

パルス応答スペクトルに基づく断層直近地震動の特性

Evaluation of near-fault ground motions in terms of the pulse response spectrum

堺 淳一*, 川島一彦**

Sakai Jun-ichi, Kawashima Kazuhiko

* 修(工) 東京工業大学大学院 理工学研究科土木工学専攻博士後期課程 (日本学術振興会特別研究員)
(〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1)

** 工博 東京工業大学教授 工学部土木工学科 (同上)

To evaluate the intensity of near-fault ground motions in extreme earthquakes, a response acceleration of single degree of freedom oscillators subjected a pulse is defined here as the pulse response spectrum. It is found from the analysis that a few main pulses dominate the response of structures.

Assuming the pulse ground motion as a sinusoidal wave, response ductility factor of a bilinear restoring force system is evaluated from nonlinear analysis. It is found from the analysis that to assume the acceptable performance in a structure, the yield force level of the structure with the perfect-plastic bilinear restoring force system has to be larger than 0.6g against a pulse having the peak acceleration of 0.8g.

Key Words: Ground motion, Seismic design, Hyogo-ken Nanbu Earthquake, Near field earthquake

1. まえがき

従来、わが国の耐震設計では海洋性大規模地震を想定し、主要動の継続時間が長く、地震動の繰り返し回数が多い、1 g 程度の弾性応答スペクトルを持つ地震動を仮想設計地震力としてきた。一方、兵庫県南部地震においては、主要動の継続時間は 8 秒程度と短く、地震動の繰り返し回数は少ないが、2 g を上回る極めて大きな弾性応答スペクトルを有する地震動が発生した。

断層直近の地震動特性に関しては、1994 年のノースリッジ地震や 1995 年の兵庫県南部地震以後、強震記録に基づいた検討や断層モデルを用いた検討が行われつつあり、こうした検討により、断層直近の構造物の耐震設計には少数(1~2 波)の非常に大きなエネルギーを持つパルス状の波形に対する応答が重要であることが指摘されている。例えば、塩見、佐藤らは震源断層モデルを用いて兵庫県南部地震による強震動地域の最大地震動の分布を推定しており¹⁾、Hall らは、ノースリッジ地震記録の解析から断層直近では、パルスタイプの地震動が卓越し断層平行方向とそれに直交方向の地震動の特性には大きな違いがあること、これが高層建物の耐震性に大きな影響を及ぼすことを指摘している²⁾。また、パルス地震動の加速度を矩形状にモデル化し、構造物の非線形応答を解析している。Somerville らは、震源過程から断層直交方向の地震動により卓越した長周期パルス地震動が生

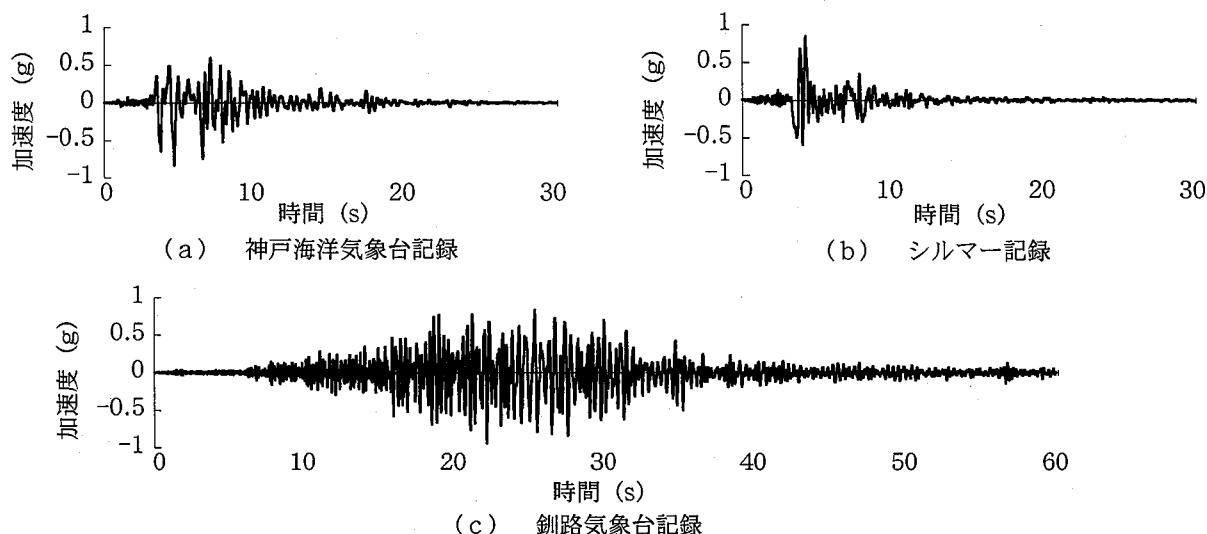
じることを示し、これを強震記録の距離減衰式から明らかにしている³⁾。瀬戸はパークフィールド等カリフォルニアに生じた地震と兵庫県南部地震の比較を示し、断層に近づくほど長周期パルス波が卓越することを示している⁴⁾。また、直下型地震による地震動の構造物に与える影響を明らかにするため、井上らは瞬間入力エネルギーという概念を提案し、エネルギー論的な立場から兵庫県南部地震の特性を検討し⁵⁾、中村らも瞬間エネルギーから最大塑性応答を推定できることを明らかにしている⁶⁾。

平成 8 年に改訂された道路橋示方書⁷⁾では、海洋性大規模地震を対象としたタイプ I 地震動と直下型地震を想定したタイプ II 地震動が地震時保有水平耐力法による耐震設計において分類され、鉄筋コンクリート橋脚の許容塑性率やせん断耐力の評価、液状化強度の評価にこうしたタイプ I とタイプ II 地震動の違いを考慮するという新しい試みが盛り込まれた。タイプ II 地震動としては兵庫県南部地震による地震応答スペクトルの包絡線が用いられたが、断層直近の強い地震動に見舞われた場合には設計地震力をどう考えるのか、また、構造物はどの程度のじん性を有している必要があるかに関しては、今後の検討が必要とされている。

断層直近の地震による強震記録は世界的にもほんの少数しか得られていない。断層直近になる程、長周期パルス地震動が卓越することが明らかにされつつあるが、どれだけ大きなパルス地震動が生じるかが解明されてい

表－1 解析に用いた地震動記録

	神戸海洋気象台記録	シルマー記録	釧路気象台記録
地震	兵庫県南部地震	ノースリッジ地震	釧路沖地震
発生年月日	1995.1.17	1994.1.17	1993.1.15
マグニチュード	7.2 (M_J)	6.7 (M_S)	7.8 (M_J)
震源距離 (km)	21	23	111
観測地点 (方向)	神戸海洋気象台 (NS)	シルマー郡病院駐車場 (NS)	釧路気象台 (EW)
最大加速度 (g)	0.83	0.84	0.94



図－1 解析に用いた地震動の加速度波形

い現状では、構造物の応答の側からどこまでのパルス地震動に対して構造物が耐えられるかを明らかにしておくことが有効である。

このような背景のもとに、本論文では1自由度系の地震応答を用いて、少数のパルスによる応答から兵庫県南部地震による地震動の特性をノースリッジ地震、釧路沖地震による地震動との比較において検討し、さらに、断層直近に生じる地震動をシンプルなパルス波形と仮定して模擬パルス地震動を定義し、それによる線形応答解析および非線形応答解析を行った結果を報告するものである。

