

断層近傍のパルス性地震動特性を考慮した設計用応答スペクトル DESIGN RESPONSE SPECTRA FOR PULSE-LIKE GROUND MOTIONS

鈴木恭平*, 川辺秀憲**, 山田真澄***, 林 康裕****
*Kyohei SUZUKI, Hidenori KAWABE, Masumi YAMADA
and Yasuhiro HAYASHI*

In recent inland shallow earthquakes, pulse-like ground motions have been observed which subsequently caused severe damage to buildings. However, the response of buildings to pulse-like ground motions has not been sufficiently characterized yet. In this study, we investigate the effect of pulse-like ground motions on the design of structures and define the maximum response of an undamped single-degree-of-freedom (SDOF) system subjected to a sinusoidal pulse as a function of natural period. In addition, design response spectra for pulse-like ground motions are proposed.

Keywords: *Sinusoidal Pulse, Response Spectra, Design Seismic Load, Uemachi Fault*
正弦波パルス、応答スペクトル、設計用地震荷重、上町断層

1. はじめに

1994年Northridge地震や1995年兵庫県南部地震など、近年に発生した内陸直下地震では、震源近傍において周期1秒程度以上のパルス状の波形が顕著にみられ、このパルス状の波形が建物被害に大きな影響を与えるのではないかと指摘されている。近年の研究により、このパルス性地震動は断層の破壊伝播方向とサイトの位置関係によるフォワード・ディレクティビティ効果によるものであること^{1,2)}などが指摘されている。

大阪府域およびその周辺地域には、上町断層や生駒断層などの多くの活断層が存在している。また、地震調査研究推進本部の主要活断層帯の長期評価によれば、上町断層帯の地震の発生確率は今後30年以内で2~3%となっており、活断層の中では発生確率の高いグループに属するとされている³⁾。そのため大阪府域の建物の耐震安全性を考える上では、東南海・南海地震のような海溝型地震のみならず、上町断層帯などの内陸直下地震による影響も考慮しなければならない。現在、様々な機関により上町断層帯の予測地震動が作成されているが^{4~6)}、これらの予測地震動の中には現行の設計用地震荷重を大きく上回るものも見られ、パルス性地震動に対する対策を早急に行う必要がある。

また、構造物の設計においては、兵庫県南部地震以降はパルス性地震動の影響を考慮するため、震源近傍の観測記録そのものや、観測記録の位相を用いた模擬地震動などが設計に使われるようになって

きている。大阪市においては、内陸直下地震への対策として上町断層帯の予測地震動を作成し、これを基に想定標準地震動を作成して設計に使用してきた^{7,8)}。しかしながら、模擬地震動や予測地震動は、地震動予測手法などの違いにより、同じ地震動算定地点でも得られる地震動の特性に大きな差があるため、パルス性地震動の影響を設計用地震荷重に十分に反映できていない。

パルス性地震動に関する研究は、パルス波に対する1自由度系の応答を理論的に求めるものや、強震記録からパルスの周期や振幅を抽出する研究などが古くから行われている^{9~16)}。たとえば、Chopra⁹⁾は、正弦波や三角波などのパルスに対する1自由度系の応答を定式化した。Mavroicidis¹⁰⁾は、GaborのWaveletを基にした関数でパルスを表示し、観測地震動の波形や応答スペクトルを近似できることを示した。また、境ら¹²⁾は、地震動をサイン波1波で単純化する方法について検討している。しかし、パルス波に対する応答理論解を求め、それを用いて設計用地震荷重を設定しようという試みはなされていない。

以上の観点から、断層近傍で建築物の構造設計を行う際に用いることを考え、パルス性地震動の影響を反映した設計用地震荷重の設定法を構築することが必要である。そこで、パルス性地震動の影響を設計へ反映させるための設計用応答スペクトルを提案するために、以下の検討を行った。

本研究ではまず、パルス性地震動を正弦波パルスで理想化し、非

* 京都大学大学院工学研究科建築学専攻 修士課程

** 京都大学原子炉実験所 助教・工博

*** 京都大学次世代開拓研究ユニット 特定助教

**** 京都大学大学院工学研究科建築学専攻 教授・工博

Graduate Student, Dept. of Architecture and Architectural Eng., Kyoto Univ.

Assist. Prof., Research Reactor Institute, Kyoto Univ., Dr. Eng.

Assist. Prof., Pioneering Research Unit for Next Generation, Kyoto Univ., Ph. D.

Prof., Dept. of Architecture and Architectural Eng., Kyoto Univ., Dr. Eng.

減衰1自由度系の時刻歴応答と応答スペクトルの理論解を求める。次に、観測記録や予測地震動を分析し、パルス性地震動の応答スペクトルを正弦波パルスの応答スペクトルと比較する。さらに、正弦波パルスに対する最大応答理論解を用いてパルス性地震動の特性を反映した設計用応答スペクトルの設定法を提案する。

2. 正弦波パルスに対する1自由度系の最大応答

本章では、パルス性地震動に対する最大応答を理論的に考察するために、パルス性地震動を正弦波パルスで理想化し、1自由度系の応答を考える。なお、パルス性地震動を理想化する関数としては、正弦波以外にも三角波、矩形波、ガウス関数などが考えられる。しかし、正弦波は三角波や矩形波のように不連続点や微分不可能な点がなく、またガウス関数に比べて数学的な取扱いが容易なため、本研究では図1に示すような正弦波パルスを地動加速度として用いた。

2.1 減衰1自由度系の応答

固有周期 $T(=2\pi/\omega)$ 、減衰定数 h の減衰1自由度系に、図1に示すような加速度振幅 P_0 、周期 $T_p=(2\pi/\omega_p)$ の正弦波 n 波（正弦波パルス）が入力する場合の応答を考える。図2に、減衰定数 $h=0.05$ 、 $T=1$ 秒および2秒の1自由度系に対して、 $P_0=1(\text{cm/s}^2)$ 、 $T_p=1(\text{s})$ 、 $n=1,2,3$ の正弦波パルスを入力させた時の加速度応答波形を示す。 $T=T_p$ では波数が増えると共に応答も大きくなるが、 $T>T_p$ では波数が大きくなっても最大応答はあまり変わらない。また、最大応答は、 $T=T_p$ の場合には概ね地動終了直後の自由振動中に発生しているが、 $T>T_p$ の場合には加振中に発生することもある。

