

# 論文 フーリエ級数を用いた鉄筋コンクリート造構造物に対する強震時の瞬間入力エネルギーの推定

藤井 賢志\*1

要旨：本論文では、著者がフーリエ級数を用いて定式化した瞬間入力エネルギーの経時関数を用いて、韌性のある鉄筋コンクリート造（RC造）建築物をモデル化した非線形1自由度系モデルに対する最大瞬間入力エネルギーと累積入力エネルギーの評価を試みた。検討の結果、非線形1自由度系モデルの最大瞬間入力エネルギーと累積入力エネルギーの速度換算値は、塑性率 $\mu=2.0$ での有効周期と粘性減衰定数0.1等を用いた等価線形1自由度系に対して経時関数を用いることで推定できることがわかった。加えて、非線形1自由度系モデルの瞬間入力エネルギーの時刻歴は、経時関数を用いる事で概要を推定できることがわかった。

キーワード：フーリエ級数，瞬間入力エネルギー，地震応答評価，経時関数，複素減衰

## 1. はじめに

鉄筋コンクリート造（以下RC造と表記）建築構造物の耐震設計において、最も重要な応答量の一つは最大変形である。一方で、地震時の繰り返し応答による累積吸収エネルギーも重要な応答量である。ここで、非線形応答での最大変形に深く関係する地震動の指標としては、中村・堀・井上の提唱する「最大瞬間入力エネルギー」<sup>1)</sup>が有用な指標である。一方、累積吸収エネルギーに関しては、秋山による「総入力エネルギー」<sup>2)</sup>が広く知られている。なお、「瞬間入力エネルギー」に関する研究としては、中村・壁谷澤による研究<sup>3)</sup>もある。

著者らは文献4)において、粘性減衰と複素減衰を有する線形1自由度系に対して有限フーリエ級数で表された地動加速度が入力するときの「瞬間入力エネルギーの経時関数」を定義し、これのフーリエ級数表現を導出して時刻歴応答解析によりその妥当性を検証した。ここで、文献4)で導出した瞬間入力エネルギーの経時関数は、線形1自由度系の動特性と地震動のフーリエ振幅・位相差分より定まる。一方で、フーリエ振幅・位相差分が等しい地震動「波形」は無数に存在するため、個々の地震動「波形」を用いた非線形応答解析による解は、地震動のフーリエ振幅・位相差分のみが与えられている場合には、その「特殊解」の1つに過ぎない。これに対し、文献4)の経時関数を用い、適切な有効周期と粘性・複素減衰定数を与えた等価線形系に基づく解は、地震動「波形」の個別性に由来する非線形応答解析による解の「ゆらぎ」の影響を排した、一般解の候補になると考えられる。これにより、入力地震動の経時特性の違いを考慮した非線形構造物の最大応答変形と累積吸収エネルギーの両者の推定が、一般性をもって行えると期待できる。

本論文では、文献4)にて定式化した瞬間入力エネルギーの経時関数を用いて、韌性のあるRC造建築物をモデ

ル化した非線形1自由度系モデルに対する最大瞬間入力エネルギーと総入力エネルギーの評価を試みる。

## 2. 入力エネルギーの経時関数

初めに2.1~2.4節では、粘性・複素減衰を有する等価線形1自由度系の瞬間入力エネルギーの経時関数の導出を、文献4)を要約して示す。次いで2.5節では、本論文で議論の対象とする最大瞬間入力エネルギーと総入力エネルギーの推定について述べる。なお、特に断りのない限り2.1~2.4節内の式の記号は、文献4)と同じである。

### 2.1 地動加速度のフーリエ級数

データ長 $t_d$ の地動加速度 $a_g(t)$ を考える。ここで、全時間での $a_g(t)$ の平均値が0とする。これのフーリエ級数は式(1)で表される。

$$a_g(t) = \sum_{n=-N}^N c_n \exp(i\omega_n t) \quad (1)$$

$$\omega_n = n\Delta\omega = n(2\pi/t_d), \omega_{-n} = -\omega_n = -n\Delta\omega \quad (2)$$

$$\begin{cases} c_n = \frac{1}{t_d} \int_0^{t_d} a_g(t) e^{-i\omega_n t} dt, c_{-n} = \frac{1}{t_d} \int_0^{t_d} a_g(t) e^{i\omega_n t} dt = \overline{c_n} \\ c_0 = \frac{1}{t_d} \int_0^{t_d} a_g(t) dt = 0 \end{cases} \quad (3)$$

ここで $c_n$ と $\omega_n$ はそれぞれ $n$ 番目の成分の複素フーリエ振幅と円振動数である。加えて式(3)の $c_{-n} = \overline{c_n}$ は、 $c_n$ が $c_n$ の複素共役であることを表す。次いで、式(1)の地動加速度 $a_g(t)$ の位相を $\pi/2$ だけシフトさせたもの考える。

$$\begin{aligned} a_g^*(t) &= \sum_{n=-N}^N c_n \exp\left[i\left\{\omega_n t - \text{sgn}(\omega_n) \frac{\pi}{2}\right\}\right] \\ &= -i \sum_{n=1}^N c_n \text{sgn}(\omega_n) \exp(i\omega_n t) \end{aligned} \quad (4)$$

$$\text{sgn}(\omega_n) = \begin{cases} 1 & \omega_n > 0 \\ -1 & \omega_n < 0 \end{cases} \quad (5)$$