2. 繰り返し回数を考慮した地震応答スペクトル

内陸直下型地震動の特性を明らかにするため、まず、繰り返し回数を考慮した地震応答スペクトルを用いて兵庫県南部地震による地震動を解析した。繰り返し回数を考慮した地震応答スペクトルとは固有周期 T 、減衰定数 h の1自由度系に生じる加速度応答において、それ以上のレベルの加速度応答が N 回生じるような加速度応答を $S_A(T, h, N)$ と定義したものである⁹⁾。したがって、一般にいう加速度応答スペクトル $S_A(T, h)$ は $S_A(T, h, 1)$ に相当する。

解析に用いたのは、表－1に示す兵庫県南部地震による神戸海洋気象台のNS成分の記録⁹⁾（以下、神戸海洋気象台記録と呼ぶ）であり、比較のために内陸直下型地震にあたる1994年ノースリッジ地震によるシルマー郡病院駐車場のNS成分の記録¹⁰⁾（以下、シルマー記録と呼ぶ）、および海洋性大規模地震にあたる1993年釧路沖地震による釧路気象台のEW成分の記録¹¹⁾も解析した。図－1はこれらの加速度波形を示したものである。これらの記録に対して、 $S_A(T, h, N)$ を計算した結果が、図－2である。ここで、減衰定数は $h=0.05$ 、繰り返し回数は $N=1, 10, 20$ としている。

この結果から、卓越周期に相当する固有周期0.35秒の応答に着目すると、神戸海洋気象台記録では、繰り返し回数 $N=1$ では2.7 gであったものが、 $N=10$ で1.7 g、 $N=20$ で1.1 gとなり、これらは $N=1$ の時の値のそれぞれ62%、41%に減少する。また、シルマー記録では、卓越周期に相当する固有周期0.34秒の応答は、繰り返し回数 $N=1$ では2.8 gであるが、 $N=10$ では1.1 g、 $N=20$ では0.8 gとなり、それらは $N=1$ の時の値のそれぞれ42%、30%に相当する。これに対して、釧路気象台記録では、卓越周期に相当する固有周期0.31秒の応答に着目すると、繰り返し回数 $N=1$ で4.7 g、 $N=10$ で3.6 g、 $N=20$ で2.8 gであり、それらは $N=1$ での値

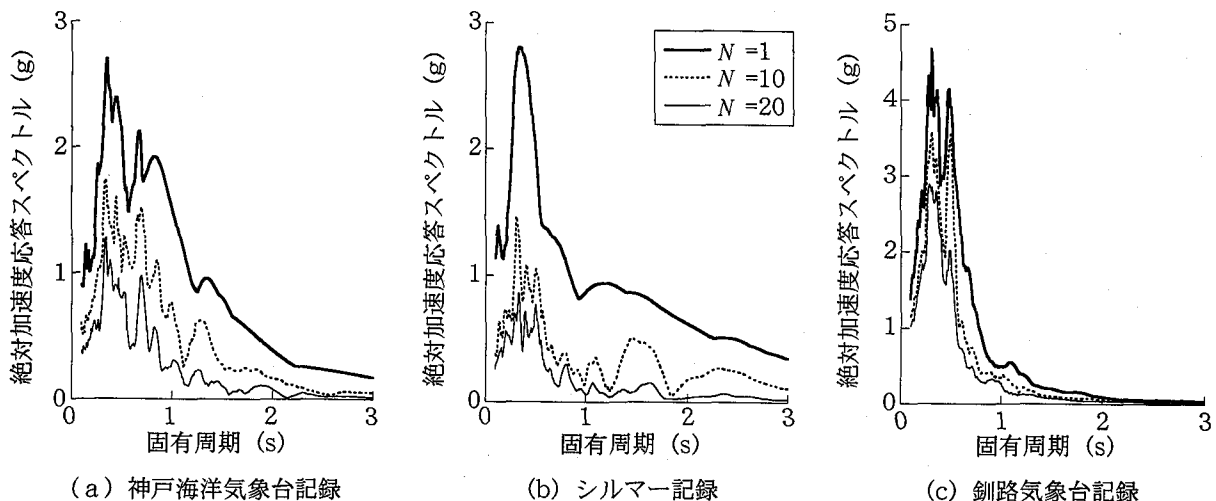


図-2 繰り返し回数を考慮した加速度応答スペクトル $S_A(T, 0.05, N)$

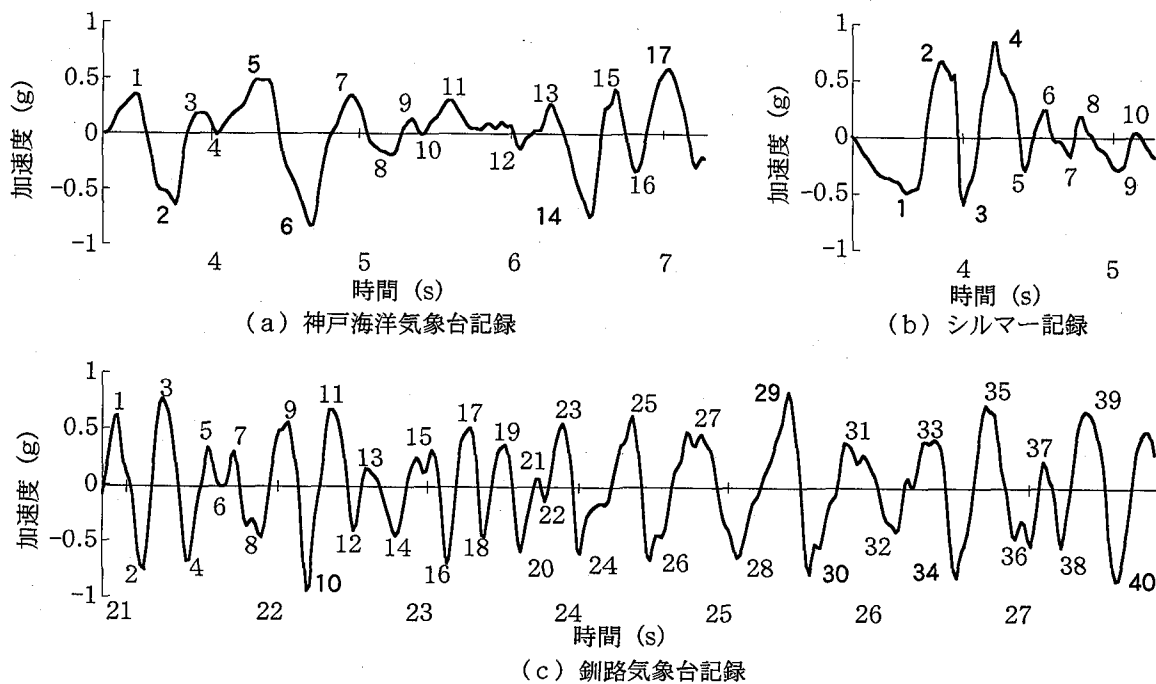


図-3 各地震動の主要動

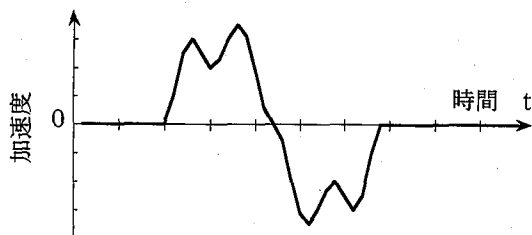


図-4 パルス地震動の定義

のそれぞれ77%, 60%となる。

釧路気象台記録では、 N が増加しても $S_A(T, 0.05, N)$ の最大値はそれ程低下しないのに対して、神戸海洋気象台記録、シルマー記録では、繰り返し回数 N に伴う加速度応答の低下が大きい。すなわち、神戸海洋気象台記録

