

相互連結による二つの構造物の減衰性能向上について

—— 改良方法とその有効性 ——

山口大学大学院 学生員 井上岳大 山口大学 正員 麻生稔彦
 (財)やまぐち産業振興財団 フェロー 會田忠義 三菱重工業 正員 藤井俊行

1. まえがき 一般に柔軟構造物では、使用上の問題から速やかに減衰することが望まれる。著者らは隣接する構造物を連結部材で相互に連結することにより、それぞれの構造物の1次モードに注目して、両構造物の減衰性能を向上させるための連結方法を提示してきた¹⁾。本研究では両構造物の1次および2次モードを考慮に入れた連結部材の改良方法とその有効性を示す。

2. 運動方程式とモード方程式 Fig.1 に示す連結要素を取り付けた系の運動方程式を以下に示す。

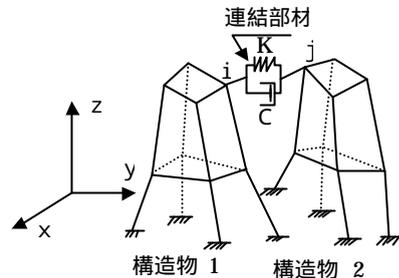


Fig.1 対象構造物

$$\text{構造物 1 の運動方程式: } M_1 \ddot{\mathbf{d}}_1 + K_1 \mathbf{d}_1 + K(\mathbf{H}_1 \mathbf{d}_1 - \mathbf{H}_2 \mathbf{d}_2) + C(\mathbf{H}_1 \dot{\mathbf{d}}_1 - \mathbf{H}_2 \dot{\mathbf{d}}_2) = \mathbf{0} \quad (1)$$

$$\text{構造物 2 の運動方程式: } M_2 \ddot{\mathbf{d}}_2 + K_2 \mathbf{d}_2 + K(\mathbf{H}_3 \mathbf{d}_2 - \mathbf{H}_4 \mathbf{d}_1) + C(\mathbf{H}_3 \dot{\mathbf{d}}_2 - \mathbf{H}_4 \dot{\mathbf{d}}_1) = \mathbf{0} \quad (2)$$

ここで、 M_1, M_2 : 構造物 1 および 2 の質量マトリックス, K_1, K_2 : 構造物 1 および 2 の剛性マトリックス, $\mathbf{d}_1, \mathbf{d}_2$: 構造物 1 および 2 の変位ベクトル, $\mathbf{H}_1, \mathbf{H}_2, \mathbf{H}_3, \mathbf{H}_4$: 構造物 1 と 2 を結ぶ節点の位置と連結要素の影響を示すマトリックス, K, C : 連結部材のばね係数と減衰係数

構造物 1 および構造物 2 の相互に連結された状態の振動変位を、各構造物が単独の場合の固有マトリックスを用いて次のように表す。 $\mathbf{d}_1 = \mathbf{f}_{11} r_{11}(t) + \mathbf{f}_{12} r_{12}(t), \mathbf{d}_2 = \mathbf{f}_{21} r_{21}(t) + \mathbf{f}_{22} r_{22}(t)$ (3)

$\mathbf{f}_{11}, \mathbf{f}_{12}$: 構造物 1 の 1 次および 2 次の固有ベクトル, $\mathbf{f}_{21}, \mathbf{f}_{22}$: 構造物 2 の 1 次および 2 次の固有ベクトル $r_{11}, r_{12}, r_{21}, r_{22}$: 時間に関する未知関数。 運動方程式(1),(2)に、(3)を代入して、直交条件を考慮に入れ

整理し、3 次以上の項を削除すると次式(4)~(7)が得られる。式(4)~(7)は下図 Fig.2 に示す 4 自由度系の運動方程式と同等である。

構造物 1:

$$M_{11} \ddot{r}_{11} + w_{11}^2 M_{11} r_{11} + Ka_1 \{ (r_{11} + g_1 r_{12}) - (b_1 r_{21} + g_1 b_2 r_{22}) \} + Ca_1 \{ (\dot{r}_{11} + g_1 \dot{r}_{12}) - (b_1 \dot{r}_{21} + g_1 b_2 \dot{r}_{22}) \} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{M_{21}}{b_1^2} (b_1 \ddot{r}_{21}) + \frac{w_{21}^2 M_{21}}{b_1^2} (b_1 r_{21}) + Ka_1 \{ (b_1 r_{21} + g_1 b_2 r_{22}) - (r_{11} + g_1 r_{12}) \} + Ca_1 \{ (b_1 \dot{r}_{21} + g_1 b_2 \dot{r}_{22}) - (\dot{r}_{11} + g_1 \dot{r}_{12}) \} = 0 \quad (5)$$

