

# 論文 鋼材系制振ブレースを設置した曲げ破壊型 RC 造建物のエネルギーの釣合に基づく地震応答予測

落合 徹<sup>\*1</sup>・藤井 賢志<sup>\*2</sup>・北村 春幸<sup>\*3</sup>

**要旨**：現在までに制振補強された RC 造建物の応答を予測する手法は数多く提案されているが、鋼材系制振部材を用いる場合には繰り返し载荷による耐力上昇が顕著であるため、これを考慮して骨組の最大応答変形に加えて制振ブレースの累積塑性ひずみエネルギーを評価する必要がある。そこで本論文では、エネルギーの釣合に基づく曲げ破壊型 RC 造建物に鋼材系制振ブレースを付加した場合の応答予測式を提案した。検討の結果、RC 躯体と制振部材の等価繰り返し数を適切に設定することで精度良く予測できることを示した。

**キーワード**：RC 造建物, 鋼材系制振ブレース, 制振構造, エネルギーの釣合, 応答評価法

## 1. はじめに

近年では、鉄筋コンクリート造建物(以下, RC 造建物)の新築, 耐震補強共に制振部材を用いるケースが増えてきており, これまでも応答予測式は数多く提案されてきた<sup>1)</sup>。しかし, 鋼材系の制振部材を使用する場合, 骨組の最大応答変形に加えて制振部材の累積塑性ひずみエネルギーも評価する必要がある。加えて低降伏点鋼を用いる場合には繰り返し载荷による耐力上昇が顕著であるが, これを考慮した応答予測式は提案されていないのが現状である。そこで本論文では, 鋼材系制振部材を用いた低層 RC 造建物を対象として, エネルギーの釣合に基づく応答予測式を提案し, 次いで, 低降伏点鋼の繰り返しによる耐力上昇を考慮した復元力特性を用いた時刻歴応答解析により提案式の検討を行う。

## 2. エネルギーの釣合に基づく応答予測式

### 2.1 多層制振構造物のエネルギー配分の基本式

#### (1) エネルギーの釣合式

地震動発生からの時刻を  $t$  で表し, 最大応答発生時の時刻を  $t_m$ , 地震動継続時間を  $t_0$  と表す。すると,  $t=t_m$ ,  $t_0$  の時のエネルギーの釣合式はそれぞれ式(1), (2)で示される<sup>2),3)</sup>。

$${}_fW_e(t_m) + {}_fW_p(t_m) + {}_dW_e(t_m) + {}_dW_p(t_m) = E_D(t_0) \quad (1)$$

$${}_fW_p(t_0) + {}_dW_p(t_0) = E_D(t_0) \quad (2)$$

ここで,  $W_e$  は弾性振動エネルギー,  $W_p$  は累積塑性ひずみエネルギー,  $E_D$  は総入力エネルギーから減衰によって吸収する分を差し引いた損傷に寄与するエネルギー入力を示す。

添字  $f$  は躯体(Frame),  $d$  はダンパー(Damper)を示している。一般に  $E_D(t_m) \leq E_D(t_0)$  となるため, 安全側の評価のため式(1)の右辺は  $t=t_0$  としている。式(2)においては, 時刻  $t_0$  では弾性振動エネルギーがゼロと見なせるため, 累積塑性ひずみエネルギーのみが残る。以降, 最大応答値を議論する時は式(1)を, 累積値を議論するときは式(2)を用いる。

#### (2) 各諸元の定義

RC 躯体と制振部材の復元力特性を図-1 に示す。 $i$  層の質量を  $m_i$ , RC 躯体の降伏点割線剛性を  $f_k y_i$ , 降伏せん断耐力を  $f_Q y_i$ , 又そのときの層間変位を  $f \delta_{yi}$  とする。構造物の最大層間変位を  $f \delta_{maxi}$  とする。制振部材の降伏せん断耐力は  $d Q_{yi}$ , 降伏層間変位は  $d \delta_{yi}$  とする。

また,  $i$  層の RC 躯体の降伏せん断力係数を  $f \alpha_{yi}$ , 制振部材の降伏せん断力係数を  $d \alpha_{yi}$  とし, 次式で定義する。

