



断層近傍のパルス性地震動に対する建物応答と建物被害

森井雄史¹⁾, 杉野未奈²⁾, 林康裕³⁾

1) 正会員 大崎総合研究所, 研究部長 博士(工学)

e-mail: t.morii@ohsaki.co.jp

2) 正会員 京都大学大学院 工学研究科 建築学専攻, 准教授 博士(工学)

e-mail: rp-sugino@archi.kyoto-u.ac.jp

3) 正会員 京都大学大学院 工学研究科 建築学専攻, 教授 工学博士

e-mail: hayashi@archi.kyoto-u.ac.jp

要 約

本論文では, 2016年熊本地震で注目されたフリングステップを伴うパルス地震動が, 指向性パルスによる地震動と, どのように建物応答への影響度が異なるかを明らかにすることを目的とする. 建物の解析モデルは多質点の非線形せん断質点系モデルとし, 建物の軒高と構造種別を解析変数とする. 軒高は実際に存在する建物を想定し, 低層建物から超高層建物を対象とする. 構造種別は非免震建物のS造とRC造, および免震建物とする. 地震応答解析の結果を基に, 過去の地震被害事例の解釈を試みる.

キーワード: 断層近傍, フリングステップ, 指向性パルス, 超高層, 免震, 最大応答

1. はじめに

南海トラフの巨大地震の発生が確実視され, 長周期長時間地震動による建物被害が懸念されている. その一方で, その発生前後には, 内陸地殻内地震が多発すると言われている. このような状況の下, 2016年熊本地震では, 2mにもおよぶ永久変位(フリングステップ)を伴う周期1~3秒程度のパルス波形の地震動(パルス性地震動)が観測されている¹⁾. また, 上町断層帯近傍にある大阪市域の予測地震動^{2,3)}の中には, 設計用地震動レベルを大きく超え, ある特定周期のパルス波形を含む地震動が含まれており, フリングステップの有無が建物応答に及ぼす影響を把握しておく事は, 地震対策を考える意味でも重要である.

フリングステップを伴うパルス性地震動は, 地表地震断層が出現するような規模の大きい地殻地震が発生した場合, 断層極近傍域において生成される可能性が指摘されている⁴⁾. そして, フリングステップを伴うパルス性地震動は, 地震発生層以浅に長周期地震動生成域(LMGA)を設定した地震動予測法により評価可能なことが明らかとなっている⁵⁾. 一方, 建物被害については, 1999年台湾集集地震のTCU068観測点や2016年熊本地震の西原村小森で, フリングステップを伴うパルス性地震動が観測されたが, 周辺の建物には倒壊などの深刻な被害は見られていない^{6,7)}. しかし, 観測点周辺には中層建物すら存在せず, 免震建物や超高層建物などの長周期建物への影響は明らかではない. また, フリングステップの有無が建物応答に及ぼす影響に関して, 正弦波1波と正弦波1.5波を用いて解析的に検討されている事例⁸⁾も見られているが, S造建物の4階, 6階, 13階といった限定的な建物モデルを用いた分析に留まっており, 超高層建物や免震建物への影響について分析されている訳ではない.

本論文では、従来の指向性パルスによる地震動と、フリングステップを伴うパルス性地震との違いが建物応答、建物被害に及ぼす影響を明らかにすることを目的とする。構造種別は非免震建物のS造建物とRC造建物および免震建物とし、低層建物から超高層建物までを検討対象とする。まず第2章では、パルス性地震動を正弦波、Ricker waveletを用いて特性化するとともに、1質点系モデルを用いて、パルス性地震動による応答特性を分析する。本論では、フリングステップを伴うパルス性地震動を正弦波パルス、指向性パルスによる地震動をRicker waveletと位置づける。第3章では、実在する超高層建物のデータを元に、解析対象とする建物の諸条件および解析モデルを作成し、パルス性地震動を数学的モデルで特性化した正弦波、Ricker waveletを用いて、パルス性地震動が建物応答に及ぼす影響の特性を把握する。建物の解析モデルは多質点の非線形せん断質点系モデルとし、建物の軒高と構造種別を解析変数とする。最後に、第4章では、観測されたパルス性地震動を用いて建物の地震応答解析を実施し、特性化したパルス性地震動による結果との整合性を確認するとともに、地震被害事例の解釈を試みる。

2. パルス性地震動による基本応答特性

2.1 パルス性地震動の特性化

時間領域や周波数領域で複雑に見えるパルス性地震動も、数少ない特性値を用いて特性化することで、その応答特性を理解しやすくなる。ここでは、特性化したパルス性地震動の加速度波形として、正弦波パルスと Ricker wavelet の2種類を用い、応答特性を分析する。パルス速度 V_p 、パルス周期 T_p とすると、特性化したパルス性地震動は表1に示すように表される⁹⁾。また、正弦波パルスと Ricker wavelet による時刻歴波形を図1に示す。正弦波パルスの変位波形は、永久変位が残るようなパルス波形となっているのに対し、Ricker wavelet の変位波形は0に戻ってくる。そのため、正弦波パルスはフリングステップを伴うパルス性地震動を特性化したもの、Ricker wavelet は指向性パルスを特性化したものと位置づける。

表1に示すように、パルス変位振幅(最大地動変位) D_p はパルス周期 T_p とパルス速度振幅 V_p の積に比例し、 T_p や V_p が大きいほど増大する。言い換えれば、パルス速度振幅 V_p が同じでも、パルス周期 T_p が長いほどパルス変位振幅 D_p は増大する。その一方で、パルス変位振幅 D_p と、パルス周期 T_p とパルス速度振幅 V_p の積を関係づける比例定数 α は、正弦波パルスでは0.5、Ricker waveletでは約0.37となり、 V_p と T_p が同じ場合には、正弦波パルスの方がRicker waveletよりも D_p が大きくなる。また、連続する正弦波の場合には、 $\alpha = 1/(2\pi) \approx 0.16$ となることから推察できるように、波数が増えるにつれて比例定数 α は減少する。

表1 特性化したパルス性地震動⁹⁾

	正弦波パルス	Ricker wavelet
加速度波形	$\ddot{y}_0(t) = A_p \sin(\omega_p t) \quad (0 \leq t \leq T_p)$	$\ddot{y}_0(t) = A_p (\tau_R^2 - 1) \exp(-\tau_R^2 / 2) \quad (0 \leq t \leq 2T_p)$
速度波形	$\dot{y}_0(t) = \frac{V_p}{2} \{1 - \cos(\omega_p t)\} \quad (0 \leq t \leq T_p)$	$\dot{y}_0(t) = -\sqrt{e} \tau_R V_p \exp(-\tau_R^2 / 2) \quad (0 \leq t \leq 2T_p)$
変位波形	$y_0(t) = D_p \left\{ \frac{t}{T_p} - \frac{1}{2\pi} \sin(\omega_p t) \right\} \quad (0 \leq t \leq T_p)$	$y_0(t) = D_p \exp(-\tau_R^2 / 2) \quad (0 \leq t \leq 2T_p)$
加速度振幅	$A_p = \pi V_p / T_p$	$A_p = \sqrt{2e} \pi V_p / T_p$
変位振幅 $D_p = \alpha(T_p \cdot V_p)$	$\alpha = 0.5$	$\alpha = \sqrt{e} / \sqrt{2\pi} \approx 0.37$
円振動数ほか	$\omega_p = 2\pi / T_p$	$\tau_R = \sqrt{2\pi}(t / T_p - 1)$

