論文 鉄筋コンクリート造実大壁フレーム構造のスラブ有効幅の検討

松井 智哉*1・壁谷澤 寿海*2・倉本 洋*3・松森 泰造*4

要旨:実大鉄筋コンクリート造建物の3次元震動破壊実験で用いられる鉄筋コンクリート造 6 層壁フレーム構造を対象に非線形応答解析を行なった。耐震壁の耐力低下を考慮したアイ ソパラメトリック要素,柱及び梁を材端バネモデルでモデル化し、スラブの有効幅を変数と した解析により、スラブの有効幅が耐震壁および建物全体の挙動に及ぼす影響について検討 を行なった。その結果、有効スラブ幅を増大させると、耐震壁の負担せん断力が増加すると ともに、建物は層崩壊形に移行することを示した。

キーワード:鉄筋コンクリート,壁フレーム構造,スラブの有効幅,地震応答解析

1. はじめに

本論文では,独立行政法人防災科学技術研究 所(大型3次元震動実験施設:E-Defense)にお いて実施された実大鉄筋コンクリート造6層壁 フレーム建物の試験体を対象に非線形応答解析 を行ない,スラブの有効幅が耐震壁および建物 全体の挙動に及ぼす影響について検討を行うと ともに,対象試験体の応答性状の把握を目的と している。

鉄筋コンクリート造 T 型梁もしくはスラブの 有効幅に関する実験的研究^{1)・3)}はいくつか行な われており、スラブが引張側となる曲げを受け る梁では、スラブ筋が梁の曲げ抵抗に協力し、 曲げ強度がスラブ無しとして計算した値よりか なり上昇する場合もあり、スラブの有効幅は、 変形の増大に伴ってほぼ全幅に近い値となるこ とが、最大耐力の計算値との対応から確認され ている。また、耐震壁の復元力特性は、境界梁・ 直交梁といった周辺部材の拘束効果による影響 を受けることから^{4)、5)}、スラブの有効幅によっ て建物全体の挙動も異なってくることも考えら れる。「鉄筋コンクリート造建物の靭性保証型耐 震設計指針・同解説」⁶では、保証変形内にとど めることを想定し、曲げ上限強度は信頼強度の 算定で仮定した有効スラブ幅の2倍を考慮する としている。今回の解析では、耐震壁の耐力低下 が生じるような、変形が大きくなる領域も検討 範囲としていることから、スラブの有効幅を変 数とした非線形解析を行なった。

2. 解析対象試験体

解析の対象となる 6 層壁フレーム構造の立面 図と基準階の平面図を図-1 に示す。試験体は, 階高 2.5m, 2×3 スパンで,柱,梁,連層耐震壁, 腰壁,袖壁,短柱といった構造部材から構成さ れている。柱は 500×500mm,主筋 8-D19,せん 断補強筋 D10@100 で全て同一であり,梁は 300 ×500mm,主筋 3-D19 あるいは 2-D19 である。 X2 フレームの中央に配する連層耐震壁および Y1,Y2 フレームに配する袖壁の壁厚は 150mm, 縦横壁筋は D10@300 ダブル,X1 フレームに配 置されている腰壁は,壁厚 120mm,D10@200 シ ングルである。スラブ厚は,R 階で 190mm,2 ~6階で 150mm,配筋は上下共D10@200 である。

3. 解析方法

3.1 解析条件

試験体は3次元でモデル化し、剛床を仮定す

*1 豊橋技術科学大学 工学部建設工学科助手 博士(工学) (正会員)

*2 東京大学 地震研究所教授 工博 (正会員)

*3 豊橋技術科学大学 工学部建設工学科助教授 博士(工学) (正会員)

*4 独立行政法人防災科学技術研究所 兵庫耐震工学研究センター 博士(工学)(正会員)