\*1 千葉工業大学 創造工学部建築学科 教授 博(工) (正会員)

## 2.2 粘性減衰と複素減衰の並列する等価線形 1 自由度系

等価線形 1 自由度系の固有円振動数を  $\omega_e$ , 粘性減衰定数を  $h_e$ , 複素減衰定数を  $\beta_e$  で表す。式(1)の  $a_g(t)$  に対する運動方程式は式(6), 式(4)の  $a_g^*(t)$  に対する運動方程式は式(7)でそれぞれ表される。

$$\ddot{y} + 2h_e\omega_e\dot{y} + \{1 + 2\beta_e i \operatorname{sgn}(\omega)\}\omega_e^2 y = -a_g(t) \quad (6)$$

$$\ddot{y}^* + 2h_e\omega_e\dot{y}^* + \{1 + 2\beta_e i \operatorname{sgn}(\omega)\}\omega_e^2 y^* = -a_g^*(t) \quad (7)$$

式(6)の変位応答と速度応答は式(8), (9)で, 式(7)の変位応答と速度応答は式(10), (11)でそれぞれ表される。

$$y(t) = -\sum_{n=-N}^N c_n H_{CVD}(i\omega_n) \exp(i\omega_n t) \quad (8)$$

$$\dot{y}(t) = -\sum_{n=-N}^N c_n H_{CVV}(i\omega_n) \exp(i\omega_n t) \quad (9)$$

$$y^*(t) = -i \sum_{n=-N}^N c_n H_{CVD}(i\omega_n) \operatorname{sgn}(\omega_n) \exp(i\omega_n t) \quad (10)$$

$$\dot{y}^*(t) = -i \sum_{n=-N}^N c_n H_{CVV}(i\omega_n) \operatorname{sgn}(\omega_n) \exp(i\omega_n t) \quad (11)$$

ここで, 式(8)~(11)中の  $H_{CVD}(i\omega_n)$  と  $H_{CVV}(i\omega_n)$  は変位ならびに速度伝達関数であり, 式(12), (13)で表される。

$$H_{CVD}(i\omega_n) = \frac{1}{\omega_e^2 - \omega_n^2 + 2\omega_e \{h_e \omega_n + \beta_e \omega_e \operatorname{sgn}(\omega_n)\}i} \quad (12)$$

$$H_{CVV}(i\omega_n) = \frac{i\omega_n}{\omega_e^2 - \omega_n^2 + 2\omega_e \{h_e \omega_n + \beta_e \omega_e \operatorname{sgn}(\omega_n)\}i} \quad (13)$$

## 2.3 エネルギー入力率の経時関数

地動加速度  $a_g(t)$  に対する時刻 0 から  $t$  までの単位質量あたりの累積入力エネルギー  $E_I(t)/m$  を式(14)で定義する。

$$\frac{E_I(t)}{m} = -\int_0^t a_g(t) \dot{y}(t) dt \quad (14)$$

地動加速度  $a_g(t)$  に対するエネルギー入力率  $e_I(t)$  を, 式(14)の時刻  $t$  での微分として式(15)により定義する。

$$e_I(t) = \frac{\dot{E}_I(t)}{m} = -a_g(t) \dot{y}(t) \quad (15)$$

地動加速度  $a_g^*(t)$  に対しても同様にして, エネルギー入力率  $e_I^*(t)$  を式(16)で定義する。

$$e_I^*(t) = -a_g^*(t) \dot{y}^*(t) \quad (16)$$

式(15), (16)の  $e_I(t)$ ,  $e_I^*(t)$  を用いてエネルギー入力率の経時関数を式(17)で定義する。

$$\hat{e}_I(t) = \{e_I(t) + e_I^*(t)\}/2 \quad (17)$$

式(17)に式(15), (16)を代入し, これに式(1), (4), (9), (11)を代入して整理すると, エネルギー入力率の経時関数のフーリエ級数表現が式(18)の形で得られる。

$$\hat{e}_I(t) = \sum_{n=-N+1}^{N-1} E_n^* \exp(i\omega_n t) \quad (18)$$

式(18)の係数  $E_n^*$  は式(19)より得られる。

$$\begin{cases} E_0^* = 2 \sum_{n=1}^N \operatorname{Re}\{H_{CVV}(i\omega_n)\} |c_n|^2 \\ E_n^* = \sum_{n=n+1}^N \{H_{CVV}(i\omega_n) + H_{CVV}(-i\omega_{n-n})\} c_n c_{-(n-n)} \\ E_{-n}^* = \overline{E_n^*} \end{cases} \quad (19)$$

