

パルス地震動とその応答から見た断層直近地震動の特性

堺淳一¹・川島一彦²

¹学生会員 修（工） 東京工業大学大学院博士後期課程 理工学研究科土木工学専攻
（〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1）

²フェロー会員 工博 東京工業大学教授 工学部土木工学科 （同上）

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、各種構造物に激甚な被害が生じた。

著者らは、兵庫県南部地震の地震動のどのような成分が構造物の応答に影響を与えるかを検討するために、パルス地震動を定義し、その応答スペクトルおよび非線形1自由度系の地震応答を求め、それを1993年の釧路沖地震の地震動記録、1994年のノースリッジ地震の地震動記録との比較において検討した^{1) 2)}。その結果、兵庫県南部地震やノースリッジ地震のようなM7クラスの直下型地震動では、主要な3～4つのパルスが構造物の応答に対して極めて大きく寄与することが明らかになった。

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ない現状では、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。

本文は、このような背景のもと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. 模擬パルス地震動の定義

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。このことから、本研究では簡単のため、断層直近での地震動をシンプルなパルス波形として与えられるものとし、その応答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-1のように与えると、次のように表すことができる。

$$a(t) = \begin{cases} 0 & t \leq t_1 \\ \frac{2\pi D}{T_F^2} \sin\left(\frac{2\pi}{T_F} t\right) & t_1 \leq t \leq t_2 \\ 0 & t \geq t_2 \end{cases} \quad (1)$$

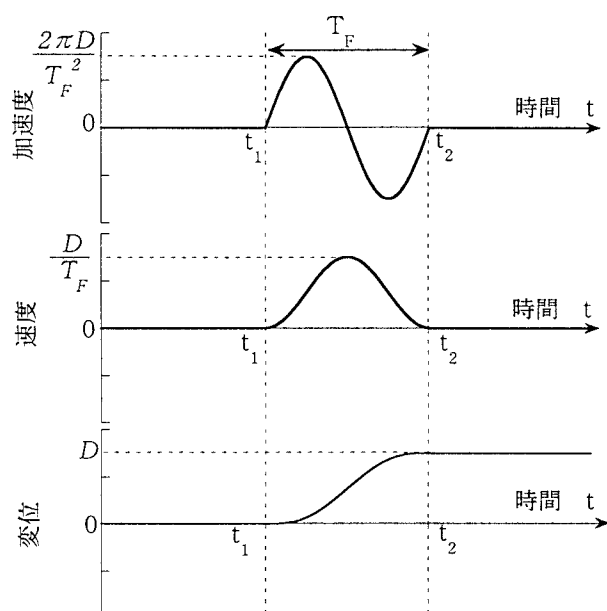
ここで、 D = 断層の変位、 T_F = 断層の周期（ $T_F = t_2 - t_1$ ）、 t_1 、 t_2 = 地震動の開始時間、終了時間である。ここで、 t_1 、 t_2 は断層の破壊の開始時間と終了時間に密接な関係がある。このようにすると、地震動の速度 $v(t)$ 、変位 $d(t)$ は次のようになる。

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

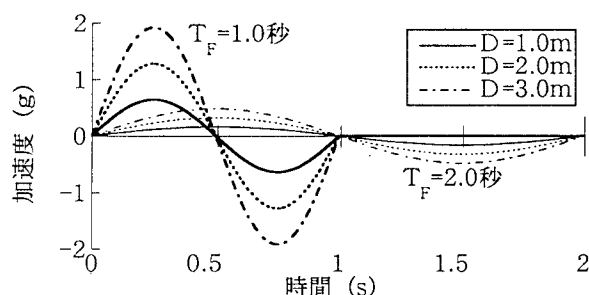
$$d(t) = \begin{cases} 0 & t \leq t_1 \\ \frac{D}{T_F} (t - t_1) - \frac{D}{2\pi} \sin\left(\frac{2\pi}{T_F} t\right) & t_1 \leq t \leq t_2 \\ D & t \geq t_2 \end{cases} \quad (3)$$

