

## 長周期・長時間地震動を想定した免震制動装置の特性設定に関する解析的研究

## Analytical study on characteristics setting of seismic isolation buffering devices

## assuming long cycle / long time ground motion

○若原達也<sup>1</sup>, 石鍋雄一郎<sup>2</sup>, 中島肇<sup>2</sup>, 柳田佳伸<sup>3</sup>, 新井佑一郎<sup>3</sup>\*Tatsuya Wakahara<sup>1</sup>, Yuichiro Ishinabe<sup>2</sup>, Hajime Nakajima<sup>2</sup>, Yoshinobu Yanagita<sup>3</sup>, Yuichiro Arai<sup>3</sup>

Abstract: Installing buffering devices that operates when the base isolation layer is displaced to some extent is effective to prevent the seismic isolation layer from colliding against the retaining wall in response to seismic movements greatly exceeding the assumption of the Building Standards Law. In this research, the influence of the actuation displacement and stiffness of the buffering device on the response of the base isolation layer is grasped, using the predicted seismic motion of the long period ground motion, and to consider the characteristic setting of the buffering device.

## 1. はじめに

建築基準法の想定を大きく超える地震動に対し、免震層を擁壁に衝突させないための対策として、免震層の変形に応じて作動する制動装置を設置する方法がある。本研究では長周期の予測地震動を用いて、制動装置の作動変位や剛性が免震層の応答に与える影響を把握し、制動装置の特性設定に関して考察する。入力地震動は国土交通省から公表されている、今後発生する可能性が高いとされる南海トラフ沿いの予測地震動を用いる<sup>1)</sup>。

## 2. 最大変位の算出と通過速度の補正

Table1 の解析条件より、制動装置なしの 1 質点系の時刻歴応答解析を行った。公表されている地震動は、工学的基盤の値であるため、表層での地盤の増幅を考慮して、1, 1.2 倍, 1.4 倍の条件を設定している。応答解析結果より、免震層最大変位  $\delta_{max}$  (以下,  $\delta_{max}$ ) が 50cm を超えた場合を制動装置を用いる条件とし、制動装置の設定および制動作動時の解析を行う。

Table1. Analysis Condition without Buffering

免震周期 $T_f$	3, 4, 5, 6
ダンパーの降伏せん断力係数 $\alpha_s$	0.04, 0.05, 0.06
入力地震動倍率	1, 1.2, 1.4

制動装置を設定するにあたり、制動装置が吸収する制動作動前の運動エネルギーを算出するために、制動開始変位の通過速度の検討が必要となる。地震時に構造物は単振動していると仮定して、式(1)より通過速度  $V$  を算出する。

$$V = \frac{2\pi\delta_{max}}{T_f} \cos \left\{ \sin^{-1} \left( \frac{\delta}{\delta_{max}} \right) \right\} \quad (1)$$

$T_f$ : 免震周期,  $\delta$ : 通過変位。

式(1)より、時刻歴応答解析結果 (以下, 解析値) で

得られた  $\delta_{max}$ ,  $T_f$  で計算した場合、計算値が解析値を下回るケースがあった。そのため、解析値を正とし、不確実性を考慮して、計算値が解析値を上回るよう補正する必要がある。

補正方法は、通過速度と最大変位を 10cm ごとにグループに分け、計算値に対する解析値の比率の各平均値を算出し、その値に+0.3 した値を補正值とした。補正值の一覧を Table2 に示す。

Table2. List of Correcting Magnification of Passage Speed

$\delta_{max}$	通過変位 (cm)							
	10	20	30	40	50	60	70	80
~10	-	-	-	-	-	-	-	-
~20	2.4	-	-	-	-	-	-	-
~30	1.8	1.9	-	-	-	-	-	-
~40	1.6	1.7	1.8	-	-	-	-	-
~50	1.6	1.7	1.8	1.9	-	-	-	-
~60	1.6	1.6	1.7	1.7	1.8	-	-	-
~70	1.5	1.5	1.6	1.6	1.6	1.7	-	-
~80	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	-
~90	1.3	1.3	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4

## 3. 制動装置の設定

使用する制動装置は鋼管コイルばね<sup>2)</sup>とする。制動装置の作動開始変位  $\delta_0$  (以下,  $\delta_0$ ) から初期剛性  $k_b$  で緩やかに上昇し、鋼管コイルばねが拘束材に巻き付き始める変位  $\delta_I$  (以下,  $\delta_I$ ) から二次剛性  $k_{b2}$  に切り替わり、エネルギー吸収能力が上昇する特性を有する。

