

連結型制震フレーム耐震改修工法に関する基礎的研究

その1 D.M.を用いた連結制震システムの概要

A basic study on the seismic retrofitting method with the vibration control linked frame

Part 1 Outline of the vibration control linked system using the Dynamic Mass (D.M.)

○田中友基³, 秦一平¹, 高松慶介²

Yuki Tanaka³, Ippei Hata¹, Keisuke Takamatsu²

The proposed system is a retrofitting method to control response by using an external frame as the TMD. It is possible to increase the mass than conventional system by using the Dynamic Mass (D.M.). It also can ensure a high damping constant. This paper shows the derivation of the optimal tuning and the optimum damping formulas based on the invariant point theory.

1. 1. はじめに

近年、建築物の耐震性向上が喫緊の課題となっている中、改修方法の一つとして、外側鉄骨フレーム耐震改修工法が採用されている。この改修方法は、既存建物と鉄骨フレームの連結部を Figure1-1 の左図に示す方法で剛接合と仮定し、既存建物と鉄骨フレームが一体となって地震力を負担する工法である^[1]。しかし、補強対象となる既存建物の躯体コンクリートは、経年劣化している可能性が高く、従来の連結方法では、剛接合とする為に多くの作業を要し、施工が煩雑になる事が考えられる。

これに対し、著者らは既往の研究^[2]において、連結部を Figure1-1 の右図に示すような柔なバネ材とし、既存建物とアウトフレームの相互作用を利用する連結制震システムを提案した。提案システムは、接合部が負担するせん断力が低減する工法である為、施工性が向上するというメリットがある。また、アウトフレームの質量を大きくする事で高い制震効果が得られる事を示した。しかし、粘性ダンパーと鉄骨フレームのみでは、アウトフレームの質量を大きくとることが困難である為、より高い制震効果が得られないという改善点がある。



Figure1-1 接合部略図
(左：従来 右：制震改修)

以上を踏まえて、本研究では、アウトフレームに慣性質量効果が得られるダイナミック・マス（以下、D.M.）を用いた連結制震システムを提案する。また、多質点系に拡張する際、高次モードの影響を与えない為に、アウトフレームに古橋、石丸らにより提案された「完全モード制御法^[3]」を適応し、Figure1-2 に示すように最上層のみを連結する。

本報その 1 では、連結制震システムの概要及びそれ

に用いる「完全モード制御法」の概要を示す。次報その 2 では、多質点系の設計例を示し、その有効性を検証する。

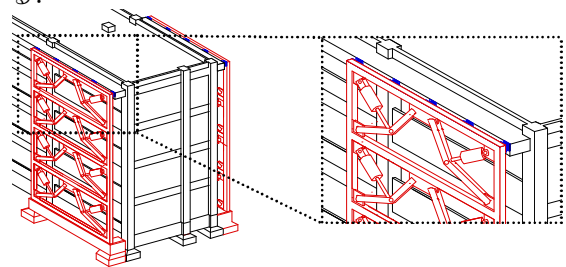


Figure1-2 施工立面図

1. 2. 提案システムの最適設計式の誘導

提案システムのモデル図を Figure1-3 に示す。 m_1 , k_1 は主系(既存建物)とし、 m_2 , k_2 は副系(アウトフレーム)とする。また、 c_2 , m_d は減衰装置及び D.M.を表す。提案システムは、両架構をバネ材 k_d で連結する事で、主系と副系との相互作用で応答低減を図るシステムとなっている。

本節では、定点理論に基づき、提案システムの最適設計式を誘導する。まず、連結部剛性の調整で両架構を同調させる最適同調式を求め、副系のダンパー調整により定点で最大応答倍率となる最適減衰式を求める。