構造物 2:

$$M_{12} \ddot{r}_{12} + w_{12}^2 M_{12} r_{12} + Ka g_1 \{ (r_{11} + g_1 r_{12}) - (b_1 r_{21} + g_1 b_2 r_{22}) \} + Ca g_1 \{ (\dot{r}_{11} + g_1 \dot{r}_{12}) - (b_1 \dot{r}_{21} + g_1 b_2 \dot{r}_{22}) \} = 0 \quad (6)$$

$$\frac{M_{22}}{b_2^2} (b_2 \ddot{r}_{22}) + \frac{w_{22}^2 M_{22}}{b_2^2} (b_2 r_{22}) + Ka g_1 \{ (b_1 r_{21} + g_1 b_2 r_{22}) - (r_{11} + g_1 r_{12}) \} + Ca g_1 \{ (b_1 \dot{r}_{21} + g_1 b_2 \dot{r}_{22}) - (\dot{r}_{11} + g_1 \dot{r}_{12}) \} = 0 \quad (7)$$

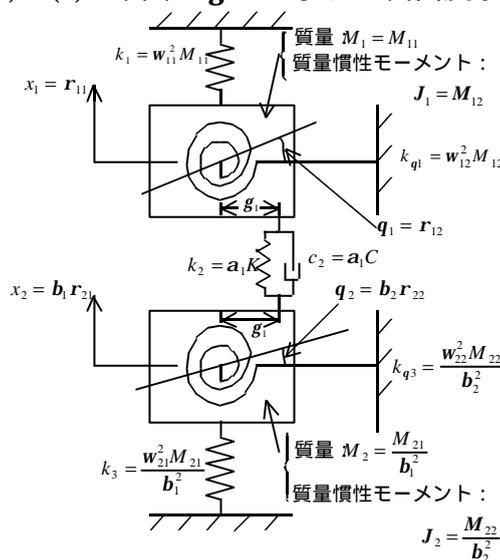


Fig.2 4 自由度系

$$\left\{ \begin{array}{l} M_{11}, M_{12}, M_{21}, M_{22} : \text{構造物 1 の 1 次および 2 次一般化質量, 構造物 2 の 1 次および 2 次一般化質量} \\ w_{11}, w_{12}, w_{21}, w_{22} : \text{構造物 1 の 1 次および 2 次固有円振動数, 構造物 2 の 1 次および 2 次固有円振動数} \\ D_{i1}, D_{i2}, D_{2j1}, D_{2j2} : \text{構造物 1 の節点 i における 1 次および 2 次モードの連結部材方向変位} \\ \text{構造物 2 の節点 j における 1 次および 2 次モードの連結部材方向変位} \\ D_{i1}^2 = a_1, D_{2j1}/D_{i1} = b_1, D_{2j2}/D_{i2} = b_2, D_{i2}/D_{i1} = g_1 \end{array} \right. \quad (8)$$

キーワード: 構造振動、振動減衰、振動制御、相互連結

連絡先: 〒755-8611 宇部市常盤台 2-16-1 山口大学工学部 Tel: 0836-85-9323 Fax: 0836-85-9301

3. 連結部材の調整法 連結させた構造系の1次モードの減衰が最大となる最適なばね係数 K と減衰係数 C は、Fig.2 の系の運動方程式(4) ~ (7)より得られる特性方程式が4つの特性根を持ち、このとき1次および2次の固有円振動数 ω_1, ω_2 、モード減衰比 x_1, x_2 がそれぞれ等しいという条件より求められる。Fig.2 の系の連結要素の k_2, c_2 を用いて、 K および C は次式で与えられる。 $K = k_2/a_1, C = c_2/a_1$ (9)(a_1 : (8)の第1式)

