

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

論題(和文)	制振構造を想定した弾塑性 1 質点系の知覚時間に関する研究
Title(English)	A Study on the Perception Time of A SDOF Elasto-Plastic System for Seismic Control
著者(和文)	添田幸平, 佐藤 大樹
Authors(English)	Kohei Soeta, Daiki Sato
出典(和文)	日本建築学会大会学術講演梗概集, , , pp. 329-330
Citation(English)	, , , pp. 329-330
発行日 / Pub. date	2023, 9
権利情報	一般社団法人 日本建築学会

# 制振構造を想定した弾塑性1質点系の知覚時間に関する研究

制振構造 知覚時間 弾塑性  
超高層 長周期地震動

正会員 ○添田 幸平\*1 同 佐藤 大樹\*2

## 1. はじめに

2011年東北地方太平洋沖地震において、首都圏に建つ超高層建物の多くが大きな揺れを経験し、建物の揺れの時間および周期が長いことが建物滞在者に大きな恐怖を与えた<sup>1)</sup>。構造安全性は建物に生じる最大応力・最大変形を用いて評価されるが、建物滞在者に大きな恐怖を与えないとは言い切れない。

本研究は、建物滞在者に大きな恐怖を与える揺れの時間(以降、知覚時間 $t_p$ )を用いてダンパーの効果の評価することを目的とする。本研究で扱う知覚時間は、最上階床における応答値の絶対値が判定値を最初に超えた時 $t_{Pstart}$ から最後に下回る時 $t_{Pend}$ までの時間(= $t_{Pend} - t_{Pstart}$ )と定義する(図1)。

前報では、ダンパー配置が後揺れおよび知覚時間に与える影響を確認した<sup>2,3)</sup>。本報は、弾塑性1質点系における知覚時間の特性を確認する。

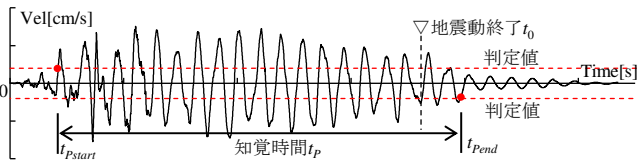


図1 知覚時間の定義

## 2. 弾塑性1質点系の終盤応答について

知覚時間を算出する際、 $t_{Pend}$ の評価が重要であること<sup>3)</sup>、 $t_{Pend}$ は弾性応答を示す地震動の終盤または自由振動区間に位置すること<sup>3)</sup>を踏まえ、本報では、弾塑性1質点系における $t_{Pend}$ 時の応答速度について検討する。

まず地震動( $t=0 \sim t_0$ )に対する弾性1質点系の応答について言及する。地震動をインパルス外力の連続と捉え、時刻 $t$ における応答速度 $\dot{x}(t)$ は、力積 $\int f(\tau) d\tau$ のインパルスによって生じる自由振動の重ね合わせで表現できる。

$$\dot{x}(t) = \int_0^t g(t-\tau) f(\tau) d\tau \quad (1)$$

ここで、 $\tau$ : 力積が加えられた時刻、 $g(t-\tau)$ : 力積が加えられてから $(t-\tau)$ だけ経過したときのインパルス応答、 $f(\tau)$ :  $t = \tau$ 時の外力を示す。

外力 $f(t)$ を $f_1(t)|_{0 \leq t < t_1} + f_2(t)|_{t \geq t_1}$ のように $t=t_1$ で分割し、 $f_1(t)$ および $f_2(t)$ それぞれの応答速度を $e\dot{x}_1(t)$ および $e\dot{x}_2(t)$ とすると、応答速度は線形性より次式となる。

$$e\dot{x}(t) = e\dot{x}_1(t) + e\dot{x}_2(t) \quad (2)$$

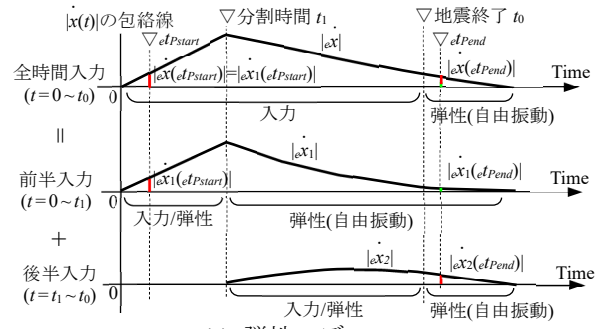
同様に、弾塑性1質点系において、 $t \geq t_1$ では弾性応答を示す場合、応答速度は弾塑性応答 $p\dot{x}_1(t)$ と弾性応答 $p\dot{x}_2(t)$ (= $e\dot{x}_2(t)$ )の和で表現できる。