※ e :自然対数の底

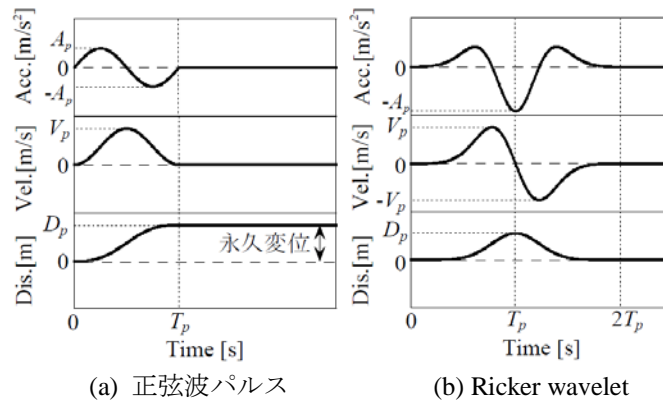


図1 特性化したパルス性地震動⁹⁾

2.2 1質点系モデルの応答特性

まず、パルス速度 $V_p = 100 \text{ cm/s}$ で、パルス周期 T_p をパラメータ($T_p = 1 \text{ s}, 2 \text{ s}, 3 \text{ s}$)とした場合の正弦波パルスとRicker waveletの非減衰擬似速度応答スペクトル ρS_v と非減衰変位応答スペクトル S_d を図2に示す。パルス周期 T_p の長周期化により、非減衰擬似速度応答スペクトル ρS_v のピーク周期も長周期化するが、 ρS_v のピーク値は変化していない。これに対して、非減衰変位応答スペクトル S_d は、パルス周期 T_p の長周期化によって、 S_d のピーク周期が長周期化するとともに、 D_p の増大に伴い長周期領域での S_d の値も大きくなっている。そのため、非減衰擬似速度応答スペクトル ρS_v と非減衰変位応答スペクトル S_d ではパルス周期 T_p の影響は大きく異なる。また、いずれのパルス性地震動についても、非減衰擬似速度応答スペクトル ρS_v は、概ね $T = T_p$ でピークを有している。

次に、非減衰変位応答スペクトル S_d を最大地動変位 D_p で基準化して図3(a)に示す。正弦波パルスの非減衰変位応答スペクトル S_d は、固有周期 T が長くなるにつれて単調増加し、最大地動変位 D_p に漸近する。そのため、フリングステップを伴う正弦波パルスは、長周期建物ほど大きな変形を生じ、 D_p に近い応答変位が生じる可能性がある。これに対してRicker waveletでは、パルス周期 T_p よりもやや長周期側の固有周期 T でピークを有し、最大地動変位 D_p よりも大きな応答変位が生じている。そのため、 D_p が同じであれば、正弦波パルスよりもRicker waveletの方が大きな応答変位が生じる可能性がある。さらに、固有周期 T をパルス周期 T_p で基準化したスペクトルを図3(b)に示し、基準化した応答値 S_d/D_p を T/T_p に基づいて分析する。正弦波パルスでは、 $T/T_p > 2$ で応答値 S_d/D_p は1に漸近していく。逆に、 $T/T_p < 1$ では S_d/D_p は0.5以下となり、応答値 S_d は D_p の半分以下となっている。一方、Ricker waveletは入力波の周波数特性¹⁰⁾から、 $T/T_p = 1.4$ 付近でピークを有し、 S_d/D_p は1.5程度となる。また、 $4T_p$ の範囲までは入力成分が含まれており、変位応答倍率との関係から $1 < T/T_p < 3$ の範囲で応答値 S_d/D_p は増大している。一方、 $T/T_p < 0.5$ では、正弦波パルスと同様に、 S_d/D_p は0.5以下となっている。Ricker waveletでは $T/T_p = 1.4$ 付近でピークを有するため、 $1 < T/T_p$ の範囲では、固有周期 T の増大に伴う応答変位の増加傾向も大きく、建物の非線形化に伴う長周期化の影響はRicker waveletの方が顕著となる。正弦波パルスとRicker waveletとを比較すると、 $T/T_p < 3$ では、Ricker waveletの方が応答値 S_d/D_p は大きくなるが、 $T/T_p > 3$ では、正弦波パルスの方が応答値 S_d/D_p は大きくなる。以上より、フリングステップを伴う正弦波パルスは、指向性パルスであるRicker waveletに比べて中低層建物の被害が生じにくく、長周期建物に限定して大きな被害を生じさせる可能性がある。

次に、減衰増大の影響について分析する。変位応答スペクトル S_d の減衰定数 h_0 を0.05, 0.1, 0.2と変化させ、非減衰の変位応答スペクトルとの比(以下、応答低減率と呼ぶ)を図4に示す。2種類の特性化したパルス性地震動のいずれについても、 $T/T_p \approx 0$ や $T/T_p \gg 1$ においては、応答低減率は0.9以上となっており、大きな応答低減効果は現れていない。 $T/T_p \approx 1$ 付近では、減衰増大による応答低減率が比較的大きいようにも見えるが、慣用されている加速度低減率 $F_h = 1/(1+10h_0)$ と比較すると、応答低減率は小さくなっている。これは、パルス性地震動の継続時間が短い(波数が少ない)ことと対応している。以上より、パルス性地震動に対しては、減衰増大による応答低減効果は期待しにくい事が分かる。

最後に、免震建物と非免震建物の最大応答を特徴づける要因の差について分析を行う。非免震建物の

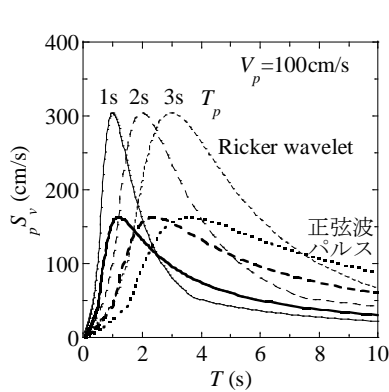
建物周期 T と建物高さ H との関係，建物高さ H と等価高さ H_e との関係を，係数 β, γ を用いて，(1),(2)式のように表すと，非免震建物に生じる平均変形角 R_0 は，変位応答 S_d や擬似速度応答 S_v を基に，(3)式のように近似できる¹¹⁾．

$$T = \beta H \quad (1)$$

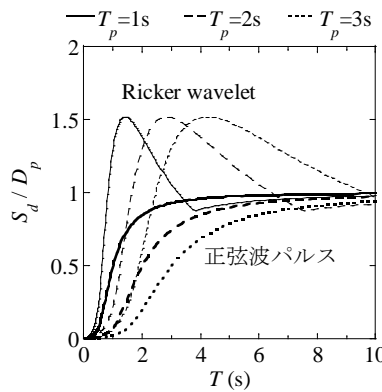
$$H_e = \gamma H \quad (2)$$

$$R_0 \doteq S_d F_h / H_e \doteq {}_p S_v F_h T / (2\pi \gamma H) = (\beta F_h / 2\pi \gamma) {}_p S_v \quad (3)$$

