T2R2 東京科学大学 リサーチリポジトリ Science Tokyo Research Repository

論文 / 著書情報 Article / Book Information

| 論題(和文) | 粘性ダンパーの長時間繰り返しによる特性値低下を考慮した解析モデルの提案と地震応答評価 | | |
|---------------------|--|--|--|
| Title(English) | | | |
| 著者(和文) | | | |
| Authors(English) | Sho Nagayama, Daiki Sato, KAZUHIKO KASAI, Kazuhiro Matsuda | | |
| 出典 / Citation | | | |
| Citation(English) | , , , pp. 553-556 | | |
| 発行日 / Pub. date | 2017, 3 | | |

粘性ダンパーの長時間繰り返しによる特性値低下を考慮した解析モデルの提案と地震応答評価

構造-振動

制振構造 長周期地震動 粘性ダンパー エネルギー密度 評価手法

1. はじめに

近年,南海トラフ地震による長周期地震動が三大都市圏 で発生することが予想されており,超高層建物などの周期 が長い建物が大きく揺れることが懸念されている。2011年 に発生した東北地方太平洋沖地震では,超高層建物が共振 することで10分間以上揺れ続けたという報告がなされて いる¹⁾。

このような被害が想定される建物に対して制振構造は 効果的であるが,長周期地震動の作用を受ける場合,長時 間の繰り返しにより制振ダンパーの種類によっては性能 が大きく低下する可能性がある。このことから筆者らは, 代表的な 4 種の実大制振ダンパーに対して長時間の正弦 波加振実験を行い,各ダンパーの動的特性の変化を明らか にし,簡易的な評価手法を示している²⁾。

本報では、粘性ダンパーを対象に特性値低下の傾向を考 慮した解析モデルを作成する。また、特性値低下を簡易的 に評価した式を用いた 2 種類の手法による応答解析の結 果を比較し、本手法の有効性の確認を行う。

2. 粘性ダンパー正弦波加振実験条件

2.1 計測概要

対象とするダンパーは、E-ディフェンスにおける実大 5層建物の震動台実験で用いられたダンパーから選出した ものである³⁾。図1に粘性ダンパー側面図、表1に粘性ダ ンパー諸元、図2にセットアップ図を示す。ここに、Caは 粘性係数、αはべき乗指数である。ダンパー部の変形はス トローク部上下左右4点で計測し、歪ゲージは、ブレース 中央部と中央部から±100mmの位置全3断面(*i*=1~3)に 4枚ずつ添付する。ダンパーストローク ua を式(1)、ダン パーカ Fa を式(2) より算出する。

$$u_{d} = \frac{\sum_{j=1}^{N_{u}} u_{d,j}}{4}, \quad F_{d} = \frac{\sum_{j=1}^{N_{s}} \varepsilon_{j}}{4} EA$$
(1, 2)

ここに, *εj* は計測位置での歪, *E* はヤング係数 (=206 GPa), *A* は歪計測位置における断面積である。なお, ダン パー力はブレース中心部における歪より算出を行っている。1 サイクルごとの最大ダンパー力およびエネルギー吸

| 正会員 | ○ 長山祥 ^{*1} | 正会員 | 佐藤大樹*2 |
|-----|---------------------|-----|--------|
|]] | 笠井和彦*3 |]] | 松田和浩*4 |



表1 粘性ダンパー諸元

| 1 | | ダンパー | | | ブレース | | | $F_{d, max}$ (kN) | | |
|----------------|------|------------------------|--------------------------------------|---------------|-----------|-------------------------------|--------------------------------------|-------------------|---|---|
| 試験体 | (mm) | l _d (mm) | A _d (mm ²) | ϕ_d (mm) | C_d 規格値 | <i>l</i> _b (mm) | A _b (mm ²) | ϕ_d (mm) | <i>u</i> _{<i>d, max</i>} 15kine | <i>u</i> _{<i>d, max</i>} 30kine |
| D1-2F D2-2F | 3947 | 606 | 12880 | 184 | 98 | 2104 | 8320 | 159 | 658 | 856 |
| D3-2F | 3849 | 689 | 28124 | 286 | 196 | 1542 | 15323 | 236 | 1316 | 1712 |

※ C_dの単位は kN/(mm/s)^α であり, α, K_dの規格値はそれぞれ 0.38, ∞である。



収量は式(3),(4)より算出する。n サイクルの最大ダンパー 力 F_d^[n] は,図3のように計測直後の1つ目の半波を除い た半波 2n と半波 2n+1 の絶対値の平均値より算出してい

