非定常弾性応答時における応答低減係数の評価

EVALUATION OF RESPONSE REDUCTION FACTOR IN NON-STATIONARY ELASTIC RESPONSE

大塚悠里^{*1}, 朱 盈^{*2}, 伊藤美瑛^{*3}, 大出大輔^{*4}, 平石久廣^{*5}Yuri OTSUKA, Ying ZHU, Miei ITO,
Daisuke ODE and Hisahiro HIRAISHI

This paper presents the revised response reduction factor with higher accuracy, which is modified from the past proposal. In the modification, two phenomena are considered. One is the influence of the asymmetry of response of one cycle just before the maximum response on the calculation of the equivalent damping factor. The other is the influence of the change of the period due to the damping. The paper also proposes simplified formula for the response reduction factor. Finally, the consistency of the modified formula and the simplified formula with the time history analytical results is investigated, which proves the excellent compatibility.

Keywords : Response reduction factor, Non-stationary response, Elastic single-mass system, One cycle at the maximum response, Projecting ratio, Absorbed energy by damping factor

応答低減係数, 非定常応答, 弾性一質点系, 最大応答時の1サイクル, 突出比, 減衰による吸収エネルギー

1. はじめに

減衰による応答低減係数は、地震時における構造物の応答を簡易に予測することができ、建物の耐震性能を効率よく把握できることから限界耐力計算など、耐震設計に関する多くの規準に採用されている。また、構造特性の位置づけなど耐震に係る研究にも多用されている。このため、古くから多くの研究者により研究が進められてきた。既往の応答低減係数の代表的なものとしては建築研究所¹⁾、笠井式²⁾、秋山式³⁾等があげられる。しかしながら、これらの応答低減係数は統計的な計算により求められた回帰式であり、理論的な背景に乏しく、入力地震動や建物の復元力特性により提案式と解析値との間にばらつきや隔離がみられ検討の余地がある^{2), 3)}。

また、非定常応答の理論的な考察としては、地震時の非定常性を考慮しつつ、主要動区間を定常ランダムと見做すことにより疑似速度スペクトルとエネルギースペクトルの関係式を導出した岡野等の研究⁴⁾があげられる。しかしながら、減衰定数が0.05より大きい範囲は適応外であり、また、応答低減係数は提案されていない。

一方、著者等は弾性、弾塑性一質点系が定常応答する場合における最大応答時の1サイクル分の吸収エネルギーの関係に着目し、入力エネルギーと減衰による吸収エネルギー及び履歴による吸収エネルギーとの関係から、定常応答時における弾性モデル、武田モデル、バイリニアモデル、武田スリップモデルの応答低減係数の理論式を

誘導し、それらが時刻歴応答解析結果と極めて良く整合することを示している⁵⁾。

また、著者等は非定常応答時における弾性一質点系の応答低減係数についてもエネルギーの釣合に基づき理論的に誘導している⁶⁾。具体的には、最大応答直前の1サイクルに着目し、最大応答直前のピーク値から最大応答に至るまでの歪エネルギーの増分、定常ループを描く時の減衰による吸収エネルギー及び最大応答と最大応答直前のピーク値の比率(以下:突出比)を用い、非定常応答時における応答低減係数の評価式を誘導した。さらに、減衰による吸収エネルギーを定常応答時から非定常応答時に修正する係数(以下:修正係数)を算出し、その値が突出比と近似できることから、応答低減係数の略算式((9)式)を提案している。

しかしながら、提案された応答低減係数の略算解は応答解析結果の下限值を描き、また、減衰定数が増大するにつれて応答解析結果の平均値との差異が大きくなる傾向を示した。さらに、応答解析結果より得られた応答低減係数は建物周期によってばらつきがみられた。

このため、本論文では文献⁶⁾を基に、減衰による吸収エネルギーに応答の非対称性を加味した修正係数と減衰による周期の変動が応答低減係数に及ぼす影響を考慮しうる補正係数を用いた応答低減係数の修正式を提案する。また、建物周期ごとの修正係数と突出比を

^{*1} 明治大学大学院 博士後期課程・大学院生
日本学術振興会特別研究員 DC1・修士(工学)

^{*2} ㈱フジタ技術センター 修士(工学)

^{*3} 明治大学大学院 博士前期課程・大学院生

^{*4} ㈱大林組技術研究所

明治大学大学院 博士後期課程・大学院生・修士(工学)

^{*5} 明治大学理工学部建築学科 教授・工博
(国立研究開発法人建築研究所 客員研究員)

Grad. Student, Graduate School of Science and Technology, Meiji Univ.
Research Fellow of Japan Society for the Promotion of Science, M.Eng.

Technology Development Division, Fujita Corporation, M.Eng.

Grad. Student, Graduate School of Science and Technology, Meiji Univ.