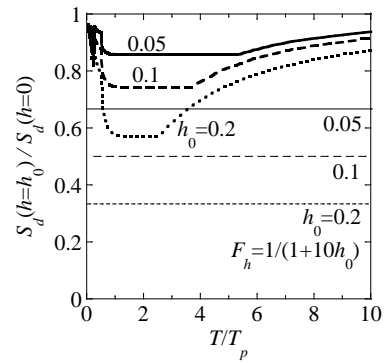
なお，係数 β は建物周期 T と建物高さ H とを関係づける係数であり，係数 γ は建物高さ H と等価高さ H_e とを関係づける係数である．係数 γ は建物の固有モード成分に応じて算定され，曲げ変形やせん断変形の割合によっても変化する．そのため，建物の特定層への変形集中や長周期化の影響はあるにしても，建物に生じる最大層間変形角は， ${}_p S_v$ （主としてパルス周期 T_p とパルス速度 V_p ）によって概ね把握できる（図2(a)）．どのような建物で最大層間変形角が大きくなるかは，建物の固有周期 T とパルス周期 T_p の比 T/T_p で決まり，最大層間変形角の最大値はパルス速度 V_p によって決まる．そして，パルス速度 V_p が同じであれば， $T \doteq T_p$ では，正弦波パルスよりもRicker waveletの方が大きくなる．その一方，免震建物の免震層の最大変位は， S_d （あるいは D_p ）によって概ね把握することができる（図2(b)）．



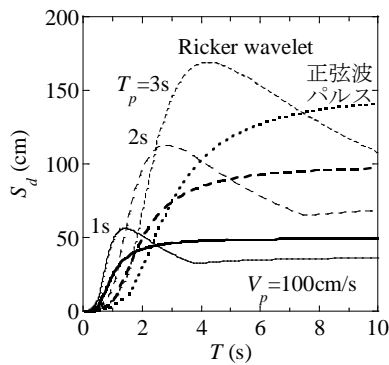
(a) 擬似速度応答スペクトル



(a) S_d / D_p

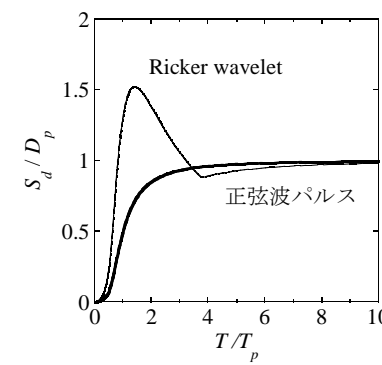


(a) 正弦波パルス



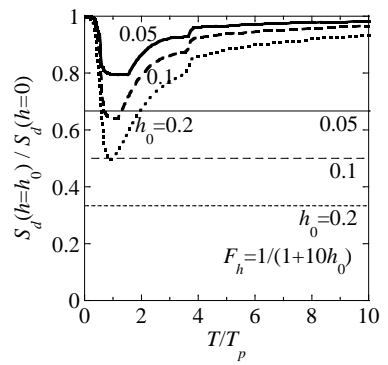
(b) 変位応答スペクトル

図2 非減衰応答スペクトル
($V_p = 100 \text{ cm/s}$)



(b) S_d / D_p と T/T_p

図3 基準化した非減衰
変位応答スペクトル



(b) Ricker wavelet

図4 減衰による応答低減率

3. 特性化したパルス性地震動による建物応答の分析

3.1 建物の多質点系解析モデル

解析対象はS造，RC造の非免震建物と，RC造の免震建物とする．構造種別ごとに軒高 H をパラメー

タとし、復元力特性は文献¹²⁾のモデル化方法に基づいて、非線形せん断質点系モデルを構築する。想定する建物モデルは、大阪市域における超高層建物データを調査した結果¹³⁾に基づいて設定する。

構造種別ごとの解析モデルの諸元を表2に示す。まず、非免震建物(S造, RC造)の軒高 H は、S造では12 m～300 m, RC造では12 m～204 mまで、 $\Delta H=12$ m刻みで変化させる。階高 h_f はS造では4 m, RC造では3 mとしており、建物階数はS造では3階～75階, RC造では4階～68階となる。建物モデルの1次固有周期 T_1 および設計用ベースシア係数 C_B は、図5に示すように、超高層建物データの調査結果¹³⁾から、本論文において次式のように近似している。

$$T_1 = \beta H \text{ (S造 : } \beta=0.025, \text{RC造 : } \beta=0.02) \quad (4)$$

$$C_B = C_0 \cdot 1.6 T_c / T_1 = 0.96 C_0 / T_1 \text{ (S造 : } C_0=0.3, \text{RC造 : } C_0=0.2) \quad (5)$$

ここで、 T_c は振動特性係数 R_t の2種地盤に基づいて $T_c=0.6$ とする。振動特性係数 R_t は、建物の1次固有周期 T_1 が T_c 以下となると一定値で定義されるが、本論では T_1 が小さくなるに従いベースシア係数 C_B を増加させる¹⁴⁾。建物モデルの初期剛性の高さ方向の分布は、最上層に対する最下層の割合を1:3とする。質点質量は建物の建築面積を900 m²、単位面積当たりの重量をRC造は9.8 kN/m²、S造建物はその0.8倍と仮定し、各層一定で設定する。建物モデルの復元力特性は、S造はノーマルトリニア、RC造は武田モデルを模した剛性劣化型モデルで設定する(図6)。各層の初期剛性 K_1 は、(4)式から求めた1次固有周期 T_1 と、設定した剛性分布から逆算する。構造種別ごとに設定した復元力特性に従い、逆算した初期剛性 K_1 と(5)式から求めた設計用ベースシア係数 C_B および建物重量(総質点重量)から、第1層目の折点変形角 R_1 、 R_2 と各折点せん断力 Q_1 、 Q_2 を設定する。各折点せん断力 Q_1 、 Q_2 と設計用ベースシア係数 C_B との関係は文献¹⁵⁾、¹⁶⁾を参考に決めている。なお、各層の折点変形角は、第1層と共通にしている。

表2 建物の解析モデルの緒元

	S造	RC造, 免震
$\beta [T_1=\beta H]$	0.025	0.02
C_0	0.3	0.2
階高 h_f (m)	4	3
軒高 H (m)	12～300	12～204
軒高の増分 ΔH (m)	12	
単位面積重量 (kN/m ²)	7.84 (9.8×0.8)	9.8
建築面積 (m ²)	900 (30×30)	
剛性分布	台形分布(1:3)	
減衰定数	0.02	0.03
減衰モデル	初期剛性比例型	

