

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

論題(和文)	最大応答発生時刻に着目したエネルギーの釣合に基づく応答予測法
Title(English)	Energy-Balance Based Seismic Response Prediction Method Focusing on Maximum Response Occurrence Time
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, , pp. 37-38
Citation(English)	Summaries of technical papers of annual meeting, , pp. 37-38
発行日 / Pub. date	2018, 9
権利情報	一般社団法人 日本建築学会

## 最大応答発生時刻に着目したエネルギーの釣合に基づく応答予測法

等価繰り返し数	エネルギーの釣合	正会員	○成田冨子*1	同	佐藤大樹*2	同	小穴温子*3
下限値	最大応答発生時刻	正会員	北村春幸*4	同	松田頼征*4	同	佐藤俊明*5
		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、構造物の最大応答値とともに、疲労損傷に代表される累積応答値の評価が求められている。累積応答値はエネルギーの釣合に基づく応答評価法<sup>(例えば1)</sup>(以降、エネルギー法と呼ぶ)により評価が可能で、建物の最大応答値は等価繰り返し数を用いて表される。しかし、最大応答発生時刻におけるエネルギー量は安定しないため、その時刻における等価繰り返し数を求めることが難しく、最大応答値を予測する時にも、地震終了時刻の等価繰り返し数を用いて評価している<sup>2)</sup>。また、等価繰り返し数の評価値は、入力地震動や構造物の特性によってばらつきが生じることから、応答評価にはその下限値が用いられてきた。既報<sup>3)</sup>では、エネルギー法の精度向上を目指し、最大応答発生時刻の等価繰り返し数を地震終了時刻の等価繰り返し数から算出する手法を提案した。本報では、提案した等価繰り返し数を適用したエネルギーの釣合に基づく最大応答予測式を導出し、予測式の精度を従来法と比較するとともに、等価繰り返し数の下限値を用いることの位置づけを確認する。

## 2. 等価繰り返し数の既往式と提案式の比較

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合せた柔剛混合構造の一つとされる。累積塑性ひずみエネルギーの釣合式から、時刻  $t$  における剛要素の等価繰り返し数  $s_n(t)$  は、時刻  $t$  における累積塑性変形倍率  $s\eta(t)$  と平均塑性変形倍率  $\bar{\mu}_m$  を用いて、次式で定義される。

$$s_n(t) = \frac{s\eta(t)}{4\bar{\mu}_m} \quad (1)$$

また、塑性化の程度が大きい構造骨組や免震・制振部材を付加した建物の場合、一般に、最大応答発生時刻  $t_m$  における損傷に寄与する入力エネルギー  $E_D(t_m)$  は、地震終了時刻  $t_0$  における損傷に寄与する入力エネルギー  $E_D(t_0)$  以下となることから、 $E_D(t_m)$  を  $E_D(t_0)$  に置き換えて用いられる。既報<sup>3)</sup>では、 $E_D(t_m)$  を  $E_D(t_0)$  に置き換えたエネルギーの釣合式から、最大応答発生時刻の剛要素の等価繰り返し数  $s_n^*(t_m)$  を次式で表した。

$$s_n^*(t_m) = \frac{s\eta(t_0)}{4\bar{\mu}_m} \cdot \left(1 - \frac{r_q \bar{\mu}_m + r_q + 1}{2s\eta(t_0)}\right) \quad (2)$$

ここで、 $r_q$  : せん断力比であり、 $r_q$  は次式で定義される。

$$r_q = \frac{fQ_{\max}}{sQ_y} = \frac{k_f}{k_s} (\bar{\mu}_m + 1) \quad (3)$$

ここで、 $fQ_{\max}$  : 柔要素の最大耐力、 $sQ_y$  : 剛要素の降伏耐力、 $k_f$  : 柔要素の剛性、 $k_s$  : 剛要素の剛性である。 $s_n^*(t_m)$  は正の値であることから、(2)式における  $r_q$  の範囲は次式の通りである。

$$0 \leq r_q < \frac{2s\eta(t_0) - 1}{\bar{\mu}_m + 1} \quad (4)$$

## 3. エネルギーの釣合に基づいた最大応答予測式の導出

柔剛混合構造を想定した制振構造の最大応答発生時刻  $t_m$  におけるエネルギーの釣合式は、次式のように表される。

$${}_fW_e(t_m) + {}_sW_e(t_m) + W_p(t_m) = E_D(t_m) \quad (5)$$

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である。柔要素の最大せん断力係数  $f\alpha$ 、剛要素の降伏せん断力係数  $s\alpha_y$  を、それぞれ次式で定義する。

$$f\alpha = \frac{fQ_{\max}}{Mg}, \quad s\alpha_y = \frac{sQ_y}{Mg} \quad (6a, b)$$

