

慣性質量効果を有する液流ダンパーを用いた3層骨組の振動応答特性

(その2) 実験および時刻歴応答解析結果

東北工業大学大学院 小嶋健太郎

東北工業大学, 船木尚己

仙台高専 飯藤将之, 藤田智己, 水間巧大

1. はじめに

地震時における建物の応答を抑制することを目的として慣性質量効果を有する液流ダンパー¹⁾を提案し, その効果を1層の縮小骨組試験体による振動台加振試験と時刻歴応答解析により検証してきた^{例え²⁾}。本報においては, 本ダンパーが組み込まれた縮小3層骨組試験体による振動台加振試験の結果をシミュレーションするための時刻歴応答解析プログラムを作成し, 実験結果と解析結果の比較から, 解析手法の妥当性を検証することを主な目的とする。

2. 解析を行った対象実験の概要

その1で示した実験を基に解析を行った。液流ダンパーを1層もしくは1層と2層に組み込んで正弦波入力で加振試験を行った。加振レベルは25galとし, 1.0Hzから0.5Hzずつ変化させ, 10Hzまでとした。

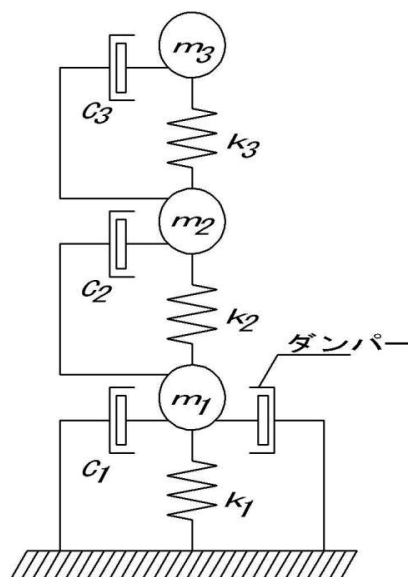


図1 解析モデル

3. 時刻歴応答解析

ダンパーが1層に配置された場合の解析モデルを図1に示す。解析モデルを基にした離散時間系の振動方程式は,

$$[\overline{M}_D]\{\ddot{x}\}_n + [\overline{C}]\{\dot{x}\}_n + [\overline{K}]\{x\}_n = -[\overline{M}]\{1\}x_{0n} - \{F_s + F_f\}_{n-1} \quad (1)$$

と導かれる。 \ddot{x}_n , \dot{x}_n , x_n はそれぞれ次のステップの加速度、速度、変位を表しており, $[\overline{M}]$, $[\overline{C}]$, $[\overline{K}]$ はそれぞれ質量マトリクス, 減衰マトリクス, 剛性マトリクスを表している。 $[\overline{M}_D]$ は質量効果が付加された質量マトリクスを表し,

$$[M_D] = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \beta^2 m_{a1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

と表される。(2)式において、 m_a は連結管内の液体質量を、 β はピストンの有効断面積 A と連結管の断面積 a の比を表し、 $\beta^2 m_a$ が連結管内の液流による質量効果を示している。(1)式の右辺第1項の \ddot{x}_0 は地動加速度を、第2項の F_s と F_f は、それぞれシール材による抵抗力と液流による抵抗力を表しており、(3)式、(4)式のように表される。また、ダンパーの概念図を図2に示す。

$$F_s = C_s \dot{x} + K_s x \quad (3)$$

$$F_f = (\Delta P_1 + \Delta P_2 + \Delta P_3) \times A \quad (4)$$

(3)式において、 C_s 、 K_s はそれぞれ、シール材の減衰係数と剛性を示し、 \dot{x} 、 x はそれぞれピストンの速度と変位を表している。(4)式における ΔP_1 、 ΔP_2 、 ΔP_3 は連結管内の圧力損失で、流路形状が急激に変化する急縮小部と急拡大部の算出式はそれぞれ、

$$\Delta P_1 = \zeta \cdot \frac{\rho(\beta \cdot \dot{x})^2}{2} = \zeta \cdot \beta^2 \cdot \frac{\rho \cdot \dot{x}^2}{2} \quad (5)$$

$$\Delta P_2 = \frac{\rho(\beta \cdot \dot{x})^2}{2} = \beta^2 \cdot \frac{\rho \cdot \dot{x}^2}{2} \quad (6)$$