次に、図3に正弦波パルスに対する加速度応答スペクトル、図4に速度応答スペクトル、図5に変位応答スペクトルをそれぞれ示す。こ

ここで、各スペクトルの振幅軸はそれぞれ最大地動加速度 P_0 、最大地動速度 V_0 、最大地動変位 D_0 で無次元化し、また周期軸は正弦波の周期 T_p で無次元化してある。各スペクトルともに $T/T_p=1$ 付近では波数の増加とともに応答が大きくなるのがわかる。

2.2 非減衰1自由度系の時刻歴応答

固有周期 $T(=2\pi/\omega)$ の非減衰1自由度系に、加速度振幅 P_0 、周期 $T_p=(2\pi/\omega_p)$ の正弦波 n 波（正弦波パルス）が入力する場合の運動方程式は、次式で表される。

$$\ddot{u} + \omega^2 u = \begin{cases} -P_0 \sin \omega_p t & (0 \leq t < nT_p) \\ 0 & (nT_p \leq t) \end{cases} \quad (1)$$

これを2つの場合に分けて考える。

(i) $T_p \neq T$ のとき

まず、強制振動中 ($0 \leq t < nT_p$) のとき、式(1)を解くと、

$$\frac{u}{P_0/\omega^2} = \frac{1}{\tau^2 - 1} (\sin \omega_p t - \tau \sin \omega t) \quad (2)$$

ここで、 $\tau = \omega_p/\omega = T/T_p$ である。

次に、自由振動中 ($nT_p \leq t$) のときは、式(1)を解くと、

$$\frac{u}{P_0/\omega^2} = -\frac{2\tau}{\tau^2 - 1} \cdot \sin \frac{n\pi}{\tau} \cdot \cos \left(\frac{2\pi}{T} t - \frac{n\pi}{\tau} \right) \quad (3)$$

(ii) $T_p = T$ のとき

まず、強制振動中 ($0 \leq t < nT_p$) のとき、式(1)を解くと、

$$\frac{u}{P_0/\omega^2} = \frac{1}{2} \{ \omega t \cos \omega t - \sin \omega t \} \quad (4)$$

次に、自由振動中 ($nT_p \leq t$) のときは、式(1)を解くと、

$$\frac{u}{P_0/\omega^2} = \pi \cos \omega t \quad (5)$$

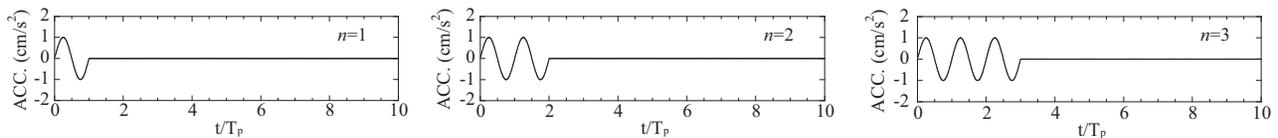
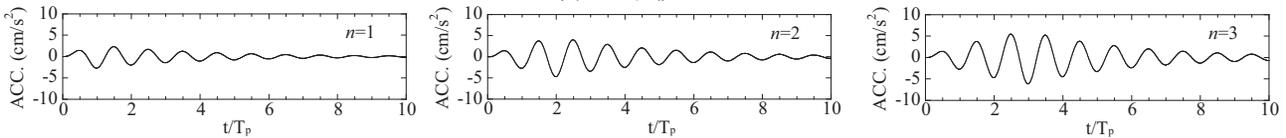
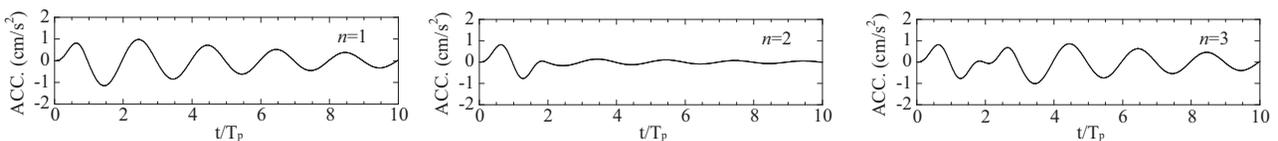


図1 正弦波パルス



(a) 加速度応答波形 ($T=1.0$, $h=0.05$)



(b) 加速度応答波形 ($T=2.0$, $h=0.05$)

図2 正弦波パルスに対する応答

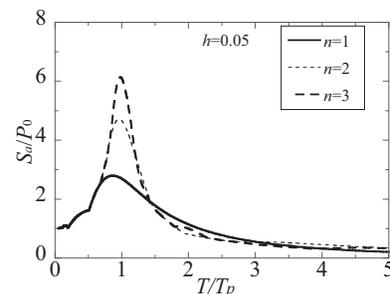


図3 加速度応答スペクトル

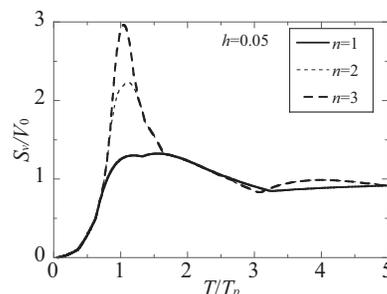


図4 速度応答スペクトル

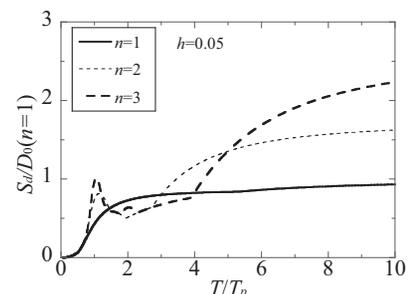


図5 変位応答スペクトル

以上より、時刻歴応答変位は、1自由度系の固有周期 T と正弦波パルスの周期 T_p の比 $\tau = T/T_p$ に依存することがわかる。

2.3 加速度応答スペクトル

非減衰の場合、加速度応答スペクトル S_a と変位応答スペクトル S_d の間には、 $S_a = \omega^2 S_d$ の関係があるので¹⁷⁾、式(2)、(3)で求めた変位応答の最大値を求めることで、加速度振幅 P_0 で無次元化した加速度応答スペクトル S_a/P_0 を求めることができる。