る (ただし $n \ge 1$ とする)。また, エネルギー吸収量 $W_d^{[n]}$ は 1 サイ クルごとの履歴の面積より算出し ている。ここに、 ${}_{h}F_{d,max}$ は半波ごと の最大ダンパーカ, N_D は 1 サイク ルのデータ数である。なお,() は ステップ, () は半波, [] はサイク ルを意味する。



 $F_{d}^{[n]} = \frac{\left|_{h} F_{d,\max}^{\langle 2n \rangle}\right| + \left|_{h} F_{d,\max}^{\langle 2n+1 \rangle}\right|}{2}$ (3)

$$W_{d}^{[n]} = \sum_{i=1}^{N_{D}} \frac{\left(F_{d}^{(i)} + F_{d}^{(i+1)}\right) \cdot \left(u_{d}^{(i+1)} - u_{d}^{(i)}\right)}{2}$$
(4)

2. 2 加振計画

前報より⁴⁾,新たに大容量の試験体 (D3-2F)を用いた正 弦波加振実験を追加で行った (V-10)。表 2 に加振パラメ ータを示す。それぞれの加振は,周期 2~6s,振幅 10~ 30mm の範囲内で行っている。

なお, 速度依存型のダンパーである粘性ダンパーは, 材 料疲労の問題がなく繰り返し実験できるため, 載荷後にダ ンパーの温度が初期温度に戻ったことを確認してから、ダ ンパーの損傷確認の載荷を行い,損傷が無いことを確認し た後に次の載荷を行っている。

| 実験番号 | 周期 T (s) | 振幅 u _d (mm) | 加振時間 t ₀ (s) | サイクル数 | 初期温度 θ ₀ (°C) | 試験体 |
|------|-------------|---------------------------|----------------------------|-------|-----------------------------|-------|
| V-1 | 4.0 | 20 | 600 | 150 | 10 | |
| V-2 | 4.0 | 20 | 1800 | 450 | 15 | D1 2F |
| V-3 | 4.0 | 20 | 3600 | 900 | 15 | D1-21 |
| V-4 | 4.0 | 20 | 10800 | 2700 | 13 | |
| V-5 | 2.0 | 20 | 230 | 115 | 15 | |
| V-6 | 4.0 | 10 | 1200 | 300 | 15 | |
| V-7 | 4.0 | 20 | 600 | 150 | 15 | D2-2F |
| V-8 | 4.0 | 30 | 400 | 100 | 15 | |
| V-9 | 6.0 | 20 | 900 | 150 | 15 | |
| V-10 | 4.0 | 20 | 1800 | 450 | 26 | D3-2F |

表2 正弦波加振実験パラメータ

3. 粘性ダンパー特性値低下の傾向

3.1 エネルギー密度による評価

制振ダンパーを長周期地震動対策として用いる場合,最 大値による評価だけでなく繰り返し変形を受けて吸収す るエネルギー量の累積値による評価が重要となってくる。 本報では、ダンパー特性値として最大ダンパー力に着目し て検討を行う。図 4(a)に累積エネルギー吸収量 ΣWa に対 する最大ダンパー力の低下率の変化を示す。同容量のダン パーを用いた V-1~V-9 では、周期・振幅によらず同様の 低下の傾向を示した。これは、粘性体がエネルギーを吸収 することでシリンダー内部の粘性体温度が上昇し,それに 伴い特性値が低下するためと考えられる。しかし、容量の 大きいダンパーを使用した V-10 では、他の結果(V-1~V-9) と比較して低下の傾向が異なっていることが分かる。

そこで、異なるダンパー容量での統一的な評価を行うた めに,累積エネルギー吸収量を粘性ダンパーの容積 Vv で 除したものを、エネルギー密度 Ω と呼び以下のように定 義する。

| $Q = \frac{\sum W_d}{\sum W_d}$ | (5) |
|---------------------------------|-----|
| V_{ν} | |

ここで、Vv は粘性ダンパー内に封入されている粘性体 の容量である。エネルギー密度 Ωは、単位容積あたりで 吸収した累積吸収エネルギーを意味し,粘性体による発熱 と直接関連する値である。本報では簡便のために、ダンパ 一部の長さと内部の断面積より算出した粘性ダンパーの 容積を,内部粘性量と仮定して検討を行った。エネルギー 密度 Ωに対する最大ダンパー力の低下率の変化を図 4(b) に示す。図4(b)より,粘性ダンパーにおいてエネルギー密 度 Ωに対する最大ダンパー力の低下率の変化は、周期・ 振幅・ダンパー容量によらずおおむね同様の傾向を示した。 この関係から、エネルギー密度 Ωを用いることで長時間

の繰り返しによる粘性ダンパーの特性値低下の傾向を簡 易的に評価できると考える。ただし, 封入されている粘性 体の性質や大きく形状の異なるダンパーに対しては低下 の傾向が変わると考えられる。しかし、その場合、長時間 の加振実験を一回行うことで振幅や周期によらず長時間 の繰り返し加振時におけるダンパーの特性低下を評価で きるという利点を有する。