Technical Research Institute, Obayashi Corporation

Grad. Student, Graduate School of Science and Technology, Meiji Univ., M.Eng.

Prof., Dept. of Architecture, School of Science and Technology, Meiji Univ., Dr.Eng.

(Visiting Research Fellow, Building Research Institute)

用いた具体的な応答低減係数を算出し、応答解析結果との比較からその整合性を検証する。さらに、応答低減係数の修正式を基に応答低減係数の簡易式を誘導し、応答解析結果及び既往の提案式との比較からその適合性を示す。

2. 文献⁶⁾の応答低減係数の提案式とその検討課題

本章では、本論文の基本となる文献⁶⁾で誘導した非定常応答時における弾性一質点系の1サイクル分のエネルギーの関係式、応答低減係数の理論式並びに文献⁶⁾の略算式とその検討課題を示す。

2.1. 1サイクル分のエネルギーの釣合式

Fig.1に弾性一質点系が非定常応答をする時の応答変位 y と時刻 t の関係を示す。また、非定常応答状態における復元力特性(Fig.2)を、減衰力と剛性 k を有する弾性系で表した場合を Fig.3 及び Fig.4 に示す。Fig.2 の減衰による吸収エネルギー ${}_eE_d$ は、Fig.3 の減衰力 $C\dot{y}$ の面積による仕事量で与えられる。

一方、弾性一質点系の最大応答時における1サイクル分のエネルギーの釣合式は(1)式で得られ、(2)式で表せる。

$$\int_{t_1}^{t_2} M\ddot{y} dt + \int_{t_1}^{t_2} C\dot{y}^2 dt + \int_{t_1}^{t_2} ky\dot{y} dt = - \int_{t_1}^{t_2} M\ddot{y} dt \quad (1)$$

$${}_eE_d + {}_eE_\Delta = E \quad (2)$$

$M\ddot{y}$: 慣性力

$C\dot{y}$: 減衰力

ky : 復元力

$M\ddot{z}$: 地震力

${}_eE_d$: 1サイクル分の減衰による吸収エネルギー

${}_eE_\Delta$: 1サイクル分の弾性歪エネルギーの増分

E : 1サイクル分の地動による入力エネルギー

Fig.1 Time history of displacement for one cycle before the maximum response

Fig.2 Hysteresis characteristics and absorbed energy

Fig.3 Damping force and absorbed energy

Fig.4 Elasticity

2.2. 応答低減係数の理論式

文献⁶⁾では、減衰定数 h による応答の違いを Fig.5 のように仮定し、応答低減係数 F_h を(3)式で与えている。また、応答低減係数の一般式は(2)式から、(4)式で与えられる。

$$\frac{y_h}{y_0} = \frac{y_{hmax}}{y_{0max}} = F_h \quad (3)$$

$$F_h = \frac{{}_eE_{d0} + {}_eE_{\Delta 0}}{\frac{h}{h_0} {}_eE_{d0} + {}_eE_{\Delta 0}} \quad (4)$$

h, h_0 : 減衰定数

y_0 : $h = h_0$ の時の応答変位

y_h : $h = h$ の時の応答変位

y_{0max} : $h = h_0$ の時の最大応答変位 [$y_2(h = h_0)$]

y_{hmax} : $h = h$ の時の最大応答変位 [$y_2(h = h)$]

${}_eE_{d0}$: $h = h_0$ の時の減衰による吸収エネルギー

${}_eE_{\Delta 0}$: $h = h_0$ の時の弾性歪エネルギーの増分

また文献⁶⁾では、減衰定数 $h = h_0$ の時の減衰による吸収エネルギー ${}_eE_{d0}$ を歪エネルギーの面積 ${}_eE_{e0}$ (三角形 OAC) を用いて、Fig.6 のような正負対称の減衰による吸収エネルギーの時に成立する(5)式で表している。

$${}_eE_{d0} = 4\pi h_0 \cdot {}_eE_{e0} \quad (5)$$

非定常応答時の応答低減係数は、減衰定数 $h = h_0$ の時の応答変位 y_1 と y_2 の比率(突出比 γ_0 ((6)式))並びに、減衰による吸収エネルギーに(7)式の修正係数 β_0 を用い、(8)式で与えている。

$$\gamma_0 = \frac{y_2(h = h_0)}{y_1(h = h_0)} \quad (6)$$

$$\beta_0 = \frac{\text{楕円 AA'BA の面積}(h = h_0)}{\text{楕円 AA'A の面積}(h = h_0)} \quad (7)$$

$$F_h = \frac{\beta_0 \cdot 4\pi h_0 + (\gamma_0^2 - 1)}{\beta_0 \cdot 4\pi h + (\gamma_0^2 - 1)} \quad (8)$$

