K-17

ばね-粘性減衰(K-C)並列型 D.M. 同調新システムの応答性能に関する基礎的研究
その 1. K-C 並列型 D.M. 同調新システムの制震性能

A basic study on the performance of spring-viscous damping parallel configured new tuned dynamic mass system
Part.1 The performance of K-C parallel configured new tuned dynamic mass system

○梶山瑞生 [3], 秦一平 [1], 阿久戸信宏 [2], 市川達也 [2],
川口雄暉 [2], 織田悠汰 [3], 加藤亮 [3], 田代直生 [3]
* Mizuki Kajiyama [3], Ippei Hata[1], Nobuhiro Akuto[2],Tatsuya Itikawa
Yuuki Kawaguchi[2], Yuuta Oda[3],Ryou Katou[3],Naoki Tshiro[3],

Abstract: In this report, the optimum design formula of the new system is derived, and the seismic control effect is confirmed by a study example using the optimum design.

1-1 はじめに

超高層建築物では, 1 次モードの固有周期が長いため, 応答変位を低減させるために制震ダンパーを採用している事例が多いが， 直下型地震のような短周期成分が卓越する地震動に対しては, 2 次モードや 3 次モードの共振が応答に大きく影響する. 超高層建築物の制震装置の選択として, 例えばオイルダンパー（粘性系）を用いた場合, 1 次モード又は 2 次モード以降においても, 粘性減衰を与える効果があるが, より大きな粘性減衰を付与させるためには, 多くダンパー台数を必要とする． その改善方法として, 粘性ダンパーとダイナミック・マス（以降，D.M.）を並列にした D.M.同調システム [1] [2] （以降，従来システム）があり, より小さな減衰係数で大きな粘性減衰を付与できる. 一方, 従来システムでは, 例えば 1 次モードに対する最適設計を行った場合, 高次モードの応答倍率は小さくならない課題がある. そのため, 別途高次モードを制御するダンパーが必要となる. 本研究では, ばね(K)と粘性減衰(C)を並列に配置し, 更に D.M.を直列に配置した K-C 並列型 D.M.同調新システム（以降，新システム）と最適設計式を提案し, 試験体の振動試験を行う と共に, 設計例を示し, より効率の良い制震構造の確立を目的とする.

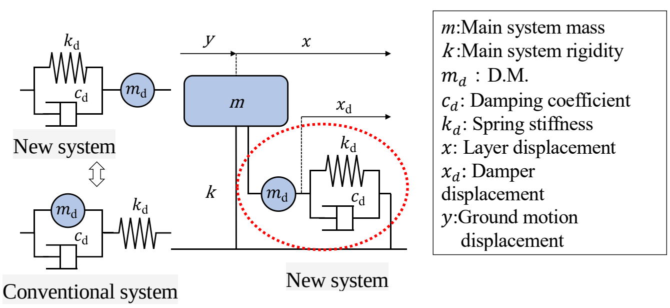

Figure 1-1. New system 1 point system analysis model

1-2 新システムの最適同調式・最適減衰式

Figure 1-1 に示す新システムの最適設計式である「最適同調式」と「最適減衰式」を導出する．まず, 固有周期 T_∞ は減衰係数 $c_d=\infty$ の状態とすれば，$T_\infty=2\pi\sqrt{(m+m_d)/k}$ となる. なお, 質量比 $\gamma_m=m_d/m$ とし, 非制震時の固有周期 T_0 は T_0=$2\pi\sqrt{m/k}$ であるため, 上記の T_∞ との関係を整理すると， 質量比 γ_m は (1) 式のような周期の関係式となる.

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

新システムの動的な釣合式は(2),(3)式のようになる.

$$(m+m_d)\ddot{x}-m_d\ddot{x}_d+kx=-m\ddot{y} \tag{2}$$

$$-m_d\ddot{x}+m_d\ddot{x}_d+c_d\dot{x}_d+k_dx_d=0 \tag{3}$$

ここで,剛性比 $\gamma_k=k_d/k$ とし,(2),(3)式において定常振動 $x=Xe^{i\omega t}$, $x_d=X_de^{i\omega t}$, $\ddot{y}=-\omega^2Ye^{i(\omega t+\phi)}$ とおくと,相対変位応答倍率曲線における $c_d=0$ と $c_d=\infty$ の応答倍率の交点（定点）の方程式 [1] は(4)式のように求められる.ここで,$\lambda=\omega/\omega_0$,ω_0 は非制震時の固有振動数である.

$$(\gamma_m+2)\lambda^4-2\left(1+\gamma_k+\frac{\gamma_k}{\gamma_m}\right)\lambda^2+2\frac{\gamma_k}{\gamma_m}=0 \tag{4}$$

(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.

$$\gamma_m+1=\gamma_m/\gamma_k \tag{5}$$

また, $c_d=0$ 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.

$$\lambda_{0,1}^2\cdot\lambda_{0,DM}^2=\gamma_k/\gamma_m \tag{6}$$

(1)， (5) 式を (6) 式に代入すると (7) 式の最適同調式が得られる. $T_{0,1}$, $T_{0,DM}$ は 1 次モード (主系)，D.M.モード (副系) の周期であり, D.M.モードは新システムによる振動モードである.