およびシルマー記録は、釧路気象台記録に比較して、地震動の継続時間が短く、少数の特定のパルス群が応答に寄与している。

3. パルス地震動とその応答スペクトル

地震動の波形のどの部分が構造物の応答に寄与したかを調べるために個々のパルスに対する応答を求めることにした¹²⁾。図-3は、神戸海洋気象台記録、シルマー記録、釧路気象台記録の主要動部分を示したものである。各パルスには番号を打ってあるが、これはゼロ線を境にある時刻でゼロ線を切ってから次にゼロ線を切るまでを、1つのパルスとカウントしたものである。主要なパルス

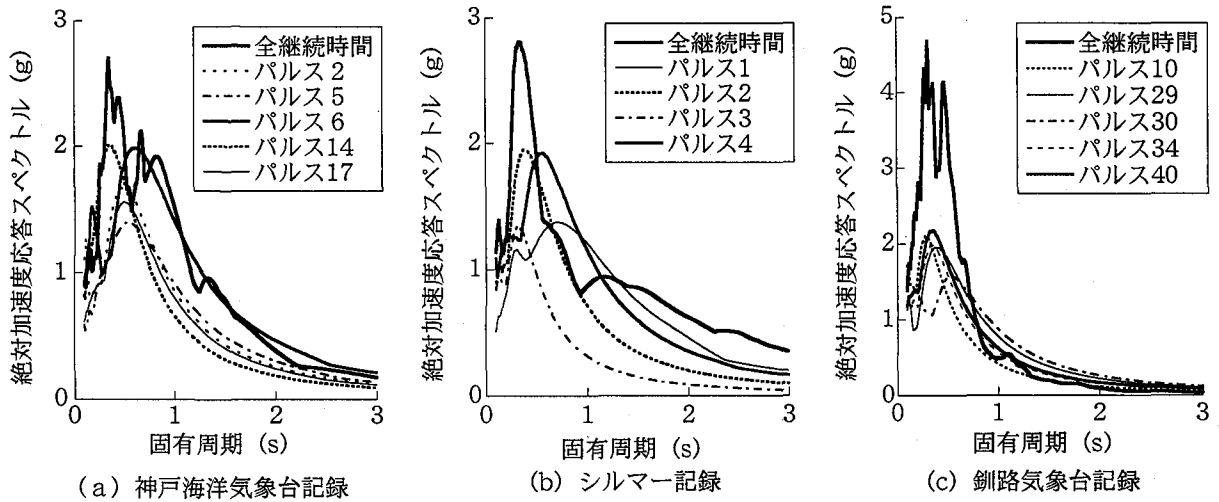


図-5 パルス応答スペクトル $P_A(T, 0.05)$

に対して応答スペクトルを計算するが、片側だけの加速度パルスを用いることは、地震動速度に残留値が生じることを仮定することになる。従って、ここでは図-4に示すように、あるパルスの後にこれと反対符号を持つパルスが続くと仮定してこれをパルス地震動と定義し、さらにパルス地震動に対する加速度応答スペクトルを、パルス加速度応答スペクトル $P_A(T, h)$ と定義することとする。

解析に用いたパルスは、それぞれの地震動において加速度が大きく継続時間が長く、応答に大きな影響を与えるものを選んだ。神戸海洋気象台記録ではパルス 2, 5, 6, 14, 17, シルマー記録ではパルス 1, 2, 3, 4, 釧路気象台記録ではパルス 10, 29, 30, 34, 40 である。

図-5 は、主要なパルスに対する P_A を求めた結果である。減衰定数は 0.05 としている。これによれば、神戸海洋気象台記録では、パルス 6 とパルス 14 の P_A は、それぞれ固有周期 0.62 秒および 0.34 秒でいずれも 2.0 g の最大値を与える。これらは地震動の全継続時間から計算される S_A の最大値 2.7 g のともに 74% の大きさである。また、パルス 14 とパルス 6 を比較すると、パルス 14 の方が卓越周期が短い。すなわち、先行するパルス 6 との共振によって構造物に損傷が生じて固有周期が伸びた結果、後続のパルス 14 との共振で応答が大きくなるといった状態にはなりにくい地震動である。

シルマー記録においても同様の傾向があり、パルス 2 とパルス 4 の P_A が他のパルスと比べて圧倒的に大きい。釧路気象台記録では、パルス 10 とパルス 40 の P_A の値が大きい。こうしたパルス地震動による P_A は最大でも 2 g 程度であり、地震動の全継続時間から計算される S_A の最大値 4.7 g の 45% 程度に過ぎない。したがって、釧路気象台記録では応答スペクトルに及ぼすひとつひとつのパルスの寄与度は小さい。

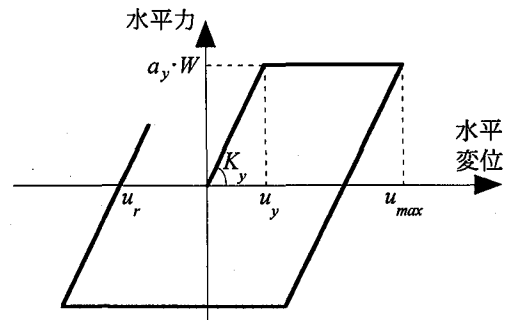


図-6 完全弾塑性バイリニア型モデルの定義

4. パルス地震動に対する非線形応答

線形応答において寄与度が最も大きい神戸海洋気象台記録のパルス 6 に対して、非線形 1 自由度系の地震応答を求めた。比較のためにシルマー記録のパルス 4, 釧路気象台記録のパルス 10 についても解析した。

解析を簡単にするため、図-6 に示す完全弾塑性バイリニア型の履歴特性を仮定した。ここで、履歴減衰以外に逸散減衰等によるエネルギー吸収を考慮して、減衰定数は 0.05 としている。また、質点の重量 W は 9.8N (1kgf) とした。解析においては、降伏剛性 K_y (初期剛性) から次式を用いて求められる固有周期 T_y (以下、降伏周期と呼ぶ) と 1 自由度系の初期剛性が 2 次剛性に変化する時の加速度 a_y (以下、降伏加速度と呼ぶ) をパラメータとし、 T_y は 0.1 秒～3.0 秒まで、 a_y は 0.2 g ～1.0 g の範囲で変化させた。

$$T_y = 2\pi \sqrt{\frac{W}{g K_y}} \quad (1)$$

ここで、 g は重力加速度である。

応答量の大きさを表す指標として、1 自由度系の応答

塑性率 μ を次のように定義した。

$$\mu = \frac{|u_{\max}|}{u_y} \quad (2)$$

ここで、 u_y は降伏変位、 $|u_{\max}|$ は最大応答変位である。

このようにして、 T_y を1.0秒、 a_y を0.4 gとして、神戸海洋気象台記録のパルス6を入力した場合の応答を求めた例を図-7に示す。最大応答変位 $|u_{\max}|$ は0.24mであり、応答塑性率 μ は2.5である。また、加振終了後には0.07mの残留変位 u_r が生じている。兵庫県南部地震後、曲げ損傷を受けた阪神高速道路の約80基の橋脚は残留変位が大きく、もとの位置に引き戻すことができないため、撤去、新設された。従来、耐震設計においては最大応答にばかり関心が払われてきたが、このことは地震後の使用性や復旧を考える上では、残留変位も重要であることを示している¹³⁾。

