Response duration of long-period structure due to earthquake ground motion in Tokyo area

篠 泉
Izumi Shino

工博，足利工業大学准教授，工学部都市環境工学科（〒326-8558 栃木県足利市大前町 268-1）

Durations of earthquake responses of long-period structures including high-rise buildings are estimated in Tokyo area from digital strong-motion seismograph records provided by K-NET. Long-period structure is modeled by a SDOF system with damping constant of 0.01. In cases of seismograms with short time lengths, free vibrations of structures from the ends of records are considered as structure responses. At Sarue, one of the K-NET stations in Tokyo, response durations vary from 50 to 460 s, and the validity of those values is ascertained by comparison with response durations computed from JMA's low-magnification displacement seismograph records in Tokyo.

Key Words: Response duration, Long-period structure, Response spectrum

キーワード：応答継続時間，長周期構造物，応答スペクトル

1. はじめに

近年，比較的遠地の地震で，震度が3程度以下の場合にも，東京にある超高層ビルにおいて，2秒をこえる長周期の揺れが数多く経験されている¹⁾。そのような場合には，通常の場合（地表面上や従来の建物内など）で人体に感じられる震動が終息してしばらく経ってから，超高層ビルのような長周期構造物（固有周期 T_0 が2秒～20秒程度で従来の構造物より長い構造物）で震動が生じ，その揺れが長時間続くことが多い。このような周期2～20秒程度の長周期地震動により構造物の震動がどの程度継続するかは，構造物の崩壊に直接結びつかない場合にも，長周期構造物を利用する際に問題となる点であり，長周期構造物の地震対策に関わる重要な検討事項の一つである。

従来，地震による震動の継続時間は，地動の加速度波形，速度波形，あるいは変位波形に関する検討がほとんどであり，地震動による構造物の応答の継続時間に着目したまとまった研究はない。

図-1は，平成16年新潟県中越地震の際に独立行政法人防災科学技術研究運用のK-NET²⁾の新宿観測点で得られた強震記録の加速度波形を示したものである。この図には，この波形の速度応答スペクトルがピークを示す固有周期 $T_0=5.7$ 秒の1自由度系の相対速度応答波形も2種

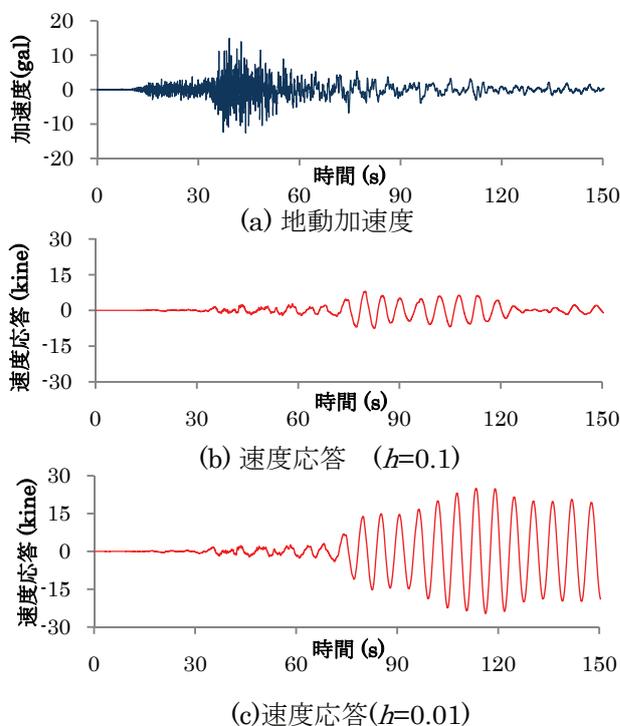


図-1 K-NET新宿での記録波形と相対速度応答波形（中越地震，NS成分， $T_0=5.7$ s）類示してある。1自由度系の減衰定数 h は，図(b)が $h=0.1$ ，図(c)は $h=0.01$ である。構造物の減衰が大きい場合

には、構造物の応答波形の包絡線等は、入力地震動波形からおおよそ推定できる形状となるが、構造物の減衰が小さい場合には、地動加速度記録終了時に大きな応答速度が生じた状態となってしまう場合もあり、その後の構造物の応答は不明となり、入力地震動波形記録から構造物の応答波形を類推することは難しいことになる。したがって、長時間継続する低減衰時の地震応答を正確に把握するためには、入力となる地震動の記録時間長も十分な長さが必要となることになる。また、一般に減衰の極めて小さい長周期構造物の応答の継続時間を正確に評価するには、入力波としては、より数は限られるが、速度記録や変位記録を利用する方が適切である。

本研究では、長周期構造物を1自由度系でモデル化し、東京および近隣の地盤上で得られた実地震記録の水平2成分をそれぞれ入力地震波として地震応答を計算し、応答の継続時間（応答継続時間）に注目し、その工学的性質を定量的に検討する。

2. 対象とする強震記録

防災科学技術研究所が運用する、全国を約20km間隔で均質に覆う1000箇所以上の強震観測施設からなる強震観測網であるK-NET²⁾では、東京都東部の墨田区・葛飾区・江戸川区・江東区により密な間隔で、16強震観測点(砂町(TKY013)~越中島(TKY028))が設けられている。これらの観測点ではこれまで数多くの加速度強震記録が得られ続けているが、そのなかでも262地震の強震記録(2008年6月まで)があり、かつ主要な地震の記録が得られており、さらに、記録時間の長いデータが多く残されている猿江(TKY021)の強震記録に注目することにした。

2.1 対象地震

K-NET観測点である猿江の強震記録のうち、以下の条件を満たす記録を得た地震を選択した。

- ① 強震記録から計算した速度応答スペクトル(減衰定数 $h=0.01$)において固有周期2秒程度以上の長周期にピークが存在すること。
- ② ①での速度応答スペクトルのピーク値が1kine以上の振幅であること。

さらに、これまで長周期地震動が観測される地震のマグニチュードが6.5程度以上であったこと、震源深さが浅い場合に長周期地震動を構成する表面波が励起されやすいことを考慮して、表-1に示す14の地震を対象地震とした。表中の M_J は気象庁のマグニチュードであり、 M_w は防災科学技術研究所(F-net)³⁾により決定されたモーメントマグニチュードである。なお、各地震に表のように地震番号を付けることにする。また、図-2に対象とした14地震の震央位置を示す。

表-1 対象地震

地震番号	地震発生時刻(JST)	震源地	M_J	M_w	深さ(km)
1	2000/07/30,21:25	三宅島近海	6.5	6.4	17
2	2003/05/26,18:24	宮城県沖	7.1	7.0	72
3	2003/09/26,04:50	釧路沖	8.0	7.9	45
4	2003/09/26,06:08	十勝沖	7.1	7.3	21
5	2003/10/31,10:06	福島県沖	6.8	6.7	33
6	2004/09/05,19:07	紀伊半島沖	7.1	7.2	38
7	2004/09/05,23:57	東海道沖	7.4	7.5	44
8	2004/10/23,17:56	新潟県中越地方	6.8	6.6	13
9	2004/10/23,18:34	新潟県中越地方	6.5	6.3	14
10	2004/11/29,03:32	釧路沖	7.1	7.0	48
11	2005/08/16,11:46	宮城県沖	7.2	7.1	42
12	2007/07/16,10:13	新潟県上中越沖	6.8	6.6	17
13	2008/05/08,01:45	茨城県沖	7.0	6.8	51
14	2008/06/14,08:43	岩手県内陸南部	7.2	6.9	8

