論文 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

太田 健吾"・向井 智久"・衣笠 秀行"・野村 設郎"4

要旨:本論ではせん断破壊する連層耐震壁構造建物を対象として,解析対象建物の地震時の 応答特性を把握した上で,瞬間的な入力エネルギー量 Emax に対するエネルギー吸収のモデ ル化と,既往の研究で提案されている全入力エネルギー量 ED に対するエネルギー吸収のモ デル化の2種類のモデル化を行った。そして,エネルギー釣合式からせん断破壊層の最大応 答変形量を予測する手法を提案した。その結果,本論で検討した2種類のエネルギー吸収の モデル化により定式化したエネルギー釣合式を用いてせん断破壊層の応答変形量を予測する 手法の妥当性を確認した。

キーワード: RC造連層耐震壁, せん断破壊, 最大変形量予測, 入力エネルギー量, 繰り返し数

1. はじめに

筆者らは、既往の研究においてエネルギー 入力速度概念に基づいたエネルギー釣合式に より, RC 造建物の最大応答変形量を予測す る手法を提案している¹⁾。その手法は,地震 動の威力を入力エネルギー量 ED と繰り返し 数 ND により評価し,エネルギー釣合式を用 いて最大応答変形量を予測するものであり、 梁降伏型や弱層を有する多層建物において適 用し,手法の有効性を確認している^{2),3)}。一方, 文献4)では1層壁脚が曲げ降伏する連層耐震 壁構造建物に関する検討を行っており,対象 建物の降伏時 1 次周期 Tey とベースシア係数 C_B を保存する等価 1 質点系への縮約手法を 示し,手法の有効性を確認している。しかし, 連層耐震壁構造建物の崩壊形としてはある層 の耐震壁がせん断破壊する場合も考えられる 事から、せん断破壊型の連層耐震壁構造建物 についての検討を行う必要がある。そこで, 本論では崩壊形と ED,ND の値が既知であり, せん断破壊により変形集中が生じる層を予め

 *1 東京理科大学、 理工学研究科建築学専攻
 (正会員)

 *2 東京理科大学
 理工学部建築学科
 助手 工博
 (正会員)

 *3 東京理科大学
 理工学部建築学科
 助教授 工博
 (正会員)

 *4 東京理科大学
 理工学部建築学科
 教授 工博
 (正会員)

特定できる連層耐震壁構造建物を対象に地震 時の応答特性を把握した上で,エネルギー釣 合に基づく最大変形量予測手法を検討する。

2. 解析概要

2.1 解析対象建物

本論では基本的な連層耐震壁の応答特性の 把握及び最大変形予測を目的としている為, 解析対象とする建物は,スパン 6m,階高 3.5m の1スパンで構成される7層の連層耐震壁構 造建物とする。図-1に連層耐震壁構造建物の 平面図,軸組図を示す。ここで,連層耐震壁 構造建物に対して断面・配筋を変化させて1



-1231-



図-2 各建物モデルの断面・配筋図

層がせん断破壊するモデルと4層がせん断破 壊するモデルを設定する。図-2において各モ デルで用いた耐震壁の断面・配筋図を示す。

2.2 耐震壁のモデル化とその復元力特性 耐震壁のモデル化は図-3に示す弾塑性バネ モデルを用いており、側柱は軸方向変形、壁 パネル部を置換した柱は,曲げ,せん断,軸 方向変形を考慮する。各バネの復元力特性と して,曲げバネは降伏時剛性を初期剛性に設 定した Degrading-Bilinear 型, せん断バネは原 点指向型でそれぞれモデル化する。ここで, せん断バネには耐力低下を考慮した復元力特 性を考慮すべきであるが,現在,せん断破壊 時の挙動を適切に捉えるモデルの決定は困難 であることから本論では設計や研究における 解析^{5),6)}で一般的に用いられている原点指向型 の復元力特性でモデル化する。軸バネは圧縮 側は弾性,引張側は Bilinear 型の復元力特性 でモデル化する。耐震壁の曲げ剛性,せん断 剛性は側柱も含めて算出し,軸バネの引張剛 性については壁軸バネは壁の全縦筋による引 張剛性を側柱軸バネは側柱全主筋による引張 剛性をそれぞれ設定する。耐震壁の曲げ降伏 強度, せん断ひび割れ強度, せん断終局強度 は文献7)を参照して求める。



2.3 解析パラメータ

解析パラメータを表-1に示す。解析に使用 した地震波は,El Centro NS 成分,JMA Kobe NS 成分,Taft EW 成分の3種類であり,各建物 モデルにおいて崩壊形に至った後の変形が十 分に得られるようにJMA Kobe は原波を,El Centro,Taft に関しては最大地動速度を75kine に基準化して用いる。粘性減衰は瞬間剛性比 例型で減衰定数は弾性1次固有周期に対し 0%,5%の2通りとする。

