論文　エネルギー入力特性に着目したRC構造物の構造特性係数に関する研究

向井智久[*1]・衣笠秀行[*2]・野村設郎[*3]

要旨：筆者らは，地震入力特性に着目したエネルギーの釣合いに基づきRC構造物の最大応答変位の予測方法を提案している。その方法は①構造物の塑性化による地震入力エネルギー量の変動と②構造物の吸収エネルギーを求めるに当たって繰り返し挙動を考慮している点で実際の応答をより再現しているものといえる。このことを用いて構造特性係数DS'を算出するために，構造物の繰り返し数NDと塑性時の片寄り係数d，1サイクルでの最大の瞬間入力エネルギーΔEmaxに対する最初の半周期での履歴吸収エネルギーEds1の比率Eds1/ΔEmax（＝α）を導入し，DS'の意義について述べた。

キーワード：最大応答変位予測，構造特性係数，片寄り，繰り返し数，瞬間入力エネルギー

1. はじめに

現在，耐震設計法が性能評価型に移行し，その際構造物の性能を何らかの指標で表す必要がある。RC構造物の累積塑性変形量を定量化するには，繰り返し変形中の剛性，耐力劣化などの現象を把握しなければならず，現在のところ非常に困難である。そのような現状から，RC構造物の性能指標として最大応答変位が考えられ，それを予測する研究[1～3]が多い。最大応答変位が予測できれば構造物の安全限界変形以下であるかどうかの検討が可能となり，構造物を靭性の点からも評価できる。既往の研究において多く用いられてきた方法として「エネルギー一定則」や「変位一定則」があるが，両者は成立条件が明快であることなどから，二次設計における構造特性係数DSの算出に用いられている。しかし，この手法で最大応答変位を精度よく予測することは非常に困難であると考えられる。その理由として，エネルギー一定則はエネルギー入力量が構造物の塑性化により変化することを考慮しておらず，また構造物が片側でのエネルギー吸収を想定して解く事が挙げられる。

筆者らは，地震時における繰り返し数を地震入力の激しさを表すエネルギー入力速度概念から算出し，構造物の塑性化によるエネルギー入力量の変動を考慮して最大応答変位予測を行い，精度についても確認している[3)]。また，構造物の塑性時におこる片寄り機構を明確にし，その算出方法を示した[4)]。そこでそれらの研究から得られた知見に基づき，構造物の塑性化によるエネルギー入力量の変動や構造物の弾塑性時における繰り返し数を考慮したエネルギーの釣り合いから設計用地震動に応じたDS'の算出の提案を行い，その中で必要となる繰り返し数と片寄り量について説明した後にDS'の意義について述べる。また本手法を基に現行のエネルギー一定則や変位一定則の精度に関する検討の結果，本手法の概念の理解，整理を行うこととする。

2. エネルギー釣り合いに基づく構造特性係数DS'の算出

構造物の塑性化によるエネルギー入力量の変動や構造物の弾塑性時における繰り返し数を考慮したエネルギー一定則を以下の2つの

＊1　東京理科大学助手　理工学部建築学科　工修　（正会員）
＊2　東京理科大学助教授　理工学部建築学科　工博　（正会員）
＊3　東京理科大学教授　理工学部建築学科　工博　（正会員）

条件と3つの仮定を考慮して算出する。

■条件

①構造物の塑性化に伴う地震エネルギー入力量の変動

②構造物の地震時繰り返し応答（正負の応答）

■仮定

①最大応答変位は地震の瞬間入力エネルギーが最大となる時間(サイクル)で生じる

②**図1**に示す置換が可能である（文献3参照）

③1サイクルでの最大の瞬間入力Δ Emax に対する最初の半周期での履歴吸収エネルギー Eds1（**図3**）の比率 Eds1/ΔEmax（＝α）は構造物の降伏耐力に応じて**図2**に示すように変化する（文献4参照）

仮定①は瞬間入力と最大応答変位との相関性，仮定②はランダムな応答を定常なエネルギー吸収を行う応答に置き換えることの妥当性，仮定③は1サイクルの入力エネルギーΔEmax に対して構造物が半サイクルで吸収できるエネルギー量は降伏耐力の大きさに依存している解析結果に基づいている。

