

1. はじめに

1995年兵庫県南部地震における中高層建物被害の一要因として震源近傍において発生した顕著なパルス状の地震動(以後、パルス性地震動と呼ぶ)が挙げられる。また、大阪市域を縦断する上町断層帯の地震による予測地震動(例えば1,2)においても振幅レベルの極めて大きなパルス状の波形が見受けられる。ゆえに、パルス性地震動に対する建物応答特性を把握することや効果的な被害低減対策が望まれるところである。

そこで本研究では、パルス性地震動の影響を適切に考慮した合理的な設計を念頭に置き、パルス性地震動に対する建物応答特性および損傷制御法の応答低減効果を把握することを目的とし、せん断棒モデルと特性化パルスを用いて理論的および解析的検討を行う。なお、本論文は、筆者がこれまでにに行ったパルス性地震動に対する建物応答特性に関する研究³⁾や変形制御機構の効果に関する研究⁴⁾を統合すると共に、修正および加筆したものである。

2. 線形最大応答変形評価

本章では、応答解を理論的に導出し、最大応答変形角が発生するメカニズムの解明を試みる。

2.1 解析概要

(1) 入力パルス波

パルス性地震動を簡単な数学的モデルで特性化できるものとして、ここでは入力速度 $\dot{y}_0(t)$ が次式で表される Ricker wavelet を用いる。

$$\dot{y}_0(t) = -\sqrt{e} \tau_R V_p \exp\left(-\frac{\tau_R^2}{2}\right) \quad (1)$$

$$\tau_R = \frac{\omega_p}{\sqrt{2}}(t - T_p)$$

ただし、 V_p はパルス速度振幅、 T_p はパルス周期、 $\omega_p (=2\pi/T_p)$ はパルス角振動数をそれぞれ表す。Ricker wavelet は永久変位がなく、その速度波形は両振幅となる(図1)。パルス変位振幅 D_p で基準化した変位応答スペクトル S_d (図2)を見ると、固有周期とパルス周期の比 $T/T_p=1$ 近傍において応答が最大となることが分かる。また、 $T/T_p \geq 4$ では、建物には D_p に相当する変位が生じ、逆に、 $T/T_p \ll$

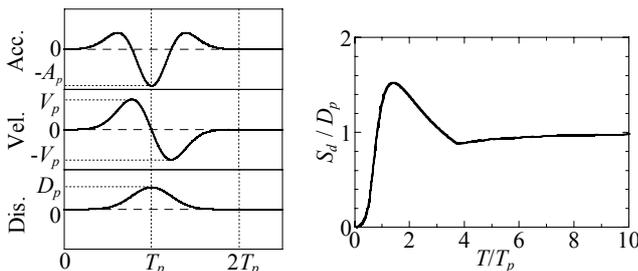


図1 Ricker wavelet

図2 Ricker wavelet に対する基準化変位応答スペクトル

1では、応答が急激に減少する傾向が理解できる。

(2) 建物モデル

ここでは、1次固有周期 T が建物高さ H に比例するような建物群を考える。

$$T = \gamma \cdot H \quad (2)$$

本章では、応答解の数式表現並びに応答特性の理解を優先するため、建物モデルとして一様せん断弾性棒(図3(a))を用いる。すると、 s 次固有周期 T_s 、モード分布 $\phi(x)$ (図4(a)) および刺激係数 β は、

$$T_s = T / (2s - 1) \quad (3)$$

$$\phi(x) = \sin((2s - 1)\pi x / 2H) \quad (4)$$

$$\beta = 4 / (2s - 1)\pi \quad (5)$$

と表現される。さらに、モード分布 $\phi(x)$ を高さ x で微分し、その最大値が1になるよう変形角モード分布 $\psi(x)$ (図4(b)) を定義する。

$$\psi(x) = \cos((2s - 1)\pi x / 2H) \quad (6)$$

なお、ここでは簡単のため、非減衰とする。

2.2 パルス波伝播理論

波動伝播理論に基づいて応答変形角 $R(x,t)$ を定式化するに当たり、まず無限長せん断弾性棒の応答変形角 $R_0(x,t)$ を考える。変形角は変位 u_0 の x 微分で表されるため、 $R_0(x,t)$ とその最大値 R_{0max} は次のようになる。