図-1 解析対象試験体の平面図および立面図

する。使用する材料強度については、コンクリ ート強度は 24N/mm², D10 および D19 の鉄筋の 降伏強度はそれぞれ 354 N/mm², 380 N/mm² と仮 定した。重量は単位床面積当り 11.8kN/m² とし、 支配面積の質量を各節点に集中質量として与え、 水平成分のみ考慮する。各層の重量は、1,225kN となる。基礎は固定とする。連層耐震壁のみ耐 力低下を考慮してモデル化する。

3.2 解析モデル

耐震壁のモデル化においては耐力低下性状を 考慮するため、アイソパラメトリック耐震壁モ デルを用いる。本モデルの特徴は、図-2に示す ようにパネル要素と柱、梁部材で構成されてお り、RCパネル要素にアイソパラメトリック要素 を用いることにより、せん断力・モーメント・ 軸力の相互作用を考慮でき、曲げ降伏後のせん 断破壊といった複雑な挙動を表現できることで ある。側柱は、軸方向の剛性のみを考慮し、後



図-2 アイソパラメトリック耐震壁モデル

で示す独立柱の軸バネと同じ非線形ばねモデル を用い,梁の曲げ剛性は剛としている。

パネル要素におけるコンクリートの構成則に は、ひび割れモデルとして回転ひび割れモデル を採用し、コンクリートの材料モデルにおいて コンクリートの圧縮ひずみに対して直交する引 張ひずみによって圧縮強度を低減させる方法を とっている(図-3)。負勾配領域における剛性 は、初期剛性の 0.001 倍とした。鉄筋は軸方向の みの剛性を考慮し、履歴モデルはバイリニアモ デルとしている。本モデルに関する詳細な理論 及び検証については文献 7) - 9)において示され ており、耐震壁の耐力が急激に低下する変形域 まで概ね模擬可能であるとしている。

梁、柱、腰壁および袖壁には、剛域を考慮し た弾塑性材端バネモデルを用いる。回転バネの 復元力特性は Tri-linear 型とし, 履歴特性に Takeda モデルを用いる。復元力の各折れ点は曲 げひび割れ、曲げ降伏に対応するとし復元力特 性は文献 6)の算定方法に従った。ここで, T 型 梁の有効スラブ幅は、「鉄筋コンクリート構造計 算規準・同解説」¹⁰⁾による 0.5m(片側 0.1L, L: スパン長) (Model-1), それより大きくした 0.9m (Model-2), 1.2m (Model-3) を設定した。図-4にモデルごとに設定した梁の曲げバネのスケ ルトンカーブ(M - θ関係)を示す。これにより, 2 階における柱/梁耐力比は,約 1.9 (Model-1), 1.5 (Model-2), 1.25 (Model-3) となる。降伏後 の剛性は初期剛性の 0.001 倍とした。柱の軸バネ は非線形として Axial-Stiffness モデルを用い¹¹⁾, 圧縮側は弾性、引張側は鉄筋のみを考慮すると して剛性を低下させる。また、柱全主筋の引張 降伏耐力で引張降伏するとし、初期軸力を考慮 する。降伏後の剛性は初期剛性の 0.001 倍とした。

剛性変化による不釣合力は,次のステップで 外力に足し合わせて解除することとした。

4. 変位增分解析

ここでは,非線形変位増分解析を行ない,建 物の崩壊モードの違いについて検討する。外力 分布には,逆三角形分布を仮定し,載荷方向を Y 方向のみとした。

図-5に全体変形角 R,=0.02rad.時の Model-1 と Model-3 の部材の降伏ヒンジ発生位置を示す。ま た,図-6には、全体変形角とベースシヤー係数 (1層層せん断力および1層耐震壁のせん断力を 上部構造の総重量で除した値とした)の関係を 示し、併せて、1層壁せん断破壊、2層壁せん断 破壊、1層層降伏が生じた点をプロットしている。 ここで、解析における耐震壁のせん断破壊の目 安として、アイソパラメトリック要素の半分以 上の積分点におけるコンクリートのひずみが軟







(耐震壁を押え込む方向を正として表す)

化域に達したときとし,層降伏は,当該層において壁がせん断破壊,全ての柱の柱頭・柱脚において降伏ヒンジが発生した時とした。図-7に1層耐震壁の周辺部材(境界梁,直交梁)のせん断力(耐震壁には軸力として作用する力)を示す。

Model-1 では、最終的に 1 層と 2 層の耐震壁が せん断破壊に至るものの耐震壁の耐力低下は緩 やかで、全体のベースシヤー係数をみても *R*,=0.027rad.まで耐力を維持している。また、 *R*,=0.02rad.では短柱の柱頭、柱脚は降伏している が、耐震壁はせん断破壊に至らず、*R*,=0.02rad.



