# 論文 地震動のパルス性の強さが RC 造中低層建築物の最大応答に及ぼす 影響に関する解析的検討

大江 諭史\*1·楠原 文雄\*2·塩原 等\*3

要旨:本研究ではRC造中低層建築物を想定した1質点系弾塑性地震応答解析を行い,地震波のパルス性の強弱が地震時最大応答に及ぼす影響について検討する。検討用地震動は、地震動の持つ周期特性の影響を少なくするため、パルス性の強さが様々でかつ同一の加速度応答スペクトルとなる模擬地震動を作成して用いる。降伏強度、弾性固有周期、及びパルス性の強弱を変数として、最大変位応答と最大塑性率を検討する。弾性固有周期が短いほど、パルス性が強いと応答がやや大きくなり、特に弾性固有周期が0.2秒の場合、パルス性の強い場合の最大変位応答がパルス性の弱い場合に対して平均で10%ほど大きいことを示す。

キーワード:パルス波,模擬地震動,ウェーブレット変換,弾塑性地震応答解析,応答変位

#### 1. はじめに

地震時に、断層近傍でパルス状地震波が観測されることがある。国内では過去に、1995年兵庫県南部地震、2004年新潟県中越地震、2007年新潟県中越沖地震などにおいて、周期1秒前後のパルス状地震波が建築物の応答に対して大きな影響を及ぼし、甚大な被害を及ぼす要因となったことが指摘されている<sup>1),2)</sup>。

一方,設計で地震応答解析を行う際には、いくつかの特徴のある観測地震動の位相を用いた模擬地震動を作成して応答を検討することにより、パルス状地震波に対する安全性の含めてを確認できていると考えることが多い。しかし、用いた地震動がパルス状地震波の特徴を有しているかどうかは、不明である。

本研究では、パルス性の強さが様々な模擬地震動を用いて、中低層鉄筋コンクリート(以下、RC)造建築物を想定した1質点系弾塑性応答解析を行い、パルス性の強さと1質点系の最大応答値の関係について検討を行う。パルス性の強さについては連続ウェーブレット変換を用いたBaker<sup>3)</sup>らの提案する指標によって表す。

# 2. 検討用地震動

本研究では、地震動の持つ周期特性の影響を少なくするため、強い卓越周期を持たない模擬地震動を検討に用いる。模擬地震動は告示で定められた解放工学的基盤上の極めて稀に発生する地震動の加速度応答スペクトルに表層地盤の増幅率を乗じたものに適合するように、正弦波合成法により作成する。このとき、表層地盤の増幅率は、地盤を2種地盤として告示にて定められた簡略式により算出する。

一方,模擬地震動のパルス性はフーリエ係数の位相を変えることにより変化させる。位相差分布を正規分布で与え、パルス性の大小をその標準偏差によって与える方法も提案されているが<sup>4)</sup>,本研究では様々なパルス性をもつ観測地震動の位相をそのまま用いることにより,パルス性の強い模擬地震動からパルス性の弱い地震動まで作成する。ここで,観測地震動にはパルス性の強いものから弱いものまでが分布する<sup>5)</sup>,1999年台湾集集地震における水平方向の 422 記録のうち,最大加速度が200cm/s<sup>2</sup>以上の89記録を用いる。

作成した 89 波の模擬地震動の加速度応答スペクトルと目標スペクトルを比較して図-1 に示す。作成した模擬地震動において、応答スペクトルの目標スペクトルに対する比(応答スペクトル比)は、周期 0.01 秒~5 秒の範囲において、変動係数が 0.033~0.158、比の最小値は 0.850~0.957、最大値は 1.066~1.538 であった。

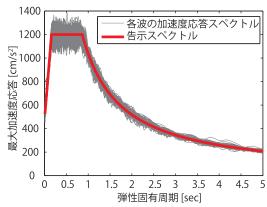


図-1 加速度応答スペクトルの比較

<sup>\*1</sup> 東京大学大学院 工学系研究科建築学専攻 修士課程 (学生会員)

<sup>\*2</sup> 東京大学大学院 工学系研究科建築学専攻 助教・修士(工学) (正会員)

<sup>\*3</sup> 東京大学大学院 工学系研究科建築学専攻 教授・博士(工学) (正会員)