$$R_0(x,t) = \frac{\partial u_0}{\partial x} = -\frac{\gamma}{4} \cdot \dot{y}_0\left(t - \frac{\gamma}{4} \cdot x\right) \quad (7)$$

$$R_{0max} = (\gamma \cdot V_p) / 4 \quad (8)$$

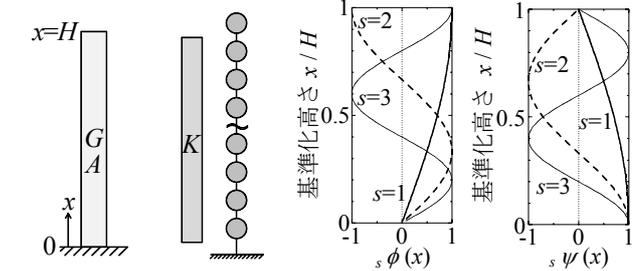
式(7)より入力速度の波形が建物内を伝播することが理解できる。また、 R_{0max} は γ と V_p だけで決定するため、容易に予測が可能である。一方、 $R(x,t)$ を導出するためには、 $R_0(x,t)$ に境界条件を考慮すればよい。

$$R(x,t) = \sum_{n=1}^{\infty} R_n(x,t) \quad (9)$$

$$R_{2k-1}(x,t) = (-1)^{k-1} \cdot R_0(x + 2(k-1)H, t)$$

$$R_{2k}(x,t) = (-1)^k \cdot R_0(-x + (2k-1)H, t) \quad (10)$$

一様せん断弾性棒と概ね等価な質点系せん断型モデル(図3(b))の時刻歴応答波形からは、1次固有周期比 $\tau (=T/T_p)$ が4.0の場合にパルス波が伝播する様子が視認できる(図5(b))。しかし、建物高



(a) せん断棒 (b) 質点系 図3 建物モデル

(a) 変位 (b) 変形角 図4 モード分布

さ H に対するパルス波長 λ_p (式(11))が大きい場合、各層の応答極値が概ね同時に発生しており、パルス波が伝播する現象と捉えてもあまり応答特性の理解に供することはないと考えられる(図5(a)).

$$\lambda_p / H = 4 \cdot t_{dur} / T = 8 / \tau \quad (11)$$

ただし、 t_{dur} は入力パルス波の継続時間を表す。また、最大応答変形角の最大値 ${}_{\max}R_{\max}$ およびそれが発生する高さ ${}_{\max}x$ と時刻 ${}_{\max}t_{\max}$ (以後、最大応答変形特性と呼ぶ)に注目すると、 ${}_{1}\tau$ によりその特性が異なることが分かる(図5)。そこで、 ${}_{1}\tau$ を変化させて最大応答変形特性を調べる(図6)。 ${}_{1}\tau > 2$ では下式により最大応答変形特性の評価が可能である。

$${}_{\max}R_{\max} / R_{0\max} = 2 \quad (12)$$

$${}_{\max}x / H = 1 - 1 / \tau \quad (13)$$

$${}_{\max}t_{\max} / T_p = \tau / 4 + 1 \quad (14)$$

一方、 ${}_{1}\tau \leq 2$ の範囲では概ね最下層において ${}_{\max}R_{\max}$ が発生し、 ${}_{1}\tau$ によって ${}_{\max}R_{\max}$ が著しく変化する傾向が理解できる。このように、 ${}_{1}\tau = 2$ を境界として最大応答変形特性が大きく異なることがわかる。

2.3 モード寄与率

次に、各固有モードの応答が最大応答にどれほど寄与するのかを、各固有モードの応答に分解して分析する。まず、 s 次モードの最大応答変形角 ${}_{s}R_{\max}(x)$ は下式のように表される。

$${}_{s}R_{\max}(x) = \beta \cdot (d_s \phi(x) / dx) \cdot S_d(s, \tau) \quad (15)$$

