

正負地動パルスによる1自由度完全弾塑性系の地震応答の予測

PREDICTION OF EARTHQUAKE RESPONSE OF SDOF ELASTO-PLASTIC SYSTEM USING REVERSED PULSES AS GROUND MOTION

張 富明^{*}, 酒井久和^{*}, 河村 廣^{**}, 久保哲夫^{***}

Fuming ZHANG, Hisakazu SAKAI, Hiroshi KAWAMURA and Tetsuo KUBO

Although time history analysis gives us detailed information about earthquake response, explicit formulas and simplified methods are efficient to highlight the structural response that are decided by earthquake input and structure characteristics. However, recent near-fault earthquakes shown strong pulse-like ground motion component in velocity, and the well established methods applied in structural design based on stable vibration could not explain structural response consistently. In this paper, earthquake motions are simplified as rectangular acceleration pulses and velocity pulses that are solely related with peak values of ground motions, then, structural response are directly solved using the equation of motion, and explicit formulas are obtained for maximum displacement and velocity. The proposed method results a series of simple explicit formulas, and gives an extremely simple correlation between structural response and seismic demand with peak values of ground motion. Finally, R_t factor and D_s factor assigned in Japanese seismic design for building structures are discussed.

Keywords: *Earthquake response, Elasto-plastic, Peak values of ground motion, Pulse input, Demand spectra, Explicit formula*
地震応答, 弾塑性, 地動ピーク値, パルス入力, 必要スペクトル, 解析式

1. はじめに

構造物モデルの地震応答は、地震動波形と構造物の復元力特性さえ与えられれば、時刻歴解析に基づいて精度良く求めることが可能である。しかし、数値解析が一般に行われている今でも、少なくとも単純な振動系に対し、時刻歴解析による特解よりも、地震動と構造物を少ない特性値で関係付け、陽な一般解を提供することは依然に大きな意義を持つと考える。

数値解析を行わずに地震応答を予測するためには、地震動入力の単純化並びに構造物応答に関する仮定が必要である。例えば、耐震設計に用いられる等価線形解析法¹⁾やエネルギー法²⁾の場合、構造物の定常振動の仮定、速度スペクトルやエネルギースペクトルとしての地震動入力が与えられることが前提となっている。

しかし、構造物に大きな被害をもたらす直下型地震の特徴として、大きな速度パルスが地震動波形に含まれていると指摘されている³⁾。この場合、構造物の弾塑性応答は基本的に非正常なものであり、過渡振動の影響度合いが大きいと思われる。特に、大きな塑性化が生じた場合には、応答の偏りが一層顕著になるものと考えられる。応答の非正常性に着目し、瞬間エネルギー⁴⁾やエネルギー入力率⁵⁾により最大応答を予測する方法も提案されている。

上述の応答評価法^{1),2),4),5)}はどれも地震動の効果を各種の応答スペクトルで表わし、弾性系の応答から弾塑性系の応答を推定するものである。一方、地震動そのものを定量化する最も単純な指標として、地

動の最大加速度(PGA)、最大速度(PGV)、最大変位(PGD)が挙げられる。最近の直下型地震では震源近く数10km以内の範囲にわたり、1g程度のPGAあるいは1m/s程度のPGVが多く記録されている。耐震設計あるいは被害予測において、このような大きなピーク値を持つ直下型の地震動に対し、大きな塑性化が生じることを対象とした応答評価も重要になっている。また、構造物の耐震安全性に係わる大きな変形レベルの地震応答は、弾性系の応答よりも完全弾塑性系の応答に関連性が高いと思われる。

本研究はとりあえず、直下型地震における弾塑性応答の特徴を理解するための手助けとして、1自由度(SDOF)完全弾塑性系の最大応答を検討する。地震動については、最大加速度(PGA)と最大速度(PGV)を正負加速度・速度パルスで代表させ、パルス応答解析により完全弾塑性系の最大応答を降伏震度と固有周期に関連付け、1自由度系の最大応答を解析式により予測しようとするものである。

2. 地動パルスを用いた応答評価法

地震動の破壊力を地動速度で捉える棚橋⁶⁾のポテンシャルエネルギー説がある。完全弾塑性系については、地動速度パルスによる応答は数式的に簡単に表わすことができる⁷⁾。なお、河村⁸⁾は片方向のパルス入力に基づくパルス地震動解析法を提案しているが、地動パルスに応答スペクトルの値が用いられている。

直下型地震の場合、構造物の応答も主要動のパルス成分と大きく関

^{*} 防災科学技術研究所地震防災フロンティア研究センター 研究員・工博

^{**} 神戸大学工学部建設学科 教授・工博

^{***} 防災科学技術研究所地震防災フロンティア研究センター チームリーダー
東京大学大学院工学系研究科建築学専攻 教授・工博

Research Engineer, Earthquake Disaster Mitigation Research Center, NIED, Dr. Eng.
Prof. of Dept. Architecture, Faculty of Engng., Kobe University, Dr. Eng.

Team leader, Earthquake Disaster Mitigation Research Center, NIED, and Prof. of
Dept. Architecture, Graduate School of Engng., University of Tokyo, Dr. Eng.

