RC 構造物のエネルギーに基づく設計法開発のための基礎的研究

(その2 設計限界変形を保証するに必要な耐力と対繰り返し劣化能力)

FUNDAMENTAL STUDY ON THE DEVELOPMENT OF SEISMIC DESIGN
BASED ON ENERGY CONCEPT—Part 2 Strength and cyclic deterioration capacity required to
control maximum response displacement—

衣笠 秀行*, 野村 設郎**

Hideyuki KINUGASA and Setsurou NOMURA

In order to control maximum response displacement of a structure under earthquake ground motions, the structure is required to have proper strength and cyclic deterioration capacity. In the previous paper, EIV which was defined as energy input velocity under stationary vibration was formulated. EIV was represented as a function of strength(P_y) and maximum response displacement ($\delta_{\max}$). In this paper, a procedure to determine the strength(P_y) and the cyclic deterioration capacity which were required to control maximum response displacement was presented based on the concept of EIV.

It was confirmed that EIV was almost equal to actual energy input velocity $(\Delta E / T_e)_{\max}$ of inelastic response. Strength(P_y) required to control maximum displacement was obtained by solving the relationship, $EIV = (\Delta E / T_e)_{\max}$. The strength(P_y) was represented as a function of design maximum displacement(δ_D), total input energy(E_D) and actual energy input velocity $(\Delta E / T_e)_{\max}$. The procedure to determine the strength(P_y) was validated from inelastic response analysis. In order to control maximum displacement, it is necessary to secure not only proper strength but also enough cyclic deterioration capacity. The capacity was defined based on EIV and its characteristics were discussed.

Keywords: design maximum deformation, requisite strength, cyclic deterioration capacity, energy input velocity, total input energy

設計限界変形、必要耐力、対繰り返し劣化能力、エネルギー入力速度、エネルギー入力量

1. はじめに

地震時に構造物に生じる変形量の大きさを予測する、あるいは、これを耐震性能指標として積極的に考えていこうとする研究が最近、活発に行われるようになってきた^{2)~8)}。応答変形量の大きさを基に耐震性能の評価を行うためには、次の3つの評価を精度よく行う必要がある。

- ①地震の威力の評価(応答変形量と相関の強い指標の導入)
- ②構造物の応答性状の評価(応答変形量、繰り返し回数など)
- ③変形量を構造物の損傷の面から評価(変形量と損傷の関係)

本論文の目的は、地震の威力をエネルギー入力量とエネルギー入力速度で表した場合の応答変形量の予測方法を提案し、これを通して耐震性能指標として変形量を用いることの可能性について考えることにある。すなわちここで取り組むのは、上記3項目の内の①と②についてということになる。

前報(その1)¹⁾では、エネルギー入力速度 EIV の概念を導入し、変形量を損傷指標とした耐震性評価法について論じた。この方法は、地震継続時間内に構造物に入力されるエネルギー量と構造物が吸収可能なエネルギー量の大小関係をもとに耐震性能評価を行うおうとするものである。性能評価の精度は構造物が吸収可能なエネルギー量を計算する上で基にしている、EIV の概念の妥当性に左

右されるところが大きい。

EIV は定変位振動する構造物へのエネルギー入力速度で定義される。この定変位振動の振幅を応答時の最大変位で与えられれば、EIV の値はその応答の刻々変化するエネルギー入力速度の最大値(以下、実エネルギー入力速度)とおおよそ一致することが予想される。

前報では、弾塑性応答解析を行い得られた最大変位を基に EIV を計算し、これが5%減衰の粘弾性応答における実エネルギー入力速度とほぼ同様の値となっていることを確認した。しかしながら、EIV が塑性化から受ける影響については多少検討を行ったものの、これが弾塑性応答時の実エネルギー入力速度とどの程度の一致を示すかについては検討されておらず、EIV に基づく性能評価法の有効性を十分示すには至っていない。

ここでは、前報では幾分複雑となってしまった EIV の定式化を明快にするとともに、関連する定式化を分かり易く整理を行う。また、EIV と、弾塑性応答における実エネルギー入力速度を直接比較することにより、EIV の物理的意味の妥当性を検討し、これを基に、設定された限界変形を保証するに必要な耐力および構造物が有すべき対繰り返し劣化能力を明らかにしようとするものである。

前報では耐力が既知、応答変形量が未知とした場合の応答変形

本論文の一部は日本建築学会大会学術講演梗概集、1996.8に発表している。

* 東京理科大学理工学部建築学科 講師・工博

** 東京理科大学理工学部建築学科 教授・工博

Lecturer, Dept. of Architecture, Faculty of Science and Engineering, Science Univ. of Tokyo, Dr. Eng.

Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Science and Engineering, Science Univ. of Tokyo, Dr. Eng.

予測を問題としたが、ここでは逆に、耐力を未知、応答変形量を既知とした場合の問題について論じることとする。すなわち、目標応答変形を設定した場合に、これを保証するに必要な耐力の算出方法を示し、これがどの程度の精度を有するかの検証を行う。

前報では、応答変形量予測の精度検証を行っていないが、ここで行う検証結果が良好なものであれば、条件は異なるものの同じ EIV の概念に基づく定式化であり、前報で述べた評価手法の妥当性をも同時に示すことができると考えている。

また、地震時に応答変形が目標変形を上回らないことを保証するためには、耐力と同時に、構造物には目標変形が生じても耐力劣化や繰返し劣化が生じない、いわゆる変形能力が求められる。構造物の変形能力は一般にある載荷履歴下での繰返し載荷実験で確認される。しかしながら、変形能力の大小は載荷履歴の違いによって影響を受けるにもかかわらず、これを定める理論的根拠は存在せず、各研究者によって実験用載荷履歴は経験的に定められているのが現状である。

ここでは、EIV の概念に基づき計算される地震時繰返し回数をもとに、目標応答変形を保証するために構造物が有すべき繰返し劣化能力を明らかにし、これを通して、構造物の変形能力を繰返し実験から確認する上で設定すべき載荷履歴の設定方法について考えることにする。

2. 定変位エネルギー吸収を仮定したエネルギー入力速度 EIV

実際の、最大応答変位が δ_D となったときのエネルギー入力(図1左側)を、振幅 δ_D の定変位振動によるエネルギー入力(図1右側)に置き換えることを考える。エネルギー入力速度 EIV は、この定変位振動で置き換えたときのエネルギー入力速度で定義される。また、この最大応答変位を振幅とする定変位振動で、エネルギー入力 E_D を消費するに必要な繰返し回数を地震時繰返し回数 n_D

と呼び、構造物が地震時に受ける繰返し回数の多少を表す指標としての意味を持つ。前報では n_D に基づき、地震継続時間内に構造物が吸収可能なエネルギー量を算出し、これと構造物に入力されるエネルギー量との比較を行うことで構造物の耐震性能評価を行った。

エネルギー入力速度 EIV は図1の右側の図から、エネルギー入力 E_D と地震時繰返し回数 n_D 及び図2で定義される振幅 δ_D の時の等価周期 T_e を用い式(1)で定義される。

$$EIV = \frac{E_D}{n_D T_e} \quad \text{---- (1)}$$

実際の応答におけるエネルギー入力速度は刻々変化するものであるが、耐力劣化やループ面積の劣化が起こらない限り、エネルギー入力速度は最大応答変位時に最大値となることが予想される(図1左側)。実際このことは、1/2 サイクルで定義されるエネルギー入力速度でおおよそ成り立つことが堀・井上らにより確認されている³⁾。すなわち、最大応答変位を振幅とした定変位振動時のエネルギー入力速度で定義される EIV は、実際の応答における刻々変化するエネルギー入力速度の最大値とおおよそ一致することが考えられる。このことは次章で検証する。

定変位振動時の構造物のエネルギー吸収 E_s を、図3に示すように、弾性バネに吸収されるエネルギー(E_y)と塑性バネに吸収されるエネルギー($E_{ds} + \sum E_i$)に分け、式(2)でモデル化する。こ

$$E_s = E_y + E_{ds} + E_c \quad \text{----- (2)}$$

$$\begin{aligned} E_y &= 0.5 P_y \delta_y \\ E_{ds} &= 2 P_y (\delta_D - \delta_y) \\ E_c &= 4 P_y \xi (n_D - 1) (\delta_D - \delta_y) \end{aligned}$$

で、 E_{ds} は1サイクル目に塑性バネに吸収されるエネルギー、

図1 エネルギー入力速度 EIV

図2 等価周期 T_e とループ面積 E_i

図3 定変位振動エネルギー入力のモデル化

ΣE_i はそれ以降、 n_D サイクルまでに吸収されるエネルギーを示している。式中の P_y は降伏耐力、 δ_y は降伏変位、 δ_D は最大応答変位であり、図3に定義されている。また、 ξ はループ面積の大きさを表すパラメータであり、図4に定義されている。