\*1 東京理科大学大学院生 理工学研究科建築学専攻 (正会員)

\*2 千葉工業大学助教 工学部建築都市環境学科 博士(工学) (正会員)

\*3 東京理科大学教授 理工学部建築学科 博士(工学)

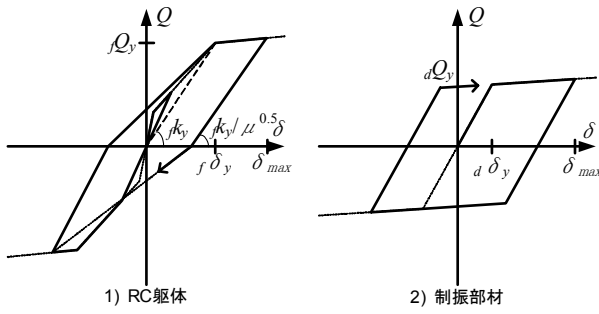


図-1 制振構造の復元力特性

$$f \alpha_{yi} = f Q_{yi} / \sum_{j=1}^N m_j g \quad (3)$$

$$d \alpha_{yi} = d Q_{yi} / \sum_{j=1}^N m_j g$$

ここで、 $g$  は重力加速度、 $m_i$  は  $i$  層の質量、 $N$  は建物層数を示す。更に、RC 躯体を 1 質点振動系に置換した場合の等価バネ定数  $k_{eq}$  を次式で定義する。

$$k_{eq} = 4\pi^2 M / T_f^2 \quad (4)$$

ここで、 $M$  は建物総質量、 $T_f$  は 1 次固有周期を示す。

等価バネ定数  $k_{eq}$  を  $i$  層の RC 躯体の降伏点割線剛性  $k_{yi}$  で除した値  $\kappa_i$  を次式で定義する。

$$\kappa_i = k_{eq} / f k_{yi} \quad (5)$$

また、無補強時のせん断力係数  $f \alpha_0$  と変位  $f \delta_0$  を損傷に寄与するエネルギー入力  $V_D$  の速度換算値と 1 次固有周期  $T_f$  を用いて下式で定義する。

$$f \alpha_0 = 2\pi \cdot V_D / T_f \cdot g$$

$$f \delta_0 = T_f \cdot V_D / 2\pi \quad (6)$$

なお、1 次固有周期は制振ブレースの設置により短くなり  $V_D$  は減少する。しかし、この影響を無視することは安全側の評価になるため、本検討での  $V_D$  は補強前後で等しいものとする。

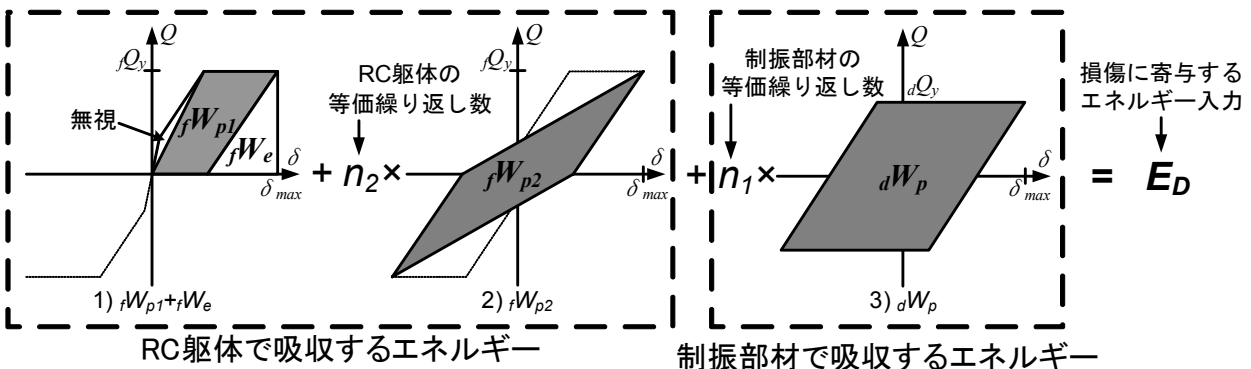


図-2 吸収エネルギーの概念図

更に、損傷分散係数  $\gamma_i$  は損傷に寄与するエネルギー入力  $E_D$  を各層に分配する比率を示しており次式で算出する<sup>4)</sup>。