## 2.4 瞬間入力エネルギーの経時関数

文献 1) に従って, 単位質量あたりの瞬間入力エネルギーを式(20)で定義する。

$$\frac{\Delta E(t)}{m} = -\int_t^{t+\Delta t} a_g(t) \dot{y}(t) dt \quad (20)$$

ここで,  $\Delta t$  は一方の変位ピークから逆側の変位ピークまでの半ループの時間である。ここで, 単位質量あたりの瞬間入力エネルギー  $-\Delta E/m$  を  $\Delta t$  で割ったエネルギー入力率の平均値を考え, 式(21)で近似する。

$$\frac{1}{\Delta t} \frac{\Delta E(t)}{m} = -\frac{1}{\Delta t} \int_t^{t+\Delta t} a_g(t) \dot{y}(t) dt \approx \frac{1}{\Delta t} \int_{t-\Delta t/2}^{t+\Delta t/2} \hat{e}_I(t) dt \quad (21)$$

ここで, 式(21)では積分範囲を区間  $[t, t+\Delta t]$  から区間  $[t-\Delta t/2, t+\Delta t/2]$  に変更している点に留意されたい。式(21)を整理すると, 単位質量あたりの瞬間入力エネルギーの経時関数が式(22)の形で得られる。

$$\frac{1}{\Delta t} \frac{\Delta E(t)}{m} = \sum_{n=-N+1}^{N-1} E_{\Delta,n}^* \exp(i\omega_n t) \quad (22)$$

$$E_{\Delta,0}^* = E_0^*, E_{\Delta,n}^* = \frac{\sin(\omega_n \Delta t/2)}{\omega_n \Delta t/2} E_n^*, E_{\Delta,-n}^* = \overline{E_{\Delta,n}^*} \quad (23)$$

ここで,  $\Delta t$  を変位ならびに速度応答の二乗平均値を用いて式(24)により近似的に評価する。

$$\Delta t \approx \pi \sqrt{\sum_{n=1}^N |H_{CVD}(i\omega_n)|^2 |c_n|^2 / \sum_{n=1}^N |H_{CVV}(i\omega_n)|^2 |c_n|^2} \quad (24)$$

## 2.5 最大瞬間入力エネルギーと総入力エネルギーの推定

本論文では, 時刻  $t$  における単位質量あたりの瞬間入力エネルギー  $-\Delta E(t)/m$  を, 式(22)を用いて式(25)で近似的に評価する。

$$\frac{\Delta E(t)}{m} \approx \int_{t-\Delta t/2}^{t+\Delta t/2} \sum_{n=-N+1}^{N-1} E_{\Delta,n}^* \exp(i\omega_n t) dt \quad (25)$$

単位質量あたりの最大瞬間入力エネルギー  $-\Delta E_{\max}/m$  は, 式(25)より得られる  $\Delta E(t)/m$  の  $[0, t_d]$  での最大値とする。一方, 単位質量あたりの総入力エネルギー  $E_I/m$  は, 時刻  $t_d$  までの単位質量あたりの累積入力エネルギーとして式(26)より得られる。

$$\frac{E_I}{m} = -\int_0^{t_d} a_g(t) \dot{y}(t) dt = t_d E_0^* \quad (26)$$

以下では, 文献 1) に倣い  $\Delta E_{\max}/m$  ならびに  $E_I/m$  の速度換算値  $V_{\Delta E}$ ,  $V_I$  を式(27)で定義して議論の主対象とする。

$$V_{\Delta E} = \sqrt{\frac{2\Delta E_{\max}}{m}}, V_I = \sqrt{\frac{2E_I}{m}} \quad (27)$$

### 3. 解析諸元

#### 3.1 非線形時刻歴応答解析での解析モデル

本論文での非線形時刻歴応答解析で用いる解析モデルは、靱性のある RC 造建築構造物を想定した 1 質点 1 自由度系モデルである。図 - 1 に解析モデルの復元力特性を示す。解析モデルの質量  $m$  は 1000t, 降伏耐力  $Q_y$  は降伏せん断力係数を 0.3 と仮定して 2940kN とする。降伏変位  $\delta_y$  は等価高さ  $H^*$  の 1/150 と仮定し,  $H^*$  の値は 4 層, 7 層, 10 層ならびに 15 層建築物を想定してそれぞれ  $H^* = 9\text{m}, 15\text{m}, 21\text{m}, 30\text{m}$  とする。減衰は初期剛性に対して  $h_0 = 0.05$  の瞬間剛性比例型とする。表 1 に解析モデルの ID と等価高さ  $H^*$ , 初期周期  $T_0$ , 降伏点割線周期  $T_y$  ならびに文献 5) の式(28)より求まる塑性率  $\mu = 2$  での有効周期  $T_e$  の値を示す。

$$T_e = \frac{1}{\mu} \left\{ T_y + \int_1^{\mu} (T_y \sqrt{\mu}) d\mu \right\} = \frac{T_y}{3} \left( \frac{1}{\mu} + 2\sqrt{\mu} \right) \quad (28)$$

