

パルス性地震動の特性化法の提案と地震時建物挙動の解明

Proposal of Characterization Method of Pulse-like Ground Motions and Response Analysis of Buildings

京都大学大学院 工学研究科 建築学専攻 准教授 杉野 未奈

(研究計画ないし研究手法の概略)

1. はじめに

内陸地殻内地震の震源近傍で発生するパルス性地震動は、継続時間は短いものの大振幅であり、1995年兵庫県南部地震や2016年熊本地震などでは建物に甚大な被害を与えた。本研究では、多様なパルス性地震動に対する多様な建物の安全性を簡便に検証可能とするため、パルス性地震動を複数の特性値により定義される数学的に単純な波に簡便に置換する方法を提案した。更に、パルス性地震動の特性が建物応答に及ぼす影響を分析した。

2. パルス性地震動の特性化法の提案

2.1 Gabor Wavelet

特性化に用いる Gabor Wavelet の速度波形を式(1)~(3)に示す。

$$\dot{y}_0(t) = V \cdot \exp\left\{-\left(\frac{2\pi}{T_H} \cdot \frac{t'}{\sigma}\right)^2\right\} \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{T_H} \cdot t'\right) \quad (1)$$

$$t' = t - 3\sigma / (2\pi / T_H) \quad (2)$$

$$\sigma = k\pi / 3 \quad (3)$$

ここで、 t は時間であり、 T_H を調和波の周期、 V をパルス速度振幅、 k を波数とよぶ。図1に波数 k を変化させた場合のGabor Waveletの速度時刻歴波形を示す。

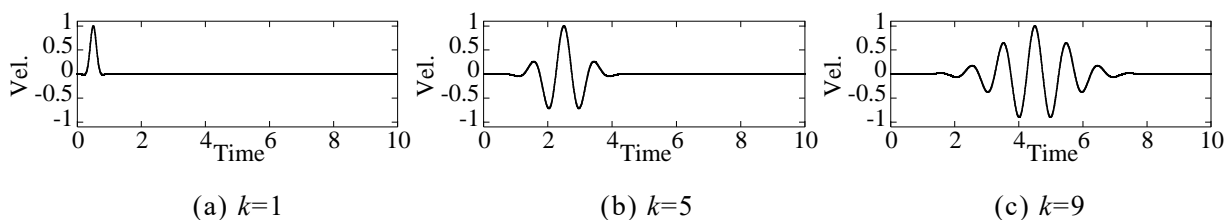


図1 Gabor Wavelet の速度時刻歴波形($V=1, T_H=1$)

2.2 特性化法

本研究では、地震動の擬似速度応答スペクトル ${}_pS_v(h, T)$ を用いることにより、積分やフィルター処理を行うことなく、周期・振幅・継続時間に関する特性値であるパルス周期 T_p 、パルス速度振幅 V 、波数 k が求まる特性化法を提案した。

1) パルス周期 T_p

パルス周期 T_p は、減衰定数 $h=0.05$ の擬似速度応答スペクトルの最大値 ${}_pS_{v\max}(h=0.05)$ の周期とする。なお、Gabor Wavelet の波形を求める上で必要となる T_H は、Gabor Wavelet

のフーリエスペクトルの理論式に基づいて定式化した式(4)で求める。

$$T_H = T_p \left(1 + \sqrt{1 + 8/\sigma^2} \right) / 2 \quad (4)$$

ここで、 σ は式(3)で定義したとおり k から求まる。

2) 波数 k

本研究では、異なる h の ${}_p S_{v\max}(h)$ の比から波数 k を求める方法を新たに提案した。

波数 k の評価式を構築するため、Gabor wavelet の非減衰における ${}_p S_{v\max}(h=0)$ に対する減衰定数 h の ${}_p S_{v\max}(h)$ の比を式(5)で回帰することを考える。