連するものと考えられる。しかし、直下型地震の地震動でも正負両方向に共に大きな振幅を持ち、構造物の応答も一方向なものとはならない。もし片方向の速度パルス（1つの加速度インパルス）のみが作用されれば、応答速度が地動速度を超えることがない。しかし、直下型地震の特徴の一つは、弾性速度応答スペクトルでは、ある（中）周期域において、応答速度が突出的に大きく、地動速度の2ないし3倍の値にもなっていることが挙げられる。これは正負パルス、すなわち逆載荷があったためと思われる。そこで、本研究では、地震動を正負加速度パルス・正負速度パルスで代表させ、完全弾塑性系の最大応答変位と最大応答速度を数式で予測する。

3. 正負台形速度パルスの定義

複雑な地震動波形を種々なパルスで代表して応答を求めようとする研究が古くから行われている。最近、Cuestaら⁹⁾は数多くのパルス波の適用性を検討している。また、境ら¹⁰⁾は地震動をサイン波1波で代表できることを示している。しかし、このサイン波1波の振幅と周期は周波数領域で統計処理によって求められるものであり、地震動の各種最大値と直接に関連するものではない。Hallら¹¹⁾は地動の最大値に一致するよう、3つの連続した三角加速度パルスを提案している。この入力速度パルスはサイン波1波に似たもの、入力変位は半波となっている。また、Alaviら¹²⁾は3つの連続した矩形加速度パルスを用いている。

サイン波1波でも、連続した三角波でも、地動加速度から得られる地動速度は正負パルスであり、変位の漸増過程や最大応答を決めるために必要な除荷過程の両方を含めている。個々の地震動の主要動部分に適合するようなパルス入力を設定することも可能であるが、弾塑性応答の最も単純なケース - 完全弾塑性の復元力を有する1自由度系に対し、矩形パルス入力であれば、時刻歴解析の必要がなく、応答の定式化が可能である。

そこで、本研究では地震動をパルス群の連続として捉え、仮に主要動を Fig.1 に示すように(a) 加速度が A_p の断続した矩形加速度パルス、(b)速度が V_{p0} の正負矩形速度パルスで代表できると仮定する。なお、(a)の加速度パルスにより、(b)では台形速度パルス(ピーク値 V_p)が生じるが、ここでは、解析式を得るために近似的に幅値が V_{p0} の矩

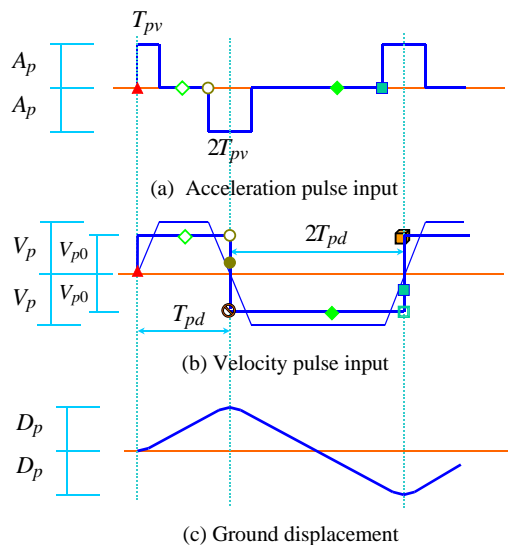


Fig.1 Earthquake input simplified as reversed pulses

形速度パルスを用いる。

久田¹³⁾は震源近傍の強振動特性をランダム位相波・長周期パルス波・大変位波に分類しているが、Fig.1の地動パルスは長周期パルス波を想定したものである。

地動パルス A_p, V_p, D_p に対し、次の式が成り立つ。

$$T_{pv} = V_p / A_p \quad (1)$$

$$D_p = V_p (T_{pd} - T_{pv}) \quad (2)$$

これらの式により、速度パルスの持続時間 T_{pd} は次式で与えられる。

$$T_{pd} = (D_p + V_p T_{pv}) / V_p = (D_p + V_p^2 / A_p) / V_p \quad (3)$$

一方、矩形速度パルスは本来の台形速度パルスと等しい地動変位を生じさせるので、その幅値は次式で与えることになる。

$$V_{p0} = D_p / T_{pd} = V_p \frac{1}{1 + V_p^2 / (A_p D_p)} \quad (4)$$

Fig.1は最も単純な入力であり、加速度・速度・変位はどれも正負方向で等しいピーク値を有している。速度パルスの持続時間を変化させることにより、異なる地動変位(PGD)も得ることができ、本報では正負対称な地動変位を生じさせる Fig.1のパルス入力によってもたらされる最大応答を検討する。なお、パルス入力の値 A_p, V_p, D_p は地震動の主要動部分から抽出するか、あるいは積分値(PGA, PGV, PGD)を用いるべきかは、今後の研究課題である。

4. 応答の予測式

一つの矩形加速度パルス或いは矩形速度パルスに対する一方向の応答について、山田ら¹⁴⁾は最大変位の解析式を導いている。正負パルス入力についても解析式の誘導も可能であるが、弾性応答の部分が含まれると、複雑な式になるので、本研究では正負パルスによる応答に後述のように仮定を設け、最大応答の定式化を行う。なお、解析対象は完全弾塑性の復元力を有する SDOF 系で直下型地震によって大きく塑性化するものを考えているので、粘性減衰を無視する。