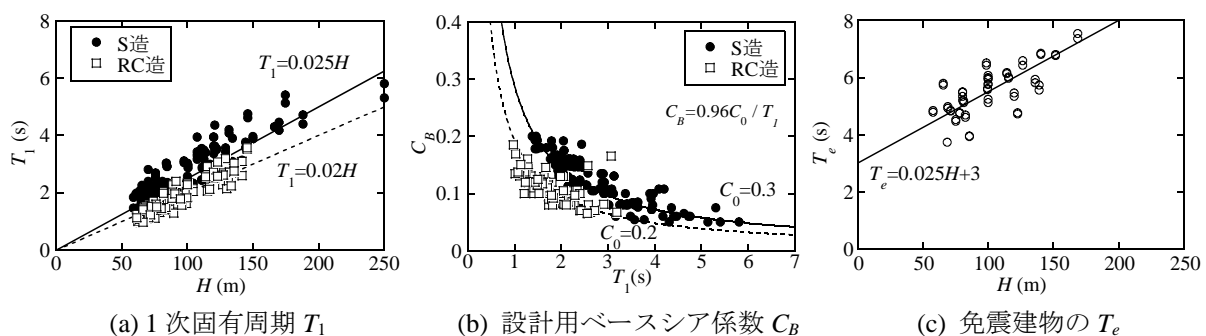
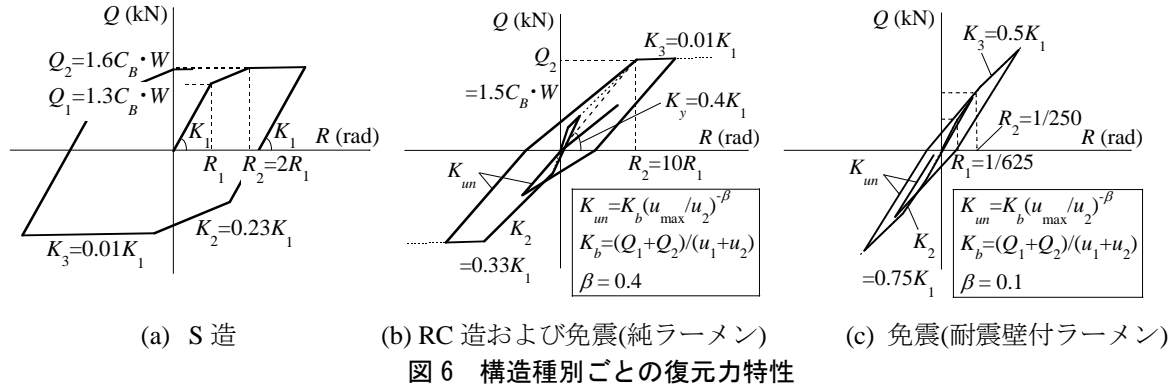


図5 建物モデルの1次固有周期と設計用ベースシア係数



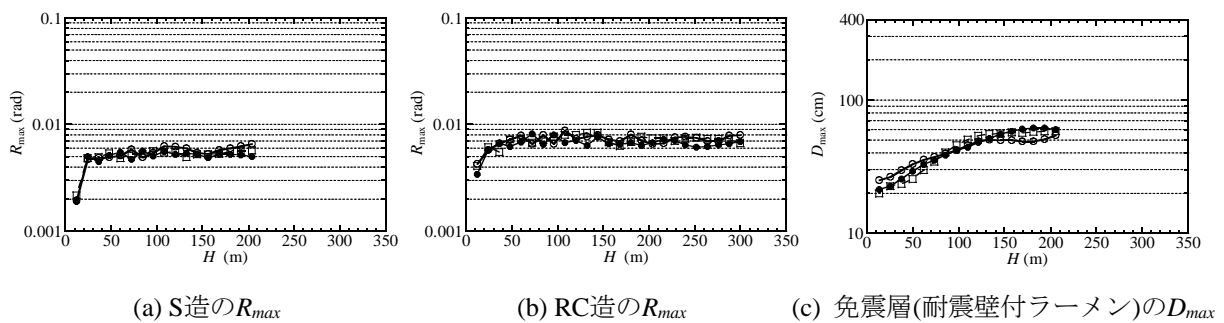
免震建物の上部構造は、非免震の RC 造と同じ方法でモデル化する。復元力特性はラーメン架構(以下、純ラーメン)と耐震壁付ラーメン架構(以下、耐震壁付ラーメン)を想定した 2 種類を設定する(図 6)。免震層は線形モデルで表し、免震層の剛性 k_e は総質点質量 M ，レベル 2 地震動時の 1 次固有周期 T_e を用いて、次式で算定する。 T_e についても同様に、超高層建物データの調査結果¹³⁾から、本論文において近似している(図 5(c))。

$$T_e = 0.025H + 3 \quad (6)$$

$$k_e = M (2\pi / T_e)^2 \quad (7)$$

免震層の質量は上部構造の質点の 2 倍とし、免震層の減衰は粘性減衰で表して、減衰定数 h_e は 0.2 となるように減衰係数を設定する。なお、免震層のクリアランスが 60 cm 以下の建物も見られているが、擁壁衝突や繰り返し依存性¹⁷⁾は考慮しない。

設定した建物モデルの応答特性を確認するため、告示波(極稀レベル)による応答解析結果を図 7 に示す。ここでは、非免震建物(S造およびRC造)の最大層間変形角 R_{max} と、免震層(耐震壁付ラーメン)の最大変位 D_{max} を示している。告示波(極稀レベル)は、加速度応答スペクトル($h=0.05$)の周期 10 秒までに適合するように、ランダム位相で 3 波作成しており、各図ではその 3 波の結果を示している。設定した建物モデルでは、非免震建物の最大層間変形角 R_{max} は 1/100 rad 以下、免震層の最大応答変位 D_{max} は最大で 60 cm 程度となっている。



3.2 特性化したパルス性地震動に対する建物応答

(a) 非免震建物(S造, RC造)

前節で説明した建物モデルに、正弦波パルスおよび Ricker wavelet で特性化したパルス性地震動を入力し、各建物モデルの最大層間変形角 R_{max} や免震層最大応答変位 D_{max} が、軒高 H によってどのように変化するか分析する。パルス周期 T_p は $T_p = 1, 2, 3$ s，パルス速度 V_p は $V_p = 50, 100, 150$ cm/s で変化させる。

パルス速度 $V_p = 100 \text{ cm/s}$ とし、パルス周期 T_p を $T_p = 1, 2, 3 \text{ s}$ と変化させた場合の非免震建物(S造およびRC造)の最大層間変形角 R_{max} を図8～9に示す。まず、S造の応答結果を用いて分析する。正弦波パルスを入力した場合、パルス周期 T_p の違いによって最大層間変形角 R_{max} が最大となる軒高 H は異なり、パルス周期 $T_p = 1 \text{ s}$ で軒高 $H = 40 \text{ m}$ 付近、 $T_p = 2 \text{ s}$ で $H = 80 \text{ m}$ 付近、 $T_p = 3 \text{ s}$ で $H = 120 \text{ m}$ 付近で、 R_{max} の最大値 $_{max}R_{max}$ は 0.01 rad 以上となるが、 $_{max}R_{max}$ は T_p によって殆ど変化していない(図2(a), (3)式参照)。また、パルス周期 T_p が長くなるに従い、 R_{max} が 0.01 rad 以上となる軒高 H の範囲が広がっている。一方、Ricker waveletを入力した場合には、 R_{max} の最大値 $_{max}R_{max}$ は 0.02 rad 程度となり、正弦波パルスを入力した場合よりも増大する。これとともに、Ricker waveletを入力した場合には、 R_{max} が大きくなる軒高 H の範囲も拡大している。軒高 H を建物の1次固有周期に換算してパルス周期 T_p で基準化すると、Ricker waveletの方が正弦波パルスよりも R_{max} の最大値 $_{max}R_{max}$ が大きくなり、 R_{max} が大きくなる周期帯域も拡大している事が確認できる。また、 $T/T_p = 0.5$ 程度以下では、図3に示した基準化した変位応答スペクトルと同様に、最大層間変形角 R_{max} は小さな値となる。