3. 連層耐震壁構造建物の応答特性

3.1 静的非線形解析結果

3章では解析対象建物の応答特性について 検討する。図-4において各建物モデルで Ai 分布に基づいた外力分布を用いて静的非線形 解析(以後,Pushover 解析)を行い得られた 各層の層せん断力(Q)-層間変形角(R)関係を 示す。同図において弾塑性バネモデル(図-3) の各バネが塑性化したステップにおけるQ-R の点をプロットしている。図-4の解析結果よ り,せん断破壊する層は他層に比べて剛性の 低下が著しく,せん断破壊後はその層に変形 が集中する多層構造物におけるせん断破壊特 有の Q-R 関係が得られている事が分かる。 また,本論で用いる建物の損傷レベルの1つ として,弱層せん断破壊時の1層壁脚曲げモ ーメントの値(M1)を1層耐震壁の曲げ降伏



強度(My)で除した値 (=M1/My)を定義し, 各建物モデルにおいて算出した。その結果,1 層せん断破壊モデルでは =0.72,4 層せん断 破壊モデルでは =0.63 であり,曲げに対す る余裕度はせん断に比べて十分に大きい建物 モデルであると言える。

3.2 エネルギー吸収特性

せん断破壊モデルの地震時の応答特性を把 握する為に,各建物モデルにおいて地震応答 解析を行い得られた各層の最大層間変形角分 布と履歴吸収エネルギー分布を比較した。そ の結果,全ての解析ケースにおいて本論で設 定した2種類の建物モデル共にせん断破壊層 の応答変形が最大耐力時変形(、)を大きく



上回り,せん断破壊層の履歴吸収エネルギー が他層に比べて非常に大きな値となる事を確 認している。そこで,せん断破壊モデルのエ ネルギー吸収特性をより詳細に検討する為 に, せん断破壊層の時刻歴応答変位, 連層耐 震壁構造建物の入力エネルギー(TIE),履歴 吸収エネルギー(THDE),粘性減衰吸収エネ ルギー(TVDE),運動エネルギー(TKIE)の時 刻歴を比較する。図-5は1層せん断破壊モデ ル,図-6は4層せん断破壊モデルの時刻歴応 答結果を示している。入力地震波は JMA Kobe NS(原波)である。図-5,図-6より TIE は せん断破壊層の応答変形の増大に伴い急激に 増大する傾向があり, TIE の最大値(EDmax)が 最終解析時刻における値(EDm)と異なる場合 が存在する事が分かった。そして, THDE は せん断バネに設定した原点指向型の復元力特 性の影響を受けて,吸収と放出を繰り返しな がら時々刻々エネルギーを蓄えるといった不 安定なエネルギー吸収特性を示している。ま た,最終解析時刻における TVDE の割合は最 大変形算出時刻における割合に比べて大きい 事が分かる。以上のエネルギー吸収特性より、 エネルギー吸収のモデル化を考える際には対 象とする時刻におけるエネルギー入力量,工 ネルギー吸収の割合やエネルギー放出量を適 切に評価する事が必要であると言える。

3.3 せん断破壊モデルのED,ND

4章で検討するエネルギー釣合式による応 答予測手法では,外力の大きさとして地震動 の威力を入力エネルギー量 ED と繰り返し数 ND により評価する。そこで,3.3ではせん断 破壊モデルにおける ED,ND の値について検 討する。図-5,図-6では,本論のせん断破壊 モデルにおける入力エネルギー TIE の最大値 (EDmax)が最終解析時刻における値(EDfm)と異 なるケースが存在した。そこで,図-7で全解 析ケースにおける EDmax と EDfm を比較する。

図-7の結果から,解析ケースによっては ED_{max}と ED_{fn}の値にはやや差がある場合が存



在し,特に減衰定数 0%の結果にその傾向が 見られる。最大応答変形には EDfan より EDmax が寄与すると仮定し,エネルギー釣合式中で 用いる入力エネルギー量 ED には EDmax を用 いる事とする。

次に,繰り返し数 ND の値について検討す る。筆者らは既往の研究において ND を入力 エネルギー量 ED と等価周期 T。当たりに入力 するエネルギー量の最大値である Emax を用 いて式(1)により定義している。

$$ND = ED / E_{max}$$
(1)

なお,等価周期 T。は地震応答解析から得 られた各層の正負それぞれの最大変形より求 めた等価剛性 K_e(図-8)と各層の質量 miを用 いて固有値解析を行い算出する。

ここで,式(1)により算出した ND の値と は別に ED と等価周期 T。当たりにせん断破壊 層で吸収するエネルギー量の最大値である THDEmaxjを用いて算出した ND*の値を式(2)よ り算出する。なお, THDEmaxjの算出は図-9 に示すように実際のせん断破壊層の THDE の 時刻歴を包絡した曲線より算出する。