Fig.5 Assumption of the time history of the displacement

Fig.6 Strain energy and energy by damping force in one cycle (A-A'-A)

2.3. 応答低減係数の略算式とその検討課題

応答低減係数の略算式は、減衰による吸収エネルギーの修正係数 $\beta_0((7)式)$ が突出比 $\gamma_0((6)式))$ と等しいとし、(9)式で与えている⁶⁾。

$$F_h = \frac{10h_0 + 0.8(\gamma_0 - 1/\gamma_0)}{10h + 0.8(\gamma_0 - 1/\gamma_0)}$$

(9)

しかしながら、上記の応答低減係数の略算式は応答低減係数を小さめの値で評価しており、また、減衰定数 h が増加するにつれて応答解析結果の平均値との差異が大きくなる傾向が見られた(後述 Fig.12 参照)。さらに、応答解析結果は減衰定数 h が同じであっても、建物周期 T によって応答低減係数の値が異なる結果となった。したがって、応答低減係数の精度の向上を図るため、減衰定数 h が応答に及ぼす効果について更なる検討を行った。

3. 応答低減係数の修正式の検討

本章では、2.3 節の検討課題について 3.1 節に示す解析概要より得られた応答解析結果を用いて検討を行う。3.2 節では減衰による吸収エネルギーの修正係数 β_0 を応答の非対称性を加味した係数として新たに提示し、3.3 節では減衰定数 h による応答低減係数への影響を補正する係数 ζ を誘導する。

3.1. 検討に用いた解析の概要

解析対象モデルは弾性一質点系とし、建物周期 T を 0.5 秒〜3.0 秒までの範囲で変化させ系の剛性を設定した。また、減衰定数 h は 0.05、0.1、0.15、0.2、0.25、0.3、0.35、0.4 の 8 種類とした。

入力地震動は告示波 3 種と実地震動 10 種の計 13 種類を対象とした。Table1 に告示波 3 波及び実地震動の最大加速度及び入力時間を示す。告示波は模擬地震波作成プログラム ARTEQ⁷⁾を用い、目標スペクトルを告示の 2 種地盤スペクトルとし、乱数を変化させ、3 種類の波形を作成した。Fig.7 に告示波 3 波の入力加速度波形を示す。また、実地震動は様々な波が報告されているが、本論文では文献⁸⁾の観測波(Tohoku、El Centro、Hachinohe、Taft)及び気象庁に公開されている観測波(Kobe)を用い、それぞれの地震動の最大速度をレベル 2 に相当する 50cm/s に基準化した。なお、修正係数 β_0 の算出

Table1 Input earthquake motions

Earthquake motion	Max acc. (cm/s ²)	Time (s)
Wave1	463.00	120.00
Wave2	443.00	120.00
Wave3	491.00	120.00
Tohoku NS	356.63	40.96
Tohoku EW	367.03	40.96
El Centro NS	510.00	53.76
El Centro EW	284.69	53.48
Hachinohe NS	333.72	51.00
Hachinohe EW	238.36	51.00
Taft NS	486.31	54.38
Taft EW	496.89	54.40
Kobe NS	451.08	173.02
Kobe EW	408.80	173.02

Fig.7 Input earthquake motions in notification

には、減衰定数 $h=h_0$ の時における減衰による吸収エネルギーの正確な値を把握する必要があるため、入力地震動の刻み時間を十分な収束が見られた 0.002 秒とし、検討を行った。

3.2. 応答の非対称性を加味した修正係数 β_0' の検討

一般的に等価減衰定数 h は減衰による吸収エネルギー eE_d と歪エネルギー eE_e を用いて(10)式で表される。

$$h = \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{eE_d}{eE_e}$$

(10)

しかしながら、(10)式が成立するのは定常応答の場合であり実際の応答のように正負非対称の応答を描く場合で(10)式のように表すには補正が必要になる。本論文ではこの補正を以下のように考えた。

Fig.8 に正負非対称の応答を、Fig.9 に Fig.8 の非対称の応答が対称になるように x 軸及び y 軸をずらした図を示す。ここで、Fig.9 における $\bar{y}_1$ は Fig.8 の y_l と y_l' の平均値を示す((11)式)。