表－１ 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

	$T_F=1.0$ 秒		$T_F=2.0$ 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



図－１ 断層直近の地震動の特徴



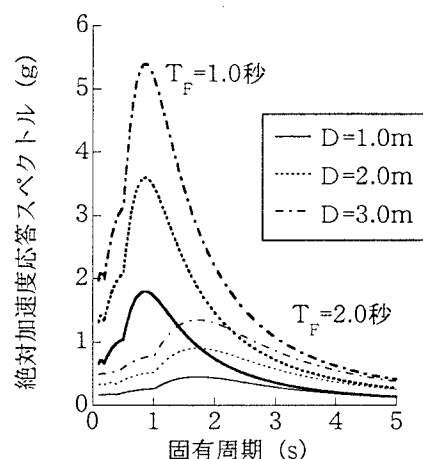
図－２ 模擬パルス地震動加速度

このように仮定すると、

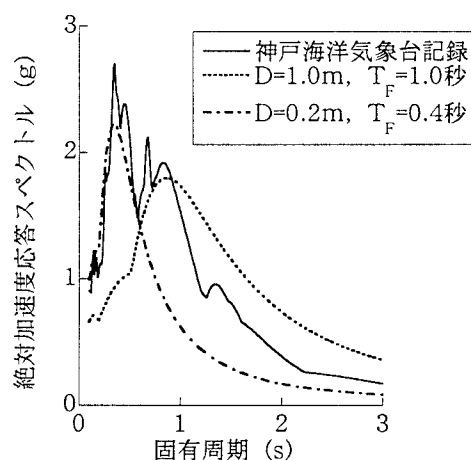
$$a_{max} = \frac{2\pi D}{T_F^2} \quad (4)$$

$$v_{max} = \frac{2D}{T_F} \quad (5)$$

であるから、主要な D と T_F から、 a_{max} 、 v_{max} を求めると表－１のようになる。また、図－２は、主要な D と T_F から求められる模擬パルス地震動の加速度波形 $a(t)$ を示したものである。



図－３ 模擬パルス地震動に対する $P_A(T, 0.05)$



図－４ 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 ($h=0.05$)

３．模擬パルス地震動に対する応答スペクトル

図－３は、主要な模擬パルス地震動に対する応答スペクトルを求めた結果である。減衰定数は $h=0.05$ としている。ここで、パルス地震動に対する加速度応答スペクトルをパルス応答スペクトル $P_A(T, h)$ と定義する。これによれば、 $D=1.0$ m、 $T_F=1.0$ 秒の模擬パルス地震動に対する $P_A(T, 0.05)$ は、固有周期 0.87 秒で 1.8g の最大値となる。また、 $D=3.0$ m、 $T_F=1.0$ 秒の $P_A(T, 0.05)$ の最大値は、

固有周期0.87秒で5.4gもの大きな値となる。一方、 $T_F=2.0$ 秒の場合は $D=3.0$ mとしても $P_A(T,0.05)$ の最大値は、固有周期1.73秒で1.35gである。以上から、周期 T_F 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こと、周期 T_F は断層の変位 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ことが分かる。

また、図-4に示すように $D=1.0$ m、 $T_F=1.0$ 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、 $D=0.2$ m、 $T_F=0.4$ 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。すなわち、兵庫県南部地震のような断層直近地震の地震動は、少数の主要なパルスによって表すことができる。

4. 模擬パルス地震動に対する非線形応答

ここでは、模擬パルス地震動に対する非線形応答を求める。解析を簡単にするため、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。解析においては、降伏剛性（初期剛性）から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0.2g~1.0gの範囲で変化させた。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。

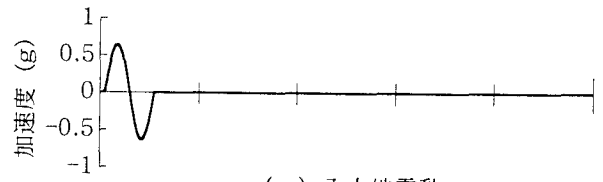
$$\mu = \frac{u_{max}}{u_y} \quad (6)$$

ここで、 u_y は降伏変位、 u_{max} は最大応答変位である。

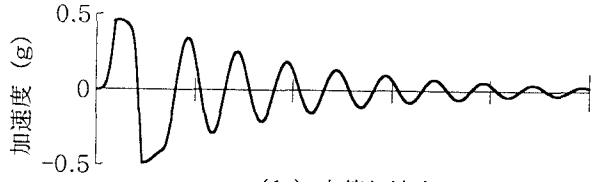
図-5は、 $D=1.0$ m、 $T_F=1.0$ 秒の模擬パルス地震動に対する降伏周期 $T_Y=1.0$ 秒、降伏加速度 $a_Y=0.4$ gの完全弾塑性バイリニア型非線形系の応答を求めた結果である。最大応答変位 u_{max} は0.32mであり、応答塑性率 μ は3.2である。また、加振終了後には0.15mの残留変位 u_r が生じている。ここで、残留変位 u_r の大きさを評価するため、これを降伏変位 u_y で無次元化して残留変位比 r_r を次のように定義する³⁾。