ここで、残留変位 u_r の大きさを評価するため、これを降伏変位 u_y で無次元化して残留変位比 r_r を次のように定義する。

$$r_r = \frac{|u_r|}{u_y} \quad (3)$$

これによると、残留変位比 r_r は0.74である。

以上のような解析結果から、神戸海洋気象台記録のパルス6を入力した場合について降伏周期 T_y と降伏加速度 a_y をパラメーターにして最大応答加速度、応答塑性率 μ 、残留変位比 r_r を求めた結果が図-8である。

降伏加速度 $a_y=0.2$ gの場合には、降伏周期 T_y が1.1秒までは応答塑性率 μ は5を、また残留変位比 r_r は降伏周期 T_y が0.22秒以下と0.46~0.56秒にかけて2を超えている。現在、一般に許容応力度の余裕や2次部材の効果を見込むと多くの橋梁構造物では0.4 g程度の降伏加速度 a_y が見込まれていると考えられるが、 $a_y=0.4$ gの

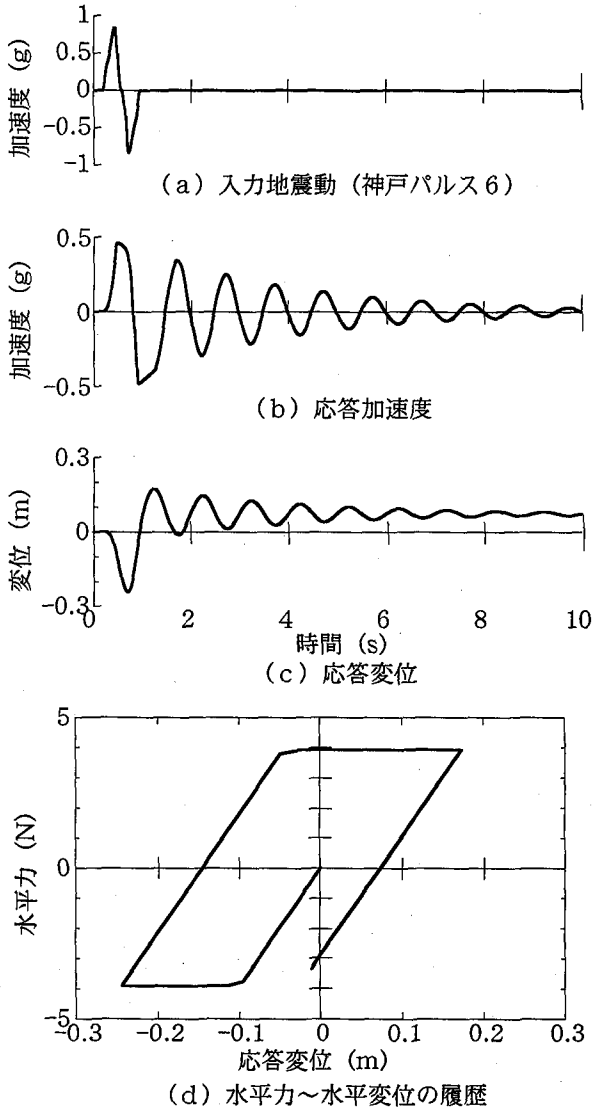


図-7 非線形1自由度系の地震応答
(神戸海洋気象台記録のパルス6を入力した場合)