β だけでなく $S_d(s, \tau)$ 等も s に依存して変化するため、式(15)から各モードの影響を直接評価するのは困難である。そこで以下のように ${}_{s}R_{\max}(x)$ の最大値を表す ${}_{s}R_{\text{eff}}$ (以後、モード寄与率スペクトルと呼ぶ)と高さ方向分布を表す ${}_{s}\psi(x)$ に分離する。

$${}_{s}R_{\max}(x) = {}_{s}R_{\text{eff}} \cdot \psi(x) \quad (16)$$

$$\frac{{}_{s}R_{\text{eff}}}{R_{0\max}} = 8\alpha \cdot \frac{S_d(s, \tau) / D_p}{{}_{1}\tau} \quad (17)$$

すると、 ${}_{s}\psi(x)$ の最大値は s に依らず1であることから、 ${}_{s}R_{\text{eff}}$ は s 次モードの応答の最大応答への寄与率を表す良い指標になると考えられる。また、パルス波の種類によりスペクトル形状が決定するように、 ${}_{s}R_{\text{eff}}$ は $R_{0\max}$ で基準化することが可能である(図7、式(17))。ただし、 α はパルス波の種類により定まる係数であり、Ricker waveletの場合は $\alpha \approx 0.37$ となる。図7より ${}_{1}\tau$ が大きくなるに従って高次モードの寄与率が大きくなる傾向が理解できる。特に、 ${}_{1}\tau \leq 2$ の範囲では2次以上のモードの寄与率が比較的小さいため、1次モードの応答で近似可能である。つまり、 ${}_{1}\tau \leq 2$ の範囲では応答を1次モードの振動現象として捉えることにより、応答特性の理解が容易になる。逆に、 ${}_{1}\tau > 2$ の範囲では高次モードの影響が無視できないほど大きい、この範囲はパルス波の伝播現象として捉えることで応答特性の理解が容易になる ${}_{1}\tau$ の範囲と対応している。

以上のように、 ${}_{1}\tau = 2$ を境界として応答性状が大きく異なることは、パルス性地震動に対する建物応答を理解する上で非常に重要であると考えられる。例えば、30階建の鋼構造建物($\gamma = 0.03$, $T = 3.6\text{s}$)を想定すると、パルス周期 $T_p = 0.9\text{s}$ (${}_{1}\tau = 4.0$)の場合には最大応答が中間層で発生するのに対して、 $T_p = 3.0\text{s}$ (${}_{1}\tau = 1.2$)の場合には最大応答が最下層において発生することから、両者の被害低減対策が異なることが考えられる。また、建物応答特性を理解する際に、もし $T_p = 0.9\text{s}$ の場合も一般的によく利用されるモード分解による方法を用いたなら、その分析は非常に複雑になると考えられる。

3. 損傷制御法による応答低減効果

本章では、まず非線形化を考慮した場合の最大応答変形特性の変化を分析し、次に損傷制御法による応答低減効果を把握することを試みる。

3.1 解析概要

(1) 主架構モデル

初期剛性の分布が高さ方向に一律な質点系せん断型モデル(図3(b))を用い、各層の復元力特性はBi-linear型で降伏変形角 R_y は $1/150\text{rad}$ 、初期剛性に対する降伏後の剛性比を 0.01 とする(図8(a))。

(2) 損傷制御装置

主架構に配置する損傷制御装置として、ここで

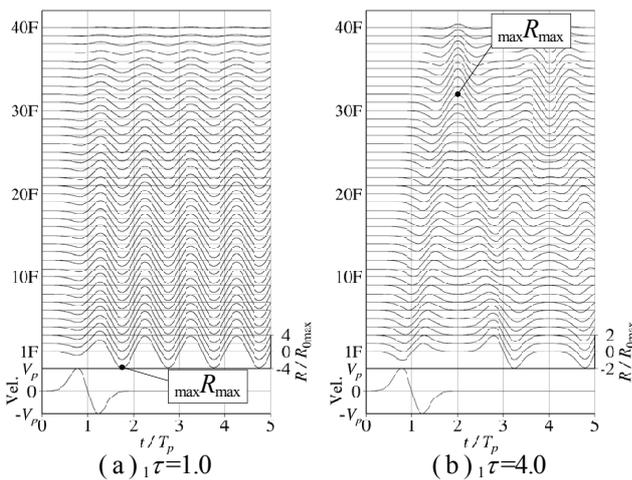


図5 応答変形角の時刻歴(非減衰)