提案システムの振動方程式を(1-1)式に示す。(1-1)式より、 $c_2=0$, \hat{O} の応答倍率式を誘導すると、(1-2), (1-2)式のようなになる。これらの交点である定点の高さが揃う最適同調式は、無減衰時の 1 次, 2 次固有周期 T_{01} , T_{02} と $c_2=\hat{O}$ の固有周期 T_0 を用いて(1-5)式のように表す事ができる。また、定点で最大応答倍率となる最適減衰式は、(1-6)式のようなになる。

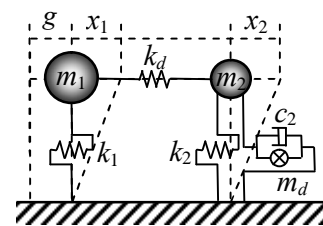


Figure1-3 提案システム

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

$$\begin{bmatrix} m_1 & \\ & m_2 + m_d \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_2 \\ & c_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 + k_d & -k_d \\ -k_d & k_2 + k_d \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{Bmatrix} = - \begin{bmatrix} m_1 & \\ & m_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \end{Bmatrix} \ddot{g}$$

$$\omega_1 = \sqrt{\frac{k_1}{m_1}}, \omega_2 = \sqrt{\frac{k_2}{m_2}}, \gamma_m = \frac{m_2}{m_1}, \gamma_k = \frac{k_2}{k_1},$$

$$h_2 = \frac{c_2}{2\omega_2 \cdot m_2}, \kappa_k = \frac{k_d}{k_1}, \eta_m = \frac{m_d}{m_2}$$

$h_2 = 0$ の場合の振幅倍率は、

$$\left| \frac{X_1}{G} \right|_{h_2=0} = \lambda^2 \frac{\{\gamma_k + \kappa_k + \gamma_m \kappa_k\} - \gamma_m (1 + \eta_m) \lambda^2}{(\gamma_k + \kappa_k) - \gamma_m (1 + \eta_m) \lambda^2 \{ (1 + \kappa_k) - \lambda^2 \} - \kappa_k^2}$$

$h_2 = \infty$ の場合の振幅倍率は、

$$\left| \frac{X_1}{G} \right|_{h_2=\infty} = \frac{\lambda^2}{\lambda_\infty^2 - \lambda^2}$$

$$T_\infty = \sqrt{T_{0,1} T_{0,2}} \sqrt{1 - \frac{\kappa_k}{2(1 + \eta_m)(1 + \kappa_k)}} \quad \text{: 最適同調条件} \quad (1-4)$$

$$h_{opt} = \sqrt{\frac{h_1^2 + h_2^2}{2}} \approx \frac{1}{2} \sqrt{1 - 4 \frac{B}{A^2}} \quad \text{: 最適減衰条件} \quad (1-5)$$

$$A = (1 + \kappa_k) + \frac{2\gamma_k + 2\kappa_k + \gamma_m \kappa_k}{2\gamma_m(1 + \eta_m)}, \quad B = \frac{2\gamma_k + \kappa_k(\gamma_m + 2\gamma_k + \kappa_k + \gamma_m \kappa_k + 2)}{2\gamma_m(1 + \eta_m)}$$