と表される。また、連結管内摩擦については、

$$\Delta P_3 = \frac{\rho \cdot L}{2D} u_m^2 \cdot f \quad (7)$$

と表される。

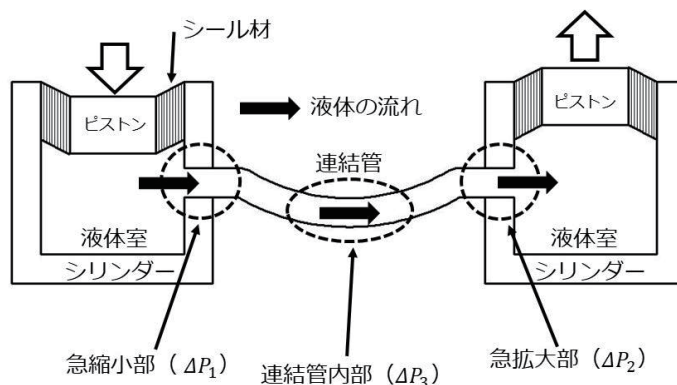


図2 ダンパー概念図

(5)式において ζ ($=0.5$)は流路形状により定まる係数を表している。また、(5)式から(7)式において液体の密度を ρ ($=998.2\text{kg/m}^3$)としており、 L は連結管長さ、 D は連結管内径であり、値を表1に示す。 u_m は連結管内を流れる流体の平均速度を示しており、

$$u_m (= \beta \cdot \dot{x}_n) \quad (8)$$

と表される。(7)式の、 f は管摩擦係数を表しており、ダンパー単体による加振試験の結果から実験式として導かれる(表1)。なお、レイノルズ数 Re は、

$$Re = \beta \frac{u_m \cdot D}{\nu} \quad (9)$$

と表すことが出来る。ここで ν は動粘性係数を示しており、 ν は室温と同じ20°Cの値を採用した。

4. 解析プログラム

解析には数値解析ソフトのMATLABを使用した。(1)式について数値積分法としてRunge-Kutta法を適用し、応答解析プログラムを作成した。解析はダンパーが付かないフレームのみの状態(Case1)とシール材のみのダンパーを組み込んだもの(Case2)、ダンパーを1層に組み込んだもの(Case4からCase6)について行った。解析プログラムのフローチャートを図3に、解析に使用したパラメータを表1に示す。フレームのパラメータはCase1の自由振動試験を行って得られた結果に基づき算出した値を採用している。ダンパーのパラメータについては、ダンパー単体の加振試験から得られた実験結果³⁾を参考にした。

