

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

堺淳一¹・川島一彦²

¹ 学生会員 東京工業大学大学院 理工学研究科土木工学専攻修士課程
(〒152 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)

兵庫県南部地震の地震動を評価するために、パルス地震動を定義し、その応答スペクトルを用いて、地震動のどのような成分が構造物の応答に大きな影響を与えるかをノースリッジ地震によるシルマー記録、釧路沖地震による釧路気象台記録との比較において検討した。その結果、兵庫県南部地震およびノースリッジ地震のような継続時間の短い M7 クラスの直下型地震動では、主要な 3～4 のパルスの影響度が大きく、釧路沖地震のような継続時間の長い海洋性地震による地震動ではひとつひとつのパルスの影響度は比較的小さいことが分かった。さらに、パルス地震動の非線形応答を求めて、応答塑性率や残留変位比について考察した。

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

Nonlinear dynamic response analysis, Ductility demand, Ductility design method

1. まえがき

平成 7 年 1 月の兵庫県南部地震では、各種の構造物に甚大な被害が生じた。従来、わが国では、海洋性巨大地震に対する耐震対策に関心が払われてきたが、これにより、直下型地震に対する耐震対策も重視されるようになった。本研究では、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という観点から、兵庫県南部地震による神戸海洋気象台記録の特性を平成 5 年 1 月の釧路沖地震による釧路気象台記録、平成 6 年 1 月のノースリッジ地震によるシルマー記録との比較において検討した。

2. パルス地震動とその応答スペクトル

図-1～図-3 は、神戸海洋気象台記録 NS 成分、シルマー郡病院駐車場記録 NS 成分、釧路気象台記録 EW 成分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

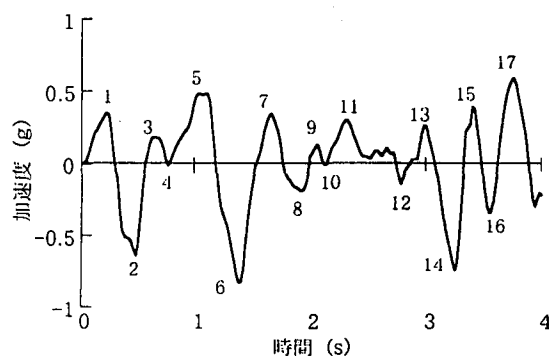


図1 神戸海洋気象台記録の主要動

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、あるパルスの後にこれと同じパルスが反対側に続くと仮定し、これら一対のパルスをパルス地震動と定義する。また、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

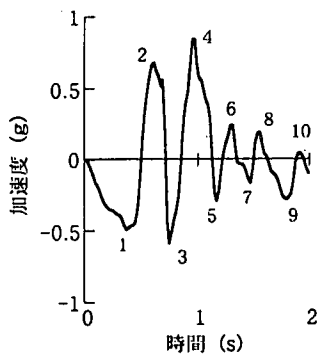


図2 シルマー記録の主要動

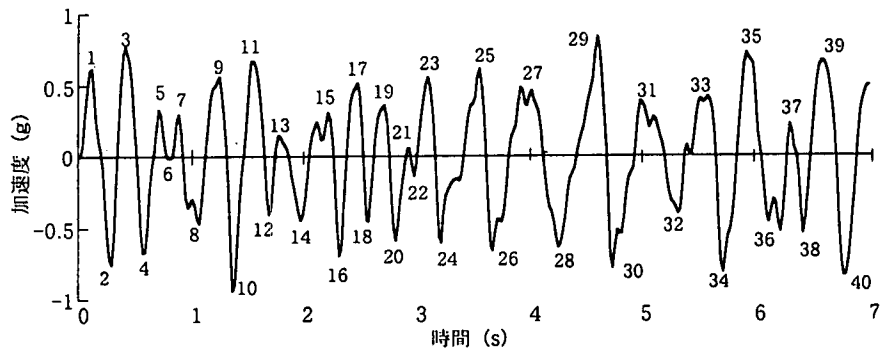
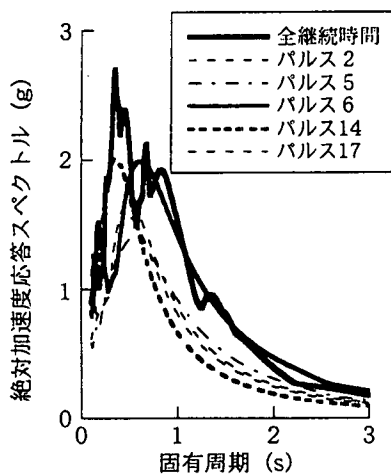
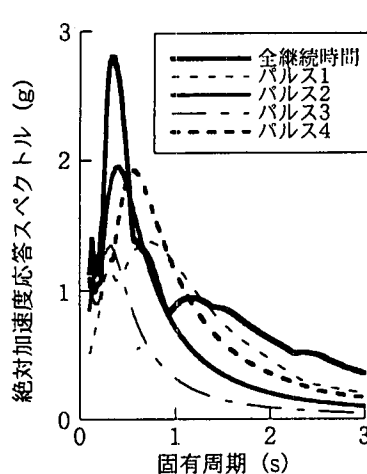