まず、強制振動中 ($0 \leq t < nT_p$) の最大応答を求める。時刻歴で最大点となる可能性があるのは、式(2)を微分して得られる速度が0となる時刻 $t = mT/(\tau \pm 1)$ であり、 $0 \leq t < nT_p$ となるような整数 m を選ばばよい。 $t = mT/(\tau + 1)$ と $t = mT/(\tau - 1)$ をそれぞれ式(2)に代入し、整理して以下のように $g_{1,m}$ 、 $g_{2,m}$ とおく。

$$g_{1,m} \equiv \left| \frac{1}{\tau-1} \sin\left(\frac{2\pi m \tau}{\tau+1}\right) \right|$$

$$g_{2,m} \equiv \left| \frac{1}{\tau+1} \sin\left(\frac{2\pi m \tau}{\tau-1}\right) \right|$$
(6)

次に、強制振動終了後の自由振動中 ($nT_p \leq t$) の最大応答を求める。 $nT_p \leq t$ では非減衰自由振動になるので、最大応答は式(3)の振幅となる。よって、式(3)の右辺の振幅を表す関数を以下のように f_n とおく。

$$f_n = \left| \frac{2\tau}{\tau^2-1} \sin\frac{\pi n}{\tau} \right|$$
(7)

以上より、非減衰の加速度応答スペクトルは、 f_n 、 $g_{1,m}$ 、 $g_{2,m}$ を用いて次式で表現できる。

$$\frac{S_a}{P_0} = \max\{f_n, g_{1,m}, g_{2,m}\}$$
(8)

図6には、 $n=1$ の場合について、式(6)による強制振動中の最大値と式(7)による自由振動中の最大値を、数値計算による最大値とともに示す。図6より、式(8)で定式化した加速度応答スペクトルが数値計算の結果と一致していることがわかる。また、図6から最大応答加速度は $T/T_p < 1$ では式(6)で決まり、 $T/T_p > 1$ では式(7)で決まるが、これは $T/T_p > 1$ ではインパルス応答に近い応答を示すからである。

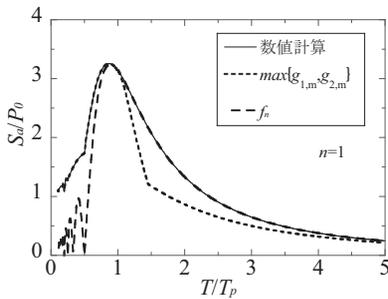


図6 正弦波パルス ($n=1$) に対する加速度応答スペクトル

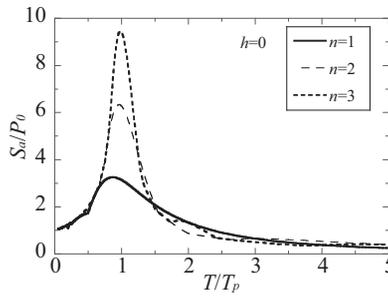


図7 波数の影響

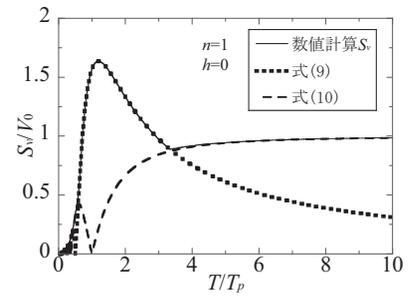


図8 速度応答スペクトル

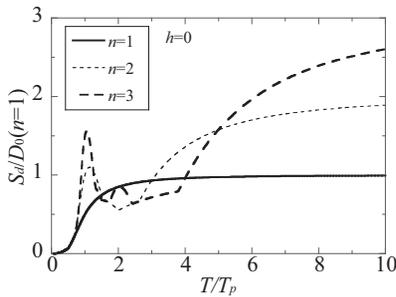


図9 変位応答スペクトル

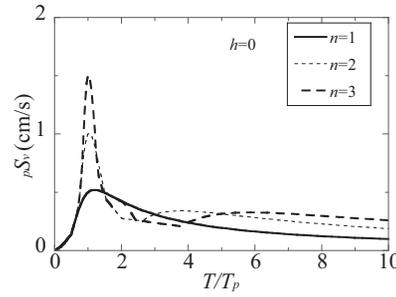


図10 擬似速度応答スペクトル

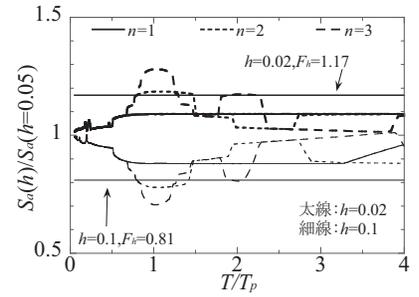


図11 減衰補正係数

次に、図7に波数 $n=1, 2, 3$ の場合について式(8)で求めた加速度応答スペクトル $S_a(\tau, n)$ を示す。 $T/T_p=1$ 付近では共振により、波数 n が大きくなると最大応答加速度が大きくなり、 $T/T_p=1$ ではその値は $n\pi$ となる。また、 $T/T_p=1.5$ では波数によらず最大応答加速度がほぼ一定値となり、 $T/T_p > 1.5$ では波数が増加しても加速度応答スペクトルの値はあまり変わらない。

2.4 速度応答スペクトル

強制振動終了後に最大応答速度が発生するとき、非減衰の速度応答スペクトルは地動加速度のフーリエ振幅スペクトル $F(\omega)$ に等しい¹⁷⁾。そこで、正弦波パルス入力に対するフーリエ振幅スペクトルを計算すると次式で表される。

$$F(\omega) = \frac{P_0 T_p}{\pi} \left| \frac{\tau^2}{\tau^2-1} \sin\frac{n\pi}{\tau} \right| = V_0 \cdot \left| \frac{\tau^2}{\tau^2-1} \sin\frac{n\pi}{\tau} \right|$$
(9)

ここで、 V_0 は図1の正弦波パルスを積分して得られる地動速度の最大値である。また、 $T/T_p \gg 1$ では概ね時刻 $t = T_p/2$ で最大応答速度が発生する性質を用いて¹⁸⁾、式(2)を微分して得られる速度応答の式に $t = T_p/2$ を代入すれば、最大速度応答は次式で表される。

$$S_v \cong \frac{V_0}{2} \left| \frac{\tau^2}{\tau^2-1} (1 + \cos\frac{\pi}{\tau}) \right|$$
(10)

図8に $n=1$ の場合について、数値計算によって求めた速度応答スペクトルと式(9)および式(10)で得られる値を重ねて示す。図8から $T/T_p=1$ 付近では速度応答スペクトルと式(9)が一致しており、地動終了後に最大応答速度が発生したことがわかる。また、 $T/T_p \gg 1$ では速度応答スペクトルは式(10)でよく近似できていることがわかる。