Fig.8 Displacement and strain energy in case of non-stationary response

Fig.9 Modified displacement as to be stationary response and modified strain energy

$$\bar{y}_1 = \frac{|y_1| + |y_1'|}{2} \quad (11)$$

(10)式における歪エネルギー ${}_eE_e$ の代わりに Fig.9 の歪エネルギー ${}_eE_e'$ を用いれば、等価減衰定数と減衰による吸収エネルギー ${}_eE_d$ の間に(12)式が成立する。結果として、非定常応答をする場合の等価減衰定数 h' は(13)式で表される。

$$h' = \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{{}_eE_d}{{}_eE_e'} = h \cdot \frac{{}_eE_e}{{}_eE_e'} \quad (12)$$

$$h' = h \cdot \left(\frac{y_1}{\bar{y}_1} \right)^2 \quad (13)$$

なお、以下では文献^⑨の提案式との継続性を保つため、等価減衰定数は従来と同じとし、減衰定数 $h=h_0$ の時の減衰定数の補正係数 $(y_1/\bar{y}_1)^2$ を修正係数 β_0 ((7)式)に乗じた応答の非対称性を加味した減衰による吸収エネルギー ${}_eE_{d0}$ の修正係数 β_0' を(14)式で表す。

$$\beta_0' = \beta_0 \cdot \left(\frac{y_1}{\bar{y}_1} \right)^2 \quad (14)$$

Fig.10 に、例として Wave1、Wave2、Tohoku NS、Hachinohe NS を用いた場合の減衰定数 h_0 が 0.05 及び 0.1 における、修正係数

β_0 ((7)式)及び β_0' ((14)式)を示す。文献^⑨の修正係数 β_0 は建物周期 T による差異が大きく、応答の非対称性を加味した修正係数 β_0' は建物周期 T による差異が概して小さい結果となった。

以上より、応答の非対称性による減衰定数への影響を加味した応答低減係数(以下:応答低減係数の修正式)が(15)式で得られる。なお、最大応答直前のピーク値である y_1 が小さい場合、一律とした場合の突出比 γ_0 ((6)式)の値に大きな影響を与え、結果として応答低減係数も大きく変動することから、本論文では建物周期 T によらず応答低減係数を表すため、(15)式の全ての項に突出比の逆数の2乗 $1/\gamma_0^2$ を乗じた。なお、 γ_0^2 で除すことは最大応答直前のピーク値ではなく最大応答時の歪エネルギーを基準にして表すことを意味する。

$$F_h = \frac{\beta_0'/\gamma_0^2 \cdot 4\pi h_0 + (1 - 1/\gamma_0^2)}{\beta_0'/\gamma_0^2 \cdot 4\pi h + (1 - 1/\gamma_0^2)} \quad (15)$$

Fig.11 に、例として Wave1、Wave2、Tohoku NS、Hachinohe NS を用いた減衰定数 h_0 が 0.05 及び 0.1 の場合における、突出比の逆数 $1/\gamma_0$ を示す。突出比の逆数 $1/\gamma_0$ は、建物周期 T によって値が異なるが、おおよそ一定の値を示しており、建物周期 T による影響度合いはさほど大きくない。

Table2 に各地震波から得られた減衰定数 h_0 が 0.05 及び 0.1 の場

Fig.10 The modified factor of absorbed energy by damping factor β_0, β_0'

Fig.11 The reciprocal of projected ratio at the maximum response $1/\gamma_0$

Fig.12 Response reduction factor (Earthquake motions in notification)

合における β_0'/γ_0^2 と突出比の逆数 $1/\gamma_0$ 及び減衰定数の補正係数 $(y_1/\bar{y}_1)^2$ の平均値を示す。 β_0'/γ_0^2 は最小値が 0.3、最大値が 0.8 となった。また、減衰定数の補正係数 $(y_1/\bar{y}_1)^2$ の値は減衰定数 h_0 に係わらず、おおよそ 0.7 となった。

Fig.12 に、建物周期 T を 0.5、1.0、1.5、2.0、2.5、3.0 とし、告示波 3 波を用いた場合の応答解析結果とその平均値、応答低減係数の修正式((15)式)の平均値及び文献⁹⁾で示した応答低減係数の略算式((9)式)を示す。また、(15)式における修正係数 β_0' と突出比の逆数 $1/\gamma_0$ には前述のように建物周期 T ごとの値を用い、(9)式における突出比 γ_0 には Table2 の値を用いた。その他、減衰定数 h_0 は 0.1 とした。なお、図中(19)式と(20)式の結果の検討については 3.3 節及び 4 章で後述する。Wave1 と Wave3 の場合、応答低減係数の略算式((9)式)に対し応答低減係数の修正式((15)式)の方が応答解析結果の平均値と良い対応を示した。Wave2 の場合では、応答低減係数の修正式((15)式)と応答低減係数の略算式((9)式)は殆ど同じであるが、もともと応答低減係数の略算式((9)式)の結果と応答解析結果の平均値との

差異が少ない。しかし、全ての告示波を用いた結果において、減衰定数 h が大きい範囲で応答解析結果の平均値と応答低減係数の修正式の平均値に差異が見られた。

3.3. 減衰による周期への影響の考慮

Fig.13、Fig.14 に Wave2 を用いた場合の 1 サイクル分の応答変位 y と継続時間 t の関係を示す。なお、Fig.13 に建物周期 T を 0.5、Fig.14 に建物周期 T を 1.0 とした結果を示す。減衰定数 h の値によって 1 サイクル分の応答周期が若干異なり、減衰定数 h の増大に伴い概して応答周期が延びている。以下では、この減衰定数 h の増大に伴う、応答周期の変動が応答低減係数に及ぼす影響を補正する係数を提案する。