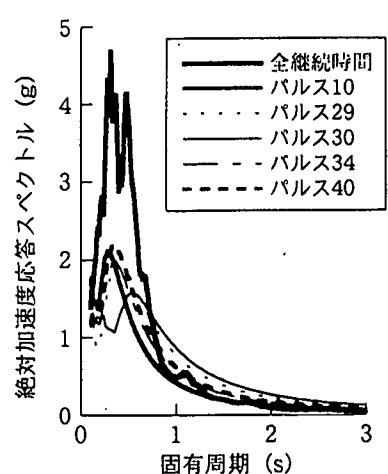
図3 釧路気象台記録の主要動



(a) 神戸海洋気象台記録



(b) シルマー記録



(c) 釧路気象台記録

図4 パルス応答スペクトル P_A ($h=0.05$)

トル P_A と定義する。

図-4は、主要なパルスに対するパルス加速度応答スペクトル P_A を求めた結果である。減衰定数は5%としている。これによれば、以下の点が指摘できる。

(1) 神戸海洋気象台記録では、パルス6とパルス14の P_A は、固有周期 0.6~1.5秒および 0.1~0.4秒の範囲でそれぞれ 1.99 g、2.01 g の最大値を与え、それは地震動の全継続時間から計算される S_A の最大値 2.70 g のともに約74%の大きさである。

(2) 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の寄与が大きい。

(3) 釧路気象台記録では、パルス10とパルス40の値が大きい。しかし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 4.67 g の45%程度に過ぎない。

3. 複数のパルスに対する応答スペクトル

以上では、ある特定のひとつのパルス地震動の寄

与度を求めたが、こうしたパルスを含むもう少し長い時間範囲で応答を解析するために、ここでは寄与度の大きいパルスの前後を含む1.0~2.5秒の間の地震動に対して加速度応答スペクトル S_A を計算した。解析対象としたのは、神戸海洋気象台記録ではパルス2~6の1.24秒間およびパルス14~17の0.82秒間の2区間、シルマー記録ではパルス1~4の1.12秒間、釧路気象台記録ではパルス2~11の1.44秒間およびパルス29~40の2.48秒間の2区間である。この結果を図-5に示す。これによれば、以下の点が指摘できる。

(1) 神戸海洋気象台記録では、パルス2~6(1.24秒間)の S_A は固有周期が0.44秒において最大値 2.15 gをとる。また、パルス14~17(0.82秒間)の S_A は固有周期が0.33秒において、最大値 2.34 gをとる。これは、地震動の全継続時間から計算される S_A の最大値 2.70 g のそれぞれ80%、87%の値に相当する。

(2) シルマー記録では、パルス1~4(1.12秒間)の S_A は固有周期が0.34秒において最大値 2.83 gをとり、これは地震動の全継続時間から計算される S_A