ここで、 $M$  : 建物質量、 $g$  : 重力加速度である。基準となる応答量として、柔要素のみのせん断力係数  $\alpha_0$ 、最大変形  $\delta_0$ 、架構周期  $T_f$  を次式で定義する。

$$\alpha_0 = \frac{2\pi V_D}{T_f g}, \quad \delta_0 = \frac{T_f V_D}{2\pi}, \quad T_f = 2\pi \sqrt{\frac{M}{k_f}} \quad (7a, b, c)$$

ここで、 $V_D$  : 損傷に寄与するエネルギーの速度換算値であり、 $V_D$  は次式で表される。

$$V_D = \sqrt{\frac{2E_D(t_0)}{M}} \quad (8)$$

剛性比  $k_f/k_s$  を  $\beta$  と置き、 ${}_fW_e(t_m)$ 、 ${}_sW_e(t_m)$ 、 ${}_sW_p(t_m)$  は、それぞれ次式で表される。

$${}_fW_e(t_m) = \left(\frac{f\alpha}{\alpha_0}\right)^2 \cdot \frac{MV_D^2}{2} \quad (9)$$

$${}_sW_e(t_m) = \beta \left(\frac{s\alpha_y}{\alpha_0}\right)^2 \cdot \frac{MV_D^2}{2} \quad (10)$$

$${}_sW_p(t_m) = 8s_n^*(t_m) \left(\frac{s\alpha_y}{\alpha_0}\right) \left(\frac{f\alpha}{\alpha_0}\right) \cdot \frac{MV_D^2}{2} - 8\beta s_n^*(t_m) \left(\frac{s\alpha_y}{\alpha_0}\right)^2 \cdot \frac{MV_D^2}{2} \quad (11)$$

$E_D(t_m)$  を  $E_D(t_0)$  に置き換え、(9)~(11)式を(5)式に代入すると、次式が得られる。

$$\left(\frac{f\alpha}{\alpha_0}\right)^2 + \beta \left(\frac{s\alpha_y}{\alpha_0}\right)^2 + 8s_n^*(t_m) \left(\frac{s\alpha_y}{\alpha_0}\right) \left(\frac{f\alpha}{\alpha_0}\right) - 8\beta s_n^*(t_m) \left(\frac{s\alpha_y}{\alpha_0}\right)^2 = 1 \quad (12)$$

最大変形  $\delta_{\max}$  は次式で表される。

$$\left(\frac{\delta_{\max}}{\delta_0}\right) = \frac{f \alpha M g \cdot T_f^2}{4\pi^2 M} \cdot \frac{2\pi}{T_f V_D} = \left(\frac{f \alpha}{\alpha_0}\right) \quad (13)$$

(12)式を $(f \alpha / \alpha_0)$ について解き、(13)式に代入することで $\delta_{\max}$ は次式のように求まる。

$$\left(\frac{\delta_{\max}}{\delta_0}\right) = -4_s n^*(t_m) \left(\frac{s \alpha_y}{\alpha_0}\right) + \sqrt{\{16_s n^*(t_m)^2 + 8_s n^*(t_m) \beta - \beta\} \left(\frac{s \alpha_y}{\alpha_0}\right)^2} + 1 \quad (14)$$

一方で、従来のエネルギーの釣合に基づく応答予測式<sup>4)</sup>は、次式で表される。

$$\left(\frac{\delta_{\max}}{\delta_0}\right) = -4_s n(t_0) \left(\frac{s \alpha_y}{\alpha_0}\right) + \sqrt{16_s n(t_0)^2 \left(\frac{s \alpha_y}{\alpha_0}\right)^2} + 1 \quad (15)$$

(15)式を従来法と呼び、以降は(14)式と(15)式を比較し、最大応答値の予測に $s n^*(t_m)$ を用いることの妥当性を検討する。

#### 4. 最大応答予測式における等価繰り返し数の検討

##### 4.1 解析条件

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 $k_2$ 、剛要素の降伏耐力 $s Q_y$ は次式で表す。

$$k_1 = k_f + k_s, \quad k_2 = \rho k_1 \quad (16a, b)$$

$$s Q_y = s \alpha_y M g \quad (17)$$

ここで、 $\rho$ ：二次剛性比である。解析パラメータは、 $M$ を1000 ton、 $T_f$ を1秒、減衰定数 $h$ を2%、 $\beta$ を1.0、 $s \alpha_y$ を0.05, 0.10, 0.15, 0.20, 0.25, 0.30とする。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 KOBE NS成分(以降、JMA KOBE)、2003年十勝沖地震の観測記録である