$$s_i p_i^{-n} / \sum_{j=1}^N s_j p_j^{-n} = 1 / \gamma_i \quad (7)$$

ここで、 $p_i = ((f \alpha_{yi} + d \alpha_{yi}) / (f \alpha_{y1} + d \alpha_{y1})) / \bar{\alpha}_i$

$$s_i = \left( \sum_{j=1}^N \frac{m_j}{M} \right)^2 \cdot \bar{\alpha}_i \cdot \left( \frac{k_{y1}}{k_{yi}} \right)$$

$\bar{\alpha}_i$  : 最適降伏せん断力係数

$n$  : 損傷集中指数

損傷集中指数  $n$  については、各層への損傷の度合いを定めるもので、数値が大きくなればなるほど弱層への損傷集中が大きくなる。本論文では  $n$  の値を 6.0 と仮定した<sup>4)</sup>。

## 2.2 各エネルギーの算出式の導出

### (1) 各要素によるエネルギー吸収の概念

建物全体の吸収エネルギーの概念図を図-2 に示す。地震動終了時刻  $t=t_0$  における  $i$  層の RC 躯体で吸収する塑性ひずみエネルギーは  $f W_{p1}$  と  $f W_{p2}$  に等価繰返し数  $n_2$  を掛けたものの和で求められ、制振部材で吸収する塑性ひずみエネルギーは  $d W_{p1}$  に等価繰返し数  $n_1$  を掛けたものとする。なお、本論文においてはひび割れによって吸収するエネルギーは小さいと考えられるため無視する。最大応答発生時  $t=t_m$  における建物全体でのエネルギーを考える場合には、これに弾性ひずみエネルギー  $f W_e$  が加えたものとして表される。以下、各エネルギーを上述のパラメータを用いて定式化する。

### (2) $f W_e$ と $f W_{p1}$ の算出式

初めに最大応答発生時  $t=t_m$  での吸収したエネルギーを第 1 層に着目して考える。このとき弾

性振動エネルギー ${}_fW_e$ と塑性ひずみエネルギー ${}_fW_{pl}$ は別々に考えてそれぞれを算出するべきであるが、簡便に ${}_fW_e$ と ${}_fW_{pl}$ の和を式(8)で示す。

$${}_fW_e + {}_fW_{pl} = \gamma_1 \cdot \frac{MV_D^2}{2} \left\{ \frac{1}{\kappa_1} \left( \frac{{}_f\alpha_{y1}}{{}_f\alpha_0} \right)^2 + 2 \cdot \left( \frac{{}_f\alpha_{y1}}{{}_f\alpha_0} \right) \left( \frac{\delta_{\max 1} - {}_f\delta_{y1}}{{}_f\delta_0} \right) \right\} \quad (8)$$

次に、地震動終了時刻 $t=t_0$ での吸収エネルギーを算出する式を求める。このときは、弾性振動エネルギーがゼロと見なせるため、塑性ひずみエネルギー ${}_fW_{pl}$ のみで与えられると考えられる。式を求めると次式になる。

$${}_fW_{pl} = \gamma_1 \cdot {}_fQ_{y1} \left\{ \delta_{\max 1} - \frac{{}_f\delta_{y1}}{2} - \frac{\sqrt{\delta_{\max 1} {}_f\delta_{y1}}}{2} \right\} \quad (9)$$

### (3) ${}_fW_{p2}$ の算出式

続いて ${}_fW_{p2}$ の算出式を導出する。累積塑性ひずみエネルギー ${}_fW_{p2}$ は、第1層に着目して式(10)で表す(図-2-2)。

$${}_fW_{p2} = \gamma_1 \cdot 2n_2 {}_fQ_{y1} \left( \delta_{\max 1} - \sqrt{\delta_{\max 1} {}_f\delta_{y1}} \right) = \gamma_1 \cdot 4n_2 \frac{MV_D^2}{2} \left( \frac{{}_f\alpha_{y1}}{{}_f\alpha_0} \right) \left( \frac{\delta_{\max 1} - \sqrt{\delta_{\max 1} {}_f\delta_{y1}}}{{}_f\delta_0} \right) \quad (10)$$

