# 論文 エネルギー釣合を用いた既存低層RC造建物の動的耐震診断手法

向井智久<sup>\*1</sup>·古間直希<sup>\*2</sup>·野村設郎<sup>\*3</sup>

要旨:既存 RC 造建物の動的耐震診断法を確立する研究として,まず本論では提案する 動的耐震診断手法の全体概要を示した。次に曲げバネとせん断バネを有しかつ構造耐震 指標 Is 値が等しい1自由度にモデル化された耐力低下を起こす RC 造建物を対象に , 地 震応答解析を行い応答性状を把握した。その後,エネルギー釣合を用いた応答変形推定 手法を示し、その精度について検討した。その結果、提案した手法の精度はおおむね良 好であることを確認した。

キーワード:エネルギー釣合,最大応答変形推定,耐力低下,1質点系,構造耐震指標

### 1.はじめに

1995年の阪神淡路大震災以後,国内の既存建 物のストックのための耐震化が指摘され,1995 年12月に「耐震改修促進法」が施行された。し かしながら,現状は既存建物の耐震化の進捗度 耐震化促進策としてまず考えられることは、建 物の地震時の耐震性能を適切にかつ簡易に把握 することである。現行の耐震診断基準は,上記 の大きな役割を果たしているが、さらなる精度 向上のために既存 RC 造建物の地震時応答を正 確に考慮する必要がある。

一方,筆者らは地震動の構造物に対する破壊 力を入力エネルギー量 ED (速度換算値 VE) と繰り返し数 ND により評価し,エネルギー入 力速度概念に基づいて地震時のランダムな応答 を定常振動に置き換えた後に,建物のエネルギ -吸収をモデル化し,エネルギー釣合から RC 建物の最大応答変形量を推定する手法<sup>1)</sup>の妥当 性について,多層建物<sup>㈱ぇば2)</sup>で検討してきた。 筆者らの手法は,地震時のランダムな繰り返し 挙動をある等価な繰り返し数 ND として定量的 に表しているため,繰り返しに伴う損傷についれらの値が既知であることを前提としている。

て扱いやすい特徴を有するが、そのような復元 力特性を有するモデルについてはいまだ未検討 である。

そこで本報は,既存 RC 造建物の動的耐震診 断法を確立する基礎的研究として,まず提案す は十分とは言えない状況にある。そのような中, る動的耐震診断手法の全体概要を示す。その後, Is 値が等しく,かつ1自由度にモデル化された 既存 RC 造建物(本論で扱うのは,耐力低下及 び繰り返し作用に伴うエネルギー吸収能の低い 部材を有する建物)を対象に,地震応答解析を 行い応答性状を把握する。また繰り返し挙動を 考慮したエネルギー釣合を用いた最大応答変形 推定手法を示し,その精度について検討する。

### 2. 動的耐震診断手法

## 2.1 手法概要

建築物の耐震性能の評価方法は強地震動被災 後の再使用を絶対条件としない一般用途の建物 が強地震動をうけ、倒壊を含みどの程度の損傷 となるかを判断する手法である。例えば図-1 に示す流れが考えられる。ここで倒壊限界変形 は別途詳細に検討する必要であり、本手法はそ

- \*1 独立行政法人 建築研究所 構造研究グループ 研究員 博(工) (正会員)
- \* 2 東京理科大学大学院 理工学研究科建築学専攻 (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)

