# 論文 壁式 RC 造既存建物の実大壁を対象にした加力実験

加藤 博人\*1·楠 浩一\*2·諏訪田 晴彦\*3·中埜 良昭\*4

要旨:築40年以上経過した壁式RC造建物の実大壁を対象に,壁開口の有無を実験変数に した試験体2体の静的加力実験を行った。現場実験で反力フレームを設置できないため,実 験区間とその上下部分で力の釣り合いを取る自己完結形の加力方法を採用した。無開口壁で は壁と床スラブの接合部に滑りが発生し,最大耐力に達した。一方,有開口壁では壁のせん 断破壊で最大耐力に達したが,有開口壁の最大耐力は無開口壁の80%程度であった。 キーワード:既存壁式RC造建物,実大壁実験,壁開口の有無,自己完結形加力

#### 1. はじめに

古くなった建物を社会資本として有効に活用 することを目的として,既存建築物のリニュー アル,あるいはコンバージョンに関する技術開 発が盛んに行われるようになっている。筆者ら は,既存の集合住宅を検討モデルとしてリニュ ーアルに関する研究を実施しているが<sup>1)</sup>,その過 程で1960年代に建てられた鉄筋コンクリート (以下, RC)造壁式構造建物の構造性能を実験 により確認することとなった。

壁式 RC 造建物は, 一般的に耐力が高いと考え られている。壁式構造を対象とした実大加力実 験はこれまでにもいくつか報告されているが, いずれも試験体として製作したものであり, 竣 工後40年程度使用された実際の建物を使った実 験は殆ど報告されていない。壁式構造が年数を 経ても十分な構造性能を有しており, リニュー アル後に建物に要求される性能を保持している ことを, 実建物を使った実験で把握しておくこ とは重要な意味がある。

1960 年代の建物では,鉄筋に丸鋼を用いてい る場合が多く,さらに,実施工建物では配筋等 が必ずしも設計図通りではないことも考えられ る。そのため,実建物の耐震性能を実験的に把 握しておくことは,空間拡大を検討するための 基礎的情報として非常に有用である。

そこで,次の2点を研究目的として実大建物を 対象とした加力実験を計画した。

- a) 壁式構造の耐震性能の確認
- b) 実施工部材の構造性能の把握

以下,実験手法の検討,および加力実験結果の 概要について報告する。

#### 2. 実験計画

#### 2.1 実験対象建物

加力実験の対象建物は,東京近郊にあった集合 住宅で,1960年に設計された4階建てのRC造 壁式構造である(設計は文献2)に準拠)。既存建 物のリニューアルを考える場合,居住空間の拡 大を図るために,はり間方向の戸境壁に開口を 設けることが想定されるため,実験も同等の条 件で行うこととし,3階部分のはり間方向壁(戸 境壁)を加力対象として選定した。

加力実験に用いた耐力壁の設計寸法は,壁厚 180mm,高さ2.55m,壁長さ5.5mで,実験部分 だけを桁行方向の壁から切り離し,文献3)によ る直交壁の有効長さ1.08m(壁厚の6倍相当)を 残したI型断面とした。設計では,壁の縦横筋 として9φの丸鋼(SR235)を250mm間隔でシング ル配筋し,コンクリートの設計基準強度は

\*1 独立行政法人建築研究所 構造研究グループ 主任研究員 (正会員)
\*2 独立行政法人建築研究所 構造研究グループ 主任研究員 工博 (正会員)
\*3 国土交通省国土技術政策総合研究所 建築研究部 研究官 (正会員)
\*4 東京大学生産技術研究所 助教授 工博 (正会員)

18N/mm<sup>2</sup>である。建物のはり間方向中間部にも 直交壁が存在したが,加力の都合上その部分を 撤去し,1枚壁として実験を行った。

実験は、何も手を加えない状態の耐力壁(無開 口試験体)とリニューアルで想定される壁開口 (出入口 1.0x1.9m,開口周比 0.37)を設けた試 験体(有開口試験体)の計2体である。ただし、 有開口試験体でも開口周囲の補強は何も行って いない。有開口壁試験体の形状を図-1に示す。 図中の寸法は、試験体を実測した結果である。 南側には長さ1.1mのベランダが張り出している。



### 2.2 加力方法の検討

実験では,はり間方向の耐力壁を加力対象とし たため,加力時のジャッキ反力をどのように取 るかが問題となる。一般的に考えられる加力方 法としては,

- a) はり間方向の一部分を反力フレームとして 用いる(はり間方向多スパン建物の場合)
- b) 建物外部に反力フレームを構築する
- c)実験対象と同等の桁行き方向壁をはり間方 向壁と仮定して桁行方向の加力で代替する
- d) 試験部分で力の流れが自己完結する加力方 法を用いる

