鉄筋コンクリート造建築物の必要水平耐力に関する研究
STUDY ON REQUIRED LATERAL LOAD CARRYING CAPACITY OF
REINFORCED CONCRETE BUILDINGS稲井 栄一*, 北村 梢**, 丸橋 奈々子***, 平石 久廣****
Eiichi INAI, Kozue KITAMURA, Nanako MARUBASHI
and Hisahiro HIRAISHI

In this paper, simple equations for the required lateral load carrying capacity of reinforced concrete buildings using the equivalent linearization method and the equal energy concept which is used in the calculation of lateral load carrying capacity of the current seismic regulations are shown based on two bi-linear restoring force models with the constant initial stiffness and the constant yield deformation. Then, comparisons of the two methods and the two bi-linear restoring force models are conducted. As a result, it is concluded that the method based on the bi-linear restoring force model with the constant yield deformation is rational and effective for the required lateral load carrying capacity of the buildings with ductile moment-resisting frames.

Keywords : Reinforced concrete buildings, Seismic design, Required lateral load carrying capacity,

Equivalent linearization method, Calculation of lateral load carrying capacity, Equal energy concept

鉄筋コンクリート造建築物, 耐震設計, 必要水平耐力, 等価線形化法, 保有水平耐力計算, エネルギー一定則

1. はじめに

建築物の地震時の応答は、建築物の周期と減衰に大きく依存する。柴田¹⁾は、等価剛性による周期と履歴面積に基づいた減衰定数を用いることで、地震時の弾塑性応答を算定し得る等価線形化法を提示している。また、2000年に導入された限界耐力計算では、応答値の算定に等価線形化法が用いられており、その妥当性の検証は文献^{2), 3)}等でなされている。

著者等は、文献⁴⁾において、極短周期の領域、加速度一定領域、速度一定領域および変位一定領域からなる応答スペクトルに対し、等価線形化法に基づいた応答値の算定式を誘導するとともに、その算定式より定まる必要水平耐力と法令の保有水平耐力計算の必要水平耐力との比較を行い、建築物の高さ、許容する塑性率によっては、両者に極めて大きな差異が生じることを指摘している。また、文献⁵⁾では、保有水平耐力計算を合理的な規定とするための修正法を提案している。

本論では、まず、等価線形化法、および、保有水平耐力計算の基本原理であるエネルギー一定則を、建築物の復元力特性を表す2つの完全弾塑性型モデル（初期剛性一定型と降伏変形一定型）に適用し、各々の場合における必要水平耐力の算定式を簡便な形で示した。次に、これらの算定式を用いて等価線形化法とエネルギー一定則

との関連を検討し、保有水平耐力計算では考慮されていない加速度一定領域における建築物の周期の伸びによるポテンシャルエネルギーの増大を考慮すれば、エネルギー一定則による必要水平耐力は等価線形化法によるものとほぼ同程度となることを示している。

さらに、本論では、初期剛性一定型の完全弾塑性モデルの降伏変形の検討、ならびに、初期剛性一定型と降伏変形一定型の完全弾塑性モデルから導かれるベースシア係数—応答変位関係の検討から、梁降伏先行型の純フレームの建築物に対して、降伏変形一定型の完全弾塑性モデルに基づく必要水平耐力の算定法が合理的で有用であることを示している。

2. 降伏変形一定型および初期剛性一定型復元力特性モデルに対する等価線形化法による必要ベースシア

2.1 等価線形化法による必要ベースシアの算定式

文献⁵⁾に示したように、限界耐力計算で規定される地盤種別ごとの加速度応答スペクトル（ただし、周期0.16s以上の加速度一定領域および速度一定領域）を対象とした場合、等価線形化法による建築物の全重量に対する必要ベースシア係数 C_{BT} は(1)式で表される。ただし、(1)式は塑性率 μ が1以上の場合を対象とし、有効質量比として0.82を設定して得られたものである。

* 山口大学大学院理工学研究科 教授・博士(工学)

** 山口大学大学院理工学研究科 博士前期課程・大学院生

*** 山口大学大学院理工学研究科 助教・博士(工学)

**** 明治大学理工学部建築学科 教授・工博
(独立行政法人建築研究所 客員研究員)

Prof., Graduate School of Science and Eng., Yamaguchi Univ., Dr. Eng.

Graduate Student, Graduate School of Science and Eng., Yamaguchi Univ.

Assistant Prof., Graduate School of Science and Eng., Yamaguchi Univ., Dr. Eng.

Prof., Dept. of Architecture, School of Science and Technology, Meiji Univ., Dr. Eng.
(Visiting Research Fellow, Building Research Institute)

$$C_{BT} = \begin{cases} Z \cdot F_h & (\text{加速度一定領域: } Te \leq Tc \text{ の場合}) \\ \left(\frac{Z \cdot Tc \cdot g}{2\pi} \right)^2 \frac{1}{g} \frac{1}{R_y \cdot H} \cdot \frac{F_h^2}{\mu} & (\text{速度一定領域: } Te > Tc \text{ の場合}) \end{cases} \quad (1a)$$

ここで、 R_y および H は文献⁴⁾の定義による建築物の降伏時全体変形角および降伏時代表高さで、 $R_y \cdot H$ は建築物の降伏変形 δ_y である。 Z は地震地域係数で、 Tc は第1種地盤では0.64s、第2種地盤では0.96s、第3種地盤では1.28sである。 g は重力加速度を表す。 F_h は減衰による応答加速度の低減率で、限界耐力計算の告示⁶⁾では(2)式で与えられる。(2)式中の he は等価減衰定数で、主筋とコンクリートの付着が適切に確保されている場合には(3)式で与えられる。

$$F_h = \frac{1.5}{1 + 10 \cdot he} \quad (2) \quad he = 0.25 \left(1 - \frac{1}{\sqrt{\mu}} \right) + 0.05 \quad (3)$$