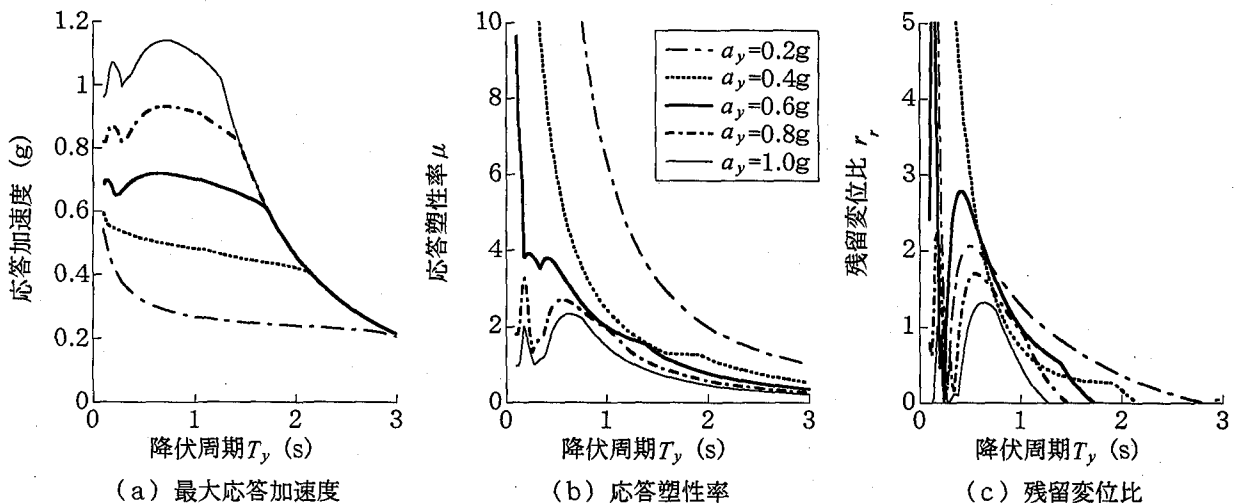


図-8 神戸海洋気象台記録のパルス6を入力した場合の応答

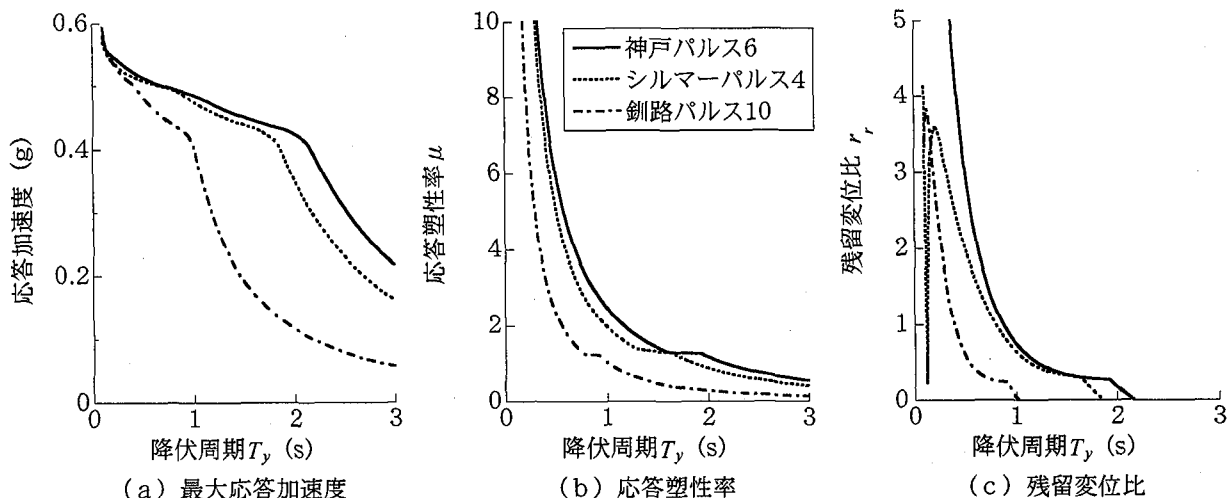


図-9 降伏加速度 $a_y=0.4g$ とした場合の応答値の比較

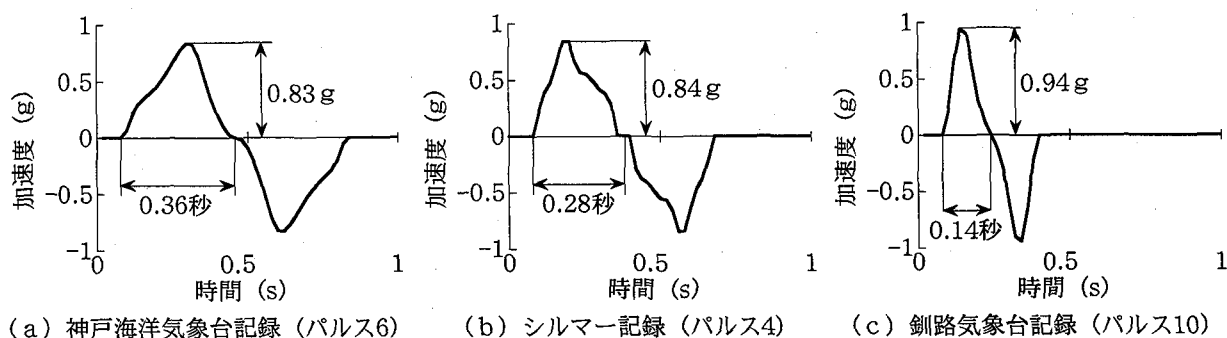


図-10 パルス継続時間

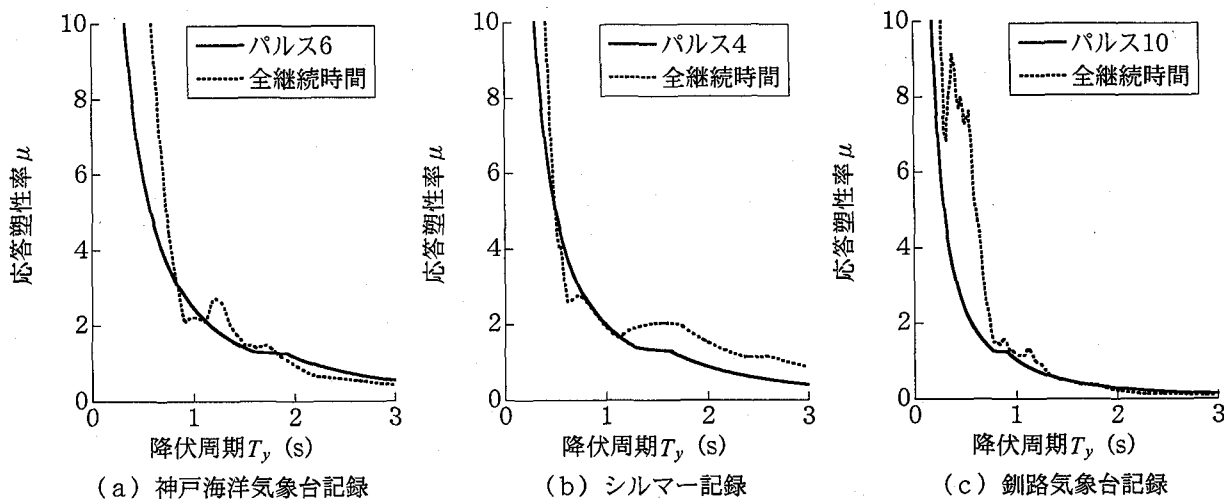


図-11 パルス地震動と地震動全継続時間の応答塑性率 μ の比較 ($a_y=0.4g$ とした場合)

場合をみると、降伏周期 T_y が0.6秒以下では応答塑性率 μ は5を超え、残留変位比 r_r も2以上と大きな値になる。降伏加速度 a_y を0.6 g以上にすれば、降伏周期 T_y が0.2秒以上であれば応答塑性率 μ は5以下に収まるが、降伏周期 T_y が0.3~0.6秒にかけて残留変位比 r_r が2を上回る応答が生じている。しかし降伏加速度 a_y を0.8 g以上にすれば、解析の対象とした降伏周期 T_y の範囲で応答塑性率 μ は5以下に、残留変位比 r_r は2以下にそれぞれ収ま

る。以上より、応答塑性率から評価すれば、降伏加速度 a_y を0.6 g程度確保しないと神戸海洋気象台記録に対して事実上耐震設計が困難といえることができる。ただし、ここでは完全弾塑性バイリニア系に対する検討結果を示したが、残留変位は剛性比（1次剛性に対する2次剛性の比）によって大きく異なることに注意しなければならない¹³⁾。

図-9に降伏加速度 a_y を0.4 gとして神戸海洋気象台

表-2 解析に用いた模擬パルス地震動の最大加速度および最大速度

	$T_G=1.0$ 秒		$T_G=2.0$ 秒	
	最大加速度 a_{max} (g)	最大速度 v_{max} (m/s)	最大加速度 a_{max} (g)	最大速度 v_{max} (m/s)
$D=1.0\text{m}$	0.64	2.0	0.16	1.0
$D=2.0\text{m}$	1.28	4.0	0.32	2.0
$D=3.0\text{m}$	1.92	6.0	0.48	3.0

記録のパルス6, シルマー記録のパルス4, 釧路気象台記録のパルス10を入力した場合の最大応答加速度, 応答塑性率 μ , 残留変位比 r_r の比較を示す。シルマー記録のパルス4では降伏周期 T_y が0.1秒~1.8秒で, 応答塑性率 μ は神戸海洋気象台記録のパルス6の80~100%となり, 神戸海洋気象台記録のパルス6の応答よりも一回り小さい応答を与える。一方, 釧路気象台記録のパルス10では降伏周期 T_y が0.1~3.0秒で, 応答塑性率 μ は神戸海洋気象台記録のパルス6の55%以下の値となる。また, 降伏周期 T_y が1.0秒以上になると構造物は非線形化しない。

ここで, パルスの継続時間をパルスがゼロ線を横切った瞬間から再びゼロ線を横切るまでと定義すると, 図-10に示すように神戸海洋気象台記録のパルス6が0.36秒, シルマー記録のパルス4が0.28秒, 釧路気象台記録のパルス10が0.14秒である。それぞれのパルスの最大加速度が, 神戸海洋気象台記録のパルス6で0.83g, シルマー記録のパルス4で0.84g, 釧路気象台記録のパルス10で0.94gとほぼ同程度であることから, パルス継続時間が非線形応答に大きな影響を与えている。