RC造についてもS造と同様の傾向が見られており、最大層間変形角 R_{max} の最大値 $_{max}R_{max}$ は、S造とRC造ではほぼ同程度で、構造種別による復元力特性の違いは $_{max}R_{max}$ には現れていない。しかし、RC造の最大層間変形角 R_{max} が大きくなる範囲は $T/T_p < 3$ であり、S造と比べて狭くなっている。S造とRC造の結果を比較すると(図8(c), 図9(c))、正弦波パルスを入力した場合には、最大層間変形角の分布はほぼ同じような形状になっているのに対し、Ricker waveletを入力とした場合にのみ違いが生じている。図6に示したとおり、RC造建物の復元力特性は、剛性劣化モデルであり、経験した最大層間変形角によって剛性が低下するため、建物周期が長周期化する。そのため、Ricker waveletの場合には、正弦波パルスに比べて継続時間が長いことから、建物周期の長周期化によって最大層間変形角 R_{max} が大きくなる T/T_p の範囲が狭くなっていると推測される。

次に、パルス周期 T_p を $T_p = 1, 3 \text{ s}$ とし、パルス速度 V_p を $V_p = 50, 100, 150 \text{ cm/s}$ で変化させた場合の非免震建物(S造)の最大層間変形角 R_{max} を図10に示す。図8に示した結果と同様に、パルス速度 V_p が同じであれば、パルス周期 T_p の違いによって R_{max} の最大値 $_{max}R_{max}$ を生じる軒高 H は変わるが、 $_{max}R_{max}$ に違いは見られていない。このため、 R_{max} の最大値 $_{max}R_{max}$ は、パルス速度 V_p によって概ね決定されると言える。

(b) 免震建物(耐震壁付ラーメン)

パルス速度 $V_p = 100 \text{ cm/s}$ とし、パルス周期 T_p を $T_p = 1, 2, 3 \text{ s}$ と変化させた場合の免震建物の免震層最大

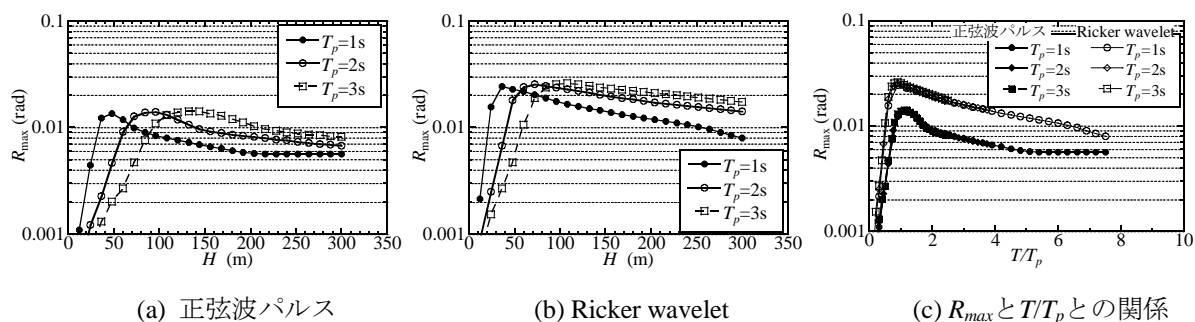


図8 S造建物の最大層間変形角 ($V_p = 100 \text{ cm/s}$)

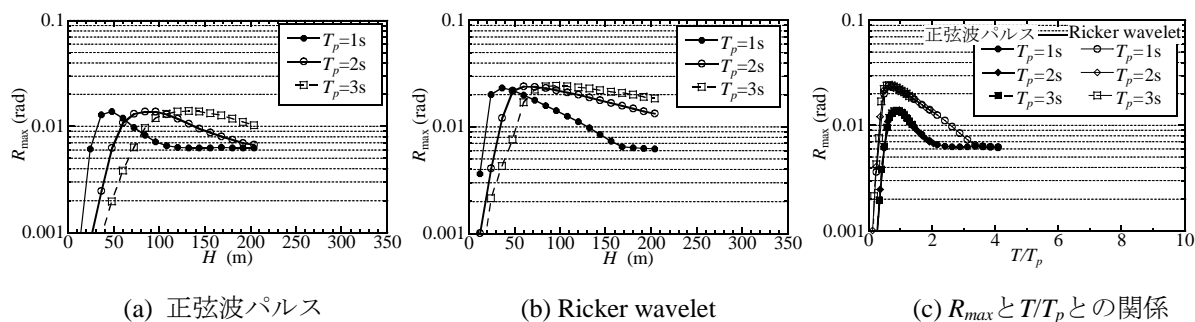


図9 RC造建物の最大層間変形角 ($V_p = 100 \text{ cm/s}$)

応答変位 D_{max} を図11に示す。免震層最大応答変位 D_{max} は、正弦波パルス、Ricker waveletともに軒高 H に関わらずほぼ一定値を示し、パルス周期 $T_p = 1$ sでは D_{max} は30 cm程度、 $T_p = 2$ sでは D_{max} は50 cm程度、 $T_p = 3$ sでは D_{max} は80~100 cm程度となっている。ただし、非免震建物の最大層間変形角 R_{max} の場合と異なり、免震層最大応答変位 D_{max} は、Ricker waveletよりも正弦波パルスの方が大きくなる場合が見られている。パルス周期 T_p で基準化し比較すると、 $T/T_p > 3$ の範囲では、正弦波パルスの方が最大応答変位 D_{max} は大きくなっており、図3に示した基準化した変位スペクトルと同様の結果となっている。

(c) 特性化したパルス性地震動に対する建物応答のまとめ

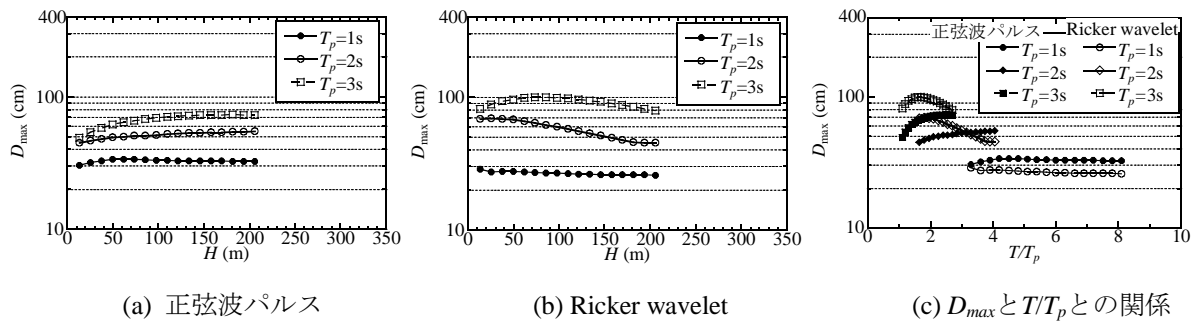
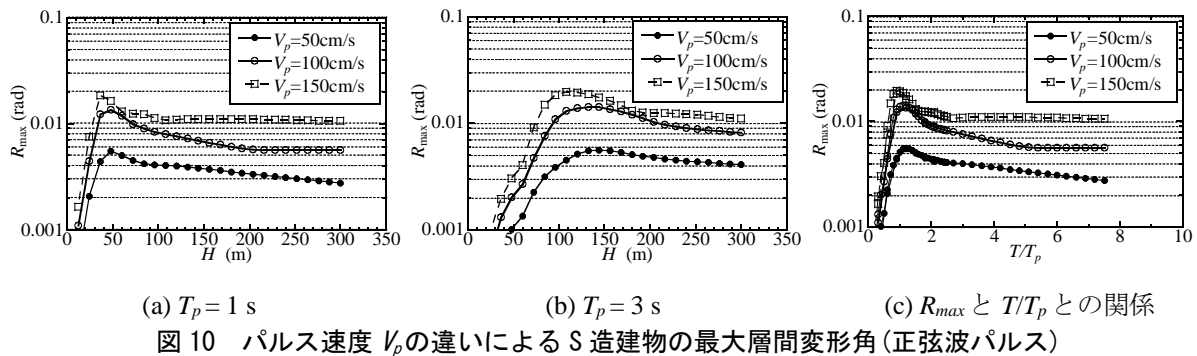
以上より、特性化したパルス性地震動に対する非免震建物と免震建物の応答特性をまとめる。