3.2 特性値低下を考慮した解析モデル

3.1 節の結果より得られたエネルギー密度を用いて近似 式を算出し,長時間繰り返しによる特性値低下を考慮した 解析モデルを作成する。粘性ダンパーの基本特性式は,式 (6)のように表される。

$$F_{d}^{(n)} = C_{d}^{(n)} \cdot \dot{u}_{d}^{\alpha(n)} \tag{6}$$

繰返し効果を考慮した場合での n ステップにおける粘 性係数 Cd⁽ⁿ⁾ は式(7)より算出される。繰返しによる粘性係 数の低下率 λはエネルギー密度 Ωを用いて式(8a, b)より 求められる(図4(b)中破線)。



表3 a, Ca の近似式と値³⁾

-554-

$$C_{d}^{(n)} = \lambda^{(n)} \cdot C_{d}^{(0)} \tag{7}$$

$$\lambda^{(n)} = \exp(-a_0 \cdot \Omega^{(n)}), \quad a_0 = 1.695 \times 10^{-6} [\text{m}^2/\text{kN}]$$
 (8a, b)

ここに、 C_d ⁽⁰⁾は粘性係数の初期値、 a_0 は繰返しによる低下の程度を表す係数である。ここで、図5に実験結果(V-6,10)と解析結果を比較したものの一例を示す。なお、解析に用いる粘性ダンパーの α 、 C_d 値は表3より算出を行っている³⁾。図5より特性値低下を考慮した解析モデルは比較的精度良く実験結果を再現できていることが分かる。

4. 時刻歴応答解析

4.1 建物モデル概要

本報で使用する建物モデルは,建物高さ 81.7m の 20 層 のせん断モデルである ^{5,6}。主架構の 1 次固有周期 *T*₁ は 2.69s である。構造減衰は,1 次と 2 次でそれぞれ等価な 1%のレーリー型減衰とする。なお,主架構は弾性として解 析を行う。

4.2 入力地震動概要

入力地震動として,東海・東南海地震動を想定した東海 地方の長周期地震動である三の丸波(SAN)⁷⁾,南海トラ フ4連動地震(工学的地盤)⁸⁾を想定した津島波(AIC003), 堺波(OSK006) JMA 名古屋波(E34),大分波(OIT010) の計5波を採用する。図6(a)~(e)に入力地震動の加速度波

形, 図 7(a),(b)に擬似速度応答スペクトル $_{p}S_{v}(h=5\%)$,エ



ネルギースペクトル V_E (h = 10%) をそれぞれ示す。主架 構の1次固有周期である3秒付近に $_pS_{v_j}V_E$ のピークを有 する地震動を採用している。



4.3 ダンパー配置

解析において対象とする粘性ダンパーは,長時間正弦波 加振実験において用いた D2-2F の値を使用している。なお 4章で用いる粘性ダンパーの α , C_d 値は規格値(表 1)を 使用している。図8のようにダンパーと取付け部材は直列 に繋がるため,内部剛性 K_d と取付け部材剛性 K_b をまと めて等価支持材剛性 K_b^* で表す(表 4)³⁾。ダンパーの取 付け角度は全層で 30°に一定配置とし,取付け角度を考慮 して粘性係数および等価支持材剛性を変換している⁹。

図 9 に高さ方向における粘性ダンパーの粘性係数を示 す。ここで、V100 ではレベル 2 相当の地震動において層 間変形角 R = 1/100 以内、V150 では 1/150 以内に収まるよ うに粘性ダンパーを配置している^の。なお、本報では建物 の全体曲げ変形などによってダンパーの実効変形が低下 する影響¹⁰⁾を無視して解析を行っている。



4. 4 時刻歴応答解析結果

本節では、高さ方向における最大応答分布として層間変 形角、絶対加速度に着目し検討を行っていく。

はじめに、図 10,11 に、特性値低下を考慮せず解析を行ったもの($_{0}$ V100, $_{0}$ V150)と、解析より得られた地震終了時におけるダンパーのエネルギー密度 Ω (式(5))から、実験結果(図 4(b))を用いて特性値低下を評価し、粘性係数 $C_{d}^{(0)}$ を低下させ、再度解析を行ったもの($_{s}$ V100, $_{s}$ V150)(以降, 簡易手法)の結果を示す¹¹⁾。図 10 より、 $_{s}$ V150 が $_{0}$ V150 に対して、SAN では 1.4 倍、AIC003、OIT010 では