図-11は, 降伏加速度 a_y を0.4gとして, 地震動の全継続時間を入力する場合と1つのパルスを入力する場合の応答塑性率 μ の比較を, 神戸海洋気象台記録のパルス6と神戸海洋気象台記録の比較, シルマー記録のパルス4とシルマー記録の比較および釧路気象台記録のパルス10と釧路気象台記録の比較を例として, それぞれ示したものである。ここで, 地震動の全継続時間を入力する場合の応答塑性率 μ に対する1つのパルスを入力する場合の応答塑性率 μ の比が70%を上回ることをひとつの目安として考える。神戸海洋気象台記録の比較では降伏周期 T_y が0.7秒~1.2秒で, 地震動の全継続時間を入力する場合に対する1つのパルスを入力する場合の応答塑性率 μ の比が70%以上となり, 降伏周期 T_y が0.9秒では130%となる。シルマー記録の比較では, 降伏周期 T_y が0.45秒~1.3秒で, 応答塑性率 μ の比が70%を上回る。釧路気象台記録のパルス10では上述したように降伏周期 T_y が1.0秒以上になると構造物は非線形化しないため, ここでは降伏周期 T_y が1.0秒以下で比較すると, 降伏周期 T_y が0.8秒以上で応答塑性率 μ の比が70%を上回るが100%を上回ることではない。以上のことから, 非線形応答に関しても神戸海洋気象台記録やシルマー記録のほうが釧路気象台記録よりも, その応答塑性率 μ に与えるひとつのパルスの寄与度大きい。

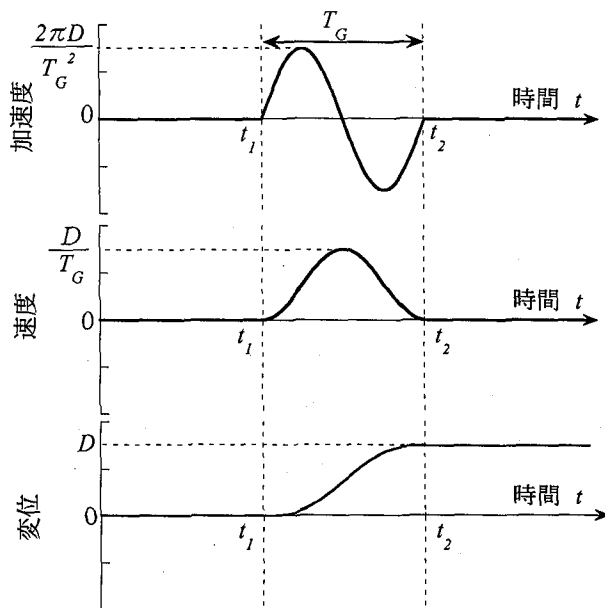
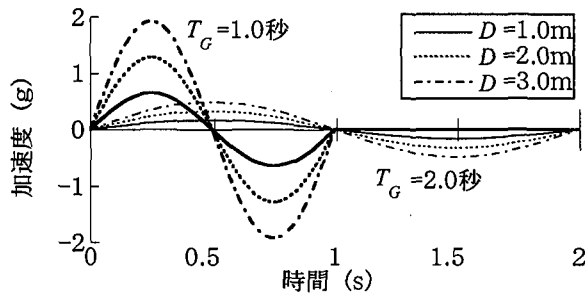


図-12 断層直近の地震動のモデル化

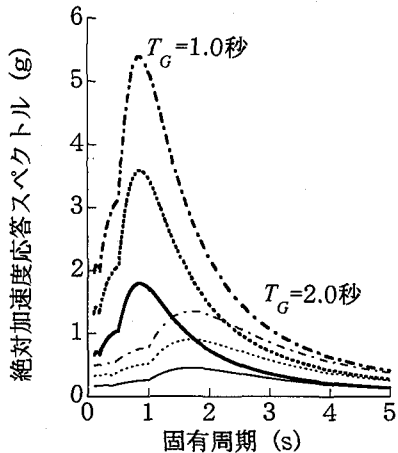
5. 模擬パルス地震動とその応答

震源近傍や断層直近における地震動に関しては断層モデルを用いていろいろな検討が行われている。この結果, 断層直近になる程, 地震動は単一のパルスに近づき, また, Directivity が断層近傍の地震動に大きな影響を与えることが指摘されている。これについては, 今後さらにいろいろな情報が与えられるようになって考えられるが, 前章までのように, 断層近傍に存在する構造物の地震応答および耐震性能がごく少数のパルス地震動によって支配されるのであれば, 究極にはパルス地震応答スペクトルが構造物の耐震設計に大きな影響を与えることになる。このようなことから, ここでは簡単のため, 断層直近での地震動をシンプルパルス波形として与えられるものとし, パルス応答スペクトル P_A を求めることとした。いま, 断層直近の地震動の加速度 $a(t)$ を図-12のように与えると, 次のように表すことができる。

$$a(t) = \begin{cases} 0 & t \leq t_1 \\ \frac{2\pi D}{T_G^2} \sin\left(\frac{2\pi}{T_G}(t-t_1)\right) & t_1 \leq t \leq t_2 \\ 0 & t \geq t_2 \end{cases} \quad (4)$$



(a) 模擬パルス地震動加速度波形



(b) 模擬パルス地震動に対する $P_A(T, 0.05)$

図-13 解析に用いた模擬パルス地震動

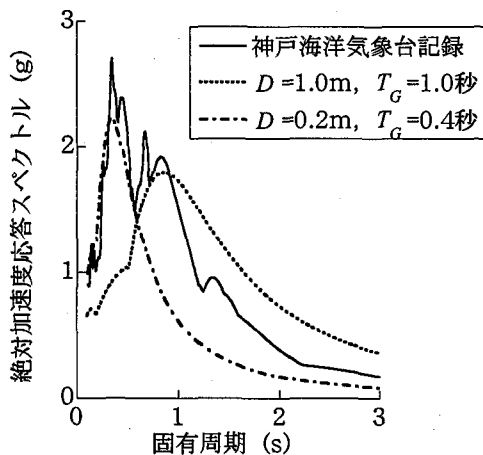
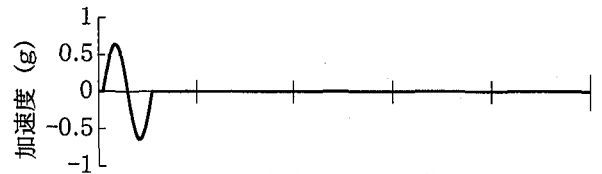


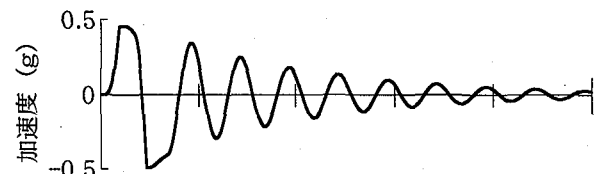
図-14 神戸海洋気象台記録と模擬パルス地震動の加速度応答スペクトルによる比較 ($h=0.05$)

ここで、 D = 地震動の変位、 T_G = 地震動の周期 ($T_G = t_1 - t_2$)、 t_1 、 t_2 = 地震動の開始時間、終了時間である。このようにすると、地震動の速度 $v(t)$ 、変位 $d(t)$ は次のようになる。