まず仮定①より，1サイクルでの瞬間入力エネルギーの最大値ΔEmax と1サイクルで吸収できる塑性履歴吸収エネルギー Eds*との釣り合いを式（1）に示す。

$$\Delta E_{max} = E_{ds}^{*} \tag{1}$$

次に仮定③から以下の式(2)が得られる。式中に示す Eds1 は**図3**で示すように，急激な入力があった際の最初の半周期で吸収するエネルギー量である。

$$E_{ds1} = \alpha \cdot \Delta E_{max} \tag{2}$$

1周期での瞬間エネルギーΔ Emax と全入力エネルギー量 ED との関係は仮定②より繰り返し回数 ND を用いて式(3)で表される。

$$E_D = \Delta E_{max} \cdot N_D \tag{3}$$

条件①から構造物が塑性化すると，式(3)左辺の入力エネルギー ED は周期の伸びにより変化する値となるため，**図4**より ED の値は△OBC ではなく△OFG の部分となる。図中 Key は降伏時剛性，Ke は等価剛性（**図5**参照）で

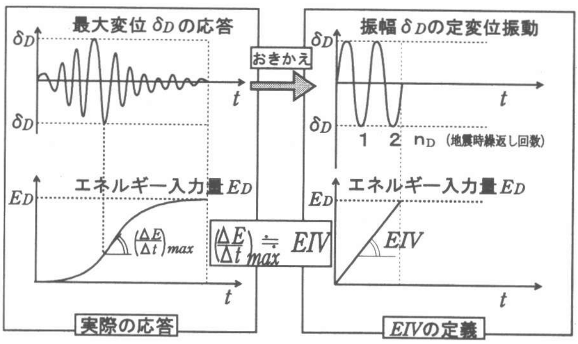


図1　仮定②（エネルギー入力速度概念図）

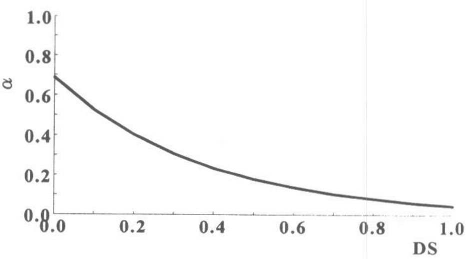


図2　仮定③

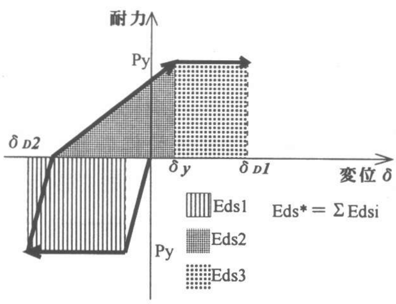


図3　1サイクル内のエネルギー吸収

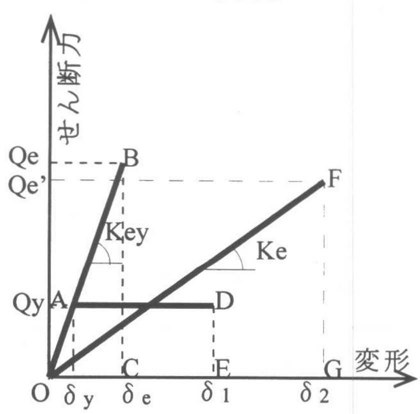


図4　塑性化を考慮したエネルギー一定則

ある。また，構造物の最大応答変位が発生する側で吸収するエネルギー量は**図4**中台形OADEである。これは式(2)の左辺に当たる。式(3)よりΔEmaxを求め，式(2)に代入し構造特性係数DS'（構造物耐力/地震外力）が式(4)及び(5)で導かれる（過程を付録1に示す）。

$$DS'=\left(\frac{Qy}{Qe'}\right)=\sqrt{\frac{\alpha}{2(d-1/\mu av)\cdot ND}} \tag{4}$$

$$DS'=\sqrt{\frac{\alpha}{2(2-d-1/\mu av)\cdot ND}} \tag{5}$$

ただしμavは平均塑性率である。

また，式中のdは構造物が中心位置からの片寄りを表す係数であり，式(6)に示す。平均塑性率とは正負の最大塑性率の平均値である。

$$d = 最大塑性率/平均塑性率 \tag{6}$$

式（4）は最大応答変位が発生する1サイクルにおいて最初の半周期側で，式(5)は後半の半周期側で最大応答変位が発生する場合である。以上のことから，DS'を厳密なエネルギーの釣り合いから求めることで，地震時の繰り返し数NDや片寄り係数dを考慮して降伏耐力を求める式を示した。

