論文 梁降伏型RC構造物の最大層間変位予測に関する研究

小林 克至*1·向井 智八*2·衣笠 秀行*3·野村 設郎*4

要旨:本論では,梁降伏型RC構造物を対象に地震時最大層間変位の予測法の提案を行った。 始めに構造物の降伏時周期,ベースシア係数が等価な1質点系の作成を行う。次にその1質 点系を用い地震時入力エネルギー量,繰り返し回数の予測を行う。そして多層フレームに おける入力エネルギー量と各層の吸収エネルギー量の釣り合いより層間変位を算出する。 その結果,各層最大層間変位の平均値の応答値と推定値は比較的よい精度を示した。また その結果から最大層間変位の予測も行った。その精度もおおむね良好であった。 キーワード:梁降伏型,層間変位,エネルギー入力量,繰り返し回数,1質点系

1 はじめに

地震時の最大応答変形は,性能評価型耐震設 計にとって有効な1指標である。またその指標 は合理的かつ簡便に算出されることが望ましい。

既往の研究において静的増分解析に高次モー ドを考慮した外力分布を用いて層間変形分布や 梁の損傷分布を予測する研究がある¹⁾が、入力 地震動に応じて外力分布を決定するのは現在の 段階では難しい。一方, 秋山らは鋼構造多層建 物を対象に地震時における建物の非線形挙動を エネルギーでモデル化し, エネルギーの有用性 を示した²⁾。また市之瀬らは RC 造フレームモ デルを対象にエネルギー分布の観点から建物の 応答変位予測式の提案³⁾を行っている。しかし 地震時における繰り返し数を明確に考慮された ものではない。筆者らは1質点系にモデル化さ れた RC 構造物を対象に、地震時繰り返しを考 慮して最大応答変位の予測法を提案⁴⁾している が、RC 造フレームモデルを対象に適用してい ない。

そこで本論では、中低層の RC 造フレームモ デルを対象し、各階最大層間変位の平均値の予

*1	東京理科大学大学院	理工学研究科建築学	学専攻	(正会員)
* 2	東京理科大学助手	理工学部建築学科	工修	(正会員)
*3	東京理科大学助教授	理工学部建築学科	工博	(正会員)
* 4	東京理科大学教授	理工学部建築学科	工博	(正会員)



表1 解析パラメータ

剛性分布	モデル1, モデル2			
層数	7層,12層			
設計用地震動	ELCENTRO			
	JMA KOBE, TAFT			
梁耐力	A(強), B(弱)			

測法を提案し、その精度を検証する。提案する 予測法は図1に示す手法を基に行う。具体的に は①多層フレームと降伏時周期とベースシア係 数が等しい1質点系を作成(3.1)、②等価1質点 系を用いて外力(ED,ND)を算出(3.2)、③算出 された外力を用いて多層フレームへの展開(各 階最大層間変位の平均値の予測)である(3.3)。



図5 材端の弾塑性バネの復元力特性

またその結果を基に、最大層間変位の予測を行 う。ただし、フレームモデルは梁降伏型となる 建物を対象としている。

2 解析概要

解析対象建物は、スパンの長さは梁間方向、 桁行方向共に6m であり, 階高は3.5m, 単位面 積当たりの重量は12kN/m²とする。建物階数は7, 12階,剛性分布は損傷の分布が異なるモデル1,崩壊系を仮定すれば Tey と CB の算出は静的非

モデル2(後述)を用いる。部材耐力は文献5), 6) を参考に決定を行っており、Elcentro NS(194 0年 Imperial Valley 地震), JMA KOBE NS(1995 年 兵庫県南部地震神戸海洋気象台記録), Taft EW(1952年 Kern Country 地震)の3波の設計用 地震動に対して梁降伏型が形成される部材耐力 を与えている。ここでの梁降伏型とは、1階柱 脚以外の柱は降伏せず,かつ梁の塑性率10(回 転角で1/25rad 程度)以下, 柱の塑性率は6(回転 角で1/50rad 程度)以下と定義する。また梁は損 傷度が異なる2通りの耐力(A(強),B(弱))を用 いる(表1)。Aの1階柱脚と梁部材(ヒンジ想定 部材)の耐力は図2に示す。全解析対象建物を地 震応答解析した結果, 塑性化した梁部材の塑性 率は平均で2.5であった。

