損傷制御構造に設置された履歴ダンパーのエネルギー吸収能力予測法

PREDICTION OF ENERGY ABSORPTION CAPACITY OF HYSTERESIS DAMPERS INSTALLED IN DAMAGE CONTROL STRUCTURES

田原 健一^{*1}, 山崎 真司^{*2}, 見波 進^{*3}

Kenichi TAHARA, Shinji YAMAZAKI and Susumu MINAMI

In this paper, the energy absorption capacity of a hysteresis damper installed in a damage control structure was investigated. The performance of a hysteresis damper is limited by its fracture. The method predicting the metal fatigue life is extended to apply to the evaluation of the life of dampers. However, the method based on the energy absorption is necessary for the earthquake-resistant design. The conclusions obtained from this paper can be summarized as follows. (1) The energy-based method to evaluate the ultimate performance of a hysteresis damper was proposed based on the results of the cyclic loading tests. (2) The characteristic of the distribution of the energy response of the damage control structure is clarified based on the results of the earthquake response analyses. (3) By using these results, the simple method to predict the energy absorption capacity of the damper was proposed.

Keywords : *Energy absorption capacity, Earthquake response, Energy response distribution, Steel rod damper, Cyclic loading test, Miner's law*

エネルギー吸収能力, 地震応答, エネルギー応答分布, 鋼棒ダンパー, 繰返し載荷実験, Miner 則

1 序

建物の自重を支持する弾性主架構(柔部分)と地震入力エネルギーを吸収する弾塑性要素(剛部分)から構成される耐震構造(柔剛混合構造¹⁾, 損傷制御構造²⁾)においては, 弾性架構の存在により, 地震入力エネルギーが弾塑性要素で効率良く吸収され, また, 地震終了時の残留変形が抑制される. このような構造の耐震性能を定量的に評価するためには, エネルギー吸収要素の限界性能が明らかにされなければならない. 履歴型エネルギー吸収要素(以下, ダンパー)の限界性能については, これまで多くの研究が行われているが, 必ずしも充分とは言えない.

ダンパーを含む鋼材の極低サイクル疲労に対して, 疲労問題を拡張して用いる研究は建築分野に限らず数多くなされており, Manson-Coffin 則³⁾および Miner 則⁴⁾を用いた損傷評価法が極低サイクル領域に適用されている. 地震応答などのランダム振幅載荷ではレインフロー法⁵⁾などの手法により振幅を集計し Miner 則を用いて精度のよい評価ができるとの報告が, 花井ら⁶⁾, 青木ら⁷⁾, 田上ら⁸⁾によりされている. また, Miner 則の成立を前提とした風応答に対するダンパーの評価法なども成原ら⁹⁾により提案されている. 一方で, 竹内ら¹⁰⁾や, 大小二段の振幅を交互に載荷する場合を扱った清水ら¹¹⁾, 中込ら¹²⁾, 館石ら¹³⁾などの論文において Miner 則の精度に関する問題が指摘されており, 中込ら¹²⁾, 館石ら¹³⁾は同評価法の修正法を提案している.

設計者が意図する耐震性能を実現するために, 概略設計の段階において, 地震時の建物応答をエネルギーの釣合いに基づき総合的に把握することは重要である¹⁾. エネルギーの釣合いに基づく設計法において, ダンパー性能の検討は, 入力するエネルギーと保有するエネルギー吸収能力との比較により行われる. これを行うためにはダンパーのエネルギー吸収性能と, エネルギー入力(ダンパーのエネルギー応答)の特性の双方が明らかにされる必要がある.

ダンパーの限界性能をエネルギー吸収または累積塑性変形の点から考察した研究は少なく, ほぼ以下に挙げるような研究に限られる.

秋山ら¹⁴⁾は履歴曲線を骨格部とバウシグナー部へ分解し, 骨格曲線の変位量を用いて載荷振幅レベルを表現し, エネルギー吸収量を評価する手法を提案している. エネルギー吸収を骨格部とバウシグナー部によるものに分けて評価することで, 精度が高く, 載荷履歴によらず統一的に用いることができる評価法となっている. この手法で応答解析結果を評価する場合, 既報¹⁵⁾のように骨格部とバウシグナー部を考慮した精緻な履歴モデルが必要となり, 現段階では設計に直接用いることは難しい.

また, 竹内ら^{10), 16)}は二種類のダンパーについて, 骨格部とバウシグナー部の損傷への影響度の違いや, それぞれの累積塑性変形量の比率に注目することで累積塑性変形性能の予測式を導出している.

一方で, 小川ら¹⁷⁾はバイリニア系を用いて応答の半サイクル間でのエネルギー入力について検討を行い, 半サイクル毎のエネルギー

*1 ㈱フジタ 博士(工学)

(元 首都大学東京大学院)

*2 首都大学東京 名誉教授・工博

*3 首都大学東京大学院都市環境科学研究科建築学専攻
助教・博士(工学)

Fujita Corporation, Dr. Eng.

Prof. Emeritus, Tokyo Metropolitan University, Dr. Eng.

Assistant Prof., Dept. of Architecture and Building Engineering, Graduate School of Urban Environmental Sciences, Tokyo Metropolitan University, Dr. Eng.