また、 Te は応答時の建築物の等価周期で(4)式で表される。

$$Te = \begin{cases} \sqrt{\frac{\mu}{F_h}} \cdot To & (Te \leq Tc \text{ の場合}) \\ \frac{\mu}{F_h} \cdot To & (Te > Tc \text{ の場合}) \end{cases} \quad (4a)$$

(4)式中の To は、加速度応答スペクトル（加速度一定領域で $Z \cdot g$ 、速度一定領域で $Z \cdot Tc / T \cdot g$ 、ここで T は周期）に対する応答変位が建築物の降伏変形 $\delta_y (= R_y \cdot H)$ に一致する時の建築物の周期で、(5)式で与えられる。本論では、以下、 To を基準周期と呼ぶ。

$$To = \begin{cases} 2\pi \sqrt{\frac{R_y \cdot H}{Z \cdot g}} & (Te \leq Tc \text{ の場合}) \\ \frac{(2\pi)^2}{Z \cdot Tc \cdot g} R_y \cdot H & (Te > Tc \text{ の場合}) \end{cases} \quad (5a)$$

ここで、(1a)式によるベースシア係数を $C_{BT,A}$ 、(1b)式によるベースシア係数を $C_{BT,V}$ と置く。加速度応答スペクトルおよび建築物の H と R_y が一定の場合、 $C_{BT,A}$ および $C_{BT,V}$ はともに塑性率 μ の関数になる (F_h も μ の関数)。以下では、同一の μ に対する $C_{BT,A}$ と $C_{BT,V}$ の大きさを比較する。まず、建築物の等価周期 Te が加速度一定領域にある場合、すなわち、 $Te \leq Tc$ の場合は、この式の Te に(4a)式を代入し、さらに To に(5a)式を代入し整理すると、(6a)式が得られる。また、建築物の等価周期 Te が速度一定領域にある場合、すなわち、 $Te > Tc$ の場合には、この式の Te に(4b)式を代入し、さらに To に(5b)式を代入し整理すると、(6b)式が得られる。

$$\begin{cases} C_{BT,A} \leq C_{BT,V} & (Te \leq Tc \text{ の場合}) \\ C_{BT,A} > C_{BT,V} & (Te > Tc \text{ の場合}) \end{cases} \quad (6a)$$

したがって、ある塑性率 μ に対して、建築物の応答時の等価周期 Te が加速度一定領域にあるか速度一定領域にあるかどうかは、その μ の値を用いた $C_{BT,A}$ と $C_{BT,V}$ の値を比較することでも判別可能で、 $C_{BT,A}$ と $C_{BT,V}$ のどちらか小さい方の値が必要ベースシア係数となる。なお、 $Te = Tc$ の場合は $C_{BT,A} = C_{BT,V}$ である。

2.2 降伏変形一定型モデルの場合

まず、図1の(b)に示すように降伏耐力が変化しても降伏変形が一定である完全弾塑性型の復元力特性を持つ建物群を想定する。この降伏変形一定型のモデルは、文献⁵⁾において、ひび割れが生じ剛性低下を起こす鉄筋コンクリート造建築物の復元力特性モデルとして用いたものである。(1)式において $C_{BT} = C_Y$ (C_Y : 降伏ベースシア係数) と置き、さらに、塑性率 $\mu = 1$ かつ $F_h = 1$ の時の(1)式によるベースシア係数を C_E として(7)式で表わすと、(8)式が得られる。

(a) 初期剛性一定型モデル

(b) 降伏変形一定型モデル

図1 完全弾塑性型の復元力特性モデル

$$C_E = \begin{cases} Z & (\text{加速度一定領域: } Te \leq Tc) \\ \left(\frac{Z \cdot Tc \cdot g}{2\pi} \right)^2 \frac{1}{g} \frac{1}{R_y \cdot H} = \frac{Z \cdot Tc}{To} & (\text{速度一定領域: } Te > Tc) \end{cases} \quad (7a)$$

$$C_E = \begin{cases} Z & (\text{加速度一定領域: } Te \leq Tc) \\ \left(\frac{Z \cdot Tc \cdot g}{2\pi} \right)^2 \frac{1}{g} \frac{1}{R_y \cdot H} = \frac{Z \cdot Tc}{To} & (\text{速度一定領域: } Te > Tc) \end{cases} \quad (7b)$$

$$\frac{C_Y}{C_E} = \begin{cases} F_h & (\text{加速度一定領域: } Te \leq Tc) \\ \frac{F_h^2}{\mu} & (\text{速度一定領域: } Te > Tc) \end{cases} \quad (8a)$$

$$\frac{C_Y}{C_E} = \begin{cases} F_h & (\text{加速度一定領域: } Te \leq Tc) \\ \frac{F_h^2}{\mu} & (\text{速度一定領域: } Te > Tc) \end{cases} \quad (8b)$$

C_E は、加速度一定領域および速度一定領域の各々において、基準周期 To を持つ弾性系の応答ベースシア係数を表わしており、 To の定義からも明らかに、この弾性系の応答変位は $\delta_y (= R_y \cdot H)$ である。なお、(6)式に示した同一の μ に対する加速度一定領域と速度一定領域の必要ベースシア係数の大小関係により、降伏変形一定型の必要ベースシア係数は、加速度一定領域の(8a)式と速度一定領域の(8b)式をまとめて、(9)式のように簡便な形で表すこともできる。

$$C_Y = C_E \cdot \frac{F_h^2}{\mu} \quad (9)$$

$$\text{ただし、} C_Y \leq Z \cdot F_h, C_E = \frac{Z \cdot Tc}{To}, To = \frac{(2\pi)^2}{Z \cdot Tc \cdot g} R_y \cdot H$$