4. 連結減衰部材の妥当性 解析対象は塔と立体ラーメンの2つを用いた。塔はFig.3 に示した形状である。並立する塔の一般化質量(kg)(1次および2次)は $M_{11}=M_{12}=3.0 \times 10^4, M_{21}=M_{22}=4.0 \times 10^4$ 、固有円振動数(rad/s)は $\omega_{11} = 2.471, \omega_{12} = 15.484, \omega_{21} = 1.243, \omega_{22} = 7.790$ である。この場合の最適なばね係数 $K_{opt}=1.929 \times 10^4(N/m), C_{opt}=1.409 \times 10^4(N/m)$ であった。また、連結位置はFig.3 のように右塔の先端とする。連結部材が式(9)より求められた K_{opt}, C_{opt} を有するとき、有限要素法を用いて求めたモード減衰比と、本調整法より得られた1次のモード減衰比の理論値をTable1 に示す。表中には本調整法の妥当性を調べるため、1次モードのみ採用時(既存の方法¹⁾)のモード減衰比の理論値と有限要素法を用いて求めた値も示した。Table1 より明らかなように2次モードまで考慮した場合が理論値との差異が少なくかつ大きな値が得られることがわかる。また、連結部材の取り付け位置の変動に伴うモード減衰比の挙動について調べた結果を1次モードのみ採用時とともにFig.4 に示す。Fig.4 より、明らかなように2次モードまで考慮に入れた方が適用範囲が拡大され、かつやや大きいモード減衰比が求められる。次にFig.5 に示す並立する立体ラーメンの適用結果を示す。各ラーメンの一般化質量(kg)(1次と2次)は $M_{11}=1.278, M_{12}=0.562, M_{21}=1.731, M_{22}=0.483$ 、固有円振動数(rad/s)は $\omega_{12} = 26.236, \omega_{11} = 36.459, \omega_{21} = 20.654, \omega_{22} = 40.605$ である。また、連結は各ラーメンの最上層で行い、5つのケースを想定した。Case 1 は xy 平面での対称軸を一直線上に配置し、対称軸上の節点を連結した状態を、Case 2, Case 3 では2つのラーメンの対称軸を x 方向に偏心させ連結した状態、Case 4, Case 5 は両ラーメンをせん断中心で連結し、曲げ振動のみで影響し合うようにした状態である。Fig.6 に Case 1 と Case 4 のみを示す。Table 2 に Case 1 ~ Case 3 について塔の場合と同様に本調整法で求められた K_{opt}, C_{opt} を有するときのモード減衰比を有限要素法で求めた結果と本調整法で求められた理論値を示した。この場合、連結を偏心させるとモード減衰比が徐々に低下することがわかる。逆に5次モード(ねじりモード)は上昇している。これは、連結部材がラーメンのねじりに抵抗する効果をもったためである。次に構造物の水平断面のせん断中心間に連結部材を配置した場合の Case 4 と Case 5 についてのモード減衰比を Table 3 に示す。Case 5 は2つのラーメンの1次の振動モードが直交する方向にあらわれるように連結した場合である。結果から2次モードまで考慮したほうが有効であることが明らかになった。

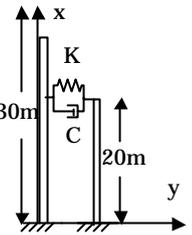


Fig. 3 塔の形状

Table 1 モード減衰比の比較

	モード減衰比(%)
1次および2次モード採用時	0.224
理論値	0.216
1次モードのみ採用時	0.219
理論値	0.191

Table 1 より明らかなように2次モードまで考慮した場合が理論値との差異が少なくかつ大きな値が得られることがわかる。また、連結部材の取り付け位置の変動に伴うモード減衰比の挙動について調べた結果を1次モードのみ採用時とともにFig.4 に示す。Fig.4 より、明らかなように2次モードまで考慮に入れた方が適用範囲が拡大され、かつやや大きいモード減衰比が求められる。次にFig.5 に示す並立する立体ラーメンの適用結果を示す。各ラーメンの一般化質量(kg)(1次と2次)は $M_{11}=1.278, M_{12}=0.562, M_{21}=1.731, M_{22}=0.483$ 、固有円振動数(rad/s)は $\omega_{12} = 26.236, \omega_{11} = 36.459, \omega_{21} = 20.654, \omega_{22} = 40.605$ である。また、連結は各ラーメンの最上層で行い、5つのケースを想定した。Case 1 は xy 平面での対称軸を一直線上に配置し、対称軸上の節点を連結した状態を、Case 2, Case 3 では2つのラーメンの対称軸を x 方向に偏心させ連結した状態、Case 4, Case 5 は両ラーメンをせん断中心で連結し、曲げ振動のみで影響し合うようにした状態である。Fig.6 に Case 1 と Case 4 のみを示す。Table 2 に Case 1 ~ Case 3 について塔の場合と同様に本調整法で求められた K_{opt}, C_{opt} を有するときのモード減衰比を有限要素法で求めた結果と本調整法で求められた理論値を示した。この場合、連結を偏心させるとモード減衰比が徐々に低下することがわかる。逆に5次モード(ねじりモード)は上昇している。これは、連結部材がラーメンのねじりに抵抗する効果をもったためである。次に構造物の水平断面のせん断中心間に連結部材を配置した場合の Case 4 と Case 5 についてのモード減衰比を Table 3 に示す。Case 5 は2つのラーメンの1次の振動モードが直交する方向にあらわれるように連結した場合である。結果から2次モードまで考慮したほうが有効であることが明らかになった。