入力最大の総エネルギー入力に対する比率に関する検討に基づき、半サイクル毎のエネルギー入力の分布特性を定式化している。

しかし、地震動により損傷を受けるダンパーの限界性能について、地震入力エネルギーの特性に関する検討結果と組合せて評価する研究はほとんどない。本論文では、ダンパーの繰返し载荷実験と、多数の地震応答解析結果の分析に基づき、地震動により損傷を受けるダンパーのエネルギー吸収能力に関する簡易な予測法を提案する。

まず、曲げを受ける鋼製丸棒ダンパーを用いた、一定および変動振幅の繰返し载荷実験に基づき、半サイクルでのエネルギー吸収を振幅の指標として Miner 則と類似の方法でダンパーの限界性能を評価できることを示す。次に、多数の地震応答解析に基づき、半サイクルで吸収するエネルギー量の分布特性を明らかにする。これらに基づき地震応答時のダンパーのエネルギー吸収能力の簡易な予測法を提案し、その精度を検証する。なお、本論文ではダンパーが大きく塑性化する地震応答の場合を対象とし、風振動などにより生じるほぼ弾性範囲の応答がダンパーの限界性能評価に及ぼす影響を考慮しなければならない場合は対象外とする。

2 繰返し载荷実験

2.1 試験体

ダンパーの試験体には SS400 鋼板から切削加工で製作した鋼棒を用いる (図 1)。素材の引張試験結果を図 2 に示す。鋼棒の両端には取り付け用のねじがあり、片持ち梁形式に固定し自由端側をピンを介して繰返し载荷する (図 3)。ダンパーの諸元を表 1 に示す。

2.2 測定

载荷治具に取付けたロードセルにより荷重 (Q)、変位計により载荷点ピン中心位置の荷重方向変位 (δ) を測定する。荷重、変位は連続的に測定し、測定値を用いてエネルギー (E) を算出する。変位とエネルギーについては、降伏荷重を Q_p 、降伏変位を δ_p とし、次式による無次元化表記、塑性率 μ 、累積塑性変形倍率 η を用いる。

$$\mu = \delta / \delta_p \quad (1) \quad \eta = E / (Q_p \cdot \delta_p) \quad (2)$$

2.3 载荷

载荷はすべて準静的に変位制御で行う。ダンパーの性能限界点については後述するが、実験は破断、すなわち荷重がほぼ 0 (ロードセルの分解能 15 N の 2~3 倍程度) に至るまで行う。

1) 一定振幅载荷 (試験名 Cxxx)

正負対称交番の一定変位振幅で载荷する。

2) 漸増振幅载荷 (試験名 Ixxx)

正負対称交番の漸増変位振幅で载荷する。同じ大きさの変位振幅を正負一回ずつ等差数列的に漸増する振幅 ($a, -a, 2a, -2a, 3a, -3a, \dots$) で载荷する。

3) ランダム振幅载荷 (試験名 Rxxx)

一定、漸増振幅载荷の結果をもとにダンパーの履歴特性をモデル化し、それを組込んだ振動系の応答波形を基に作成した変位振幅 (詳細は後述) で载荷する。いずれも 0 点に対して偏りがほぼない波形である。破断に至るまで同じ波形を繰返し入力する。

2.4 ランダム振幅

ランダム振幅载荷の波形には図 4 に示す 4 種類を用いる。これらは以降に示す条件で地震応答解析を行い得られた応答波形を基に作成している。

図 1 試験体

図 2 素材の応力歪関係 (右図は降伏点付近)

表 1 ダンパーの諸元

端部半径	R	4.0 mm
弾性剛性	K_d	17.6 kN/mm
降伏荷重	Q_p	4.4 kN
降伏変位	δ_p	0.251 mm

図 3 载荷セットアップ

図 4 ランダム振幅载荷の载荷履歴 (1 セット)

図 7 解析用の履歴モデルと実験結果

図 6 履歴モデルの概要

表 2 地震波

名称	説明	種別
Kobe	兵庫県南部地震 神戸海洋気象台 1995 NS	観測波
El Centro	インペリアルバレー地震 El Centro 1940 NS	観測波
W-Osaka	想定東南海地震 西大阪予測波 NS ¹⁹⁾	予測波
Art-Hachi	告示による解放工学的基盤上のスペクトル + 1968 十勝沖地震 八戸波位相	模擬波
Tomakomai	2003 十勝沖地震 K-NET 苫小牧 NS	観測波