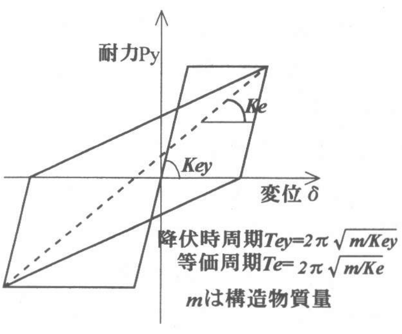


図5　降伏時・等価周期

3. 繰り返し数と片寄り量の算出

厳密なエネルギー一定則からDS'を評価しようとすると，繰り返し回数NDと片寄り係数dが必要である。そこで3章ではそれらの数値特性と推定手法等について述べる。

3.1　繰り返し数

繰り返し数NDは地震動の威力を直接表す指標であり，かつ構造物が塑性時においてどのくらい履歴繰り返し応答するかを大略表すものでもある。性能評価型の耐震設計においては，地震動の威力は設計者が任意に設定すればよいものである。そこで地震動の威力をエネルギー入力量と繰り返し数で与えるための基礎資料を得る事を目的に，観測地震動や模擬地震動による弾塑性応答解析からNDの値を算出し，その値の予測方法を示す。

図6では縦軸にエネルギー入力量ED，横軸に入力の激しさを表すエネルギー入力速度Δ

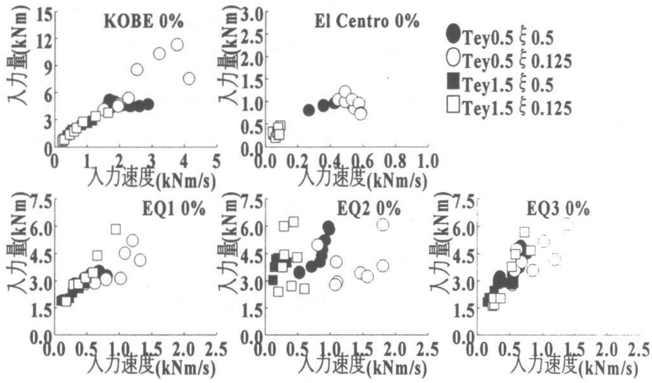


図6　入力量と入力速度の関係

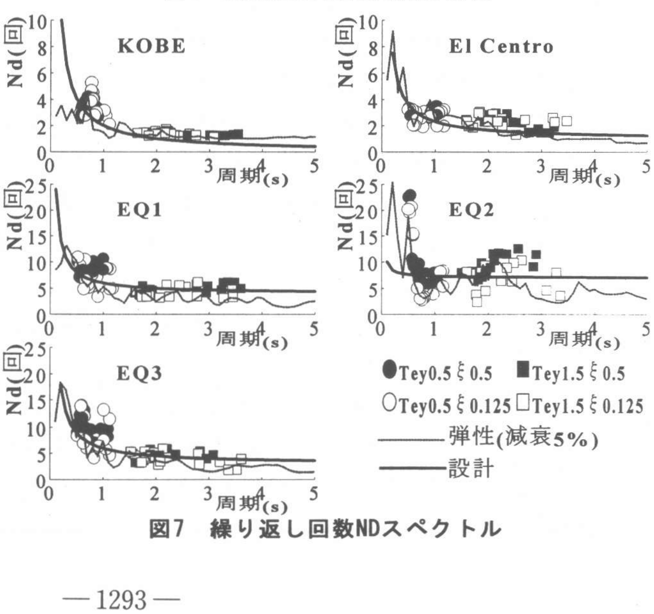


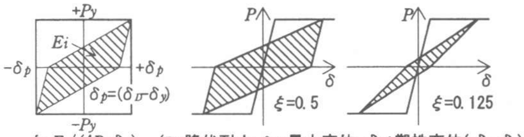
図7　繰り返し回数NDスペクトル

Emax/Te を，降伏時周期 Tey，エネルギー吸収能力を表すループ面積係数ξ（**図8**），地震動（EQ1 ～ 3 は NEWRC 波）別に減衰 0%時を示す。この傾向は減衰 5%の時もほぼ同じであった。**図6**よりおおよそ線形に表されると仮定すると式(7)ができる。

