T2R2 東京工業大学リサーチリポジトリ Tokyo Tech Research Repository

論文 / 著書情報 Article / Book Information

| 論題(和文) | 座屈拘束ブレースの疲労損傷度に影響を与える平均歪みの導出 |
|---------------------|--|
| Title(English) | |
| 著者(和文) | 高橋真人, 植木卓也, 佐藤利昭, 北村春幸, 宮川和明, 佐藤大樹 |
| Authors(English) | Takuya Ueki, Toshiaki Sato, Haruyuki Kitamura, Kazuaki Miyagawa, Daiki Sato |
| 出典 / Citation | |
| Citation(English) | , , , pp. 561-564 |
| 発行日 / Pub. date | 2016, 3 |

座屈拘束ブレースの疲労損傷度に影響を与える平均歪みの導出

構造-振動

疲労損傷度 中低層建物 時刻歴応答解析 履歴減衰型ダンパー

1. はじめに

東北地方太平洋沖地震以降,建物を早期に復旧させ て継続的に使用する必要性が高まり,建物には高い耐 震性能が要求されている。高耐震化を図る手立ての 1 つに,地震動による入力エネルギーをダンパーに集中 させる制振構造が挙げられ¹⁾,現在では多くの建物 に適用されている。一方,想定を上回る地震動の発生 を受け,近年では強震動予測による地震動の見直しが 進められ,南海トラフを震源とする東海,東南海,南 海地震,およびそれらの連動地震に代表される長周期 地震動の発生が懸念されている²⁾。これらの想定地震 動は,これまでの設計用外力を上回るものであり³⁾, 制振構造の要となるダンパーの変形増大による破断 よりも,地震動の繰返し入力による疲労損傷が破断に 大きく影響を与える可能性があり,今後において疲労 損傷度の評価が重要になると考える。

筆者らはこれまで入力地震動であるランダム波形 をエネルギー等価な一定振幅波形に置き換えた等価 平均歪みによる座屈拘束ブレースの疲労損傷度評価 法を提案し,地震動加力実験結果を用いることでその 妥当性を確認してきた^{4),5)}。しかし,上記の評価法に より疲労損傷度を算出する場合は応答波形を振幅に 分解する作業が必要不可欠であり,それに伴い検討が 煩雑になってしまうことが問題となっている。

そこで、本報ではより簡易的に疲労損傷度を評価す ることを目的として、ダンパーの疲労損傷度に影響を 与える平均歪み振幅を導出する方法を提案する。

2. 検討対象建物及び解析用入力地震動概要

2.1 検討対象建物

検討対象建物は図1に示す10層の鋼構造建物とし, 地上10階,高さが42.4m(1階4.6m,2~10階4.2m), 長辺方向が43.2m(7.2m×6スパン),短辺方向が14. 0m+6.0m=20.0m⁶,主架構のみの場合における1次固 有周期_fT₁は2.0sである。ダンパーは軸材にLY225材 を用いた履歴減衰型ブレースを採用し,長辺方向に各 層8基設置している。本解析では、ダンパーを弾性部, 塑性化部を含めた1要素でモデル化している⁷⁾。ダン パーの種類は2種類を想定し、ダンパーの塑性化部長 さ L_p を柱梁芯間長さの1/3(タイプA)と1/2(タイプB)

| 正会員 〇 | 高橋真人 | 同 | 植木卓也*2 | 同 | 佐藤利昭*1 |
|-------|------|---|--------|---|--------|
| 正会員 | *1 | 同 | 宮川和明 | 同 | 佐藤大樹 |

に設定した。ダンパー弾性時における建物の1次固有 周期は $T_{1A}=1.77s(タイプ A)$, $T_{1B}=1.80s(タイプ B)$ であ る。第*i*層のダンパー1本分の降伏軸力 $_{d}N_{yi}$ は A_{i} 分布 に基づき,

$${}_{d}N_{yi} = \frac{dQ_{yi}}{n \cdot \cos\theta_i} \qquad {}_{d}Q_{yi} = {}_{d}\alpha_y \times Mg \times \frac{Q_i}{Q_1}$$
(1-a,b)