$$r_r = \frac{u_r}{u_y} \quad (7)$$

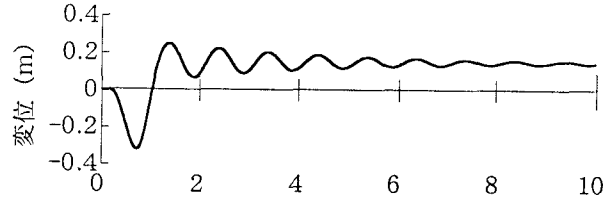
これによると、残留変位比 r_r は1.5である。



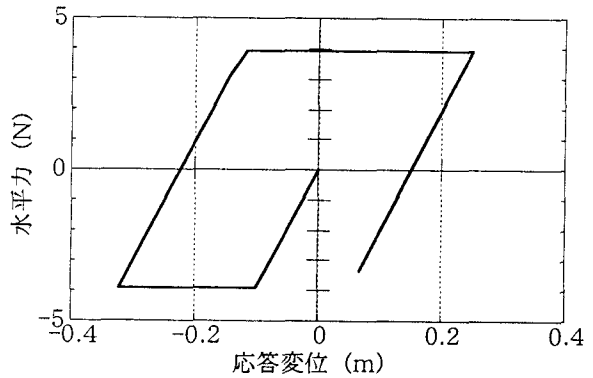
(a) 入力地震動



(b) 応答加速度



(c) 応答変位



(d) 水平力～水平変位の履歴

図-5 非線形1自由度系の地震応答
($D=1.0$ 、 $T_F=1.0$ 秒の模擬パルス地震動を入力した場合)

以上のような解析を $D=1.0$ m、 $T_F=1.0$ 秒の模擬パルス地震動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 を変化させ、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-6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0.96秒までは応答塑性率 μ は10を超えている。 $a_Y=0.4$ gの場合をみると、降伏周期 T_Y が0.48秒以下では応答塑性率 μ は8を上回る。一方、降伏加速度 a_Y を0.6g以上にすれば、応答塑性率 μ は最大でも3.3であり、残留変位比 r_r も2.3以下に収まる。したがって、降伏加速度 a_Y を0.6g程度確保すれば、 $D=1.0$ m、 $T_F=1.0$ 秒の模擬パルス地震動に対して耐震上、安全性が確保されるといえる。

図-7は、降伏周期 T_Y と降伏加速度 a_Y を変化させ、断層の変位 D 、周期 T_F をいろいろ組み合わせた模擬パルス地震動に対して応答塑性率 μ を求めた結果である。ここでは、降伏加速度 $a_Y=0.4$ g、0.6g、0.8gとした場合の結果を示している。

