

論文 / 著書情報
Article / Book Information

| | |
|-------------------|--|
| 論題(和文) | 最大応答発生時刻と地震終了時刻の等価繰り返し数の比較とその検証 |
| Title(English) | Comparison between the Equivalent Repetition Number at Maximum Response Occurrence Time and That at Earthquake End Time and its Validation |
| 著者(和文) | 成田冴子, 佐藤大樹, 小穴温子, 北村春幸, 松田頼征, 佐藤俊明, 壇一男 |
| Authors(English) | Saeko Narita, Daiki Sato, Atsuko Oana, Haruyuki Kitamura, Yoriyuki MATSUDA, Toshiaki Sato, Kazuo Dan |
| 出典(和文) | 日本建築学会大会学術講演梗概集, vol. B-2, , pp. 149-150 |
| Citation(English) | , vol. B-2, , pp. 149-150 |
| 発行日 / Pub. date | 2017, 8 |
| 権利情報 | 一般社団法人 日本建築学会 |

最大応答発生時刻と地震終了時刻の等価繰り返し数の比較とその検証

| | | | | | | | | |
|---------|----------|-----|-----|----------|---|--------|---|---------|
| 等価繰り返し数 | 累積塑性変形倍率 | 塑性率 | 正会員 | ○成田 冨子*1 | 同 | 佐藤大樹*2 | 同 | 小穴 温子*3 |
| せん断力比 | エネルギーの釣合 | | 正会員 | 北村春幸*1 | 同 | 松田頼征*1 | 同 | 佐藤俊明*4 |
| | | | 正会員 | 壇 一男*3 | | | | |

1. はじめに

近年、長周期地震動に対する関心が高まり、疲労損傷に代表される累積値の評価が求められている。これら累積値はエネルギーの釣合に基づく応答評価法^{例えば 1), 2)}より評価が可能で、建物が吸収するエネルギー量は等価繰り返し数を用いて表される。等価繰り返し数は累積塑性変形倍率を用いて表される¹⁾が、最大応答発生時刻の累積塑性変形倍率を表すことは難しく、設計法の簡易化には向かないと考えられる。一方で、地震終了時刻のエネルギーは安定した量であり、累積塑性変形倍率は簡単に求まることから、設計に用いやすいと推察される。そこで本報では、地震終了時刻の累積塑性変形倍率に着目して、最大応答発生時刻の等価繰り返し数を表し、地震終了時刻の等価繰り返し数と比較した。

2. 等価繰り返し数の式の導出

制振構造は、弾性成分を表す柔要素と弾塑性成分を表す剛要素を組み合わせた柔剛混合構造の一つとされる。最大応答発生時刻 t_m と地震終了時刻 t_0 におけるエネルギーの釣合式は、それぞれ次式のように表される。

$${}_fW_e(t_m) + {}_sW_e(t_m) + {}_sW_p(t_m) = E_D(t_m) \tag{1}$$

$${}_sW_p(t_0) = E_D(t_0) \tag{2}$$

ここで、 ${}_fW_e(t)$: 時刻 t における柔要素の弾性振動エネルギー、 ${}_sW_e(t)$: 時刻 t における剛要素の弾性振動エネルギー、 ${}_sW_p(t)$: 時刻 t における剛要素の累積塑性ひずみエネルギー、 $E_D(t)$: 時刻 t における損傷に寄与する入力エネルギーである。 ${}_fW_e(t_m)$ 、 ${}_sW_e(t_m)$ 、 ${}_sW_p(t_m)$ は、それぞれ次式のように表される。

$${}_fW_e(t_m) = \frac{1}{2} {}_fQ_{\max} \delta_{\max} \tag{3}$$

$${}_sW_e(t_m) = \frac{1}{2} {}_sQ_y \delta_y \tag{4}$$

$${}_sW_p(t_m) = 4 {}_sQ_y (\delta_{\max} - \delta_y) \cdot n(t_m) \tag{5}$$

ここで、 ${}_fQ_{\max}$: 柔要素の最大耐力、 δ_{\max} : 最大塑性変形、 ${}_sQ_y$: 剛要素の降伏耐力、 δ_y : 降伏変位、 $n(t)$: 時刻 t における剛要素の等価繰り返し数である。損傷に寄与するエネルギーの速度換算値 V_D は、次式で表される。

