

MC-CK 型同調システムに関する基礎的研究

その1. MC-CK 型同調システムの最適設計式

Study on MC-CK type tuned dynamic mass system

Part1. Optimal design formula of MC-CK type tuned dynamic mass system

○河内佑介³, 秦一平¹, 阿久戸信宏¹, 郭鈞桓², 栗林愛季³

*Yusuke Kawachi³, Ippei Hata¹, Nobuhiro Akuto¹, Chunhuan Kuo², Aiki Kuribayashi³

Abstract: This paper shows an optimal design formula of MC-CK type tuned dynamic mass system. Two types of a design method, such as “MC-K” and “M-CK”, by tuned dynamic mass system on previous papers work for displacement control but they have any problems. On the other hand, MC-CK type tuned dynamic mass system which works efficiently has been proposed, but a design method of it and a performance of it for real scale structure haven't been derived. In this paper, we derive the optimal design formula of MC-CK and verify it for multi-mass system.

1. はじめに

建築物に対する地震の応答制御として、D.M.同調システムを用いたモード同調制御法^[1]が提案されている。既往の研究^[2]では、ダイナミック・マスと粘性減衰、ばね剛性を用いた2種類のD.M.同調システムについての最適設計式および設計法が示され、固有周期の関係式より最適同調および最適減衰を満足する制震装置のデバイス量が簡易に設定することができる。それぞれの要素の配置から以降ではこれらのシステムを「MC-K型」、「M-CK型」と呼称する。両システム共に、オイルダンパーを用いた設計よりも制御対象モードに大きな粘性減衰の付与が可能であり、応答変位に対する制震効果が非常に高い。しかし、MC-K型では高次モードへの減衰付与がなされないこと、また、M-CK型では慣性質量ダンパーが有するD.M.部の内部減衰が考慮されていないことが課題としてあげられる。

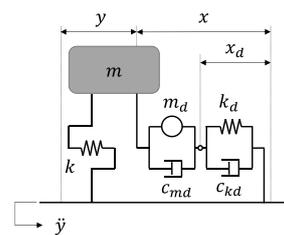
一方、D.M.と粘性減衰を並列に配置した要素と、ばね剛性と粘性減衰を並列に配置した要素を、直列に接続した制震システムについては、磯田らの研究^[3]が挙げられる。本研究ではこのシステムを「MC-CK型」と呼称する。また、菊池ら^[4]は免震構造物を対象にMC-CK型を用いた際の地震時応答変位制御について検討し、システムの有効性を示している。しかし、MC-CK型を用いた設計法については、多質点モデルに対するモード同調制御の最適設計法や、実大建築物への適用性など不明確な点が多い。

以上を踏まえて、本研究では実用化を見据えて慣性質量ダンパーの内部減衰を考慮したMC-CK型最適設計法の提案および応答性能を確認することを目的とする。

2. MC-CK 型の最適同調式・最適減衰式

Fig.1 に示す MC-CK 型の最適同調式と最適減衰式を導出する。まず、減衰係数 $c_{md} = 0$, $c_{kd} = \infty$ の状態の固有周期を $T_\infty = 2\pi\sqrt{m + m_d/k}$ とすると、非制震時の固有周期は $T_0 = 2\pi\sqrt{m/k}$ であるから、質量比 $\gamma_m (= m_d/m)$ は (1) 式のような周期の関係式で示すことができる。

MC-CK 型の釣合式は (2), (3) 式のようになる。ここで、剛性比 $\gamma_k = k_d/k$ として、(2), (3) について定常振動 $x = X e^{i\omega t}$, $x_d = X_d e^{i\omega t}$, $\ddot{y} = -\omega^2 Y e^{i(\omega t + \theta)}$ とおくと、相対変位応答倍率曲線における $c_{md} = c_{kd} = 0$ 時と非制震時の応答倍率の交点（定点）の方程式は (4) 式のように求められる。ここで $\lambda = \omega/\omega_0$, ω_0 は非制震時の固有円振動数である。



m	Structure mass
k	Structure stiffness
m_d	Dynamic mass (D.M.)
k_d	Spring stiffness
c_{md}	Damping coefficient of m_d
c_{kd}	Damping coefficient of k_d

Fig.1 SDOF model with MC-CK system

$$\gamma_m = \left(\frac{T_\infty}{T_0}\right)^2 - 1 \quad (1)$$

$$(m + m_d)\ddot{x} - m_d\ddot{x} + c_{md}\dot{x} - c_{md}\dot{x}_d + kx = -m\ddot{y} \quad (2)$$

$$-m_d\ddot{x} + m_d\ddot{x}_d - c_{md}\dot{x} + (c_{md} + c_{kd})\dot{x}_d + k_d x_d = 0 \quad (3)$$

$$2\lambda^4 - \left(2 + \gamma_k + 2\frac{\gamma_k}{\gamma_m}\right)\lambda^2 + 2\frac{\gamma_k}{\gamma_m} = 0 \quad (4)$$

