

B-43

同調 D.M. システムを有する構造物設計法に関する研究

その 2 特徴的な地震動に対する超高層構造物の制震設計例

A study on design method for structure with tuned dynamic mass systems

Part2: Seismic response control design example of super high-rise structures for characteristic ground motions

稀代康平⁴, 石丸辰治¹, 古橋剛², 郭鈞桓³, 押山育未⁴, 土田堯章⁴*Kouhei Kitai⁴, Shinji Ishimaru¹, Takeshi Furuhashi², Kuo Chunhuan³, Ikumi Oshiyama⁴, Takaaki Tsuchida⁴

In the part 1, it is shown that the characteristics of long period waves and pulse waves. In addition, it is shown that two design method which proposed by Ishimaru for a characteristic ground motion. In the part 2, it is shown that seismic response control design example of super high-rise structures using the design method of two types of Tuned Dynamic Mass System, response analysis results and its effectiveness.

2.1 はじめに

その 1 では、長周期地震動や指向性パルス地震動といった特徴的な地震動と、石丸らによる同調 D.M. システムの 2 種類の設計方法を簡単に紹介した。その 2 では、2 種類の同調 D.M. システムの設計方法を用いた超高層構造物の設計例を示し、特徴的な地震動に対する応答結果及び、有効性を確認する。

2.2 検討モデル概要

本研究では、Figure 2-1 に示す制震モデル ModelGJ2 を用いて検討を行っていく。

本研究で対象とする超高層構造物においては曲げ変形が卓越するため、シアリンク型、ブレース型制震機構などの制震効果があまり期待できないと考えられる。そこで、本研究ではダンパーに作用する変位(水平, 上下)を増幅し、効率的にエネルギーを吸収することが出来るトグル装置を用いて設計を行う。

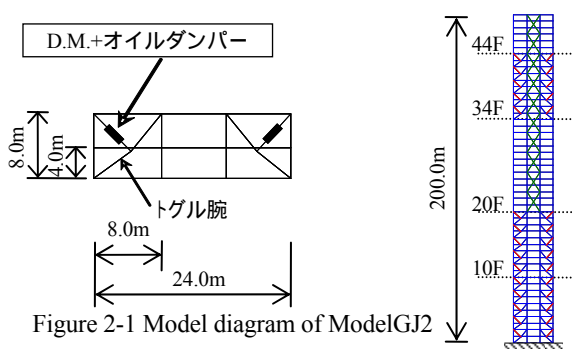


Figure 2-1 Model diagram of ModelGJ2

2.3 設計手法概要

2.3.1 制震機構の設定及び設置箇所

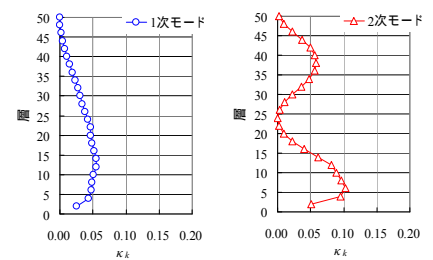
従来の制震設計では制震装置の設置場所や、ダンパーの最適値が明確でないという問題がある。この問題に対し、本研究では石丸らにより提案されている「固有周期と付加剛比 κ_k 」の概念^[1]を用いる事で、有効な制震装置の設置箇所を簡易に判断できる事を示す。

(1-3)式から、 κ_k の値が大きくなるほどより高い減衰効果を得られることが分かる。したがって κ_k を大きくするために、トグル腕の断面積は 0.12m^2 という種柱程度に大きな部材を採用している。なおトグル装置による増幅倍率を 4 と設定していることから、梃子の原理より、ダンパーの性能が 4^2 の 16 倍に増幅される。

ここで、Figure 2-1 に示した複層トグル装置を、非制震モデルの最下層から 2 層間ずつ順次設置した系に対し、

(1-1)式より各層ごとの κ_k をモード毎に算出する。

Figure 2-2 に設置層と κ_k の関係図を示す。

Figure 2-2 κ_k - Installation layer plot

ここで、Figure

2-2 に着目すると、1 次モードを制震対象とする場合には、下部層に制震装置を設置し、2 次モードを対象とする場合には、0~10 層、34~44 層間に制震装置を設置すれば、高い粘性減衰定数を得られることがわかる。