等が挙げられるが、それぞれ長所・短所を有す る。a)は建物、加力位置ともに非常に限定され、 今回の建物では実施困難であった。b)は大規模な 建設工事を伴うことになり,実験費用が非常に 高くなる。c)は,はり間方向と同等の壁を桁行方 向に見つけることが難しい。そこで今回は,d) の自己完結形の加力方法<sup>4)</sup>を用いることを前提 に,実験計画の検討を行った。

今回採用した自己完結形の載荷方法を図-2 に示す。加力を行う壁の両面に2台ずつ加力ジ ャッキをK型ブレースのように設置する。各ジ ャッキの頂部と脚部は加力治具に取り付け,加 力治具は加力対象の上下の壁,あるいはスラブ 部分に固定する。壁に向かって左側のジャッキ を力Pだけ伸ばす方向に加力する場合,右側の ジャッキは同じ力Pで縮める方向に同時に加力 する。ジャッキは角度θを持って設置されている ので水平方向に2Pcosθだけの力が発生する。同 時に,ジャッキの鉛直方向の分力も発生するが, 力の向きが上下逆であるため鉛直成分は相殺さ れる。このように,ジャッキと試験区間内で力 の釣り合いが取れるため,外部に反力フレーム を設けることなく実験が可能となる。



本加力では、同一仕様のジャッキ4台を使用す ること、押し引き同圧で作動する油圧ジャッキ (串型ジャッキ)が制御上望ましい。また、加 力治具にせん断力が発生しないようにするため に、ジャッキ頂部はゲージラインが1点に集ま るように取り付けるような工夫が必要である。

### (1) 試験体に作用するカ

本加力方法における力の作用関係を図-3に 示す。1組のジャッキにより試験体に作用するせ ん断力*Q*は(両面にジャッキを取り付けると試 験体に作用するせん断力は2*Q*),式(1)により計 算できる。

$$Q = 2P\cos\theta \tag{1}$$

ここに,

$$\tan \theta = \frac{H}{L/2}, \quad \sin \theta = \frac{H}{\sqrt{H^2 + (L/2)^2}}$$

 $\theta$ :油圧ジャッキの取り付け角度

この水平力により, 壁脚部に発生する転倒モー メントMは

$$M = OH = 2PH\cos\theta \tag{2}$$

となり,この転倒モーメント*M*により壁両端に 発生する軸力*N*は

$$N = \frac{M}{L} = \frac{QH}{L} = \frac{2PH\cos\theta}{L} = \frac{PH\cos\theta}{L/2} = P\sin\theta \quad (3)$$

となる。

# (2) 水平変形に伴う各作用力の誤差

本方法では,試験体に作用する水平力は試験体 の変形に伴って,式(1)で求められるQと異なっ てくる。また,鉛直方向の分力も変化するため, 節点Aにおける鉛直方向力が常にOとはならな い。それら加力に伴う誤差の影響について検討 する。水平加力に伴う高さ方向の変形は無視し ている。

試験体の大きさから H=2.74m, L=5.5m とし, 水平変形を考慮して求めた水平力 Q と,初期取 り付け角度 θ 時の水平力 Q<sub>0</sub> との誤差は図-4 (a)のようになる。層間変形角 1/25rad.程度まで変 形しても,水平力の誤差は 0.06%程度である。

一方,節点Aにおける軸方向力N'と水平力Q の比率を計算すると図-4(b)のような結果が得 られる。水平変形にともない試験体に圧縮力が 作用することとなるが,その大きさは層間変形 角1/100rad.で水平力Qの約0.5%,1/25rad.で2.0% 程度である。よって,本加力方法における水平 力および軸力の誤差はさほど大きくなく,実験 上ほとんど影響ないものと判断される。

本実験では図-2に示すように実験対象部分 の直上の耐力壁を鋼製の加力治具で両面から挟 み込み,スラブ中央部分を切り欠いて油圧ジャ ッキの頂部を取り付けた。試験体下部は、床ス ラブを挟むように加力治具を取り付け、試験体 直下(2階部分)の耐力壁にもPC鋼棒を使って 治具を圧着してジャッキ反力を取るようにした。 実験では、容量1MN、ストローク±300mmの串 型油圧ジャッキを使用し、南側のジャッキ2台 はコンピュータを使って制御し、北側のジャッ キは同圧で追随するように駆動して、合計4台 のジャッキを連動させながら加力を行った。