#### 3.2 入力地震動

本論文では, 入力地震動として 5 つの観測記録 (El Centro 1940(ELC), Fukiai 1995(FKI), Hachinohe 1968(HAC)<sup>6)</sup>, Sendai 2011(SND)<sup>7)</sup>, Tohoku Univ. 1978(TOH)) の水平主軸成分を用いた。この 5 つの観測記録に対し, フーリエ振幅スペクトルを変化させずに位相を  $\Delta\phi_0 = 0, \pi/12, 2\pi/12, \dots, 11\pi/12$  までシフトさせた地震

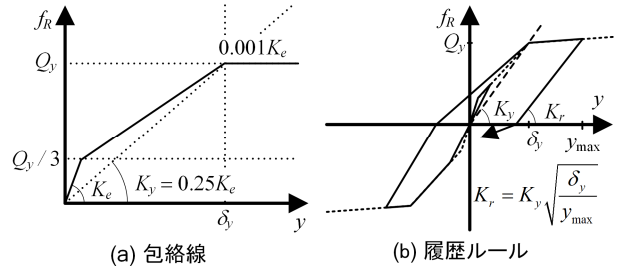


図 - 1 復元力特性

表 1 各モデルの初期周期・降伏点割線周期・有効周期

モデル ID	$H^*$ (m)	$T_0$ (s)	$T_y$ (s)	$T_e$ (s)
H09	9	0.449	0.898	0.996
H15	15	0.579	1.159	1.286
H21	21	0.686	1.371	1.521
H30	30	0.819	1.639	1.818

動 12 波を式(29)により作成した。

$$a_g(\Delta\phi_0, t) = \sum_{n=-N}^N c_n \exp[i\{\omega_n t - \text{sgn}(\omega_n)\Delta\phi_0\}] \quad (29)$$

以下, 各々の地震動群を地震動群 ELC 地震動群 FKI, 地震動群 HAC 地震動群 SND 地震動群 TOH と称する。

図 2 に, 粘性減衰定数  $h = 0.10$  の線形 1 自由度系を用いた各地震動群の総入力エネルギースペクトル ( $V_I$  スペクトル) ならびに最大瞬間入力エネルギースペクトル ( $V_{\Delta E}$  スペクトル) をそれぞれ示す。ここで, 図中に "Each Wave" と表記されているものは, 式(29)により作成した個々の波を用いて時刻歴応答解析により求めたもの, "Fourier Series" と表記されているものは, 各モデルの有効周期に対して前節の経時関数を用いて推定した  $V_I$ ,