### (4) ${}_dW_p$ の算出式

次に、制振部材が吸収するエネルギーを考える。制振部材は累積塑性ひずみエネルギーに比べて弾性ひずみエネルギーは非常に小さいため、本検討では無視して考える。よって、制振部材で吸収するエネルギーは ${}_dW_p$ のみとなり、第1層に着目すると次式で算出される。

$${}_dW_p = \gamma_1 \cdot 8n_1 \frac{MV_D^2}{2} \left( \frac{{}_d\alpha_{y1}}{{}_d\alpha_0} \right) \left( \frac{\delta_{\max 1} - {}_d\delta_{y1}}{{}_d\delta_0} \right) \quad (11)$$

また、式(11)を1層の制振部材の累積塑性変形倍率 ${}_d\eta_1$ を用いて表すと式(12)となる。この式は、制振部材の累積値を予測するときに使用する。

$${}_dW_p = \gamma_1 \cdot {}_d\eta_1 {}_dQ_{y1} {}_d\delta_{y1} \quad (12)$$

## 2.3 応答予測式の導出

### (1) 最大応答予測式

ここでは、2.1~2.2で求めた各要素が吸収するエネルギーの算出式を基に最大応答値の予測式を導出する。これは、式(1)最大応答発生時 $t=t_m$ で

のエネルギーの釣合式を基にする。式(1)に式(8)、(10)、(11)を代入して整理すると式(13)を得る。

$$\gamma_1 \left\{ \frac{1}{\kappa_1} \left( \frac{{}_f\alpha_{y1}}{{}_f\alpha_0} \right)^2 + 2 \left( \frac{{}_f\alpha_{y1}}{{}_f\alpha_0} \right) \left( \frac{\delta_{\max 1} - {}_f\delta_{y1}}{{}_f\delta_0} \right) \right\} + \gamma_1 \cdot 4n_2 \left( \frac{{}_f\alpha_{y1}}{{}_f\alpha_0} \right) \left( \frac{\delta_{\max 1} - \sqrt{\delta_{\max 1} {}_f\delta_{y1}}}{{}_f\delta_0} \right) + \gamma_1 \cdot 8n_1 \left( \frac{{}_d\alpha_{y1}}{{}_d\alpha_0} \right) \left( \frac{\delta_{\max 1} - {}_d\delta_{y1}}{{}_d\delta_0} \right) = 1 \quad (13)$$

式(13)により、RC 躯体、制振部材、入力 of 各諸元が与えられたときの最大応答値 $\delta_{\max 1}$ を予測することが可能となる。

### (2) 制振部材の累積塑性変形倍率の予測式

次に、制振部材の累積塑性変形倍率 ${}_d\eta_1$ を予測する式を導出する。これは、式(2)の地震動終了時刻 $t=t_0$ での釣合式に式(9)、(10)、(12)を代入して求める。

$$\gamma_1 {}_fQ_{y1} \left\{ \delta_{\max 1} - \frac{{}_f\delta_{y1}}{2} - \frac{\sqrt{\delta_{\max 1} {}_f\delta_{y1}}}{2} \right\} + \gamma_1 \cdot 2n_2 {}_fQ_{y1} \left( \delta_{\max 1} - \sqrt{\delta_{\max 1} {}_f\delta_{y1}} \right) + \gamma_1 {}_d\eta_1 {}_dQ_{y1} {}_d\delta_{y1} = E_D \quad (14)$$

ここで、式(14)を ${}_d\eta_1$ で解くと次式を得る。

$${}_d\eta_1 = \frac{E_D - {}_fW_{p11} - {}_fW_{p21}}{\gamma_1 {}_dQ_{y1} {}_d\delta_{y1}} \quad (15)$$