[非免震建物]

- (a) $T/T_p < 0.5$ では、フリングステップの有無に関わらず、最大層間変形角 R_{max} は非常に小さい値となる。
- (b) パルス速度 V_p が同じ場合、 R_{max} の最大値 R_{max} はパルス周期 T_p によって大きく変化しないが、フリングステップを伴う正弦波パルスよりも、指向性パルスを模擬したRicker waveletの方が大きい。
- (c) 最大層間変形角 R_{max} が大きくなる T/T_p の範囲は、構造種別による復元力特性の違いに起因して若干異なる。また、 R_{max} が大きくなる T/T_p の範囲はRicker waveletの方が広がる。

[免震建物]

- (a) $T/T_p > 3$ では、フリングステップを伴う正弦波パルスの方が、指向性パルスを模擬したRicker waveletよりも免震層の最大応答変位 D_{max} が大きくなる。



4. 観測地震動による建物応答と建物被害の分析

4.1 観測地震動

ここでは、建物の地震応答解析に用いる観測された代表的なパルス性地震動について説明する。検討に用いる観測地震動を表3に示す。震源近傍で記録された代表的なパルス性地震動として、パルス周期の異なる1995年兵庫県南部地震のJR鷹取NS成分(以下、鷹取)、1999年台湾集集地震のTCU068 EW成分(以下、TCU068)、2016年熊本地震(本震)の西原村小森EW方向(以下、西原村小森)を検討に用いる。本論文では、鷹取はフリングステップを含まない指向性パルスのパルス性地震動、西原村小森および

TCU068 は、フリングステップを伴うパルス性地震動として検討を行う。

各観測地震動の速度波形を図12に示すとともに、擬似速度応答スペクトル ${}_pS_v$ と変位応答スペクトル S_d を図13に示す。なお、同図には、告示波(極稀レベル)の ${}_pS_v$ と S_d も比較のために示している。最大地動速度 PGV は、鷹取で約130 cm/s、西原村小森で約240 cm/s、TCU068で約200 cm/sとなっている。各観測地震動のパルス周期は、擬似速度応答スペクトル ${}_pS_v$ からみると、鷹取では1~2 sの間に2つ、西原村小森で約0.8 sと3 sの2つのパルス周期が見られるのに対し、TCU068では9.4 sとなっている。パルス周期 T_p は、擬似速度応答スペクトル ${}_pS_v$ のピーク周期から判断している。変位応答スペクトル S_d の最大値は、鷹取で約100 cm、西原村小森で200 cmに達している。TCU068では周期が長くなるに従い S_d 値は大きくなり、周期9 s付近で500 cm程度を超えている。

表3 観測された代表的なパルス性地震動

地震名	M_w	観測点	方向	PGA (cm/s ²)	PGV (cm/s)	T_p (s)
1995年兵庫県南部地震	6.9	JR鷹取	NS	600	127	1.3, 1.9
1999年台湾集集地震	7.6	TCU068	EW	502	202	9.4
2016年熊本地震	7.0	西原村小森	EW	770	239	0.8, 3.1

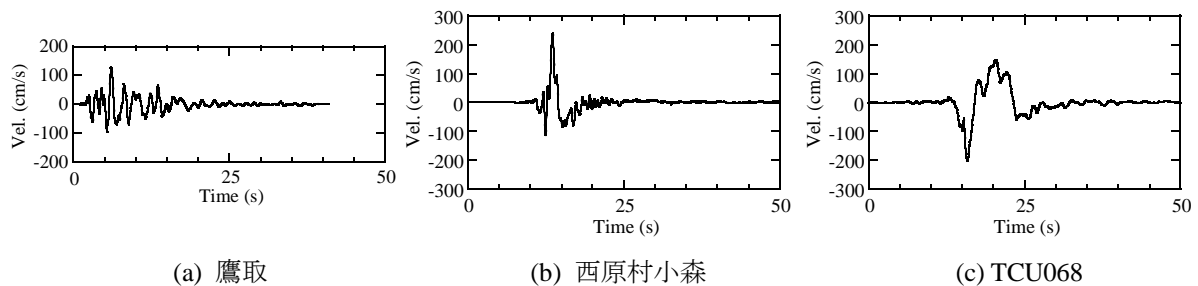


図12 観測地震動の速度波形

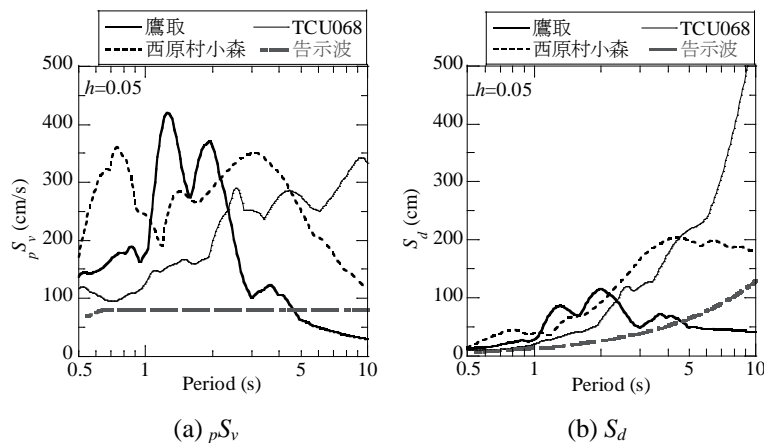


図13 観測地震動の擬似速度応答スペクトル ${}_pS_v$ と変位応答スペクトル S_d

4.2 建物応答と地震被害の分析

3.1節で示した建物モデルに上記の観測地震動を入力し、建物応答に及ぼす影響を検討するとともに、建物の地震被害を分析する。非免震建物(S造, RC造)の地震応答解析の結果を図14に示し、免震建物(純ラーメン, 耐震壁付ラーメン)の地震応答解析の結果を図15,16に示す。

(a) 非免震建物(S造, RC造)