$$ED = \gamma \cdot \Delta Emax/Te + \beta \qquad (7)$$

上式の両辺をΔ Emax で除すと式(8)を得る。

$$ND = \gamma /Te + \beta' \qquad (8)$$



ξ=Ei/(4Py δp)　(Py:降伏耐力, δD:最大変位, δp:塑性変位(=δD−δy))

図8　ループ面積係数ξ

表1　設計用ND決定のための係数

	γ	β'
KOBE	*2*	*0*
Elcentro	*1.3*	*1*
EQ1	*2*	*4*
EQ2	*0*	*7*
EQ3	*3*	*3*

図6（減衰0%時）と減衰が 5 %の時の結果を基に最小二乗法からγ，βを求め，β' をβ/ΔEmax として求めると**表1**が得られる。その結果，式(8)はスペクトル上で表すことが可能となる。**図7**の縦軸は繰り返し数 ND，横軸は周期である。減衰 5%弾性応答値を点線で，式(8)から得られる曲線を実線で示し，弾塑性の地震応答解析結果（減衰 0，5%）を点でプロットしている。図より ND の値は周期によって変化し，地震動により値も大きく異なるが，設計用 ND 曲線が弾塑性の結果におおよそ近いことが分かる。以上より，設計用地震動に応じた適切な係数（γ，β'）を与えることで簡易的に必要な繰り返し数 ND が求まる。

3.2 片寄り量

前章の仮定②（**図1**）を用いて地震応答時の平均塑性率，つまり振幅は精度良く推定できることを筆者らは既に示した [3)]。その中で片寄り量が推定できれば，最大塑性率を精度良く推定できることになるため，文献 3 では最大塑性率とループ面積係数ξ（**図8**）を用いて定性的に片寄り量を推定したが，その精度はばらつきが大きかった。そのため，片寄り量を推定するには片寄りのメカニズムを把握する必要があると考えられる。メカニズムについて文献 4 で地震動のエネルギー入力特性（瞬間的な入力と最大応答変位との相関性）を利用して地震動を単純な SIN 波に置き換えて片寄り発生の原因を検討したところ，**図2**で示した現象が起こっている事が分かり，それを基に片寄り量を推定する方法を示した。それらをふまえ，以下に SIN 波 1 波を用いた場合における片寄り量の算出方法を以下に示す。

片寄り量の算出過程を**図9**に示す。図中の 2.において，設計用地震エネルギー入力量は減衰を考慮した弾性時のスペクトルより既知のものとする。図中の 3.において，ΔEmax/ED（全入力量に対する 1 サイクルでの入力量）は著しく降伏耐力が低い建物を除いてほぼ 1 とし，Eds1/ΔEmax（本論中α）は仮定③により求まるものとする。次に図中 4.において Eds1 を算出し，一方の応答変位 δ_{D2}（**図3**参照）を求める。次に**図3**中の Eds2 を算出し，ξが 0.125 の様に原点指向性の強い系においては除荷時の放出エネルギーΔE1（**図10**）を適切に考慮して Eds3（**図3**参照）を次式で算出する。

$$Eds3 = \Delta Emax + \Delta E1 - (Eds1 + Eds2) \qquad (9)$$

上式から Eds3 が求まり逆側の応答変位 δ_{D1} が算出され，その結果，式(6)より片寄り量が

1.入力波の決定　→　2.エネルギー入力量ED決定　→　3.DSからΔEmax/EDとEds1/ΔEmaxの値を算出　→　4.EDとΔEmax/EDからΔEmaxを求め、Eds1を算出し、一方の応答変位を算出　→　5.ξ（図8）の値を考慮して、ΔEmax-Eds1分のを逆側で消費させ、他方の応答変位を算出　→　6.片寄り量の算出