ここでは式表示の簡略化のために ${}_fW_{p11}$ と ${}_fW_{p21}$ を用いている。これらは1層のRC 躯体が吸収する累積塑性ひずみエネルギーである。式(15)により、制振部材の累積値を予測することが可能となる。以降、本章で導出した予測式の妥当性を数値解析結果と照らし合わせて示していく。

## 3. 解析諸元

### 3.1 解析建物のモデル化

#### (1) 解析対象建物

解析対象建物は、図-3に示す矩形平面を有する3層純ラーメン建物である。全構面の軸組は図-4のようになっており、階高は1層が3.85(m)で2、3層は3.6(m)である。各階の単位面積当たりの慣性質量を1.2(ton/m<sup>2</sup>)とし、使用コンクリートは $F_c=21(\text{N/mm}^2)$ 、鉄筋の降伏強度は $\sigma_y=379.5(\text{N/mm}^2)$ である。部材断面は柱 600×600、

梁 400×800, 基礎梁 500×1300 とする。また, 降伏機構が構面 A,D では柱崩壊型, 構面 B,C では梁崩壊型となるように部材耐力を設定した。ブレース設置前の弾性 1 次固有周期は 0.329(sec) である。

### (2) 制振部材

制振部材は制振ブレースを使用し, 桁行き方向に図-5 のように設置する。また, ブレースには低降伏点鋼(LYP100)を使用し, 低降伏点鋼特有の繰返し载荷による耐力上昇を考慮した I-K モデル(図-6)<sup>5)</sup>と耐力上昇を無視した Normal-Bilinear モデルの 2 つを仮定した。I-K モデルのパラメータは  $\alpha_I=0.01$ ,  $\beta=0.90$  とした。

パラメータは第 1 層における制振ブレースの降伏せん断力係数  $\alpha_{yl}$  とし, 0.05, 0.10, 0.15, 0.20 の値を用いる。尚, 2, 3 層の降伏せん断力係数は  $A_i$  分布に比例させて求めた。

### (3) 解析建物のモデル化

解析は, 平面フレーム解析により行うものとし, 桁行き方向のみ検討する。解析建物は構面 A と構面 D, 構面 B と構面 C が同一であるため, 構面 A, B のみを解析対象とする。各部材は矩形部分の図心を通る線材でモデル化し, 剛域はフェイス位置までとする。梁部材は曲げ変形およびせん断変形を, 柱部材は曲げ変形・せん断変形に加えて軸方向変形を考慮する。梁および柱はせん断バネの付いた材端バネモデルでモデル化し, せん断バネは弾性とし, 曲げバネの復元力特性は図-1-1) の形とする。

### 3.2 入力地震動

入力地震動は, 表-2 に示す模擬地震動とする。図-7 に総入力エネルギースペクトル( $h=0.10$ )と加速度応答スペクトル( $h=0.05$ )を示す。模擬地震動は表-2 に示す観測波の位相特性を用いて, 式(17)に示す  $V_E$  スペクトルに適合するように作成した。

$$V_E(T) = \begin{cases} 2.78T & (T \leq 0.864s) \\ 2.4 & (T > 0.864s) \end{cases} \quad (16)$$