2.5 変位応答スペクトル・擬似速度応答スペクトル

図1に示した加速度振幅 P_0 の地動加速度を積分することにより、最大地動変位 D_0 は次式で表される。

$$D_0 = \frac{nT_p^2}{2\pi} P_0$$
(11)

また非減衰の場合、加速度応答スペクトルと変位応答スペクトルの間には $S_a = \omega^2 S_d$ の関係があることから、式(8)で求めた加速度応

答スペクトルを用いて変位応答スペクトルは次式で表される。

$$\frac{S_d}{D_0} = \frac{\tau^2}{2\pi} \cdot \frac{S_a}{P_0} \quad (12)$$

図9に $n=1,2,3$ とした時の変位応答スペクトルを示す。ただし、振幅軸は $n=1$ の時の最大地動変位 $D_0(n=1)$ で無次元化してある。図9より $T/T_p=1$ 付近では波数が大きくなるほど応答が大きくなる。また、 $T/T_p \gg 1$ では波数が大きいほど応答が大きくなるが、これは T/T_p が十分大きい場合、相対応答変位はほぼ地動変位に等しくなること、式(11)より最大地動変位 D_0 は n に比例して大きくなるのが原因である。

次に、擬似速度応答スペクトルは、次式で定義される。

$${}_p S_v = S_a / \omega \quad (13)$$

図10に $n=1,2,3$ とした時の擬似速度応答スペクトルを示す。

2.6 減衰補正係数

図11に、正弦波パルス入力時の加速度応答スペクトルの減衰補正係数 $F_h(h) (= S_a(h) / S_a(h=0.05))$ を $h=0.02$ と 0.1 の場合について示す。図11から、パルスの入力に対する減衰補正係数は T/T_p によって変化し、 $T/T_p=1$ 付近で最も減衰の影響が大きいことがわかる。

ところで、 $T/T_p=1, h \ll 1$ の条件で正弦波パルス n 波を入力した時、減

衰定数 $h=0$ の応答スペクトルに対する減衰補正係数 $F_{h0}(= S_a(h) / S_a(h=0))$ は次式で表される¹⁹⁾。

$$F_{h0} = (1 - \exp(-2\pi nh)) / 2\pi nh \quad (14)$$

ここで、式(14)を次式の形で近似することを考える。

$$F_{h0} = 1 / (1 + ah) \quad (15)$$

式(14)と式(15)を $h=0$ 近傍でテイラー展開し1次項の係数を等値して α を求めると $\alpha=n\pi$ となる。よって式(15)は、

$$F_{h0} = 1 / (1 + m\pi h) \quad (16)$$

と表される。式(15)の α は、減衰の効き具合を示す係数と考えられ、 $n=1,2$ とした時の値 $\alpha=\pi, 2\pi$ は告示の $\alpha=10$ に比べて小さく、パルスの入力の場合は減衰の効果が小さいことに対応している。さらに、 $h=0.05$ の応答スペクトルに対する減衰補正係数 F_h を次式で定義することを試みる。

$$F_{h,1}(h) = F_{h0}(h) / F_{h0}(h=0.05) \quad (17)$$

例として図11に式(17)を $n=2$ として細線で示す。図11より $T/T_p=1$ の付近では、式(17)の値が数値計算結果を概ね近似できていることがわかる。

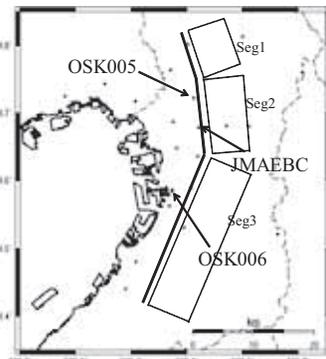
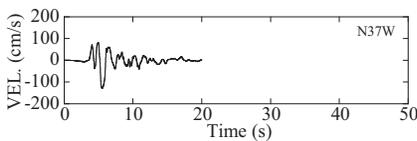


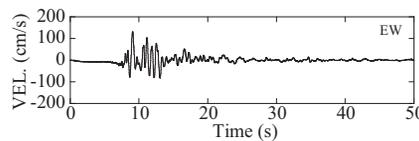
図12 予測地震動算定地点

表1 パルス特性値

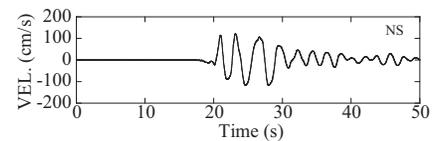
地震動の種類	地点	V_p (cm/s)	T_p (s)
1995年兵庫県南部地震	葦合	120	1.2
	JMA神戸	82	0.9
2000年鳥取県西部地震	日野	92	0.7
2004年新潟中越地震	JMA川口	125	1.4
	小千谷	105	0.7
2007年能登半島地震	JMA輪島	74	1.8
	柏崎	118	2.4
2007年新潟県中越沖地震	刈羽村	123	3.1
	JMAEBC	106	1.5
上町断層帯の 予測地震動 (産総研波)	OSK005	80	2.7
	OSK006	65	1.1
	JMAEBC	102	2.9
上町断層帯の 予測地震動 (中防波)	OSK005	67	2.6
	OSK006	61	2.2
	JMAEBC	105	1.7
上町断層帯の 予測地震動 (川辺波)	OSK005	100	2.0
	OSK006	47	2.4



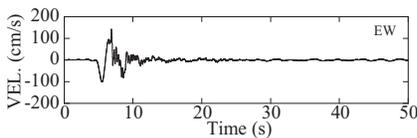
(a) 兵庫県南部地震(葦合)



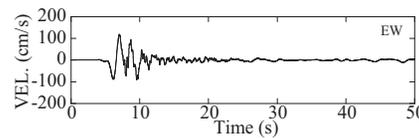
(b) 新潟県中越地震(小千谷)



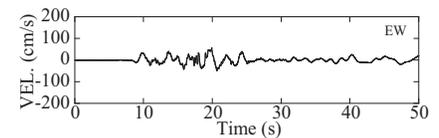
(c) 新潟県中越沖地震(刈羽村)



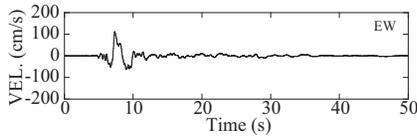
(d) OSK005(川辺波)