(8)式あるいは(9)式に示されるように、必要ベースシア係数は、弾性系の応答ベースシア係数に対して、加速度一定領域では F_h 、速度一定領域では F_h^2/μ に比例して低減される。

なお、(8)式は応答時の等価周期におけるポテンシャルエネルギー（単位質量あたりのポテンシャルエネルギー）の釣り合いからも定めることができる。速度一定領域では、周期にかかわらず弾性系のポテンシャルエネルギーは一定であることから、図1(b)の弾性系のポテンシャルエネルギー $[1/2 C_E \cdot \delta_y]$ に減衰による低減を考慮した $[1/2 C_E \cdot \delta_y \cdot F_h^2]$ と図1(b)の弾塑性系のポテンシャルエネルギー

$[1/2 C_Y \cdot \mu \cdot \delta_y]$ を等値して(8b)式が得られる。一方、加速度一定領域においては、周期の2乗に比例してポテンシャルエネルギーは増大する。図1(b)の場合、応答時の等価周期は弾性系周期の $\sqrt{C_E/C_Y} \cdot \sqrt{\mu}$ 倍となることから、ポテンシャルエネルギーは弾性系周期のものの $C_E / C_Y \cdot \mu$ 倍となる。そこで、減衰による低減を考慮した応答時のポテンシャルエネルギー $[1/2 C_E \cdot \delta_y \cdot C_E / C_Y \cdot \mu \cdot F_h^2]$ と、弾塑性系のポテンシャルエネルギー $[1/2 C_Y \cdot \mu \cdot \delta_y]$ を等値して(8a)式が得られる。

2.3 初期剛性一定型モデルの場合

次に、図1(a)に示すように、初期剛性が一定の場合、すなわち、降伏変形 δ_y^* が降伏耐力に比例する完全弾塑性型の復元力特性をもつ建物群を想定する。なお、初期剛性一定型モデルにおける降伏変形と弾性系の応答ベースシア係数は降伏変形一定型のものと区別するため*を付加している。保有水平耐力計算では、エネルギー一定則による必要ベースシアの低減効果を説明するためにこのモデルが用いられている。図1(a)中 δ_E は弾性系の応答変位を表している。ここで、この初期剛性による初期周期を T_i とすると、弾性系の応答ベースシア係数 C_E^* は(10)式で、応答時の等価周期 T_e は(11)式で表される。

$$C_E^* = \begin{cases} Z & (\text{加速度一定領域 : } T_e \leq T_c) \\ \frac{Z \cdot T_c}{T_i} & (\text{速度一定領域 : } T_e > T_c) \end{cases} \quad (10a)$$

$$T_e = \sqrt{\mu} \cdot T_i \quad (11)$$

次に、応答時の等価周期におけるポテンシャルエネルギーの釣合いを考える。速度一定領域では、前節同様、図1(a)の弾性系のポテンシャルエネルギーに減衰による低減を考慮した $[1/2 C_E^* \cdot \delta_E \cdot F_h^2]$ と図1(a)の弾塑性系のポテンシャルエネルギー $[1/2 C_Y \cdot \mu \cdot \delta_y^*]$ を等値して、さらに、 $\delta_y^* = C_Y / C_E^* \cdot \delta_E$ の関係をを用いて(12b)式が得られる。一方、加速度一定領域においては、図1(a)の場合には応答時の等価周期は弾性系周期の $\sqrt{\mu}$ 倍となることから、応答時の減衰による低減を考慮したポテンシャルエネルギー $[1/2 C_E^* \cdot \delta_E \cdot \mu \cdot F_h^2]$ と弾塑性系のポテンシャルエネルギー $[1/2 C_Y \cdot \mu \cdot \delta_y^*]$ を等値し、(8a)式と同じ(12a)式が得られる。

$$\frac{C_Y}{C_E^*} = \begin{cases} F_h & (\text{加速度一定領域 : } T_e \leq T_c) \\ \frac{F_h}{\sqrt{\mu}} & (\text{速度一定領域 : } T_e > T_c) \end{cases} \quad (12a)$$

$$\frac{C_Y}{C_E^*} = \begin{cases} F_h & (\text{加速度一定領域 : } T_e \leq T_c) \\ \frac{F_h}{\sqrt{\mu}} & (\text{速度一定領域 : } T_e > T_c) \end{cases} \quad (12b)$$

2.1 節同様、(12a)式による加速度一定領域のベースシア係数を C_{BTA} 、(12b)式による速度一定領域のベースシア係数を C_{BTV} と置き、同一の μ に対する C_{BTA} と C_{BTV} の大きさを比較すると、 $T_e \leq T_c$ の場合は、この式の T_e に(11)式を代入して(6a)式が得られる。 $T_e > T_c$ の場合には同様に(6b)式が得られる。したがって、必要ベースシア係数は、加速度一定領域の(12a)式と速度一定領域の(12b)式をまとめて、(13)式のように簡便な形で表すこともできる。

$$C_Y = C_E^* \cdot \frac{F_h}{\sqrt{\mu}} \quad (13)$$

ただし、 $C_Y \leq Z \cdot F_h$ 、 $C_E^* = \frac{Z \cdot T_c}{T_i}$

(12)式あるいは(13)式より、必要ベースシア係数は、弾性系の応答ベースシア係数に対して、加速度一定領域では F_h 、速度一定領域で

表1 塑性率 μ と構造特性係数 D_s の関係⁴⁾

部材種別	FA	FB	FC	FD
塑性率	4以上	3以上4未満	2以上3未満	2未満
構造特性係数	0.3	0.35	0.4	-

は $F_h/\sqrt{\mu}$ に比例して低減されることがわかる。なお、(12)式の関係は既に文献¹⁾に示されている。

2つの復元力特性モデルによる必要ベースシアの比較は5章で行うが、 $T_i = \sqrt{\mu} / F_h \cdot T_o$ の関係が成立する場合、(9)式と(13)式は同一のベースシア係数を与える。