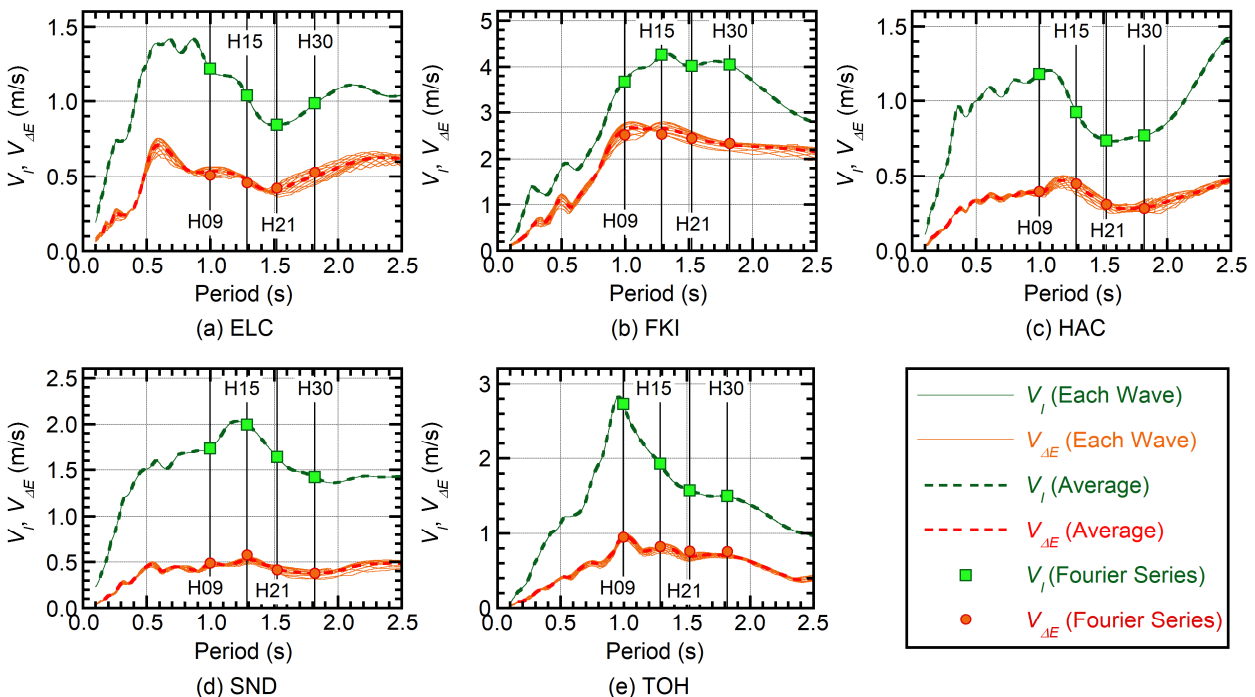


図 2 地震動群の総入力エネルギースペクトル・最大瞬間入力エネルギースペクトル

$V_{AE}$  の値である。同図より明らかなように、 $V_I$  スペクトルは同一地震動群では等しい値となるのに対し、 $V_{AE}$  スペクトルは同一地震動群でも差異が認められる。加えて、経時関数による  $V_I$ 、 $V_{AE}$  の値は、時刻歴応答解析結果の平均と良好に一致していることが確認できる。

非線形解析における入力倍率は、目標塑性率を  $\mu_T = 2$  として各地震動群で単一の値に設定した。すなわち、各地震動群で位相シフト量の異なる 12 波で非線形時刻歴応答解析を実施して  $\mu = \mu_T = 2$  となる倍率を求め、これの平均値をその地震動群での入力倍率とした。

表 2 に、各モデルでの地震動群の入力倍率を示す。

### 3.3 経時関数に基づく推定

本論文では、固有周期を有効周期  $T_e$  とした等価線形 1 自由度系より非線形 1 自由度系の  $V_I$ 、 $V_{AE}$  の値を推定する。まず Case 1 は簡便な方法として、文献 1)、2) と同様に粘性減衰定数  $h_e = 0.10$ 、複素減衰定数  $\beta_e = 0$  とした場合である。一方の Case 2 は、減衰を粘性減衰定数  $h_e$  と複素減衰定数  $\beta_e$  に分けて考え、目標塑性率  $\mu_T = 2$  に対してそれぞれ式(30)で算定した場合である。

$$h_e = h_0 \frac{T_0}{T_y} \frac{1}{\sqrt{\mu_T}}, \beta_e = 0.2 \left( 1 - \frac{1}{\sqrt{\mu_T}} \right) \quad (30)$$

算定の結果、粘性減衰定数は  $h_e = 0.0177$ 、複素減衰定数は  $\beta_e = 0.0586$  となり、両者の和は  $h_e + \beta_e = 0.0763$  と 0.10

表 2 各モデルでの地震動群の入力倍率

モデル ID	ELC	FKI	HAC	SND	TOH
H09	1.005	0.2852	1.574	1.210	0.5615
H15	1.257	0.2688	1.888	1.715	0.9875
H21	1.994	0.3161	3.078	2.466	1.391
H30	2.131	0.4842	3.909	3.164	1.556

より小さくなった。

## 4. 解析結果と推定結果の比較

### 4.1 最大瞬間入力エネルギー

図 - 3 に、最大瞬間入力エネルギーの速度換算値  $V_{AE}$  の推定結果を、非線形時刻歴応答解析結果と比較して示す。同図より  $V_{AE}$  については、非線形時刻歴応答解析結果は位相シフト量によりばらつきがみられるものの、その平均値は Case 1、2 による推定値と近い値となっていることがわかる。各ケースの非線形時刻歴応答解析結果の平均値に対する比率は、Case 1 では 0.79 ~ 1.18、Case 2 では 0.80 ~ 1.26 となった。加えて、Case 1 と Case 2 の差は小さく、 $V_{AE}$  の推定値の比(Case1)/(Case2)の値は 0.916 ~ 1.095 となった。

### 4.2 総入力エネルギー

図 - 4 に、総入力エネルギーの速度換算値  $V_I$  の推定結果を、非線形時刻歴応答解析結果と比較して示す。同図に示すように、 $V_I$  についても図 - 3 の  $V_{AE}$  と同様、非線形時刻歴応答解析結果の平均値は Case 1、2 による推定値と近い値となった。各ケースの非線形時刻歴応答解析結果の平均値に対する比率は、Case 1 では 0.75 ~ 1.18、Case 2 では 0.74 ~ 1.20 となった。加えて、Case 1 と Case 2 での  $V_I$  の推定値の比(Case1)/(Case2)の値は 0.948 ~ 1.111 となった。

以上より、 $V_{AE}$  と  $V_I$  の両者の推定に関しては、簡便に粘性減衰定数  $h$  を 0.10 とした Case 1 でも、ならびに粘性減衰定数と複素減衰定数を別個に与えた Case 2 と同程度の精度となった。このことから、 $V_{AE}$  と  $V_I$  の推定に関しては、本論文での検討と同程度の目標塑性率 ( $\mu_T = 2$  前後)であれば粘性減衰定数  $h_e$  を 0.10 として推定できると考えられる。なお、モデル H30 に対して地震動群 HAC