表3 実験一覧

試験名	载荷パターン (括弧内は μ)	(a) η_i	(b) η_f	(c) η_e	(d) N_f	(e) N_e	(f) D_η	(g) D_η (1波)	(h) η_e (推定)	(i) D_η (推定)	(j) D_η (1波推定)
C010	一定: ± 1.0 mm (± 4.0)	2069	1779	—	296	—	—	—	—	—	—
C023	一定: ± 2.25 mm (± 9.0)	1839	1659	—	77	—	—	—	—	—	—
C047	一定: ± 4.7 mm (± 18.7)	1261	1149	—	23	—	—	—	—	—	—
C100	一定: ± 10.0 mm (± 39.8)	930	764	—	6	—	—	—	—	—	—
C125	一定: ± 12.5 mm (± 49.8)	835	657	—	4	—	—	—	—	—	—
I013	漸増: $\pm 1.3, \pm 2.6, \pm 3.9$ mm ... ($\pm 5.2, \pm 10.4, \pm 15.5$...)	1089	1008	1008	—	15	1.088	—	—	—	—
I026	漸増: $\pm 2.6, \pm 5.3, \pm 7.8$ mm ... ($\pm 10.4, \pm 20.7, \pm 31.1$...)	1117	1076	1076	—	10	1.312	—	—	—	—
RK01	ランダム: Kobe 入力での応答, 1波で破断予定	1193	997	968	—	15	1.173	—	913	1.128	—
REL1	ランダム: El Centro 入力での応答, 1波で破断予定	1410	1256	1170	—	52	1.006	0.776	1204	1.017	0.758
RW01	ランダム: W-Osaka 入力での応答, 1波で破断予定	1670	1464	1429	—	186	0.817	—	1661	0.819	—
REL5	ランダム: El Centro 入力での応答, 5波で破断予定	1925	1705	1624	—	201	0.906	0.215	1624	0.922	0.214

2.4.1 振動モデル

損傷制御構造を想定した, 主架構を模す弾性ばねとダンパーを模す履歴特性のばね, 粘性減衰および質点から成る一自由度系を用いる (図 5). 主架構ばねの剛性 K_f と履歴ばねの弾性剛性 K_d は 1:1 とし, 系の固有周期を 1.0 秒としている. 粘性減衰については主架構のみの状態に対して減衰定数が 2% となるように定めている.

2.4.2 ダンパーの履歴モデル

ダンパーの履歴モデルには大井, 高梨らの提案するスケルトンシフトモデル¹⁸⁾を用いる (図 6). 各パラメータは载荷実験結果とよく一致するように定め, 図中の値としている. 解析モデルと実験結果の比較を図 7 に示す.

2.4.3 入力地震動

入力地震動には継続時間の異なる 3 波 Kobe, El Centro, W-Osaka を用いる (表 2 中 3 波). 各入力地震動に対し 1 波ないし 5 波を 1 セットとし, 1 セット終了時にダンパーが概ね限界状態の損傷を受けるように, 地動加速度を係数倍し大きさを調整している.

2.4.4 载荷履歴の作成

応答変位波形からピーク点 (折返点) を取りだし, これに基づき载荷履歴を決めている. なお, きわめて小さい振幅 (概ね $0.4\delta_p$ 以下) は取り除いている.

2.5 実験一覧

実験の一覧を表 3 に示す. 全 11 ケースである.

図8 半サイクル

図9 C023 の限界点判定

図10 全振幅と最大荷重

図11 Q_s と Q_{pk}

3 ダンパーの性能限界点の定義

耐力劣化を基準としてダンパーの性能限界の判定を行う.

载荷の回数は「半サイクル」を用いて表す. 半サイクルは荷重が 0 点を超えて, 折返し, 再び 0 点に至るまでとする (図 8).

3.1 一定振幅载荷の場合

一定振幅载荷実験に関しては, ある半サイクルでのピーク荷重の絶対値 Q_{pk} が, 全载荷における Q_{pk} の最大値 Q_{max} の 75% を最後に下回る半サイクルの一つ前の半サイクルまでをほぼ健全な状態とし, その点を性能限界点とし, 限界点までの半サイクル数を N_f とする. 得られた N_f を表 3 (d) 欄に示す. 図 9 は C023 の半サイクル数と Q_{pk}/Q_{max} , エネルギー吸収量の関係を示している. $\times$ 印の点が限界点である. 限界点以降は, ほとんどエネルギーを吸収しておらずエネルギー吸収能力をほぼ失っていることが分かる.

完全破断 (実験終了時) までのエネルギー吸収量を η_i , 限界点までのエネルギー吸収量を η_f とする. η_i , η_f を表 3 (a), (b) 欄に示す.

3.2 漸増, ランダム振幅载荷

漸増振幅やランダム振幅など変動振幅载荷の場合, 健全状態であっても振幅に応じてピーク荷重も変化するため, ピーク荷重と最大荷重の比較では耐力劣化を適切に評価できない. そこで, 健全状態で同じ振幅を受けたときに達するピーク荷重 Q_s と実際のピーク荷重 Q_{pk} の比に着目して耐力劣化を評価する.

図 10 中の $\bullet$ は一定振幅载荷実験での载荷変位全振幅の無次元量 μ_a と最大荷重 Q_{max} の関係を表している. これを図中に実線で示す曲線 (次式) で近似する.

$$\mu_a \leq 2 \text{ の場合 } Q_{max}/Q_p = f(\mu_a) = 0.50\mu_a \quad (3)$$

$$\mu_a > 2 \text{ の場合 } Q_{max}/Q_p = f(\mu_a) = 0.83\mu_a^{0.24} + 0.02 \quad (4)$$

変動振幅载荷の場合, あるピークから次のピークの間の変位と同じ μ_a に対する上式による Q_{max} が健全時荷重 Q_s であると仮定し, 同値でそのときの実際のピーク荷重 Q_{pk} を除す (図 11 参照). Q_{pk}/Q_s が 0.75 を最後に下回る半サイクルの一つ前の半サイクルを限界点とする.