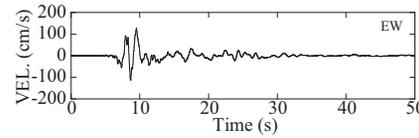
(e) JMAEBC(川辺波)



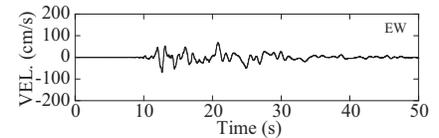
(f) OSK006(川辺波)



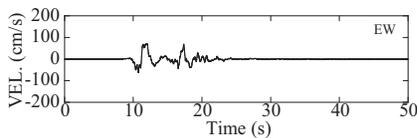
(g) OSK005(産総研波)



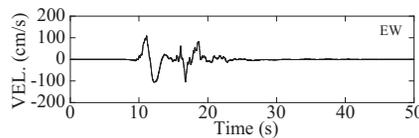
(h) JMAEBC(産総研波)



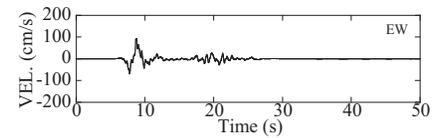
(i) OSK006(産総研波)



(j) OSK005(中防波)



(k) JMAEBC(中防波)



(l) OSK006(中防波)

図13 分析に用いた地震動の速度波形

3. 観測記録と予測地震動の分析

3章では、近年発生した内陸直下地震の震源近傍での観測記録や、内陸直下地震に対する予測地震動を用いて、パルス性地震動特性について分析する。

3.1 分析に用いた地震動

本研究では、以下に述べる観測記録および内陸直下地震の予測地震動を用いた。内陸直下地震の予測地震動の例として、上町断層帯に対する予測地震動を用いる。

(a) 観測記録

震源近傍の観測記録として、葺合、JMA 神戸(1995年兵庫県南部地震)、日野(2000年鳥取県西部地震)、JMA 川口、小千谷(2004年新潟県中越地震)、JMA 輪島(2007年能登半島地震)、柏崎、刈羽村(2007年新潟県中越沖地震)の8つの記録を用いる。

(b) 予測地震動

上町断層帯に対する予測地震動として、川辺・釜江による予測地震動(川辺波)⁴⁾、産業技術総合研究所による予測地震動(産総研波)⁵⁾、中央防災会議による予測地震動(中防波)⁶⁾の3種類を用いる。本研究では、以上の3つの予測地震動の共通の算定地点であるJMAEBC、

OSK005、OSK006の地震動を用いる。図12には、3地点の位置と川辺・釜江が地震動予測に用いた断層モデルを示す。

図13に観測記録および予測地震動の速度波形を、図14に加速度応答スペクトルをそれぞれ示す。また図14には、告示で規定された工学的基盤の標準加速度応答スペクトルおよび簡略法による第2種地盤の加速度応答スペクトルを細線で示している。

3.2 パルス特性値

パルス特性値として、パルス周期 T_p とパルス速度振幅 V_p を定義する。まず、減衰定数 $h=0.05$ の擬似速度応答スペクトルの最大値を与える周期をパルス周期 T_p と定義する。次に、 $0.8T_p \sim 1.5T_p$ の周期帯域にバンドパスフィルタを施した速度波形の振幅をパルス速度振幅 V_p と定義する。表1にパルス特性値の一覧を示す。

3.3 正規化加速度応答スペクトル

図7に示した正弦波パルスに対する加速度応答スペクトルが $T/T_p=1.5$ 付近で波数によらずほぼ一定値となる性質を利用して、正規化加速度応答スペクトルを次のように定義する。