3. 初期剛性一定型および降伏変形一定型復元力特性モデルに対するエネルギー一定則による必要ベースシア

前章の2つの完全弾塑性型の復元力特性モデルを対象に、保有水平耐力計算に用いられているエネルギー一定則による必要ベースシアを示す。

3.1 初期剛性一定型モデルの場合

(a) 速度一定領域

図1(a)のように初期剛性が一定の場合、弾性系のポテンシャルエネルギー $[1/2 C_E^* \cdot \delta_E]$ と弾塑性系の最大応答変形時までの吸収エネルギー $[1/2 (2\mu - 1) C_Y \cdot \delta_y^*]$ を等値し、 $\delta_y^* = C_Y / C_E^* \cdot \delta_E$ の関係をを用いて(14)式⁷⁾が得られる。また、弾塑性系の履歴減衰による応答低減効果を考慮するために、弾塑性系と等値する弾性系のポテンシャルエネルギーを、 D_h (減衰による応答加速度の低減係数)を用いてあらかじめ低減すると、弾性系のポテンシャルエネルギーは $[1/2 C_E^* \cdot \delta_E \cdot D_h^2]$ となるので、前出の弾塑性系の吸収エネルギーと等値して(15)式⁸⁾が得られる。

$$\frac{C_Y}{C_E^*} = \frac{1}{\sqrt{2\mu - 1}} \quad (14) \quad \frac{C_Y}{C_E^*} = \frac{D_h}{\sqrt{2\mu - 1}} (= D_s) \quad (15) \quad D_h = \frac{1.5}{1 + 10h} \quad (16)$$

(15)式は、保有水平耐力計算における構造特性係数 D_s の実験および解析による評価式として文献⁹⁾に示されている。式中の D_h の評価式としては(16)式も示されているが、(16)式中の減衰定数 h の具体的な評価法が提示されていないため、現行の D_s の設定の際にどの程度の D_h が考慮されているかは明確ではない。ただし、文献⁴⁾に記したように、全体崩壊形の建築物を対象として、部材の塑性率と建築物の塑性率が等しいと仮定すると、文献¹⁰⁾に記載の鉄筋コンクリート造柱部材の靱性ランクと塑性率の関係から、 D_s の値と建築物の塑性率 μ の関係として表1の関係が想定できる。この場合、 D_h としては概ね0.7~0.8の値が設定されていることになる。なお、文献⁸⁾には、地震波形としてEl Centro(1940)を用いたバイリニア型の復元力特性モデルの時刻歴応答解析の結果から $D_h = 0.75$ がほぼ応答値の上限を与えることが示されている。

(b) 加速度一定領域

保有水平耐力計算においては、初期周期により定まる弾性系のポテンシャルエネルギーを用いてエネルギー一定則を適用しており、塑性化による周期の伸びの影響が考慮されていないため、等価線形化法と比べ、必要ベースシアに大きな差異が生じることは既に報告している⁵⁾。ここでは、等価線形化法と同様に、弾性系のポテンシャルエネルギーを応答時の等価周期により与えた場合のエネルギー一定則による必要ベースシアを示す。2.3 節で求めたように、応答時の等価周期におけるポテンシャルエネルギーは $[1/2 C_E^* \cdot \delta_E \cdot \mu]$

となる。これと弾塑性系の最大応答変形までの吸収エネルギー $[1/2 (2\mu-1) C_Y \cdot \delta_y^*]$ を等値すると(17)式が得られる。また同様に、 D_h を考慮すると(18)式が得られる。(15)式より(18)式は $D_s \cdot \sqrt{\mu}$ と表わすことができる。

$$\frac{C_Y}{C_E^*} = \frac{1}{\sqrt{2\mu-1}} \cdot \sqrt{\mu} \quad (17) \quad \frac{C_Y}{C_E^*} = \frac{D_h}{\sqrt{2\mu-1}} \cdot \sqrt{\mu} \quad (= D_s \cdot \sqrt{\mu}) \quad (18)$$

以上より、初期剛性一定型モデルの C_Y は、2.3節同様、速度一定領域の(15)式と加速度一定領域の(18)式をまとめた形で、初期周期 T_i を用いて(19)式のように表される。また、保有水平耐力計算の D_s を用いて表現すると(20)式となる。

$$C_Y = C_E^* \cdot \frac{D_h}{\sqrt{2\mu-1}} \quad (19)$$

$$\text{ただし、} \quad C_Y \leq Z \cdot \frac{D_h}{\sqrt{2\mu-1}} \cdot \sqrt{\mu}, \quad C_E^* = \frac{Z \cdot T_c}{T_i}$$

$$C_Y = C_E^* \cdot D_s \quad (20)$$

$$\text{ただし、} \quad C_Y \leq Z \cdot D_s \cdot \sqrt{\mu}, \quad C_E^* = \frac{Z \cdot T_c}{T_i}$$

3.2 降伏変形一定型モデルの場合

(a) 速度一定領域

図1(b)のように降伏変形が一定の場合、弾性系のポテンシャルエネルギー $[1/2 C_E \cdot \delta_y]$ と弾塑性系の吸収エネルギー $[1/2 (2\mu-1) C_Y \cdot \delta_y]$ を等値し、(21)式が得られる。また、弾性系のポテンシャルエネルギーを D_h により低減した場合には、(22)式が得られる。(15)式より、(22)式は D_s^2 と表せる。

$$\frac{C_Y}{C_E} = \frac{1}{2\mu-1} \quad (21) \quad \frac{C_Y}{C_E} = \frac{D_h^2}{2\mu-1} (= D_s^2) \quad (22)$$