最終的に倒壊に対して安全と判定されても,建 物の損傷程度を最大応答変形から推定できる。

上記建物の耐震性能を最大応答変形から評価 する場合,以下の2手法が考えられる。

A. 地表面地震動を用いた地震応答解析により 耐震性能を判定する手法

B.直接地震応答解析を行わず,地震時の繰り 返し挙動を考慮したエネルギー釣合手法を用い て耐震性能を判定する手法

A について文献3)では実験結果を基にせん 断型の解析モデルを決めている。本論ではそれ らを参照して曲げ型も含めた検討を行っている。

Is値が等しい建物の地震応答解析

本章では前述手法 A を検討するため,鉛直 部材の特徴が異なり Is 値が等しい建物モデル を対象に地震応答解析を行い、その結果を示す。 3.1 解析概要

建物の復元力特性は,主として柱や壁のせん 断余裕度,柱に接続する二次壁の形状寸法及び 構造スリットの有無等により想定される靭性の 程度ならびに最大耐力以降の復元力特性に応じ、 一つの階につき全ての鉛直部材を最大4グルー プ(せん断,曲げ柱各2通り)に分類して建物 の復元力特性を定める。本論では,図-2の1a, 2a,2b 部材を用いることとした。各部材の F 値 は文献4)を参考に1a 部材(急激な耐力低下を 起こすせん断鉛直部材,初期剛性に対する耐力 低下時の接線剛性比(以後,耐力低下率)-0. -3に示すループ面積係数 で表し,1a部材の 195) を1.0, 2a 部材(曲げ降伏後, 耐力低下 する鉛直部材, =-0.182)を2.0,2b部材 (曲げ降伏後,耐力低下しない鉛直部材, = 0.001)を3.2とした。また C 値はせん断部材 の最大耐力を曲げ部材の1.2倍とした。文献5) では,極脆性柱では層間変形角1/500[rad.], せん断柱1/250[rad.]で最大耐力に達し,曲げ |柱は1/150[rad.]で降伏時変形角としているが , の値が0.7となるよう建物強度を決定した。ま 本論ではそれを基に各変形角は1a部材を1/350 [rad.], 2a部材を1/200[rad.], 2b部材を1/150 [rad.]とした。さらに内部履歴則を決定するた



図-2 破壊モードの異なる部材の性能

め,各部材の繰り返しエネルギー吸収特性を図 を0.2,2a,2b部材を0.5とした。

解析建物のパラメータとしては,前述した3 種類の鉛直部材の組み合わせを変化させた。具 体的には1a 部材の割合を層全体の20%から80% まで10%毎に変化させ,かつ2a,2b部材の割合 は同値とした。また Is 値は全建物とも文献5) の靱性型保有性能基本指標式により算出し、そ た図-4に1a部材が80%(以後1a80%建物と呼 称)及び20%建物モデルにおける骨格曲線を, 図-5に両建物モデルの復元力特性を示す。図-

5よりせん断部材が多い場合,高い層せん断力 を有しているが,耐力低下及び繰り返しエネル ギー吸収は低下することが分かる。骨格曲線に より得られるエネルギー吸収量はせん断部材の 多い1a80%建物の応答変位が約0.2m(1a部材 の負担せん断力が0となる点)までは大きいが, それ以降曲げ部材の多い建物1a50%から20%建 物の吸収量が大きい。また繰り返し履歴により 得られるエネルギー吸収量は耐力低下の少ない 1a30%や20%建物が耐力低下の大きい1a70,80 %建物に比べ,各耐力低下部材の負担せん断力 が0となる点を境にエネルギー吸収量の差は大 きくなる傾向にある。

以上のような特性を有する1質点系にモデル 化された RC 建物の種類が7通り(ベースシア 係数が0.44から0.73,初期周期0.43秒から0.67 秒の範囲)である。ちなみに1a50%建物はベー スシア係数0.6,初期周期0.5秒である。入力地 震動は,ElcentroNS 成分,神戸海洋気象台 NS 成分,TaftEW 成分の3波(以後それぞれ ELCE, KOBE,TAFT と呼称)で,その最大速度を25, 50,75kine の3通りとした。よって合計63通りで ある。以上の解析には Canny03<sup>6)</sup>を用いている。 3.2 解析結果

図-6に入力地震動が KOBE50kine で対象建 物が1a80%,20%建物における層せん断力-層間 変形角関係を示す。図よりいずれも層せん断力 が低下し,正側に応答変形の片寄りが見られる。 最大応答変形は1a20%建物がやや大きいが,耐 力低下は1a80%建物が激しい。

図-7に最大応答変形(上段),入力エネル ギー ED(中段),繰り返し数 ND(下段)を 地震動のレベル別に示す。図より地震動レベル が25kine の場合は,おおむね強度型建物(1a60 -80%)の変形が小さく,靭性型建物(1a20-40 %)の変形が大きい結果で,その傾向は ELCE で顕著であった。地震動レベル50kine でも概ね 傾向は25kine と同様であったが,75kine では強 度型建物の応答変形が大きくなる場合も見られ る。次に最大応答変形と入力エネルギー ED と



繰り返し数 ND との関係を検討する。地震動レ ベル75kine の TAFT の場合,どの建物において も最大応答変形は比較的小さい。入力エネルギ – ED は最大応答変形が大きい ELCE とほぼ同 等であるが,繰り返し数が他の地震動に比べか なり大きい値となる。また TAFT の1a20から40 %建物の ND は他の地震動に比べるとやや大き い値であるが, ED が他の地震動よりも大きい 値であることから,最大応答変形は大きくなっ ていると判断できる。このことは,地震時の最 大応答変形を入力側から考える際に ED 及び N D が有効であることを示唆している。