文献⁹⁾より、減衰を有する一質点系が自由振動する場合、減衰定数 h の時の減衰応答周期 T_h は、非減衰応答周期 T を用いて(16)式で与えられる。同様にして、減衰定数 h_0 の時の減衰応答周期 T_0 は、(17)式となる。

$$T_h = \frac{T}{\sqrt{1-h^2}} \quad (16)$$

$$T_0 = \frac{T}{\sqrt{1-h_0^2}} \quad (17)$$

(16)式、(17)式より、減衰応答周期 T_0 と T_h の時の応答の比は速

Fig.13 Time history of displacement (T=0.5)

Fig.14 Time history of displacement (T=1.0)

Earthquake motion	β_0'/γ_0^2		$1/\gamma_0$		$(y_1/\bar{y}_1)^2$	
	h_0	h_0	h_0	h_0	h_0	h_0
	0.05	0.1	0.05	0.1	0.05	0.1
Wave1	0.7	0.5	0.8	0.6	0.8	0.7
Wave2	0.6	0.5	0.7	0.6	0.8	0.7
Wave 3	0.7	0.6	0.7	0.7	0.8	0.8
Tohoku NS	0.7	0.6	0.7	0.7	0.8	0.8
Tohoku EW	0.5	0.4	0.6	0.5	0.7	0.6
El Centro NS	0.7	0.7	0.7	0.7	0.8	0.9
El Centro EW	0.4	0.4	0.5	0.5	0.6	0.4
Hachinohe NS	0.6	0.6	0.7	0.7	0.7	0.7
Hachinohe EW	0.7	0.7	0.8	0.7	0.9	0.9
Taft NS	0.6	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7
Taft EW	0.6	0.3	0.7	0.3	0.8	0.5
Kobe NS	0.7	0.8	0.6	0.6	0.6	0.6
Kobe EW	0.5	0.4	0.6	0.4	0.6	0.4

度一定領域とすると T_h/T_0 となる((18)式)。以下では、(18)式を減衰定数 h の増大による応答低減係数への影響を補正する係数 ζ とし、その影響を検討した。

$$\zeta = \frac{T_h}{T_0} = \sqrt{\frac{1-h_0^2}{1-h^2}} \div \sqrt{1+h^2-h_0^2} \quad (18)$$

なお、定常応答時は減衰応答周期 T_h と非減衰応答周期 T が一致し、減衰定数 h の増大による応答周期への影響がないことから補正係数 ζ ((18)式)は 1 とする。

以上より、(15)式の応答低減係数の修正式を(19)式のように書き換える。

$$F_h = \frac{\beta_0' / \gamma_0^2 \cdot 4\pi h_0 + (1 - 1/\gamma_0^2)}{\beta_0' / \gamma_0^2 \cdot 4\pi h + (1 - 1/\gamma_0^2)} \cdot \zeta \quad (19)$$

前述 Fig.12 に、応答低減係数の修正式((19)式)の平均値と応答解析結果の平均値の比較を示す。ここで、(15)式と同様に、(19)式における修正係数 β_0' と突出比の逆数 $1/\gamma_0$ には建物周期 T ごとの値を用

いた。その他、実地震動も検討対象であることから建物周期 T が 0.5 秒の場合も含めて ζ は T_h/T_0 とした。なお、図中、(20)式及び実地震動に対する結果の検討については 4 章で後述する。告示波を用いた場合においては、全ての結果で補正係数 ζ を加えた応答低減係数の修正式((19)式)は応答解析結果の平均値とほとんど一致する結果となった。

4. 応答低減係数の簡易式の提案と解析結果及び既往式との比較

本章では、応答低減係数の修正式((19)式)を基に、応答低減係数を容易に評価しうる簡易式を提案し、応答解析結果及び既往の応答低減係数の提案式と比較する。また、本論文で提案した応答低減係数の修正式((19)式)と実地震動を用いた応答解析結果を比較し、その整合性を検証する。

応答低減係数の簡易式は(20)式で与えられる。ここで、減衰による吸収エネルギーの過大評価を防ぐため、(19)式の β_0' / γ_0^2 を Table2 の最小値である 0.3 とし、応答低減係数の簡易式を導出した。なお、(20)式における突出比の逆数 $1/\gamma_0$ は Table2 の値を用いる。

Fig.15 Response reduction factor (Actual earthquake motions)