$${}_p S_{v\max}(h) / {}_p S_{v\max}(h=0) = (1 + \alpha k h)^\beta \quad (5)$$

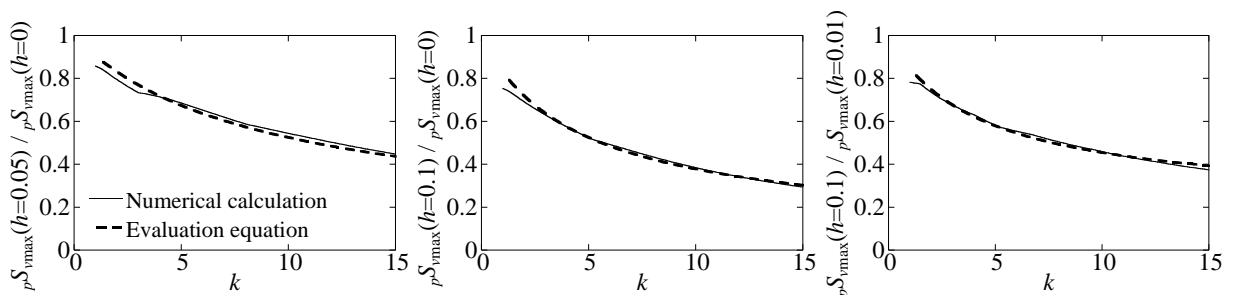
上式について数値計算結果 ($T_H=1$, $V_p=1$, $k=1\sim 15$ で 0.1 刻み, $h=0.01\sim 0.2$ で 0.01 刻み) との平均二乗誤差が最小となる α , β を求めた結果、 $\alpha=3.05$, $\beta=-0.696$ となった。図2(a), (b)では、 $h=0.05$, $h=0.1$ での数値計算および回帰式を示す。同図より、式(5)で十分に回帰できていることが分かるが、観測地震動の場合は非減衰の応答スペクトルの値が安定しないと考えられる。そこで、微小な h を与えることにより応答スペクトルを平滑化することとする。本研究では ${}_p S_{v\max}(h=0.01)$ に対する ${}_p S_{v\max}(h=0.1)$ の比を k の評価に用いる。図2(c)には、 ${}_p S_{v\max}(h=0.01)$ に対する ${}_p S_{v\max}(h=0.1)$ の比の数値計算結果および回帰式を示す。ここで、回帰式では、式(5)に $h=0.1$ と $h=0.01$ を代入した結果の比とした。同図より、 ${}_p S_{v\max}(h=0.01)$ に対する ${}_p S_{v\max}(h=0.1)$ の比についても、式(5)を用いることで数値計算結果を十分に評価できることが分かる。

ここで、 ${}_p S_{v\max}(h)$ となるときの周期と T_p は概ね等しいので、式(5)より式(6)の関係が成り立つ。

$${}_p S_v(h=0.1, T=T_p) / {}_p S_v(h=0.01, T=T_p) \approx (1 + \alpha k \cdot 0.1)^\beta / (1 + \alpha k \cdot 0.01)^\beta \quad (6)$$

式(6)を k について解いた式(7)を k の評価式とする。

$$k = \frac{1 - \left\{ {}_p S_v(h=0.1, T=T_p) / {}_p S_v(h=0.01, T=T_p) \right\}^{1/\beta}}{\alpha \left[0.01 \left\{ {}_p S_v(h=0.1, T=T_p) / {}_p S_v(h=0.01, T=T_p) \right\}^{1/\beta} - 0.1 \right]} \quad (7)$$



(a) ${}_p S_{v\max}(h=0.05) / {}_p S_{v\max}(h=0)$ (b) ${}_p S_{v\max}(h=0.1) / {}_p S_{v\max}(h=0)$ (c) ${}_p S_{v\max}(h=0.1) / {}_p S_{v\max}(h=0.01)$

図 2 Gabor Wavelet の ${}_p S_{v\max}$ の比と k の関係

3) パルス速度振幅 V

パルス速度振幅 V は、Gabor Wavelet のフーリエスペクトルの理論式に基づいて定式化した式(8)で求める。

$$V = \frac{{}_p S_v(h=0.05, T=T_p)}{(1+\alpha k \cdot 0.05)^\beta \cdot \gamma} \quad (8)$$

ここで、 γ は式(9)である。

$$\gamma = \sqrt{\pi} \sigma (T_H / T_p) / 2 \cdot \left[\exp \left\{ - \left((T_H / T_p + 1) \sigma \right)^2 / 4 \right\} + \exp \left\{ - \left((T_H / T_p - 1) \sigma \right)^2 / 4 \right\} \right] \quad (9)$$

3. 特性化法の適用例

本研究では、提案した特性化法の適用例として観測地震動のパルス特性値を求めた。ここでは、パルス性地震動として知られている代表的な3地震動（1979年インペリアルバレー地震の Meloland、1994年ノースリッジ地震の Rinaldi Receiving Sta.、1999年台湾集集地震の TCU068）の最大速度方向における特性化結果を例示する。図3に本研究で求めた特性化パルス性地震動と観測地震動の ${}_p S_v(h, T)$ を示す。同図より、概ね良好に特性化できていることが分かる。