として決定した。ここで、 $_dQ_{yi}$:第 i層のダンパー水平 方向降伏層せん断力、n:ダンパー本数、 θ :第 i層ダン パーの取付け角度、 $_d\alpha_y$:ダンパーの降伏層せん断力係 数、M:建物全質量、g:重力加速度、 Q_i : A_i 分布に基づ く第 i層の層せん断力である。以降、ダンパーの降伏 層せん断力係数 $_d\alpha_y$ をダンパー量と呼ぶ。本報ではダ ンパー量 $_d\alpha_y$ を 0.01 に設定し、検討対象ダンパーは図 1 に緑線で示すように、A 通り 2、3 間の外側のダンパ ーとする。時刻歴応答解析は各検討対象建物の長辺方 向のみを対象とし、主架構を弾性とする。



2.2 解析用入力地震動

本報における入力地震動は、1940 年 Imperial Valley 地震における観測波(El Centro)、1968 年十勝沖地震に おける観測波(HACHINOHE)、1952 年 Kern County 地 震における観測波(Taft)、2011 年東北地方太平洋沖地 震における築館地方での観測波(MYG004)、1995 年兵 庫県南部地震における観測波(JMAKOBE)、十勝沖地 震を位相特性として、コーナー周期 T_c =0.64s 以降の擬 似速度応答スペクトル_pS_vが 80cm/s で一定となる告示 波(ART-HACHI)、兵庫県南部地震を位相特性として、 T_c =0.64s 以降の_pS_vが 80cm/s で一定となる告示波(ART-KOBE)、 MYG004 の加速度入力倍率を 2 倍にした地 震波(MYG004_2)の計 8 種類を採用した。図 2 に入力 地震動の擬似速度応答スペクトル_pS_v(減衰定数 *h*=5%) とエネルギースペクトル $V_E(h=10%)$ を示す。



2.3 時刻歴応答解析によるダンパーの応答

各地震動が建物に入力された時の応答結果として、 ダンパーの最大片振幅歪み ε_{max} を図3に、累積塑性変 形倍率 η を図4にダンパーのタイプ毎に示す。ダンパ ーの片振幅歪み ε とダンパーの累積塑性変形倍率 η は、

$$\varepsilon = \frac{d \,\delta_{ai}}{L_p}$$
 $\eta = \frac{W_p}{d \,N_{yi} \cdot d \,\delta_{yi}}$ (2-a,b)

と示される。ここで、 $_d\delta_{ai}$:第i層ダンパーの軸方向変 位、 L_p :ダンパーの塑性化部長さ、 W_p :ダンパーの累 積塑性歪みエネルギー、 $_d\delta_{yi}$:第i層ダンパーの軸方向 降伏変位である。図より、JMAKOBE 入力時を除き、 ダンパーの最大片振幅歪み ε_{max} と累積塑性変形倍率 η に共通して第2、第3層にて応答が最大値をとってい ることがわかる。また、ダンパーのタイプにより応答 値が異なり、最大で1.5倍程度変わることが確認でき る。



3. ダンパーの疲労損傷度評価方法

本章では,次章で用いる疲労損傷度の評価方法であるマイナー則⁴⁾とエネルギー等価法⁴⁾について説明し, 本報での検討項目について述べる。

3.1マイナー則による疲労損傷度評価

マイナー則による疲労損傷度評価において,疲労に 影響を与える歪みの振幅をダンパーの応答波から算 出する方法として,レインフロー法⁸⁾を用いる。レイ ンフロー法により地震動の波形を個々の半波長の振 幅に分解し,それぞれの歪み振幅Δε_iに対する限界繰返 し回数 N_{cri}を算出する。1/2N_{cri}を半波長あたりの疲労 損傷度としたとき,半波長数 Nの地震動入力1回に対 する疲労損傷度 D_mは,

$$D_m = \sum_{i=1}^{N} \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta \varepsilon_i}{\alpha} \right)^{\frac{-1}{\beta}} \qquad \qquad N_{cri} = \left(\frac{\Delta \varepsilon_i}{\alpha} \right)^{\frac{1}{\beta}} \qquad (3-a,b)$$

と示される。ここで、 N_{cri} :限界繰返し数、 $\Delta \varepsilon_i$:全歪み 振幅(%)、 $\alpha = 15.83(タイプ A)$ 、 $\alpha = 8.724(タイプ B)$ 、 $\beta = -0.44(タイプ A)$ 、 $\beta = -0.33(タイプ B)$ である^{4)、9)}。な お、歪み振幅が弾性歪み範囲($\Delta \varepsilon \leq 0.22\%$)のものは除 いている。