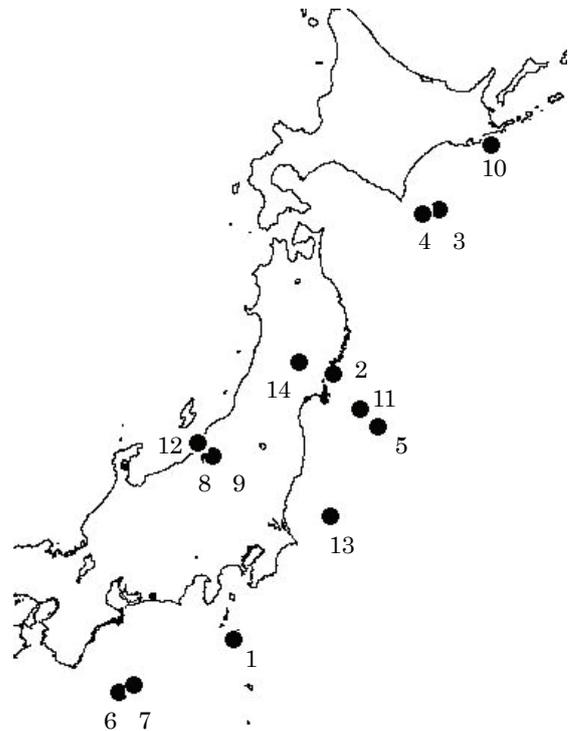


図-2 対象地震の震央位置(1~14は表-1の地震番号)

2.2 対象強震観測地点

本研究では、猿江の強震データを検討の中心とするが、そのほかに、東京および近隣の以下のK-NETの4強震観測点における記録も検討の対象とする。

- ・辰巳(TKY017):猿江と同様に約400秒間以上の長い強震記録が多く得られており、長周期構造物の応答継続時間のより適切な評価に有益なデータとなるため
- ・新宿(TKY007):2008年6月までに極めて多数(319)の強震記録が得られており、また、多くの超高層ビルが

存在する地点であるため。

・横浜(KNG002)：東京の南方に位置し、付近に超高層ビルが建設されているため。

・大宮(SIT010)：東京の北方にあり、強震記録が多数得られているため(2008年6月までに298記録)。

表-1の地震による強震記録が対象とした5地点で得られたことを○で示したものが表-2である、本研究の解析対象記録である。また、各観測点の位置を図-3に示す。

表-2 各地点の強震記録 (○:有り)

地震番号	猿江	辰巳	新宿	横浜	大宮
1	○	○		○	○
2	○	○	○	○	○
3	○	○	○		○
4	○	○			
5	○	○	○	○	○
6	○	○	○	○	○
7	○	○	○	○	○
8	○	○	○	○	
9	○	○	○	○	○
10	○	○			
11	○		○	○	
12	○	○	○	○	○
13	○	○	○	○	○
14	○	○	○	○	○

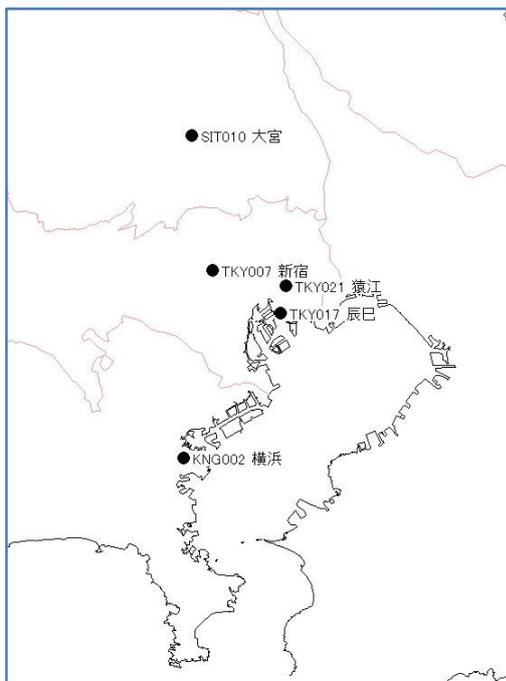


図-3 対象観測点の位置

また、図-4には、猿江(TKY021)での各対象地震の震央距離と地震のモーメントマグニチュードを示した。

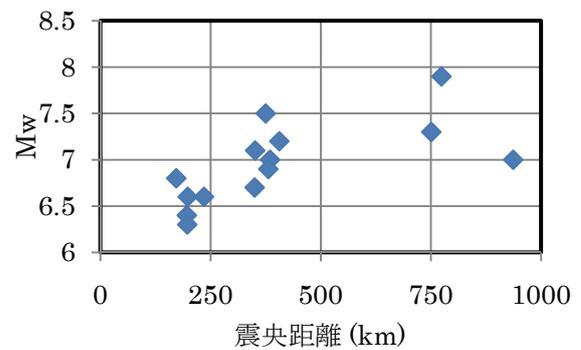


図-4 対象地震の猿江での震央距離とモーメントマグニチュード (Mw)

3. 応答継続時間の定義

長周期構造物を1自由度系でモデル化し、その速度応答に着目することにする。対象とした減衰定数 h は、

- ① 長周期構造物の一種であるS造の超高層ビルの場合、 $h=0.02$ が設計で採用されているが、より高い建物の場合はより小さくする配慮が必要と指摘されている⁴⁾。
- ② 長周期地震動による石油タンクのスロッシング現象の減衰定数は、自由液面を持つ固定屋根式タンクで0.03%または0.1%、シングルデッキの浮き屋根式タンクでは0.5%、ダブルデッキ浮き屋根式タンクでは1次モードで1%、2次モード、3次モードでは5%程度が妥当とされている⁵⁾。

などの点を考慮して、 $h=0.01$ の一種類とした。

1自由度系の速度応答は、外乱線形補間法⁶⁾により計算した。そして、速度応答波形の最大振幅値、その50%および25%の値となる時間に着目し、以下の5種類の応答時間を求めることにした。

- ・最大値が発生する時間 (t_{max})
- ・初めて最大値の25%の振幅を超える時間 (t_{25F})
- ・初めて最大値の50%の振幅を超える時間 (t_{50F})
- ・最後に最大値の50%の振幅となる時間 (t_{50L})
- ・最後に最大値の25%の振幅となる時間 (t_{25L})

図-5は、地震番号13の地震の際に猿江で得られた強震記録のEW成分から求めた速度応答波形の応答時間 t_{max} , t_{25F} , t_{50F} , t_{50L} , t_{25L} の位置を示した例である。