次に,地震動レベル毎にみると,レベルが大 きくなるにつれ Is 値が一定の建物の最大応答 変形は大きく異なる。そこで最大応答変形だけ では耐力低下する建物の損傷を適切に表現でき ないと考え,耐力保持係数 を導入した。この 値は,各建物が有する最大耐力に対して,地震 時に部材が水平抵抗力を失った後,耐力を保持 している割合を表す。図-8 に塑性率(最大耐 力点を降伏点と仮定して算出)と の関係を地 震動のレベル別に示す。図より,25kine の場合 は応答変形も小さく も高い値である。50kine の場合,入力地震動が KOBE で1a70や80%建物 の最大応答変形は1a20%建物より小さいが,

は0.4以下であり危険な状態を保持しているこ とが分かる。さらに75kineの場合,最大応答変 形が大きく1a40%から80%建物の全ての耐力低 下部材が水平抵抗性を失っている。従って最大 応答変形の大きさに加えて,耐力保持能力が低 下する程度も併せて既存 RC 建物の損傷を評価 することが必要となる。そのためには倒壊過程 における損傷把握が別途必要となる。

エネルギー釣合に基づく最大応答変形推定手法とその精度

ここでは2章で示した手法 B について検討す る。まず手法の概要を示し,その後推定手法の 精度について検証する。

4.1 最大応答変形の推定過程

基本的な既存建物の耐震性能評価の流れとし ては倒壊現象を念頭に考えている。ただし倒壊 判定の必要性が特にない場合,ここで示す最大 応答変形を推定する手法を直接用いることも考 えられる。

ここでは2通りの推定手法について示す。-



つは「層のエネルギー吸収性能に基づき推定す る手法(手法1)」,他方は「各部材バネのエ ネルギー吸収性能に基づき推定する手法(手法 2)」である。

(1)最大応答変形推定手法1

弾塑性範囲におけるエネルギー吸収のモデル 化を図-9に示す。図に示すように最大耐力に 達するまでに,部材が繰り返しエネルギー吸収 する分を無視している。なお,建物の全エネル ギー吸収量 ES は,次式で表せる。 ES=Ey+Eds+Ec

 $=Ey+2P_{y1}$  D+4  $P_{y1}$  (ND-1)( D-y) (1)

ただし, Ey:弾性歪みエネルギー, Eds:1回目の塑性歪みエネルギー, Ec:2回目以降の累積塑性歪みエネルギー, Py1:最大耐力, (= \*/

D), \*: 図-10参照, D: 平均最大応答変形, =(Pv2/Pv1):耐力低下係数, :ループ面積係 数,ND:繰り返し数, y:降伏変形

式(1)のエネルギー吸収量 ES と入力エネル ギー ED との釣合から式(2)が得られる。

$$D = \frac{ED - Ey + 4 P_{y1} (ND - 1) y}{2P_{y1} + 4 P_{y1} (ND - 1)}$$
(2)

なお,式(2)中に Dの関数である がある ため,まずある Dを仮定し,算出した Dが仮 定した値と一致するまで収束計算を行う。次に、 弾性範囲についても最大応答変形推定式を導く。 ている場合(図-11中範囲(2)にある場合)に ついて考える。建物の全エネルギー吸収量 ES y2i/Py1i): 各バネの , i: 各バネの は弾性歪みエネルギーのみとなり次式で表せる。  $ES = Ey_1 + 0.5 (2P_1 + K_2(D_{-1})) (D_{-1}) (3)$ ただし, Ev1: 1までの弾性歪みエネルギー 式(3)で表される ES を ED との釣合より D について解けげ次式が得られる

$$D = \frac{-B + \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A}$$

$$A = K_2, B = 2(P_1 - K_2 2),$$

$$C = 2ED - 2Ey_1 + 2P_1 - K_2 2^2$$
(4)

最後にどの部材バネも降伏変形に達しない場 合,建物のエネルギー吸収量 ES は次式となる。 あるが,まず弾塑性範囲の推定式(式(2)及び式  $ES = 0.5K_1 D^2$ (5)

K1:層の初期剛性(図-11参照)

同様に D について解けば次式が得られる。  
D = 
$$\sqrt{\frac{2ED}{K_1}}$$
 (6)