なお、本論文では問題を簡単にするため、図5に示すようなシンプルな復元力特性モデルを仮定し、2サイクル目以降のループ面積 E_i は一定値を維持するものと仮定した。また、ここでは簡単化のため、構造物のエネルギー吸収として減衰によるエネルギー吸収分は考えていない。

減衰ゼロの弾性バネの最大応答変位はエネルギー入力量から決まり、エネルギー入力速度の大小とは関係しない。一方、塑性バネの最大応答変位はエネルギー入力量ではなく、エネルギー入力速

度の大きさに強く影響を受けることが予想される。式(2)において、エネルギー吸収を弾性バネに吸収されるものと塑性バネに吸収されるものに分けているのはこのような考えによる。

式(2)を n_D について解き $E_s = E_D$ とすると式(3)が導き出される。

$$n_D = \frac{E_D - E_y - E_{ds}}{4 P_y \xi (\delta_D - \delta_y)} + 1 \quad (3)$$

地震時繰り返し回数 n_D は式(1)の関係から分かるように、エネルギー入力速度が大きくなるほど小さくなる。しかしながら、式(3)の右辺第一項はゼロ以上の値をとり、どんなに大きなエネルギー入力速度の場合でも n_D は1より小さく計算されることはない。これは本定式化が振動する構造物を想定して行われているため、 $n_D=1$

表 1 神戸海洋気象台波解析ケース（全 54 ケース）

$\xi \backslash T_{ey}$	0.5(s)	1.0(s)	1.5(s)
0.5	$P_y/mg=0.4 \sim 1.73$ $\mu = 1.3 \sim 7.1$ (11 ケース)	$P_y/mg=0.23 \sim 0.93$ $\mu = 1.5 \sim 4.1$ (5 ケース)	$P_y/mg=0.16 \sim 1.0$ $\mu = 1.1 \sim 2.8$ (10 ケース)
0.125	$P_y/mg=0.4 \sim 2.5$ $\mu = 1.4 \sim 17.7$ (13 ケース)	$P_y/mg=0.23 \sim 0.93$ $\mu = 1.8 \sim 5.3$ (5 ケース)	$P_y/mg=0.16 \sim 1.0$ $\mu = 1.2 \sim 3.2$ (10 ケース)

表 2 EL-centro 解析ケース（全 37 ケース）

$\xi \backslash T_{ey}$	0.5(s)	1.5(s)
0.5	$P_y/mg=0.2 \sim 0.8$ $\mu = 1.2 \sim 4.4$ (11 ケース)	$P_y/mg=0.09 \sim 0.2$ $\mu = 1.1 \sim 2.0$ (7 ケース)
0.125	$P_y/mg=0.2 \sim 0.8$ $\mu = 1.6 \sim 8.4$ (11 ケース)	$P_y/mg=0.09 \sim 0.3$ $\mu = 1.1 \sim 2.8$ (8 ケース)

表 3 New RC 1 波 解析ケース（全 11 ケース）

$\xi \backslash T_{ey}$	0.5(s)	1.5(s)
0.5	$P_y/mg=0.2 \sim 1.0$ $\mu = 1.3 \sim 8.2$ (4 ケース)	$P_y/mg=0.1 \sim 0.6$ $\mu = 1.1 \sim 3.9$ (3 ケース)
0.125	$P_y/mg=0.2, 0.6$ $\mu = 3.4, 28.9$ (2 ケース)	$P_y/mg=0.2, 0.6$ $\mu = 1.3, 3.4$ (2 ケース)

表 4 New RC 2 波 解析ケース（全 11 ケース）

$\xi \backslash T_{ey}$	0.5(s)	1.5(s)
0.5	$P_y/mg=0.2 \sim 1.0$ $\mu = 1.3 \sim 7.5$ (4 ケース)	$P_y/mg=0.1 \sim 0.6$ $\mu = 1.2 \sim 3.6$ (3 ケース)
0.125	$P_y/mg=0.2, 0.6$ $\mu = 3.8, 23.7$ (2 ケース)	$P_y/mg=0.2, 0.6$ $\mu = 1.3, 4.3$ (2 ケース)

表 5 New RC 3 波 解析ケース（全 11 ケース）

$\xi \backslash T_{ey}$	0.5(s)	1.5(s)
0.5	$P_y/mg=0.2 \sim 1.0$ $\mu = 1.4 \sim 7.8$ (4 ケース)	$P_y/mg=0.1 \sim 0.6$ $\mu = 1.2 \sim 4.4$ (3 ケース)
0.125	$P_y/mg=0.2, 0.6$ $\mu = 3.5, 25.8$ (2 ケース)	$P_y/mg=0.2, 0.6$ $\mu = 1.5, 3.5$ (2 ケース)