SDOF 系の質量を m 、相対変位を x 、復元力を Q 、地動加速度を \ddot{x}_0 とし、運動方程式が次式で表わされる。

$$\ddot{x} + Q/m = -\ddot{x}_0 \quad (5)$$

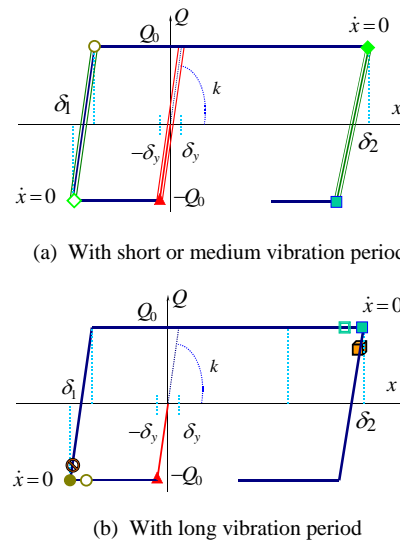


Fig.2 Response model of elasto-plastic system

4.1 短周期系に対する正負加速度パルスに基づく応答

Fig.1(a)の加速度入力に対し、系の時刻歴応答を式で表わすことも可能であるが、極端に単純化された入力に対する厳密解はあまり工学的な意味があるとは思わない。ここで、単純化された矩形加速度パルスが入力される前にも、加速度パルスが0の間においても何らかの入力が存在し、弾性限の間で振動することとし、加速度パルスが入力される時にちょうど降伏変位に達すると仮定する。

系の降伏せん断力を F_y 、初期変位を δ_0 、初速度を0、加速度パルスの振幅を α_p 、作用時間を t_p とすると、加速度パルス終了時の速度と変位は次式で示される。

$$\dot{x}_a = (\alpha_p - F_y/m)t_p \quad (6)$$

$$x_a = \delta_0 + \frac{1}{2}(\alpha_p - F_y/m)t_p^2 \quad (7)$$

その後、加速度パルスが0、式(6)の初速度と式(7)の初期変位で Δt を経過した時点で、除荷すなわち応答速度が0を迎え、この時の変位は式(9)で表わされる。

$$\Delta t = \frac{m\dot{x}_a}{F_y} = \left(\frac{m\alpha_p}{F_y} - 1\right)t_p \quad (8)$$

$$\delta_b = \delta_0 + \frac{1}{2}\left(\frac{m\alpha_p}{F_y} - 1\right)\alpha_p t_p^2 \quad (9)$$

第1波の加速度パルスに対し、 $\delta_0 = -\delta_y$ 、 $\alpha_p = -A_p$ 、 $F_y = -Q_y$ 、 $t_p = T_{pv}$ を式(9)に代入し、最小変位 δ_1 は式(10)で表わされる。Fig.1(a)と Fig.2(a)では、記号 δ_1 は初期位置、 δ_b は最小変位の位置を記す。

$$\delta_1 = -\delta_y - \frac{1}{2}\left(\frac{mA_p}{Q_y} - 1\right)A_p T_{pv}^2 \quad (10)$$

第2波の加速度パルスに対し、 $\delta_0 = \delta_1 + 2\delta_y$ 、 $\alpha_p = A_p$ 、 $F_y = Q_y$ 、 $t_p = 2T_{pv}$ を式(9)に代入し、最大変位 $\delta_{\max} = \delta_2$ は式(11)で求められる。また、最大応答速度 V_{\max} は式(12)で表わされる。記号 δ_1 は初期位置、記号 δ_b は最大変位の位置を記す。

$$\begin{aligned} \delta_{\max} = \delta_2 &= \delta_y + \frac{3}{2}\left(\frac{mA_p}{Q_y} - 1\right)A_p T_{pv}^2 \\ &= \delta_y + \frac{3}{2}\left(\frac{m}{Q_y} - \frac{1}{A_p}\right)V_p^2 \end{aligned} \quad (11)$$

$$V_{\max} = (A_p - Q_y/m)2T_{pv} = 2[1 - Q_y/(mA_p)]V_p \quad (12)$$

以降、第3波の加速度パルスに対し、負方向で降伏する。応答履歴のイメージを Fig.2(a)に示す。

しかし、たとえば第1波の加速度パルスに対し、式(8)から得られた時間増分が $\Delta t > (t_{pd} - t_{pv})$ の場合、降伏状態での自由振動の間に次ぎの加速度パルスによる強制的な除荷もあり得る。これは4.2で検討することとする。また、式(11)は大きな応答値が得られるので、安全側の予測とも言えよう。

(11)式より、最大応答変位は地動加速度 A_p が大きいほど大きく、地動速度 V_p の二乗に比例して増大する。

4.2 中周期系に対する正負速度パルスに基づく応答

Fig.1(b)の矩形速度パルスに対し、ここでは、先の加速度パルスの解析と同様、大きな塑性変形が生じることを前提に、復元力の原点からではなく Fig.2(a)の履歴応答を想定する。