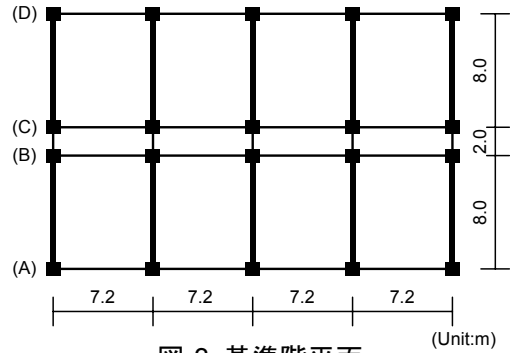


図-3 基準階平面

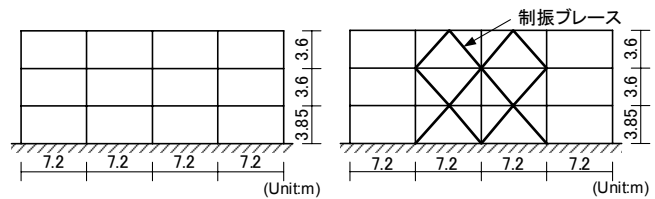


図-4 軸組図

図-5 制振ブレース付構面の軸組図

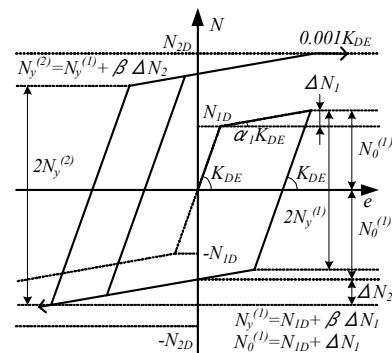


図-6 I-K モデルの復元力特性

表-2 入力地震動一覧

地震動ID	位相特性	最大加速度 (m/s <sup>2</sup> )	最大速度 (m/s)	継続時間 (sec)
ELC	El Centro 1940NS	4.550	0.876	60.0
HAC	Hachinohe 1968EW	3.965	0.842	
JKB	JMA Kobe 1995NS	6.892	1.604	
NTT	NTT Kobe 1995NS	5.492	1.102	
TAF	Taft 1952NS	4.281	1.208	
TOH	Tohoku Univ. 1978NS	4.034	1.329	

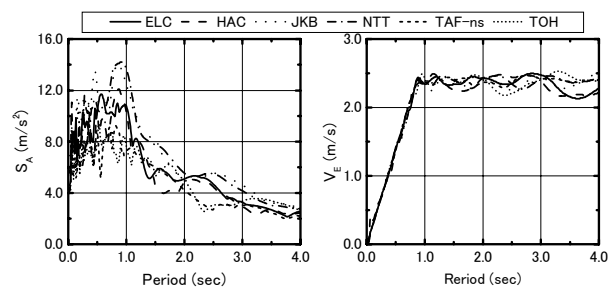


図-7  $S_A$  スペクトルと  $V_E$  スペクトル

## 4. 解析結果

### 4.1 RC 躯体の等価繰り返し数 $n_2$

RC 躯体の等価繰り返し数  $n_2$  は式(17)から求める。その時に必要となるひび割れせん断力  $Q_c$ 、ひび割れ変位  $\delta_c$ 、降伏せん断力  $f_y Q_y$ 、降伏変位  $f_y \delta_y$  は Pushover 解析から得られた履歴曲線を近似する 3 折れ線に置換した時に得られる第 2 折れ点の値とする。

$$n_2 = (f_y W_{pi} - f_y W_{pli}) / f_y W_{p2i} \quad (17)$$

ここで、 $f_y W_{pi}$  は  $i$  層の RC 躯体で吸収した累積塑性ひずみエネルギーである。

図-8 に、横軸に層間変形角を取ったときの RC 躯体の等価繰り返し数  $n_2$  の分布を示す。図-8 より、無補強時には  $n_2$  の値は層間変形角の増大とともに低下する傾向があるものの、下限値として 2.0 を取ることができると考えられる。一方で、制振ブレースを設置した場合には  $n_2$  の値は全般的に小さくなり、 $n_2$  の下限値は 1.0 程度となっている。これは、制振ブレースの設置により RC 躯体の吸収するエネルギーが小さくなっているものと解釈できる。

### 4.2 制振部材の等価繰り返し数 $n_1$

次に、制振ブレースの等価繰り返し数  $n_1$  の値を算出する。 $n_1$  の算出は式(18)による。

$$n_1 = {}_d W_{pk} / \{ {}_d Q_{yk} (\delta_{\max k} - {}_d \delta_{yk}) \} \quad (18)$$