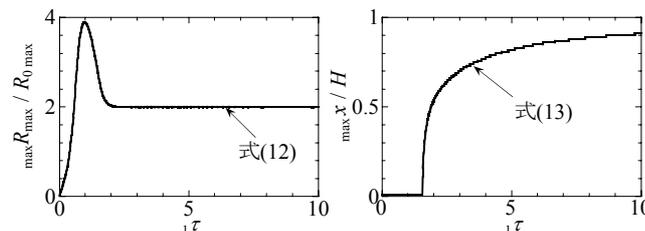


図6 基準化最大応答特性スペクトル(非減衰)

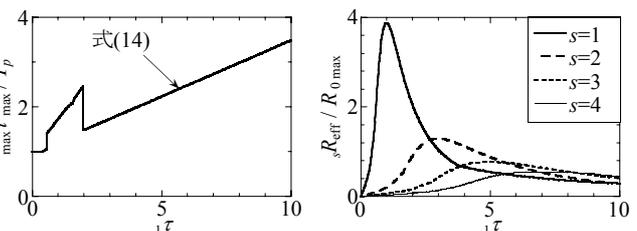


図7 基準化変形角モード寄与率スペクトル(非減衰)

は粘性系ダンパーと履歴型ダンパーを取り扱う。本章では、主架構の剛性分布に比例するような配置法（剛性比例配置）の場合を考える。粘性系ダンパーは1次減衰定数 $\gamma_D=0.04$ となるデバイス量を与える。また、履歴型ダンパーの復元力特性は低降伏点のBi-linear型（図8(b)）とし、主架構の降伏せん断力に対して0.2倍の降伏せん断力となるデバイス量を与える。

3.2 入力レベル依存性

$1\tau=1.2$ の場合、 $\max R_{\max}$ は V_p に依らず最下層で発生する（図9(a)）。それに対して、 $1\tau=4.0$ の場合に $\max R_{\max}$ が発生する層は、 $V_p=1.0\text{m/s}$ のとき中間層であるが、 $V_p=2.0\text{m/s}$ のとき最下層である（図9(b)）。このように、非線形化を考慮した場合、 1τ によっては入力レベルに依存して最大応答が発生する高さが変化する現象が見られる。これは、崩壊等が予測される層が 1τ だけでなく V_p に依っても変化することを意味し、対策を検討する上で重要な事実であると考えられる。

この現象について、線形のパルス波伝播理論に基づいて考察を行う。線形の場合、図5(b)より第30層で最大応答 $\max R_{\max}=2R_{0\max}=0.5\gamma V_p$ が発生することがわかる。今、 V_p を漸増することを考えると、第30層で塑性化を経験する最小の V_p は $V_p=2R_y/\gamma=4/9\text{m/s}$ である。さらに V_p を大きくしても $V_p=R_y/\gamma=8/9\text{m/s}$ となるまで、つまり、第1層の第1応答極値で塑性化する入力レベルになるまでは、第30層付近しか塑性化を経験しない。しかし、 V_p がある程度以上大きくなると、第1層における塑性変形量が大きくなるため、波がうまく上層部まで伝播せず、相対的に中間層の応答が小さくなる。そのため、 V_p が大きい時には最下層で $\max R_{\max}$ が発生したと考えられる。また、最大応答が発生する高さが変化すれば、その時刻も変化する（図5(b)）。