すなわち、負方向の降伏時(記号 δ_1)に第1波の矩形速度パルスが加えられ、当該パルスが終了する前に除荷(記号 δ_2)が生じることとする。エネルギーの釣合より、下記の式が得られる。

$$-Q_y(\delta_1 + \delta_y) = \frac{m}{2}V_{p0}^2 \quad (13)$$

$$\delta_1 = -\delta_y - \frac{m}{2Q_y}V_{p0}^2 \quad (14)$$

次に、負側で除荷され、弾性限内での振動が減衰されずに、あるいは考慮されない何らかの入力によって、正側の降伏と共に第2波の矩形速度パルス($2V_{p0}$ の逆パルス)が加えられた状態(記号 δ_2)にあることとする。エネルギーの釣合より、最大変位(記号 δ_{\max})に関する下記の式が得られる。

$$Q_y(\delta_2 - 2\delta_y - \delta_1) = \frac{m}{2}(2V_{p0})^2 \quad (15)$$

$$\delta_{\max} = \delta_2 = \delta_1 + 2\delta_y + \frac{2m}{Q_y}V_{p0}^2 = \delta_y + \frac{3m}{2Q_y}V_{p0}^2 \quad (16)$$

第1波の負側での速度パルスから、瞬時に第2波の正側での速度パルスが作用することは、その差分すなわち $2V_{p0}$ である速度パルスが加えられることを意味する。この点は本論文の最も特記すべき点である。この場合、地動パルス $2V_{p0}$ によるエネルギーが履歴の1/2サイクル(δ_1)にフルに入力され、最大応答変位は V_{p0} の二乗に比例して増大する。なお、 V_{p0} は A_p にも関係することは式(4)に示す通りである。

最大応答速度 V_{\max} は最も大きく採りうる値として次式で求める。

$$V_{\max} = 2V_{p0} \quad (17)$$

4.3 長周期系に対する正負速度パルスに基づく応答

系の固有周期が長くあるいは降伏せん断力が小さくなると、降伏状態での自由振動が消滅し、加速度パルスによって強制的に逆方向へ変形する。Fig.1(b)の矩形速度パルスを用い、Fig.2(b)の履歴応答を想定する。

まず、負側降伏時(記号 δ_1)に速度パルスが作用することとすると、第1波の速度パルスに対して時間増分 T_{pd} の時(記号 δ_2)の応答変位と応答速度は次式で与えられる。

$$\delta_1 = -\delta_y - V_{p0}T_{pd} + \frac{Q_y}{2m}T_{pd}^2 \quad (18)$$

$$V_1 = -V_{p0} + \frac{Q_y}{m}T_{pd} \quad (19)$$

次に、第2波の速度パルス($2V_{p0}$ の逆パルス)に対して瞬間的に逆方向の降伏変位に達して、初速度は次式で与えられる。

$$V_{20} = 2V_{p0} + V_1 = V_{p0} + \frac{Q_y}{m}T_{pd} \quad (20)$$

最大応答速度 V_{\max} は次式で求められる。

$$V_{\max} = V_{20} = V_{p0} + \frac{Q_y}{m}T_{pd} \quad (21)$$

第2波の速度パルスに対して時間増分 $2T_{pd}$ の時の応答変位は、次式で求められる。

$$\begin{aligned} \delta_{\max} = \delta_2 &= 2\delta_y + \delta_1 + 2V_{20}T_{pd} - \frac{Q_y}{2m}4T_{pd}^2 \\ &= \delta_y + V_{p0}T_{pd} + \frac{Q_y}{2m}T_{pd}^2 = \delta_y + D_p + \frac{Q_y}{2m}(D_p/V_{p0})^2 \end{aligned} \quad (22)$$

上記の式から、最大応答変位は地動最大変位 D_p に関し放物線的に増加する。長周期系について式(22)の第3項が小さいので、塑性変形に関しても変位一定説($\delta_{\max} \approx D_p$)が成り立つ。

なお、式(19)から分かるように、降伏せん断力が大きい場合に $V_1 > 0$ となり、降伏状態での自由振動の間に除荷が生じることとなる。これは4.2で検討されている。

4.4 必要耐力スペクトルと速度応答スペクトル

完全弾塑性系の降伏変位 δ_y は固有周期 T 及び降伏震度 q_y との間に次の関係が成り立つ。 g は重力加速度である。

$$\delta_y = \frac{T^2 g}{4\pi^2} q_y \quad (23)$$

(a) 短周期で正負加速度パルスによる場合

まず、正負加速度パルス応答に対し、式(23)を 4.1 の式(11)に代入すると、次式が得られる。 μ は最大塑性率を表わす。

$$\mu = \frac{\delta_{\max}}{\delta_y} = 1 + \frac{3}{2} \left(\frac{A_p}{g} \frac{1}{q_y} - 1 \right) \frac{A_p}{g} T_{pv}^2 \frac{4\pi^2}{T^2} \frac{1}{q_y} \quad (24)$$

上記の2次式より、必要強度スペクトルに関する次式が得られる。

$$q_y = \frac{A_p}{g} \frac{3\pi^2}{(\mu-1)} \left(\frac{T_{pv}}{T} \right)^2 \left[\sqrt{1 + \frac{2(\mu-1)}{3\pi^2} \left(\frac{T}{T_{pv}} \right)^2} - 1 \right] \quad (25a)$$