2.3.2 制震設計概要

前節で、有効に制震性能が得られる制震装置の設置箇所を κ_k から簡単に判断できることを示した。その為、Table 2-1 に示す 2 層間トグル制震装置の設置箇所を、モード同調制御を用いて 1, 2 次モードを制御し、さらに擬似モード制御法を用いて、高次モードの制御を行った。Table 2-1 から分かるように、0~10 層間では左右の複層トグル装置で制御手法を変えていることに特徴がある。

なお、(1-1)式より κ_k が固有周期の関係式であるため、 κ_k の値をより大きくするために 20~50 層に軸剛性 $500,000\text{kN/m}$ のブレースを配置し、原構造の上部層を

硬くしている。

Table2-1 Installation layer of seismic control device

設置位置	制御対象モード	
	左側	右側
34-44 層間	2 次モード	2 次モード
10-20 層間	1 次モード	1 次モード
0-10 層間	2 次モード	擬似モード制御

モード同調制御法による 1 次モードの目標粘性減衰定数 h_1 は、

$$h_1 \approx 0.5 \sim 0.6 \sqrt{\frac{1 \cdot \kappa_k}{2 + \kappa_k}} \Rightarrow h_1 = 0.5 \sim 0.6 \sqrt{\frac{0.25}{2.25}} = 0.17 \sim 0.20 \quad (2-1)$$

3 次(原構造の 2 次)モードの目標粘性減衰定数 h_3 は、

$$h_3 \approx 0.5 \sim 0.6 \sqrt{\frac{3 \cdot \kappa_k}{2 + \kappa_k}} \Rightarrow h_3 = 0.5 \sim 0.6 \sqrt{\frac{0.76}{2.76}} = 0.26 \sim 0.31 \quad (2-2)$$

となる。次に擬似モード制御法について述べていく。理論展開の詳細は論文^[2]を参照されたい。ここでは提案されている設計式から算出される D.M.量を設置することで、高次モードの刺激係数を低減する手法であることを理解しておけばよい。そのため、途中計算の詳細は割愛し、最終的に必要な D.M.量を(2-3)式に示す。

$$\begin{Bmatrix} \hat{\eta}_{10} \\ \hat{\eta}_8 \\ \hat{\eta}_6 \\ \hat{\eta}_4 \\ \hat{\eta}_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0.9 \\ 0.72 \\ 0.54 \\ 0.36 \\ 0.18 \end{Bmatrix} \longrightarrow \begin{Bmatrix} m_{10}' \\ m_8' \\ m_6' \\ m_4' \\ m_2' \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 213.3 \\ 810.7 \\ 1792.0 \\ 3157.3 \\ 4906.7 \end{Bmatrix} \quad (2-3)$$

ここで、 m_i' : 下部 10 層複層の層質量

$\hat{\eta}_i$: 下部 10 層複層の外乱の分配ベクトル

Table 2-2 にモード同調制御法に必要なダンパー量を、Table 2-3 に擬似モード制御法に必要な D.M.量を示す。また複素固有値解析結果を Table 2-4 に示す。

Table 2.2 Damper parameters

D.M.(ton)	0-10 層複層左側	380
	10-20 層複層	2950
	34-44 層複層	190
c_d (kN·s/m)	0-10 層複層左側	-
	0-10 層複層右側	2300
	10-20 層複層	2500
	34-44 層複層	1150
	固有周期(sec)	$T_{01}(T_{02})$ 注 1)
	$T_{02}(T_{04})$	4.29(0.85)
	$T_{04}(T_0)$	6.06(1.70)
	$T_1(T_2)$	5.42(1.28)
	$T_1(T_2)$ (1-2)式より	5.43(1.29)
	$T_2(T_4)$ (1-1)式より	0.25(0.76)
粘性減衰定数	$h_1(h_2)$	0.18(0.28)
	$h_1(h_2)$ (2-1), (2-2)式より	0.17(0.26)