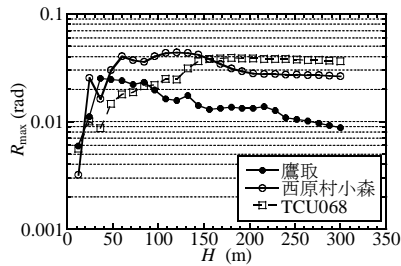
まず、S造およびRC造の非免震建物の最大層間変形角 R_{max} について分析する(図14)。パルス周期 T_p が1~2

sの鷹取では、軒高 $H = 30$ m程度で最大層間変形角 R_{max} は0.03 rad程度となっている。そして、軒高 H が高くなるに従い R_{max} は減少し、指向性パルスを模擬したRicker waveletの結果と同様の傾向となっている。パルス周期 T_p が3.1 sの西原村小森では、軒高 $H = 50$ m程度で最大層間変形角 R_{max} は最大0.04 rad程度となるが、軒高 H が高くなっても R_{max} は大きく低減されない。さらに、パルス周期が長いTCU068では、軒高 $H = 150$ m程度で最大層間変形角 R_{max} は0.04 rad程度となり、西原村小森と同様、 R_{max} はほぼ同程度となっている。このように、パルス周期 T_p が長くなるほど影響を受ける非免震建物の軒高 H が高くなることは、特性化したパルス性地震動による検討結果と整合している。

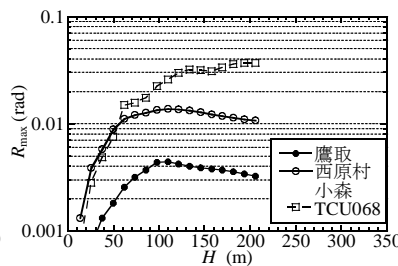
パルス周期 T_p で基準化し、 T/T_p と最大層間変形角 R_{max} との関係で整理した結果でも(図17), 西原村小森, TCU068では、フリングステップを伴う正弦波パルスの結果と同様の傾向となっている。また、 $T/T_p < 0.5$ (軒高 $H = 20$ m程度以下)の建物では、最大層間変形角 R_{max} は0.005 rad以下と非常に小さく、西原村小森, TCU068の観測点周辺において、建物被害が殆ど見られなかった事とも整合する結果となっている。

(b) 免震建物(純ラーメン, 耐震壁付ラーメン)

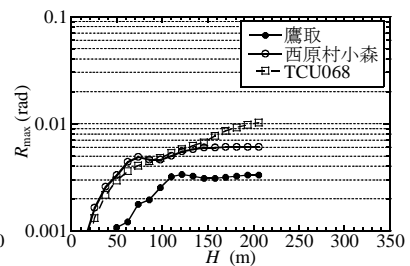
次に、免震建物(純ラーメンおよび耐震壁付ラーメン)の免震層最大応答変位 D_{max} について分析を行う(図15,16)。免震層の最大応答変位 D_{max} は、純ラーメンと耐震壁付ラーメンとで大きな違いはなく、パルス周期 T_p が1~2 sの鷹取では D_{max} は50 cm以下であり、軒高 H が高くなるに従い D_{max} は減少する。パルス周期 T_p が3 s程度の西原村小森では、免震層最大応答変位 D_{max} は概ね100 cm程度と、軒高 H に関わらずほぼ一定となる。パルス周期 T_p が9 s程度と長いTCU068では、軒高 H が高くなるに従い、免震層の最大応答変位



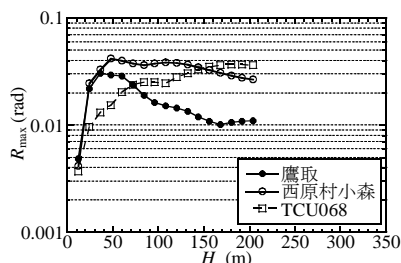
(a) S 造の R_{max}



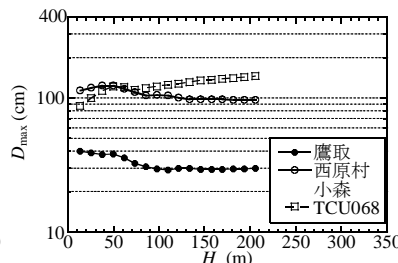
(a) 上部構造の R_{max}



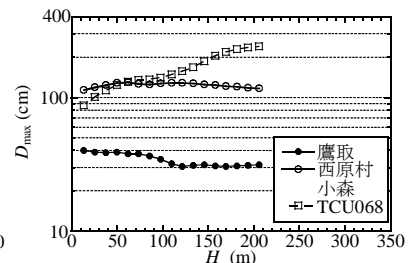
(a) 上部構造の R_{max}



(b) RC 造の R_{max}



(b) 免震層の最大応答変位 D_{max}

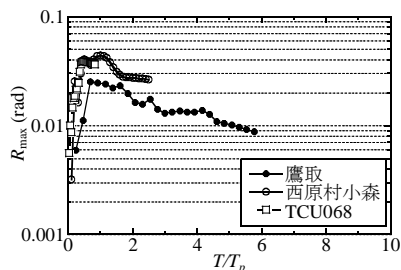


(b) 免震層の最大応答変位 D_{max}

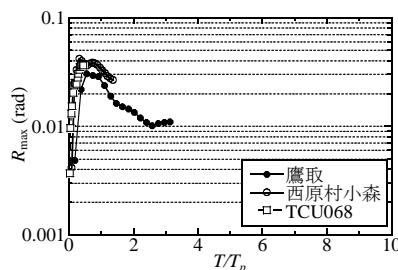
図 14 非免震建物の最大層間変形角

図 15 免震建物(純ラーメン)の応答結果

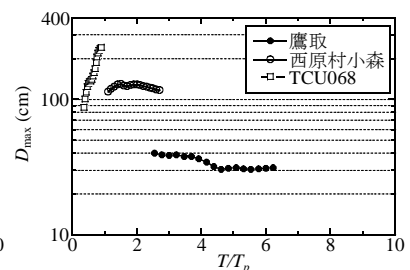
図 16 免震建物(耐震壁付ラーメン)の応答結果



(a) S 造の R_{max}



(b) RC 造の R_{max}



(c) 免震層の最大応答変位 D_{max}

図 17 T/T_p と最大層間変形角および免震層最大応答変位との関係

D_{max} は増加していく。非免震建物と同様に、 T/T_p との関係で整理した結果(図17)でも、正弦波パルス、Ricker waveletによる地震応答解析結果と同様の傾向が確認できる。また、西原村小森やTCU068では、軒高 H に関わらず D_{max} は100 cmを超える場合もあり、擁壁衝突が起こる可能性が高くなっている。

最後に、免震建物の上部構造の最大層間変形角 R_{max} について分析する。パルス周期が1~2 sの鷹取では、上部構造の最大層間変形角 R_{max} は0.005 rad以下となっており、免震効果によって R_{max} は抑えられている。一方、パルス周期が3 s以上の西原村小森やTCU068では、免震層の最大応答変位 D_{max} は概ね100 cm程度となり、純ラーメンの最大層間変形角 R_{max} は0.01 rad以上となり免震建物であっても、深刻な建物被害が生じる可能性がある。

