論文 RC造連層耐震壁付きラーメン建物の地震時応答特性とエネルギー に基づく耐震設計手法

向井智久^{*1}·衣笠秀行^{*2}·野村設郎^{*3}

要旨:鉄筋コンクリート造10階建て連層耐震壁付きフレームを対象としエネルギーに基 づく耐震設計法を提案することを目的として地震時の応答性状を検討した。建物の崩壊 形としては,1層壁脚の曲げ降伏または基礎浮き上がり構造を対象とした。応答解析の 結果,壁脚部の基礎の固定条件別に柱及び壁部材の応力負担の変化や動的増幅係数,主 要部材のエネルギー吸収量について示した。またエネルギー設計手法を適用するための 検討として等価1質点系による地震動の建物に対する破壊力の推定を行った。

キーワード:連層耐震壁ラーメン構造,応力負担,動的増幅,エネルギー応答,等価1質点系

1. はじめに

筆者らは、鉄筋コンクリート造多層建物(純 ラーメン形式及び弱層を有する形式)を対象に エネルギー入力速度概念¹¹を用いて, 地震時の 繰り返し挙動を考慮した耐震性能設計及び評価 手法を提案²⁾してきた。また1スパンの連層耐 震壁構造建物(崩壊形は1層壁脚曲げ,基礎浮 き上がり、1層または4層のせん断破壊を検討) を対象として,前述した文献による手法を適用 するための検討³⁻⁴⁾を行い,壁がせん断破壊す る場合に地震動の建物に対する破壊力(以後, 地震動の威力) である総エネルギー入力量 ED と繰り返し数 ND の推定が困難であること以外 は、本手法を適用できることを確認している。 しかし一般的には純ラーメン部分を同じ構面に 有する連層耐震壁付きラーメン建物が多いもの と考えられ、それらは各部材の損傷や負担応力 及び動的増幅係数など検討するべき項目は多く, かつ壁脚部の基礎の固定条件によってこれらの 応答値は変化するものと考えられる。加えて、 前述した文献にて示したエネルギー設計手法を 適用する場合,まず基礎的に各部材のエネルギ 一応答や等価1自由度が多層骨組に入力するエ

ネルギーの推定等について検討する余地がある。

そこで本研究では,RC 造10階建て連層耐震 壁付きラーメン建物を対象に応答解析を行い, 柱及び壁部材の応力負担や動的増幅係数,エネ ルギー吸収の割合などの応答値を,基礎が固定 され1層壁脚が曲げ降伏する場合と基礎が浮き 上がる場合とを比較し検討する。さらに,本建 物にエネルギー設計手法を適用するための基礎 的検討として,等価1質点系による地震動の威 力の推定及び壁部材の損傷推定を行う。

2. 解析概要

2.1 解析対象建物

本論で扱う建物は図-1に示すように中央スパ ンに連層壁をもち、2×3スパンの平面を有する RC 造10階建て連層耐震壁付きラーメン建物で ある。解析対象としているのは図-1の Y2構面 である。図-2には解析建物を基礎の固定条件 (図-3参照)別に、3次までの刺激関数を示す。 基礎固定の建物(Type1)は1次固有周期が0.57 秒,基礎が浮き上がる建物(Type2)は0.669秒 である。部材断面は柱は800×800[mm],耐震 壁側柱600×600[mm],梁部材は上層ほど断面

*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 理工学部建築学科 助教授 工博 (正会員)
*3 東京理科大学 理工学部建築学科 教授 工博 (正会員)

を小さくし500×800から300×600[mm]である。 がりを表現する軸バネを設定した (図-5中の 壁厚は180から120「mm]で,鉄筋はダブル配筋 としている。コンクリート強度は24N/mm²で, 主筋は SD295から390までを使用した。

2.2 部材のモデル化とその復元力特性

図-4に基礎が固定された場合の1層部分のモ デル化を示す。2層以上も1層同様である。梁部 材は材端に曲げバネ,材中央にせん断バネを設 定した。柱部材は、梁部材に軸方向バネを追加 して設定した。ちなみに曲げ耐力はメカニズム 時の圧縮および引張軸力値を平均し、間接的に 変動軸力を考慮した。壁部材は、パネル部分は 端部に曲げバネを,材中央にせん断及び軸バネ を設定した。また側柱は連層壁の全体曲げ変形 を考慮するため軸方向バネを設定した。また梁 は剛としている。それら各バネの復元力特性は 図-5に示す。曲げバネは Degrading-Bilinear 型と し, せん断バネは原点指向型とした。軸バネは 引張側は鉄筋の剛性及び耐力を, 圧縮側は RC の弾性剛性を用いた。Type2では基礎の浮き上



「基礎バネ」)。引張側は荷重を全く負担せず、 圧縮側は弾性とした。剛性は杭基礎の RC の弾 性剛性とした。また柱及び梁のせん断耐力は文 献5を、それ以外は文献6を参照して算出した。