ここで、 $t_{Pend}$ が $t \geq t_1$ に位置し、 $t_1$ から $t_0$ までの時間が十分に長い場合、 $t \geq t_1$ 範囲では自由振動を示す $p\dot{x}_1(t_{Pend})$ は $p\dot{x}_2(t_{Pend})$ と比べて十分に収束し( $p\dot{x}_1(t_{Pend}) \approx e\dot{x}_1(t_{Pend})$ ),

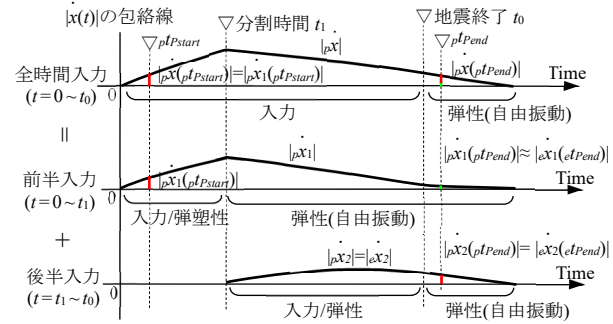
$t = t_{Pend}$ における応答速度 $p\dot{x}(t_{Pend})$ は次式となる。

$$p\dot{x}(t_{Pend}) = p\dot{x}_1(t_{Pend}) + p\dot{x}_2(t_{Pend}) \approx e\dot{x}_1(t_{Pend}) + e\dot{x}_2(t_{Pend}) = e\dot{x}(t_{Pend}) \quad (3)$$

上記の関係より、弾塑性1質点系における $t = t_{Pend}$ 時の応答速度は弾性1質点系で模擬できると考えられる(図2)。



(a) 弾性モデル



(b) 弾塑性モデル

$$t_1 \sim t_0 \text{ が十分に長い場合, } \begin{cases} e\dot{x}(t_{Pend}) = e\dot{x}_1(t_{Pend}) + e\dot{x}_2(t_{Pend}) \\ p\dot{x}(t_{Pend}) = p\dot{x}_1(t_{Pend}) + p\dot{x}_2(t_{Pend}) \approx e\dot{x}_1(t_{Pend}) + e\dot{x}_2(t_{Pend}) \end{cases}$$

十分に収束 弾性応答のため等しい

図2 分割入力の概要

## 3. 弾塑性1質点系が知覚時間に与える影響

### 3.1 解析概要

検討に用いる解析モデルは、地上30層の超高層鋼構造建物を想定した図3の仕様とする。弾性周期 $T=3 \sim 5$ s, 減衰定数 $h=1 \sim 5\%$ , 二次剛性比 $p(=K_2/K_1)=0.4 \sim 0.9$ および降伏耐力 $\alpha_y(=F_y/Mg)=3 \sim 10\%$ をパラメータとする。減衰は弾性1次固有周期に対して $h\%$ となる初期剛性比例型とする。知覚時間算出時の判定値は前報<sup>3)</sup>に倣う。

検討用地震動は、前報と同様、観測波2波、模擬波3波の計5波とする。観測波は、Hachinohe 1968 NS波<sup>4)</sup>(以降 HACHI。最大速度は基準化しない。), 2011年東北太平洋沖 NS<sup>5)</sup>(観測点は新宿 TKY007。以降 TOHOKU)を採用する。模擬波は、南海トラフ地震<sup>6)</sup>(以降 KA1)および大正関東地震<sup>7)</sup>(場所は東京都庁。以降 TA), 告示波(極稀, 位相特性は HACHINOHE 1968 NS, 以降 告示 H)を採用する。図4に擬似速度応答スペクトル $pSv_r(h=5\%)$ を示す。なお、地震動終了後の自由振動区間として各地震動