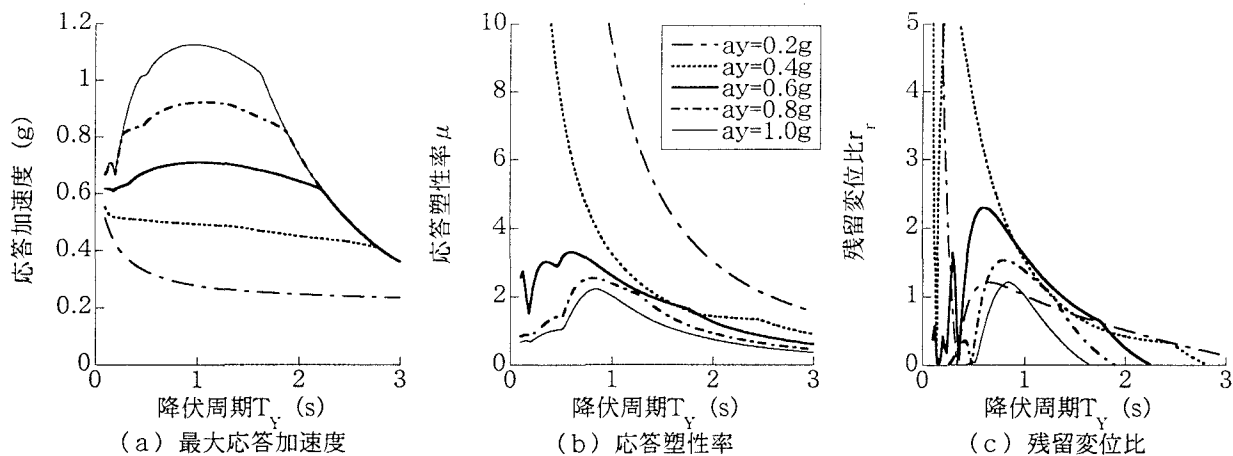


図-6 模擬パルス地震動によるパルス応答スペクトル

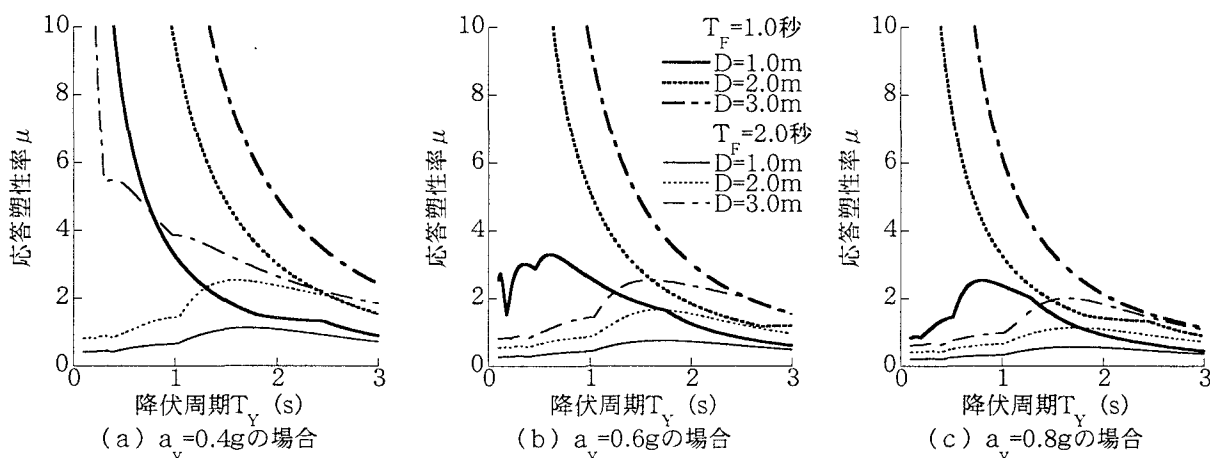


図-7 模擬パルス地震動による応答塑性率 μ

$D=2.0$ m, $T_F=1.0$ 秒の模擬パルス地震動に対しては、降伏周期 T_Y が 0.8 秒以下で応答塑性率 μ は 8 を超える大きな応答が出る。さらに、 $D=3.0$ m, $T_F=1.0$ 秒となると、模擬パルス地震動の最大加速度 a_{max} は 1.92 g 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 $a_y=0.8$ g を確保しても、降伏周期 $T_Y=0.84$ 秒以下で応答塑性率 μ は 8 を上回る。

また、 $D=3.0$ m, $T_F=2.0$ 秒の模擬パルス地震動に対しては、降伏加速度 $a_y=0.4$ g を確保すれば降伏周期 T_Y が 0.24 秒以上で応答塑性率 μ は 8 以下に収まる。

5. 結論

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構造物の応答特性を検討するために、模擬パルス地震動を定義し、それに対する 1 自由度系の線形および非線形地震応答を求めた。本解析で明らかとなった事項をまとめると、以下のようになる。

- (1) 模擬パルス地震動の断層の周期 T_F が構造物の地震応答に大きな影響を与え、 $T_F \times 0.9$ 程度の固有周期を持つ構造物の地震応答が大きくなる。
- (2) $D=1.0$ m, $T_F=1.0$ 秒のパルス応答スペク

トル $P_A(T, 0.05)$ と $D=0.2$ m, $T_F=0.4$ 秒の $P_A(T, 0.05)$ を組み合わせると、兵庫県南部地震の神戸海洋気象台記録の加速度応答スペクトル $S_A(T, 0.05)$ をよく表すことができる。

(3) 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、入力模擬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 0.4 g、応答塑性率 μ を 8 程度確保することで、耐震上、安全性が確保される。しかし、 $D=3.0$ m, $T_F=1.0$ 秒という大きな模擬パルス地震動が作用すると、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) 堺淳一, 川島一彦: パルス地震動とその応答から見た兵庫県南部地震による地震動の特性, 第 24 回地震工学研究発表会講演論文集, pp. 977-980, 1997
- 2) 堺淳一, 川島一彦: パルス応答スペクトルから見た断層直近地震動の解析, 東京工業大学地震工学研究グループ報告書, TIT/EERG 97-3, 1997
- 3) Kawashima, K., MacRae, G. A., Hoshikuma, J., and Nagaya, K.: Residual Displacement Response Spectrum, J. Struct. Engineering, ASCE, Vol. 124, No.5, pp.523-530, 1998