また、式(12)を整理すると、速度応答スペクトルに関する次の式が得られる。

$$V_{\max} = 2V_p \left(1 - q_y \frac{g}{A_p} \right) \quad (26a)$$

(b) 中周期で正負速度パルスが入力された場合

速度パルスが入力された場合、4.2 の式(16)と式(17)を整理すると、下記の式が得られる。

$$q_y = \frac{2\pi V_{p0}}{g T} \sqrt{\frac{3}{2(\mu-1)}} \quad (25b)$$

$$V_{\max} = 2V_{p0} \quad (26b)$$

(c) 長周期で逆速度パルスによって除荷が生じた場合

4.3 の式(22)と式(21)を整理すると、長周期の系に関する下記の式が得られる。

$$q_y = \frac{4\pi^2}{\mu-1-2[\pi D_p/(TV_{p0})]^2} \frac{D_p}{g} \frac{1}{T^2} \quad (25c)$$

$$V_{\max} = V_{p0} + q_y g T_{pd} \quad (26c)$$

5. 応答スペクトルに関する考察

5.1 応答スペクトルの特徴

以上では、正負加速度パルスによる応答を求める際に、加速度入力 \dot{u} が 0 の間において振動することと仮定している(4.1)。これは降伏耐力が高く除荷が生じること、固有周期が短く数回弾性振動が生じることを想定したものである。また、正負速度パルスによる応答を求める際に、降伏状態での自由振動が考えられる場合(4.2)、及び長周期の系あるいは降伏強度が非常に低く、逆載荷によって除荷されることを想定している(4.3)。それぞれから得られる必要耐力スペクトル及び速度スペクトルは式(25)、(26)の a,b,c 諸式で求められ、同じ固有周期に対してそれらの小さい値を評価値に採用する。ここで、一例として塑性率 $\mu=4$ 、パルス入力 ($A_p=1.0g$, $V_p=1.0m/s$, $D_p=0.5m$) に対する応答スペクトルを Fig.3 に示す。

Fig.3(a)に示すように、必要耐力(降伏震度 q_y) は短周期では a、中周期では b、長周期では c で決まる。この例では $T < 2.6s$ であれば、a すなわち加速度パルスによる応答式でほぼ降伏震度が決まる。

Fig.3(b)では、最大応答速度 V_{\max} についても、短・中・長周期の各周期域において、応答値は a,b,c の諸式でそれぞれ決まる。しかし、必要耐力スペクトルとは各式が適用される周期帯が異なる。最大速度スペクトルは直下型地震の弾性速度応答スペクトルや瞬間エネルギー

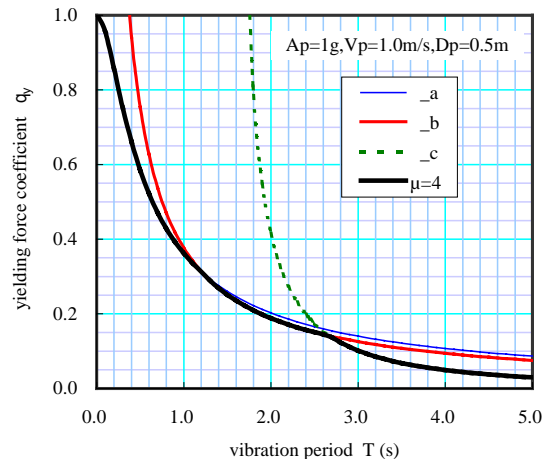
ースペクトルとは似通った形を示す。また、Fig.2 の応答履歴について、 V_{\max} は 1/2 サイクルのエネルギー入力速度と解釈できるものとする。

長周期域では、必要降伏震度及び最大応答速度が固有周期の増加につれて小さくなることは、途中での強制除荷によるものである。

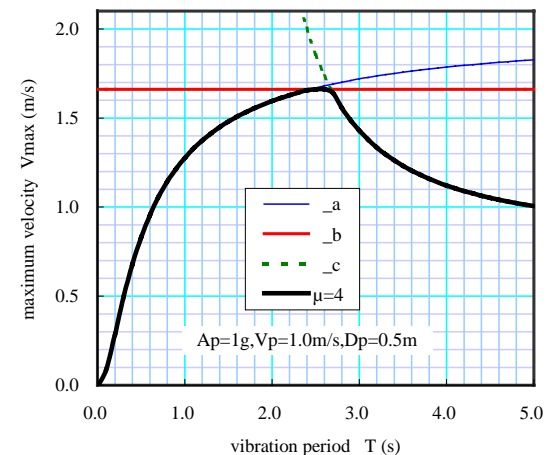
式 25,26 の a,b,c 諸式に示されるように、短・中・長周期の各周期域の境界は固定した値で表わすことができない。それぞれの境界周期は入力(地動パルスの諸値)、及び構造物特性(降伏震度、想定塑性率)に関係するからである。