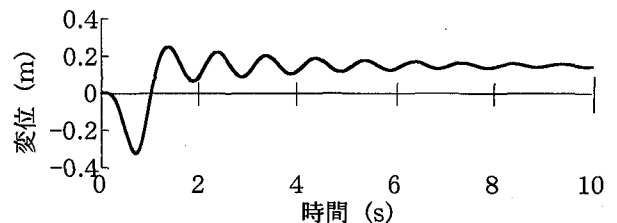
$$v(t) = \begin{cases} 0 & t \leq t_1 \\ \frac{D}{T_G} \left\{ 1 - \cos\left(\frac{2\pi}{T_G}(t - t_1)\right) \right\} & t_1 \leq t \leq t_2 \\ 0 & t \geq t_2 \end{cases} \quad (5)$$



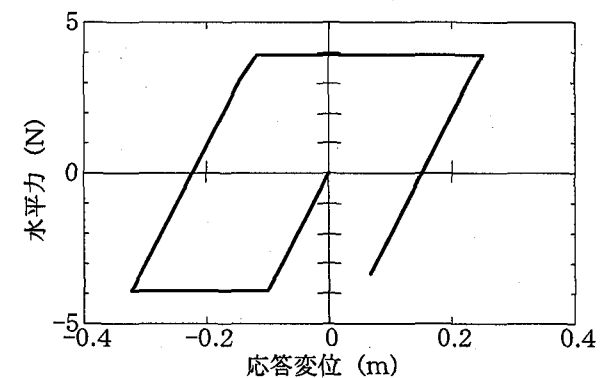
(a) 入力地震動



(b) 応答加速度



(c) 応答変位



(d) 水平力～水平変位の履歴

図-15 非線形1自由度系の地震応答 ($D=1.0\text{m}$ 、 $T_G=1.0\text{秒}$ の模擬パルス地震動を入力した場合)

$$d(t) = \begin{cases} 0 & t \leq t_1 \\ \frac{D}{T_G}(t - t_1) - \frac{D}{2\pi} \sin\left(\frac{2\pi}{T_G}(t - t_1)\right) & t_1 \leq t \leq t_2 \\ D & t \geq t_2 \end{cases} \quad (6)$$

このように仮定すると、

$$a_{\max} = \frac{2\pi D}{T_G^2} \quad (7)$$

$$v_{\max} = \frac{2D}{T_G} \quad (8)$$

であるから、主要な D と T_G から、 $a_{\max}$ 、 $v_{\max}$ を求めると表-2 のようになる。

図-13 は、主要な D と T_G から求められる模擬パルス地震動の加速度波形 $a(t)$ とこれから求められるパルス応

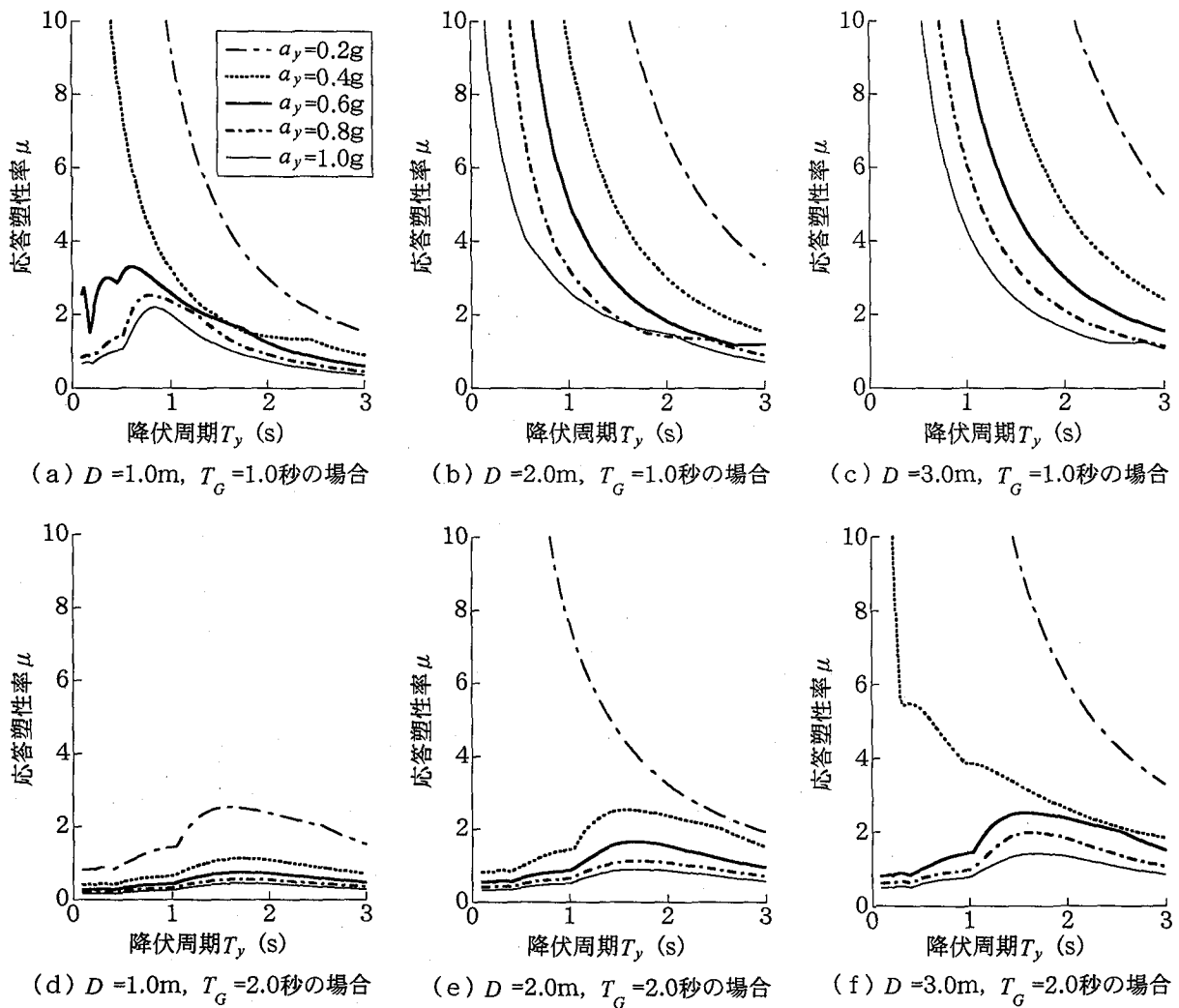


図-16 模擬パルス地震動による応答塑性率 μ の比較

答スペクトル $P_A(T, h)$ を示したものである。減衰定数は $h=0.05$ としている。式(4)からもわかるように、地震動の周期 T_G は地震動の変位 D 以上にパルス応答スペクトル P_A に顕著な影響を与える。地震動の周期 T_G の約0.9倍に相当する固有周期において、構造物の応答は最も大きくなる。

また、図-14に示すように $D=1.0\text{m}$ 、 $T_G=1.0\text{秒}$ とすれば、固有周期0.8~0.9秒付近での $P_A(T, 0.05)$ は1.8g程度となり、神戸海洋気象台記録の加速度応答スペクトル $S_A(T, 0.05)$ とよく似た値となる。同様に、 $D=0.2\text{m}$ 、 $T_G=0.4\text{秒}$ とすれば固有周期0.3~0.35秒付近の $P_A(T, 0.05)$ は神戸海洋気象台記録の $S_A(T, 0.05)$ とよく似た値となる。