3.2 エネルギー等価法による疲労損傷度評価

エネルギー等価法とは、図5に示すように、地震動 波形を総エネルギー吸収量が等しく、かつ波形分解し て得られた歪み振幅を平均歪み振幅とする一定振幅 とみなして評価する方法であり、疲労損傷度 D_{eq}は、

$$D_{eq} = \left(\frac{n_{eq}}{N_{cri}}\right) \qquad \qquad n_{eq} = \left(\frac{W_p}{W_{peq}}\right) \qquad (4-a,b)$$

$$W_{peq} = 4 \cdot_d N_{yi} \cdot (\varepsilon_{eq} - \varepsilon_y) \cdot L$$

(4-c)

と示される。ここで、 n_{eq} :等価繰返し数、 W_{peq} :1 波長あ たりの累積塑性歪みエネルギー、 ε_{eq} :平均歪み、 ε_{5} :降伏 歪みである。エネルギー等価法は総エネルギー吸収量 と平均歪み ε_{eq} を求めることで疲労損傷度 D_{eq} を算出す ることができる。しかし、従来の方法の場合⁴⁾、波形 分解した歪み振幅の単純累加平均値を平均歪み ε_{eq} と しており、波形分解法を必要としていた。そこで次章 より、波形分解法を用いずにマイナー則による評価と 同様な結果になるような平均歪み ε_{eq} を算出する方法 の提案を行う。



4. 簡易的な平均歪みの導出

簡易的にダンパーの平均歪み ϵ_{eq} を導出する方法として,前章の(4)式に着目する。総エネルギー吸収量が既知であり,マイナー則により算出した疲労損傷度 D_m が正解値であるという仮定のもとで,(4-c)式中の平均歪み ϵ_{eq} を逐次変化させ,エネルギー等価法により算出した疲労損傷度 D_{eq} が D_m と等しくなる ϵ_{eq} を求めた。図6にタイプA,図7にタイプBのダンパーの疲労損傷度と平均歪み ϵ_{eq} の関係を入力地震動毎に示す。図6,図7より,JMAKOBEやART-KOBEのような入

カレベルが大きい直下型の地震動がダンパーに入力 された場合,各層の疲労の度合いがほぼ類似している ことがわかる。一方,MYG004やART-HACHIのよう な入力レベルの大きい長周期地震動や,それ以外の入 カレベルの小さい地震動がダンパーに入力された場 合,各層によって疲労の度合いが異なり,ばらつきが 生じている。また,ダンパーの種類によっても疲労の 度合いが大きく異なっていることがわかる。次に,図 6,図7中に赤丸で示した,各疲労損傷度 Deq と Dm が 最初に一致(Deq/Dm=1.0)した層のダンパーにおける



- 1FL — 2FL — 3FL — 4FL — 5FL •••• 6FL •••• 7FL •••• 8FL •••• 9FL •••• 10FL

図7 疲労損傷度と平均歪みの関係(タイプB)

 $\varepsilon_{eq}/\varepsilon_{max}$ の値を表1に示す。図6と図7にて、ダンパー の種類により疲労の度合いは大きく異なっていたが, TAFT 入力時を除き,表1の Eeg/Emax の値に着目すると ダンパーの違いによる影響はほぼないことが窺える。 TAFT 入力時にばらつきが生じている理由としては, ダンパーの応答が小さいことから弾性歪みが支配的 になり,疲労損傷度の値が小さくなったからだと考え る。以上のことから、ダンパーの種類に関わらず、各 疲労損傷度 Deg と Dm が一致するように決定した平均 歪み Eeg は入力地震動毎でほぼ同じとなる傾向が見ら れる。図8に地震動のエネルギースペクトル VEと擬 似速度応答スペクトル "Syの関係を示す。図中のプロ ットと表1に着目すると、 V_E と $_pS_v$ が一定の範囲であ る時に、数種類の地震動にて $\varepsilon_{eq}/\varepsilon_{max}$ の値が類似してい ることがわかる。このことから、 V_E と $_pS_v$ の大きさに 準じて,図中に点線で示す範囲で地震動を4種類に仮 分類し,平均歪みの値 ε_{eq} をグループ毎に,最大歪み ε_{max} の 0.4 倍(グループ 1), 0.6 倍(グループ 2), 0.8 倍(グル ープ3), 1.2 倍程度(グループ4)に設定することで、マ イナー則により算出した疲労損傷度 Dm とほぼ一致す るようなエネルギー等価法による疲労損傷度 Deg を算 出することができると考える。今後の課題として, 様々な入力地震動に対して同じ検討を行い, グループ 毎に決める平均歪みの精度を上げる必要があると考 える。