# 3. パルス指標

### 3.1 模擬地震動からのパルスの抽出

89 波の模擬地震動の速度波形について、 4 次の Daubechies Wavelet をマザーウェーブレットとして連続ウェーブレット変換を行い、速度波形のパルスを抽出する。模擬地震動の速度波形はロールオフ周期 5 秒、カットオフ周期 10 秒の台形のハイパスフィルタにより長周期成分を除去した加速度時刻歴を線形加速度法により積分して求め、パルスの抽出は Baker の方法 3 によった。

以下,模擬地震動の速度波形を「原波形」,抽出した速度波形を「パルス波」と呼び,原波形からパルス波を取り除いた速度波形を「残波形」と呼ぶ。

### 3.2 パルス指標の算定

パルス性の強さを示すパルス指標  $^{3}$  (以下, PI) は(1) 式で算定する。PI は  $^{0}$  から  $^{1}$  の値となり、大きいほどパルス性が強い。

$$PI = \frac{1}{1 + e^{\{-23.3 + 14.6 \times (v_{\text{ratio}}) + 20.5 \times (E_{\text{ratio}})\}}}$$

$$v_{\text{ratio}} = \frac{\max |v_{\text{pulse}}(t)|}{\max |v_{\text{original}}(t)|}$$

$$E_{\text{ratio}} = \frac{E_{\text{pulse}}}{E_{\text{original}}} = \frac{\int \{v_{\text{pulse}}(t)\}^2 dt}{\int \{v_{\text{original}}(t)\}^2 dt}$$
(1)

ここに,

 $v_{
m pulse}(t)$  : パルス波の速度時刻歴 $v_{
m original}(t)$  : 原波形の速度時刻歴

 $E_{
m pulse}$  : パルス波のもつエネルギー  $E_{
m original}$  : 原波形のもつエネルギー

である。

### 3.3 パルス性の判定

PI により、原波形のパルス性を判定する。Baker の方法  $^{3)}$ に倣い、PI が 0.85 以上をパルス的、0.15 未満を非パルス的、その間を中間とする。

作成した模擬地震動 89 波について、PI の度数分布を図-2に示す。89 の波形のうち、非パルス的と計算されたものが 72 (80.9%)、パルス的と計算されたものが 6 (6.7%)となった。模擬地震動の作成に用いた観測地震動は89 記録中10 波がパルス的であり、同一の位相を用いていても作成された模擬地震動がパルス的とならない場合も存在したが、これは図-1 にて示した模擬地震動のターゲットとした加速度応答スペクトルの周期特性が比較的フラットであることの影響が考えられる。

パルス的波形,非パルス的波形それぞれについて,原波形とパルス波,及び原波形に対応する加速度波形の例を,図-3に示す。

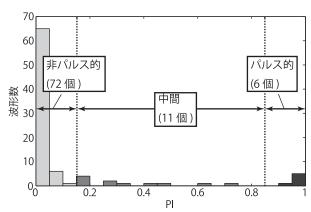


図-2 PIの大小による波形の数

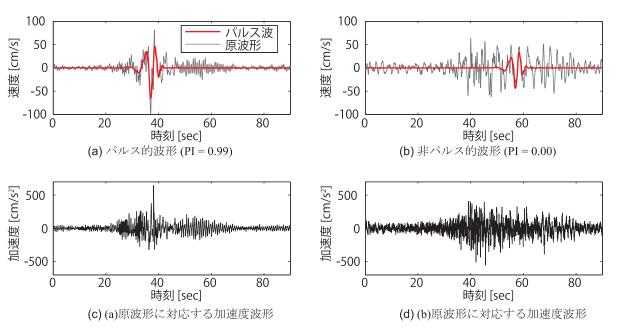


図-3 原波形とパルス波,及び対応する加速度波形の例

### 4.1 質点系弹塑性地震応答解析

#### 4.1 地震応答解析の概要

#### (1) 入力地震動

2 章で述べた模擬地震動の加速度波形 (89 波) を入力 地震動とする。

# (2) 1 質点系の固有周期

RC 造の中低層建築物 (3 階建, 6 階建, 10 階建) を想定し、弾性固有周期を 0.2 秒, 0.4 秒, 0.6 秒の 3 ケースとした。

### (3) 復元力特性

解析モデルの復元力特性は RC 造を想定し、骨格曲線は Tri-Linear型、履歴モデルは Takeda モデル <sup>6)</sup>とした。建物の構造として、純ラーメン構造、耐震壁付きラーメン構造、壁式構造を想定し、第 2 折れ点(降伏点)のベースシアー係数は 0.3、0.4、0.5 の 3 ケース設定とした。また、第 1 折れ点のベースシアー係数は一律で 0.1 とした。降伏点割線剛性の弾性剛性に対する比を 0.3、降伏後剛性の弾性剛性に対する比を 0.01 とした。

