

B-3

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3 中間層連結制震システムによる制震改修方法

A basic study on the seismic retrofitting system by response control frame of coupling type

Part3 Method of coupled seismic response control system on intermediate-level

○本藤洋介², 秦一平¹, 石澤遥³*Yousuke Hondou², Ippei Hata¹, Haruka Ishizawa³

The purpose of this study is a proposal that a retrofit method to control response using outer frame as the TMD. For retrofit the high-rise building, it is necessary to design an outer frame on intermediate-level. This paper shows a retrofit method to control response using outer frame on intermediate-level of the existing building

3.1. はじめに

東北地方太平洋沖地震から 5 年が経過し、近年では首都直下型地震や東海・東南海地震に対応するため、超高層ビルなどの建築物の耐震性の向上が喫緊の課題となっている。

既往の研究^{[1][2]}では補強対象となる既存躯体に制震部材を設置しているアウトフレームを積層ゴム等の柔なバネ材で連結し、既存躯体が負担するせん断力を低減させ、連結制震理論に基づく制震改修方法を提案してきた。しかし、この連結制震システムでは既存躯体と同じ高さのアウトフレームを設けなければならず、コストや施工性を考えると現実的でない。そこで本報では、既往の研究^{[1][2]}を応用し、既存躯体より低層のアウトフレームで連結制震する制震改修方法を提案する。

本提案システムの基本技術となる「完全モード制御法^[3]」と「固有ベクトルの基準化」については次節以降で示す。また、次報その 4 で多質点系の設計例とその時の時刻歴応答解析結果を示し、その有効性について報告する。

3.2. 提案システムの概要

提案システムを超高層の建築物に適用する場合、総質量が大きくなる。この既存躯体を連結制震するにはアウトフレームにも大きな質量が必要になる。しかし、アウトフレームの質量を大きくすることは現実的に不可能である。そこで既往の研究^{[1][2]}でも用いているダイナミックマス(以下、D.M.)をアウトフレームに用いることで、擬似的に質量を大きくする。これにより、アウトフレームに大きな質量効果を期待でき、周期伸長効果もあるので固有周期の調整も可能となるため、高い制震効果を持たせることができる。

今までの連結制震システムと提案する連結制震システムを質点系で表したモデルを Figure3-1 に示す。図の

左側の既存躯体を主系、右側の D.M.等の制震部材が付与されているアウトフレームを副系と呼ぶ。両架構を柔なバネ材で連結することで主系と副系の位相差で応答を制御する連結制震システムとなっている。

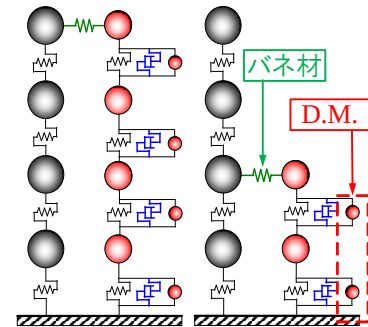


Figure3-1 多質点系の制震イメージ図

(左：今までの連結システム 右：本提案システム)

3.3. 提案システムの設計フロー

本節では、中間層で連結制震する方法の設計手順を示す。この提案システムは「定点理論」に基づいた制震を行っており、既存架構の 1 次モードの応答を抑えることが目的となっている。提案する設計フローを Figure3-2 に示す。

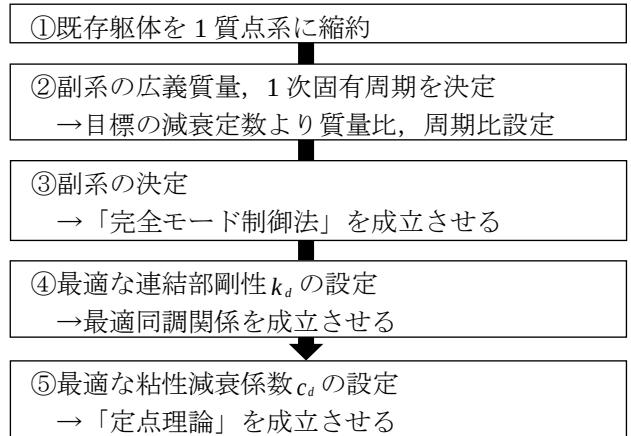


Figure3-2 提案システムの設計フロー

まず、既存躯体を 1 質点系に縮約する。既存躯体の層ごとの節点質量、初期剛性を基に固有値解析を行う。算出された固有ベクトルを連結するアウトフレームの高さと同じ層を 1 に基準化する。それを基に(3-1)式より主系の 1 次広義質量を算出する。

$$\hat{m} = r_1^T M r_1 \quad (3-1)$$

$\hat{m}$: 広義質量 M : 質量マトリクス r_1 : 1 次の固有ベクトル

次に目標の粘性減衰定数 h_{opt} を任意で決め、それを満足する質量比、周期比を Figure3-3 より設定する。質量比、周期比の関係は(3-2)式である。これより副系に必要な広義質量と 1 次固有周期を算出する。

$$\text{質量比} = \frac{r_1^T M_2 r_1}{r_1^T M_1 r_1} \quad \text{周期比} = \frac{T_2}{T_1} \quad (3-2)$$