1:日本理工・教員・建築　2:日大理工・院（前）建築　3:日大理工・学部・建築

$$T_{\infty} = \frac{T_{0,1} \cdot T_{0,DM}}{T_0} \tag{7}$$

また，定点理論に基づいた定点 P,Q の応答倍率は $\sqrt{2/[\gamma_m(\gamma_m+1)]}$ と表せるため，共振時の応答倍率[1]を$1/(2h_{opt})$とおけば，(8)式の最適減衰式が得られる．ここで，h_{opt}は最適粘性減衰定数である．

$$h_{opt} = 0.5\sqrt{\frac{\gamma_m(\gamma_m+1)}{2}} \tag{8}$$

1-3　8 層せん断モデルの検討

本検討では，その 2 の振動試験で扱う 8 層せん断モデルを用いて，新システムの効果を検証する．

解析モデルは超高層建築物を想定し，1 次モードの固有周期は 3 秒程度としている．Figure 1-2 に解析モデル、Table 1-1 に非制震時の諸元および固有値結果を示す．なお，本検討では従来システムおよび新システムを 1 層目のみに配置し，目標の最適粘性減衰定数を h=0. 10 となるように，それぞれ最適設計を行う．

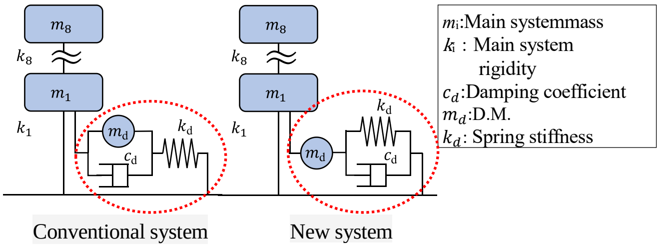

Figure 1-2.　Analysis model

Table 1-1.8-layer shear model parameters

FL	m(ton)	k(KN/m)	FL	m(ton)	k(KN/m)	mode	T(s)
1	1.1	84.2	5	1.0	134.7	1	2.914
2	1.0	96.7	6	1.0	145.1	2	1.059
3	1.0	111.8	7	1.0	154.1	3	0.654
4	1.0	119.7	8	1.0	166.7	4	0.482

ここで、従来システムの諸元は、D.M. 同調システムの簡易設計法[1] [2]で算出できる。なお、新システムの設計方法である最適設計の手順の一例を下記の①～④に示す．

① 目標の最適粘性減衰定数が h=0. 10 となるように (8) 式の最適減衰式より目標の質量比γ_mを求める．(1) 式の質量比γ_mによりT_{∞}が計算できる．

② 複素固有値解析により，$c_d = \infty$の状態で，T_{∞}を満足するように，m_dを決定する．

③ 複素固有値解析により，$c_d = 0$の状態で，(7) 式の最適同調式を満足するように，k_dを決定する．

④ 複素固有値解析により，主系のモードの減衰定数が h=0. 10 となるように，c_dの値を決定する．

両システムの目標値および最適設計諸元を Table 1-2 に，複素固有値解析結果を Table 1-3 に示す．新システムは従来システムよりも，高次モードに減衰定数が付与されることが確認できる． これにより，新システムを用いた多質点系では，モード同調した 1 次モードだけでなく，高次モードにも粘性減衰の付与が可能となる．

Table 1-2. Target Value and optimum design parameters

Model	Target h	Target κ_k Or γ_m	T_0 (s)	T_{∞} (s)	m_d (ton)	c_d (kN·s/m)	k_d (kN/m)
Conventional	0.10	0.083 (κ_k)	2.91	2.80	13.8	12.8	124.0
New	0.10	0.074 (γ_m)	2.91	3.02	10.9	12.9	62.4

※κ_kは付加剛比 1)2)であり、$\kappa_k = (T_0/T_{\infty})^2 - 1$である。

Table 1-3. Complex eigenvalue analysis(No Ieternal attenuation)

Conventional system			New system		
mode	T(s)	h	mode	T(s)	h
1(main)	3.099	0.100	D.M. (secondary)	3.206	0.065
D.M.(secondary)	2.529	0.100	1(main)	2.689	0.100
2	1.010	0.001	2	1.022	0.030
3	0.628	0.000	3	0.629	0.037
4	0.465	0.000	4	0.459	0.041

1-4　応答性能の比較

Figure 1-3 に各解析モデルの共振曲線を示す． 内部減衰はレーリー型減衰 $h_1=h_2=0.02$ とした． 新システムの最適同調･減衰が確認される． なお，非制震時の応答倍率に対して，両システムは 1 次モードで約 80%低減されている． 一方、従来システムは 2 次と 3 次モードで低減できていないのに対して，新システムでは約 50%低減されている．

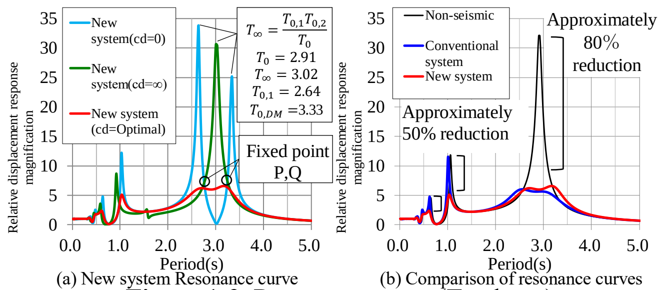

Figure 1-3. Resonance curve (Top layer)

1-5　まとめ

本報では，新システムの設定方法の「最適同調式」および「最適減衰式」を理論的に導出した． 固有周期の関係式で表すことで，多質点系にも応用できることが確認できる．なお，新システムを用いた検討例では，複素固有値解析および共振曲線により，モード同調した 1 次モードだけでなく高次モードにも同時に粘性減衰が付与され，応答低減効果があることが確認できる．

1-6　参考文献

[1]石丸辰治，三上淳治，秦一平，古橋剛「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75 巻，第652 号，2010.6
[2]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75巻，第654 号，2010.8