図 12 は REL1 の Q_{pk}/Q_s と半サイクル数の関係を示したものである. 2 セット目始めの振幅が大きい領域で Q_{pk}/Q_s が急激に低下し限界 (図中の $\times$ 印) に達していることが分かる. 同図最下段にエネルギー吸収量を示す. 限界点以降はほとんどエネルギーを吸収していないことが分かる.

完全破断までのエネルギー吸収量 η_i , 限界点までのエネルギー吸収量 η_f を表 3 (a), (b) 欄に示す. 変動振幅では η_f は η_i の 84~96% 程度で, 振幅の大きいものでやや値が低い.

図 12 REL1 の限界点判定

図 13 $\overline{\Delta\eta}$ と N_f

図 14 $\Delta\eta$ のサンプル (REL1)

4 エネルギーに基づくダンパーの限界性能評価

本論文では、半サイクルでのエネルギー吸収量 $\Delta\eta$ を振幅の指標として扱い、 $\Delta\eta$ を用いて Miner 則と類似な方法によりエネルギー吸収に関する限界性能を評価することを試みる。

4.1 一定振幅載荷実験結果

i 番目の半サイクルの $\Delta\eta$ を $\Delta\eta_i$ とするとき、限界点までの総エネルギー吸収 η_f と $\Delta\eta$ の平均値 $\overline{\Delta\eta}$ は次式となる。

$$\sum_{i=1}^{N_f} \Delta\eta_i = \eta_f \quad (5) \quad \overline{\Delta\eta} = \eta_f / N_f \quad (6)$$

図 13 は $\overline{\Delta\eta}$ と N_f の関係を示している。両対数軸図上で概ね直線の関係になっている。これを次式で近似する。

$$\overline{\Delta\eta} = C_\eta N_f^{k_\eta} \quad (7)$$

$$C_\eta = 502,$$

$$k_\eta = -0.76$$

上式を $\overline{\Delta\eta}$ に対する限界点までの半サイクル数を表す曲線とし、損傷度の評価に用いる。

4.2 ランダム振幅載荷実験結果の処理

損傷にあまり寄与しない小振幅成分を取り除くため実験結果から得た $\Delta\eta$ のサンプルのうち、 $\Delta\eta$ の最大値の 5% より小さいものは取り除く。残ったサンプルの個数、即ち損傷に対して有効な半サイクルの数を N_e とし、有効半サイクル数と呼ぶ。図 14 は REL1 の $\Delta\eta$ のサンプルであり、このうち網掛になっているサンプルが上記の処理により得られた損傷に有効な $\Delta\eta$ である。得られた N_e を表 3 (e) 欄に示す。なお、このデータ処理後の $\Delta\eta$ の合計を η_e とすると η_e は表 3 (c) 欄に示すような値となり、 η_e の η_f (実際に限界点までに吸収した総エネルギー) に対する割合は約 90% から 99% である。

また、損傷に有効な $\Delta\eta$ の平均値 $\overline{\Delta\eta_e}$ を次式で表す。

$$\overline{\Delta\eta_e} = \eta_e / N_e \quad (8)$$

4.3 損傷度の評価

式 (7) による曲線をもとに Miner 則と同様な方法でランダム振幅載荷における損傷度の評価を試みる。

i 番目の半サイクルにおいて吸収するエネルギー $\Delta\eta_i$ による損傷度 $\Delta D_{\eta i}$ は式 (7) を参照して次式で評価できると仮定する。

$$\Delta D_{\eta i} = \frac{1}{N_{fi}} = 1 \left/ \left(\frac{\Delta\eta_i}{C_\eta} \right)^{1/k_\eta} \right. = \left(\frac{\Delta\eta_i}{C_\eta} \right)^{-1/k_\eta} \quad (9)$$

累積損傷の指標 D_η は各半サイクルによる損傷度 $\Delta D_{\eta i}$ の和で評価できるとすると、

$$D_\eta = \sum_{i=1}^{N_e} \Delta D_{\eta i} = \sum_{i=1}^{N_e} \left(\frac{\Delta\eta_i}{C_\eta} \right)^{-1/k_\eta} \quad (10)$$

全てのランダム載荷実験に対する限界点における D_η の値を表 3 (f) 欄に示す。 D_η は概ね 1.0 である。

以上より、ランダム振幅載荷時の各半サイクルのエネルギー吸収量 $\Delta\eta_i$ に基づき式 (10) より D_η を求めれば、 $D_\eta = 1.0$ がダンパーの性能限界点に対応することが分かった。

なお、漸増振幅載荷についても 4.2 と同様に $\Delta\eta$ を処理し η_e 、 N_e を求め、本節と同様の方法で D_η を求めることができる。得られた η_e 、 N_e および D_η をそれぞれ表 3 (c)、(e)、(f) 欄に示す。I026 ではやや値が大きいものの D_η は概ね 1.0 である。