図9　片寄り量算出過程

算出されることとなる。

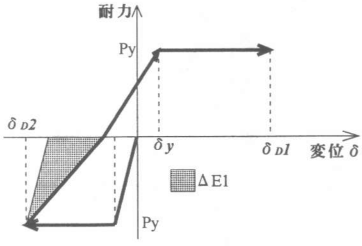


図10　放出エネルギーΔE1

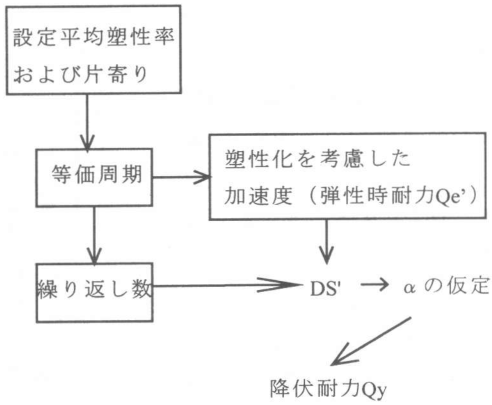


図11　設計上おけるDS'の位置付け

4. DS'と現行のDSについて

4.1 本手法の意義

式(4)及び(5)において新たなDS'の算出式を示した。DS'の設計上の位置付けについて**図11**に示す。設計で考えられる損傷として平均塑性率及び片寄りを設定し等価周期 Te を求め，構造物の弾塑性状態を考慮した加速度応答スペクトルから Qe'が求まることとなり，αを仮定して DS'が算出される。その結果，降伏耐力 Qy が決定する。よって DS'は，現行の DS（**図12**）の様に降伏耐力を設定した段階で最大応答変位を算出するといった性能確認型ではなく，繰り返し数 ND（設計用地震動特性）及び片寄り量が決定した結果，ある設計用最大応答変位（性能）を保証する降伏耐力の算出を行うために用いられる。

4.2 本手法における現行のエネルギー一定則及び変位一定則の精度に関する検討

既往のエネルギー一定則[5]は，比較的短周期において適用可能のものであるとし，これを基に DS が求められている。しかし先ほど求めた DS'とは異なり，塑性化による入力エネルギーの変動を考慮していないことから直接比較はできないが，構造物が塑性化しても入力エネルギーが一定であると仮定すると，本手法において片寄り係数 d=2，繰り返し数 ND=1，α=1 の場合に相当する。これは地震エネルギーが 1 サイクルで入力し，かつ入力したエネルギーを半サイクルで全て吸収したという意味を持つ。**図13**左図に示すように短周期領域では，構造物の塑性化によりエネルギー入力量が増加することが一般的であり，また**図7**や**13**右図より ND の値は大きいものとなる。よって DS 算出においてエネルギー入力量を過小評価することも多いと考えられるが，片寄り係数 d の値が 2 であることや繰り返し数 ND を 1 としていることが非常に大きい安全側の評価をしているために，結果としてある程度の精度を持ち得ているものと思われる。しかしながら文献 8 においてエネルギー一定則の精度に関するものをみると，短周期領域（降伏時周期が 0.3 及び 0.5 秒）において危険側の評価をするものも多く見られる。

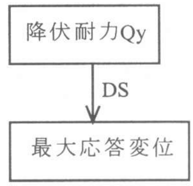


図12　現行DS

次に，長周期領域で適用可能とされている変位一定則についてである。長周期領域では，**図13**左図に示すように，エネルギー入力量は一定と見なされる[6]。また**図7**や**13**右図より ND の値は小さくなり 1 に近くなる。この場合，本手法を基に考えると，最大応答変位は降伏耐力の大きさにより変化するα（1 周期の入力の内，最初の半周期で吸収する割合）に依存することとなる。つまり，各降伏耐力の大きさにより，片寄り量が異なることで最大応答変位の値は変動するものと思われる。しか

しながら，エネルギー入力量が一定でかつ，ND が 1 であるとすると式(3)より瞬間的なエネルギー入力 Δ Emax も一定の値となる。その結果，**図2**より応答変位振幅は保たれることとなり [7] 予測値に対する精度はある程度保たれたものとなる [8] と考えられる。