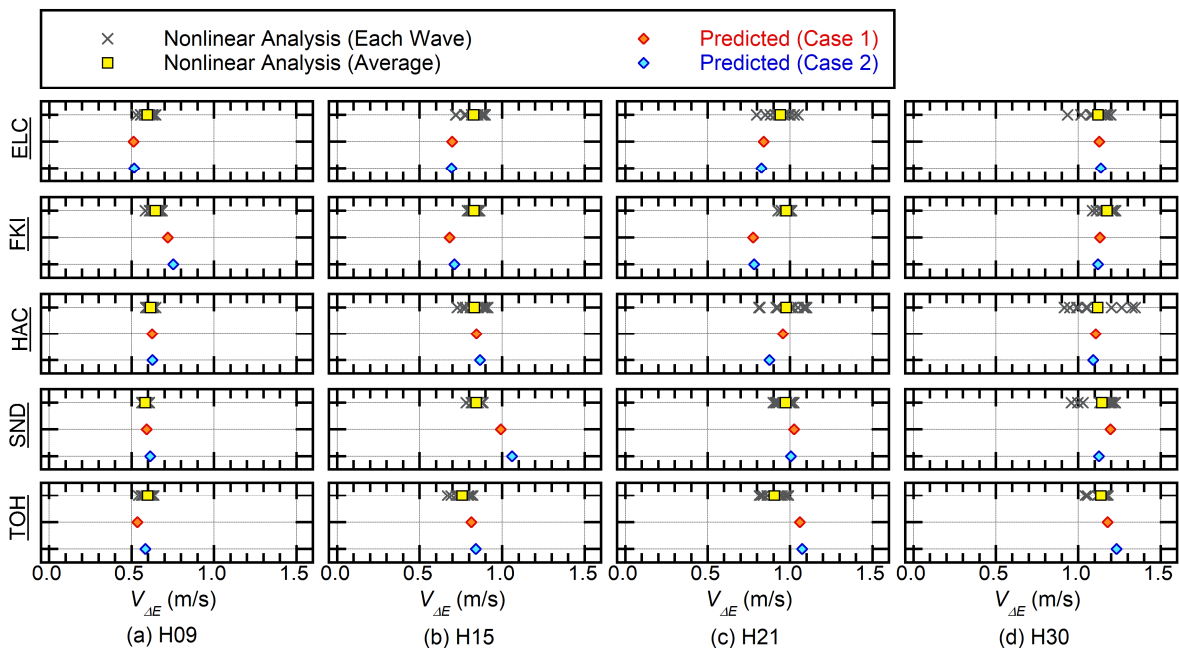


図 - 3 最大瞬間入力エネルギーの速度換算値の推定

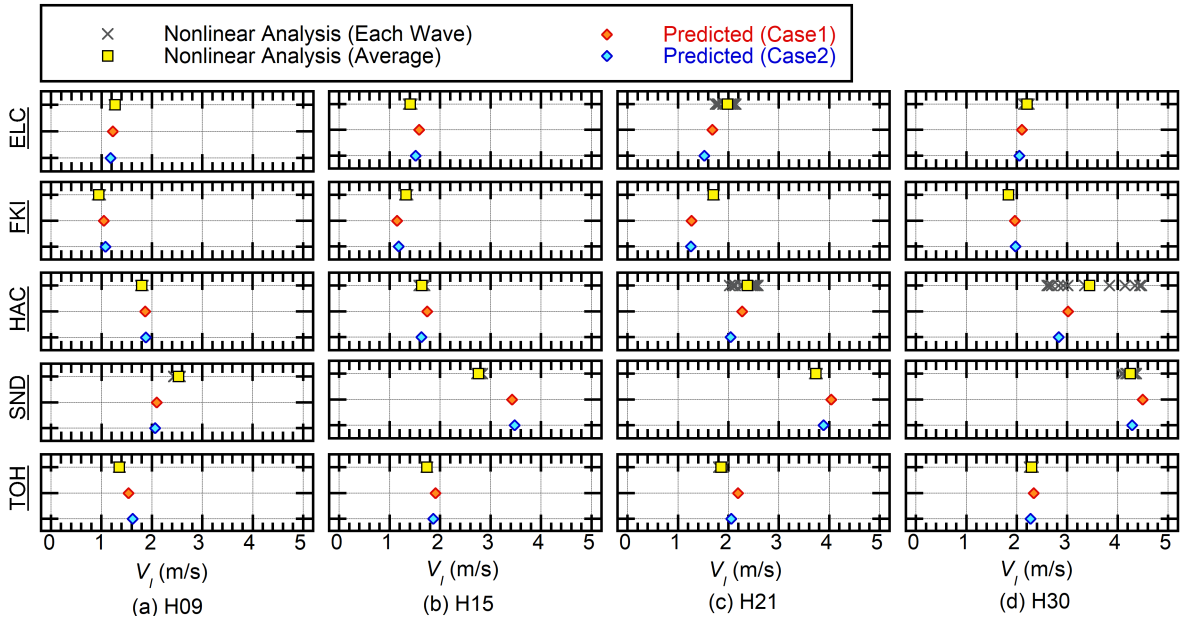


図 - 4 総入力エネルギーの速度換算値の推定

を入力した場合、 $V_{AE}$  と  $V_i$  とも非線形応答解析結果のばらつきが大きい、これについては次節で後述する。

#### 4.3 瞬間入力エネルギーの時刻歴と経時関数の比較

図 - 5 に、非線形応答解析により得られた瞬間入力エネルギーの時刻歴を、式(22)で得られる瞬間入力エネルギーの経時関数 (Case 1, 2) と比較して示す。同図(a)は地震動群 HAC、同図(b)は地震動群 FKI であり、解析モデルはともに H09 と H30 である。