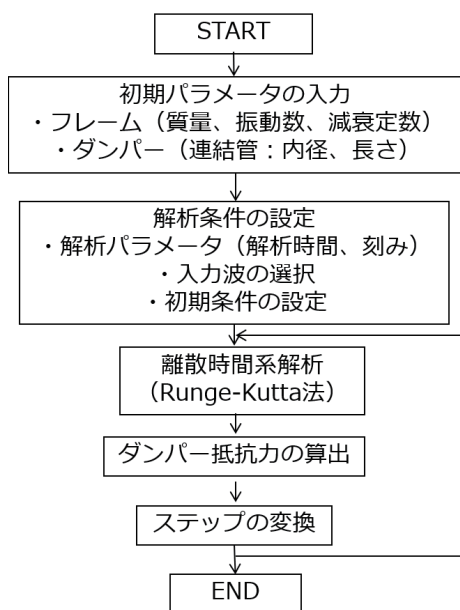


図3 フローチャート

表1 解析パラメータ
フレームのパラメータ

フレームのパラメータ		
質量 [kg]	$\begin{bmatrix} 34.9038 & 0 & 0 \\ 0 & 28.7038 & 0 \\ 0 & 0 & 23.5164 \end{bmatrix}$	
剛性 [N/m]	$\begin{bmatrix} 44497.2 & -22248.6 & 0 \\ -22248.6 & 44497.2 & -22248.6 \\ 0 & -22248.6 & 22248.6 \end{bmatrix}$	
減衰定数 [%]	$a_0[M] + a_1[K]$ (レーリー型減衰) a_0, a_1 は1.2%	
ダンパーのパラメータ		
ピストン有効半径 [m]	0.0220	
ピストン有効断面積 [m ²]	0.00152	
連結管内径 [m]	0.01	
連結管長さ [m]	0.5、1.0、2.0	
断面積比	19.36	
ダンパー抵抗力のパラメータ		
シール材	ばね定数 [N/m]	52432.2
	減衰定数 [N·sec/m]	66.9
管内摩擦 実験式 ($\varphi = 10\text{mm}$)	$L = 0.5\text{m}$	$f = 10611R_e^{-1.063}$
	$L = 1.0\text{m}$	$f = 1219.3R_e^{-0.88}$
	$L = 2.0\text{m}$	$f = 926.94R_e^{-0.899}$

5. 実験結果と解析結果の比較

実験結果と解析結果を比較した代表的な共振曲線の例を図4から図6に示す。

図4はダンパーの無い試験体の解析結果であり、1次、2次、3次とも実験結果とほぼ同じ周波数で応答倍率のピークが得られている。応答倍率の対応は不十分であるが、概ね振動特性を表現している。

図5は1層にダンパーを取り付け液体を入れてない試験体の解析結果であり、シール材による1次ピークシフトを精度よく再現している。2次、3次に関しては実験結果より柔らかめの周波数でピークを示しているが、ダンパー抵抗力のパラメータは概ね良い精度と考えられる。

図6は1層のダンパーに液体を封入した試験体の解析結果であり、1次ピークは対応がよいものの2次、3次はピークが再現できず、共振周波数付近で応答倍率に段差がつく結果となった。

6. まとめ

慣性質量効果を有する液流ダンパーが組み込まれた3層骨組試験体を対象に、その動的特性を解析的に把握するため、時刻歴応答解析プログラムを構築した。本報においては、構築した解析手法の妥当性を検証するために、解析結果を振動台加振試験により得られた結果と比較した。その結果、ダンパーを1層に配置した場合については、構築した解析プログラムによる結果は実験結果を概ね再現できることを確認した。

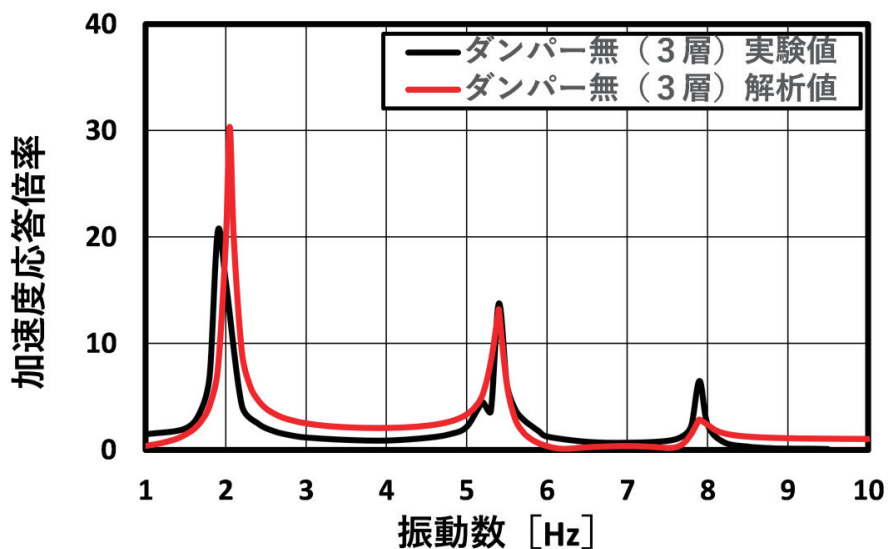


図4 共振曲線 (Case1 : 3層)