ここで、 ${}_d W_{pk}$  は  $k$  個目の制振ブレースが吸収した累積塑性ひずみエネルギーである。

図-9 に縦軸を制振ブレースの等価繰り返し数  $n_1$ 、横軸に層間変形角をとった図を示す。□は耐力上昇を考慮しないモデル、△は耐力上昇を考慮したモデルである。図-9 より、全体的に制振ブレースが降伏した後、 $n_1$  は増大することがわかる。しかし、それは地震動の特性によって差があり、ELC, HAC, TAF, TOH では下限値に 2.0 を設定できるが、JKB や NTT などの直下型地震では短時間でエネルギーが入力するため下限値を 1.0 に設定することが妥当であると考えられる。更に、耐力上昇を考慮しないモデルと考慮したモデルとでは吸収したエネルギーに大差ないことが分かる。

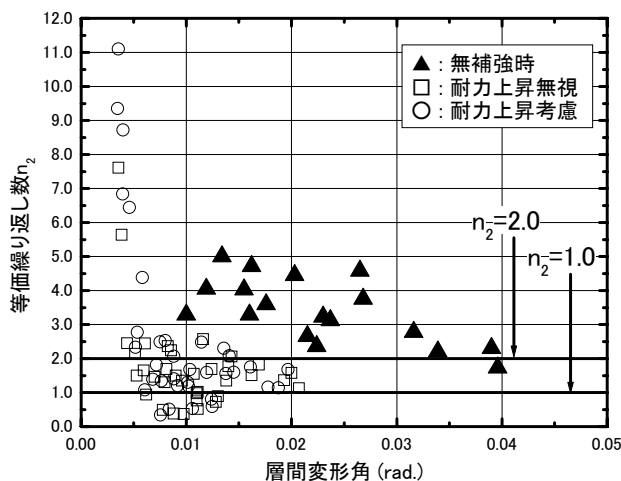


図-8 RC 躯体の等価繰り返し数

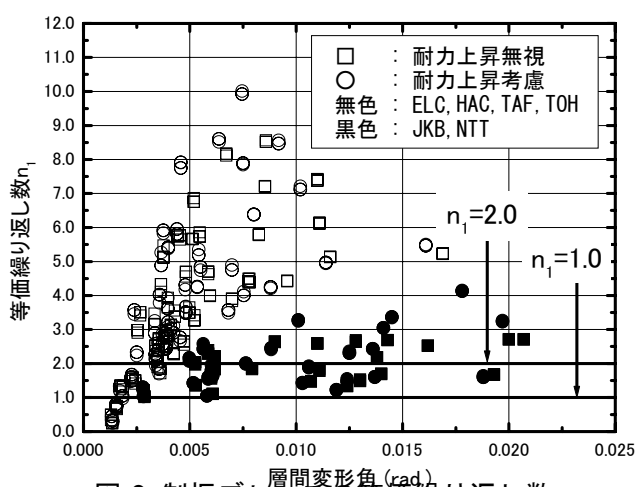


図-9 制振ブレースの等価繰り返し数

## 5. 予測式の検証とまとめ

### 5.1 応答予測式の検証

ここでは、2章で導出した応答予測式の妥当性を4章で示した解析結果を基に検証する。

#### (1) 最大応答値の予測式の検証

ここでは、最大応答値を予測する式(13)の検証を行う。架構の第1層の最大応答値を予測した値と解析より得られた値を比較した図を図-10に示す。ここで、予測に用いた RC 躯体の等価繰り返し数は無補強時で  $n_2=2.0$ 、補強時で  $n_2=1.0$  を用い、制振ブレースの等価繰り返し数は  $n_1=2.0$  を用いた。また、予測に用いた周期は、Pushover 解析によって得られた履歴曲線を 3 折れ線に置換したときの第 2 折れ点を降伏点とし、各層で同時に降伏すると考えたときの降伏点周期と、時刻歴応答解析の結果得られた最大変形時の周期を式(19)によって算出し、それらの平均値と仮

定した。

$$T = 2\pi\sqrt{\sum m_i d_i^2 / \sum p_i d_i} \quad (19)$$

ここで、 $d_i$ は*i*層の相対変位、 $p_i$ は*i*層の水平力を示す。

図-10より、全体的に予測値が解析値を上回っており、安全側の予測ができているものと考えられる。これは、予測に等価繰り返し数の下限値を用いて、構造体で吸収するエネルギーを少なく評価していることが原因と言える。しかし、全体的に傾向を良く捉えられているため、本予測式は妥当であると考えられる。