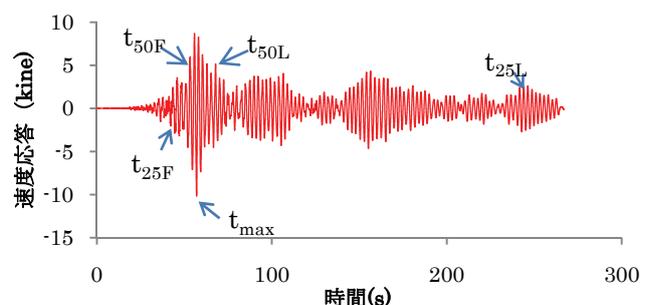


図-5 速度応答と応答時間(地震番号13, 猿江, EW成分, 固有周期 $T_f=2.4s$, $h=0.01$)

ここで、以下のように、応答の継続時間 T_{d50} , T_{d25} を定義する。

$$T_{d50} = t_{50L} - t_{50F} \quad (1)$$

$$T_{d25} = t_{25L} - t_{25F} \quad (2)$$

T_{d50} を 50% 応答継続時間, T_{d25} を 25% 応答継続時間とよぶことにする。

4. 応答継続時間の減衰自由振動を考慮した推定

応答波形の特徴を示す5つの応答時間 (t_{\max} , t_{25F} , t_{50F} , t_{50L} , t_{25L}) を図-1(c)に示すような低減衰1自由度系の速度応答波形から求めようとする。最大応答を過ぎた後の t_{50L} , t_{25L} などが正しく得られないこととなる。1自由度系の減衰定数が小さく応答がそれほど小さくならないためであり、入力となる地震動の記録時間長が十分に長ければ、この問題は生じないものである。しかし、強震記録の収録時間は限られている。そこで、 t_{50L} , t_{25L} 等を近似的に推定するために、1自由度系の減衰自由振動を利用することとした。実際には、入力地震記録終了時に1自由度系に生じている応答変位、応答速度を初期条件として、その後の1自由度系の減衰自由振動を計算し、その波形より t_{50L} , t_{25L} などの応答時間を求めることとした。

減衰自由振動開始後にその包絡線の振幅 A が $p \cdot A$ (ただし $p=0 \sim 1$) に減少するまでの時間 t_p は、粘性減衰自由振動を考えれば、次式で求めることができる。

$$t_p = -\frac{T_0 \cdot \ln p}{2\pi h} \quad (3)$$

ここで、 T_0 は1自由度系の(非減衰)固有周期である。そこで、式(3)から求めた値を第1次近似値として利用することで、 t_{50L} , t_{25L} を効率的に計算することができる。ちなみに、図-1(c)の場合、地震記録の終わる150秒の時点から後の自由振動部分の速度応答波形の振幅が半分となるためには、 $T_0=5.7$ 秒, $h=0.01$, $p=0.5$ を式(3)に代入して、約63秒後ということになる。

図-6(a)は、猿江(TKY021)での地震番号8の地震による強震記録のEW成分の加速度波形を示したものである。図(b)は、固有周期 $T_0=7$ 秒, 減衰定数 $h=0.01$ の1自由度系の速度応答波形であり、図中に、時間 t_{\max} , t_{25F} , t_{25L} の位置が示してある。なお、図(a)に示した地震動の速度応答スペクトル ($h=0.01$) の周期2秒より長周期側での最大のピークは $T_0=7$ 秒で生じており、いわば、卓越周期といえる。

一方、図-6(a)の加速度記録が仮に200秒で終了した場合を仮定して、図(c)には200秒以降は1自由度系の速

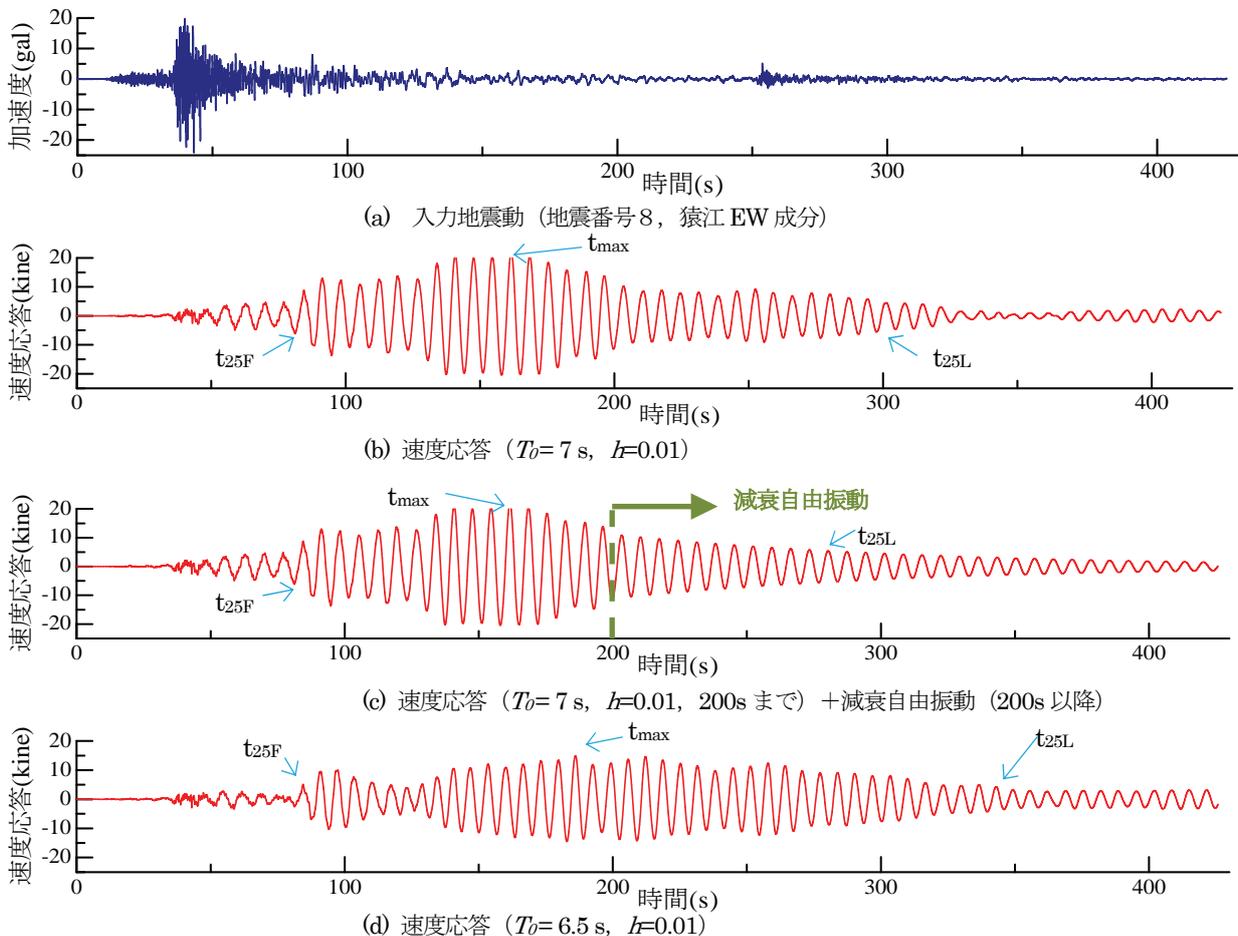


図-6 応答速度波形と自由振動波形, 固有周期の応答波形への影響

度の減衰自由振動波形を示した。最大値の25%の振幅となる時間 t_{25L} が図中に示してあるが、本来の図(b)の場合より早めに t_{25L} が生じていることがわかる。したがって、入力地震波の形状にもよるが、多くの場合、入力地震波の終了以前の1自由度系の応答を減衰自由振動で推定すると、実際の応答時間 t_{25L} などを小さめに評価することになることが考えられる。