HKD066 標津 NS成分(以降、HKD066 NS)を採用する。

##### 4.2 最大応答予測式の精度の検証

表1に応答解析で求めた等価繰り返し数の一覧を示す。表1より、 $s n^*(t_m)$ は $s n(t_0)$ よりも小さいことが確認できる。特にJMA KOBEの $s \alpha_y = 0.05$ の $s n^*(t_m)$ は、 $s n(t_0)$ の20%程度であることが確認できる。これは、 $s W_p$ に対して $s W_e$ が大きいからだと考えられる。 $s n^*(t_m)$ は、地震動や $s \alpha_y$ によってエネルギー吸収量が異なるため、値にばらつきが生じる。図1に各地震動の $(\delta_{\max} / \delta_0)$ の解析値と予測値の関係を示す。図1より、地震動によらず、(14)式の予測値は、解析値と一致することが確認できる。 $s n^*(t_m)$ が2より小さいパラメータでは、従来法で $s n(t_0) = 2$ を用いても危険側の評価となることが確認できる。従来法では、 $s n(t_0)$ を用いた予測値は解析値より小さいことから、危険側の評価となる。下限値である $s n(t_0) = 2$ を用いても、 $s n^*(t_m)$ が2より小さい値があり、危険側の評価となるため、(14)式で最大応答値を予測することが妥当であるといえる。

##### 5. まとめ

既報<sup>3)</sup>で提案した最大応答発生時刻の等価繰り返し数を適用し、エネルギーの釣合に基づいて最大応答予測式を導出し、予測式の精度を従来法と比較した。その結果、 $s n^*(t_m)$ を用いた予測式は解析値と一致することが確認できた。等価繰り返し数の下限値である2を用いても、 $s n^*(t_m)$ が2より小さい値があり、危険側の評価となるため、(14)式で最大応答値を予測することが妥当であるといえる。

##### 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、東京理科大学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
- 3) 成田淳子、佐藤大樹、小穴温子、北村春幸、松田頼征、佐藤俊明、壇一男：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、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.149-150、2017.8
- 4) 東野さやか、北村春幸：粘性ダンパーを付与した免震構造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588号、pp.79-86、2005.2

表1 等価繰り返し数の一覧

$s \alpha_y$	$s n^*(t_m)$						$s n(t_0)$					
	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30
El Centro	4.4	3.5	1.9	1.3	0.8	—	5.4	4.1	2.6	2.1	1.9	1.6
JMA KOBE	0.8	1.6	1.8	1.8	1.8	1.8	4.3	3.2	2.9	2.6	2.5	2.5
HKD066 NS	5.5	4.2	2.7	1.9	1.4	1.0	6.7	4.9	3.3	2.5	2.1	1.7

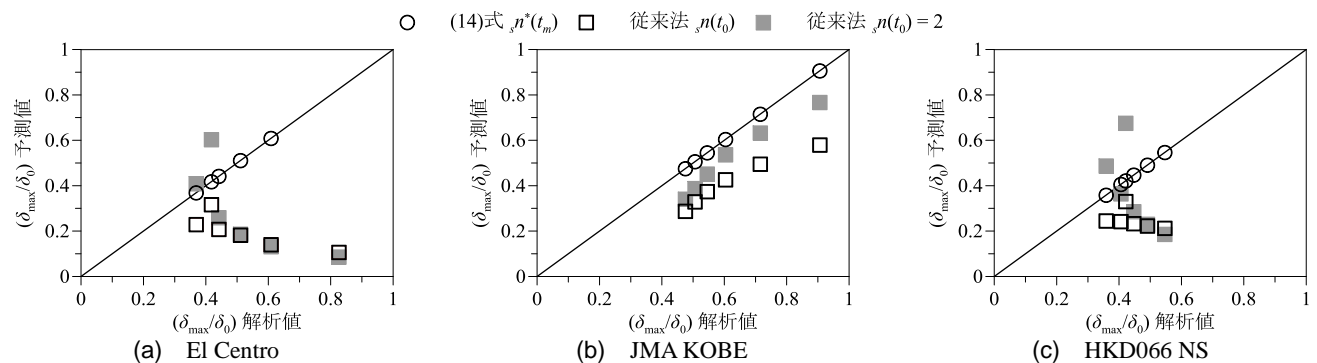


図1  $(\delta_{\max} / \delta_0)$ の解析値と予測値の関係

\*1 清水建設(株) (元 東京理科大学) \*2 東京工業大学 \*3 Shimizu Corporation (formerly Tokyo University of Science)  
 \*4 清水建設(株) \*5 東京理科大学 \*6 (株)大崎総合研究所 \*7 Tokyo Institute of Technology \*8 Shimizu Corporation  
 \*9 Tokyo University of Science \*10 Ohsaki Research Institute, Inc.