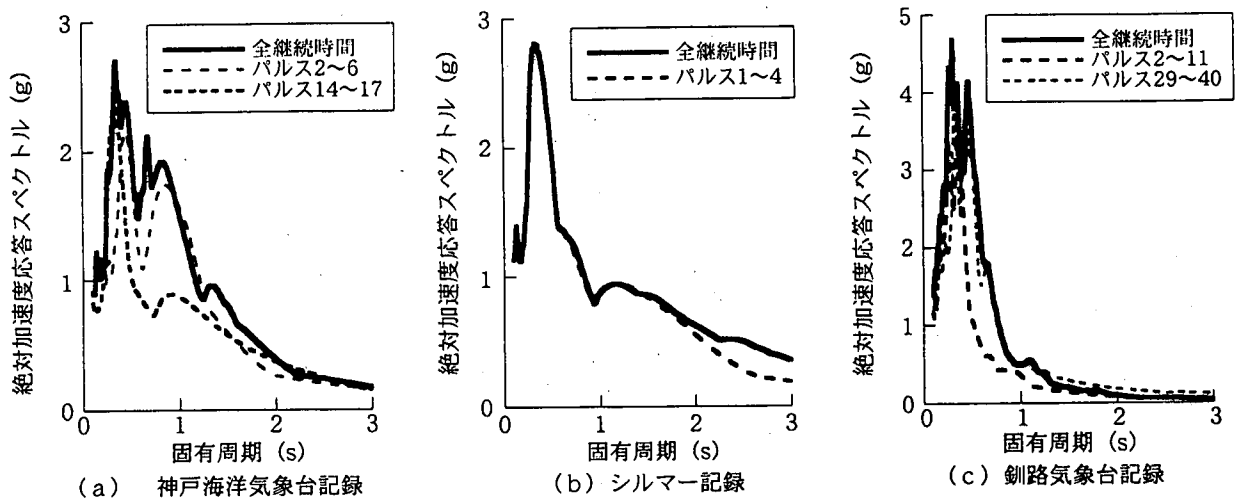


図5 複数のパルスに対する応答スペクトル S_A ($h=0.05$)

の最大値 2.80 g の 101% となっており、ほとんど同じ値を与える。また S_A の形状を比較すると 0.1~1.5 秒においてほぼ一致している。

(3) 釧路気象台記録では、パルス 2~11 (1.44 秒間) の S_A は固有周期が 0.37 秒において最大値 3.70 g を、パルス 29~40 (2.48 秒間) の S_A は固有周期が 0.33 秒において最大値 3.77 g をそれぞれとる。これは、地震動の全継続時間から計算される S_A の最大値 4.67 g のとともに約 80% の値に相当する。

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大きい神戸海洋気象台記録のパルス 6 を対象として、非線形 1 自由度系の地震応答を求めた。解析を簡単にするため、完全バイリニア型の履歴特性を仮定した。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 5% 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) と降伏加速度 a_y をパラメータとし、 T_y は、0.1~4.0 秒の範囲で、 a_y は 0.2~1.0 g の範囲でそれぞれ変化させた。応答量の大きさを表す指標として、応答塑性率 μ を次のように定義する。

$$\mu = \frac{u_{\max}}{u_y} \quad (1)$$

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、応答を求めた例を図-6 に示す。最大応答変位 $u_{\max}$ は 244mm であり、式 (1) による応答塑性率 μ は 2.5 である。応答後には、73mm 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

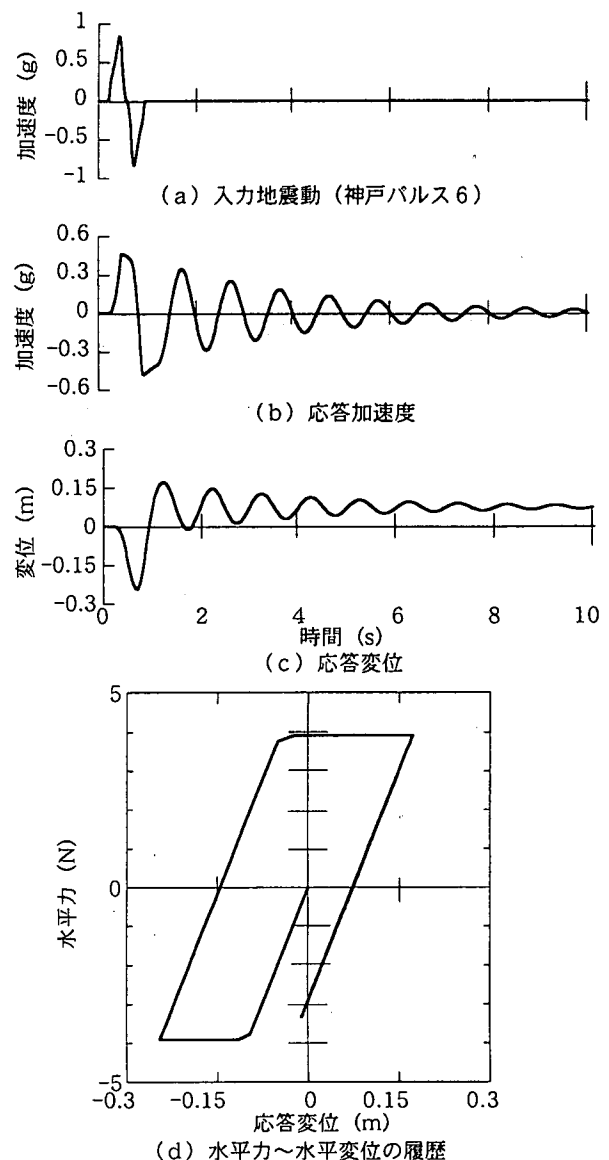


図6 非線形 1 自由度系の地震応答
(神戸海洋気象台記録のパルス6を入力した場合)