2.3 解析パラメータ

本論では、静的解析及び地震応答解析を行う。



解析パラメータを表-1に示す。基礎固定条件の 異なる建物が2種類,静的解析では外力分布は Ai 分布とした。動的解析では入力地震動は観 測波3波(El-CentroNS 成分,神戸海洋気象台波 NS 成分,TAFT EW 成分)について,対象建物 が弾性及び弾塑性になるように最大速度を調整 して用いた。減衰の種類は瞬間剛性比例型とし, 定数は0及び5%としている。

3. 解析結果

3.1 静的解析結果

図-6はタイプ別に、各階の層せん断力と層間 変形について部材の損傷(降伏)した点を併せ て示す。ただし凡例中の「梁曲げ降伏最終ステ ップ」とは、ある通りの全ての梁が降伏に至っ た点である。基礎固定(Type1)は基礎浮き上 がり(Type2)に比べ大きな層せん断力を負担 している。また Type2は基礎が浮き上がり連層 壁が剛体変形することで各層の変形がほぼ一定 となる。Type1の損傷過程は、1層壁脚部の曲げ 降伏の後,引張となる1層の側柱(X2構面柱) の軸降伏及び X1-X2通りの全ての梁部材が曲げ 降伏し,建物の保有水平耐力に達する。また T ype2は、小さい変形角で基礎が浮き上がり(基 礎バネの負担応力が0となり), 純ラーメン部 分の1層柱脚が曲げ降伏し、X1-X2通りの全て の梁が曲げ降伏した後に保有水平耐力に達する。

次に各層壁部材の応力負担割合を検討する。 図-7は、縦軸に層せん断力に対する壁部材の負 担割合を横軸にベースシアを、層数毎に示す。 Type1は1層の壁部材が9割以上負担しており、 他層の壁は上層ほど負担割合は減少する。さら に壁脚が曲げ降伏すると、負担割合は1層で低 下する。Type2では基礎の固定条件の影響で Ty pe1と比べ壁部材の負担せん断力割合が低く、 特に1層が低い。また壁の浮き上がりが始まる と1層壁部材の負担せん断力割合はさらに低下 し、柱部材の負担が大きくなることが分かる。

図-8には横軸にベースシア,縦軸に1層柱の 変動軸力を建物別に示す。Type1は,耐震壁の



図-8 1層柱部材の負担変動軸力

側柱が大きな変動軸力を負担し、1層壁脚が曲 げ降伏した後は負担する変動軸力は更に大きく なる。ちなみに各柱の長期軸力に対する負担割 合は、ほとんど等しい。Type2の耐震壁の側柱 の負担する変動軸力は Type1に比べ極めて小さ い。一方、純ラーメン部分の柱(X1, X4構面 柱、以後単に柱と呼称)は、ベースシアが比較 的小さいにもかかわらず、Type1とほぼ同等の 軸力を負担している。

3.2 動的解析結果と静的解析との比較

3.2.1 柱及び壁部材のせん断力の負担

図-9に動的解析の結果(図は TAFT50kine, h =0%の場合)得られる層せん断力, 壁及び柱部

材のせん断力負担を,静的結果と比較して示す。 なお静的の値は,最上階最大変位が動的解析か ら得られる値となる時の STEP を用いている。

Type1では,層せん断力は静的の値に比べ下 層及び上層で増加し,壁部材のせん断力負担が も大きくなる。逆に柱部材の負担は静的解析結 果同様,各階おおよそ同じである。一方,Type 2では Type1同様,壁部材のせん断力負担が支 配的である。また静的解析においては1層の壁 部材が負担するせん断力負担は小さいが,動的 時には顕著に増加している。このことは地震時, 壁の曲げ応力状態が純曲げよりむしろ,逆対称 に近い状態であることを示唆している。また他 の地震動の場合も同様の結果が得られている。

3.2.2 柱及び壁部材の応力の動的増幅

図-10に動的解析の結果得られるせん断力の 動的増幅係数(層せん断力及び壁及び柱部材の せん断力を,静的結果のそれで除す)を建物 (減衰0%)及び地震動別に示す。図中の柱及 び壁部材の「設計値」とは,文献6において示 される手法(静的せん断力を Ai 分布とした場 合)により算出し,層全体の設計値は柱及び壁 部材の設計値を用いて算出している。

Type1の耐震壁及び層全体は下層及び上層で せん断力が増幅し、特に TAFT では各層設計値 を上回り、この影響で1層壁脚部が曲げ降伏し た後にせん断破壊している。なお紙面の都合上 示していないが、減衰を考慮した場合はおおむ ね設計値以下に収まっていた。柱部材は減衰の 有無に関係なくおおむね設計値以下に収まって いる。一方 Type2は最下層及び最上層で, 壁部 材の値が大きく増幅し設計値を上回っている。 また2層の柱部材のせん断力も増加し、設計値 を大きく上回っている。また減衰を考慮した場 合でも,最下層及び上層の壁部材及び層全体の 応答値は設計値を上回っていた。このことから, 浮き上がり構造の1層壁部材及び2層柱部材が動 的時に大きなせん断力を負担することがあるた め、設計上考慮する必要がある。