図 4 ループ面積パラメータ ξ

図 5 復元力特性のモデル化

図 6 一方向変形によるエネルギー入力

と計算された場合には、実際には n_0 が1より小さい、図6に示すような一方変形によるエネルギー吸収が生じ、最大変位が $2\delta_0 - \delta y$ となる可能性をも考えておく必要がある。

$n_0=1$ のときには $E_c=0$ となり塑性バネのエネルギー吸収として E_{ds} のみが残ることになる。このときの E_{ds} は図3に示す正負対称か図6に示す片側のどちらかで与えられると考える必要がある。このため、 E_{ds} は1サイクル目に吸収できるエネルギー量としてよりもむしろ、エネルギー入力速度が大きくなり、 n_0 が1となって一方変形にのみ変形が生じた場合(図6)でも最低限、塑性バネが吸収するエネルギー量としての意味を持つように定められている。

エネルギー入力速度 EIV は、式(3)を式(1)に代入することにより求められる。次章ではこの EIV が実際の弾塑性応答時のエネルギー入力速度とどの程度の一致を示すか検討を行う。

3. 弾塑性応答での実エネルギー入力速度 $(\Delta E/Te)_{max}$

とエネルギー入力速度EIV

3. 1 実エネルギー入力速度 $(\Delta E/Te)_{max}$

質量1 ton の1質点系弾塑性応答解析を行い、図7に示すように、等価周期 T_e (図2参照)の刻み時間の間に入力されるエネルギー量 ΔE から $\Delta E/Te$ を計算し、刻み時間を0.01(s)ずつずらしながら刻々変化する $\Delta E/Te$ の最大値を求めた。以下ではこれを実エネルギー入力速度 $(\Delta E/Te)_{max}$ と呼ぶこととする。

応答解析に用いた地震波は、神戸海洋気象台波(NS)、EL-CENTRO(NS)、NewRCの3波(模擬地震波)の合計、5波である。解析パラメータは、降伏耐力 P_y 、降伏時周期 T_{ey} (図5参照)、ループ面積パラメータ ξ (図4参照)の3つであり、解析ケースを地震波別にまとめて表1,2,3,4,5に示す。解析ケースは神戸海洋気象台波54ケース、EL-CENTRO(NS)37ケース、NewRCの3波(模擬地震動)それぞれ11ケースの合計124ケースであり、同表中には応答解析の結果得られた塑性率 μ (=最大応答変位 δ_0 /降伏変位 δy)の範囲も示してある。なお、本論文で示す最大応答変位や塑性率は正負の値を平均した値である。

応答解析から得られた実エネルギー入力速度 $(\Delta E/Te)_{max}$ を縦軸に、等価周期 T_e を横軸に取り示したものが図8である。実エネルギー入力速度 $(\Delta E/Te)_{max}$ は等価周期 T_e が大きくなるほど小さくなる傾向にあること、神戸海洋気象台波のエネルギー入力速度は他の地震波と比較し、著しく大きな値となっていることがわかる。

図9は、 $T_{ey}=0.5(s)$ 、 $\xi=0.5$ の場合について、縦軸にエネルギー入力量 E_0 、横軸に実エネルギー入力速度 $(\Delta E/Te)_{max}$ を取り示したものである。相対的に、EL-CENTROはエネルギー入力速度、エネルギー入力量共に小さいのに対し、NewRCの3波はエネルギー入力速度はEL-CENTRO並みであるがエネルギー入力量は非常に大きい。神戸海洋気象台波の場合、エネルギー入力量はNewRCの3波と同程度で非常に大きく、さらに、エネルギー入力速度もNewRCの3波やEL-CENTROと比較し非常に大きくなっている。

図10はこのときの降伏耐力 P_y と応答塑性率 μ との関係を示したものである。同じ耐力における応答塑性率を比較するとEL-CENTROと比較しエネルギー入力量の大きいNewRC波は応答塑性率が大きくなっており、さらに、エネルギー入力速度、入力量ともに大きい神戸海洋気象台波ではNewRC波やEL-CENTROと比

図7 実エネルギー入力速度 $(\Delta E/Te)_{max}$ の算出

図8 実エネルギー入力速度

図9 解析に用いた地震波のエネルギー特性

図10 耐力と応答塑性率

較し塑性率が非常に大きな値となっていることが分かる。特に、エネルギー入力量はほぼ同じで、入力速度の異なる NewRC 波と神戸海洋気象台波で応答塑性率に大きな違いが生じていることは、地震の威力を考える上でエネルギー入力速度が重要であることを示している。

