

制震補強建物の耐震性能評価法に関する研究

その2 保有減衰性能の算定と応答解析における構造減衰の扱いに関する検討

Study on Seismic Capacity Evaluation Method of Buildings Retrofitted by Energy Dissipation System

Part2 Damping Performance Evaluation and Investigation of Structural Damping on Response Analysis

天羽 祥太¹, ○市原 寿人², 北嶋 圭二³, 中西 三和³, 安達 洋³
 Shota Amo¹, *Hisato Ichihara², Keiji Kitajima³, Mitsukazu Nakanishi³, Hiromi Adachi³

This paper shows Investigate treatment of structural damping on response displacement using object building holding attenuation performance calculation and time-history response analysis.

1. はじめに

前報(その1)では、制震補強建物の耐震性能評価法を提案し、検討対象建物の概要と必要減衰性能の算定結果について示した。本報(その2)では、検討対象建物の保有減衰性能の算定および時刻歴応答解析による応答変位の確認、応答解析における構造減衰の扱いについて検討する。

2. 保有減衰性能の算定

無補強建物および各々の制震補強建物の保有減衰性能は、フレーム解析モデルに対して定常応答解析を行い、応答解析結果を1自由度系に縮約して安全限界変位レベルでの定常ループを抽出し、1ループの履歴面積より等価粘性減衰定数を算定して評価する。応答解析は Newmark-β 法(β=0.25)の数値積分法を用い、積分時間刻みは 0.001 秒とした。入力波は、建物の安全限界周期と同一の周期特性を有し、加速度振幅を徐々に大きくしていく漸増定常加速度波形を作成して用いた。入力した漸増定常加速度波形を Fig.1 に、定常応答解析の1自由度系縮約結果の履歴ループを Fig.2 に示す。多層建物の時刻歴応答解析結果の1自由度系への縮約は、モーダルアナリシス¹⁾の考えに基づき式(1)、式(2)を用いて行った²⁾。式(1)が応答変位の縮約、式(2)がせん断力の縮約方法である。定常ループの履歴面積からの等価粘性減衰定数の算定には式(3)を用いた。

算定の結果、無補強建物の保有減衰性能(等価粘性減衰定数)は18%であった。なお、ここでの検討では履歴ループに及ぼす構造減衰の影響を排除するため、定常応答解析は構造減衰0%で行っている。したがって算定された保有減衰性能は、柱・梁などの主体構造の損傷により吸収された履歴面積の等価粘性減衰換算値であり、以後、主体構造の損傷減衰と称することとする。

制震補強建物の保有減衰性能は、履歴系ダンパーの場合

合が31%、粘性系ダンパーの場合が32%と評価された。その内訳は、主体構造の損傷減衰がともに18%であり、制震ダンパーによる付加減衰は履歴系ダンパーが13%、粘性系ダンパーが14%である。ここで、制震補強建物に対して式(3)を適用する際、ポテンシャルエネルギーは、無補強建物のポテンシャルエネルギーを用いることとする。これは、式(3)の分母を無補強建物・補強建物で同一としておくことにより、履歴面積の増加分が単にダンパーによる付加減衰量と評価できるためである。

以上、提案した本手法を用いることにより、主体構造損傷減衰と制震ダンパーによる付加減衰を分離して評価することが可能であり、建物の損傷程度とダンパーによる制震効果を明確に分けて表示することができる。すなわち、一般的な性能評価方法に比べ、制震効果を付加減衰性能として表示できる点において、提案手法が性能表示方法として有効であるといえる。

$${}_1q_0 = \frac{\{ {}_1u_i \}^T [M] \delta_i}{\beta \{ {}_1u_i \}^T [M] \{ {}_1u_i \}} \dots (1) \quad {}_1Q = \sum \beta \{ {}_1u_i \} (Q_{i+1} - Q_i) \dots (2)$$

${}_1q_0$: 1次の代表変位, ${}_1u_i$: i層の1次固有ベクトル(最大応答変位),
 [M]: 質量マトリクス, β : 1次の刺激係数, δ_i : i層の相対変位(応答解析結果),
 ${}_1Q$: 1次の層せん断力, Q_i : i層の層せん断力(応答解析結果)

$$h = \frac{1}{4\pi} \frac{\Delta W}{W} \dots (3) \quad \Delta W: 1ループの履歴面積, W: 無補強建物のポテンシャルエネルギー$$