5. 応答継続時間の計算

図-6(d)には、固有周期 $T_0=6.5$ 秒、減衰定数 $h=0.01$ の1自由度系の速度応答波形が示してある。速度応答スペクトル ($h=0.01$) が最大ピークを示す(卓越)固有周期7秒(図-6(b))を少し外れた周期6.5秒を選んで、速度応答を計算したもののだが、25%応答継続時間が、卓越周期である図-6(b)の場合より、長くなることわかる。これは、 $T_0=6.5$ 秒の場合、 $T_0=7$ 秒の応答波形の最大値付近に存在する応答の局所的な増加がなく、全般的に $T_0=6.5$ 秒の応答の包絡線が平坦なものになるために生じた結果である。同様な傾向が他の強震記録の場合にも認められたため、本研究では、各強震記録の水平成分ごとに、周期2秒~20秒の範囲での応答スペクトル値が最大となる固有周期のみに限定して、1自由度系の速度応答を計算し、応答継続時間を調べることにした。なお、前述のように減衰定数は $h=0.01$ の1種類のみとしている。

図-7は、対象とした固有周期とその速度応答スペクトル値である。

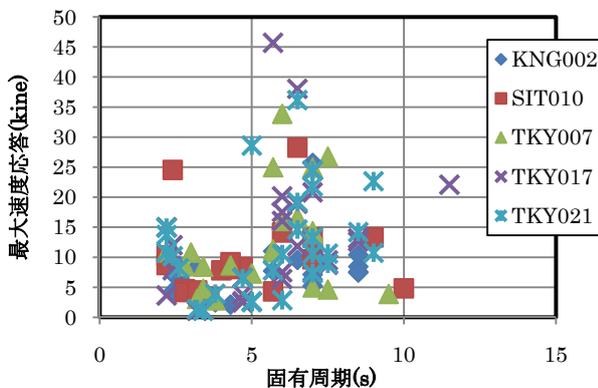


図-7 対象固有周期と速度応答値

表-3 固有周期の基本的な統計値(秒)

観測点	最長	最短	平均	標準偏差
猿江	9.0	2.2	5.55	2.12
辰巳	11.5	2.2	5.67	2.22
新宿	9.5	2.2	5.42	1.92
横浜	8.5	2.2	5.27	2.37
大宮	10.0	2.2	4.77	2.23

表-3は固有周期の最長値、最短値、平均値、標準偏差を観測点ごとにまとめたものである。

対象とした固有周期は、2.2~11.5秒(平均5.4秒)である。

計算した応答継続時間の基本統計量を表-4, 5に示す。いずれの観測点での場合も、25%応答継続時間は平均的に50%応答継続時間の2倍程度になっている。また、NS成分とEW成分での相違は、猿江と大宮ではEW成分が大きめとなるものの、ほぼ同等の値となっている。なお、顕著な違いが認められるのは、猿江・辰巳とそれ以外の3地点での応答継続時間である。平均値で比較しても猿江・辰巳での応答継続時間は、50%、25%ともに、他の3地点での値より約1.4倍長い。これらの原因の一つに記録長の違いがあげられる。表-6は各観測点の対象記録の記録時間長を示したものである。記録ごとにばらつきはあるものの、平均的に、猿江・辰巳は他地点の約2倍の記録時間がある。

表-4 50%応答継続時間の基本統計量(秒)

観測点	成分	最大	最小	平均	標準偏差
猿江	NS	264.67	43.53	116.71	65.00
	TKY021	EW	253.13	14.82	144.64
辰巳	NS	313.91	29.51	125.10	72.22
	TKY017	EW	328.73	66.18	120.15
新宿	NS	123.31	56.21	91.01	22.33
	TKY007	EW	146.29	20.91	86.07
横浜	NS	122.31	31.09	86.61	28.49
	KNG002	EW	142.08	39.78	89.96
大宮	NS	134.41	46.05	86.22	30.23
	SIT010	EW	158.64	66.21	103.66

表-5 25%応答継続時間の基本統計量(秒)

観測点	成分	最大	最小	平均	標準偏差
猿江	NS	457.41	119.35	225.82	91.56
	TKY021	EW	381.90	146.41	277.41
辰巳	NS	493.15	164.79	236.05	92.45
	TKY017	EW	412.37	145.30	249.09
新宿	NS	231.06	105.60	164.24	42.54
	TKY007	EW	239.87	76.53	175.15
横浜	NS	222.40	96.49	172.58	35.20
	KNG002	EW	260.83	89.25	165.37
大宮	NS	255.39	87.62	152.64	51.51
	SIT010	EW	271.58	95.49	189.57

表-6 対象強震記録の記録時間長(秒)

観測点	最大	最小	平均	標準偏差
猿江	469.57	180.00	319.03	95.15
辰巳	459.48	161.00	308.89	94.56
新宿	197.19	116.09	144.11	29.43
横浜	199.00	60.00	121.63	46.02
大宮	218.00	119.99	159.31	41.62

また、計算した応答継続時間のうち、地震記録後の減衰自由振動の部分から得られている継続時間の長短も相違の原因と考えられる。減衰自由振動から評価すると応答継続時間を過小評価する可能性があるからである(図-6(c))。そこで、地震記録部分のみから求めた応答継続時間を原応答継続時間と呼ぶことにし、4. で述べた減衰自由振動を加味した応答継続時間と比較することとした。図-8は、50%応答継続時間と50%原応答継続時間を比べたものである。図-9は25%の場合の同様な図である。強震記録長の長いものが多い猿江・辰巳での応答継続時間の方が、多くの場合原応答継続時間に近い。