5.2 耐震設計の R_t 曲線及び D_s 値に対する考察

建築構造物の保有耐力設計法(新耐震設計法¹⁵⁾)では、1階の必要保有水平耐力の係数($C_0=1.0$ 、全重量に対して)は振動特性係数 R_t と構造特性係数 D_s で定められている。係数 R_t は種々の地盤における強震記録の弾性加速度応答スペクトルを参照して定めているが、 D_s 値は弾性系と完全弾塑性系のエネルギー一定則で定式化されている¹⁶⁾。なお、エネルギー一定則は地動を一方速度パルスと仮定したときに成り立つものである。地震波を用い、石丸¹⁷⁾は地震応答解析により D_s 値について検討している。しかし、 D_s 及び R_t の値について理論的な説明が少なく、弾性応答をベースに議論されていることもあり、必ずしも十分な根拠を与えたとは言えない。



(a) Required strength spectra



(b) Maximum velocity spectra

Fig.3 Response spectra induced by acc. pulses or vel. pulses

Fig.4 に、地動パルス入力($A_p = 0.5g, V_p = 0.5m/s, D_p = 0.25m$)とし、塑性率 μ に応じた必要耐力スペクトルを示す。 q_y は式(25a,b,c)の最小値で、図中に保有耐力設計の $D_s R_t$ 曲線も併せて示してある。なお、短周期域を除けば、本研究による必要耐力は $D_s R_t$ 曲線に似たような傾向を示す。なお、短周期域では、 $D_s R_t$ 曲線で設計された建物は大きな塑性率応答を示すことは周知の通りである。

保有耐力設計法では、固有周期の影響は弾性応答、塑性化の影響は塑性率、それぞれ独立に評価している。本研究では、中周期域を対象とする式(25b)では固有周期の影響(R_t 曲線に相当)と塑性率の影響(D_s 値に相当)を分離することができるが、短周期域の式(25a)及び長周期域の式(25c)では両者の影響を分離することができない。

Fig.5 に $D_s R_t$ で降伏震度を与えた SDOF 完全弾塑性系の応答塑性率を示す。地動パルス入力を($A_p = 0.5g, V_p = 0.5m/s, D_p = 0.25m$)とした場合、 $D_s=0.3$ とすれば短周期域($T < 0.6s$)を除けば塑性率が 2.0 程度となっているが、 $D_s=0.6$ とすれば塑性率が 1.0 程度で弾性を保つことになる。一方、($A_p = 1.0g, V_p = 1.0m/s, D_p = 0.5m$)とした場合、短周期域($T < 1.0s$)を除けば、 $D_s=0.3$ に対し塑性率が 5-6 程度となっているが、 $D_s=0.6$ に対しては塑性率が 2 程度、 $D_s=0.9$ とすれば塑性率が 1.5 以下となっている。

本研究は保有耐力設計の諸係数の意味について一つの解釈を与えた。しかし、 $D_s R_t$ を決定した際の想定地震動の性質は、本研究のパルス入力で単純化できるとは考えられないし、想定される地震応答(定常振動か過度振動か)も異なるものであることを記しておく。

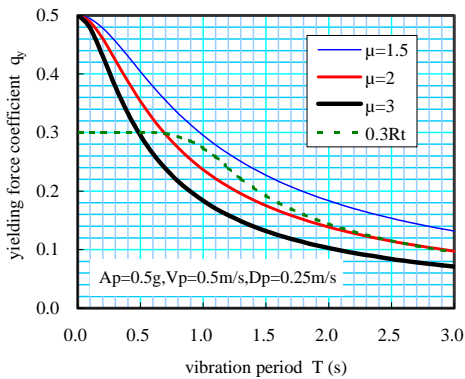


Fig.4 Comparison of required strength with $R_t \cdot D_s$ values

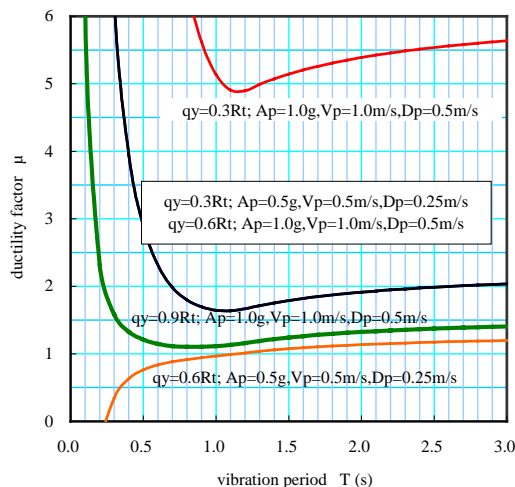


Fig.5 Ductility factor of SDOF system under reversed pulse inputs when yielding strengths are given by $R_t \cdot D_s$ values