Fig.16 Comparison of proposals of response reduction factor

$$F_h = \frac{10h_0 + 2.7(1 - 1/\gamma_0^2)}{10h + 2.7(1 - 1/\gamma_0^2)} \cdot \zeta \quad (20)$$

前述 Fig.12 に、告示波を用いた場合の応答解析結果の平均値と応答低減係数の簡易式((20)式)の比較を示す。応答低減係数の簡易式((20)式)は、Wave1 と Wave3 を用いた場合では応答解析結果の平均値とほぼ一致する結果となり、Wave2 を用いた場合では応答解析結果の平均値をやや過大評価する結果となった。

Fig.15 に実地震動を用いた場合の応答解析結果とその平均値、応答低減係数の修正式((19)式)の平均値、応答低減係数の簡易式((20)式)及び既往の応答低減係数の略算式((9)式)を示す。応答低減係数の修正式((19)式)は、El Centro EW を除けば既往の応答低減係数の略算式((9)式)と比較して応答解析結果の平均値と良い対応を示した。また、Tohoku EW、Hachinohe NS、Hachinohe EW、Taft EW、Kobe NS、Kobe EW の応答解析結果の平均値と良い整合性を示し、Tohoku NS、El Centro NS、Taft NS では応答解析結果の平均値を過小評価し、El Centro EW では応答解析結果の平均値を過大評価した。応答低減係数の簡易式((20)式)も、El Centro EW を除けば既往の応答低減係数の略算式((9)式)と比較して応答解析結果の平均値と良い対応を示した。また、Tohoku EW、El Centro NS、Hachinohe NS、Hachinohe EW、Kobe NS、Kobe EW においては、応答解析結果の平均値と良い整合性を示した。なお、Tohoku NS($T=2.5$)、El Centro NS($T=1.5$)及び Taft EW($T=1.0$)の応答解析結果は他の建物周期 T に比べ大きくばらつきが見られるが、これは主として減衰定数 $h=0.1$ の時の最大応答変位 y_2 が他の減衰定数 h に比べ小さい又は小さめの値となったためである。

Fig.16 に、代表的な既往の応答低減係数の提案式である建研式((21)式)¹⁾、笠井式((22)式)²⁾、秋山式((23)式)³⁾及び本論文で導出した応答低減係数の簡易式((20)式)を示す。なお、Fig.16 おける減衰定数 h_0 は 0.05 とした。

$$\text{建研式} : F_h = \frac{1 + 10h_0}{1 + 10h} \quad (21)$$

$$\text{笠井式} : F_h = \sqrt{\frac{1 + 25h_0}{1 + 25h}} \quad (22)$$

$$\text{秋山式} : F_h = \frac{1 + 3h_0 + 1.2\sqrt{h_0}}{1 + 3h + 1.2\sqrt{h}} \quad (23)$$

応答低減係数の簡易式((20)式)の突出比の逆数 $1/\gamma_0$ を 0.8 とした場合は建研式((21)式)、0.6 とした場合は笠井式((22)式)、0.4 とした場合は秋山式((23)式)とほぼ一致する。また、建研式((21)式)と応答解析結果の平均値の下限値が一致し、Taft EW を除けば秋山式((23)式)と応答解析結果の平均値の上限値が一致した。建研式((21)式)は主として告示波を、笠井式((22)式)、秋山式((23)式)は実地震動を対象として作成されていることが主たる理由であろう。

なお、実務的に応答低減係数の簡易式((20)式)を用いる場合、突出比の逆数 $1/\gamma_0$ については、長周期地震動で共振するような場合では 1.0 に近い値、告示波に対しては 0.6~0.8 程度の値をとることが考

えられる。また、直下地震のような地震動に対しては 0.3~0.5 程度の値を実情に応じ判断して用いることが必要であろう。例えば、設計者や行政判断の観点から安全側の設計を行う場合には、0.3 もしくはそれ以下の値をとることなども考えられる。その他、Fig.15 より、応答低減係数は建物周期 T の影響も見られるが減衰定数 h の方が応答低減係数の第一次的な影響因子であり、減衰定数 h に比べれば建物周期 T の影響が小さいこと、及び、弾塑性系の場合では建物周期 T は応答周期を用いる必要があり、建物周期 T を応答低減係数の関数とすると実務的に煩雑になることから、本論文では応答低減係数の提案式を文献⁹⁾と同様に建物周期 T の関数とせず、その平均値に対しての適合性を検討した。

5. まとめ

本論文では、文献⁹⁾の非定常応答時の応答低減係数に応答の非対称性を加味した減衰による吸収エネルギーの修正係数 β_0' と、減衰定数による周期の変動の影響を考慮した補正係数 ζ を用いることで、応答低減係数の修正式を提案した。また、応答低減係数の修正式に建物周期ごとの修正係数 β_0' 及び突出比の逆数 $1/\gamma_0$ を用い、具体的な応答低減係数を算出した。さらに、提案した応答低減係数の修正式を基に、応答低減係数の簡易式を提示した。