1. 3. 提案システムの設計フロー

本節では、提案設計法の概要を示す。Figure1-4 は、提案する設計フローチャートである。なお、設計例を含む詳細は、次報その 2 で示す。

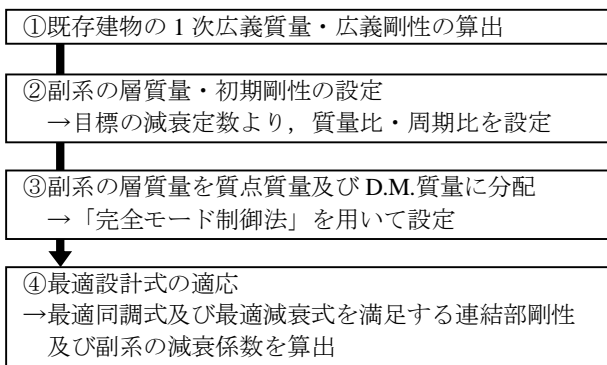


Figure1-4 提案システムの設計フローチャート

1.2 節で示した連結制震システムの最適設計式より、副系のモデルを決定する。

手順①では、既存建物の 1 次広義質量、広義剛性を固有値解析により算出する。

手順②では、目標粘性減衰定数 h_{opt} から、副系の質量比と周期比を決定する。それを基に、副系の質量、剛性を決定する。

手順③では、手順②で求めた層質量を質点質量と D.M. 質量に分配する。その際、D.M. 質量は、「完全モード制御法」を用いて求める。「完全モード制御法」を利用する事で、副系の振動モードが 1 次モード系のみとなる。その為、既存建物にアウトフレームの高次モードが影響せず、既存建物の 1 次モードに対してアウトフレームの 1 次モードで制御する事が可能となる。

「完全モード制御法」の概要については次節に示す。

手順④では、複素固有値解析により、最適設計式を満足する連結部剛性及びダンパーの減衰係数を求める。以上の手順で設計終了となる。

1. 4. 完全モード制御法の概要

「完全モード制御法」とは、D.M. の慣性質量効果により質量分布を調整する事で、全ての高次モードの刺激係数を完全にゼロ化する方法である。これにより、制震対象である既存建物の 1 次モードをアウトフレームの 1 次モードで制御する事ができる。完全モード制御に必要な各層の D.M. 質量は、(1-6) 式より算出する事ができる。

$$\begin{aligned} {}_1\omega^2 &= \frac{1}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{k_i} \sum_{s=i}^n m_s \right)} & n: \text{層数 (FL)} \quad {}_1\omega^2: 1 \text{ 層の固有値} \\ \eta_0 &= 0 & m: \text{各層の質量 (ton)} \\ \eta_i &= \eta_{i-1} + \frac{{}_1\omega^2}{k_i} \sum_{s=i}^n m_s \quad (1 \leq i \leq n) & k: \text{各層の剛性 (kN/m)} \\ \{ {}_{n+1}u \} &= \{ 1 - \eta \} & u: \text{各層の固有モード} \quad \eta: \text{低減率} \\ D_i &= \frac{n+1 u_i}{n+1 u_{i-1}} & m: \text{各層の D.M. 値 (ton)} \\ m'_n &= 0 \\ m'_i &= \frac{m_i + m'_{i+1} (1 - D_{i+1})}{\frac{1}{D_i} - 1} \quad (1 \leq i \leq n-1) \end{aligned} \quad (1-6)$$

提案設計法では、(1-6) 式より求めた D.M. 質量を用いて、副系のみ固有値解析を行う。手順④において、固有値解析結果より、目標とする周期比を満足する事が出来ない場合は、既存建物の剛性比例倍で D.M. 質量を増加させる事で周期比を満足させる。「完全モード制御法」は、D.M. を付加した構造物の剛性比例倍で D.M. 質量を増やしても高次モードのゼロ化を保持できるという特性がある。また、質量項の調整ができる為、固有周期の調整も可能となる方法論である。この特性により、高次モードのゼロ化を保持しつつ、アウトフレームの広義質量を大きくする事が可能となる為、より大きな質量比の確保が現実的となる。

1. 5. まとめ

本報では、連結制震システムによる設計フロー及び「完全モード制御法」の概要を示した。次報その 2 では、多質点系の設計例を示し、その有効性を示す。

1. 6. 参考文献

[1] 国土交通省住宅局建築指導課：既存鉄筋コンクリート造建築物の「外側耐震改修マニュアル- 枠付鉄骨ブレースによる補強-」，日本建築防災協会，2002
 [2] 秦一平, 石丸辰治, 宮島洋平, 高松慶介：連結型制震フレーム耐震改修工法に関する基礎的研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.1229-1230, 2013.8
 [3] 古橋剛, 石丸辰治：「慣性接続要素による多質点振動系の応答制御 慣性接続要素による応答制御に関する研究 その2」，日本建築学会構造系論文集 (601)，pp.83-90, 2006.3