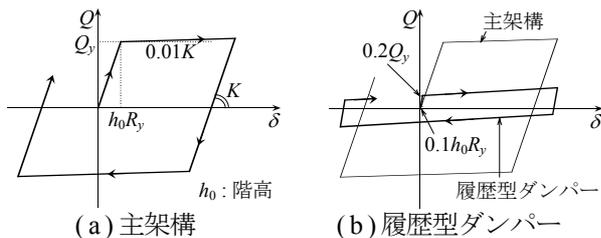


図8 各層の履歴特性

3.3 損傷制御法による応答低減効果

粘性系ダンパーを剛性比例配置した場合、 1τ や V_p に依らず $\max R_{\max}$ を低減することが可能であることが分かる（図10）。それに対して、履歴型ダンパーを剛性比例配置した場合、特に $1\tau=1.2$ 、 $V_p=2.0\text{m/s}$ のときにはダンパーを配置したことにより $\max R_{\max}$ が増加している（図11(a)）。この要因を探るため主架構の $\max R_{\max}$ スペクトル（ $V_p=2.0\text{m/s}$ ）を用いて、履歴型ダンパー付加に起因した固有周期の変化による応答の変化について調べる（図12）。履歴型ダンパーを配置したモデルについて、主架構弾性域における割線剛性から求めた等価固有周期比の上限値と下限値を■印で図中に示すが、主架構モデルの固有周期比（○印）よりも小さくなっており、この短周期化とともに $\max R_{\max}$ 増大方向へ移動することが分かる。これに対して実際の $\max R_{\max}$ 増加量はそれほど大きくない（図11(a)）のは、履歴型ダンパーを付加することにより、短周期化に起因した $\max R_{\max}$ 増大効果だけでなく、エネルギー吸収に起因した $\max R_{\max}$ 低減効果も付与されたためであると考えられる。このように剛性変化をとまなう損傷制御装置を付加する際には、 $\max R_{\max}$ が増加することが無いようスペクトル形状と固有周期の関係に注意する必要がある。

4. 損傷制御装置の配置法による影響

4.1 配置法

3章で用いた剛性比例配置の他に、特定層集中配置および変形角モード比例配置を扱う。ここでは、40階建モデルの第1層～第5層、第11層～第15層に集中配置した場合と1次モードおよび2次モードに比例するように配置した場合を考える（例：図13）。なお、ここでは配置法による応答低減効果の相違を分析するために、デバイス量の総量は配置法に依らず一定（3.1項に示すデバイス総量）とする。

4.2 配置法による影響

まず、粘性系ダンパーを特定層集中配置した場合の応答低減効果の違いを調べる（図14）。 V_p や 1τ に依らず、第1層～第5層に集中配置した場合に最も $\max R_{\max}$ を低減できることが分かる。その要因について、モード分解により考察を行う。そも