Table 2.3 Damper parameters

場所	D.M.(ton)
8-10 層間 (右側)	13.3
6-8 層間 (右側)	50.7
4-6 層間 (右側)	112.0
2-4 層間 (右側)	197.3
0-2 層間 (右側)	306.7

注 1) () は 3 次モードを意味する。

Table 2.4 Complex eigenvalue analysis of ModelGJ2

モード	$T(s)$	h	$\bar{\eta}$
1	6.51	0.18	0.72
2	4.48	0.22	0.16
3	1.8	0.28	0.73
4	0.89	0.27	0.4
5	0.61	0.1	0.63
6	0.57	0.08	0.34
7	0.52	0.13	0.07
8	0.46	0.09	0.09
9	0.36	0.08	0.68
10	0.32	0.09	0.35

1 次モード同調 注 2)
2 次モード同調 注 2)
擬似モード制御

注 2) ここでいう 1,2 次モードは原構造のモードのことである。
 $\bar{\eta}_j$: j 次モードの入力低減率

2.4 解析結果

Figure 2-3 に長周期地震動に対する時刻歴応答解析結果を示す。非制震モデルでは、最大層間変形角が 1/50 以

上となり、かなりの損傷が生じる可能性があるといえる。一方 ModelGJ2 では、検討地震動に対して最大層間変形角が 1/100 以内に納まっており、高い制震効果を有していることが分かる。このことから、長周期地震動に対しては 1 次モードの減衰定数を確保することが出来れば応答低減が可能であるといえる。

一方、Figure 2-4 に示す指向性パルス地震動の応答結果に注目すると、制震モデルにおいて層間変形角が低減されていることが分かる。この理由として、上部層の 20~50 層にブレースを設置し、制震性能を左右する κ_k の値を大きくしたことで制震性能が向上したこと、また擬似モード制御により高次モードを抑制がされているという点が挙げられる。

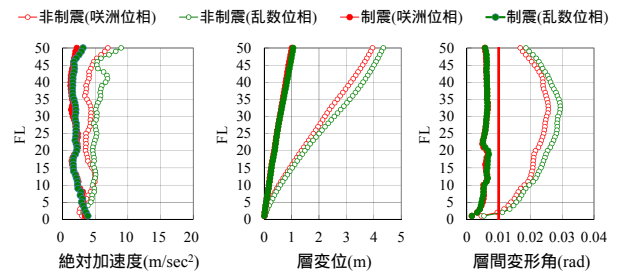


Figure2-3 Response analysis for long-period wave

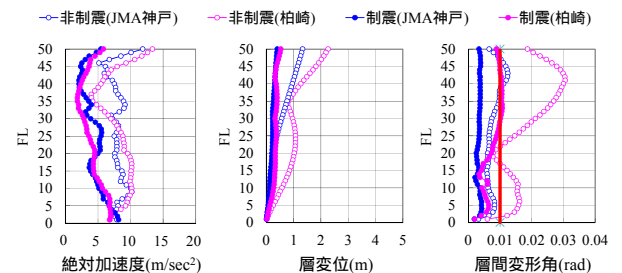


Figure2-4 Response analysis for pulse wave

2.5 まとめ

その 2 では、超高層構造物の制震設計例として、石丸らによる同調 D.M.システムの設計法に基づいて制震モデルを構築し、特徴的な地震動に対応する応答、及び有効性を示した。このことから、それぞれの設計法を併用することで、より高い制震効果が得られるといえる。その 3 では、原構造の塑性を考慮した設計法として、塑性率制御法を用いた設計例とその応答解析結果を示す。

【参考文献】

- [1] 石丸辰治, 秦一平, 三上淳治, 公塚正行: 付加剛比による D.M.同調システムの簡易設計法, 日本建築学会構造系論文集 第 654 号, pp.1455-1464, 2010.6
- [2] 石丸辰治, 秦一平, 古橋剛: 擬似モード制御による D.M.同調システムの簡易設計法, 日本建築学会構造系論文集 第 661 号, pp.509-517, 2011.3