モデル1の剛性分布は曲げ剛性 EI が全層で等 しいモデルであり、モデル2の剛性分布は上層 ほど EI が減少するモデルである(図3)。モデル 2の EI は柱の水平剛性を質点系の層剛性に置換 し、Ai 分布に基づく外力分布に対して剛性率 が一定となるように決定した。1階の柱断面は 7層で80cm×80cm, 12層で85cm×85cm であり, 梁の断面は柱の剛性の2/3(7層建物の2階梁断面 を45×70cm, スラブ厚18cm, スラブの有効幅6 0cm 程度)になるように設定した。なおコンク リート強度は7層で30N/mm², 12層で33N/mm²と する。また本研究では、図4に示すような部材 端に弾塑性曲げバネを有するキの字形フレーム モデルを用いる。その際の曲げバネの復元力特 性は Degrading-Trilinear 型(図5), せん断バネは 弾性とする。なお建物の粘性減衰は考慮してい ない。

3 予測手法の提案

3.1 1質点系の縮約概念

ここでは、図1①の多層フレームを等価1質点 系に縮約する。**文献7)**より等価1質点系の降伏 時周期 Tey とベースシア係数 CB が多層フレー ムのそれらと等しいことが重要である。建物の



線形増分解析を行わずとも可能であると考えら れるが、本論では静的非線形増分解析を用いて 多層フレームの1質点系の作成を行う。

3.1.1 等価1質点系の作成手法(図6)

(1)多層フレームを、Ai 分布に基づく外力分布 を用いた静的非線形増分解析を行い、各層の層 せん断力(Q)-層間変位(δ)関係を得る。

(2) (1)の Q-δ関係をトリリニア化し、各層の 降伏時剛性 keyjを算出する。さらに各層の keyj と各層の質量 mj を用いて固有値解析を行い、 多層フレームモデルの降伏時周期 Tey を算出す る。トリリニア化の手法は3.1.2で後述する。
(3)最上階の変位δτとベースシア QB をトリリ ニア化し、1質点系の骨格曲線を算出する。

(4) (3) で求めた Key と Tey より等価1質点系の 質量1M を算出する(式(1))。

$$1M = \frac{Key \cdot Tey^2}{4\pi^2}$$
(1)

(5) (3)で得られた降伏耐力 Qy と建物全質量 M
 (=Σm_j)より、ベースシア係数 CB を求める。この CB と等価1質点系の質量1M より等価1質点系における耐力1Qy を求める(式(2))。ひび割れ耐力 Qcについても同様に求める。



以上より,多層フレームと同じ Tey 及び CB を有する1質点系を作成した。

3.1.2 トリリニア化の手法

図7にトリリニア化の手法を示す。

(1)初期剛性(原点の接線剛性)をα倍した直線
 と Q-δ曲線の交点を A'点とする(図7(a))。本
 論ではαを0.75とする⁸。

(2) A'点の縦軸を Qcとし,初期剛性の縦軸が Qc となる点 A として,これを見かけ上のひび割 れ点と考える(図7(a))。

(3) Q-δ上に降伏後の変形と特定できる B 点を
 任意に定め、その点の傾きを求めるために、B
 点と B 点から数ステップ進んだ(0.2δB)C 点を
 通る直線を引く(図7(b))。

(4)この直線上に以下の式(3)を満足する D 点 を定める(図7(b))。

面積 S1+面積 S3=面積 S2 (3)

(5)B 点の変形が D 点の変形の2~4倍の範囲[®] であるか確認する。その範囲になければ(3)で 定めた B 点を再設定する。

(6)D 点を見かけ上の降伏点と考え, A, D, B 点 を通るトリリニアのスケルトンカーブにモデル 化する。

以上の手法により等価1質点系の復元力特性 を決定する。

3.2 外力(入力エネルギーED,繰り返し回数 ND)の算出

スペクトルから予測する手法⁴も考えられる が,ここでは図1②等価1質点系の ED, ND を 地震応答解析より算出し,キの字形フレームモ デルの ED, ND との比較を行う。