(2)最大応答变形推定手法2

まず1つ以上の部材バネが弾塑性の範囲にあ る場合,図-12のようにエネルギー吸収のモ デル化を行い, ES は式(7)で表せる。どの変形 範囲においても全ての部材バネの繰り返しによ るエネルギー吸収を考慮できる。

$$\begin{split} \text{ES} &= 0.5 \left( \sum_{i=1}^{n} P_{y1i} \quad y_i \right) + 2 \left( \sum_{i=1}^{n} P_{y1i} \quad i \right) \quad \text{D} \\ &+ 4 \left\{ \sum_{i=1}^{n} \quad i P_{y1i} \quad i (\text{ND} - 1) ( \quad \text{D} - \quad y_i ) \right\} \end{split} \tag{7}$$



まず,1つ以上の部材バネのみ降伏変形に達し ただし, n:部材バネの数, Py1i:各部材のPy1, yi:各バネの y, i:各バネの , i=(P

> 式(7)で表される ES を ED と等しいとして Dについて解けば次式が得られる。

$$D = \frac{ED + 4(ND - 1)\left\{\sum_{i=1}^{n} i |K_{eyi} y_i^2\right\} - 0.5\left(\sum_{i=1}^{n} K_{eyi} y_i^2\right)}{2\left(\sum_{i=1}^{n} i K_{eyi} y_i\right) + 4(ND - 1)\left\{\sum_{i=1}^{n} i |K_{eyi} y_i\right\}} (8)$$

$$D < y_i O \succeq i=0, \quad i=0, \quad y_i = D$$

ただし,Keyi:各バネの降伏時剛性

次にどの部材バネも降伏変形に達しない場合, Dは式(6)で得られる。

なお,(1)の手法及び(2)の手法に共通過程で (8))を適用して収束計算を行い,算出された値 が降伏変形以上であるかを確認する。降伏変形 以下であれば弾性であると考えられるので弾性 範囲の式を適用する。(1)の手法については弾性 範囲内でも最大3通りの場合分けを行う必要があ るが, 収束計算行った結果が考えている変形範 囲内にあるかを確認し,かつ収束計算の結果が 一致する場合を □の解としている。

4.2 手法の精度検証

今回はエネルギー吸収モデルの妥当性を確認 することを目的とし,また実際の診断時には診 断用外力が定められ既知であることなどを考慮 して,応答変形推定の際に,ED 及び ND は応 答値を用いている。図-13,14は縦軸に推 定値,横軸に応答値を示す。両図よりどちらの

手法も精度はおおむね高いことが分かる。この ことは、前述したように手法1が最大耐力に達 するまでに、他の部材が繰り返しエネルギー吸 収する分を無視しているが、その影響は小さい ことを示唆しており、簡易的な手法1の有効性 が確認される。しかし ELCE や KOBE で入力 が大きくせん断部材が多い建物の場合に推定値 が応答値を過小評価し、危険となる場合が存在 する。その理由として、本手法が定常応答を仮 定してエネルギー吸収のモデル化を行っており、 応答に大きな片寄りがある場合、図-15に示 すように Ey と Eds を過大評価するためと考え られる。

# 5. まとめ

本論では, Is 値を等しくした既存低層 RC 建 物を対象に,地震応答解析を行った。また同建 物に対してエネルギー釣合に基づく動的耐震診 断手法を示し,地震応答解析を行わずに最大応 答変形を予測する手法を示し,その妥当性を確 認した。

## 参考文献

1)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 2)向井智久,菊本衛,衣笠秀行,野村設郎 「地震時繰り返し挙動を考慮したエネルギー釣 合手法に基づく層崩壊型 RC 構造物の最大応答 変形予測」日本建築学会構造系論文集563号,p p.153-159,2003.1

3) 芳村学,中村孝也,八木克己「既存低層鉄 筋コンクリート造建物における構造耐震指

標(Is値)と被災度の関係」日本建築学会構造 系論文報告集578号,pp.107-114,2004.4

4) 埼玉県有施設耐震判定委員会:「埼玉県県有施設のための耐震診断・耐震補強マニュアル」 pp.付録9-2 - 9-3,2003.6

5)2001年改訂版 既存鉄筋コンクリート造建築



図-15 エネルギー吸収モデル化 物の耐震診断基準同解説,日本建築防災協会 6)Li Kang-Ning:「CANNY(VersionC03)」,3-Dimensional Nonlinear Static/Dynamic Structural An alysis Computer Program, 2003

謝辞:文献4にある耐震診断・耐震補強設計マ ニュアル2003年版編集委員会各委員のご意見に 感謝いたします。