M_1, M_2 : 主系, 副系の質量マトリクス

T_1, T_2 : 主系, 副系の 1 次固有周期

次に副系を多質点系に拡張する。その際「完全モード制御法^[3]」を用いて、副系モデルに必要な D.M. の値を求める。副系の広義質量を層質量と D.M. 質量に分配ができれば、先ほど求めた副系に必要な 1 次固有周期になるようにアウトフレームの剛性を設定する。

次に「定点理論」を成立させるために最適な連結部剛性 k_d を設定する。「定点理論」とは、粘性減衰係数 c_d が 0, ∞ のときの応答倍率曲線上で交わる二つの交点(定点)の高さが揃う最適同調関係になる連結部剛性 k_d を設定し、その二つの定点が最大となるように最適な粘性減衰係数 c_d を与えることである。このことを用いて、数回の複素固有値解析より最適同調関係になる連結部剛性 k_d を設定する。最適同調関係になると Figure3-4 のようになる。最適な連結部剛性 k_d が決定したら Figure3-5 のように二つの定点が最大となるよう副系の各層に剛性比例倍で粘性減衰係数 c_d を与えて設計は終了となる。

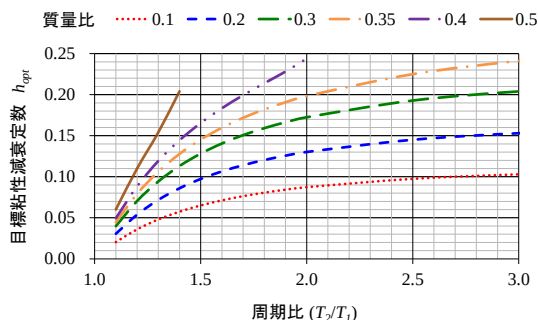


Figure3-3 周期比-目標粘性減衰定数関係

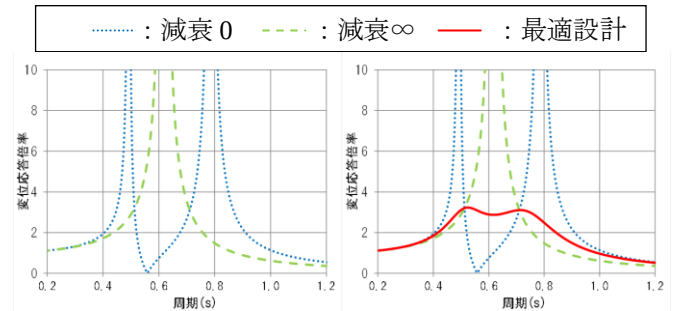


Figure3-4 最適同調関係図

Figure3-5 最適減衰時

3.4. 完全モード制御法の概要

提案モデルでは、副系に「完全モード制御法」を適用し、制震対象の既存躯体を副系の 1 次モードで応答制御させる。「完全モード制御法」は、その構造体の高次モードを完全にゼロ化する設計法である。「完全モード制御法」に必要な D.M. 値は、(3-3)式より算出する。また、D.M. 値を構造体剛性の比例倍に増やすことで、高次モードのゼロ化を保持したまま広義質量を大きくすること、さらに固有周期の調整も可能となる方法論である。

$$\begin{aligned} \omega^2 &= \frac{1}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{k_i} \sum_{s=1}^n m_s \right)} & n: \text{層数 (FL)} \quad \omega^2: 1 \text{ 層の固有値} \\ \eta_0 &= 0 & m: \text{各層の質量 (ton)} \\ \eta_i &= \eta_{i-1} + \frac{\omega^2}{k_i} \sum_{s=1}^n m_s \quad (1 \leq i \leq n) & k: \text{各層の剛性 (kN/m)} \\ \{u_{n+1}\} &= \{1 - \eta\} & u: \text{各層の固有モード} \quad \eta: \text{低減率} \\ D_i &= \frac{n+1}{n+1} \frac{u_i}{u_{i-1}} & m': \text{各層の D.M. 値 (ton)} \\ m'_n &= 0 \\ m'_i &= \frac{m_i + m'_{i+1} (1 - D_{i+1})}{\frac{1}{D_i} - 1} \quad (1 \leq i \leq n-1) \end{aligned} \quad (3-3)$$

3.5. まとめ

本報では、中間層連結制震システムによる設計フローを示した。次報その 4 では、多質点系での設計例と時刻歴応答解析結果を示し、その有効性を示していく。

3.6. 参考文献

- [1] 高松慶介, 秦一平, 廣谷直也, 田中友基: 「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 2」, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp701-702 2014.9
- [2] 田中友基, 秦一平, 高松慶介, 廣谷直也: 「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 3」, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp703-704 2014.9
- [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, pp.83-90, 2006.3