ND^{*} = ED/ THDE_{max j} (2) ND と ND*を算出し, Emax, THDEmaxjを

比較する事により 1 サイクル (等価周期 T。)当 たりに入力するエネルギー量の最大値である Emax をせん断破壊層の履歴吸収エネルギー

として 1 サイクル当たりにどの程度吸収して





いるかを確認する。図-10の結果より, Emax と THDEmaxiは概ね等しく,両者から求めた NDの値も同様に相関性が見られた。しかし, 図-7で示した入力エネルギー量が大きい解析 ケースにおいては, THDEmaxiが Emax よりも 小さくなる傾向がある。以上の結果より,本 論で設定したせん断破壊モデルでは,減衰の 有無に関わらず,1 サイクル当たりに入力す るエネルギー量の最大値 Emax の殆どをせん 断破壊層の1 サイクルの履歴吸収エネルギー

THDEmax」により吸収する特性があるが,入 カエネルギーが大きい場合は1サイクルの履 歴吸収エネルギーでは Emax を十分に吸収で きないケースが存在する事が分かった。

4. せん断破壊層の最大応答変形量予測 3章において,本論で設定したせん断破壊 モデルではせん断破壊層で地震入力エネルギ ーの大部分を吸収する事を確認している。従 って,エネルギー吸収のモデル化に際して, せん断破壊層のみで地震入力エネルギーを吸 収すると仮定し,せん断破壊層に対してエネ ルギーの釣合式を考える。本論で提案する最 大応答変形量予測手法のフローを図-11に示



図-11 最大変形量予測手法のフロー

す。なお,本論ではせん断破壊モデルにおけ るエネルギー吸収のモデル化の妥当性を確認 する事を目的としている為,ED,NDの値に は連層耐震壁構造建物の地震応答解析から得 られる応答値(EDmax,ND)を用いる。また, エネルギー吸収のモデル化に関しては,瞬間 的な入力エネルギー量 Emax に対するエネル ギー吸収のモデル化(4.1)と既往の研究で提 案されている全入力エネルギー量 ED に対す るエネルギー吸収のモデル化をせん断破壊モ デルに適用する場合(4.2)の2種類を考える。

Emaxによるエネルギー吸収のモデル化 4.1 図-10で示した結果より,本論のせん断破 壊モデルでは,1 サイクル(等価周期 T_e)にお ける入力エネルギー量の最大値 Emax とせん 断破壊層の履歴吸収エネルギー量の最大値 THDEmaxiには高い相関性があった。その傾向 は粘性減衰吸収エネルギーを考慮した減衰定 数 5%の解析ケースにおいても同様に見られ た。すなわち,せん断破壊モデルでは Emax はほぼせん断破壊層の履歴吸収エネルギーの みで吸収する特性があると言える。そこで, 4.1では EDmax と ND の応答値から 1 サイクル 当たりに入力するエネルギー量の最大値であ る Emax を式(3)より算出し, 0.5 Emax が半サ イクルの履歴吸収エネルギー量(ΔES)と等し いと仮定する事により繰り返し挙動や粘性減 衰吸収エネルギーを直接考慮せずに瞬間的な エネルギー入力に対してせん断破壊層のエネ ルギー吸収のモデル化を行う。

$$E_{max} = ED_{max} / ND$$
 (3)

図-12において4.1で提案するエネルギー吸



収のモデル化を示す。せん断破壊層の半サイ クル当たりのエネルギー吸収量 ES に対し て半サイクルの骨格曲線で囲まれる面積が等 価となるように履歴吸収エネルギー量 E1,E2 とエネルギー放出量 Edi に分けて式(4)でエ ネルギー釣合式を定式化する。

$$ES = E1 + E2 - Edi$$

$$E1 = 0.5\{ c Q_{c} + (y - c) (Q_{y} + Q_{c})\}$$

$$E2 = Q_{y p} = Q_{y}(p - y)$$

$$Edi = 0.5Q_{y D}$$
(4)

ここで,式(4)中の Q₆,Q_y, <u>,</u>, <u>,</u> は Pushover 解析により得られるせん断破壊層(j層)の層 せん断力(Q_i) - 層間変位(<u>i</u>)関係をトリリニ ア化した骨格曲線より求める。

式(4)において ΔES=0.5ΔEmax とし,平均塑性 率 μave(正負の最大塑性率の平均値)について 解くと以下の式(5)が得られる。

$$\mu_{ave} = \frac{E_{max} \cdot K_{ey} - 0.5(- +1)Q_{y}^{2}}{Q_{y}^{2}}$$
 (5)