まず、減衰定数 $h=0.05$ の加速度応答スペクトルの周期軸をパルス周期 T_p で除し、次に振幅軸を周期 $T=1.5T_p$ での加速度応答スペクトル

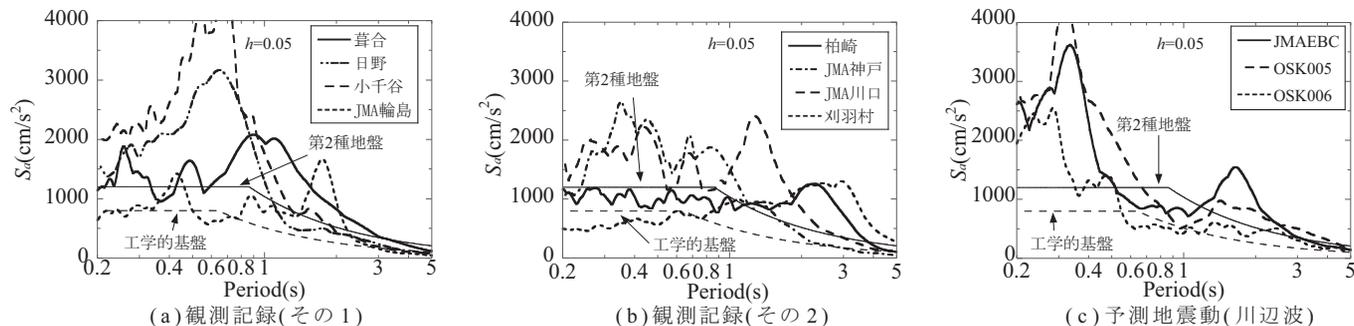


図14 加速度応答スペクトル

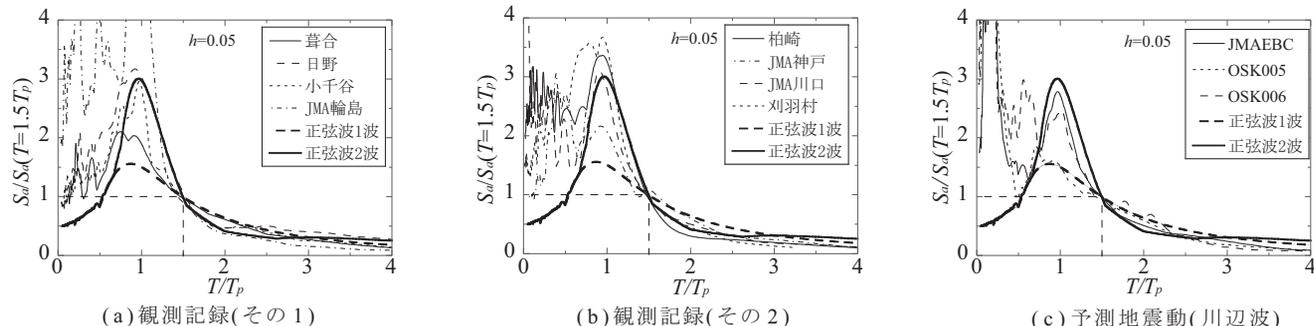


図15 正規化加速度応答スペクトル

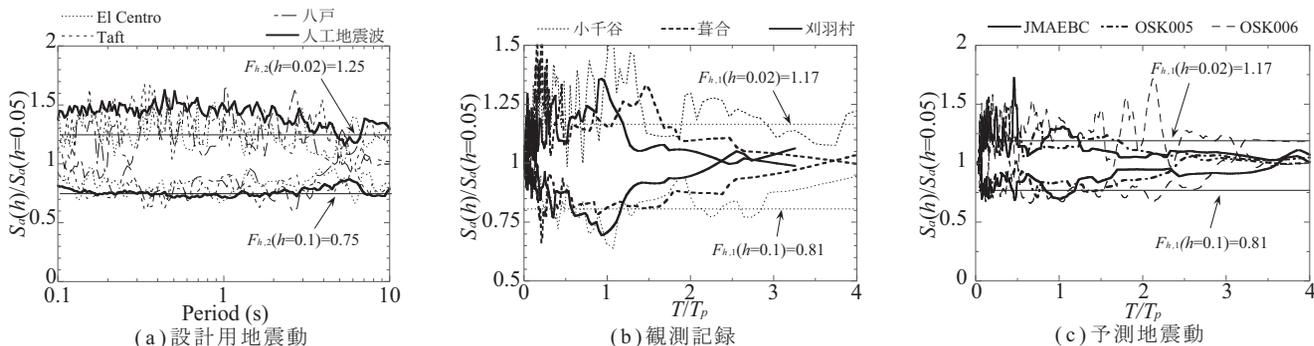


図16 減衰補正係数(図中に細線で示した F_b は式(17),(18)で算定)

の値 $S_a(T=1.5T_p)$ で除して、正規化加速度応答スペクトルを算定する。

図15に、観測記録および予測地震動の正規化加速度応答スペクトルを示す。図15には、 $n=1,2$ の正弦波パルスの正規化加速度応答スペクトルを重ねて示している。図15から、観測記録や予測地震動の正規化加速度応答スペクトルは、 $n=1$ または 2 の正弦波パルスの正規化加速度応答スペクトルで概ね近似できることがわかる。

3.4 減衰補正係数

図16に、設計用地震動、観測記録、川辺波の減衰補正係数 $F_h(h)$ ($= S_a(h) / S_a(h=0.05)$) を $h=0.02$ と 0.1 の場合について算定し、それぞれ示す。なお、設計用地震動として、El Centro 波、Taft 波、八戸波および告示スペクトルに適合するように作成した人工地震波10波の平均値について示している。図16(a)には次式で算定される減衰補正係数を細線で示している。

$$F_{h,2}(h) = 1.5 / (1 + 10h) \quad (18)$$

設計用地震動の減衰補正係数は、減衰定数 h が小さい場合に式(18)に対してやや大きくなっているが、幅広い周期帯域でほぼ一定値となっていることがわかる。

次に、図16(b),(c)には、式(17)で $n=2$ とした場合を細線で重ねて示す。図16より、式(17)の減衰補正係数は $T/T_p=1$ 付近では観測記録や予測地震動の減衰補正係数を概ね近似できている。

さらに、式(17)により F_h を周期によらず一定とすれば、正規化加

速度応答スペクトルの算定の際、 $S_a(T=1.5T_p)$ で無次元化するため、非減衰として求めた正規化加速度応答スペクトルを減衰定数5%の正規化加速度応答スペクトルとして扱うことができる。

4. 設計用地震荷重の提案

4.1 設計用応答スペクトル

2章、3章での議論を踏まえて、内陸直下地震に対する設計用地震荷重を減衰定数 $h=0.05$ の加速度応答スペクトル $S_a(\tau=T/T_p)$ として定義することを試みる。

まず、3章でも示したように、観測記録や予測地震動の正規化加速度応答スペクトルは、波数 $n=1,2$ の正弦波パルスの正規化加速度応答スペクトルで概ね近似できた。そこで、正弦波パルスの最大応答理論解(式(6),(7))を用いて、 $n=1,2$ の正弦波パルスに対する非減衰の正規化加速度応答スペクトルを概ね包絡するような関数 S_{a0} を次式で定義する。

$$S_{a0}(\tau) = \begin{cases} g_{1,1}(\tau) / f_1(1.5) & (0.25 < \tau < 0.5) \\ g_{1,2}(\tau) / f_1(1.5) & (0.5 \leq \tau < 0.667) \\ g_{1,3}(\tau) / f_1(1.5) & (0.667 \leq \tau < 0.75) \\ g_{1,4}(\tau) / f_1(1.5) & (0.75 \leq \tau < 1) \\ f_2(\tau) / f_1(1.5) & (1 < \tau < 1.5) \\ f_1(\tau) / f_1(1.5) & (1.5 \leq \tau) \end{cases} \quad (19)$$