図-11に1層及び2層の柱, 側柱の変動軸力 (引張及び圧縮)に関する動的増幅係数を建物 別に示す。入力波は ELCE50, 減衰は0%の場 合である。図より Type1は2層の側柱がやや大 きく設計上, 注意が必要である。Type2も Type 1同様, 側柱の変動軸力の増幅が大きく, 特に2 層のそれが顕著である。減衰を考慮した場合,



この傾向はやや緩和されるが,ほぼ同様の傾向 が得られている。

3.2.3 エネルギー応答

図-12に JMAKOBE (50kine) を入力した際のエ ネルギーの時刻歴応答結果を建物別、減衰別に 示す。図-12(a)にはエネルギー吸収が大きい壁 部材も併せて示す。図-12(a)右図より, Type1 の履歴吸収エネルギーの多くを壁部材(1層) が吸収しているが,粘性減衰吸収量が履歴減衰 吸収量を上回っている。一方,図-12(b)より T ype2は Type1と同じ粘性減衰の種類及び定数に も関わらず、粘性減衰吸収エネルギーより履歴 吸収エネルギーの占める割合が大きい。これは Type1の建物が高剛性であるため,瞬間剛性比 例の減衰が効果的に利いたためである。次に図 -13にエネルギー吸収の割合を示す。図より Ty pe1では、粘性減衰が無ければ壁(図中(1)、 (2)) 及び梁部材((3)) がほとんどのエネルギ ーを吸収している。Type2では、梁部材がほと んどのエネルギーを吸収していることが分かる。

エネルギー設計手法のための等価1質点系 を用いた検討

エネルギー設計法において, 建物に入力する 総入力エネルギー量 ED 及び繰り返し数 ND を 推定することは重要²⁾ である。そこで等価1質 点系を用いて, 推定することの可能性を検討す る。また等価1質点系を用いる利点は, 繰り返 し変形を含めたエネルギー吸収部材の靭性設計 に活用する²⁾ ことにもある。従って, まずは基 礎的検討として Type1の壁部材の曲げバネと等 価1質点系との時刻歴応答について比較する。

図-14に, ED と ND について, 横軸は多層骨 組の地震応答解析から得られる「応答値」を, 縦軸に等価な1質点系(文献3)から得られる 「推定値」を示す。図より, Type1の場合に N D をやや小さく推定するケースもあるが, 変形 量を推定する点において安全側の評価であるこ とから, ED, ND の推定精度として十分に活用 できるものと言える。



定精度が低下するケースも見られる。このこと は高次モードの影響で壁以外の部材が応力を負 担しているものと考えられる。以上のことから, 等価1質点系から本建物における壁部材の動的 挙動の推定にはさらなる検討が必要である。

5. まとめ

鉄筋コンクリート造10階建て連層耐震壁付き フレーム建物を対象としエネルギーに基づく耐 震設計法を提案することを目的として静的及び 動的応答解析を行い,基礎固定の条件別に地震 時の応答性状について検討した。

1) 基礎浮き上がり構造の1層耐震壁及び2層柱
 部材は大きなせん断力を負担し,現行指針で示
 される値を上回っていた。またいずれの建物も
 2層側柱は大きな変動軸力を負担していた。さ
 らに,それら応力負担割合は減衰の有無に影響
 を受ける。さらに部材レベルでのエネルギー吸
 収割合についても示した。

2)等価1質点系が、多層建物の総入力エネルギー量 ED を精度良く、繰り返し数 ND をやや小 さく見積もるケースもあるがおおむね推定できた。また、等価1質点系による壁部材の動的挙動の推定はさらなる検討が必要である。

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, 衣笠秀行, 野村設郎「エネルギ 一釣合に基づく RC 造梁降伏型建物の設計手 法」日本コンクリート工学年次論文集, 2003.7, Vol25, NO. 2. pp. 1-6

 3)太田健吾,向井智久,衣笠秀行,野村設郎
 :「RC 造連層耐震壁構造建物の最大応答変形 量予測に関する研究」構造工学論文集,2003.4, Vol49B, pp.209-219

4) 太田健吾,向井智久,衣笠秀行,野村設郎 「せん断破壊する RC 造連層耐震壁構造建物の



応答特性とエネルギー釣合に基づく最大変形量 予測手法」日本コンクリート工学年次論文集,2 003.7, Vol25, NO. 2. pp. 1231-1236

5) 日本建築学会関東支部:鉄筋コンクリート 構造の設計, 2002.1

6)日本建築学会:鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針・同解説,1999.8

7) 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自由度系縮約手法と地
 震応答予測精度, 日本建築学会構造系論文集,
 第546号, pp79-85, 2001.8