3. 2 エネルギー入力速度EIVと

実エネルギー入力速度 $(\Delta E / T_e)_{\max}$

エネルギー入力速度 EIV を式(1),(3)から求め、これが弾塑性応答時の実エネルギー入力速度 $(\Delta E / T_e)_{\max}$ とどの程度の相関を有するかの検討を行う。なお、EIV の算出にあたり、 E_D, δ_D, T_e にはそれぞれ応答解析の結果得られたエネルギー入力量、最大応答変位(正負の平均値)、等価周期を用いた。

図 11,12,13 に、各地震波について縦軸に実エネルギー入力速度 $(\Delta E / T_e)_{\max}$ を、横軸にエネルギー入力速度 EIV を取り示した。なお、NewRC の3波はほぼ同じ傾向を示したことから、これらをまとめて一つの図に示してある。エネルギー入力速度 EIV は実エネルギー入力速度 $(\Delta E / T_e)_{\max}$ と比較し多少小さめの値を示しているものの、地震波、降伏時周期 T_{ey} 、ループ面積 ξ の違いに関わらず両者は高い相関を有しているといえる。

EIV は n_0 サイクルになされるエネルギー入力の平均速度で定義されている。このため、全サイクルを通しての最大値で定義された実エネルギー入力速度 $(\Delta E / T_e)_{\max}$ と比較し EIV は小さめの値となったことが考えられる。

以上のことは次式の関係がほぼ成り立つことを示しており、第2章で述べた EIV の物理的意味の妥当性を示す結果であるといえる。

$$EIV = \left(\frac{\Delta E}{T_e} \right)_{\max} \quad \text{----- (4)}$$

4. EIVに基づく必要耐力 P_y の算出とその精度検証

4. 1 EIVに基づく必要耐力 P_y の算出法

ここでは、前章で検証を行ない、ほぼ成立が確認された式(4)の関係をもとに、ある設定した塑性率 $\mu (= \delta_D / \delta_y)$ を保証するに必要な耐力 P_y の算出方法について述べることにする。

式(4)の左辺 EIV は P_y や μ の関数の関数として与えられることから、式(4)を P_y について解くことにより、設定塑性率 μ を保証するに必要な耐力が求められる。

エネルギー入力速度 EIV は式(3)を式(1)に代入することにより次式で求められる。

$$EIV = \frac{E_D}{\left(\frac{E_D - E_y - E_{ds}}{4 P_y \xi (\delta_D - \delta_y)} + 1 \right) T_e} \quad \text{----- (5)}$$

式(4)と式(5)から次の等式が成り立つ。

$$\frac{E_D}{\left(\frac{E_D - E_y - E_{ds}}{4 P_y \xi (\delta_D - \delta_y)} + 1 \right) T_e} = \left(\frac{\Delta E}{T_e} \right)_{\max} \quad \text{----- (6)}$$

EIV $= (\Delta E / T_e)_{\max}$ のときの地震時繰り返し回数を n_0' で表すと、 n_0' は式(1)から次のように計算される。

図 11 EIV と実エネルギー入力速度の対応 (神戸)

図 12 EIV と実エネルギー入力速度の対応 (EL-CENTRO)

図 13 EIV と実エネルギー入力速度の対応 (NewRC1,2,3)

図 14 精度検証

$$n_D' = \frac{E_D}{T_e \left(\frac{\Delta E}{T_e} \right)_{\max}} \quad \text{----- (7)}$$

式(6)と式(7)から式(3)と類似の次(8)が求められる。

$$n_D' = \frac{E_D - E_y - E_{ds}}{4 P_y \xi (\delta_D - \delta_y)} + 1 \quad \text{---- (8)}$$

式(2)に示した E_y 、 E_{ds} の定義、及び $\delta_y = P_y / K_{ey}$ の関係を考慮し、式(8)を P_y について解くと、塑性率 μ を保証するに必要な耐力 P_y は式(9)で与えられる。なお、 K_{ey} は降伏時剛性であり、図5に定義されている。

$$P_y = \sqrt{\frac{2 K_{ey} E_D}{1 + 4(\mu - 1) + 8\xi(n_D' - 1)(\mu - 1)}} \quad \text{---- (9)}$$

実エネルギー入力速度 $(\Delta E / T_e)_{\max}$ とエネルギー入力量 E_D は既知であると仮定すると、設定塑性率 μ を与えれば、これを保証するに必要な耐力 P_y が式(9)から計算されることになる。なお、 T_e は $\sqrt{\mu}$ と降伏時周期 T_{ey} のかけ算で計算され、ループ面積パラメータ ξ はあらかじめ設定可能であると仮定する。