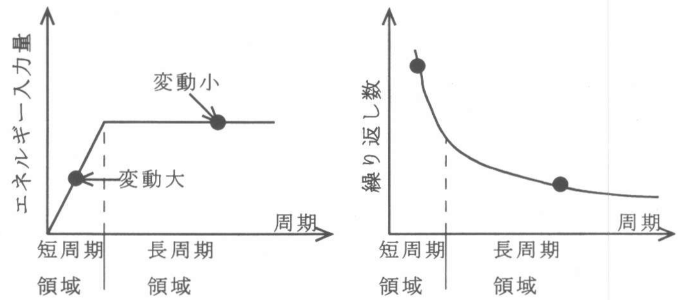


図13　エネルギー入力量及び繰り返し数スペクトル

以上より本手法の考え方を用いて現行のエネルギー一定則及び変位一定則の持つ精度に関する検討を行った。地震時の応答をより表現できる本手法の概念を明確にした。

5. まとめ

本研究で，入力の激しさを表すエネルギー入力速度の概念を基に最大応答変位予測を試みてきた一連の研究において得られている知見から構造物の塑性化によるエネルギー入力量 ED の変動や構造物の弾塑性時における繰り返し数 ND を考慮して，設計用地震動に応じた DS'の算出法の提案を行った。

・厳密なエネルギーの釣合いから DS'を算出した場合，構造物の繰り返し数 ND と片寄り係数 d（最大塑性率/平均塑性率）及び 1 サイクルでの最大の瞬間入力 ΔEmax に対する最初の半周期での履歴吸収エネルギー Eds1 の比率 Eds1/ΔEmaxが必要である。つまり DS'は，現行の DS とは異なり，繰り返し数や片寄り量を考慮した上で，ある変形量（性能）を保証するに必要な降伏耐力を算出するものである。

・繰り返し数 ND は，地震動の威力であるエネルギー入力量と入力速度を基に係数を決定することで簡易的に算出可能である。

・現行のエネルギー一定則及び変位一定則の精度に関する検討により，本報で述べた概念を明確にした。

本研究の結果，多層建物モデルにおいて DS'の概念を用いることが可能と考えられるため，引き続き検討する予定である。

参考文献

1) 中村友紀子,壁谷澤寿海：等価減衰を考慮したスペクトルによる応答の推定,日本建築学会構造工学論文集,Vol.44B,pp.313-318

2) 堀則男,井上範夫,岩崎智哉：1 自由度質点系による鉄筋コンクリート構造物の地震時応答変形推定手法（その 1. 瞬間的なエネルギーの釣り合いに着目した応答推定）,日本建築学会大会梗概集（中国）,pp.691-692,1999.9

3) 向井智久,衣笠秀行,野村設郎：地震動を受ける RC 構造物の限界応答変形量を保証するに必要な耐力算出法とその精度検証,日本建築学会構造系論文報告集,532 号,pp.137-143,2000.6

4) 向井智久,衣笠秀行,野村設郎：RC 構造物の塑性時の片寄りに関する研究,日本建築学会大会梗概集（東北）,pp71.72-,2000.9

5) 柴田明徳：最新耐震構造解析,1981

6) 秋山宏：エネルギーの釣り合いに基づく建築物の耐震設計,1999

7) 向井智久,衣笠秀行,野村設郎：RC 構造物における塑性時の片寄りに関する研究,構造工学論文集,Vol.46B,pp.601-607

8) 小林克至,向井智久,野村設郎：RC 構造物を対象とした等価線形化法の精度検証,日本建築学会関東支部,2001.3

付録1. 式(4)の導出過程（図5の記号参照）

まず式(3)を(2)に代入し

$$ED/ND\cdot\alpha=Qe'/2\cdot\delta_2=Eds1=(\delta_1-\delta y)Qy$$

両辺を δy で除すと

$$\frac{Qe'\cdot\delta_2}{2ND\cdot\delta_y}\times\alpha=(\mu_{max}-1)Qy$$

ただし μmax は最大塑性率

$\delta_2/\delta y=Key\cdot Qe'/(Ke\cdot Qy)$ と $Te=\sqrt{\mu ave}\cdot Tey$ を考慮することより

$$\frac{Qe'\cdot Key}{2ND\cdot Ke}\times\alpha=(\mu_{max}-1)(Qy/Qe')^2$$

以上より式(4)が導出される過程を示した