3.2.1 入力エネルギー量EDの予測精度

キの字形フ レームモデル の ED と等価1 質点系の ED について検討 する。ED は質 量に比例する ため,ここで はエネルギー



の速度換算値 VE(ED=M·VE²/2)を用いる。 図8は横軸に等価1質点系(SDOF)の VE を,縦 軸にキの字形フレームモデル(FRAME)の VE を示している。これより、キの字形フレームモ デルの VE は等価1質点系の VE とほぼ同じ値 であり、本手法における等価1質系を用いるこ とより、キの字形フレームモデルの ED を予測 することが可能である。

3.2.2 繰り返し回数NDの予測

(1)繰り返し回数の定義

筆者らは繰り返し回数 ND を文献4) において 以下のように定義している。

$$ND = \frac{ED}{\Delta E_{max}}$$
(4)

Δ Emax: 等価周期 Te 当たりに入力するエネ ルギー量の最大値。等 価周期 Te は正負それ ぞれの最大応答変位か ら求める(図9)。

NDは構造物が地震



時に受ける繰り返し回数の多少を表す指標とし ての意味を持つ。本論では各層における繰り返 し回数を求めるため、以下のように定義する。

$$ND_{j} = \frac{ES_{j}}{\Delta ES_{maxj}}$$
(5)

ESi は i 層の吸収エネルギーであり、 Δ ESmaxi は i 層が等価周期 Te 当たりに吸収するエネル



ギー量の最大値を示している。

(2) 各層における繰り返し回数

図10に各層の繰り返し回数 NDi を示した。 横軸は NDj, 縦軸は階数を示している。また ΔES_{maxi} は等価1質点系の Te より求めた。図 より、各層ごとに NDi は多少異なる値を示して いる。他の建物においても同様の傾向が見られ たが、その値は各層の NDi の平均値に対してほ ぼ0.8~1.4倍の範囲内の値であった。

(3)精度検証

(2)より各層 の ND_j は各々比 較的近い値であ ることから、キ の字形フレーム モデルの ND を 全層の ND_i の平 均値とする。



図11の横軸は 図11 SDOFとFRAMEのNDの比較 等価1質点系の

ND を、縦軸にキの字形フレームモデルの ND を示す。これより地震動によって繰り返し回数 の違いは等価1質点系,キの字形フレームモデ ル共にあることが分かる。またキの字形フレー

ムモデルと等価1質点系の ND はおおよそ同じ値であり,等 価1質点系の ND よりキの字形 モデルの ND は予測が可能で ある。よって等価1質点系の 作成手法が妥当と言える。

3.3 多層フレームへの展開

ここでは,図1③等価1質点 系を多層フレームに展開する 手法を示し,最大層間変位の 平均値の予測精度について検 討する。



図12 吸収エネルギーのモデル化の概念図

3.3.1 最大層間変位の平均値の予測手法

本論で対象にしている中低層の梁降伏型構造 物は各層の梁におおよそ損傷を分散でき,また 3.2.2より各層の繰り返し数は全層においてほ ぼ一定の値であることが分かる。そこでフレー ムのエネルギー吸収のモデル化を各層の最大層 間変形が全層において一定値(δ_{D})で,ND 回定 変位振動すると仮定する(式(6),図12)。した がってその際の δ_{D} は最大層間変位の平均値を おおよそ示すと考えられる。

 $\sum_{j=1}^{N} ES_{j} = \sum_{j=1}^{N} (Ey_{j} + Eds_{j} + \sum_{i=1}^{ND-1} EC_{i})$ (6) Ey_{j}=0.5($\delta c_{j} \cdot Qc_{j} + (\delta y_{j} - \delta c_{j})(Qy_{j} + Qc_{j}))$: j 層における弾性歪みエネルギー Eds_{j}=2Qy_{j}($\delta p - \delta y_{j}$) : j 層に1サイクル目に吸収される 塑性歪みエネルギー $\sum_{i=1}^{ND-1} EC_{j} = 4Qy_{j} \xi (ND-1)(\delta p - \delta y_{j})$: j 層に2サイクル目以降の累積塑性歪 みエネルギー