4. 2 必要耐力 P_y の精度検証

第3章の応答解析では、降伏耐力 P_y を設定し応答解析を行った結果、図14の上段に示すように、実エネルギー入力速度 $(\Delta E / T_e)_{\max}$ とエネルギー入力量 E_D 、そして、応答塑性率 μ が得られた。ここでは、これとは逆に図14に示すように、応答から得られた μ 、 $(\Delta E / T_e)_{\max}$ 、 E_D からどの程度の精度で式(7)、(9)を用いることにより解析時に設定した降伏耐力 P_y を推定可能か検証を行う。

式(7)の E_D と $(\Delta E / T_e)_{\max}$ にそれぞれ応答から得られたエネルギー入力量と実エネルギー入力速度を代入し、地震時繰り返し回数 n_D' を求める。このとき、等価周期 T_e は解析時に設定した降伏時周期 T_{ey} と応答塑性率 μ の平方根を掛け合わせることで与えられる。式(9)に、この n_D' と応答により得られた塑性率 μ 、設定した ξ を代入すると、目標塑性率 μ を実現するに必要な耐力 P_y が計算されることになる。

図15、16、17にそれぞれ神戸海洋気象台波、EL-CENTRO、NewRC2波の降伏時周期 $T_{ey} = 0.5, 1.5$ 、ループ面積パラメータ $\xi = 0.5, 0.125$ の時の推定 P_y と解析時 P_y (図14参照)の比較を、横軸に応答塑性率 μ を取り示す。なお、NewRC1,2,3波はほぼ同様の結果となったのでここではNewRC2波の結果のみを示してある。

これらの図から、地震波の違いや、ループ面積の大小、周期の長短に関わらず、推定された P_y は解析時の P_y と非常に良く一致していることがわかる。このことは、エネルギー入力量 E_D と実エネルギー入力速度 $(\Delta E / T_e)_{\max}$ があらかじめ正しく与えられれば、設計塑性率 μ を保証するに必要な耐力 P_y は式(9)を用い精度良く推定可能であることを示している。

なお、推定 P_y が解析時 P_y と比較し大きめの値となっているのは、3.2節で述べたように、エネルギー入力速度 EIV が実エネルギー入力速度 $(\Delta E / T_e)_{\max}$ と比較し多少小さめの値となっているため

図15 必要耐力の推定 (神戸海洋気象台波)

図16 必要耐力の推定 (EL-CENTRO)

図17 必要耐力の推定 (NewRC 2)

と考えられる。

耐力 P_y の推定は、図3に示す定変位繰り返しのエネルギー吸収モデルと式(4)に示す EIV と実エネルギー入力速度 $(\Delta E / T_e)_{\max}$ の関係を基に行っている ($n_0' = 1$ となったものではなく図6のモデルを適用したものはなかった)。以上のことは、これらのモデル化および EIV の概念がますます妥当なものであったことを示している。

5. 地震時繰り返し回数 n_0 と

構造物に求められる対繰り返し劣化能力

5. 1 地震時繰り返し回数 n_0

図 18 に耐力推定時に式(7)を用いて計算された地震時繰り返し回数 n_0' の一例 ($\xi = 0.5$, $T_{ey} = 0.5$) を神戸海洋気象台波、EL-CENTRO、NewRC 2波について示す。なお、NewRC 1,2,3波はほぼ同じ傾向となったのでここでは NewRC 2波のみを示した。

エネルギー入力量とエネルギー入力速度が共に小さい EL-CENTRO と、共に大きい神戸海洋気象台波では、地震時繰り返し回数 n_0' はほぼ同じで1~4程度の値となっている。これに対してエネルギー入力量が大きく、入力速度が小さい NewRC 2波では地震時繰り返し回数 n_0' は7~11と大きな値を示している。また、塑性率が大きくなり、長周期化するに従って地震時繰り返し回数 n_0' は小さくなる傾向にあることが分かる。

秋山ら^{9), 10)}は最近、免震構造物あるいは一般構造物を対象に、定変位での2回の繰り返しによって吸収されるエネルギー量で地震エネルギーに対抗するとする簡便な設計法の提案を行っている。ここで算出した地震時繰り返し回数 n_0' は秋山らが2回と仮定した地震時の定変位繰り返し回数に相当するものである。エネルギー入力量 E_0 と実エネルギー入力速度 $(\Delta E / T_e)_{\max}$ が与えられれば、式(7)を用いて地震時繰り返し回数をより合理的に、構造物の等価周期をも考慮した形で算出可能になるものと思われる。