$$V_D = \sqrt{\frac{2E_D(t_0)}{M}} \tag{6}$$

ここで、 M : 建物質量である。(2)式、(6)式より、地震終了時刻 t_0 における累積塑性変形倍率 ${}_s\eta(t_0)$ は次式で表される。

$${}_s\eta(t_0) = \frac{{}_sW_p(t_0)}{{}_sQ_y \delta_y} = \frac{E_D(t_0)}{{}_sQ_y \delta_y} = \frac{1}{2} \cdot \frac{MV_D^2}{{}_sQ_y \delta_y} \tag{7}$$

塑性化の程度の大きな構造骨組や免震・制振部材を付加した建物の場合、一般に $E_D(t_m) \leq E_D(t_0)$ となることから、(1)式では $E_D(t_m)$ を $E_D(t_0)$ に置き換えられる^{1), 2)}。 $E_D(t_m)$ を $E_D(t_0)$ に置き換え、(3) ~ (5)式を(1)式に代入すると、 $n(t_m)$ は次式のように近似される。

$$\begin{aligned} n(t_m) &= \frac{1}{4\bar{\mu}_m} \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot \frac{MV_D^2}{{}_sQ_y \delta_y} - \frac{{}_fQ_{\max} (\delta_{\max} - \delta_y) + {}_fQ_{\max} \delta_y + {}_sQ_y \delta_y}{2 {}_sQ_y \delta_y} \right) \\ &= \frac{1}{4\bar{\mu}_m} \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot \frac{MV_D^2}{{}_sQ_y \delta_y} - \frac{r_q \bar{\mu}_m + r_q + 1}{2} \right) \\ &= \frac{{}_s\eta(t_0)}{4\bar{\mu}_m} \cdot \left(1 - \frac{r_q \bar{\mu}_m + r_q + 1}{2 {}_s\eta(t_0)} \right) \end{aligned} \tag{8}$$

ここで、平均塑性変形倍率 $\bar{\mu}_m$ 、せん断力比 r_q は、それぞれ次式で表される。

$$\bar{\mu}_m = \frac{\mu_m^+ + \mu_m^-}{2} = \frac{1}{2} \cdot \frac{(\delta_{\max}^+ - \delta_y) + (\delta_{\max}^- - \delta_y)}{\delta_y} \tag{9}$$

$$r_q = \frac{{}_fQ_{\max}}{{}_sQ_y} = \frac{k_f}{k_s} (\bar{\mu}_m + 1) \tag{10}$$

ここで、 k_f : 柔要素の剛性、 k_s : 剛要素の剛性、 μ_m^+ : 正負の荷重領域の塑性変形倍率、 δ_{\max}^+ : 正負方向の最大塑性変形であり、 k_f/k_s を剛性比と呼ぶ。(8)式において $n(t_m)$ は正の値であることから、 r_q の範囲は次式の通りである。

$$0 \leq r_q < \frac{2 {}_s\eta(t_0) - 1}{\bar{\mu}_m + 1} \tag{11}$$

一方で、(5)式は t_0 においても成り立つため、(2)式と(5)式から $n(t_0)$ は、次式のように表される。

$$n(t_0) = \frac{{}_s\eta(t_0)}{4\bar{\mu}_m} \tag{12}$$

${}_sW_p$ が支配的で ${}_fW_e$ や ${}_sW_e$ が非常に小さい場合は、 $n(t_m)$ は(12)式に近似でき、一般的に、(12)式の値が用いられる。そこで、(8)式で表される $n(t_m)$ と(12)式で表される $n(t_0)$ を比較し、 $n(t_m)$ と $n(t_0)$ が異なる条件を検討する。 $n(t_0)$ に対する $n(t_m)$ の比率は、次式で表される。

$$n(t_m)/n(t_0) = 1 - \frac{r_q \bar{\mu}_m + r_q + 1}{2 {}_s\eta(t_0)} \tag{13}$$