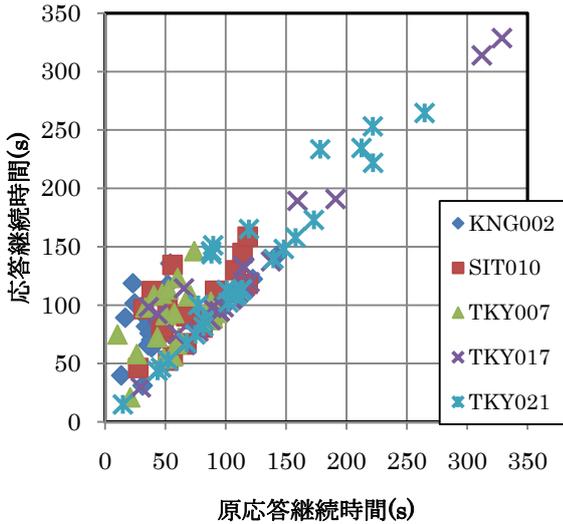


図-8 応答継続時間と原応答継続時間 (50%の場合)

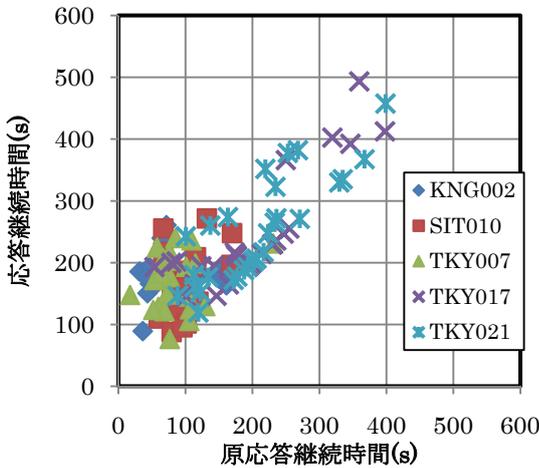


図-9 応答継続時間と原応答継続時間 (25%の場合)

表-7 (応答継続時間÷原応答継続時間)の幾何平均

観測点	猿江	辰巳	新宿	横浜	大宮	全地点
50%	1.10	1.13	1.64	1.86	1.39	1.37
25%	1.23	1.27	2.08	2.24	1.70	1.62

表-7は、地点ごとに応答継続時間を原応答継続時間で割って比を求め、その幾何平均を示したものである。

猿江・辰巳以外の3地点での場合、記録時間長が短いことが多いこともあり、減衰自由振動で評価されている応答継続時間の割合が多いことがわかる。したがって、表-7の幾何平均の相違程度は、新宿・横浜・大宮の応答継続時間が過小評価されている可能性が高い。

6. 応答継続時間の検討

6.1 猿江における応答継続時間

記録の得られた地震のマグニチュードと50%、25%応答継続時間の関係を示したのが、図-10である。なお、マグニチュードとしては、地震断層面積が地震動の継続時間に影響を及ぼすと考えて、地震モーメントから計算されるモーメントマグニチュード M_w ³⁾を使用した。

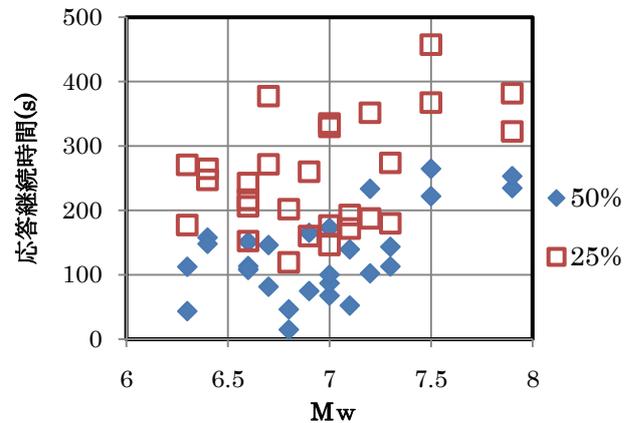


図-10 マグニチュード(M_w)と応答継続時間 (猿江)

応答継続時間が M_w にもなって大きくなる傾向が若干認められるが、ばらつきは大きい。

図-11は、震央距離と応答継続時間を示したものである

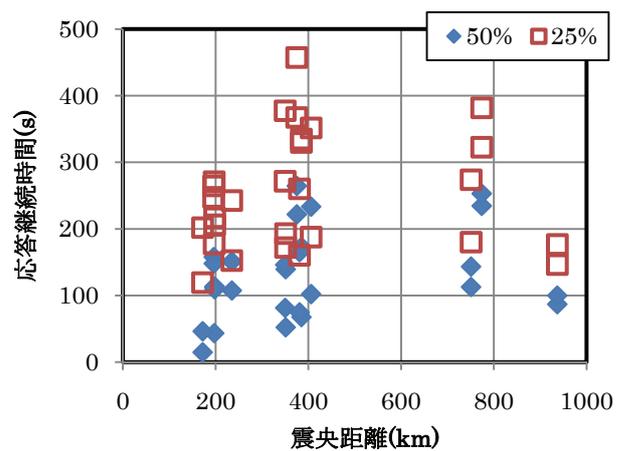


図-11 震央距離と応答継続時間(猿江)

る。50%、25%ともに応答継続時間と震央距離の間にははっきりした関係は認められない。

図-12は、50%応答継続時間を計算した1自由度系の固有周期に対して示したものである。なお、猿江の観測

点では、2006年1月に、強震計がSMAC-MDU（サンプリング振動数200Hz）からK-NET02（サンプリング振動数100Hz）に更新されている²⁾ので、区別して示した。25%応答継続時間と固有周期の関係も同様に、図-13に示した。いずれの場合もK-NET02の強震記録から計算した応答継続時間はSMAC-MDU記録のものより、短めとなる傾向が認められる。両強震計の後トリガー等の設定が異なるためか、SMAC-MDUによる11記録の平均記録長は343秒であるのに対し、K-NET02による3記録の平均記録長は232秒であり、これらの記録時間長の差が両強震計記録から求めた応答継続時間の相違を生じたものと考えられる。また、SMAC-MDUの強震記録のみから求めた応答継続時間は、50%、25%ともにばらつきは大きいものの、固有周期とともに長くなる傾向が認められる。

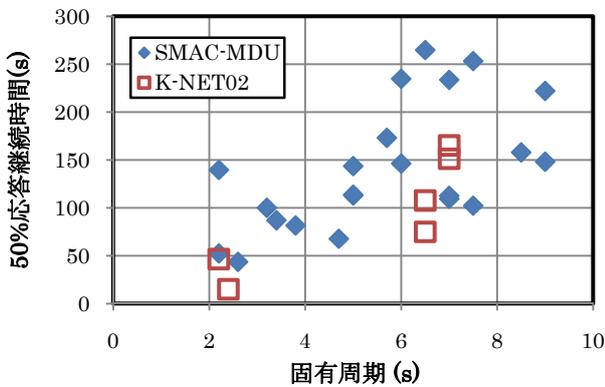


図-12 固有周期と50%応答継続時間 (猿江)