以下に、得られた知見を記す。

- ① 非定常応答時における応答低減係数を評価するための減衰定数の補正係数は $(y_1/\bar{y}_1)^2$ となる。ここで、 y_1 は最大応答直前のピーク値、 $\bar{y}_1$ は最大応答直前のピーク値と負側の最大変位の平均値である。また、本例ではその平均値はおおよそ 0.7 となった。
- ② 非対称の応答による減衰による吸収エネルギーへの影響を加味した修正係数 β_0' を減衰定数の補正係数 $(y_1/\bar{y}_1)^2$ と減衰による吸収エネルギーを表す β_0 より誘導し、 β_0' は建物周期の影響が小さいことを示した。
- ③ 減衰定数による周期の変動を考慮した補正係数 ζ を誘導し、応答低減係数の修正式を提案した。
- ④ 非定常応答時の応答低減係数の修正式は下式で与えられる。

$$F_h = \frac{\beta_0'/\gamma_0^2 \cdot 4\pi h_0 + (1 - 1/\gamma_0^2)}{\beta_0'/\gamma_0^2 \cdot 4\pi h + (1 - 1/\gamma_0^2)} \cdot \zeta$$

ここで、 β_0' は応答の非対称性を加味した減衰による吸収エネルギーの修正係数、 γ_0 は突出比、 ζ は減衰による周期の変動を補正する係数、 h 及び $h_0(=10\%)$ は減衰定数である。

- ⑤ 応答低減係数の修正式に、建物周期ごとの修正係数 β_0' と突出比の逆数 $1/\gamma_0$ を用いた平均値が、告示波による応答解析結果の平均値とほぼ一致することを示した。また、実地震動に対しても文献⁹⁾の応答低減係数の略算式より良い対応を示す。
- ⑥ 応答低減係数の修正式の β_0'/γ_0^2 を安全側の 0.3 とし、応答低減係数の簡易式を下式とした。

$$F_h = \frac{10h_0 + 2.7(1 - 1/\gamma_0^2)}{10h + 2.7(1 - 1/\gamma_0^2)} \cdot \zeta$$

応答低減係数の簡易式は文献⁹⁾の応答低減係数の略算式より応答解析結果の平均値と良い対応を示す。なお、突出比の逆数 $1/\gamma_0$ を 0.8 とした場合は建研式、0.6 とした場合は笠井式、0.4 とした場合は秋山式とほぼ一致する。

謝辞

本研究では、気象庁に公開されている強震波形(1995 年兵庫県南部地震)を利用させていただきました。ここに記し、深く感謝の意を表します。また、本研究の一部は平成 29 年度特別研究員奨励費(課題番号：17J02633、研究代表者：大塚悠里)により行った。

参考文献

- 1) Commentary on Structural Regulations of the Building Standard Law of Japan Editorial Committee: 2015nenban Kenchikubutsu no Kouzoukankei Gijutsukijun Kaisetsusho (Commentary on Structural Regulations of the Building Standard Law of Japan 2015 Edition), Official Gazette Cooperation of Japan, 2015(in Japanese)
建築物の構造関係技術基準解説書編集委員会：2015 年版建築物の構造関係技術基準解説書,全国官報販売協同組合, 2015
- 2) Kasai, K., Ito, H. and Watanabe, A. : Peak Response Prediction Rule for a Sdof Elasto-Plastic System Based on Equivalent Linearization Technique, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), No.571, pp.53-62, 2003.9(in Japanese)
笠井和彦, 伊藤浩資, 渡辺厚：等価線形化手法による一質点弾塑性構造の最大応答予測法, 日本建築学会構造系論文集, 第 571 号, pp.53-62, 2003.9
- 3) Akiyama, H. : Earthquake-Resistant Design Method for Buildings Based on Energy Balance, Gihodo Shuppan Co., Ltd. 1999(in Japanese)
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
- 4) Okano, H., Nagano, M., Imamura, A., Tokumitsu, R. and Hijikata, K. : Scaling Equation Between Response Spectrum and Energy Spectrum, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), Vol.74, No.637, pp.477-486, 2009.3 (in Japanese)
岡野創, 永野正行, 今村晃, 徳光亮一, 土方勝一郎：応答スペクトルとエネルギースペクトルのスケールリング, 日本建築学会構造系論文集, 第 74 巻, 第 637 号, pp.477-486, 2009.3
- 5) Hiraishi, H., Otsuka, Y., Zhu, Y., Oi, K., Ode, D. and Kobayashi, M. : Study on Response Evaluation of Buildings at Resonance, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), Vol.81, No.719, pp.19-27, 2016.1(in Japanese)
平石久廣, 大塚悠里, 朱盈, 大井希良里, 大出大輔, 小林正人：建築物の共振時における応答評価に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 81 巻, 第 719 号, pp.19-27, 2016.1
- 6) Hiraishi, H., Zhu, Y., Oi, K., Otsuka, Y., Ode, D. and Inai, E. : The Evaluation of Reduction Factor by Damping in Non-Stationary Elastic Response Based on Energy Theory, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), Vol.81, No.719, pp.29-37, 2016.1(in Japanese)
平石久廣, 朱盈, 大井希良里, 大塚悠里, 大出大輔, 稲井栄一：エネルギーに立脚した非定常弾性応答における減衰による応答低減係数の評価, 日本建築学会構造系論文集, 第 81 巻, 第 719 号, pp.29-37, 2016.1
- 7) Kozo Keikaku Engineering Inc. : ARTEQ for Windows Version6.1
- 8) Matsushima, Y., Research Leader : Kousoukenchikubutsu no Douteikikaisekiyou Jishindou ni Kansurukenyuu (Study on Seismic Motions for Dynamic Analysis of High-Rise Buildings), 1994 BCJ Research Grant Report, No.9404, 1995(in Japanese)
研究代表者 松島豊：高層建築物の動的解析用地震動に関する研究, (財)日本建築センター平成 6 年度研究助成報告書 No.9404, 1995
- 9) Shibata, A. : Dynamic Analysis of Earthquake Resistant Structures, Tohoku Univ. Press, 2010