(b) 加速度一定領域

2.2節同様、応答時の等価周期におけるポテンシャルエネルギーは $[1/2 C_E \cdot \delta_y \cdot C_E / C_Y \cdot \mu]$ となる。これと弾塑性系の吸収エネルギー $[1/2 (2\mu-1) C_Y \cdot \delta_y]$ を等値すると(23)式が得られる。また、 D_h を考慮すると(24)式が得られる。(23)式および(24)式は、初期剛性一定型モデルにおける(17)式および(18)式と同じである。

$$\frac{C_Y}{C_E} = \frac{1}{\sqrt{2\mu-1}} \cdot \sqrt{\mu} \quad (23) \quad \frac{C_Y}{C_E} = \frac{D_h}{\sqrt{2\mu-1}} \cdot \sqrt{\mu} \quad (= D_s \cdot \sqrt{\mu}) \quad (24)$$

以上より、降伏変位一定型モデルの C_Y は、2.2節同様、速度一定領域の(22)式と加速度一定領域の(24)式をまとめた形で、(5b)式の基準周期 T_0 を用いて(25)式のように表される。また、保有水平耐力計算の D_s を用いて表現すると(26)式となる。

$$C_Y = C_E \cdot \frac{D_h^2}{2\mu-1} \quad (25)$$

$$\text{ただし、} \quad C_Y \leq Z \cdot \frac{D_h}{\sqrt{2\mu-1}} \cdot \sqrt{\mu}, \quad C_E = \frac{Z \cdot T_c}{T_0}, \quad T_0 = \frac{(2\pi)^2}{Z \cdot T_c \cdot g} R_y \cdot H$$

$$C_Y = C_E \cdot D_s^2 \quad (26)$$

$$\text{ただし、} \quad C_Y \leq Z \cdot D_s \cdot \sqrt{\mu}, \quad C_E = \frac{Z \cdot T_c}{T_0}, \quad T_0 = \frac{(2\pi)^2}{Z \cdot T_c \cdot g} R_y \cdot H$$

4. 等価線形化法とエネルギー一定則の比較

本章では、塑性化および減衰による必要ベースシアの低減効果について、等価線形化法とエネルギー一定則の比較を行う。ただし、

(a) 初期剛性一定型モデル

(b) 降伏変形一定型モデル

図2 C_Y/C_E^* または C_Y/C_E と塑性率 μ との関係 (速度一定領域)

図3 C_Y/C_E^* または C_Y/C_E と塑性率 μ との関係 (加速度一定領域：初期剛性一定型および降伏変形一定型モデル)

エネルギー一定則においても、前章に示した加速度一定領域の周期の伸びの影響を考慮する。また、等価線形化法の減衰の評価には、(2)式および(3)式による告示⁶⁾の評価法を用いる。

4.1 速度一定領域

図2(a)は、初期剛性一定型モデルの場合において、等価線形化法による $C_Y/C_E^*-\mu$ 関係[(12b)式]、エネルギー一定則による $C_Y/C_E^*-\mu$ 関係[(15)式]ただし $D_h=0.75$ とした場合を示す、および、表1による $D_s-\mu$ 関係[$\mu=2$ の時 $D_s=0.4$ 、 $\mu=3$ の時 $D_s=0.35$ 、 $\mu=4$ の時 $D_s=0.3$ とした。以下同様]を示したものである。図に示すように、等価線形化法とエネルギー一定則は $\mu \geq 2$ の範囲ではほぼ

一致している。また、表 1 の関係とも良好に対応している。なお、 $\mu=1$ の近傍では、等価線形化法による C_Y/C_E^* は 1 に近い値となる。これは、等価減衰定数 h_e を与える (3) 式が剛性低下バイリニアモデルの履歴減衰をもとに定められており、ひび割れによる履歴減衰は考慮していないため、 $\mu=1$ で $F_h=1$ となるからである。

図 2(b) は、降伏変形一定型モデルの場合において、等価線形化法による $C_Y/C_E-\mu$ 関係 [(8b) 式]、エネルギー一定則 [(22) 式、 $D_h=0.75$]、および、表 1 による $Ds^2-\mu$ 関係 [$\mu=2$ の時 $Ds^2=0.16$ 、 $\mu=3$ の時 $Ds^2=0.1225$ 、 $\mu=4$ の時 $Ds^2=0.09$] を示したものである。この場合も、等価線形化法、エネルギー一定則と表 1 の関係は概ね良好に対応する。

したがって、速度一定領域では、初期剛性一定型モデルにおいても、降伏変形一定型モデルにおいても、エネルギー一定則と等価線形化法は、同程度の必要ベースシアの低減効果を与えていると言える。また、初期剛性一定型モデルにおいて定義された Ds を降伏変形一定型モデルに適用するには、 Ds を 2 乗して用いると良い近似となる。

4.2 加速度一定領域

図 3 は、等価線形化法による (8a) 式の $C_Y/C_E-\mu$ 関係 [あるいは (12a) 式の $C_Y/C_E^*-\mu$ 関係] とエネルギー一定則 ($D_h=0.75$) [(18) 式あるいは (24) 式]、および、表 1 による ($Ds\sqrt{\mu}$) $-\mu$ 関係 [$\mu=2$ の時 $Ds\sqrt{\mu}=0.5657$ 、 $\mu=3$ の時 $Ds\sqrt{\mu}=0.6062$ 、 $\mu=4$ の時 $Ds\sqrt{\mu}=0.6$] を表示したものである。図に示すように、 $\mu=2$ における表 1 による値が、等価線形化法、エネルギー一定則に比べ若干小さいが、これを除けば、3 者の関係は概ね一致しており、加速度一定領域においても、周期の伸びによるポテンシャルエネルギーの増大を考慮すれば、エネルギー一定則による必要ベースシアの低減効果は等価線形化法と同程度になっていると言える。