ここで,式(5)中の K_{ey}は j層の降伏時剛性 であり, , は以下の式(6),式(7)でそれ ぞれ表している。

$$= K_{ev} / K_{0}$$
 (6) $= Q_{c} / Q_{v}$ (7)

式(5)により求めた μ₄∞ に j層の降伏変位 , を乗じてせん断破壊する層の正負最大平均変 形 ∍を推定する。

4.2 既往式によるエネルギー釣合式

次に,筆者らが既往の研究により提案して いるエネルギー釣合のモデル化をせん断破壊 モデルに適用する場合を考える。せん断破壊 する層のエネルギー釣合式を考える際に,最 大平均変形 ₀を定変位振幅として定常振動 すると仮定し,図-13に示すエネルギー吸収 のモデル化を考える。既往のモデル化におい ては,2 サイクル目以降の累積塑性歪みエネ ルギー Ec 項が存在しているが,本論ではせ ん断バネに設定した原点指向型の復元力特性 に対して,エネルギー吸収のモデル化を設定 する為,Ec 項は存在しない。従って,せん 断破壊モデルにおけるエネルギー吸収量 ES



をせん断破壊層の弾性歪みエネルギー Ey, 塑性歪みエネルギー Eds,粘性減衰吸収エネ ルギー Eh に分けて式(8)でモデル化する。

$$ES = Ey + Eds + Eh$$
(8)

$$Ey = 0.5\{ cQ_{c} + (y - c)(Q_{y} + Q_{c}) = 2Q_{y} = 2Q_{y}(D_{c} - y)$$

$$Eds = 2Q_{y} = 2Q_{y}(D_{c} - y)$$

$$Eh = 2h_{0}Q_{y} = DND$$

式 (8) において ES=ED_{max} とし, µ_{ave} について 解く事により以下の式 (9) が導かれる。

$$\mu_{ave} = \frac{ED_{max} \cdot K_{ey} - 0.5(- -3)Q_{y}^{2}}{2(1 + h_{0}ND)Q_{y}^{2}} \qquad (9)$$

ここで,式(9)中の記号 , は4.1と同様 に式(6),式(7)から得られる。また,h₀は減 衰定数を表している。式(9)にて求めたμ∞にj 層の降伏変位 ,を乗じてせん断破壊層の正 負最大平均変形 ₀を推定する。

4.3 精度検証結果

図-14において,4.1,4.2に検討したエネ ルギー釣合式を用いて最大応答変形量予測を 行い得られたせん断破壊層の正負最大平均変 形 ave と地震応答解析結果を比較する。

図-14の左図の結果より,せん断破壊層の エネルギー吸収のモデル化として,4.1で示 したように1サイクル当たりに入力するエネ ルギー量の最大値である Emax をせん断破壊 層の履歴吸収エネルギーのみで吸収すると仮 定し, Emax に対してエネルギー吸収のモデ ル化を行う事は概ね妥当であると言える。ま た,既往の研究におけるエネルギー釣合式を せん断破壊モデルに適用した右図の結果も高 い推定精度が得られている事から,エネルギ



一入力速度概念により,実際の応答を最大平均変位
 っで定変位振動すると置き換える仮定が本論におけるせん断破壊モデルにも,適用可能であると考えられる。以上の結果より,本論のせん断破壊モデルの最大応答変形量を予測する際に用いるエネルギー吸収のモデル化として,4.1,4.2で示したモデル化を考慮してエネルギー釣合式を定式化し,せん断破壊層の応答予測を行う妥当性を確認した。

5. まとめ

本論では崩壊形と ED,ND が既知であり, せん断破壊を伴う変形集中が生じる層を予め 特定できる連層耐震壁構造建物を対象にして 地震時の応答特性及びエネルギーに基づいた 最大変形予測手法を検討した。その結果,応 答予測手法の有効性を確認した。

参考文献

1),2),3)向井智久ほか:RC構造物を対象としたエネルギ ーに基づく耐震性能設計手法[その1,3,4],日本建築学会 大会学術講演論文集(北陸),C-2,pp.911-pp.912, pp.915-pp.918,2002.8 4)太田健吾ほか:RC造連層耐震 壁構造建物の等価1質点系への縮約手法に関する研究, 日本建築学会大会学術講演論文集(北陸),C-2, pp.887-pp.888,2002.8 5)Dinh Van THUAT, Tatsuzo UMENO, Toshikatsu ICHINOSE:Seismic Evaluation of Reinforced Concrete Frame and Wall Structures Predicting Response Displacement, コンクリート工学年次論文集, Vol.22, No.3, pp.1411-pp.1416,2000 6)構造計画研究所: 建築構造物の振動解析プログラム RESP-M/ 利用者マ ニュアル,pp. -59, -16, -25,1999 7)日本建築学会関 東支部:鉄筋コンクリート構造の設計 - 学びやすい構造 設計 - ,pp.326-pp.341,2002