入力エネルギーと各層の吸収エネルギーの和が 釣り合うことより以下の式(8)が成立する。

$$\mathsf{ED} = \sum_{j=1}^{\mathsf{N}} \mathsf{ES}_j \tag{8}$$

また式(6)より以下の式が得られる。

$$ED = \sum_{j=1}^{N} [0.5(\delta c_{j} \cdot Qc_{j} + (\delta y_{j} - \delta c_{j})(Qy_{j} + Qc_{j})) + 2Qy_{j}(\delta_{D} - \delta y_{j}) + 4Qy_{j} \xi (ND - 1)(\delta_{D} - \delta y_{j})]$$
(9)

式(9)のエネルギーの釣り合いを δ D につい て解くことで,最大層間変位の平均値が算出さ れる。

3.3.2 最大層間変位の平均値の予測精度

ここでは最 大層間変位の 平均値の予測 を行う。ED, ND は,等価1 質点系の値(3. 2.2)を用い て,本手法の する。図14は



横軸にエネルギーの釣り合いより求めたδρを, 縦軸にキの字形フレームモデルにおける地震応 答解析の値であり,各層の最大層間変位の平均 値を示している。これよりおおよそ各層最大層 間変位の平均値を予測できることが分かる。

4 応答予測の精度

4.1 最大層間変位の予測精度

ここでは,静的非線 形増分解析において求 まる各層の層間変位の 平均値に対する最大層 間変位の比率を用い て,動的解析時の最大 層間変位を予測する。 図15は横軸に予測値 を,縦軸に地震応答解



析の値を示す。全体的に若干ばらつきがあるが おおむね精度は良いことが分かる。

4.2 予測手法の提案

以上の結果,最大層間変位と最上階の最大応 答変位が図16に示す手順より予測可能である。

5 まとめ

本論は中低層の梁降伏型 RC 構造物を対象に 図1の①②③に示した手法に基づく検討を行っ た。またその結果を基に最大層間変位を予測し た。以下に知見を示す。

(1)等価1質点系は、多層フレームの降伏時周期 及びベースシア係数が同値となるように決定し、 その決定手法が妥当であることを示した。

(2)多層フレームの入力エネルギー ED 及び繰り返し回数 ND は,等価1質点系を用いて予測することが可能である。

(3)繰り返しを考慮したエネルギー釣合を用いて
予測した多層フレームの最大層間変位の平均値は、
おおよそ地震応答解析の値と近い値を示した。
(4)最大層間変位の予測法は、おおむね良い精度を示すことが分かった。

参考文献

 1)松森泰造・壁谷澤寿海・渡辺哲巳・塩原等・小谷俊介:多自由度系の地震応答変形の推定方法-その2 漸増載荷解析に基づく地震応答変形分布の予測-,日本建築学会大会梗概集(中国),pp.697-698,1999.9
 2)秋山宏:エネルギーの釣合に基づく建築物の耐震設



図16 予測手法のフロー図

計, 技報堂出版, 1999

3) 籠橋英仲,市之瀬敏勝,本上忠:エネルギー分布に よる RC 骨組みの応答変位予測,コンクリート工学年次 論文集, Vol. 23, No3., pp. 1225-1230, 2001.6

4)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,第53
 2号, pp. 137-143,2000.6

5) 室重行,向井智久,衣笠秀行,野村設郎:梁降伏形 RC 構造物の設計手順に関する研究-その1:設計手法の検 討,日本建築学会学術講演梗概集(関東),C-2,pp. 645-646, 2001.9

6)向井智久,室重行,衣笠秀行,野村設郎:梁降伏形
 RC 構造物の設計手順に関する研究-その2:地震応答解析
 による検討,日本建築学会学術講演梗概集(関東),C-2,
 pp. 647-648,2001.9

7) 菊本衛,向井智久,衣笠秀行,野村設郎:層崩壊型 RC 構造物の最大応答変形予測に関する基礎的研究-崩壊 層と等価1質点の関係-,日本建築学会構造工学論文集, Vol47B, pp. 503-510, 2001.3

8)日本建築学会関東支部:耐震構造の設計-構造計算の すすめ方・7, pp.189-194, 1981

9)建築研究振興協会:鉄筋コンクリート造建築物の性能 評価ガイドライン, pp.84, 2000