図-15は、 $D=1.0\text{m}$ 、 $T_G=1.0\text{秒}$ の模擬パルス地震動($a_{max}=0.64\text{g}$)に対する降伏周期 $T_y=1.0\text{秒}$ 、降伏加速度 $a_y=0.4\text{g}$ の完全弾塑性バイリニア型非線形系の応答を求めた結果である。最大応答変位 $|u_{max}|$ は0.32m、残留変位は u_r は0.15mとなり、これは $\mu=3.2$ 、 $r_r=1.5$ に相当する。

以上のような解析を降伏周期 T_y と降伏加速度 a_y を変化させ、地震動の変位 D 、地震動の周期 T_G をいろいろ組み合わせた模擬パルス地震動に対して行つて、応答塑性率 μ を求めた結果が図-16である。

$D=1.0\text{m}$ 、 $T_G=1.0\text{秒}$ の模擬パルス地震動に対する応答では、降伏加速度 $a_y=0.4\text{g}$ とすると降伏周期 T_y が0.7秒以下では応答塑性率 μ は5を上回るが、降伏加速度 $a_y=0.6\text{g}$ とすれば応答塑性率 μ は5以下に収まる。しかし、 $D=2.0\text{m}$ 、 $T_G=1.0\text{秒}$ の模擬パルス地震動になると降伏加速度 $a_y=0.6\text{g}$ では降伏周期 T_y が1.0秒以下で応答塑性率 μ は5を超える大きな応答が出る。さらに、 $D=3.0\text{m}$ 、 $T_G=1.0\text{秒}$ となると、模擬パルス地震動の最大加速度 a_{max} は1.92gと神戸海洋気象台記録の2倍以上の加速度を持つ強烈な地震動となり、これが作用した場合には、降伏加速度 $a_y=0.6\text{g}$ 、降伏周期 $T_y=1.0\text{秒}$ で応答塑性率 μ は9.4に達する。

また、 $D=3.0\text{m}$ 、 $T_G=2.0\text{秒}$ の模擬パルス地震動に対しては、降伏加速度 $a_y=0.4\text{g}$ を確保すれば降伏周期 T_y が0.6秒以上で応答塑性率 μ は5以下に収まる。

以上のことから、模擬パルス地震動の最大加速度 a_{max} が0.7 g程度であれば、降伏加速度 a_y を0.6 g程度確保すると応答塑性率5以下に収まり、安全性が確保されるといえる。しかし、 $D=2.0$ m、 $T_G=1.0$ 秒の模擬パルス地震動が作用すると、図-16 (b) から降伏加速度 a_y を1.0 gとしても、降伏周期 T_y が0.4 秒以下では応答塑性率5を上回るため、現在の耐震技術では設計が困難であると推定される。

6. 結論

兵庫県南部地震で生じた地震動の特性を検討するために、1自由度系の線形および非線形地震応答を用いて、降伏加速度と最大応答の関係を検討した。さらに模擬パルス地震動を定義して、同様の解析を行い、将来発生するかもしれない断層直近における地震動に対する応答特性を検討した。本解析で明らかとなった事項をまとめると、以下ようになる。

(1) 神戸海洋気象台記録およびシルマー記録のような継続時間の短いM7クラスの直下型地震による地震動では、主要な1つのパルスによっても全継続時間に匹敵する線形加速度応答スペクトルおよび非線形応答塑性率を与える。一方、釧路気象台記録のような継続時間の長い海洋性大規模地震による地震動では、ひとつひとつのパルスの寄与度は、直下型地震による地震動に比較して小さい。

(2) パルス地震動に対する非線形応答では、ほぼ同じ加速度をもったパルスならば、パルス継続時間が、構造物の最大応答変位に大きな影響を与える。

(3) 断層直近の地震動加速度がパルスのとなり、式

(4) のような形で表されるとすれば、地震動の周期 T_G が構造物の地震応答に大きな影響を与え、 $T_G \times 0.9$ 程度の固有周期を持つ構造物の地震応答が大きくなる。

(4) 神戸海洋気象台記録のパルス6および上述した式

(4) の模擬パルス地震動を入力として、完全弾塑性バイリニア型履歴特性を有し様々な降伏周期 T_y をもつ構造物に生じる応答塑性率 μ を求めた結果から、入力パルス地震動の最大加速度 a_{max} が0.8 g程度であれば、降伏加速度 a_y を0.6 g程度確保することで、耐震上、安全性が確保される。しかし、 $D=2.0$ m、 $T_G=1.0$ 秒という大きな模擬パルス地震動($a_{max}=1.28$ g)が作用すると、現状の耐震技術では設計が困難となる場合が出てくる。

参考文献

- 1) 塩見祐二, 佐藤忠信: 兵庫県南部地震の強震域における最大地動分布の推定, 土木学会第51回年次学術講演会講演概要集, 1-B, pp. 482-483, 1996
- 2) Hall, J. F., Heaton, T. H., Halling, M. W. and Wald, D. J.: Near-Source Ground Motion and its Effects on Flexible Buildings, Earthquake Spectra, Vol. 11, No. 4, pp. 569-605, 1995
- 3) Somerville, P. G., Smith, N. F. and Graves, R. W.: Modification of Empirical Strong Motion Attenuation Relations to Include the Amplitude and Duration Effects of Rupture Directivity, Seismological Research Letters, Vol. 68.1, pp. 199-222, 1997
- 4) 瀧根一起: カリフォルニアの被害地震と兵庫県南部地震, 科学, Vol. 66, No. 2, pp. 93-97, 1996
- 5) 井上範夫, 堀則男: 直下型地震のエネルギー的な破壊力特性に関する一考察, 第1回都市直下型地震災害総合シンポジウム論文集, pp. 107-110, 1996
- 6) 中村友紀子, 壁谷澤寿海: 直下型地震による最大塑性応答変位に関する研究, 第1回都市直下型地震災害総合シンポジウム論文集, pp. 111-114, 1996
- 7) 社団法人道路協会: 道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編, 1996
- 8) Kawashima, K. and Aizawa, K.: Earthquake Response Spectra Taking Account of Number of Response Cycles, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 14, pp. 185-197, 1986
- 9) 財団法人日本気象協会: 気象庁 87 型電磁式強震計データ, 平成 7 年兵庫県南部地震神戸海洋気象台記録, 1995
- 10) Shakal, A. et al: CSMIP Strong Motion Records from the Northridge, California Earthquake of 17 January 1994, CDMG, 1994
- 11) 財団法人日本気象協会: 気象庁 87 型電磁式強震計データ, 平成 5 年釧路沖地震釧路気象台記録, 1993
- 12) 堺淳一, 川島一彦, 武村浩志: 試設計に基づく耐震技術基準の変遷に伴う RC 橋脚の耐震性向上度の検討, 構造工学論文集, Vol. 43A, pp. 833-842, 1997
- 13) 川島一彦, MacRae, G. A., 星隈順一, 長屋和宏: 残留変位応答スペクトルの提案とその適用, 土木学会論文集, No. 501/ I-29, pp. 183-192, 1994

(1998 年 9 月 18 日受付)