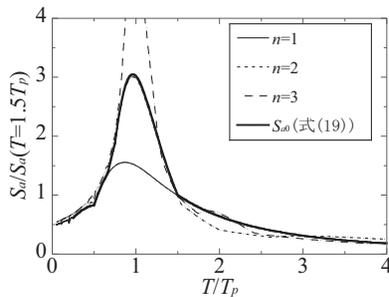


図17 提案スペクトル S_{a0}

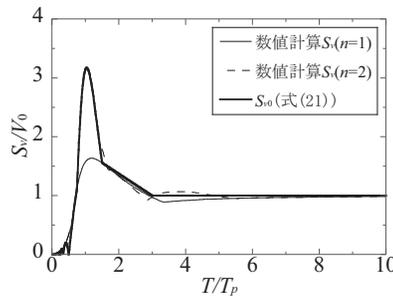


図18 提案速度応答スペクトル S_{v0}

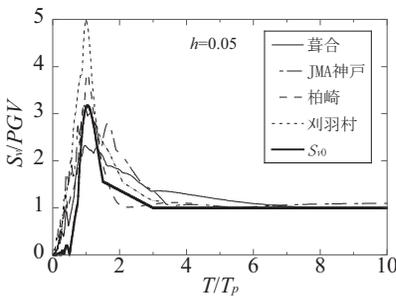


図19 観測記録との比較

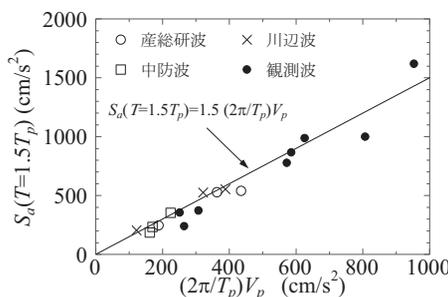


図20 $S_a(T=1.5T_p)$ と T_p, V_p の関係

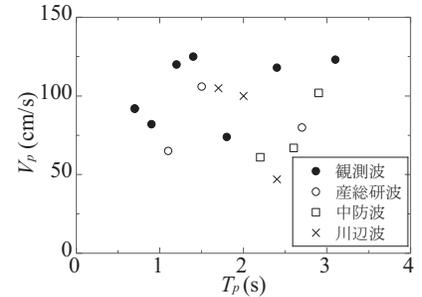


図21 パルス特性値の分布

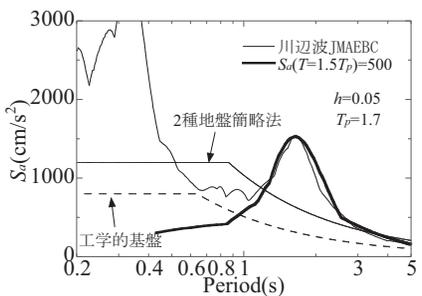
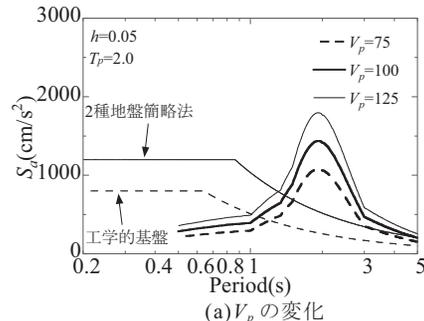
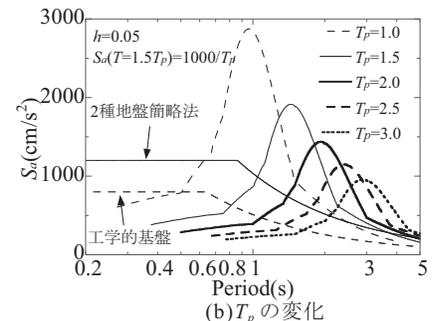


図22 提案スペクトルによる近似



(a) V_p の変化



(b) T_p の変化

図23 設計用応答スペクトルの例

ここで、 $f_1(1.5) = 6\sqrt{3}/5 \approx 2.08$ であり、正弦波パルスの加速度応答スペクトルの正規化に用いた値 $S_a(T=1.5T_p)$ である。図 17 に式(19)で算定される正規化加速度応答スペクトルを示す。

式(19)を用いて、次式によって設計用加速度応答スペクトルを提案する。

$$S_a(\tau) = S_a(T=1.5T_p) \cdot S_{a0}(\tau) \quad (20)$$

また、速度応答スペクトルについても、加速度応答スペクトルと同様に、 $n=1, 2$ の正弦波パルスに対する速度応答スペクトルを概ね包絡するような関数 S_{v0} を次式で定義する。

$$S_{v0} = \begin{cases} \left[\frac{\tau^2}{(\tau^2-1)} \cdot \sin(\pi/\tau) \right] & (\tau < 0.75) \\ \left[\frac{\tau^2}{(\tau^2-1)} \cdot \sin(2\pi/\tau) \right] & (0.75 \leq \tau < 1) \\ \pi & (\tau = 1) \\ \left[\frac{\tau^2}{(\tau^2-1)} \cdot \sin(2\pi/\tau) \right] & (1 < \tau < 1.5) \\ \frac{10-9\sqrt{3}}{15} \tau + \frac{9\sqrt{3}}{5} - 1 & (1.5 \leq \tau < 3) \\ 1 & (3 \leq \tau) \end{cases} \quad (21)$$

図 18 に、式(21)を数値計算による正弦波パルスの速度応答スペクトルとともに示す。また、図 19 には式(21)を観測記録の速度応答スペクトルとともに示す。同図から、式(21)が観測記録の速度応答スペクトルを概ね近似できていることがわかる。

4.2 $S_a(T=1.5T_p)$ の推定

正規化加速度応答スペクトルの作成に用いた $S_a(T=1.5T_p)$ がパルス特性値 T_p, V_p とどのような関係にあるのかを調べる。図 20 には、表 1 のパルス特性値 T_p, V_p より求めた等価最大加速度 $(2\pi/T_p)V_p$ と $S_a(T=1.5T_p)$ の関係を示す。図 20 から概ね $S_a(T=1.5T_p) = 1.5(2\pi/T_p)V_p$ の関係があると考えられる。

ここで、図 21 には、本研究で用いた地震動のパルス特性値の分布を示しているが、パルス周期 T_p は概ね 1 ~ 3 秒、パルス速度振幅 V_p は概ね 50 ~ 150 cm/s の範囲に分布していることがわかる。

4.3 設計用応答スペクトルの例

式(20)で提案した設計用加速度応答スペクトルを試算し、現行の設計用応答スペクトルとの比較をする。まず、提案した設計用加速度応答スペクトルを、川辺波の地点 JMAEBC のパルス特性値を参考に作成し、図 22 に示す。図中には告示による工学的基盤の標準加速度スペクトルを点線で、簡略法による第 2 種地盤の加速度応答スペクトルを細線で示す。同図より、1 秒以上の周期帯域で、提案スペクトルが現行の設計用スペクトルを大きく上回るとともに、川辺波の良い近似となっていることがわかる。

次に、図 23(a)に、提案した設計用応答スペクトルを T_p を一定として V_p を変化させて示す。また図 23(b)には、提案した設計用応答スペクトルを V_p を一定として T_p を変化させて示す。両図から、長周期帯域で提案した設計用応答スペクトルが現行の設計用応答スペクトルより大きく上回っていることがわかったとともに、パルス特性値 T_p および V_p の値によって地震荷重が大きく変化することがわかる。

5. まとめ

本研究では、内陸直下地震の震源近傍で想定されるパルス性地震動の特性を構造物の設計に反映させることを目的に、正弦波パルスに対する 1 自由度系の最大応答の定式化を行うとともに、設計用応答スペクトルの設定法の提案を行った。