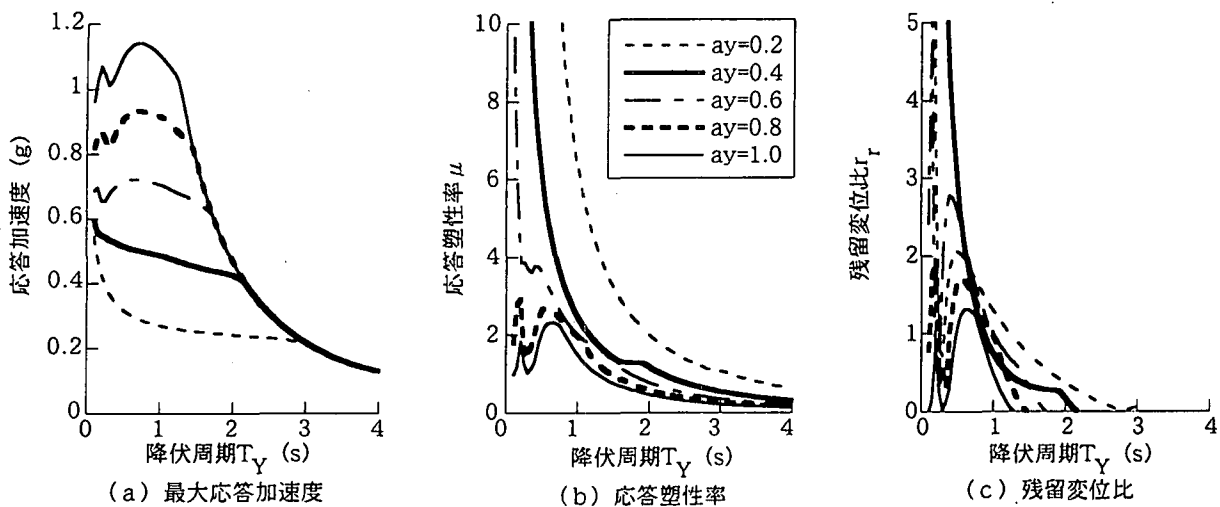


図7 神戸海洋気象台記録の中からパルス6を入力した場合の最大応答

指標として、次式のように残留変位比 r_r を定義する。

$$r_r = \frac{u_r}{u_y} \quad (2)$$

これによると、残留変位比 r_r は 0.74 である。

以上のような応答結果から、降伏周期 T_Y と降伏加速度 a_y をパラメータにして最大応答加速度、応答塑性率 μ 、残留変位比 r_r を示した結果が図-7 である。

降伏加速度 $a_y = 0.2$ g の場合では、降伏周期 T_Y が 0.9 秒までは応答塑性率 μ は 8 を、また、残留変位比 r_r は 2 をそれぞれ超えている。現在、一般に橋梁構造物の耐震設計で考えられている降伏加速度 $a_y = 0.4$ g の場合をみると、降伏周期 T_Y が 0.4 秒以下では応答塑性率 μ は 8 を超える。また、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 4 以下に収まる。

残留変位比 r_r に着目すると、降伏加速度 $a_y = 0.6$ g 以上の場合には、2 以下の値になっている。

ただし、ここでは完全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¹⁾。

5. 結論

本解析で明らかとなった事項を示すと、以下のようになる。

(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 3～4 だけのパルスによっても全継続時間に匹敵する加速度応答スペクトルを与える。

(2) 釧路気象台記録のような継続時間の長い海洋性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上記 (1) の地震動に比較して小さい。

(3) 神戸海洋気象台記録のパルス 6 を入力として、完全弾塑性型履歴特性を有する 1 自由度系構造物に生じる最大応答を解析した結果によれば、降伏加速度として 0.6 g 程度確保すれば、応答塑性率は 4 以下に収まる。

(4) 現状では、直下型地震による強震記録は少ないが、直下型地震になる程、特定のパルス地震動が卓越するようになるとすれば、パルス地震動を用いた解析は直下型地震動に対する構造物の耐震性を検討する上で有効と考えられる²⁾。

参考文献

- 1) 川島一彦, MacRae, G., 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, 1994.10
- 2) 堀淳一, 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特性の解析”, Report No.TIT/EERG97-3, 1997