5 地震応答における $\Delta\eta$ の分布特性

地震応答解析に基づき、損傷制御構造の応答における $\Delta\eta$ の分布特性と有効半サイクル数 N_e について調べる。

$\Delta\eta$ の分布特性については小川ら¹⁷⁾がバイリニア系を用いて類似の検討を行っており、 $\Delta\eta$ の最大値の $\Delta\eta$ の累積値に対する比 r_{cycle} について検討を行い、それに基づき分布特性を明らかにしている。この論文では地震動の継続時間の影響について r_{cycle} を直下型とその他の地震動で場合分けすることで考慮している。本章では、ダンパーの限界性能を評価する上で重要な指標である有効半サイクル数 N_e を考慮したかたちで $\Delta\eta$ の分布特性を明らかにするとともに、地震動の継続時間と N_e の関係を明らかにする。

5.1 解析条件

図 5 に示すような主架構弾性ばね、ダンパーをモデル化した履歴ばね、減衰および質点より成る一自由度系モデルを用いる。主架構ばねのみの状態での減衰定数が 2% となるように減衰の大きさを定める。ダンパーの弾性剛性 K_d と主架構の剛性 K_f の比 ($\kappa = K_d / K_f$)

表4 解析パラメータ

剛性比 (κ)	0.1, 1, 3, 5, 10
固有周期 (T [s])	0.35, 0.5, 0.7, 1.0, 1.4, 2.0, 2.8, 4.0
入力地震動	Kobe, El Centro, Art-Hachi, Tomakomai, W-Osaka
ダンパー履歴特性	スケルトンシフトモデル, 完全弾塑性型モデル

を5通り, 弾性時の固有周期 T を8通り, 入力地震動5通り(表2参照)に対して検討を行う(表4参照). ダンパーの履歴特性には2.4.2に示すスケルトンシフトモデルを用いるが, 履歴特性の影響を調べるため, 完全弾塑性型モデルを用いた検討も併せて行う.

5.2 解析結果

5.2.1 $\Delta\eta$ の分布

解析結果から得られた $\Delta\eta$ に対する処理と N_e の算出は4.2と同様に行う. 図15は解析結果を処理した N_e 個の $\Delta\eta$ を降順に並べたものであり, 応答の $\Delta\eta$ の分布を表している. 縦軸は $\Delta\eta$ の平均 $\overline{\Delta\eta_e}$ で除した値であり, 横軸 x はサンプル番号 i をサンプル全数 N_e で除した値である.

地震終了時に(a)~(h)は4.3に示す方法で求めた損傷度が D_η が1.0, (i)は D_η が0.2となるような大きさの入力に対する応答である.(a)~(c)は剛性比が異なる場合であるが, $\kappa = 0.1$ のような剛性比の小さい場合はばらつきが小さいが, $\kappa = 10$ のように剛性比が大きくなるとややばらつきが大きくなる.(b), (d)~(g)は入力異なる場合を比較している. Kobe のような継続時間の短い地震動でややばらつきが見られるが, 継続時間の長い地震動ではばらつきが小さい.

5.2.2 $\Delta\eta$ 分布の近似関数

$\Delta\eta$ の分布を次式による指数関数で近似する.

$$\Delta\eta / \overline{\Delta\eta_e} = A \exp(B \cdot i / N_e) \quad (11)$$

$$\Delta\eta = \overline{\Delta\eta_e} A \exp(Bx) \quad (12)$$

$\Delta\eta_i / \overline{\Delta\eta_e}$ の平均は1.0であるので,

$$1.0 = \sum_{i=1}^{N_e} \frac{\Delta\eta_i / \overline{\Delta\eta_e}}{N_e} = \int_0^1 A \exp(Bx) dx \quad (13)$$

$$A = B / (\exp B - 1) \quad (14)$$

となり A は B より従属的に定まる.

全ての解析結果に対し最小二乗法で近似関数の係数 B を定める. 得られた係数 B の平均値 -3.31 を用いた近似曲線を図15中に太実線で示す.

5.2.3 有効半サイクル数 N_e

a. 地震動の入力時間

地震動の有効な継続時間を表す指標として Trifunuc らの定義²⁰⁾による, 加速度パワーの累積値が最終値の5%から95%に至る間の時間(この定義による継続時間を T_d とする)が通常用いられるが, 長周期地震の場合は, 入力の後半に長周期成分が多くなるなどの理由から, 振動系の固有周期によって実質的な入力の継続時間が異なる場合があることが予測される. 寺本ら²¹⁾は, 減衰定数10%の弾性一自由度系の吸収エネルギーが最終値の5%から95%に至る間の時間(これを入力時間 T_E とする)について検討している. この検

図15 $\Delta\eta$ の分布

討によると、多くの場合で T_E は周期によらずほぼ一定となるが、一部の地震波で周期に対する依存性が見られる。

図 16 は本解析で用いた 5 波に対する T_E と固有周期 T の関係である。◀は Trifunuc の T_d 、▽は解析で用いた系の固有周期である。Tomakomai では強い、W-Osaka でも若干の周期に対する依存性が認められる。

b. 有効半サイクル数の予測

図 17 は有効半サイクル数 N_e と、入力時間 T_E を固有周期 T で除した値の関係である。両者には剛性比 (κ) 毎に相関が認められる。これをそれぞれの κ の場合に対して最小二乗法により近似する。

$$N_e = \alpha(T_E/T)^{0.63} \quad (15)$$

κ に応じて得られた係数 α を図 18 中に ● で示す。これを κ の関数として次式で近似する。

$$\alpha = 3.98 + 5.72 \exp(-0.76\kappa) \quad (16)$$

5.2.4 入力大きさ、履歴特性の影響

本解析では前述のように D_η の大きさが 1.0 ないし 0.2 となるように入力大きさの調整している。図 15(i) は Art-Hachi 入力、剛性比 1.0、入力大きさについては D_η が 0.2 となる場合である。同条件で D_η が 1.0 の場合である (b) とほぼ同じ傾向である。