なお、(9) 式と (25) 式、および、(13) 式と (19) 式の比較により、 $D_h=\sqrt{2\mu-1}/\sqrt{\mu}\cdot F_h$ 、あるいは、保有水平耐力計算における Ds を用いて $Ds=F_h/\sqrt{\mu}$ とすると、等価線形化法とエネルギー一定則による必要ベースシアの算定式は全く同一のものとなる。

5. 初期剛性一定型モデルと降伏変形一定型モデルの比較

5.1 降伏変形

初期剛性一定型モデルにおいては、ある一定の周期 T_i を用いて、弾性系のベースシアを定め、その値に建築物の塑性化および減衰から定めた低減係数を乗じて必要水平耐力を算出する。必要水平耐力とその周期（剛性）から定まるモデルの降伏変形は必要水平耐力に比例し、この降伏変形が対象とする建築物の降伏変形の実状と異なる場合、必要水平耐力の評価に差異が生じることになる。一方、降伏変形一定型モデルにおいては、対象とする建築物の降伏変形を予め想定し、その降伏変形を用いて必要水平耐力を算出するものである。以下では、初期剛性一定型モデルの降伏変形を検討する。

図 1(a) の初期剛性一定型モデルにおいて、 δ_y^* を ($R_y \cdot H$) と置き、降伏点周期を T_i とすれば、重力式 $T_i=2\pi\sqrt{(R_y \cdot H)/(C_Y \cdot g)}$ より、(27) 式が得られる。(27a) 式は加速度一定領域における R_y と T_i の関係を、(27b) 式は速度一定領域における R_y と T_i の関係を表している。

(a) 速度一定領域

(b) 加速度一定領域

図 4 初期剛性一定型モデルの R_y

$$R_y = \begin{cases} \frac{T_i^2}{H} \cdot F_h \cdot \frac{Z \cdot g}{(2\pi)^2} & (\text{加速度一定領域}) \quad (27a) \\ \frac{T_i}{H} \cdot \frac{F_h}{\sqrt{\mu}} \cdot \frac{Z \cdot T_c \cdot g}{(2\pi)^2} & (\text{速度一定領域}) \quad (27b) \end{cases}$$

(27b) 式の速度一定領域の R_y は、 $F_h/\sqrt{\mu}$ (Ds に相当する)、設計用地震動の大きさを表す $Z \cdot T_c$ および T_i に比例する。ここで、建築物の降伏時の代表高さ H を文献⁴⁾と同様、7 階建て程度の建築物を想定し $H=0.715H_T$ (H_T は建物高さ) とし、 $Z=1.0$ かつ $T_c=1.28s$ 、 $Z=1$ かつ $T_c=0.96s$ 、 $Z=0.8$ かつ $T_c=0.64s$ の 3 つの場合について、 T_i を $0.02H_T$ および $0.0346H_T$ として算出した (27b) 式による R_y の値を塑性率 μ を横軸にして図 4(a) に示す。なお、 $0.02H_T$ は、保有水平耐力計算の設計用一次固有周期に相当する。また、 $0.0346H_T$ は、 $0.02H_T$ をひび割れ前の弾性周期とみなし、標準的な降伏点剛性低下率の一つとして $1/3$ の値を用いた場合の降伏点周期に相当する。 F_h の算定には、(2) 式および (3) 式を用いた。

図 4(a) に示すように、塑性率 μ が大きくなるほど、また、 $Z \cdot T_c$ の値が小さくなるほど R_y は小さくなる。 T_i が $0.02H_T$ の場合には $\mu \geq 2$ の場合には $1/200$ より小さい値となる。梁降伏先行型の純フレームの建築物を対象に考えた場合、柱・梁部材の降伏変形角は、普通強度の主筋の場合、概ね $1/200 \sim 1/100$ 程度であり、曲げ強度との相関も小さい¹¹⁾。したがって、フレームの降伏時全体変形角 R_y も同程度と考えられることから、このような建築物に対しては、 $T_i=0.02H_T$ の場合は小さい R_y を設定していることになる。また、 $0.0346H_T$ の場合には、 $Z \cdot T_c$ が比較的大きく、 μ が小さい範囲では、

R_y が $1/200 \sim 1/100$ 程度の値になっているが、 μ が 3 より大きくなると R_y は $1/200$ より小さくなる。(7b)式および(8b)式に示すように、速度一定領域の必要ベースシア係数は R_y に反比例し、 R_y が小さい場合は大きなベースシア係数が必要となる。

図 4(b)は、(27a)式による加速度一定領域における R_y を示したものである。速度一定領域同様、 $H=0.715H_T$ とし、 $Z=1.0, 0.9, 0.8$ の 3 つの場合について、 T_i が $0.02H_T$ および $0.0346H_T$ の場合を示している。なお、(27a)式に示すように、 R_y は F_h および Z に比例するとともに、 T_i の 2 乗に比例するため、 R_y は建物高さ H_T に比例することになる。そこで、図 4(b)では $H_T=15\text{m}$ の場合を基準に R_y を表している。 H_T が 15m の時、 T_i が $0.02H_T$ の場合では $\mu \geq 2$ の範囲で R_y は $1/700$ より小さい。また、 $0.0346H_T$ の場合でも $\mu \geq 2$ の範囲では $1/200$ より小さい値となる。なお、 H_T が小さい場合には R_y はさらに小さくなる。 H_T が大きい場合には R_y も大きくなるが、 H_T が大きい場合には、後出の図 7(a)に示すように、塑性化により速度一定領域に移行することになる。本例では、加速度一定領域における初期剛性一定型モデルの降伏変形は、フレームの降伏変形に比べ、かなり小さい値を与えていると言える。