図-4 部材変形角と加力誤差の関係

有開口試験体の計測状況を図-5に 示す。実験では試験体の下階から計測 用不動点梁を伸ばし,試験体頂部の絶 対変形を使って加力制御を行った。壁 両端には高さ方向に変位計を5本ずつ 取り付け曲げ変形を計測した他,壁面 のせん断変形を計測するため対角線方 向に変位計を取り付けた。



図-5 計測計画

# 3. 実験結果および考察

### 3.1 材料試験結果

各試験体を切り出す過程で,加力対象の壁近傍 の部材からコンクリートコアを採取して強度試 験を行った。コンクリートの圧縮強度は,無開 口試験体では19.1 N/mm<sup>2</sup>,有開口試験体では20.5 N/mm<sup>2</sup>と設計基準強度以上の強度が得られた。 また,建物解体部分から採取した9¢鉄筋の降伏 強度は370.5 N/mm<sup>2</sup>,引張強度は474.8 N/mm<sup>2</sup>で あり,SR235(SR24)としては高めの強度であった。 後述する壁耐力の計算には,これらの材料強度 を使用する。なお,壁の曲げ補強筋として13¢ の丸鋼も使用されているが,材料試験が出来な かったため,計算では既存建物の耐震診断<sup>5)</sup>で用 いられている数値294N/mm<sup>2</sup>を採用した。

# 3.2 加力方法の評価

実験では、油圧ジャッキの初期取付け角度 $\theta$ は 45.9°であった。実験での加力範囲は層間変形角 R=1/70rad.程度までであり、図-4に示したとお り、その範囲での水平力の誤差は0.01%、軸力成 分は0.7%程度であることから、水平荷重の計算 においては取付け角度 $\theta$ をそのまま使用した。

無開口試験体に関して,ロードセルで計測した 各ジャッキの荷重差を,加力ステップ毎にプロ ットしたものを図-6に示す。J1 は図-2に示 す壁南側に取り付けたジャッキ,J3 は同じ位置 の壁裏側のジャッキである。J1-J3 の 100step お よび370step附近で荷重差が大きくなっているが, コンピュータによる連動がうまく働かなかった ためであり,それ以外では 10kN 程度の振れ幅で 加力が行われたことを示している。J1 ジャッキ をマスター機として制御し,J1からのフィード バック信号をコンピュータで折り返してJ3ジャ ッキをコントロールしている関係で,若干の制 御誤差,および制御時間差などがあり,変動幅 が大きな場合が出現したものと考えられる。

一方, J1-J2, J3-J4 は壁の同じ面の南北ジャッ キの荷重差を示しているが, 5kN 程度の変動幅 で追随していたことが分かる。J3-J4 の 20~ 70step 間で所々変動が大きいのは,油圧ホースの 接続部に遊びがあったことが影響したためであ る。全般的には,本加力方法で良好に実験を行 うことが出来,実験に大きな影響を及ぼすよう な荷重変動や偏心等の影響は見られず,有効な 実験法であることが確認された。



図-6 各ジャッキの荷重差(無開口試験体)

### 3.3 試験体性状

### (1) 荷重-変形関係

各試験体とも初めは荷重制御で加力を開始し, その後,変位制御に切り替えて正負漸増繰返し 載荷を行い,試験体が最終破壊状態に達するま で加力を行った。実験から得られたせん断力-

#### 変形関係を**図-7**に示す。

無開口試験体の最大耐力は 1.13MN(R=1/205 rad.),および-1.14MN(R=-1/440rad.)で,R=1/200rad. の負側加力で耐力が大きく低下し,さらに2回 目の加力時に試験体面外方向への倒れ込みが顕 著になったため実験を終了した。



(a) 無開口試験体



図-7 せん断カー変形関係

無開口試験体の最終ひびわれ状況を図-8に 示す。最初のせん断ひびわれは R=1/1600rad.辺り で発生し、加力を繰り返すにしたがってひびわ れが進展し本数も増加した。一方、加力の早い 段階から壁脚部、スラブとの交差部にスリップ ひびわれの発生が見られ、加力とともに壁全長 に進展した。また、変形が大きくなるにしたが って壁脚部のスリップ変形量が大きくなり、無 開口試験体の最大耐力は、スリップ破壊による ものであった。

有開口試験体の最大耐力は、0.84MN (R=1/239

rad.),および-0.94MN (R=-1/70rad.)で,最終的に は R=-1/70rad.を超えるあたりで大きなせんひび われが発生して実験を終了した。有開口試験体 でも壁脚部のひびわれは見られたが,無開口試 験体ほど顕著ではなく,スリップ変形も大きく はなかった。両試験体は,最終破壊メカニズム が異なっており単純に比較は出来ないが,有開 口試験体の最大耐力は,無開口試験体の約 83% という結果となった。