また、(h) はダンパーを完全弾塑性型履歴特性とした、Art-Hachi 入力、剛性比 1, $D_\eta = 1.0$ の場合の、 $\Delta\eta$ の分布である。(b) と比較して完全弾塑性型の場合でも分布の傾向はほとんど変わらない。

図 16 エネルギー入力に基づく入力時間 T_E と周期の関係

図 17 有効半サイクル数と周期、入力時間の関係

図 18 剛性比 κ と近似係数 α の関係

以上より入力大きさや履歴特性により $\Delta\eta$ の分布特性はほとんど影響を受けないことが分かる。紙面の都合上掲載していない他の組合せについても同様であることを確認している。また、 N_e に関しても入力大きさや履歴特性によりほとんど変わらないことを確認している。

6 地震応答時のダンパーの限界性能予測

6.1 D_η の推定法

5 章で応答解析に基づき求めた $\Delta\eta$ の分布 (式 (12)) に対し、損傷度を 4.3 の方法 (式 (10)) によって評価する。式 (10) の $\Delta\eta_i$ に式 (12) の $\Delta\eta$ を代入し、和を積分に置き換えれば、陽な形で D_η を求めることができる。

$$\begin{aligned} D_\eta &= \sum_{i=1}^{N_e} \left(\frac{\Delta\eta_i}{C_\eta} \right)^{-1/k_\eta} \\ &= \sum_{i=1}^{N_e} \left(\frac{\Delta\eta_e A \exp(B \cdot i/N_e)}{C_\eta} \right)^{-1/k_\eta} \\ &= \int_0^1 \left(\frac{\Delta\eta_e A \exp(Bx)}{C_\eta} \right)^{-1/k_\eta} N_e dx \\ &= \left(\frac{\Delta\eta_e A}{C_\eta} \right)^{-1/k_\eta} \frac{-k_\eta N_e}{B} \{ \exp(-B/k_\eta) - 1 \} \end{aligned} \quad (17)$$

上式は、 η_e と N_e から損傷の指標である D_η を推定することができることを示している。推定に際しては C_η , k_η は一定振幅荷重実験結果に基づき求めた値 (4.1 参照、本論文で用いたダンパーについては式 (7) に示す値)、 B は平均値 -3.31 (5.2.2 参照) を用いる。

6.2 D_η 推定値に対する $\Delta\eta$ 分布特性のモデル化の影響

図 19 はランダム振幅荷重を行った 4 体について限界点までの $\Delta\eta$ の分布を示したものである。分布形の係数 B に -3.31 を用いた近似曲線を太実線で示す。ランダム振幅荷重履歴は地震応答解析の応答波形より作成しているが、いずれも類似の分布形となっている。

式 (17) より求めた限界点までの D_η の推定値を表 3 (i) 欄に示す。 N_e と η_e に実験値を用いている。本実験では 1 波終了時点でちょうど限界点となっていないので入力地震波 1 波終了時点での N_e を求める式 (15) が適用出来ないため、 N_e には実験値を用いている。表 3 (f) 欄に示す式 (10) による値と比較してよく対応しており、 $\Delta\eta$ の分布特性の近似式 (11) を用いたことによる D_η の推定値への影響度は小さいと言える。

RK01, RW01 は 1 波目の途中で限界点に達しているが、REL1, REL5 に関しては 1 波終了時では限界点に達していない。REL1, REL5 について 1 波終了時点での D_η を表 3 (g) 欄に、式 (17) による D_η の推定値を (j) 欄に示す。なお推定値を求めるに際して、 η_e は実験での 1 波終了時の値、 N_e は式 (15) による値を用いている。

図 19 $\Delta\eta$ の分布

図 20 D_η の推定結果

図 21 $\overline{\Delta\eta_e}$ と N_e

図 22 η_e と N_e

実験結果に対して式 (10) で求めた値と推定値とはよく一致しており、 $\Delta\eta$ の分布特性の近似式 (11) と N_e の推定式 (15) を用いたことによる D_η の推定値への影響度は小さいと言える。

次に、前章の解析結果に対して、 D_η の推定式 (式 (17)) を適用する。 N_e は式 (15) による値とする。図 20 に推定結果を示す。入力の大きさは式 (10) による D_η が 1.0 となるように決められているが、推定結果は概ね 1.0 となり、十分な精度が得られていることが分かる。図 15 において $\Delta\eta$ の分布に対する近似関数の誤差がやや大きいと考えられる場合もあるが、推定結果を見ると、この誤差の D_η の推定値への影響度は小さいと言える。

6.3 エネルギー吸収量の推定

式 (17) より、ある D_η に対する $\overline{\Delta\eta_e}$ と N_e の関係式は、

$$\overline{\Delta\eta_e} = \left(\frac{C_\eta}{A} \right) \left[\frac{-k_\eta}{BD_\eta} \left\{ \exp(-B/k_\eta) - 1 \right\} \right]^{k_\eta} N_e^{k_\eta} \quad (18)$$