5.2 応答変位

本節では、2 つの完全弾塑性型復元力モデルの応答変位について検討する。なお、応答変位は等価線形化法により求め、減衰の評価には告示⁶⁾の(2)式および(3)式を用いる。

(a) 速度一定領域

図 5 は、速度一定領域における初期剛性一定型モデルの C_y/C_E^* と応答変位 δ の関係、降伏変形一定型モデルの C_y/C_E と応答変位 δ の関係を示したものである。ただし、応答変位 δ は、初期剛性一定型モデルの場合には弾性系の応答変位 δ_E で、降伏変形一定型モデルの場合は、降伏変形 δ_y で基準化して示している。初期剛性一定型モデルの場合の応答変位は、いわゆる、変位一定則がほぼ成立しており¹⁾、 C_y/C_E^* が 0.3 程度以上であれば、応答変位が弾性応答変位を超えることはない。これは、初期剛性一定型モデルの降伏変形 δ_y^* は C_y が小さくなればなるほど小さくなるため、応答変位が小さい場合でも塑性率が大きく減衰が大きいためである。一方、降伏変形一定型モデルの場合は、 C_y が小さくなるほど応答変位が大きくなる。 C_y/C_E が 0.2 の場合には塑性率は 2 程度となる。降伏変位一定型モデルの場合に、応答変位が降伏耐力にかかわらず一定となるのは、対象とする応答スペクトルに変位一定の領域がある場合に限られる⁴⁾。

(b) 加速度一定領域

図 6 は、加速度一定領域における初期剛性一定型モデルの C_y/C_E^* と応答変位 δ の関係、降伏変形一定型モデルの C_y/C_E と応答変位 δ の関係を示したものである。同様に、応答変位は、初期剛性一定型モデルの場合には弾性系の応答変位 δ_E で、降伏変形一定型モデルの場合は、降伏変形 δ_y で基準化している。速度一定領域と比較して、加速度一定領域では、周期の伸びによるポテンシャルエネルギーの増大により、かなり大きな耐力を有している場合でも大きな応答変位が生じることになる。ただし、応答変位が増大し、等価周期 T_e が速度一定領域に達すれば、必要水平耐力は小さくなる。

図 5 C_y/C_E^* または C_y/C_E と応答変位 δ の関係 (速度一定領域)

図 6 C_y/C_E^* または C_y/C_E と応答変位 δ の関係 (加速度一定領域)

(c) 地震地域係数 $Z=1$ におけるベースシア係数—応答変位関係

加速度一定領域と速度一定領域を合わせて、地震地域係数 $Z=1$ の第 2 種地盤を対象に、初期剛性比例型モデル[(13)式]では $T_i=0.0346H_T$ 、降伏変形一定型モデル[(9)式]では $R_y=1/150$ とした場合のベースシア係数—応答変位関係を図 7 に示す。なお、両モデルとも H は $0.715H_T$ とし、図 7 では、建物高さ H_T ごとにベースシア係数 C_{BT} ($=C_y$) と応答時の全体変形角 R ($=\delta/H$) の関係 (ただし、 $1 \leq \mu \leq 5$) を表した。5.1 節に示したように、両モデルでは降伏変形の設定が異なるため、 R_y が両モデルで一致する速度一定領域の塑性率 $\mu=2$ 近傍では両者のベースシア係数—応答変位関係はほぼ一致するが、 R_y が一致しない場合には、ベースシア係数—応答変位関係には大きな差異が生じており、必要ベースシアの算定では、降伏変形の設定が極めて重要になることを示している。

6. 降伏変形一定モデルの耐震設計への適用に関する考察

図 7(b) 同様に、地震地域係数 $Z=1$ を対象に、第 1 種地盤および第 3 種地盤の場合について、 $R_y=1/150$ とした場合の降伏変形一定モデル[(9)式]によるベースシア係数—応答変位関係を図 8 に示す。建築物の必要ベースシア係数は、許容する塑性率 μ あるいは全体変形角 R に応じて設定されることになるが、ここでは、一例として、建物高さに関わらず、塑性率 $\mu=2$ すなわち $R=1/75$ を許容変形角として、必要ベースシア係数を検討する。図 7(b) の第 2 種地盤の場合には、 $H_T=36\text{m}$ の場合 C_{BT} がほぼ 0.3 である。 $H_T=24\text{m}$ で 0.45、 $H_T=15\text{m}$ および $H_T=9\text{m}$ では加速度一定領域に留まるため 0.6 を超え

(a) 初期剛性一定型モデル

(b) 降伏変形一定型モデル

図7 C_{BT} と R の関係 ($Z=1$ 、第2種地盤)

(a) 第3種地盤

(b) 第1種地盤

図8 C_{BT} と R の関係 ($Z=1$ 、降伏変形一定型モデル)

るベースシア係数が必要となる。また、 H_T が 36m を超える場合には必要ベースシアは 0.3 以下の値となる。これは、既に文献⁵⁾で指摘したように、 R_y が一定で、かつ、同一の許容塑性率を設定した場合には、速度一定領域において建築物に要求される単位質量あたりのポテンシャルエネルギーは一定となるため、代表高さでの水平変形量が大きくなる高い建築物の方が必要ベースシア係数が小さくてすむからである（必要ベースシア係数は建物高さに反比例する）。

図8の地盤種別が異なる場合を比較すると、図8(a)の第3種地盤においては、速度一定領域の必要ベースシア係数は図7(b)に示した第2種地盤の場合に比べ大きくなり、 $H_T=36m$ の場合でも 0.535 のベースシア係数が必要となる。一方、図8(b)の第1種地盤では、同一の $H_T=36m$ の場合、必要ベースシアは 0.134 となり、第3種地盤の場合の 1/4 となる。このように必要ベースシア係数が小さい場合、建築物の水平耐力は中地震に対する損傷限界で決定され、大地震時の応答は許容変形角に対して小さくなる。