*Yuri OTSUKA^{*1}, Ying ZHU^{*2}, Mie ITO^{*3},
Daisuke ODE^{*4} and Hisahiro HIRAISHI^{*5}*

^{*1} Grad. Student, Graduate School of Science and Technology, Meiji Univ.

Research Fellow of Japan Society for the Promotion of Science, M.Eng.

^{*2} Technology Development Division, Fujita Corporation, M.Eng.

^{*3} Grad. Student, Graduate School of Science and Technology, Meiji Univ.

^{*4} Technical Research Institute, Obayashi Corporation

Grad. Student, Graduate School of Science and Technology, Meiji Univ., M.Eng.

^{*5} Prof., Dept. of Architecture, School of Science and Technology, Meiji Univ., Dr.Eng.

(Visiting Research Fellow, Building Research Institute)

This paper presented an accurate response reduction factor for non-stationary elastic response which was modified from the past reduction factor in Ref.6). In the modification, the influence of the asymmetry of the response of the absorbed energy by the damping factor of one cycle just before the maximum response was taken into account, and the influence of the damping factor on the building period was also taken into account.

Furthermore, the paper proposed the simplified formula for response reduction factor.

Finally, the compatibility was examined for both the modified formula and the simplified formula using the response analytical results by actual earthquake motions and earthquake motions in notification.

The major findings obtained in this paper were as follows.

- 1) The correction coefficient of the equivalent damping factor for evaluating the response reduction factor in non-stationary response is $(y_l/y_l -)^{1/2}$. Here, y_l is the peak value before the maximum response, and $y_l -$ is the average of y_l and the opposite peak value before the maximum response. The average value of $(y_l/y_l -)^{1/2}$ is approximately 0.7.
- 2) It is proved that the new modified factor β_0' of the absorbed energy by damping factor which taken the influence the asymmetry of the response into account is less influenced by the period of the buildings than the modified factor β_0 of absorbed energy by damping factor proposed in Ref.6).
- 3) The modified formula for response reduction factor in non-stationary elastic response is expressed as $Fh = [\{ \beta_0' \gamma^2 \cdot 4\pi h_0 + (1 - 1/\gamma^2) \} / \{ \beta_0' \gamma^2 \cdot 4\pi h + (1 - 1/\gamma^2) \}] \cdot \zeta$. Here, γ is the projected ratio at the maximum response, and $h_0 (=10\%)$ and h are damping factors.
- 4) The modified formula for response reduction factor using $\beta_0' \gamma^2$ and $1/\gamma$ for each building period shows better compatibility with the response analytical results using actual earthquake motions and earthquake motions in notification than the past approximate formula of response reduction factor of Ref.6) does.
- 5) The simplified response reduction factor can be expressed as $Fh = [\{ 10h_0 + 2.7(1 - 1/\gamma^2) \} / \{ 10h + 2.7(1 - 1/\gamma^2) \}] \cdot \zeta$ in which $\beta_0' \gamma^2$ is set to be 0.3 considering safety side. The simplified formula shows excellent correlation with the results of the response analysis than the past approximation formula dose. When $1/\gamma$ is set to 0.4, it is close to Akiyama Formula, and when it is set to 0.6, it is close to Kasai formula, and when it is set to 0.8, it is close to Kenken formula.

(2017年7月10日原稿受理, 2017年12月8日採用決定)