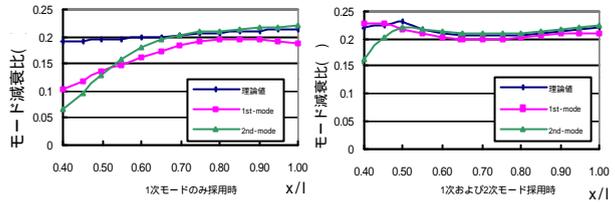


Fig. 4 連結位置の変動に伴うモード減衰比の変動

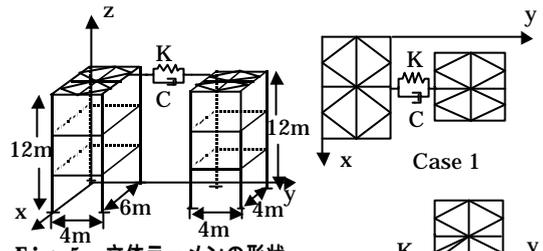


Fig. 5 立体ラーメンの形状

Table 2 Case 1 ~ Case 3 のモード減衰比の比較

	Case 1	Case 2	Case 3
1st-mode (1)	0.101	0.0924	0.0778
(1次モードのみ採用時)	0.101	0.0823	0.0784
(理論値)	0.114	0.114	0.114
2nd-mode (2)	0.127	0.136	0.147
3rd-mode (3)	58.7×10^{-6}	58.7×10^{-6}	58.8×10^{-6}
4th-mode (4)	155×10^{-6}	155×10^{-6}	156×10^{-6}
5th-mode (5)	0.57×10^{-6}	0.0166	0.0693

Table 2 に Case 1 ~ Case 3 について塔の場合と同様に本調整法で求められた K_{opt}, C_{opt} を有するときのモード減衰比を有限要素法で求めた結果と本調整法で求められた理論値を示した。この場合、連結を偏心させるとモード減衰比が徐々に低下することがわかる。逆に5次モード(ねじりモード)は上昇している。これは、連結部材がラーメンのねじりに抵抗する効果をもったためである。次に構造物の水平断面のせん断中心間に連結部材を配置した場合の Case 4 と Case 5 についてのモード減衰比を Table 3 に示す。Case 5 は2つのラーメンの1次の振動モードが直交する方向にあらわれるように連結した場合である。結果から2次モードまで考慮したほうが有効であることが明らかになった。

Table 3 Case 4 と Case 5 のモード減衰比の比較

	Case 4	Case 5
1st-mode (1)	0.0975	0.11
(1次モードのみ採用時)	0.0651	0.0603
(理論値)	0.127	0.127
2nd-mode (2)	0.146	0.124
3rd-mode (3)	0.094	0.084×10^{-6}
4th-mode (4)	0.024	1.08×10^{-6}
5th-mode (5)	1.08×10^{-6}	0.0401

Fig. 6 ラーメンの連結状態

6. まとめ 本研究では、連結部材を調整・設計するとき、1次および2次モードまで考慮に入れることの有効性を示した。塔、立体ラーメンのどちらの場合も1次モードだけでなく2次モードまで考慮に入れた方がより効果があることが明らかになった。

参考文献：1) 會田、麻生、竹下：二つの構造物の相互連結による減衰性能向上の一手法について、土木学会第55回年次学術講演会講演概要集第1部(B)pp.748-749