まず、パルス性地震動に対する応答を理論的に考察するために、パルス性地震動を正弦波パルスで理想化し、波数 n の正弦波パルスに対する非減衰 1 自由度系の応答スペクトルを固有周期 T とパルス周期 T_p の比 $\tau = T/T_p$ の陽な関数として定式化した。次に、加速度応答スペクトルの周期軸をパルス周期で無次元化し、振幅軸をパルス周期 T_p の 1.5 倍の周期での振幅値 $S_a(T=1.5T_p)$ で無次元化することによって正規化加速度応答スペクトルを定義し、震源近傍の観測記録・予測地震動および正弦波パルスについて正規化加速度応答スペクトルを算定して三者を比較した。その結果、観測記録や予測地震動の加速度応答スペクトルは波数 $n=1$ または 2 の正弦波パルスの正規化加速度応答スペクトル $S_a/S_a(T=1.5T_p)$ とパルス特性値 T_p, V_p を用いて概ね近似できることを示した。最後に、正弦波パルスの正規化加速度応答スペクトルを用いて、パルス性地震動の特性を反映した設計用加速度応答スペクトルの設定法を提案した。

本研究で提案した設計用応答スペクトルを用いれば、内陸直下地震の震源近傍に建つ建物の設計に、パルス性地震動の影響を考慮することができると考えている。ただし、海溝型地震の場合には、その地震動特性に応じた設計用応答スペクトルを別途作成する必要がある。

本研究で提案した設計用応答スペクトルを算定するためには、パルス特性値 T_p, V_p を定める必要がある。既に述べたとおり、パルス周期 T_p やパルス速度振幅 V_p を変化させると、地震荷重は大きく変化するため、 T_p, V_p を適切に設定することが重要である。パルス特性値 T_p, V_p をどのように定めればよいかについては今後の課題としたい。なお、地震学的な知見のみからパルス特性値の設定を行うには、不確定性が避けられない。図 23 に示したように、現行の設計用地震荷重レベルを大きく上回ることも考えられ、地震学的な知見から得られるパルス特性値のとりうる範囲・蓋然性を考慮しつつ、パルス特性値に対応する地震動像や建物の最大応答、許容する損傷度などを考慮しながら設定するなど、地震学的な知見とともに工学的な判断が必要ではないかと考えている。

また、本研究では非減衰 1 自由度系の応答スペクトル形状を減衰 5% の設計用応答スペクトルとして用いることを考えたため、結果として減衰補正係数は周期に依存せず一定値とせざるを得なかった。図 16 に示した減衰補正係数の周期依存性（特に、 $T/T_p > 1$ ）についても、引き続き検討を行っていきたい。

謝辞

本研究では、防災科学技術研究所の強震観測記録を使用させて頂いた。また、(株)大林組本店建築設計部の亀井功氏には正弦波パルスの分析に関して有益な助言を頂き、清水建設(株)技術研究所の森井雄史氏(元京都大学助教)には、地震動の分析に関して多大なご協力を頂きました。記して感謝の意を示します。

参考文献

- 1) 宮武隆：断層近傍の強震動パルスの成因，地震第2輯，第51巻，pp161-170，1998
- 2) 釜江孝宏，入倉孝次郎：震源近傍域での強震動パルスの特性と断層破壊過程との関係，第3回都市直下地震災害シンポジウム論文集，pp75-78，1998
- 3) 地震調査研究推進本部地震調査委員会：主要活断層帯の長期評価の概要，<http://www.jishin.go.jp/main/choukihyoka/katsu.htm>，2009.10.14参照

- 4) 川辺秀憲, 釜江克宏 : 上町断層帯の地震を想定した強震動予測, 日本建築学会近畿支部耐震構造部会主催シンポジウム「上町断層帯による想定地震動に対する建物の耐震設計を考える」, pp17-24, 2009.1
- 5) 産業技術総合研究所活断層研究センター : 大阪府周辺地域の地震動地図地震動予測研究報告 暫定版, 2005.
- 6) 中央防災会議 : 東南海、南海地震等に関する専門委員会, 中部圏・近畿圏直下地震対策, http://www.bousai.go.jp/jishin/chubou/nankai/index_chukin.html. 2009.10.14参照
- 7) 大阪市 : 大阪市土木・建築構造物震災対策技術検討会 報告書, 1997.3
- 8) 大阪市 : 大阪市土木・建築構造物震災対策技術検討会 建築物の耐震性向上の指針 解説編, 1997.3
- 9) Chopra AK : Dynamics of structures, Prentice-Hall : Berkley, CA, 1995.
- 10) George P. Mavroeidis, Apostolos S. Papageorgiou : A Mathematical Representation of Near-Fault Ground Motions, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 93, No.3, pp.1099- 1131, 2003.6
- 11) Jonathan D.Bray, Adrian Rodriguez-Marek : Characterization of forward-directivity ground motions in the near-fault region, Soil Dynamics and Earthquake Engineering 24, pp.815- 828, 2004.4
- 12) 境有紀, 壁谷澤寿海 : 地震動の単純化および距離減衰式を用いて基盤動をサイン波1波で与える方法, 構造工学論文集, Vol.46B, pp.81-86, 2000.3
- 13) 張富明, 酒井久和, 河村廣, 久保哲夫 : 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, 構造工学論文集, Vol.50B, pp435-440, 2004.3
- 14) G. P. Mavroeidis, G. Dong and A. S. Papageorgiou : Near-fault ground motions, and the response of elastic and inelastic single-degree-of-freedom (SDOF) systems, Earthquake Engng Struct. Dyn., 33, pp.1023-1049, 2004
- 15) Paul G. Somerville : Magnitude scaling of the near fault rupture directivity pulse, Physics of the Earth and Planetary Interiors 137, pp.201-212, 2003
- 16) 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, 2007.10
- 17) 柴田明德 : 最新耐震構造解析, 森北出版, 1981
- 18) 亀井功, 野畑有秀, 田中清和 : 上町断層により生成される長周期パルス地震動の特性, 日本建築学会近畿支部耐震構造研究部会主催シンポジウム「上町断層帯による想定地震動に対する建物の耐震設計を考える」, pp7-16, 2009.1
- 19) 林康裕, 森井雄史, 川辺秀憲 : 予測地震動に対する建物応答と設計用地震荷重, 日本建築学会近畿支部耐震構造研究部会主催シンポジウム「上町断層帯による想定地震動に対する建物の耐震設計を考える」, pp25-34, 2009.1

(2009年6月9日原稿受理, 2009年10月7日採用決定)