(13)式より、 ${}_s\eta(t_0)$ が大きいほど 1 に収束することがわかる。 ${}_s\eta(t_0)$ が小さい範囲では、 $\bar{\mu}_m$ が大きいほど、または r_q が大きくなるほど比率が小さくなり、 $n(t_m)$ に対して $n(t_0)$ は大きくなる。以上より、 ${}_s\eta(t_0)$ が小さい範囲において、 $n(t_0)$ は過大に評

価していると考えられる。また、(10)式より(13)式は剛性比を用いて、次式のように書き換えられる。

$$n(t_m)/n(t_0) = 1 - \frac{\frac{k_f}{k_s}(\bar{\mu}_m + 1)^2 + 1}{2_s \eta(t_0)} \quad (14)$$

k_f が一定のとき、 k_s が小さいほど剛性比は大きくなる。(14)式より剛性比が大きいほど、 $n(t_0)$ に対する $n(t_m)$ の比率が小さくなる。 $s\eta$ が小さい範囲では、 $\bar{\mu}_m$ と剛性比の影響が大きいと考えられる。

3. 数値解析による検証

3.1 解析モデルと検討対象地震動

1 質点弾塑性応答解析を用いて、(14)式の値と解析値の整合性を検討する。解析モデルは柔剛混合構造を想定し、復元力特性をバイリニア型とする。初期剛性 k_1 、二次剛性 k_2 、および k_f は、それぞれ次式のように設定する。

$$k_1 = k_f + k_s, \quad k_2 = \rho k_1 (= k_f) \quad (15a, b)$$

$$k_f = \frac{4\pi^2 M}{T_f^2} \quad (16)$$

ここで、 ρ : 二次剛性比、 T_f : 架構周期である。(15)式、(16)式より、剛性比は次式のように表される。

$$\frac{k_f}{k_s} = \frac{\rho}{1-\rho} \quad (17)$$

塑性率 μ は、次式のように表される。

$$\mu = \frac{\delta_{max}}{\delta_y} = \bar{\mu}_m + 1 \quad (18)$$

入力地震動に対して、塑性率が指定の値になるように降伏耐力 Q_y を調整して時刻歴解析を行う。 M を 1000 ton、減衰定数 h を 2 %、 T_f は 1-10 秒とし、0.1 秒刻みで応答解析を行う。 $\rho = 0.1, 0.4, 0.6$ とし、以降は塑性率をパラメータとして、 $\mu = 2, 3, 5$ で検討を行う。

検討対象地震動は 1940 年 Imperial Valley 地震 El Centro 記録 NS 成分 (以降、El Centro)、1995 年兵庫県南部地震の観測記

録である JMA KOBENS 成分 (以降、JMA KOB E)、2011 年東北地方太平洋沖地震の観測記録である IWTH24 金ヶ崎 EW 成分 (以降、IWTH24 EW)、MYG005 鳴子 NS 成分 (以降、MYG005 NS) を採用する。また、全てのパラメータで塑性化させるため、入力地震加速度を 3 倍して入力した。

3.2 時刻歴解析結果との比較

図 1 に(a) $\rho = 0.1$ 、(b) $\rho = 0.4$ 、(c) $\rho = 0.6$ のときの等価繰り返し数の比率を示す。解析結果は、解析によって得た $s\eta(t_0)$ を用いて計算した $n(t_m)$ と $n(t_0)$ の比率を示す。解析結果は概ね(14)式と一致することが確認できる。(a) $k_f/k_s = 1/9$ のとき、比率は概ね 1 に収束することが確認できる。一方で(c) $k_f/k_s = 1.5$ のときは $n(t_m)$ と $n(t_0)$ の比率が小さくなり、特に $n(t_0) = 1 \sim 2$ の範囲で、 $n(t_m)$ は $n(t_0)$ の 20 ~ 60 % 程度となることが確認できる。したがって、剛性比が大きいほど $n(t_0)$ は過大評価であると考えられる。入力地震動によるばらつきは確認できず、塑性率の影響も小さいことから、等価繰り返し数は剛性比に最も影響されると推察される。