更に両辺に N_e を乗じると、

$$\eta_e = \left(\frac{C_\eta}{A} \right) \left[\frac{-k_\eta}{BD_\eta} \left\{ \exp(-B/k_\eta) - 1 \right\} \right]^{k_\eta} N_e^{k_\eta+1} \quad (19)$$

上式を用いれば、ある D_η に対するエネルギー吸収量 η_e を求めることができる。 $D_\eta = 1.0$ に対する η_e の推定値を表 3 (h) 欄に示す。(c) 欄の実験値による η_e とよく対応している。

これら二式からある D_η に対する $\overline{\Delta\eta_e}$ や η_e と N_e の関係を得ることができる。式 (18) から得られる $D_\eta = 1.0$ に対する $\overline{\Delta\eta_e}$ - N_e 関係とその実験値を図 21、式 (19) から得られる η_e - N_e 関係とその実験値を図 22 に示す。これらはよく一致していることが分かる。また、 N_e が大きくなる場合、即ち T_E が長い場合や固有周期が短い場合ほど、エネルギー吸収の限界量が大きくなることが分かる。

7 概略設計におけるダンパーの性能評価

6 章で提案した D_η を推定する式を用いて、概略設計段階において入力の特性や構造特性に基づきダンパーのエネルギー吸収能力を簡易に予測する方法について以下に手順を整理する (図 23 参照)。

- 1) ダンパーの一定振幅载荷実験に基づき基本指標である C_η と k_η を求める。
- 2) 入力地震動のエネルギースペクトルと固有周期 T から入力エネ

図 23 予測法の流れ

ルギー E を求める。

- 3) 入力エネルギー E とダンパーの諸元 Q_p , δ_p から η_f を求める。安全側に考えて $\eta_e = \eta_f$ とする。
- 4) 図 16 のようなスペクトルから入力時間 T_E を求める。
- 5) T_E , T から式 (15) により有効半サイクル数 N_e を求める。
- 6) $\Delta\eta$ の分布関数の係数 B は本論文で求めた平均値 -3.31 を用いる。
- 7) 損傷度 D_η は、想定する限界点までのエネルギー入力量 η_e 、有効半サイクル数 N_e および各種係数を用いて式 (17) により求める。

損傷集中を考慮して当該層のダンパーへの入力エネルギー E を評価することにより¹⁾、本手法の多層モデルへの拡張が可能であると考えられる。

8 結

本論文では、鋼棒ダンパーを用いた载荷実験を基に損傷制御構造に設置された履歴ダンパーの限界性能に関する検討を行った。エネルギー吸収性状に注目して損傷度の評価を行った。時刻歴解析を行わずにエネルギーの釣合いに基づく設計において有用な、履歴ダンパーのエネルギー吸収能力を予測する方法を提案した。

本論文により以下の結論を得た。

- 1) ダンパーの性能限界点を明確に定義した。変動振幅载荷の場合について、一定振幅载荷で得られた変位振幅と最大荷重の関係から、変動振幅载荷の各振幅に対する健全状態で達する荷重を評価し、それに対して 75% に低下する点を限界点とすることで一定振幅载荷の場合と同様に評価できる方法を示した。
- 2) 半サイクルでのエネルギー吸収量を振幅の指標として扱い、これを用いて Miner 則と類似な方法により限界性能を評価できることを示した。
- 3) 多数の地震応答解析結果から、損傷に寄与する半サイクルエネルギー吸収量の分布には一定の傾向があることを明らかにし、分布を表す近似式を求めた。また、有効半サイクル数を求める近似式を得た。
- 4) 2) から得られた限界性能を表す式と、3) から得られた応答の分布を表す式を用いて、エネルギー吸収能力を簡易に推定する予測法を提案し、十分な精度が得られることを確認した。

異なる形式の履歴ダンパーに対しては、複数の一定振幅载荷実験により C_η と k_η を求めることで、本予測法により地震動を受ける場合の限界性能を予測できると思われる^{注1)}。ただ、異なる形式のダンパーに関する実験と予測法の適用性を確認することは必要であり今後の課題である。

謝辞

本研究は首都大学東京 21 世紀 COE プログラム「巨大都市建築ストックの賦活・更新技術育成」の一環として行われた。

本論文で用いた地震波 Tomakomai は独立行政法人防災科学技術研究所の強震ネットワーク (K-NET) より提供頂いた。

注

注 1) 本論文では $\Delta\eta$ と N_f の関係が両対数軸図上で直線となることが前提となっている。既往の多くの履歴ダンパーを扱った研究で変位振幅と半サイクル数 (またはサイクル数) の関係は両対数軸図上で概ね直線となっている^{6)~8), 14)}。半サイクル間のエネルギー吸収量は概ね変位のべき乗に比例するものであるため、変位振幅と半サイクル数の関係が両対数軸図上で概ね直線となるのであれば、 $\Delta\eta$ と N_f の関係も概ね直線となると考えられる。