免震層の応答変位を目標変位  $\delta_t$  (以下,  $\delta_t$ ) 以内とするために制動装置の初期剛性  $k_b$  と免震ゴムアイソレータの剛性  $k_r$  との比 (以下, 初期剛性倍率  $k_b/k_r$ ) を求める。Fig.1 は予測式の簡略図を示し、制動作動前のアイソレータの弾性ひずみエネルギーと運動エネルギーが制動作動後の制動装置と免震ゴムアイソレータのひずみエネルギーに変化したことを表している。 $V_0$  は免震層の初速度を表し、制動装置を用いない場合の  $\delta_0$  の通過速度を用いる。また、制動装置の二次剛性  $k_{b2}$  と初期

剛性  $k_b$  の比 (以下, 二次剛性倍率  $k_{b2}/k_b$ ) は 15/1.3 とし,  $\delta_t$  を設定し, 初期剛性倍率  $k_b/k_f$  の予測式を式(2)に表す.

$$\frac{k_b}{k_f} = \frac{MV_0^2 - K_f \delta_t^2 + K_f \delta_0^2}{\frac{k_{b2}}{k_b} \delta_t^2 - 2\delta_t \delta_0 + \delta_0^2 + 2\delta_t \delta_1 - 2\frac{k_{b2}}{k_b} \delta_t \delta_1 - \delta_1^2 + \frac{k_{b2}}{k_b} \delta_1^2} \quad (2)$$

$\delta_0$ : 制動装置の作動開始変位,  
 $\delta_t$ : 二次剛性に切り替わる変位,  
 $k_f$ : 免震ゴムアイソレータの剛性,  
 $k_b$ : 制動装置の初期剛性,  
 $k_{b2}$ : 制動装置の二次剛性,  $M$ : 質量,  $V_0$ : 通過速度.

4. 制動作動時の解析

Table3 の解析条件で制動作動時の 1 質点系の解析を行う. 地震動は SZ1 とする. 制動作動時の  $\delta_{max}$  を評価するにあたって,  $\delta_t$  を上回るケース (以下, 過大変形) と  $\delta_t$  より 20cm 小さいケース (以下, 過小変形) に着目する. Table4 では, 各  $\delta_0$  の  $\delta_{max}$  と制動なし時の  $\delta_{max}$  を示す. 過大変形となったものと過小変形になったそれぞれについて,  $\delta_{max}$  と  $\delta_t$  との差が最も大きいものの通過速度を Table5 に示し, それぞれの運動エネルギー—

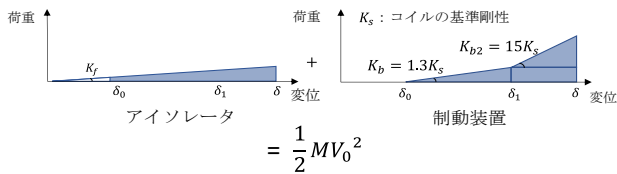


Fig.1. Simplified Drawing of Prediction Equation

Table3. Analysis Condition

目標変位 $\delta_t$	50, 60, 70, 80
制動装置が作動する変位 $\delta_0$	20, 30, 40, 50, 60
二次剛性に切り替わる変位 $\delta_1$	$\delta_0+5, \delta_0+10$
初期剛性倍率 $k_b/k_f$	式 (2) から算出
二次剛性倍率 $k_{b2}/k_b$	15/1.3