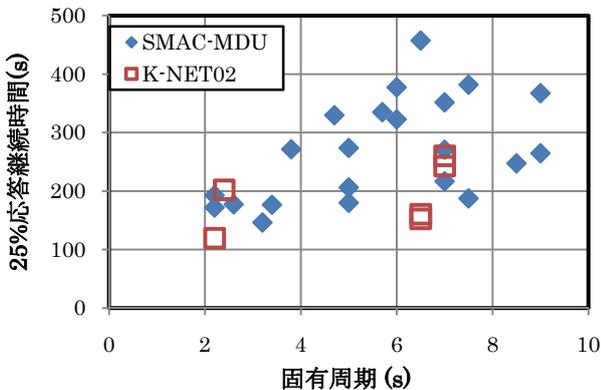


図-13 固有周期と25%応答継続時間 (猿江)

6.2 辰巳における応答継続時間

辰巳の対象強震記録から計算した1自由度系の50%、25%応答継続時間を猿江の場合と同様に固有周期に対して示したのが、それぞれ、図-14、15である。なお、猿江同様に辰巳の観測点でも、2005年12月に、強震計がSMAC-MDUからK-NET02に更新されており²⁾、K-NET02の記録の応答継続時間はSMAC-MDUのものより、短くなる傾向が認められる。

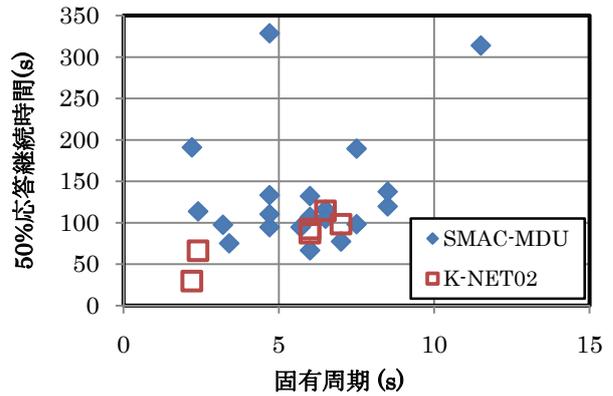


図-14 固有周期と50%応答継続時間 (辰巳)

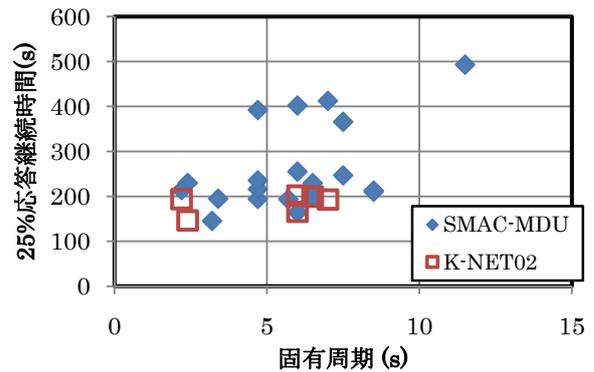


図-15 固有周期と25%応答継続時間 (辰巳)

6.3 新宿、横浜、大宮における応答継続時間

新宿における対象強震記録の応答継続時間を計算に使用した1自由度系の固有周期に対して示したのが、図-16である。そして、横浜に関しては図-17に、大宮に関しては図-18に示した。図-17より、横浜の場合にはかなり値はばらつくが、図-16、18の新宿と大宮の場合には、応答継続時間が固有周期とともに長くなる傾向が認められる。

なお、新宿、横浜、大宮でも、猿江・辰巳の場合と同様に、2004から2005年に渡り、強震計がK-NET95からK-NET02に換装されているが、その前後で、地震記録時間長にはっきりした違いが認められない。

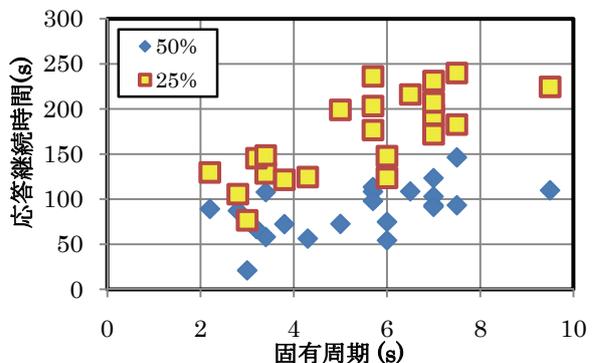


図-16 固有周期と応答継続時間 (新宿)

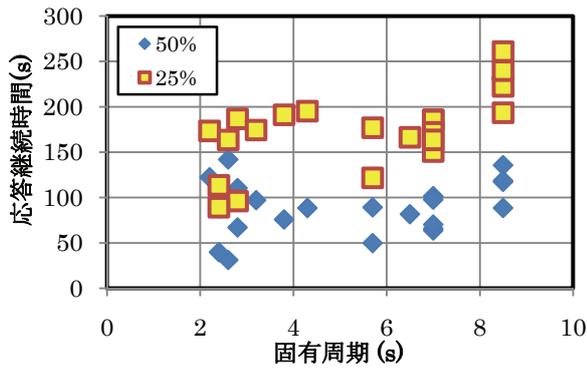


図-17 固有周期と応答継続時間
(横浜)

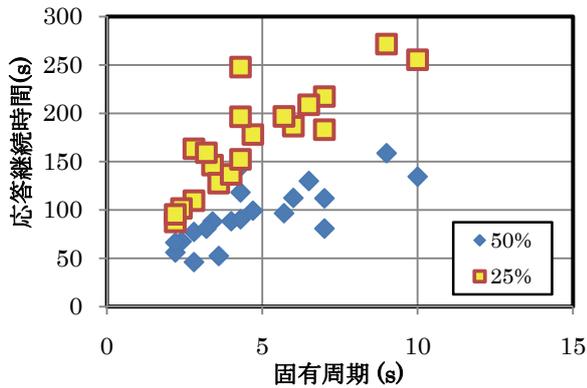


図-18 固有周期と応答継続時間
(大宮)

6.4 応答継続時間と固有周期の関係

本研究で対象とした5観測点の応答継続時間が応答を計算した1自由度系の固有周期 T_0 との間に関係が認められたため、それらの傾向を定量的に明らかにする目的で、以下の式を仮定して、あてはめを行った。

$$T_{d50} = c_{50} + d_{50} \cdot T_0 \quad (4)$$

$$T_{d25} = c_{25} + d_{25} \cdot T_0 \quad (5)$$

ここで、 c_{50} 、 d_{50} 、 c_{25} 、 d_{25} は、回帰分析により決定する係数である。表-8、9に分析の結果得られた各係数と重相関係数、標準偏差を示す。なお、猿江と辰巳の場合には、SMAC-MDUの記録から求めた応答継続時間のみをデータとして使用した。50%応答継続時間に関する結果は、係数にばらつきがあり、重相関係数も高くない。一方、25%応答継続時間に関しては、横浜の場合以外は、 T_0 の係数 d_{25} も20程度にそろっており、重相関係数も比較的高い。ただし、定数項 c_{25} が猿江・辰巳に比べて、他の3地点で小さい値となるのは、観測点の性質である可能性もあるが、主に、強震記録長が短く、応答継続時間のより多くの部分を減衰自由振動で推定しているためと考えられる(表-7)。