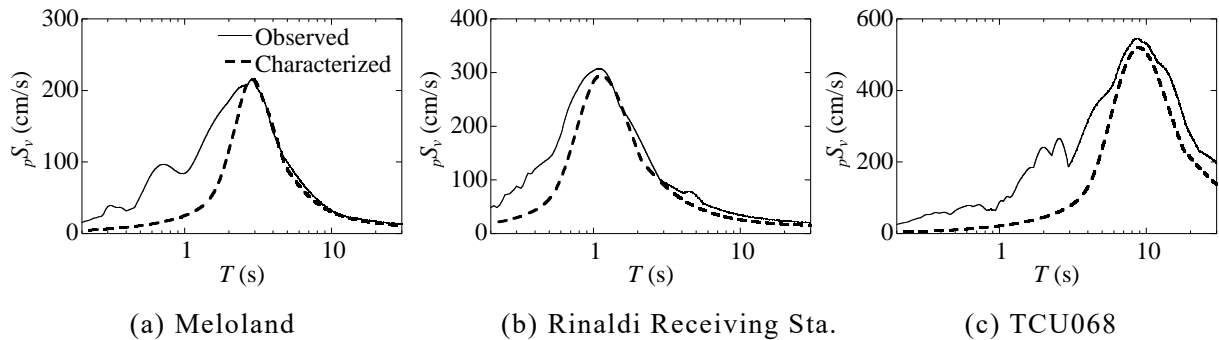


図3 ${}_p S_v$ の特性化結果 ($h=0.05$)

4. 地震時の建物挙動

本研究では、地震動のパルス性特性値が建物応答に及ぼす影響を分析した。

図4に示すような S_a-S_d スペクトルを見れば、どのような固有周期の建物がどの程度の加速度や変位を被るか容易に理解することができる。同図には、 $h=0.1$ での特性化パルス性地震動のスペクトルと日本の設計において用いられている開放工学的基盤でのスペクトル（以下、BSLJ）の S_a-S_d スペクトルを示す。なお、BSLJは $h=0.05$ で定義されているため、 $h=0.1$ のスペクトルとするために式(10)の F_h を乗じている。

$$F_h = 1.5 / (1 + 10h) \quad (10)$$

図4(a)には、 $T_p=2$, $k=3$ として、 V のみが増加した場合の S_a-S_d スペクトルを示す。BSLJでは、固有周期 T が大きくなるほど最大応答変位が大きくなることが分かる。一方、特性化地震動では $T=2\sim3$ で最大応答変位が最大となり、それ以上の T でも概ね地動変位と同程度の最大応答変位となることが分かる。図4(b)には、 $V=100$, $k=3$ として、 T_p のみが増加した場合の S_a-S_d スペクトルを示す。 V を一定としたため、 T_p が小さくなるにつれて地動変位は小さくなる。しかし、 T が T_p より大きい場合、 T に関わらず最大応答変位が概ね地動変位となり一定になる。図4(c)には、 $T_p=2$, $V=100$ として、 k のみが増加した場合の S_a-S_d スペクトルを示す。 k が大きくなるにつれて、 $T=T_p$ の応答が大きくなることを確認できる。

次に、減衰定数 h が建物応答に及ぼす影響を分析するために、図5に Gabor Wavelet および観測地震動・告示波の ${}_p S_v(h=0.05, T)$ に対する ${}_p S_v(h=0.2, T)$ の比を示す。同図には、式(10)

の F_h を併せて示す。図 5(a)より、Gabor Wavelet は k が小さいときは F_h に比べて大きいですが、 k が大きくなるにつれて T_p 付近で F_h に近づく。図 5(b)に示す 2016 年熊本地震本震で観測された地震動(EW 方向)では、パルス周期 T_p である約 3 s 付近で、西原村小森は k の小さい Gabor Wavelet と、KMM004 は k の大きい Gabor Wavelet と同様の傾向であることがわかる。図 5(c)より、2011 年東北地方太平洋沖地震 OSKH02(NS 方向)では 6 s 周辺で F_h よりも小さくなる範囲があり、長周期長時間地震動では Gabor 波・パルス性地震動と比べて h が応答スペクトルに与える影響が大きいことがわかる。また、Gabor 波・パルス性地震動と比較して、OSKH02・告示波ともに値が小さくなる T の範囲が広いことが確認できる。