| | ダンパ | | |
|-----------|--|--|------|
| 入力地震動 | タイプA | タイプB | グループ |
| | $\varepsilon_{\rm eq}/\varepsilon_{\rm max}$ | $\varepsilon_{ m eq}/arepsilon_{ m max}$ | |
| MYG004_2 | 0.40 | 0.45 | G1 |
| M YG004 | 0.55 | 0.55 | |
| ART-HACHI | 0.65 | 0.60 | G2 |
| JMAKOBE | 0.65 | 0.65 | |
| El Centro | 0.85 | 0.80 | |
| ART-KOBE | 0.80 | 0.80 | G3 |
| HACHINOHE | 0.90 | 0.80 | |
| TAFT | 1.40 | 1.00 | G4 |

表1 $D_{eq}=D_m$ である時の $\varepsilon_{eq}/\varepsilon_{max}$ の値

○ElCentro △HACHINOHE □TAFT ◇MYG004

●JMAKOBE ▲ART-HACHI ■ART-KOBE ◆MYG004_2



5. おわりに

本報では、より簡易的に疲労損傷度を評価すること を目的として、ダンパーの疲労損傷度に影響を与える 平均歪み振幅を導出する方法の提案をした。得られた 知見を以下に示す。

- (1) マイナー則により算出した疲労損傷度と一致する ように決定した平均歪みは、ダンパーの種類に関 わらず入力地震動毎でほぼ同じになる傾向が見ら れる。
- (2) 地震動の擬似速度応答スペクトルとエネルギースペクトルの値の関係より地震動を4 つのグループに分類し、また分類毎に平均歪みを設定することで、波形分解法を用いずに疲労損傷度を算出することができる。
- (3) グループ毎に定める平均歪みの精度向上のため、 今後も様々な入力地震動に対しての検討および検 証を行いたい。

謝辞

本報は JFE スチール株式会社, JFE シビル株式会社, 東京理科大学北村研究室,東京工業大学佐藤研究室の 共同研究の成果によるものです。

参考文献

- 秋山宏:建築物の耐震極限設計 第2版,東京大学出版会, 1987
- 日本建築学会長周期地震動WG:長周期地震動に対する公開研究集会,対象とする巨大地震動と地域,2011.3
- 3) 大下優作,佐藤大樹,北村春幸,長江拓也:E-ディフェン ス実験に基づくエネルギー法を用いた損傷配分評価,日本 建築学会関東支部研究報告集 87(I), pp277-280, 2011.3
- 植木卓也,石井匠,宮川和明:長周期・極大地震に対する制 振ブレースの有効性検証,JFE 技報 31 号,2013.1.
- 5) 植木卓也,宮川和明,北村春幸,佐藤利昭,橋本奨吾,高橋真人:極大地震に対する二重鋼管ブレースの性能評価その2,日本建築学会学術講演梗概集,pp1117-1118,2014.9.
- 6) 松澤祐介,佐藤大輔,佐藤大樹,北村春幸,山口路夫,脇田直弥,松蔭知明:架構応答に弾性,弾塑性が混在する場合の制振構造建物のエネルギー配分に関する研究その1,2011 年度日本建築学会関東支部研究報告集 82(I), pp193-196,2012.3
- 7) 栗林晃司,佐藤大樹,北村春幸,山口路夫,西本晃治:実 効変形を考慮した履歴減衰型制振部材を有する鋼構造建 物のエネルギーの釣合に基づく応答予測法,日本建築学会 構造系論文集 76(661), pp543-552, 2011.3
- 遠藤達雄,松石正典,光永公一,小林角市,高橋清文:「Rain Flow Method」の提案と応用,九州工業大学研究報告(工 学)28, pp33-62, 1974.3
- 9) 高橋真人,植木卓也,宮川和明,橋本奨吾,佐藤利昭,北 村春幸:極大地震に対する二重鋼管ブレースの性能評価その1,日本建築学会学術講演梗概集,pp1115-1116,2014.9.

*1 東京理科大学 *2 JFE スチール株式会社

*3 JFE シビル株式会社 *4 東京工業大学