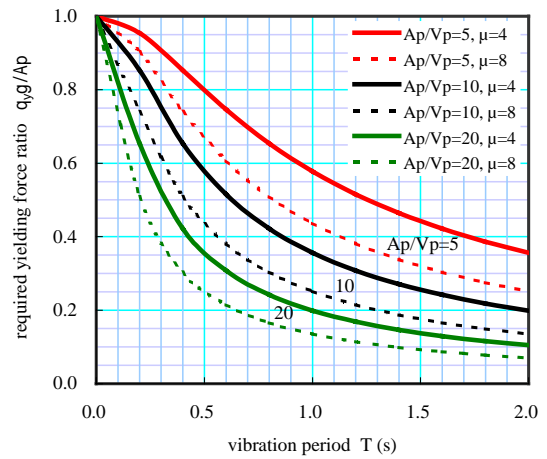


Fig.6 Required strength ratio as the function of A_p/V_p

5.3 地動パルスと必要耐力スペクトルの相関について

Fig.3(a)から分かるように、固有周期が 2.0 秒以下であれば、応答値が加速度パルスによる式(25a)で求めても良い。式(25a)を次式のように整理する。

$$\frac{q_y g}{A_p} = \frac{2}{1 + \sqrt{1 + \frac{2(\mu-1)}{3\pi^2} \left(\frac{A_p}{V_p} T \right)^2}} \quad (27)$$

必要降伏震度比 $q_y g / A_p$ は、塑性率 μ が大きいほど、加速度パルスの持続時間 $T_{pv} = V_p / A_p$ が短いほど、固有周期 T が長いほど、小さくなる。Fig.6 に式(27)による必要降伏震度比 $q_y g / A_p$ のスペクトルを示す。 A_p / V_p が小さいほど、すなわち地動速度パルス V_p が大きいほど $q_y g / A_p$ が大きくなる。従って、必要耐力スペクトルは地動加速度及び地動速度の両方で決まることが分かる。

Fig.7 に 4 種類の地動パルスに対し、式(25a,b,c)による必要耐力スペクトルを示す。(a)の case1 に比べ、地動パルスを 2 倍とした(b)の case2 は必要耐力も単純に 2 倍となる。また、(a)の case1 に比べ、(c)の case3 では地動加速度を 2 倍としており、周期が短くあるいは塑性率が小さい場合には必要降伏震度が大きく増加するが、長周期あるいは大きな塑性率の場合には必要降伏震度が殆ど変わらない。一方、地動速度を 2 倍とした(d)の case4 では、長周期あるいは大きな塑性率の場合には必要降伏震度が大きく増加する。

6. まとめ

本研究は、断続した正負矩形加速度パルス・連続した正負矩形速度パルス地動に対し、1 自由度完全弾塑性系の応答を近似的に陽な予測式で表わした。これにより、応答の最大値あるいは必要耐力はパルス入力(地動パルスの加速度・速度・変位の各ピーク値に $PGA \cdot PGV \cdot PGD$ を用いる)及び構造物特性(固有周期、降伏震度、想定塑性率)といった数少ない特性値をもって関連付けることができた。

本研究から得られた予測式を用い、地動パルスのピーク値の影響を簡単に考察することができる。例えば、極々短い固有周期に対し、必要降伏震度は構造物特性に係わず PGA で決まる。また、中周期では最大応答速度はほぼ PGV で決まる。更に、長周期では応答変位は PGD に近づくことなど、パルス地動についても従来と同様な知見が得られた。しかし、ここでいう固有周期の長短は降伏震度や地動パル