5. 2 構造物に求められる対繰り返し劣化能力

繰り返しや変形増加によって、耐力低下やエネルギー吸収能力の低下(ループ面積パラメータ ξ の減少)が生じる場合、現段階では構造物の応答変形量を精度良くコントロールすることは難しい。従って、設計塑性率 μ をあらかじめ設定し、応答塑性率をこれ以内にコントロールする設計法を考えると、構造部材には、その設計塑性率以内での繰り返しに対して耐力低下やエネルギー吸収能力の低下が生じない能力(対繰り返し劣化能力)が求められることになる。

地震時繰り返し回数 n_0' は地震時におけるエネルギー入力を定変位振動のエネルギー入力に置き換えたときの繰り返し回数であり、この繰り返し回数の間の安定したエネルギー吸収が、設計塑性率以内に応答塑性率を抑えるためには必要である。すなわち、構造物に求められる対繰り返し劣化能力は、「設計塑性率を振幅とする、地震時繰り返し回数 n_0' の定変位繰り返しに対して耐力およびエネルギー吸収能力の低下が生じない能力」と定義することができる。ここでは対繰り返し劣化能力を、設計限界変形以内に応答変形量を抑えるために、構造物が安定なエネルギー吸収能力を示すべき「载荷履歴」によって定義したことになる。

構造物の変形能力は一般にある载荷履歴下での繰り返し実験で

確認される。しかしながら、変形能力の大小は载荷履歴の違いの影響を受けるにも関わらず、これを決める理論的根拠はこれまで存在しなかった。ここで提案した、対繰り返し劣化能力はこの変形能力を確認する上での载荷履歴の設定方法の一つを与えるものである。

また、先に述べたように地震時繰り返し回数 n_0' が1の場合には、最悪のケースとして、図6に示す $2\mu - 1$ の一方向変形が発生する可能性が生じる。このため、このよう場合には $2\mu - 1$ の一方向変形に対して耐力劣化が生じないことも、構造物には求められることになる。

図 19 に一例として、設定塑性率 μ とそれを保証するに必要な耐力 P_y (式(9))および、このときに構造物に作用する繰り返し回数 n_0' (式(7))の具体的な数値例を示した(神戸海洋気象台波、 $T_{ey} = 0.5$ 、 $\xi = 0.5$)。例えば、塑性率 $\mu = 2$ を目標としたケースAの場合、 $P_y / mg = 1.1$ 程度の耐力と、塑性率 $\mu = \pm 2$ の振幅の4回の定変位繰り返しに対して耐力の劣化や、エネルギー吸収能力(ループ面積)の劣化が生じないことが求められることになる。一方、塑性率 $\mu = 6$ を目標としたケースBの場合には、 $P_y / mg = 0.7$ 程度の耐力と、 $\mu = \pm 6$ の振幅の1~2回の定変位繰り返しで耐力の劣化や、エネルギー吸収能力(ループ面積)の劣化が生じないことが求められることになる。

ケースAで要求される対繰り返し劣化能力は、変形量は塑性率2と大きくないが繰り返し回数は4回と多くなる。これに対し、ケースBでは変形量は塑性率6と大きい、繰り返し回数は1~2回と少ない。

また、ケースBの場合には、繰り返し回数 n_0' の値が1~2回となっており、最悪のケースとしてエネルギー吸収が図6に示した一方向

図 18 地震時繰り返し回数 (地震波の違いによる比較)

図 19 構造物に求められる耐震性能

変形によって行われる可能性が生じる。従ってケースBの場合には、塑性率($2\mu-1$)= 11 の一方向変形に対して耐力劣化が生じないことを確認し、最悪のケースにおける倒壊の可能性をも検討する必要があることになる。

6. まとめ

本研究は、地震時における構造物へのエネルギー入力量とエネルギー入力速度を基にした、設計限界変形 δ_0 を保証するに必要な耐力 P_y の算出方法および、このとき構造物に求められる対繰り返し劣化能力の提案を行ったものである。

前報¹⁾では定変位振動する構造物へのエネルギー入力速度で定義される EIV の概念の提案を行った。本報ではこれが、実際の応答において刻々変化するエネルギー入力速度の最大値(実エネルギー入力速度)とおおよそ一致すること(EIV=実エネルギー入力速度)を弾塑性応答解析により確認を行った。