以降も崩壊形は全体降伏形を形成している。 考慮するスラブの有効幅が大きくなると耐震 壁の最大ベースシヤー係数は、それぞれ 0.29, 0.31, 0.33 であり 1 割程度上昇している。また、 1 層耐震壁のせん断破壊が生じる全体変形角は、 0.021rad. (Model-1), 0.017rad. (Model-2), 0.015 rad. (Model-3)と減少していく傾向にある。この傾向 は、図 - 7 に示されるようにスラブの有効幅の増 加に伴って、耐震壁の引張側に作用する梁によ って押え込む力が大きくなっており、壁板コン クリートのひずみが早期に軟化域に達するため である。

図-8 に全体変形角 *R*_r=0.015, 0.02rad.時の階 ごとの水平変位を示す。*R*_r=0.015rad.では, どの ケースも同じように直線的な変形分布となって いるが, *R*_r=0.02rad.になると, Model-1, Model-2 では直線的な変形分布を保っているが, Model-3 の場合, 2 階の変位が急激に増大しており, 1 層 部に変形が集中しているのがわかる。これは, 図-6 において耐震壁の耐力が *R*_r=0.015rad.付近 ではどのケースも耐力を維持しているのに対し, *R*_r=0.02rad.付近ではModel-3のみ耐力が大きく低 下すること, 図-5 より,降伏ヒンジ発生状況が 異なることに対応する.

以上のことから,周辺部材の拘束効果が耐震 壁の復元力特性(特に,せん断破壊時の変形) に影響を与え,最終的にModel-3ではR,=0.018rad. で層降伏メカニズムを形成しており,スラブの 有効幅の増大が建物の崩壊メカニズムに及ぼす 影響を確認することができる。

5. 地震応答解析

5.1 入力地震動

入力地震動は 2 方向入力とし,JMA (1995 年 兵庫県南部地震,神戸海洋気象台の記録[NS, EW 成分])を用いた。このとき建物の Y 方向(連層 耐震壁方向)の応答が大きくなるように図-9 に 示す方向で入力した。入力レベルは観測記録を そのまま用い,X 方向で最大加速度 507gal,Y 方向で 845gal となる。地震応答解析において数 値積分法は Newmark-B 法 (β=0.25)を用い,時 間刻みを 0.002sec とした。減衰は瞬間剛性比例 型で減衰定数は1 次固有周期に対して 5%とし た。

5.2 解析結果

図-10 に Model-1, 2, 3 のベースシヤー係数 と全体変形角および 2 階変形角の関係を示す。 最大応答全体変形角は、どの解析モデルにおい ても0.03rad.程度でほとんど変わらない。しかし、 2 階変形角をみると、Model-1、Model-2、Model-3 とスラブの有効幅が大きくなるにつれて応答変 形が増大していく。これは、1 層耐震壁のせん断 破壊時の変形角(図-10 中〇印)からわかるよ うに、4節で述べたことと同じく Model-3 は、他 と比べて早い段階で耐震壁がせん断破壊に至る 傾向にあるためである。それによって、Model-3 の2階変形角は、耐力の低下とともに急激に増 大していき、Model-1、2ではみられない層降伏 を、全体変形角で0.018rad.、2階変形角で0.023rad. で形成する。

さらに、1 層耐震壁のせん断破壊が生じるとき の全体変形角は、0.024rad. (Model-1)、0.016rad. (Model-2)、0.011rad. (Model-3)となっており、静 的解析と比べて小さい値となっている。