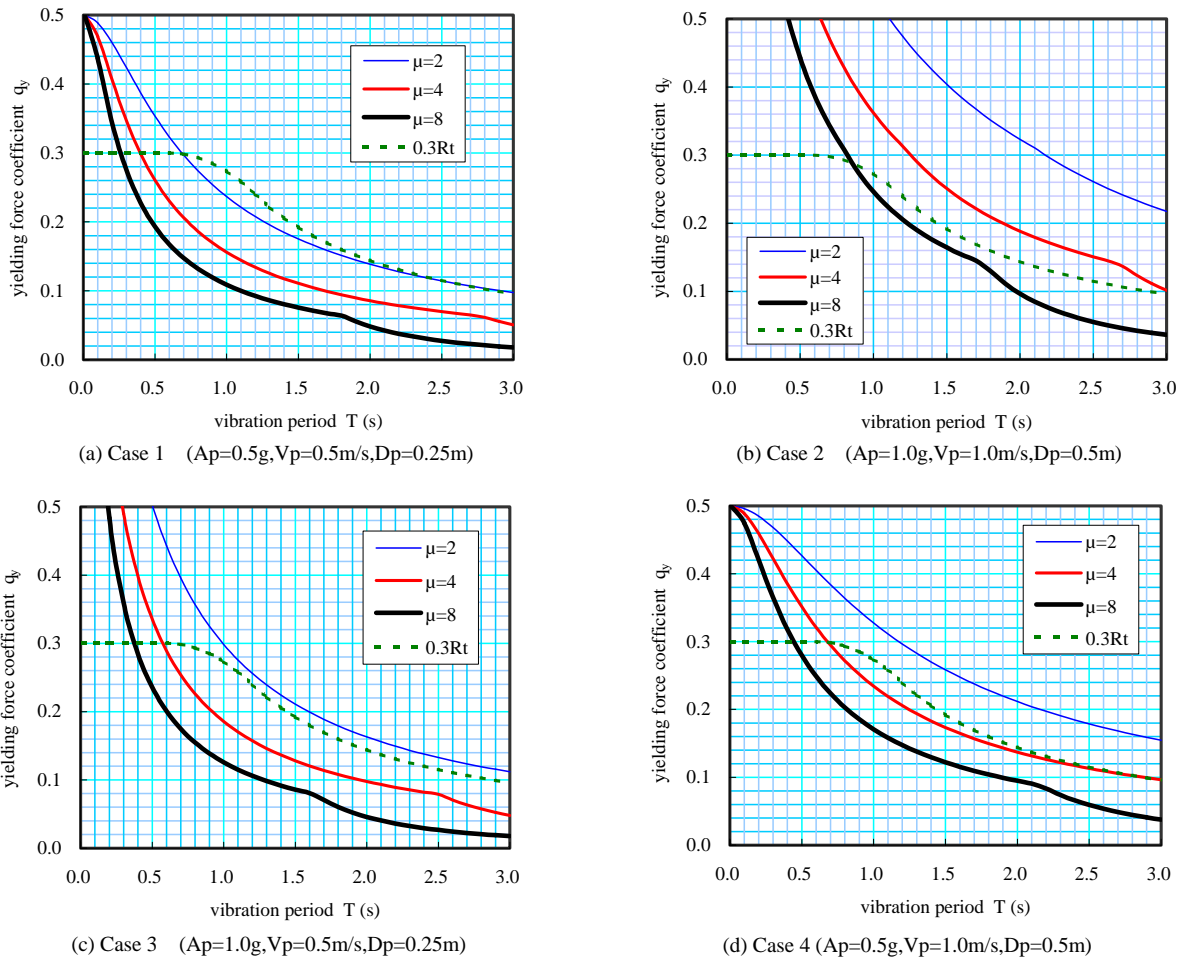


Fig.7 Required strength spectra for different pulse inputs

スの各ピーク値にも依存するものであり、弾塑性応答もパルス入力及び構造物特性のすべての因子に影響される。固有周期が特に長いものではない場合（例えば2秒以下）、必要降伏震度はPGAに比例して大きくなるが、塑性率の平方根・(PGA/PGV)・固有周期の増大につれて小さくなる。

今後の課題として、最近の直下型地震を検討し、正負矩形パルス入力の形状を幾つかに分類し、解析式の誘導と共に時刻歴応答解析により検証を行う必要がある。また、多自由度系・完全弾塑性ではない復元力特性などに対しても本研究の手法を適用し、直下型地震に対する地震応答及び被害予測の簡便な方法を開発していきたい。

謝辞：本研究の一部は平成15年度科学研究費補助金（課題番号 No. 15360304）による。

参考文献

- 1) Caughey, T.K.: Equivalent linearization techniques, Journal of the Acoustical Society of America, Vol.35, No.11, pp.1706-1711, 1963.11.
- 2) 秋山宏：建築物の耐震極限設計，東京大学出版会，1980.
- 3) 川瀬博：震源近傍における入力地震動評 $z h a z$ は z 値，日本建築学会，第28回地盤震動シンポジウム，pp.85-96，2000.
- 4) 井上範夫，堤則男，中村孝也：RC構造物の応答に対する地震動のエネルギー入力性状の影響，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.19.2，pp.531-536，1997.6.

- 5) 大井謙一，高梨晃一，本間靖章：地震動のエネルギー入力率スペクトル，日本建築学会構造系論文集，No.420，pp.1-7，1991.2.
- 6) Tanahashi, R.: Studies on the nonlinear vibrations of structures subjected to destructive earthquake, Proceedings of 1st WCEE, pp.6-1 ~ 6-12, 1956.
- 7) 柴田明徳：最新耐震構造解析，第2版，森北出版，pp.118-120.
- 8) 河村廣：地震時構造物応答の極限解析 - 構造物の極限耐震性評価の基礎理論，第27回構造工学シンポジウム，pp.95-102，1981.2.
- 9) Cuesta, I., Aschheim, M.: Isoductile strengths and strength reduction factors of elasto-plastic SDOF systems subjected to simple waveforms, Earthquake Engng Struct. Dyn., pp.1043-1059, April 2001.
- 10) 境有紀，南忠夫，壁谷澤寿海：構造物の弾塑性地震応答を考慮して地震動をサイン波1波に単純化する方法，構造工学論文集，日本建築学会，Vol.45B，pp.81-86，1999.3.
- 11) Hall, J., Aagaard, B.: Fundamentals of the near-source problem, Proceedings of the 5th Caltrans Seismic Research Workshop, 1998.6.
- 12) Alavi, B., Krawinkler, H.: Consideration of near-fault ground motion effects in seismic design, Proceedings of 12th WCEE, paper No.2665, 2000.
- 13) 久田嘉章：震源近傍の強振動 - 改正基準法の設計用入力地震動は妥当か？ - ，第29回地盤震動シンポジウム，日本建築学会，pp.99-110，2001.
- 14) 山田稔，河村廣，谷明勲，藤谷秀雄：パルス応答解析による1質点系の地震応答評価，日本建築学会構造系論文集，No.369，pp.48-59，1986.11.
- 15) 建設省建築研究所：新耐震設計法（案），建築研究報告，No.79，1977.
- 16) 日本建築学会：建築耐震設計における保有耐力と変形性能，pp.53-62，1990.
- 17) 石丸辰治：構造物の動的解析（7.2パイリニア履歴系の地震動に対する挙動），建築技術，No.375，pp.149-160，1982.11.