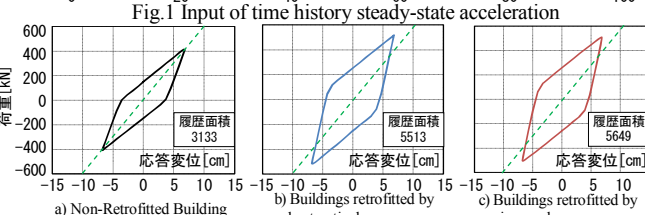
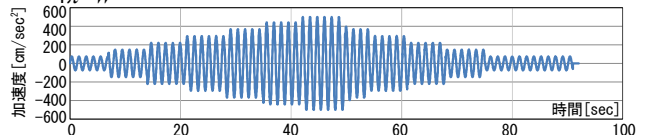


Fig.2 Result of steady-state response analysis
 Table 1 Result of damping performance [%]

	保有減衰	損傷減衰	付加減衰
無補強建物	18	18	
履歴系ダンパー補強建物	31	18	13
粘性系ダンパー補強建物	32	18	14

1: 日大理工・院(前)・海建 Graduate Student, Nihon Univ. 2: 東京ソイルリサーチ Tokyo Soil Research.Co.
 3: 日大理工・教員・海建 Prof. Nihon Univ. Dr. Eng.

3. 時刻歴応答解析による応答変位の確認

2 階建てモデルに対する地震応答解析を実施して、各建物の保有減衰性能の妥当性を確認する。なお、2 層フレームモデルに対する地震応答解析の最大応答変位は、定常応答解析と同様に 1 自由度系に縮約した結果で評価する。一例として Fig.3 a)に ELNS 入力時の地震応答解析で得られた各層の履歴曲線と、Fig.3 b)に縮約 1 自由度系の履歴曲線を示す。図中のプロット点が縮約 1 自由度系の最大応答変位である。Table2 には、各入力地震動に対する縮約 1 自由度系の最大応答変位を一覧にして示す。検討対象建物の必要減衰性能 33% に対し、保有減衰性能が 18%の無補強建物の応答変位は、安全限界変位(6.8cm)の 2 倍程度の応答変位を示し、保有減衰性能が 31%の履歴系ダンパーによる制震補強建物の最大応答変位はほぼ安全限界変位と同等の応答変位を、保有減衰性能が 32%の粘性系ダンパーによる制震補強建物の応答変位はいずれの入力地震動に対しても概ね安全限界変位を下回る結果が得られている。この結果より、提案した定常応答解析による保有減衰性能の評価結果が、概ね妥当であることが確認できた。

4. 応答解析における構造減衰の扱いに関する検討

2 階建てモデルでは、構造減衰の影響を排除するため構造減衰を 0%として保有減衰性能を評価してきた。しかし、実際の補強設計では、建物の構造減衰を考慮したうえで、保有減衰性能を評価する必要がある。そこで本章では応答解析における構造減衰の扱いに関して検討する。

4.1 検討方法

2 層平面フレームモデルを用いて、構造減衰の扱いとして、初期剛性比例型、瞬間剛性比例型および等価剛性比例型の 3 種類の方法について、いずれの方法も減衰定数は 5%とし、検討を行う。ここで、等価剛性比例型とは、安全限界時の構造減衰が 5%となるように、弾性固有周期と安全限界周期の比だけ初期剛性比例型の減衰定数を低減させる方法である。検討方法は、まず構造減衰の扱いを上記 3 種類の方法で変化させた 2 層フレームモデルに対する定常応答解析を実施し、解析結果を 1 自由度系に縮約して安全限界変位レベルの定常ループの履歴面積を評価する。ここで、構造減衰による減衰抵抗力による履歴面積を評価するために、減衰力を含んだ慣性力を縮約(慣性力縮約)し、層せん断力を縮約(せん断力縮約)した履歴面積との差より、構造減衰の効果を評価した。縮約 1 自由度系の慣性力は式(4)を用いて求めた加速度に式(5)で評価した等価質量を掛けることにより算定した。

$$({}_i\ddot{q}_0 + \ddot{y}_0) = \frac{{}_i u_i^T [M] \{\ddot{\delta}_i + \ddot{y}_0\}}{\beta \{{}_i u_i\}^T [M] \{{}_i u_i\}} \dots (4) \quad {}_i M = \frac{(\sum m_i \{{}_i u_i\})^2}{\sum m_i \{{}_i u_i\}^2} \dots (5)$$