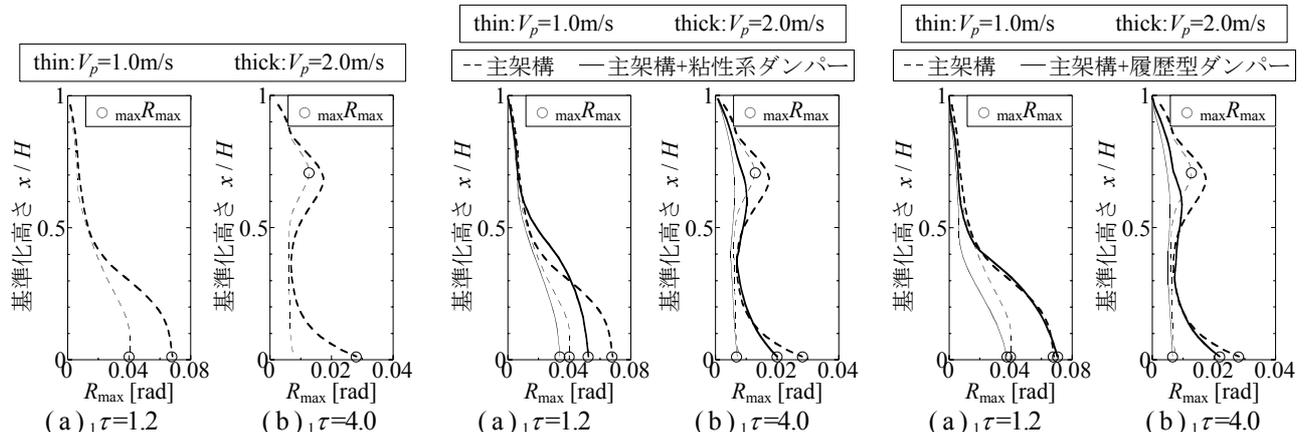


図9 V_p による R_{\max} の変化

図10 応答低減効果（粘性系ダンパー）

図11 応答低減効果（履歴型ダンパー）

そも、変形角モード寄与率 R_{eff} (図7, 式(17))の大きいモードの減衰定数を大きくすれば、 $\max R_{max}$ 低減効果が大きくなることが期待できるため、粘性系ダンパーの s 次モード減衰定数 ${}^{\text{VD}}_s h$ と R_{eff} の積の総和(${}^{\text{VD}}\Delta$)は $\max R_{max}$ 低減効果を表す良い指標になると考えられる。

$${}^{\text{VD}}\Delta = \sum_s R_{eff} \cdot {}^{\text{VD}}_s h \quad (18)$$

今、 ${}_1\tau=1.2, 4.0$ の場合に注目すると1次～3次の R_{eff} が大きい(図7)、 ${}^{\text{VD}}_s h (s=1, 2, 3)$ を大きくすれば ${}^{\text{VD}}\Delta$ も大きくなる。一様剛性分布の場合、

$${}^{\text{VD}}_s h = \frac{\int_0^H {}^{\text{VD}}_s h(x) \cdot \psi^2(x) dx}{\int_0^H \psi^2(x) dx} \quad (19)$$

であるため、 ${}^{\text{VD}}_s h$ を大きくするためには、 $\psi^2(x)$ が大きくなる高さ x における s 次モード減衰定数 ${}^{\text{VD}}_s h(x)$ を大きくすれば、つまり、 $\psi^2(x)$ が大きい位置のダンパー量を多くすればよい。第1層～第5層は、1次～3次の $\psi^2(x)$ が比較的大きい層と対応しているため(図15)、図14のように第1層～第5層に集中配置した場合に最も $\max R_{max}$ を低減できたものと考えられる。

次に、履歴型ダンパーを変形角モード比例配置した場合の応答低減効果の違いを調べる(図16)。ここで注視されるべきは、 ${}_1\tau=1.0$ の場合に2次モード比例配置したとき、中間層において $\max R_{max}$ が発生しており、その値も大きい点である。これ

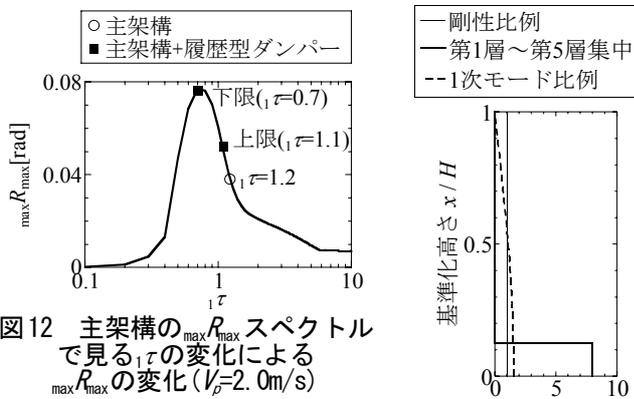


図12 主架構の $\max R_{max}$ スペクトルで見ると ${}_1\tau$ の変化による $\max R_{max}$ の変化($V_p=2.0\text{m/s}$)

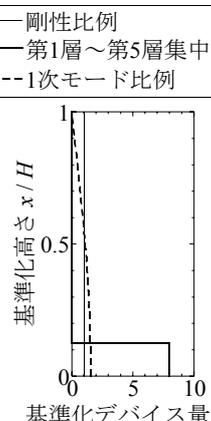


図13 デバイス量

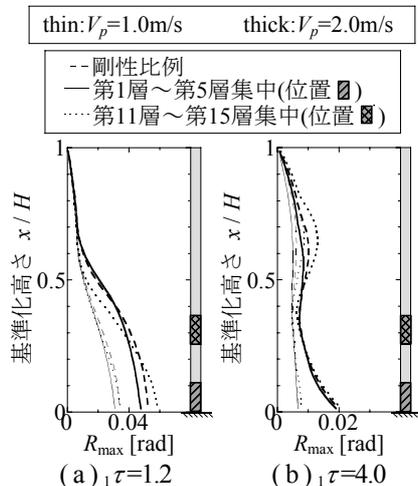


図14 配置法による応答低減効果の違い(粘性系ダンパー特定層集中配置)