同図(a)に示すように、モデル H09 に地震動群 HAC を入力した場合には Case 1, 2 とともに経時関数が非線形応答解析結果の平均と良好に対応している。一方、モデル H30 の場合では時刻  $t = 33$  秒前後までは経時関数は非線形応答解析結果の傾向を良好にとらえているものの、そ

れ以降では差異が大きい。特に、 $t = 36$  秒以降では時刻歴応答解析結果と経時関数の差異が顕著となっている。

一方、同図(b)に示すように、モデル H09 に地震動群 FKI を入力した場合には Case 1, 2 とともに経時関数と非線形応答解析結果で最大値の発生時刻がほぼ一致しているものの、経時関数は非線形応答解析とくらべ過大になっている。一方、モデル H30 の場合では両ケースとも経時関数と非線形応答解析結果で最大値ならびにその発生時刻も良好に一致していることがわかる。

以下に、図 - 5 において非線形時刻歴応答解析結果と等価線形系による経時関数との差が顕著となった、モデル H30 に地震動群 HAC を入力した場合について詳細に検討する。図 - 6 に、最大変位の最も大きくなった  $\Delta\phi_0 =$

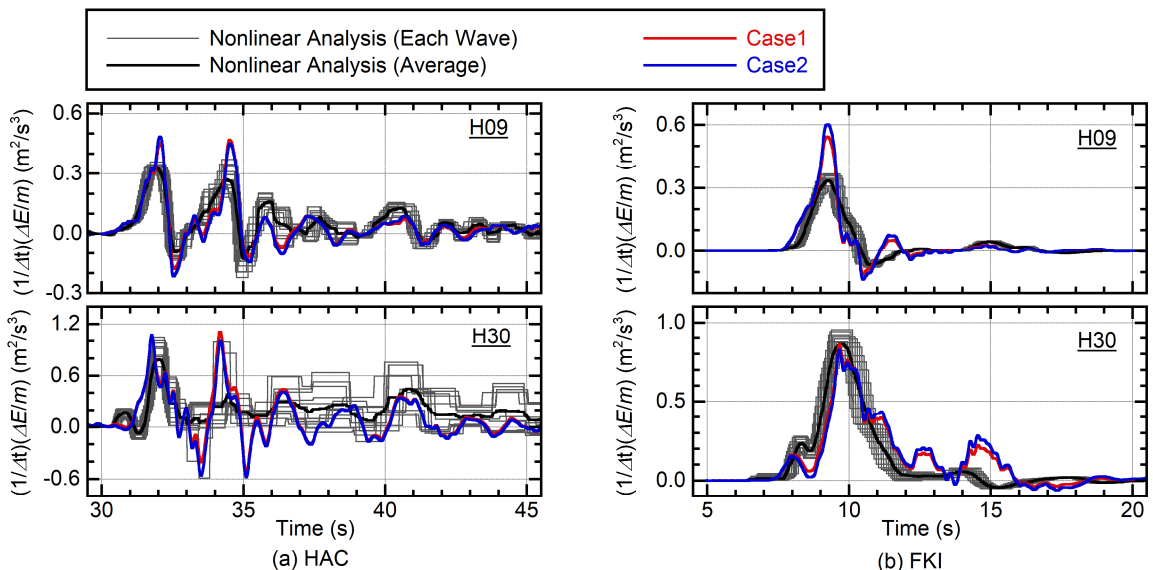


図 - 5 瞬間入力エネルギーの時刻歴と経時関数の比較

3π/12 のケースと、最も小さくなった Δφ<sub>0</sub> = 8π/12 を比較して示す。同図より、t = 33 秒までに生じた最大変位は、正負の違いこそあれ両ケースとも同程度となっていることがわかる。一方、t = 33 秒以降の応答は両者に明らかな違いがあり、同図(a)の場合には最大応答変位が同図(b)の2倍程度になっていることがわかる。ここで、最大応答変位の生じた半ループの時間 Δt は、同図(a)のケースでは Δt = 1.22s、同図(b)のケースでは Δt = 0.84s となった。