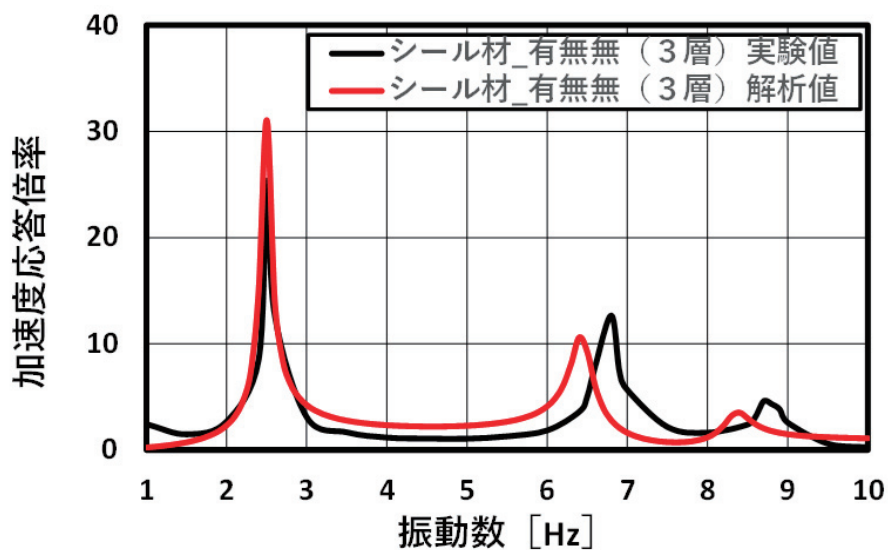


図5 共振曲線 (Case2 : 3層)

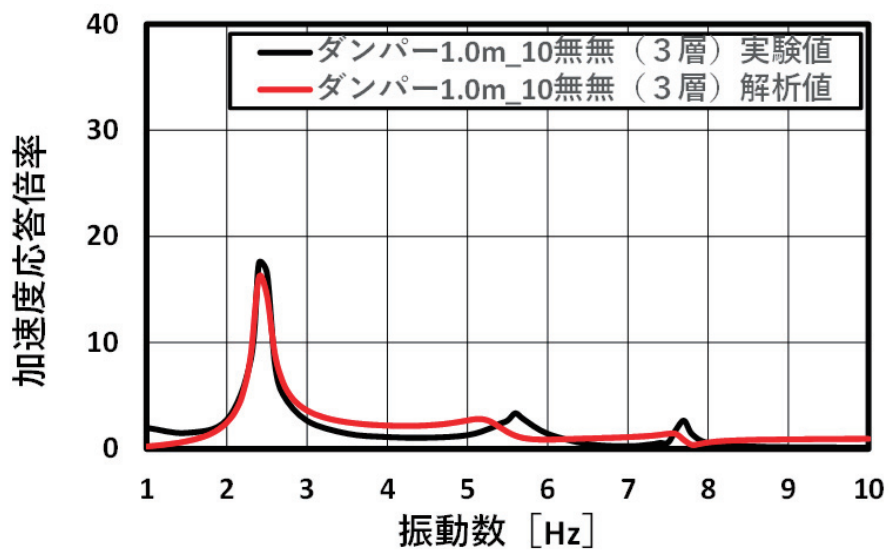


図6 共振曲線 (Case5 : 3層)

今後は、ダンパーが1層と2層に配置された場合の解析プログラムを構築するために、

Step1：質量効果が付加されたマトリクスの力学モデルの検討

Step2：より精度の高い実験値からの管内摩擦係数の算出

などを検討課題とし、ダンパーの取り付け状況を変えた解析を可能とすると共に、解析精度向上を図ることを目指す。

参考文献

- 1) 畑中友，船木尚己，藤田智巳：慣性質量効果を有する液流ダンパーを用いた多層骨組の振動応答特性（その1）試験体概要と振動台加振試験，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.863-864，2020.9
- 2) 畑中友，船木尚己：慣性質量効果を有する液流ダンパーを用いた1層制振フレームの振動応答特性（その4）地震応答解析の精度検証，日本建築学会大会学術講演梗概集，21446，pp.891-892，2019.9
- 3) 畑中友：慣性質量効果を有する液流ダンパーを用いた制振骨組の振動応答特性，，東北工業大学博士学位論文，pp.8,12 2017-03