1.2 倍に増大していることが分かる。一方で, 層間変形角 が 1/100 以内に収まっている OSK006, E34 では, 応答は大 きく増大せずほぼ同様の結果となった。ダンパー量の少な い ₀V100 と ₃V100 を比較すると, 入力エネルギーの大きい AIC003, OIT010 での著しい増加が見られる。また, 図 11 より, 絶対加速度においても同様の傾向が見られる。

次に,簡易手法に対して,式(6,7)の関係を用いて粘性係 数をステップごとに低下させ解析を行ったもの(以降,精 算手法)の結果を図 10,11 に破線で示す。結果より,精算 手法は考慮なしと簡易手法の間に位置することが確認さ



れた。簡易手法は繰り返しによる特性値が変化する解析モ デルが無い場合でも容易に評価が可能であるため有用で あるが,地震動によっては過大評価になってしまう場合も ある。一方で,精算手法はより経済的な設計を行うことが 可能である。

5. まとめ

本報では,粘性ダンパーを対象に特性値低下の傾向を考 慮した解析モデルを作成し,特性値低下を簡易的に評価し た式を用いた 2 種類の手法による応答解析の結果の比較 を行った。以下に得られた知見を示す。

- (1) 粘性ダンパーの長時間加振実験より、エネルギー密度 Ω に対する最大ダンパーカの低下の傾向は、周期・振幅・ダンパー容量によらずおおむね同様の傾向を示し、 簡易的に評価が可能である。
- (2) エネルギー密度を用いた近似式より,解析モデルを提案した。繰り返しによる特性値低下を表した解析モデルは,精度良く実験結果を再現できた。
- (3) 簡易手法,精算手法の2種類の手法を用いて時刻歴応 答解析を行った。結果より,簡易手法は簡易的に繰り 返しによる影響を考慮できるが,地震動によっては過 大評価になってしまう。一方で,精算手法はより経済 的な設計が可能である。

謝辞

本研究は、元東京工業大学笠井研究室の西島正人氏、山本英和氏の研究成果 の一部を用いたものです。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 長周期地震動と超高層建物の対策案-専門家として知っておきたいこと -、日本建築学会、2013.10
- 2) 笠井和彦, 佐藤大樹, 松田和浩, 長山祥:長時間正弦波加振実験による 4 種の実大制振ダンパーの動的特性の変化および簡易評価手法の提案,構 造工学論文集, Vol.63B, 2017.3 (掲載予定)
- 3) 笠井和彦,山際創,西島正人,馬場勇輝,伊藤浩資,引野剛,大木洋司:粘 性ダンパーをもつ実大5層鉄骨建物の3次元震動台実験,日本建築学会 構造系論文集,第79巻,第695号,pp.47-56,2014.1
- 4) 長山祥,佐藤大樹,笠井和彦,松田和浩:長周期・長時間地震動時における実大ダンパーの特性評価 その14種のダンパーの長時間正弦波加振実験による動的特性の推移,日本建築学会関東支部研究報告集,pp.389-392,2016.3
- 5) 日本建築学会:鋼構造制振設計指針,第1版,2014.11
- 6) 中井亜里沙,長山祥,佐藤大樹,笠井和彦,松田和浩:長周期地震動時に おける粘性ダンパーを有する制振構造建物の簡易応答評価 その1 建物 モデル概要とダンパー配置計画,日本建築学会大会学術講演梗概集,B-2, pp.163-164,2016.8
- 7) 愛知県建築住宅センター:名古屋三の丸地区における地域特性を考慮した耐震改修のための基盤地震動の作成(概要版),(財)愛知県建築住宅センター耐震構造委員会設計用入力地震動検討部会,pp.1-48,2004.6
- 超高層建築物等への長周期地震動の影響に関する検討 南海トラフ4連 動地震による超高層・免震建物の応答解析 -, 建築研究資料 No.147, pp.1-336, 2013.9
- 9) 日本免震構造協会(JSSI):パッシブ制振構造設計・施工マニュアル第1版, 2003.10;第2版,2005.9;第3版,2013.11
- 石井正人, 笠井和彦:多層制振構造の時刻歴解析に用いるせん断棒モデル の提案, 日本建築学会構造系論文集, 第 75 巻, 第 647 号, pp.103-112, 2010.1
- 11) 長山祥,佐藤大樹,笠井和彦,松田和浩:長周期地震動時における粘性ダンパーを有する制振構造建物の簡易応答評価 その2 粘性ダンパーの動的特性の変化を考慮した応答評価,日本建築学会大会学術講演梗概集,B-2,pp.165-166,2016.8
- *1 東京工業大学 大学院生
- *2 東京工業大学 准教授・博士(工学)
- *3 東京工業大学 教授・Ph.D.
- *4 東京工業大学 助教・博士(工学)