前述のように、第1種地盤における必要ベースシア係数が第3種地盤の場合の 1/4 になるのは、許容塑性率が同一の場合、速度一定領域において建築物に要求される単位質量あたりのポテンシャルエネルギーの大きさが $(Z \cdot T_c)$ の 2 乗に比例するからである[第1種地盤では第3種地盤の $(0.64/1.28)^2 = 1/4$ 倍になる]。一方、(13)式の初期剛性一定型モデルや保有水平耐力計算では、 T_i あるいは設計用一次固有周期が同一で、かつ、許容塑性率も同一 (D_s も同一) であれば、速度一定領域の必要ベースシア係数は $(Z \cdot T_c)$ に比例し、

第1種地盤の必要ベースシア係数は第3種地盤の 1/2 となる。これは、5.1 節で述べたように、モデルの R_y が速度一定領域では $Z \cdot T_c$ に比例するため、第1種地盤の R_y は第3種地盤の R_y の 1/2 になっており、 R_y が一定の場合に比べ、1/2 の逆数の 2 倍分大きなベースシアが必要になるためである。

以上のように、本論に示した降伏変形一定型モデルに基づく必要ベースシア係数の算定法[(9)式]は、等価線形化法ならびにエネルギー一定則にも基づいており、梁降伏先行型の純フレームの建築物に対して合理的で有用な方法と言える。ただし、必要ベースシア係数の算定では、建築物の限界変形に対し、十分安全となるように、許容塑性率あるいは許容変形角を設定することが肝要である。

7. まとめ

本論で明らかにした主要な知見を以下に記す。

- ① 加速度一定および速度一定領域からなる応答スペクトルに対し、建築物の復元力特性として、初期剛性一定型と降伏変形一定型の完全弾塑性型モデルを適用し、等価線形化法およびエネルギー一定則に基づく必要ベースシアの算定式を簡便な形で示した。
- ② 加速度一定領域における周期の伸びによるポテンシャルエネルギーの増大を考慮すれば、初期剛性一定型モデルの場合においても、降伏変形一定型モデルの場合においても、 $D_b=0.75$ とするエネルギー一定則による必要ベースシアは、 $2 \leq \mu \leq 5$ の範囲において、(2)式および(3)式を用いた等価線形化法によるものと同程度とな

ることを示した。

③初期剛性一定型モデルにおいては、塑性化および減衰の起点となる降伏変形が、許容する塑性率および設計用地震動の大きさの影響を受けることを指摘した。また、初期剛性一定型モデル[(13)式]と降伏変形一定型モデル[(9)式]のベースシア係数—応答変位関係の違いを示し、必要ベースシアの算定では降伏変形の設定が極めて重要になることを示した。

④地震地域係数 $Z=1$ の各地盤種別における降伏変形一定型モデル[(9)式]に基づく必要ベースシア係数—応答変位関係を示すとともに、許容変形角に基づき必要ベースシア係数を決定する方法を例示し、梁降伏先行型の純フレームの建築物の必要水平耐力の算定において、本モデル[(9)式]が合理的で有用な方法であることを示した。なお、本モデルの適用に際しては、建築物の限界変形に対し、十分安全となるように許容塑性率あるいは許容変形角を設定する必要がある。

参考文献

- 1) 柴田明徳：等価線形系による非線形地震応答の解析に関する一考察、東北大学建築学報、第 16 号、pp. 27-36、1975
- 2) 岡野創、宮本裕司：等価線形化に基づく応答評価式、エネルギーバランスに基づく考察と限界変形の超過確率の評価への適用、日本建築学会構造系論文集、第 562 号、pp. 45-52、2002. 12
- 3) 倉本洋、勅使川原正臣、小鹿紀英、五十田博：多層建築物の等価 1 自由度系縮約法と地震応答予測精度、日本建築学会構造系論文集、第 546 号、pp. 79-85、2001. 8
- 4) 平石久廣、稲井栄一、和田寿一、福島徹：鉄筋コンクリート造建築物の地震応答と耐震性能評価に関する研究、日本建築学会構造系論文集、第 613 号、pp. 105-112、2007. 3
- 5) 平石久廣、稲井栄一、福島徹：鉄筋コンクリート造建築物の耐震規準における規定の意義とその合理化について、日本建築学会構造系論文集、第 622 号、pp. 163-168、2007. 12
- 6) 建設省告示 1457 号：Tdi、Bdi、安全限界変位、Ts、Bsi、Fh 及び Gs を計算する方法並びに屋根ふき材等及び外壁等の構造耐力上の安全を確かめるための構造計算の基準を定める件、2000
- 7) A. S. Veletsos and N. M. Newmark：Effect of Inelastic Behavior on the Response of Simple Systems to Earthquake Motions, Proceedings of the 2nd WCEE, pp. 895-912, 1960
- 8) John A. Blume：A Reserve Energy Technique for the Earthquake Design and Rating of Structures in the Inelastic Range, Proceedings of the 2nd WCEE, pp. 1061-1083, 1960
- 9) 国土交通省住宅局建築指導課・日本建築主事会議・財団法人日本建築センター編集：2001 年版 建築物の構造関係技術基準解説書、平成 13 年 3 月
- 10) 広沢雅也、山内博之：新しい耐震設計法に基づく建築物の構造設計の実際、季刊カラム、82 号、pp. 5-38、1981. 10
- 11) 財団法人国土開発技術研究センター：建設省総合技術開発プロジェクト「鉄筋コンクリート造建築物の超軽量・超高層化技術の開発」、平成 4 年度構造性能分科会報告書、1993. 3

(2008 年 2 月 10 日原稿受理、2008 年 8 月 11 日採用決定)