4. まとめ

地震終了時刻の累積塑性変形倍率を用いて、最大応答発生時刻の等価繰り返し数を表し、地震終了時刻の等価繰り返し数と比較した。その結果、等価繰り返し数が 1 ~ 2 の範囲では、剛性比が 1.5 のときに、最大応答発生時刻の等価繰り返し数は地震終了時刻の等価繰り返し数の 20 ~ 60 % 程度であることを確認した。剛性比が大きいほど地震終了時刻の等価繰り返し数は過大評価であると考えられる。今後は、 $E_D(t_m)$ と $E_D(t_0)$ が大きく異なる場合の検討を行う予定である。

謝辞

本研究は、清水建設 (株)、(株) 大崎総合研究所、(株) 日建設計、東京工業大学 佐藤研究室、東京理科大学 北村研究室による研究会の成果の一部をまとめたものです。また本報では、防災科学技術研究所の K-NET、KiK-net 強震記録を使用致しました。ここに記して感謝の意を表します。

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, 1999.11
- 2) 北村春幸, 財津和廉, 馬谷原伴恵 : 主架構の塑性化を考慮した制振構造物のエネルギーの釣合に基づく応答評価法, 日本建築学会構造系論文集, 第 599 号, pp.71-78, 2006.1

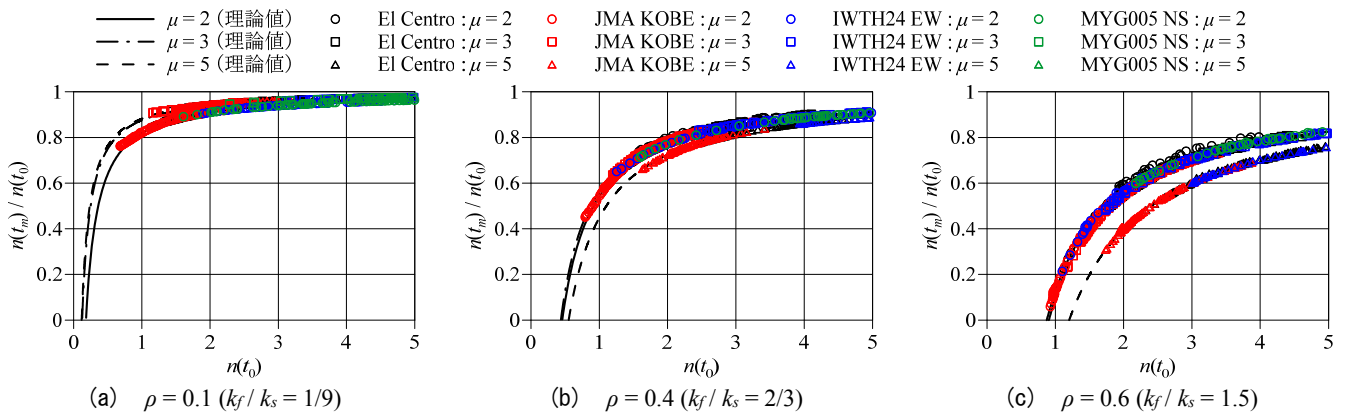


図 1 $n(t_m)$ と $n(t_0)$ の比率

*1 東京理科大学 *2 東京工業大学

*3 清水建設株式会社 *4 株式会社大崎総合研究所

*1 Tokyo University of Science *2 Tokyo Institute of Technology

*3 Shimizu Corporation *4 Ohsaki Research Institute, Inc.