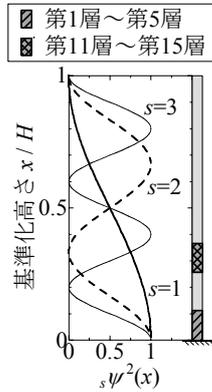


図15 特定層集中配置位置と変形角モード $s_psi^2(x)$ の関係

は、履歴型ダンパーのデバイス量と共に耐力が増加するため、周辺に比べてデバイス量が少ない層付近に損傷が集中したためと考えられる(図17)。このような損傷集中を引き起こさないように、耐力変化をともなう損傷制御装置の過度な不均等配置は避けられるべきである。

5. まとめ

本研究では、パルス性地震動に対する建物応答特性と損傷制御法の応答低減効果を把握することを目的として、パルス波に対する一様せん断弾性棒の最大応答変形評価を行い、さらに、非線形化の影響および損傷制御装置の種類や配置法による応答低減効果の違いを分析した。得られた知見を以下に示す。

- 1) 固有周期とパルス周期の比 ${}_1\tau$ によってパルス波伝播性状が異なることの重要性を指摘した。
- 2) ${}_1\tau$ によっては、非線形化を考慮した場合に入力レベルに依存して最大応答が発生する高さや時刻が変化することを指摘し、線形のパルス波伝播理論に基づいた考察からその現象の理論的な解釈を示した。
- 3) 一様剛性分布モデルに粘性系ダンパーを付加する場合、最下層付近に集中配置すれば ${}_1\tau$ によらず大きな応答低減効果が期待できる。
- 4) 履歴型ダンパーのように損傷制御装置の付加により剛性や耐力が変化する場合は、①周期変化による応答の増大や②過度な不均等配置に起因する損傷集中が発生しないように注意する必要がある。

(参考文献)

- 1) 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
- 2) 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
- 3) 南博之, 林康裕: パルス波地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, No.685, 2013.3
- 4) 南博之, 鈴木恭平, 多幾山法子, 大西良広, 林康裕: パルス性地震動に対する変形制御機構の効果に関する研究, 日本建築学会技術報告集, 第18巻, 第39号, pp.471-476, 2012.6

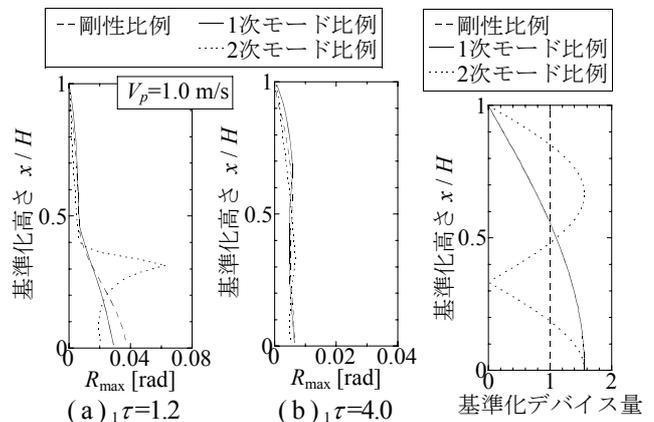


図16 配置法による応答低減効果の違い(履歴型ダンパー変形角モード比例配置)

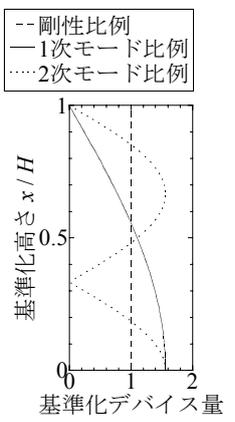


図17 変形角モード比例配置のデバイス量分布