EIV は構造物の特性から定式化されるものであり、最大変位 δ_0 や耐力 P_y の関数として式(5)で与えられる。すなわち、EIV=実エネルギー入力速度の等式(式(6))を、耐力 P_y について解くことにより、設計限界変形 δ_0 を保証するに必要な耐力 P_y が式(9)の形で求められることになる。

精度検証の結果、必要耐力の推定値は正解値より多少大きめの値となるもののよい一致を示しており、エネルギー入力量 E_0 と実エネルギー入力速度($\Delta E/Te$)max が正しく与えられれば、設計限界変形 δ_0 を保証するに必要な耐力は式(9)により精度よく推定可能であることが確認できた。

また、EIV の概念に基づき、設計限界変形 δ_0 を保証するために構造物に求められる対繰り返し劣化能力の提案を行った。これは、 δ_0 を振幅とした n_0 回の定変位繰り返しに対して耐力およびエネルギー吸収能力が劣化しない能力として定義される。 n_0 は実際の応答におけるエネルギー吸収を定変位振動によるエネルギーに置き換えたときの繰り返し回数であり、エネルギー入力量 E_0 と実エネルギー入力速度($\Delta E/Te$)max から式(7)で計算される。

構造物に求められる対繰り返し劣化能力を明らかにすることにより、これまで変形能力を繰り返し実験で確認する際に経験的に定められてきた載荷履歴を理論的根拠に基づき決定することを可能にすることが考えられる。

本研究は地震の威力を構造物へのエネルギー入力量とエネルギー入力速度で捉え、これらを基にした地震時応答変形量の推定方

法を示したものである。この推定が精度よく行われるためには、①地震時に構造物に入力されるエネルギー入力量と入力速度を精度よく推定する、②エネルギー入力量および入力速度と応答変形量の関係を明らかにする、必要がある。

本研究は、これら2項目を個々に検討を行い、独立に精度検証を行うことを研究方針としている。本論文はまず手始めとして、上記2項目の内の②について取り組んだものであり、エネルギー入力量とエネルギー入力速度が正しく与えられたとの仮定のもとで、提案した応答変形量推定式の精度検証を行い、ほぼよい推定精度を有していることを確認することが出来た。

今後の課題として、上記2項目の内の①である、地震時に構造物に入力されるエネルギー入力量とエネルギー入力速度の設定方法について明らかにする必要があると思われる。また、本研究の解析では、減衰定数をゼロとしてあり、減衰によるエネルギー吸収の影響が考慮されていない。また、ここで扱われている応答変位や応答塑性率は正負の平均として算出されており応答の正負の偏りの影響は無視されている。現在、これらについての検討を進めており、近い機会に成果の報告を行う予定である。

参考文献

- 1)衣笠秀行、野村設郎：RC 構造物のエネルギーに基づく設計法開発のための基礎的研究(その1. エネルギー入力速度 EIV を考慮した性能評価型設計法)、日本建築学会構造系論文報告集、第 486 号、pp.85-94、1996.8
- 2)諏訪仁、野畑有秀、鈴木哲夫：エネルギー入力率に基づく必要耐力の推定に関する一手法、構造工学論文集、Vol.43B、pp.523-539、1997.3
- 3)中村友紀子、壁谷澤寿海：地震動特性に基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)中村孝也、堀則男、井上範夫、柴田明徳：鉄筋コンクリート造建物における地震動入力エネルギーと応答最大塑性率との関係、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.461-462、1997.9
- 5)井上範夫、堀則男、中村孝也：RC 構造物の応答に対する地震動のエネルギー入力性状の影響、コンクリート工学年次論文報告集、第 19 巻、第 2 号、pp.531-536、1997.6
- 6)伊藤保、曾田五月也：地震エネルギー入力の非定常性を考慮した建築物の最大応答予測、日本建築学会大会学術講演梗概集 B、pp.635-636、1994.9
- 7)石丸辰治他：地震動のエネルギースペクトルの変数分離とその応用について(その1～4)、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.697-704、1995.8
- 8)川端一三、小谷俊介、小室努、原孝文：応答変形制御設計法(その1～4)、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.795-802、1996.9
- 9)秋山宏：耐震性能の多様化に対応した耐震設計、日本建築学会構造系論文報告集、第 472 号、pp.85-90、1995.6
- 10)Shoichi Yamaguchi, Hiroshi Akiyama, Akira Wada and Toshiyuki Nakazawa: Seismic Isolation System Design Procedure in Japan and its Comparison on the U.S., Technical Papers on Seismic Isolation, ACT-17-1, pp.435-446

(1998年4月30日原稿受理、1998年8月21日採用決定)