の後ろに約 150 秒間の  $0 \text{ cm/s}^2$  のデータを追加した。

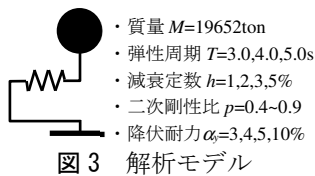


図3 解析モデル

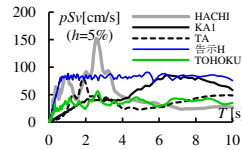


図4 応答スペクトル

### 3.2 応答の重ね合わせからみた終盤応答

図5に弾塑性1質点系( $T=4.0\text{s}$ ,  $p=0.6$ ,  $\alpha_y=5\%$ ,  $h=2\%$ )と弾性1質点系の相対速度波形を重ねて示す。図5(a)に層の塑性率 $\mu(t)$ を用いて算出した等価周期 $T_{eq}(t)$ (式(4))の時刻歴波形, 図5(b)および(c)に分割入力による応答波形を示す。

$$T_{eq}(t) = \begin{cases} T, & (\mu \leq 1) \\ T\sqrt{\mu(t)/(1-p+p\mu(t))}, & (\mu > 1) \end{cases} \quad (4)$$

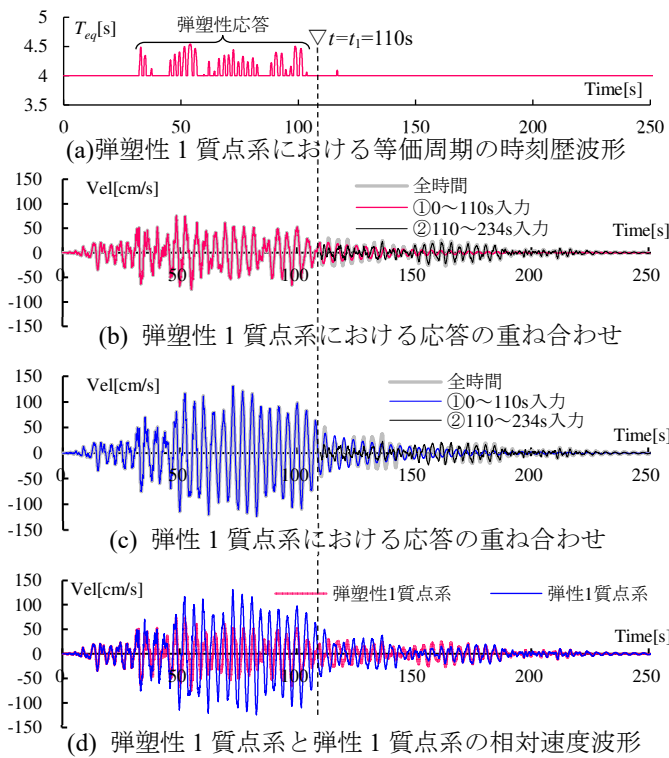


図5 応答の重ね合わせ

・図5(a)の等価周期の変動から, 弾塑性1質点系は約110sまで弾塑性応答を示し, それ以降は弾性応答を示すことが確認できる。この結果をもとに2章で示した外力の分割時間 $t_1$ を110sとした。

・図5(b)および(c)より, 0~110s入力の応答(①)は110s以降自由振動となり180s以降に収束し, 終盤は110~234s入力の応答(②)が支配的となる。

・図5(d)より, 110sまでは塑性化の影響により弾塑性1質点系と弾性1質点系の応答に差が生じているが, 0~110s入力の応答(①)が収束する180s以降は, 弾塑性1質点系と弾性1質点系が概ね等しいことが確認できる。

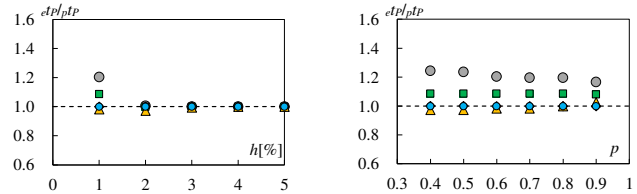
よって,  $t_1$ から $t_0$ までの時間が十分に長い場合, 弾塑性1質点系における $t=t_{Pend}$ 時の応答速度は弾性1質点系で模擬