# (4) 解析方法

地震応答解析における数値積分は Newmark-β 法 (β=1/4) により、計算の時間刻みは 0.01 秒とした。系の粘性減衰 は瞬間剛性比例型とし、減衰定数は弾性固有振動数に対して 0.03 とした。

# 4.2 最大応答値とPIの関係

最大応答値と PI との比較を行い, 降伏強度や弾性固有 周期の違いによる地震時応答の違いについて, 検討を行 う。最大応答値としては最大応答変位及び最大塑性率を 検討する。

降伏強度時のベースシアー係数  $(C_0)$  と弾性固有周期  $(T_n)$  の違いによる PI と最大応答変位の関係を $\mathbf{Z} - \mathbf{4}$  に、PI と最大塑性率の関係を $\mathbf{Z} - \mathbf{5}$  に示す。いずれも最小二乗法を用い、全体的な傾向について 1 次関数を用いて近似した結果も併せて示す。

また、パルス的、非パルス的と計算された波形における最大変位の平均値および変動係数を表-1 に、塑性率の平均値および変動係数を表-2 に示す。

### 表-1 パルス的波形,及び非パルス的波形における最大変位の平均値[cm](上段),変動係数(下段)

# (a) パルス的波形

$C_0$ $T_n$	0.2 秒	0.4 秒	0.6 秒
0.3	19.3	25.5	29.5
	0.19	0.12	0.19
0.4	12.2	24.3	30.3
	0.09	0.25	0.10
0.5	10.0	22.7	32.0
	0.23	0.23	0.18

# (b) 非パルス的波形

$C_0$ $T_n$	0.2 秒	0.4 秒	0.6 秒
0.3	15.7	24.3	29.7
	0.18	0.16	0.15
0.4	11.7	22.1	28.1
	0.21	0.14	0.13
0.5	8.6	19.2	28.0
	0.19	0.14	0.12

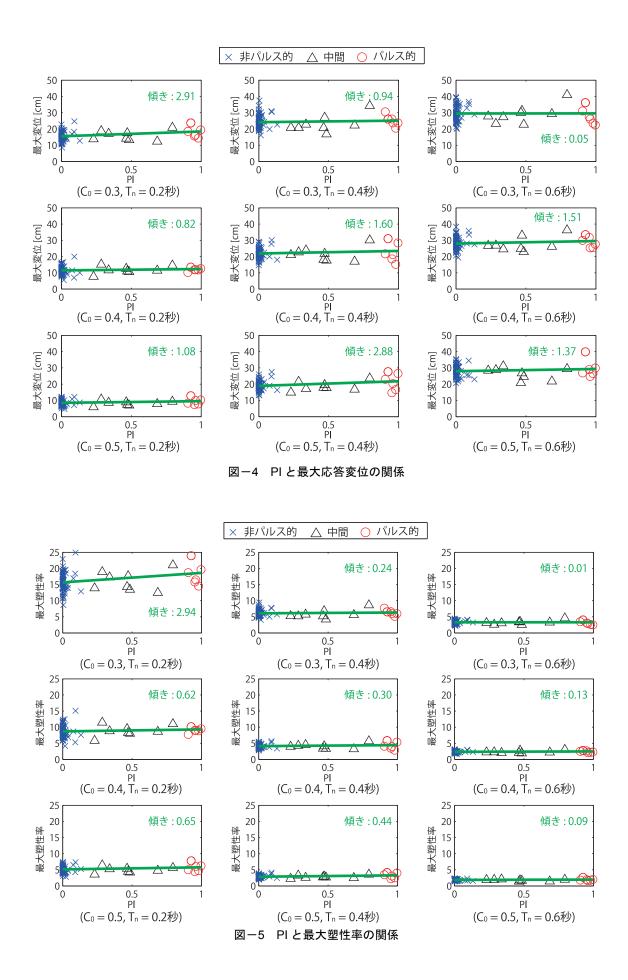
# 表-2 パルス的波形,及び非パルス的波形における最大塑性率の平均値(上段),変動係数(下段)