${}_i q_0$: 1 次の代表変位, ${}_i \ddot{q}_0$: 1 次の代表荷重(加速度換算値),
 ${}_i u_i$: i 層の 1 次固有ベクトル, β : 1 次の刺激係数, $[M]$: 質量マトリクス,
 δ_i : i 層の相対変位, \ddot{y}_0 : 入力加速度, $\ddot{\delta}_i$: i 層の相対加速度,

4.2 検討結果

Table3 に無補強建物・制震補強建物各々に対し、構造減衰を 0%, 初期剛性比例型 5%, 瞬間剛性比例型 5%, 等価剛性比例型 5%とした時の縮約 1 自由度系の履歴面積と履歴面積より算定した等価粘性減衰定数を一覧にして示す。検討の結果、初期剛性比例型では、安全限界変位レベルの等価粘性減衰定数が、建物剛性が低下した分、設定減衰(5%)より大きな減衰として効果を及ぼしていること、瞬間剛性比例型では、設定減衰(5%)と概ね一致しているが建物によってばらつきが生じていること、等価剛性比例型では、設定減衰と安全限界変位レベルの等価粘性減衰定数が良く一致していることが確認できる。よって、安全限界変位時の保有減衰性能を評価する際には、提案した等価剛性比例型が有効であるといえる。

5. まとめ

以上、本研究を行うことで以下の知見を得た。

- ・本手法を用いることにより、主体構造の損傷減衰と、制震ダンパーの付加減衰を分離して評価できる。
- ・本手法では静的増分解析が行えない粘性系ダンパーによる制震補強建物に対しても、履歴系ダンパーによる制震補強建物と同じ手法で性能評価(性能表示)することが可能であることが確認された。

参考文献 [1] 柴田明徳:「最新耐震構造解析第 2 版」, 森北出版 pp79, 2007. 6
 [2] 倉本洋:「多層建築物における等価 1 自由度系の地震応答特性と高次モードの応答予測」, 日本建築学会構造系論文集, 第 580 号, pp61-68, 2004. 6

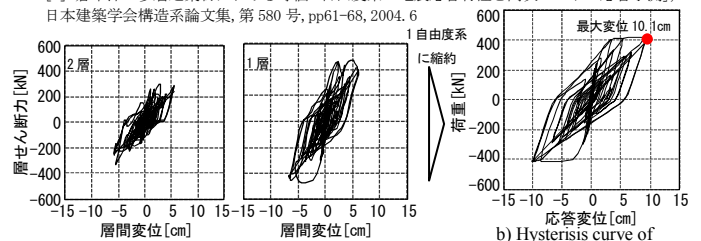


Fig.3 Hysteresis curve of seismic response analysis
 Table 2 Maximum displacement response of seismic response analysis

	EL-NS	HA-NS	KO-NS	RAND	平均
無補強建物	10.1	12.4	11.7	13.9	12.0
履歴系ダンパー補強建物	7.3	6	6.1	5.6	6.2
粘性系ダンパー補強建物	6.9	5.5	5.7	5.1	5.8

[cm]

Table 3 Damping factor changes on investigation of structural damping

無補強建物	慣性力縮約(A)		せん断力縮約(B)		構造減衰の影響(A-B)	
	履歴面積	h	履歴面積	h	履歴面積	h
0%	3133	18	3133	18	0	0
初期剛性比例5%	5612	32	3144	18	2468	14
瞬間剛性比例5%	3540	20	3116	18	424	2
等価剛性比例5%	3982	23	3103	18	879	5
履歴系ダンパー補強建物	慣性力縮約(A)		せん断力縮約(B)		構造減衰の影響(A-B)	
	履歴面積	h	履歴面積	h	履歴面積	h
0%	5513	31	5513	31	0	0
初期剛性比例5%	8154	46	5506	31	2648	15
瞬間剛性比例5%	6065	35	5482	31	583	3
等価剛性比例5%	6339	36	5466	31	873	5
粘性系ダンパー補強建物	慣性力縮約(A)		せん断力縮約(B)		構造減衰の影響(A-B)	
	履歴面積	h	履歴面積	h	履歴面積	h
0%	5649	32	5649	32	0	0
初期剛性比例5%	8333	47	5637	32	2697	15
瞬間剛性比例5%	6103	35	5651	32	452	3
等価剛性比例5%	6534	37	5644	32	889	5