図-11 に各解析ケースの1 層耐震壁がせん断





図-10 応答解析によるベースシヤー係数と変形角の関係

破壊したときの高さ方向のモーメント分布を示 す。ここで、横軸は Model-1 の地震応答解析に おける耐震壁のベースモーメントで基準化した 値としている。

耐震壁 1 層部に着目すると、スラブの有効幅 が大きいケースほどモーメントの勾配が急であ り、せん断スパン比 *M/Ql*^{**} で表すと 2.05 (Model-1), 1.51 (Model-2), 1.19 (Model-3)である。 境界梁、直交梁の曲げ戻しモーメントによる拘 束効果によって、耐震壁のモーメント分布が大 きく異なることがわかる。同様に静的解析時の Model-3 のせん断スパン比は 1.44 であり、動的 解析の結果の方が小さい。当然のことといえる が、モーメント分布によって耐震壁のせん断破 壊が生じる変形角が大きく異なる結果となって いる。

6. まとめ

耐震壁の周辺部材,ここでは、スラブの有効 幅に着目し,耐力低下を考慮した耐震壁モデル を用いた弾塑性解析を行ない、スラブの有効幅 が建物全体の挙動に及ぼす影響について検討し た。

スラブの有効幅の増加によって、耐震壁の拘 東効果が大きくなり、耐震壁は強度上昇、せん 断破壊時の変形角が小さくなるといった影響を 受け、耐震壁のせん断破壊以降、当該層に変形 が集中し、建物の降伏形は、全体降伏形から層 降伏形に移行する傾向にあることを示した。ま た、耐震壁がせん断破壊する前の変形レベルで あれば、スラブの有効幅が建物の降伏形に及ぼ す影響は少ないといえる。

本解析のように耐力低下が生じる変形レベル を対象とした場合,弾塑性骨組解析においては, 想定する変形レベルに応じてスラブの有効幅を 考慮する必要がある.

参考文献

 大久保全陸:地震時応力を対象とした鉄筋コン クリート T 型梁の剛性および強度に関する研 究,日本建築学会論文報告集, No.201, pp.25-32,



1972.11

- 2) 鈴木紀雄,小谷俊介,青山博之:鉄筋コンクリート造スラブ付柱はり立体接合部に関する実験的研究,第5回コンクリート工学年次講演会 講演論文集,pp.425-428,1983
- 3) 中田慎介ほか:大型実験施設利用による日米共 同耐震研究(その2)建物を構成するはり・柱 接合部の静加力実験・実験概要),日本建築学 会大会学術講演梗概集,構造系,pp.1657-1658, 1980
- 4) 平石久廣ほか:大型実験施設利用による日米共同耐震研究(その4 境界ばりを有する連層耐震壁の実験概要),日本建築学会大会学術講演梗概集,構造系,pp.1661-1662,1980
- 5) 荒井康幸ほか:境界梁の拘束を受ける RC 耐震 壁の水平加力実験,日本建築学会大会学術講演 梗概集,構造系,pp.1505-1506,1979
- 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,1997
- 7) 陳少華,壁谷澤寿海:非線形解析における鉄筋 コンクリート耐震壁のモデル、コンクリート工 学年次論文集, Vol.21, No.3, pp.763-768, 1999.6
- 松井智哉,壁谷澤寿海:正負繰返し載荷を受ける鉄筋コンクリート造耐震壁の非線形解析,日本建築学会大会学術講演梗概集, C-2, pp.291-292, 2004
- 2) 松井智哉,壁谷澤寿海:鉄筋コンクリート造耐 震壁の動的挙動に関する解析的研究,日本地震 工学会-2004 梗概集, pp.430-431, 2005
- 10) 日本建築学会:鉄筋コンクリート構造計算規 準・同解説, 1999
- 11) 壁谷澤寿海,小谷俊介,青山博之:耐震壁を有 する鉄筋コンクリート構造物の非線形地震応 答解析,第5回コンクリート工学年次講演会講 演論文集,pp.213-220,1983