### (a) パルス的波形

(=)					
$C_0$ $T_n$	0.2 秒	0.4 秒	0.6 秒		
0.3	19.4	6.4	3.3		
	0.19	0.12	0.19		
0.4	9.2	4.6	2.5		
	0.09	0.25	0.10		
0.5	6.0	3.4	2.2		
	0.23	0.23	0.18		

### (b) 非パルス的波形

$C_0$ $T_n$	0.2 秒	0.4 秒	0.6 秒
0.3	15.8	6.1	3.3
	0.18	0.16	0.15
0.4	8.8	4.2	2.4
	0.21	0.14	0.13
0.5	5.2	2.9	1.9
	0.19	0.14	0.12



#### 4.3 最大応答値とPIの関係

図-4, 図-5, 表-1, 表-2 により, 地震時最大応答値の傾向について以下が読み取れる。

- (1) パルス的な波に対する応答は非パルス的な波に対す る応答と同程度かやや大きい程度であり、最大変位 応答に対するパルス性の強さによる影響は小さい。
- (2) ただし、周期が短いとパルス性の強弱による応答の差がやや大きく、周期 0.2 秒のケースではパルス的な波に対する最大応答変位の平均値、最大塑性率の平均値は、非パルス的な波に対する最大応答変位の平均値、最大塑性率の平均値より 10%ほど大きかった。
- (3) 同一の周期の系で降伏時のベースシアー係数を大きくした場合に、パルス性の強さに依らず、最大応答変位および最大塑性率の平均値は大きく減少した。強度の影響は周期が短いほど大きく、周期 0.6 秒のケースでは耐力の違いによる応答の差はほとんど生じなかった。パルス性の影響が小さい要因として、図ー1に示した通り、模擬地震動のターゲットとした加速度応答スペクトルの周期特性が比較的フラットであることが考えられる。
- (4) 一方で同一の降伏強度の系で周期を大きくした場合に、パルス性の強さに依らず、最大応答変位の平均値は大きく増加し、最大塑性率の平均値は大きく減少した。したがって、建物の層数が増え周期が大きくなると、最大塑性率で表される安全率は高くなっている。一方、周期の違いが壁量等の剛性に起因する場合、周期が大きくなると応答変位が増え、使用性は低下したと言える。この周期の影響は、降伏強度が大きいほど大きかった。また、パルス性の強い波形に対する応答の方が、周期の影響は大きかった。
- (5) 最大変位応答と最大塑性率の応答のばらつきを示す 変動係数において、パルス性の強さによる明確な傾 向は見られなかった。

# 5. まとめ

本研究により,以下の知見が得られた。

- (1) パルス的な観測地震動の位相を用いて作成した模擬 地震動であっても、パルス性が小さくなる場合があ った。
- (2) 同一の加速度応答スペクトルとなるように作成した 模擬地震動に対する応答では、弾性固有周期が短い 建物ほどパルス性が強いと応答がやや大きくなり、 周期 0.2 秒ではパルス的な入力波による最大応答変 位および最大塑性率は非パルス的な入力波による応 答に対して平均 10%程度大きくなった。
- (3) 同一の加速度応答スペクトルとなるように作成した 模擬地震動に対する応答では、系の周期や耐力に依 らず、応答の変動係数にパルス性の強さによる傾向 は見られなかった。

### 参考文献

- 1) 小山哲央, 永野正行:パルス状の地震波の単純化と 弾塑性応答特性に関する基礎的研究, 2010 年度日本 建築学会関東支部研究報告書, pp.253-256, 2010
- 2) 安井雅明, 西影武知, 見上知広, 亀井功, 鈴木恭平, 林康裕: パルス地震動に対する1自由度系最大応答 理論と応答特性, 日本建築学会構造系論文集, Vol.75, No.650, pp.731-739, 2010.4
- Jack W. Baker: Quantitative Classification of Near-Fault Ground Motions Using Wavelet Analysis, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 97, No.5, pp.1486-1501, Oct. 2007
- 4) 桑村仁, 竹田拓也, 佐藤義也: 地震動の波形力指標 としてのエネルギー入力率, 日本建築学会構造系論 文集, 第491号, pp.29-36, 1997.1
- 5) 大江諭史,塩原等,楠原文雄:1999年台湾集集地震におけるパルス状地震波の分布に関する検討,日本建築学会大会学術講演梗概集,構造II,pp.197-198,2015.9
- Takeda, T., M.A.Sozen, and N.N.Nielsen: Reinforced Concrete Response to Simulated Earthquakes, Journal of the Structural Division, ASCE, Vol.96, No.ST5, 1970