図-7には、文献 6)に示される耐力壁の曲げ 終局耐力 $M_{wu}$ 時のせん断力 $Q_{wmu}$ ,およびせん断 終局耐力 $Q_{wsu}$ の計算値を破線と点線で示してい る。計算には、3.1節で述べた材料試験結果を使 用し、実験時の壁軸力の実況値(自重+加力治 具+ジャッキ重量)を考慮した。

計算から得られたせん断終局耐力 Q<sub>wsu</sub> は, い ずれの試験体においても実験値より大きく, 無 開口試験体では実験値の 1.66 倍, 有開口試験体 では 1.27 倍と試験体耐力を過大評価する結果と なった。その原因としては, 無開口試験体にお いては壁脚部のスリップにより最大耐力に達し たこと, 有開口試験体においては開口部両側の 壁の挙動が一体でなかったことなど, 計算式の 前提としている破壊メカニズムと異なっていた ことが推測される。その他, 壁縦筋の定着の問 題, 丸鋼の付着の影響なども想定される。なお, スリップ破壊は無開口試験体では見られたが, 有開口試験体では顕著ではなく, したがって, スリップ破壊は加力方法の影響によるものでは ないと判断している。

#### (2) 必要保有水平耐力との比較

実験に用いた建物は 1960 年当時の規準に基づ いて設計されたものであるが<sup>2)</sup>, 現在の建築基準 法によって当該階(3階)の2次設計用地震層せ ん断力( $C_0$ =1.0)を計算し<sup>6)</sup>,実験対象とした 壁1枚当たりの必要水平耐力を算出すると 0.85MNとなる。実験で得られた最大耐力は無開 口試験体 1.14MN,有開口試験体 0.94MN であり, 必要水平耐力との比率は,それぞれ 1.3 および 1.1 である。実験対象建物が,必要耐力以上の強 度を保有していたことが確認できた。

#### (3) 等価粘性減衰定数

図-7の履歴復元力特性から求めた各試験体 の等価粘性減衰定数(heq)の推移を図-9に示 す。R=1/1000rad.以前では1回目の加力ループ, それ以降では2回の加力ループから得られた heq をそれぞれ示している。

無開口試験体では変形の小さい部分でばらつ きが見られるが, R=1/400rad.辺りでは 9~15%程 度, 1/200rad.附近では 13~17%程度の等価粘性減 衰定数が得られた。いずれの試験体でも同一変 形における 2回目載荷時の値は小さくなり, 1回 目の約 85~60%程度であった。



図-9 等価粘性減衰定数-変形角関係

# 4. まとめ

建築後40年以上経過し,実際に集合住宅とし て使用されていた建物のRC造実大壁を対象に した加力実験について報告した。

屋外での実大実験であったが,加力用油圧ジャ ッキの反力を試験部分で釣り合わせて加力する 方法を採用し,外部に反力壁を設置することな く実験を行うことが出来た。今回採用した手法 は,構造実験に有効であり,安定した加力制御 が可能であることを確認した。

実験で得られた試験体の最大耐力は,通常,設 計で用いられる耐力算定式の計算値より低い値 となったが,破壊メカニズムが異なっていたこ となどが影響しているものと推測される。しか し、実験対象建物は,現行の耐震設計基準に照 らしても必要耐力以上の強度を保有していたこ とが確認できた。

### 謝辞

本実験は,(社)建築研究振興協会に組織された「次世 代に対応した室内空間拡大技術の開発委員会(委員長 勅使川原正臣名古屋大学教授)」の研究の一環として実 施したものである。今回の加力方法に関しては,㈱青木 あすなろ建設北嶋圭二氏から貴重な助言を頂きました。

実験に際しては,都市再生機構小谷重男氏,秋山裕紀 氏,東京大学生産技術研究所中埜研究室および芝浦工業 大学隈澤研究室の学生諸氏,その他,関係各位の多大な ご協力を得ました。ここに感謝の意を表します。

### 参考文献

- 既存建築ストックの次世代対応リニューア ル技術開発のためのフィージビリティース タディー,建築研究資料 No.99,独立行政法 人建築研究所,2004.11
- 日本建築学会,特殊コンクリート造設計規準, 4章壁式コンクリート造,1955
- 日本建築学会,壁式構造関係設計規準集・同 解説,2003
- 4) 豊岡重人,他:関東地方 A 県下における学 校校舎の耐震性能(その 22 外付け制震ブ レース取付部の性能確認実験),日本建築学 会大会学術講演梗概集,構造IV,pp.213-214, 2000
- 5) 日本建築防災協会,既存鉄筋コンクリート造 建築物の耐震診断基準・同解説,2001
- 6) 日本建築センター,建築物の構造関係技術基
   準解説書(2001年版),2001