表-8 式(4)の回帰分析結果

観測点	c_{50}	d_{50}	重相関係数	標準偏差
猿江	38.19	18.25	0.592	53.72
辰巳	82.66	8.93	0.283	70.27
新宿	45.16	8.01	0.557	23.51
横浜	75.39	2.45	0.198	29.48
大宮	44.74	10.52	0.749	21.31

表-9 式(5)の回帰分析結果

観測点	c_{25}	d_{25}	重相関係数	標準偏差
猿江	148.8	21.29	0.521	75.44
辰巳	134.8	21.42	0.502	85.72
新宿	68.2	18.73	0.765	31.08
横浜	105.4	12.07	0.643	35.00
大宮	74.6	20.23	0.845	29.23

6.5 地震による応答継続時間の相違

応答継続時間が表-1に示した地震ごとにどのように異なるかを調べるために、継続時間がより長く差異の見やすい25%応答継続時間を猿江と辰巳の強震記録で調べることにする。両地点を選んだのは記録長が長くより妥当な応答継続時間が求められていると考えられるからである。図-19、20は、それぞれ、猿江、辰巳での地震ごとの応答継続時間を示したものである。

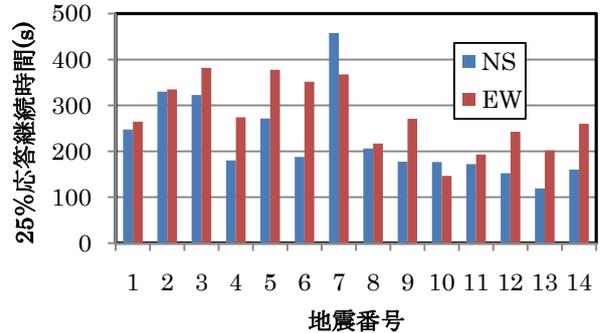


図-19 25%応答継続時間(猿江)

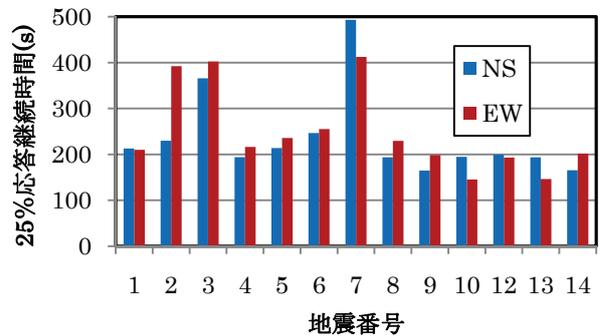


図-20 25%応答継続時間(辰巳)

地震番号2, 3, 7(表-1)では、いずれの地点でも、NS、EWいずれかの成分で300秒間以上の応答継続時間が認められる。また、猿江では、番号5, 6の地震でもEW成分で、応答が300秒間以上継続している。

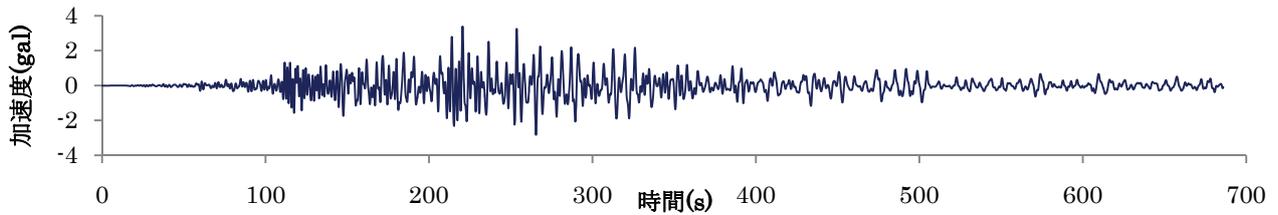


図-21 気象庁1倍強震計の数値化記録加速度波形（1968年十勝沖地震，東京，NS成分）

7. 気象庁1倍強震計記録から求めた応答継続時間との比較

1950年代より、約40年間にわたって日本全国の気象官署における強震観測に使用された倍率1の機械式変位計である気象庁1倍強震計は、周期2～20秒程度の長周期地震動を比較的精度よく記録できる地震計であり⁷⁾、篠・片山⁸⁾により、東京、横浜での記録が数値化されている。周期帯域は2～20秒に制限して求められており、本論文で注目した1自由度系の固有周期の範囲に対応するため、応答継続時間の比較検討の対象となる。表-10に比較対象とする記録の得られた地震の一覧を示す。ただし、 M_w は地震モーメント⁹⁾より計算したものである。

表-10 1倍強震計数値化記録の得られた地震

地震番号	地震発生時刻 (JST)	地震名	M_J	M_w	深さ (km)
J1	1964/06/16,13:02	新潟地震	7.5	7.6	40
J2	1968/05/16,09:49	十勝沖地震	7.9	8.2	0
J3	1968/05/16,19:39	十勝沖(余震)	7.5	—	40
J4	1983/05/26,12:00	日本海中部地震	7.7	7.9	14

十勝沖地震での東京での数値化記録 (NS成分) の加速度波形を図-21に示す。数値化記録長が700秒近くと長いですが、ここで対象とするいずれの数値化記録も500秒以上のものである。

図-22は、応答継続時間を計算した固有周期とその周期での最大速度応答値 ($f=0.01$) を示したものである。図-7で示した速度応答と同程度の値となっていることがわかる。

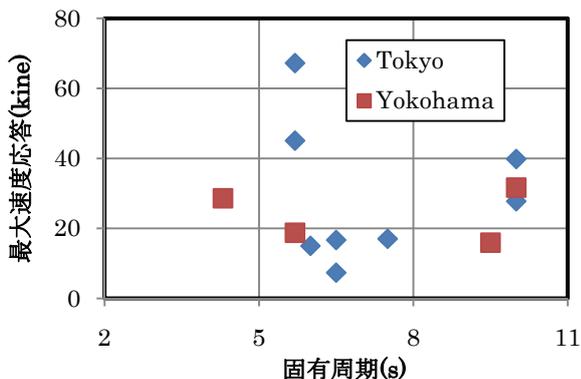
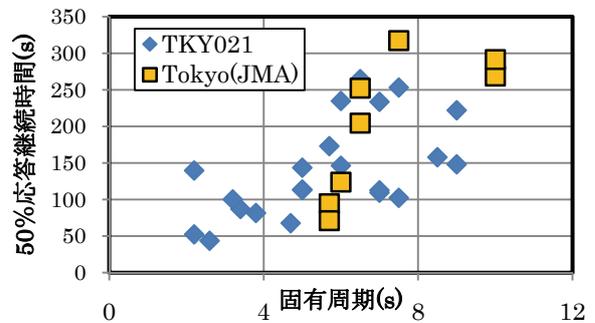