1 : 日大理工・教員・建築 2 : 日大理工・任期制職員・建築 3 : 日大理工・院 (前)・建築

(4) 式の解を λ_p^2 , λ_q^2 とおくと, 定点理論に基づいた定点 P, Q の応答倍率が等しくなる条件は (5) 式となる。

$$\frac{\gamma_k}{\gamma_m} = \frac{2}{2-\gamma_m} \quad (5)$$

また, $c_{md} = c_{kd} = 0$ としたときの特性方程式の解を $\lambda_{0,1}^2$, $\lambda_{0,DM}^2$ とおくと, (6) 式の関係が表せる。

$$\lambda_{0,1}^2 \cdot \lambda_{0,DM}^2 = \frac{\gamma_k}{\gamma_m} \quad (6)$$

(1), (5) 式を (6) 式に代入すると(7)式に示す最適同調式が得られる。 $T_{0,1}$, $T_{0,DM}$ は 1 次モード, D.M.モードの周期であり, D.M.モードは MC-CK 型の設置により生じた振動モードである。また, 定点理論に基づいた定点 P, Q の応答倍率は $\sqrt{2/\gamma_m}$ と表せるため, 近似値として共振時の応答倍率を $1/(2h_{opt})$ とおけば, (8) 式に示す最適減衰式が得られる。 h_{opt} は最適粘性減衰定数である。

$$T_0 = \sqrt{T_{0,1} \cdot T_{0,DM} \sqrt{\frac{2}{2-\gamma_m}}} \text{ or } T_\infty = \sqrt{T_{0,1} \cdot T_{0,DM} \sqrt{\frac{2(1+\gamma_m)^2}{2-\gamma_m}}} \quad (7)$$

$$h_{opt} \cong 0.5 \sqrt{\frac{\gamma_m}{2}} \quad (8)$$

ここで例として, 導出した最適設計式を用いて 1 質点系における応答倍率曲線を Fig.2 に示す。この検討では目標減衰定数を $h_{opt} = 0.10$ として最適設計を行った。最適同調式および最適減衰式を用いることで, 定点理論に基づいて高さが揃い, 最適化されていることが確認できる。

3. 多質点系モデルへの適用

本検討では多質点系モデルを用いて MC-CK 型の制震効果を確認する。なお, MC-CK 型システムを 1 層目のみに配置し, 目標減衰定数 $h_{opt} = 0.10$ と設定して最適設計を行う。解析モデルは, 超高層建築物を模擬した 8 層せん断モデルであり, 1 次モードの固有周期は 3[s]である。Table1 に解析モデルの非制震時の諸元と固有値解析結果を示す。内部粘性減衰定数はレーリー型で $h_1 = h_2 = 0.01$ とする。

導出した (7), (8) 式の最適設計式より決定した MC-CK 型の諸元および複素固有値解析結果を Table2 に示す。1 次モードおよび D.M.モードの粘性減衰定数が 0.10程度となり目標を満足していることが確認できる。また, 高次モードにも減衰が付与されていることが確認できる。Fig.3 に解析モデルの共振曲線を示す。MC-CK 型では制御対象とした 1 次モードのみならず, 高次モードまで応答倍率の低減効果が確認できる。

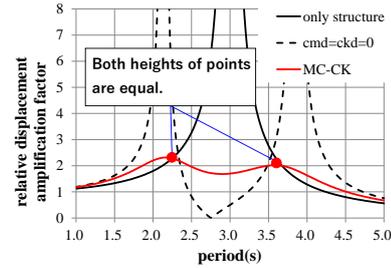


Fig.2 Amplification factor of 1-layer

Table1 Parameters and Natural period of the 8-DOF model

FL	Structure mass (ton)	Structure stiffness (kN/m)	FL	Structure mass (ton)	Structure stiffness (kN/m)	Mode	Period(s)
8	1.1	84.2	4	1.0	134.7	1st	2.914
7	1.0	96.7	3	1.0	145.1	2nd	1.059
6	1.0	111.8	2	1.0	154.1	3rd	0.654
5	1.0	119.7	1	1.0	166.7	4th	0.482

Table2 Optimal design of MC-CK system

Parameters of MC-CK system			Mode	Period(s)	h
m_d (ton)	c_{md}, c_{kd} (kN·m/s)	k_d (kN/m)	1st	3.112	0.095
11.5	6.5	78.5	D.M.	2.659	0.100
			2nd	1.021	0.014
			3rd	0.633	0.018
			4th	0.467	0.022

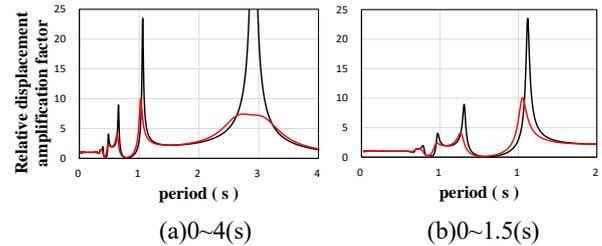


Fig.3 Amplification factor of 8-layer

4. まとめ

本報その 1 では MC-CK 型の最適同調式および最適減衰式を理論的に導出した。導出した最適設計式は多質点系にも適用可能であり, 制御対象としたモードだけでなく高次モードまで減衰が付与されることを確認した。

参考文献

- [1] 石丸辰治, 秦一平 他: 「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, Vol.75, No.654, pp.1455-1464, 2010.8
- [2] 郭鈞桓, 秦一平 他: 「粘性減衰とばね剛性の並列型 (MC-CK) 型 D.M.同調システムの応答性能に関する研究」, 日本建築学会構造系論文集, Vol.85, No.777, pp.1375-1385, 2020.11
- [3] 磯田和彦, 半澤徹也 他: 「回転慣性質量ダンパーを組み合わせた応答低減機構による 1 質点系振動モデルの応答特性に関する研究」, 日本建築学会構造系論文集, Vol.74, No.642, pp.1469-1476, 2009.8
- [4] 菊池淳哉, 池永昌容 他: 「粘弾性要素支持された粘性マスダンパーを有する免震構造物の地震時応答特性」, 日本建築学会構造系論文集, Vol.80, No.716, pp.1515-1524, 2015.10