そこで、両者での半ループの時間 Δt に着目して、有効周期を  $T_e = 2\Delta t$  と仮定した粘性減衰定数  $h = 0.10$  の等価線形系での瞬間入力エネルギーの経時関数を算定し比較して示したものが図 - 7 である。同図より、t = 33 秒以降に応答変位が著しく大きくなった Δφ<sub>0</sub> = 3π/12 のケースに相当する  $T_e = 2.44s$  では、元の推定である  $T_e = 1.88s$  と比べて t = 33 秒以降で経時関数の値が大きくなっていることがわかる。一方、Δφ<sub>0</sub> = 8π/12 のケースに相当する  $T_e = 1.68s$  では、 $T_e = 1.88s$  と比べて差が小さくなった。このことから、図 - 6 に示す t = 33 秒以降の応答の違いは、有効周期  $T_e$  の違いによる瞬間入力エネルギーの経時関数の違いと対応すると考えられる。

以上より、図 - 5 に示すモデル H30 に地震動群 HAC を入力した場合での非線形時刻歴応答解析結果と等価線形系による経時関数との差は、仮定した有効周期  $T_e$  と時刻歴応答解析との差異が一因であると考えられる。

## 5. まとめ

本論文では、文献 4) にて定式化した瞬間入力エネルギーの経時関数を用いて、靱性のある RC 造建築物をモデル化した非線形 1 自由度系モデルに対する最大瞬間入力エネルギーと総入力エネルギーの評価を試みた。限られた検討範囲ではあるが、得られた結論を以下に記す。

- (1) 文献 4) で示した瞬間入力エネルギーの経時関数を用いる事で、靱性のある RC 造建築物をモデル化した非線形 1 自由度系モデルの瞬間入力エネルギーの時刻歴の概要を推定できる。
- (2) 粘性減衰定数 0.10、複素減衰定数 0 の等価線形 1 自由度系に対して瞬間入力エネルギーの経時関数を用いる事で、本論文で検討した塑性率 2 程度の非線形 1 自由度系モデルへの最大瞬間入力エネルギーと総入力エネルギーの速度換算値を推定できる。

なお、本論文 4.3 節で議論の対象となった有効周期の違いによる応答の推定精度のばらつきへの影響は、構造物の復元力特性から有効周期の上限値と下限値を仮定することによって反映させる方法も考えられる。有効周期のばらつきを考慮した推定方法の検討、ならびに鋼製制振部材を設置した RC 造建築物や靱性のない部材の混在

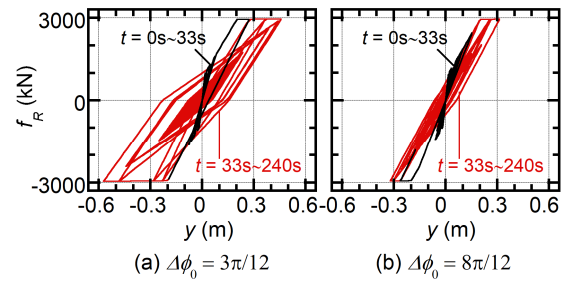


図 - 6 履歴応答の比較

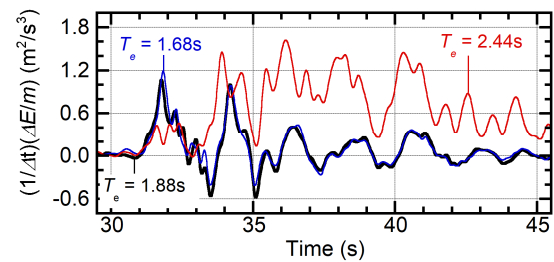


図 - 7 瞬間入力エネルギーの経時関数の比較

する建築物など、他の復元力特性を有する構造物への適用性に関しては今後の検討課題とする。

## 参考文献

- 1) 中村 孝也, 堀 則男, 井上 範夫: 瞬間入力エネルギーによる地震動破壊特性評価と応答変形の推定, 日本建築学会構造系論文集, 第 513 号, pp.65-72, 1998.11.
- 2) 秋山 宏: 建築物の耐震極限設計, 東京大学出版会, 321p., 1987.
- 3) 中村 友紀子, 壁谷澤 寿海: 地震動特性にもとづく最大塑性変位応答に関する研究, 構造工学論文集, Vol. 43B, pp.485-492, 1997. 3.
- 4) 藤井 賢志, 菅野 秀人, 西田 哲也: 1 自由度系への瞬間入力エネルギーの経時関数のフーリエ級数表現, 第 15 回日本地震工学シンポジウム, Paper ID: GO05-03-08, 2018.12.
- 5) Fujii K, Kida S.: Evaluation of the maximum momentary energy input to a structure considering phase characteristics of ground motion, 16th European Conference on Earthquake Engineering, ID: 10363, 2018.
- 6) 翠川 三郎, 三浦 弘之: 1968 年十勝沖地震の八戸港湾での強震記録の再数値化, 日本地震工学会論文集, 第 10 巻第 2 号, pp.12-21, 2010.5.
- 7) 鹿嶋 俊英, 小山 信, 大川 出: 平成 23 年 (2011 年) 東北太平洋沖地震における建物の強震観測記録, 建築研究資料, No.135, No. 2, 142p., 2012.