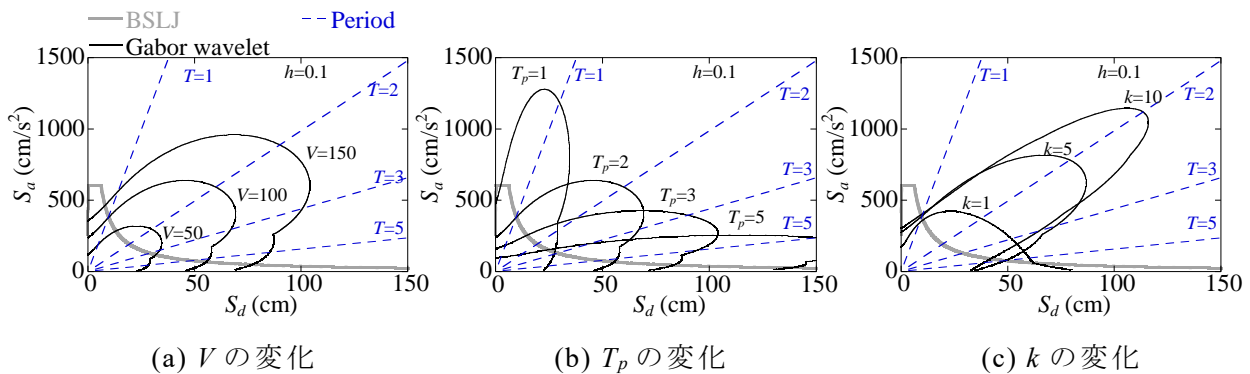


図 4 S_a - S_d スペクトル ($h=0.1$)

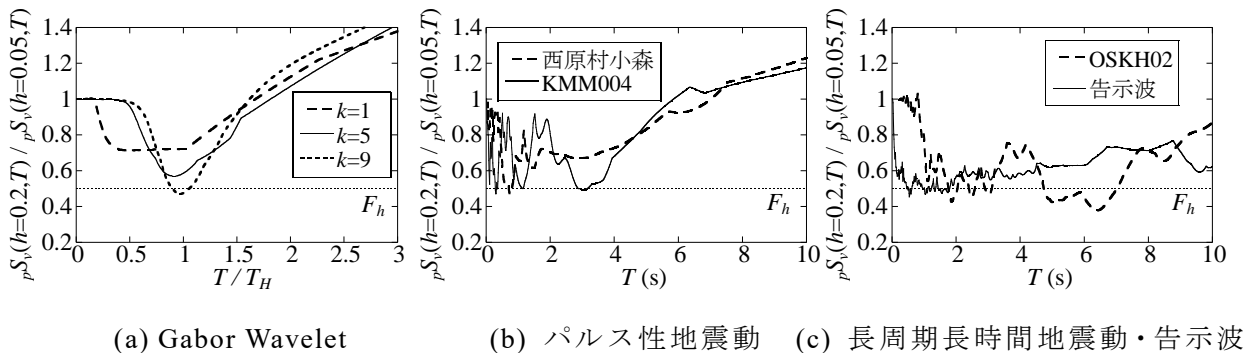


図 5 ρS_v の比の比較 ($h=0.2, h=0.05$)

(実験調査によって得られた新しい知見)

本研究では、パルス性地震動をパルス周期・パルス速度振幅・波数の 3 つのパルス特性値を用いて Gabor Wavelet に特性化する簡便な方法を新たに提案した。本手法では、異なる減衰定数における応答スペクトルの最大値とそのときの周期を求め、本研究で提案した評価式に代入することでパルス特性値を求める。そして、提案した特性化法を観測されたパルス性地震動に適用してパルス特性値を明らかにした。更に、特性化パルス性地震動の S_a - S_d スペクトルや F_h スペクトルにより、パルス性地震動が建物に与える影響を把握した。

(発表論文)

- 杉野未奈, 田中和樹, 林康裕: Gabor 波入力に対する建物応答の減衰効果, 日本地震工学会大会, P1-27, 2019.9.
- M. Sugino, K. Tanaka, Y. Hayashi: Proposal of Simplified Characterization Method of Pulse-like Ground Motions, 17th World Conference on Earthquake Engineering, 2020.9. (in print)