5. まとめ

本論文では、2016年熊本地震で注目されたフリングステップを伴うパルス地震動が、指向性パルスによる地震動と、どのように建物応答への影響度が異なるかを明らかにすることを目的として、パルス性地震動を特性化した正弦波パルスと Ricker wavelet の他、観測地震動を用いて分析した。このとき、フリングステップを伴うパルス地震動を正弦波パルスとし、指向性パルスによる地震動を Ricker wavelet と位置づけている。解析に用いた建物モデルは実際に存在する建物を想定し、低層から超高層建物を対象とした。想定した建物を多質点の非線形せん断質点系モデルで表し、建物の軒高(12~304 m)と構造種別(S造とRC造、および免震建物)を解析変数としている。以下に得られた知見をまとめる。

- 1) 1質点系モデルによる結果では、非免震建物の最大層変形角 R_{max} は、擬似速度応答スペクトル S_v (パルス周期 T_p とパルス速度 V_p)によって概ね把握でき、免震建物の免震層最大応答変位 D_{max} は、変位応答スペクトル S_d (パルス変位 D_p)によって概ね把握できる。
- 2) パルス性地震動による建物応答(最大層間変形角 R_{max} や免震層の最大応答変位 D_{max})は、建物の非線形性を考慮した場合でも、パルス周期 T_p と建物周期 T との関係(T/T_p)で概ね説明できる。
- 3) 非免震建物の最大応答変形角 R_{max} は、パルス速度 V_p が同じ場合、フリングステップを伴う正弦波パルスより、指向性パルスのRicker waveletの方が大きくなる。
- 4) 免震層の最大応答変位 D_{max} は、 $T/T_p > 3$ でフリングステップを伴う正弦波パルスの方が大きくなり、建物の軒高に関係なくほぼ一定値になる。
- 5) フリングステップが確認された2016年熊本地震の西原村小森や1999年台湾集集地震のTCU068の観測地震動では、 $T/T_p < 0.5$ の範囲で最大応答変形角 R_{max} は0.005 rad以下と非常に小さくなり、中高層建物が存在していなかった西原村小森やTCU068の観測点周辺において、建物被害が殆ど見られなかった事と整合する。

謝 辞

本論文では、鉄道総合技術研究所、熊本県、Central Weather Bureau (Taiwan)の観測地震動を使用させて頂きました。ここに記して、謝意を表します。

参考文献

- 1) 岩田知孝：益城町宮園・西原村小森本震記録の解析，京都大学防災研究所地震災害研究部門強震動研究分野，<http://sms.dpri.kyotou.ac.jp/topics/masiki-nishihara0428ver2.pdf>，2016.
- 2) 大阪府：大阪府自然災害総合防災対策検討(地震被害想定)報告書，2007.3.
- 3) 大阪府域内陸直下型地震に対する建築設計用地震動及び設計法に関する研究会：大阪府域内陸直下型地震に対する建築設計用地震動および耐震設計指針，2015.2.
- 4) Hisada, Y. and J. Bielak : A Theoretical Method for Computing Near-Fault Ground Motions in Layered Half-Spaces Considering Static Offset Due to Surface Faulting, with a Physical Interpretation of Fling Step and Rupture Directivity, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol.93, No.3, pp.1154-1168, 2003.6.
- 5) 入倉孝次郎，倉橋奨：震源断層近傍の長周期地震動評価のための特性化震源モデルの拡張—2016年熊本地震 (Mw7.0) の断層近傍地震動による検証—，日本地震工学会第13回年次大会梗概，2017.
- 6) 久田嘉章：震源域の強震動と被害，強震動予測と設計用入力地震動，日本建築学会大会，構造部門

- (振動) PD資料, pp.13-29, 2004.8.
- 7) 村瀬詩織, 大村早紀, 杉野未奈, 林 康裕: 2016年熊本地震における地震動強さと木造住宅の倒壊率の関係, 日本地震工学会論文集, Vol.18, No.2, pp.147-165, 2018.5.
 - 8) Erol Kalkan and Sashi.K. Kunnah: Effects of Fling Step and Forward Directivity on Seismic Response of Buildings, Earthquake Spectra, Vol.22 No.2, pp.367-390, 2006.5.
 - 9) 南博之, 林康裕: パルス波地震動を受けるせん断弾性棒の応答特性評価, 日本建築学会構造系論文集, 第78巻 第685号, pp.453-460, 2013.3.
 - 10) 大崎順彦: 建築振動理論, 彰国社, 1996.
 - 11) 林康裕: パルス性地震動の特徴と耐震設計の方向性, 活断層を考慮した設計用地震荷重, 2011年度日本建築学会大会, 構造部門(振動)PD資料, pp.41-54, 2011.8.
 - 12) 岡沢理映, 杉野未奈, 林康裕: 超高層非免震建物群のモデル化およびRicker wavelet に対する基本応答特性 パルス性地震動に対する大阪市域の超高層建物群の被害予測 その1, 日本建築学会構造系論文集, 第83巻, 第745号, pp.421-430, 2018.3.
 - 13) 木村友香, 岡沢理映, 関口春子, 林康裕: 大阪市域を対象としたパルス性地震動に対する超高層建物群の被害予測(その1,2), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造II, pp.197-200, 2014.9.
 - 14) 熊本匠, 境有紀: 鉄筋コンクリート造建物の非構造部材を考慮した実耐力分布, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造II, pp.311-312, 2007.8.
 - 15) 馬谷原伴恵, 北村春幸: 長周期地震動に対する鋼構造高層建物の耐震安全性評価(その1), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.373-374, 2005.9.
 - 16) 秋田知芳, 石塚圭介, 藤原実咲, 和泉信之: 既存超高層RC造建築物の安全限界に関する保有耐震性能指標値の頻度分布, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.2, pp.643-648, 2014.
 - 17) 国土交通省: 超高層建築物等における南海トラフ沿いの巨大地震による長周期地震動への対策について, http://www.mlit.go.jp/jutakukentiku/build/jutakukentiku_house_fr_000080.html (参照2017.9.8).

(受理: 2019年4月3日)
(掲載決定: 2019年8月13日)

Response and Damage of Buildings due to the Pulse-like Ground Motions Near Fault

MORII Takeshi ¹⁾, SUGINO Mina ²⁾ and HAYASHI Yasuhiro ³⁾

1) Ohsaki Research Institute Inc., Dr. Eng.

2) Associate Professor, Dept. of Architecture and Architectural Eng., Kyoto Univ., Dr. Eng.

3) Professor, Dept. of Architecture and Architectural Eng., Kyoto Univ., Dr. Eng.

ABSTRACT

We have analyzed response and damage of buildings due to pulse-like ground motions predicted near faults, assuming Uemachi fault. In this study, we especially aim to clarify effects of pulse-like ground motions including fling step attracted in the 2016 Kumamoto earthquake on building response. Analysis model of buildings apply nonlinear multi-mass-of-freedom-systems, parametric studies are performed by changing height and structural type of buildings. Height of buildings are set from low-rise to high-rise buildings. Structural type are S-structure, RC-structure and base-isolated building. Finally, we try to understand building damage during the past-earthquakes based on the results of earthquake response analysis.

Keywords: Near Fault, Fling step pulse, Directivity pulse, Super-high-rise building, Seismic isolated building, Maximum response