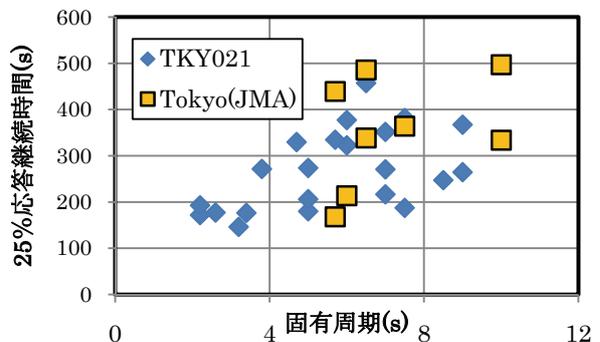
図-22 固有周期と速度応答値(J1-J4)

表-10の4地震による東京の1倍強震計数値化記録から計算した応答継続時間を図-23に示した。比較のために、東京の気象庁に最も近い猿江(TKY021, 5.5km)での応答継続時間 (SMAC-MDU記録の計算結果のみ) も示してある。表-10の地震の M_w が大きいものが多いためもあり、1倍強震計の応答継続時間が猿江のK-NETの結果をやや上回るデータもあるが、50%の場合も25%の場合も、両者はほぼ対応した応答継続時間となっている。このことは、応答継続時間に関して、地震の規模より伝播・サイト特性がより大きく影響している可能性を示唆しているものと考えられる。

横浜では、1倍強震計数値化記録が表-10に示す新潟地震(J1)と日本海中部地震(J4)の2地震でしか得られていないため、それらから、応答継続時間を計算し、K-NETの横浜(KNG002)での応答継続時間とともに図-24に示した。1倍強震計の結果が大きく上回ることが多いが、両観測点は2kmしか離れていないことを考慮すると、これらの相違は、KNG002の強震記録時間が表-6に示すように他のK-NET観測点に比べても短いことなどが原因と考えられる。



(a) 50%応答継続時間



(b) 25%応答継続時間

図-23 応答継続時間の1倍強震計記録による結果との比較 (東京)

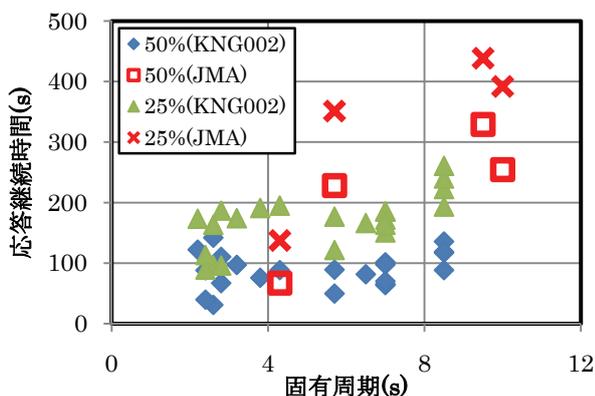


図-24 応答継続時間の1倍強震計記録による結果との比較（横浜）

8. まとめ

東京および近隣のK-NETの5強震観測点(猿江, 辰巳, 新宿, 横浜, 大宮)で得られた14地震の各強震記録のうち水平2成分を対象として, 速度応答スペクトルが最大ピークを示す固有周期(周期2~12秒程度)の1自由度系の速度応答($f=0.01$)を計算し, その継続時間(応答継続時間)を求めた。継続時間としては, 速度応答がその最大値の50%を最初と最後にこえる間の時間で定義した50%応答継続時間と最大値の25%を最初と最後にこえる時間差で定義した25%応答継続時間を使用した。検討の結果を以下にまとめる。

- ① 地震動そのものではなく, 1自由度系でモデル化した長周期構造物の応答の継続時間を計算した。一般に減衰の小さい長周期構造物の応答をより正確に把握するには長時間の入力地震動の記録が必要となるが, それが満たされない場合には, 地震記録終了後に生じる1自由度系の減衰自由振動を利用して応答継続時間を推定することにした。
- ② 新宿・横浜・大宮の3観測地点の強震記録が応答継続時間を評価するという点からは, 記録時間が短く, 地震記録後の減衰自由振動を利用しても, 応答継続時間を過小評価してしまう可能性が認められた。
- ③ 東京の猿江・辰巳の応答継続時間と地震動に卓越した周期(固有周期)との簡単な関係式を求めた。この関係式で, 地震時に長周期構造物の震動がどの程度続くかを推定できるが, 当関係式の適用条件・精度(重相関係数など)の検討が必要である。
- ④ 十勝沖(地震番号3(表-1)), 宮城県沖(番号2, 5), 紀伊半島沖(番号6, 7)での地震により, 東京(猿江など)では長い応答継続時間が得られた。

- ⑤ 東京(猿江)のK-NETの強震記録から得られた応答継続時間は, 東京(気象庁)での気象庁1倍強震計の数値化記録から計算した応答継続時間とほぼ対応する値となり, K-NET強震記録から応答継続時間を計算することの妥当性が確認できた。

本研究では限られた強震記録から応答継続時間を算出したが, より的確に応答継続時間を計算するためには, 東京および近隣の記録時間長の長い良好な強震記録をより多く見出し, さらに, 検討を加えることが必要である。

謝辞

本研究では, 独立行政法人防災科学技術研究所の運用する強震観測網K-NETの強震記録を利用させて頂いた。さらに, インターネットのホームページに公開された観測点情報なども種々参照させて頂いた。また, 査読者には大変有益なご指摘を多々頂いた。ここに記して, 謝意を表す。

参考文献

- 1) 古村孝志: 関東平野で成長する長周期地震動, JGL, Vol.4, No.2, pp.5-7, 2008.
- 2) 防災科学技術研究所の運用する強震観測網K-NET, <http://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/>
- 3) 防災科学技術研究所F-netにて提供の地震のメカニズム情報, <http://www.fnet.bosai.go.jp/fnet/event/search.php?LANG=ja>
- 4) 太田外氣晴, 座間信作: 巨大地震と大規模構造物, 共立出版, 2005.
- 5) 座間信作, 西晴樹, 廣川幹浩, 山田實, 畑山健: 石油タンクのスロッシングの減衰定数, 消防研究所報告第98号, pp.66-73, 2004.
- 6) Nigam, N.C. and Jennings, P.C.: Calculation of response spectra from strong-motion earthquake records, Bull. of Seismological Society of America, Vol.59, No.2, pp.909-922, 1969.
- 7) 篠泉, 片山恒雄: 気象庁1倍強震計記録による地動の再現性の検討, 第18回地震工学研究発表会講演概要集, 土木学会, pp.69-72, 1985.
- 8) 篠泉, 片山恒雄: 気象庁1倍強震計記録の数値化データ-北米濃, 新潟, 十勝沖(本震, 余震), 日本海中部地震(本震, 余震)-, 土木学会第40回年次学術講演会講演概要集, 第1部, pp.821-822, 1985.
- 9) 宇津徳治, 嶋悦三, 吉井敏尅, 山科健一郎: 地震の事典, 第2版, 朝倉書店, 2001.

(2008年9月2日受付)