## (2) 累積値の予測式の検証

次に第1層の制振ブレースの累積値の予測式(15)の妥当性を検証する。縦軸を予測値、横軸を解析値にとった図を図-11に示す。予測する際に用いた最大変位は前項で予測した値を用いた。この図より予測値が解析値を上回る結果となった。これは、式(15)の導出において補強前と補強の入力エネルギーが等しいと考えていることに起因すると考えられる。全体的にブレース量が増えるに従って $\eta$ の値が小さくなっていく傾向が良く表現できており、更に安全側の評価であるため式(15)は妥当であると考えられる。

## 5.2 まとめ

本検討より得られた知見を以下に示す。

(1) エネルギーの釣合に基づくRC造建物復元力特性を考慮した最大応答値、制振部材の累積塑性変形倍率を予測する式を提案した。本論文で提案する式では、骨組み最大層間変形および制振ブレースの累積塑性変形倍率が安全側の評価となった。

(2) 制振ブレースの復元力特性として、繰り返し载荷による耐力上昇を考慮したモデルと無視したモデルとで比較した結果、本検討の限りエネルギー吸収量に関して両者に差が無いことが明らかとなった。

今後、本論文の検討結果に基づき、制振補強した曲げ破壊型のRC造建物の構造耐震指標の算出法を検討していく予定である。

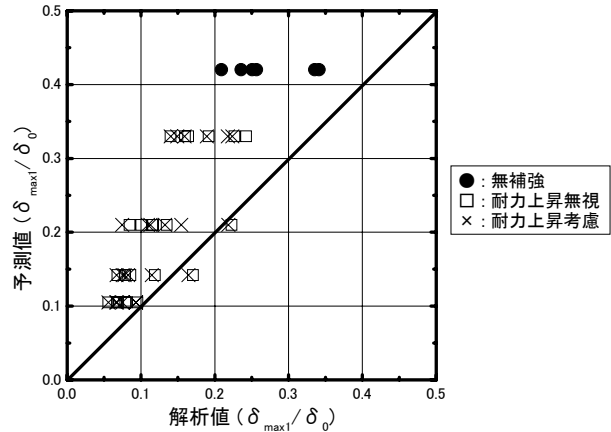


図-10 最大値に関する予測値と解析値の対応

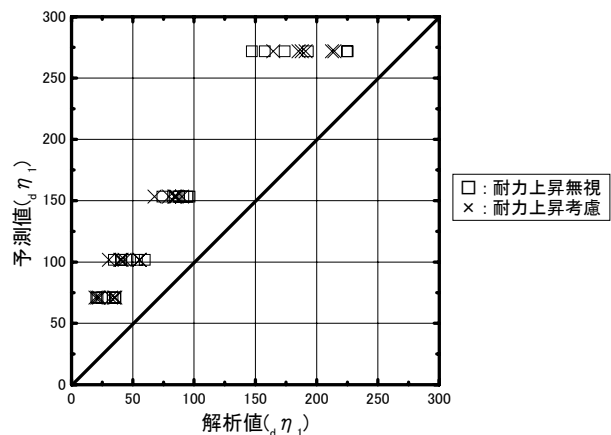


図-11 累積値に関する予測値と解析値の対応  
謝辞

本研究は、JFE シビル、JFE スチールと東京理科大学北村研究室の共同研究の成果を使用させて頂きました。関係者各位に厚く御礼申し上げます。

## 参考文献

- 1) コンクリート構造物の応答制御技術研究委員会 報告書・論文集, 日本コンクリート工学会, 2002.6
- 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, No.599, pp.71-78, 2006.1
- 3) 北村 春幸: 建築振動解析入門, 彰国社, 2002
- 4) 秋山 宏: エネルギーの釣合に基づく建築物の耐震設計, 技報堂出版, 1999
- 5) 山田 稔, 辻 文三: 鋼材の応力-歪関係に関する研究, 日本建築学会論文報告集, 第270号, pp.17-22, 1978.8