図注 1 は一定振幅荷重実験から得られた変位全振幅の無次元量 μ_a と半サイクル数 N_f の関係である。本論文で用いたダンパーについても同様に直線となっている。これらの関係は以下に示す直線式により近似できる。

$$\mu_a = CN_f^k$$

$$C = 229, \quad k = -0.59$$

なお、変動振幅荷重の場合について上式を用いてレインフロー法により疲労損傷度指標 D 値を求めると表注 1 に示す値となる。本実験結果において D 値は 0.8~1.0 程度となった。

図注 1 μ_a - N_f 曲線

表注 1	D 値
試験名	D 値
I013	0.808
I026	0.878
RK01	0.926
REL1	0.840
RW01	0.801
REL5	0.987

参考文献

- 1) 秋山宏: エネルギーの釣合に基づく建築物の耐震設計, 技術堂出版, 1999
- 2) 和田章, 岩田衛, 清水敬三, 阿部重孝, 川合広樹: 建築物の損傷制御設計, 丸善, 1998
- 3) S. S. Manson: Thermal Stress and Low Cycle Fatigue, McGraw-Hill, pp. 245-274, 1966

- 4) M. A. Miner: Cumulative Damage in Fatigue, J. Appl. Mech., Trans. ASEM, No. 67, pp. A159-A164, 1945
- 5) 遠藤達雄, 安在弘之: 簡明にされたレインフローアルゴリズム「P/V 差法」について, 材料, 日本材料学会, 30 巻 328 号, pp. 89-93, 1981.1
- 6) 玉井宏章, 近藤一夫, 花井正実: 履歴減衰装置の極低サイクル疲労特性と実地震応答下における疲労寿命の予測, 日本建築学会構造系論文集, No. 462, pp. 141-150, 1994.8
- 7) 小山雅人, 青木博文: 繰り返し変形を受ける鋼部材の累積損傷評価指標に関する研究-極低降伏点鋼を用いた損傷集中型耐震部材の定振幅繰返し荷重実験に基づく累積損傷評価および実用的損傷評価法の提案-, 日本建築学会構造系論文集, No. 562, pp. 159-166, 2002.12
- 8) 田上淳, 石井孝二, 吉田正邦, 坂本光雄, 山田俊一, 黒川泰嗣, 牧部一成: ハニカム開口を有する鋼板ダンパの低サイクル疲労実験 (その 1~3), 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-1, pp. 791-796, 1999.9
- 9) 成原弘之, 泉満: 風応答振動による弾塑性履歴ダンパーの疲労損傷: 日本建築学会構造系論文集, No. 518, pp. 119-126, 1999.4
- 10) 竹内徹, 井田茉莉, 山田哲, 鈴木一弁: 変動歪振幅下における座屈拘束ブレースの累積塑性変形性能予測, 日本建築学会構造系論文集, No. 586, pp. 203-210, 2004.12
- 11) 嶋田勝紀, 小茂島潤, 清水真佐男: 極低サイクル疲労における Manson-Coffin 則の適用性と累積損傷, 日本機械学会論文集 (A 偏), 53 巻 491 号, pp.1178-1185, 1987.7
- 12) 中込忠男, 李建: 繰返しを受ける SM490 鋼の疲労性に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, No. 469, pp. 127-136, 1995.3
- 13) 館石和雄, 判治剛, 南邦明: 極低サイクル疲労領域における変動振幅ひずみ下の低サイクル疲労寿命予測モデル, 土木学会論文集, No. 773/I-69, pp. 149-158, 2004.10
- 14) 秋山宏, 高橋誠, 石軍: 繰返し曲げを受ける円形断面鋼棒の終局エネルギー吸収能力, 日本建築学会構造系論文集, No. 475, pp.145-154, 1995.9
- 15) 田原健一, 山崎真司, 見波進, 柳沼大樹: 繰返し曲げを受ける鋼棒履歴ダンパーのエネルギー吸収能力, 日本鋼構造協会年次論文報告集, Vol. 14, pp. 335-342, 2006.11
- 16) 竹内徹, 調浩朗, 山田哲, 吉敷祥一, 鈴木一弁, 佐伯英一郎, 和田章: 梁端弾塑性ダンパーの累積変形性能および損傷度評価, 日本建築学会構造系論文集, No. 600, pp. 115-122, 2006.2
- 17) 小川厚治: 半サイクル地震入力エネルギーとバイリニア系の最大地震応答, 日本建築学会構造系論文集, No. 532, pp. 185-192, 2000.6
- 18) 孟令樺, 大井謙一, 高梨晃一: 鉄骨骨組地震応答のための耐力劣化を伴う簡易部材モデル, 日本建築学会構造系論文集, No. 437, pp. 115-124, 1992.7
- 19) 東海地震等巨大災害への対応特別調査委員会報告書, 日本建築学会, 2006.3
- 20) M. D. Trifunac and A. G. Brady: A Study on Duration of Strong Earthquake Ground Motion, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 65, No. 3, pp. 581-626, 1975.6
- 21) 齊藤紋子, 垣内延介, 石井正人, 村上勝英, 寺本隆幸: 制振ダンパーのエネルギー吸収能力に関する研究 (その 1), 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2, pp. 765-766, 2007.8

(2007年10月10日原稿受理, 2008年5月8日採用決定)