Table4. Analysis Result  
 ex)  $T=3, \alpha_s=0.04 \rightarrow T3 S4$

$\delta t$	$\delta_0 - \delta_1$	SZ1 1.4倍															
		T3 S4	T4 S4	T5 S4	T6 S4	T3 S5	T4 S5	T5 S5	T6 S5	T3 S6	T4 S6	T5 S6	T3 S7	T4 S7	T5 S7	T6 S7	
50	20-25	43.0	43.2	51.7	60.4	37.2	39.7	48.2	50.8	36.4	40.3	44.3					
	20-30	38.4	41.1	47.1	56.8	35.9	41.5	48.9	51.6	34.8	41.7	45.9					
	30-35	42.1	43.7	48.9	55.3	37.9	45.0	49.7	49.7	38.7	44.5	46.2					
	30-40	42.3	46.2	50.5	55.2	42.6	46.4	49.6	50.4	41.0	45.7	46.9					
	40-50	51.9	49.3	62.4		43.0	48.4	53.2									
60	20-25	44.9	47.3	61.9		40.0	49.5	54.7									
	20-30	48.9	51.2	62.0		42.2	51.4	54.3									
	30-35	47.8	53.6	61.3		45.4	53.4	55.2									
	30-40	51.4	55.7	62.8		50.2	55.6	55.7									
	40-50	52.1	56.7	60.6		53.3	56.3	56.3									
70	20-25	60.6	58.0			47.8											
	20-30	52.6	54.2			44.9											
	30-35	55.2	58.2			49.6											
	30-40	51.0	60.2			50.4											
	40-45	57.0	61.7			56.0											
80	40-50	58.2	62.7			57.3											
	50-55	61.6	67.1			62.4											
	50-60	64.4	65.8			65.1											
	20-25	69.9	66.1														
	20-30	63.1	64.2														
制動なし	30-35	59.6	64.1														
	30-40	55.3	65.4														
	40-45	63.6	68.7														
	40-50	65.6	69.6														
	50-55	69.8	72.3														
50-60	71.4	71.5															
60-65	74.8	74.4															
60-70	75.7	74.0															
制動なし	85.9	84.8	66.8	58.0	71.2	67.8	60.6	52.3	58.5	54.8	54.7						

変形関係を Fig.2 に, 制動装置の荷重—変形関係を Fig.3 に示す.

Table4 より, 過小変形となるものは  $\delta_0$  が小さい場合に見られ,  $\delta_0$  が大きいと  $\delta_{max}$  は大きくなり,  $\delta_t$  に近づく. 制動なし時の  $\delta_{max}$  と  $\delta_t$  の差が小さく,  $T_f$  が 5, 6 秒のケースでは過大変形となる場合があった. Table5 より, 通過速度を比較すると, 過小変形時は予測値が解析値を上回っており, 過大変形時は解析値が予測値を上回った. Fig.2 より, 予測値と解析値を比較すると, 過大変形時は解析値が予測値を上回り, 過小変形時は予測値が解析値を大きく下回る傾向が見られた. Fig.3 より, 過大変形時は作動開始変位が繰り返しによって大きくなっており, 過大変形時に通過速度や  $\delta_{max}$  が大きくなることに起因すると考えられる.

5. まとめ

制動装置の作動変位と剛性が免震層の応答に与える影響を検討した. 今後は過大 (過小) 変形時の通過速度の補正方法を確認し直し, 多質点のモデルを解析することで上部構造への影響を確認する必要がある.

6. 参考文献

- [1] 国土交通省ホームページ: 「超高層建築物等における南海トラフ沿いの巨大地震におけ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](http://www.mlit.go.jp/jutakukentiku/build/jutakukentiku_house_fr_000080.html) (2018年5月9日閲覧)
- [2] 新井佑一郎, 土田堯章, 柳田佳伸, 石鍋雄一郎: 「鋼管コイルばねを用いた免震緩衝装置の開発 (その1 概要と効果検証実験)」, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (関東), 2015.9

Table5. Analysis Value and Predicted Value of Passage Speed

条件	通過速度	
	解析値	予測値
(a) 過大変形時 (T6 S4 $\delta t=50cm$ 20-25)	109.1	91.2
(b) 過小変形時 (T3 S5 $\delta t=70cm$ 20-30)	108.2	229.0

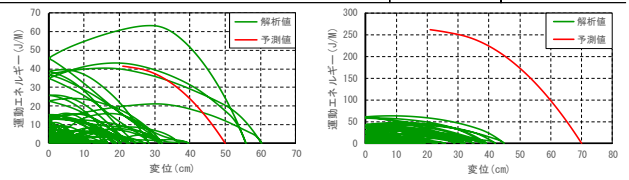


Fig.2. Relationship between Kinetic Energy and Deformation

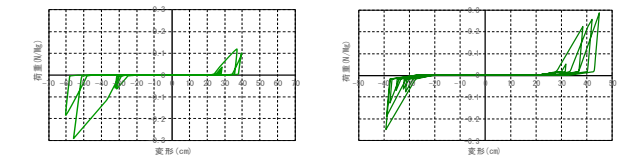


Fig.3. Relationship between Load and Deformation