\*1 久米設計  
\*2 東京工業大学

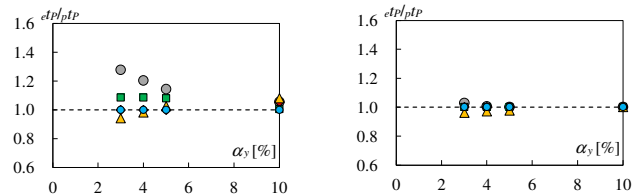
できる。

### 3.3 各パラメータが与える影響

各パラメータに対して検討し, 弾塑性1質点系における $t=t_{end}$ 時の応答速度は弾性1質点系で模擬できる条件を確認する。図6に弾性1質点系の知覚時間 $e_{TP}$ と弾塑性1質点系の知覚時間 $p_{TP}$ の比率 $e_{TP}/p_{TP}$ とパラメータの関係を示す。



(a)  $h$  との関係 ( $p=0.6, \alpha_y=4\%$ ) (b)  $p$  との関係 ( $h=1\%, \alpha_y=4\%$ )



(c)  $\alpha_y$  との関係 ( $p=0.6, h=1\%$ ) (d)  $\alpha_y$  との関係 ( $p=0.6, h=2\%$ )

○ 告示H ◆ KAI ■ HACHI ▲ TOHOKU ● TA

図6  $e_{TP}/p_{TP}$  とパラメータの関係 ( $T=3\text{s}$ )

・図6(a)より,  $h$  が大きいほど  $e_{TP}/p_{TP}$  は1に近づき, 特に  $h$  が1~2の間で変化が大きい。

・図6(b)より,  $p$  が大きいほど  $e_{TP}/p_{TP}$  は1に近づく傾向はあるが,  $p$  の影響は小さい。

・図6(c)および(d)より, 告示Hは $\alpha_y$ の影響が大きい, 他の地震波の場合影響が小さい。また,  $h > 2\%$ では $\alpha_y$ の影響が小さい。

・概ね  $e_{TP}/p_{TP} \geq 1$ , つまり弾塑性1質点系の知覚時間 $p_{TP} \leq$ 弾性1質点系の知覚時間 $e_{TP}$ の関係を示し, 弾性1質点系を用いれば知覚時間は安全側の評価となる。

・TOHOKU波のように $e_{TP}/p_{TP} < 1$ となるケースもある。紙幅の都合上分析結果は省略するが, 中盤の弾塑性応答部分の周期変動により, 終盤の弾性応答との間に位相差が生じたためである。

### 5. おわりに

終盤における地盤終了までの弾性応答区間が十分に長い場合, 弾塑性1質点系における $t=t_{Pend}$ 時の応答速度は弾性1質点系で模擬できることを確認した。また, 各パラメータの影響について確認した。

#### 参考文献

- 気象庁: 東北地方太平洋沖地震における長周期地震動による揺れの実態調査について, 長周期地震動に関する情報のあり方検討会(第1回), 2011.11
- 添田幸平ら: 粘性ダンパーと履歴ダンパーを併用配置した超高層鋼構造建物の後揺れに関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造II, pp.767-768, 2021.9
- 添田幸平ら: 粘性ダンパーと履歴ダンパーを併用配置した超高層鋼構造建物の知覚時間に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造II, pp.551-552, 2022.9
- 翠川三郎ら: 1968年十勝沖地震の八戸港湾での強震記録の再数値化, 日本地震工学会論文集, 第10巻, 第2号, 2010
- National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience (2019), NIED K-NET, National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience (DOI: <https://doi.org/10.17598/NIED.0004>)
- 内閣府: 南海トラフ沿いの巨大地震による長周期地震動に関する報告, 南海トラフの巨大地震モデル検討会, 首都直下地震モデル検討会, 2015.12
- 地震調査研究推進本部地震調査委員会: 長周期地震動評価 2016年試作版-相模トラフ巨大地震の検討-, 2016.10

\*1 KUME SEKKEI  
\*2 Tokyo Institute of Technology