

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きている。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¹⁾、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/mm²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。

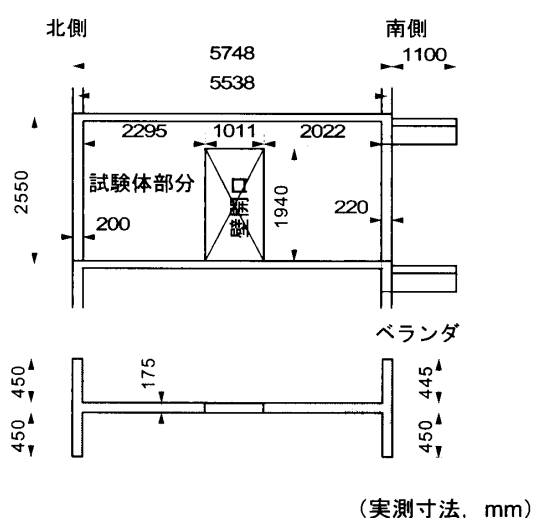


図-1 有開口壁試験体形状

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⁴⁾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 $2P \cos \theta$ 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。

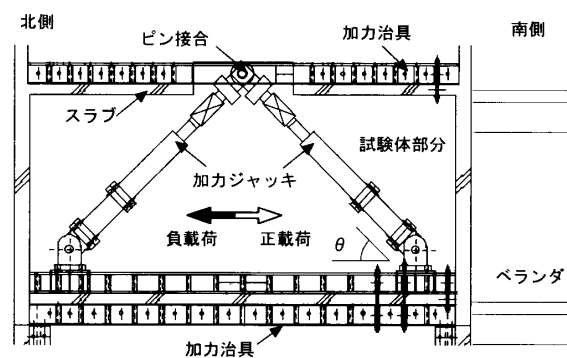


図-2 載荷方法

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) 試験体に作用する力

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

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 $2Q$ ），式(1)により計算できる。

$$Q = 2P \cos \theta \quad (1)$$

ここに，

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

θ ：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

$$M = QH = 2PH \cos \theta \quad (2)$$

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 0 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 $H=2.74\text{m}$ ， $L=5.5\text{m}$ 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_0 との誤差は図-4 (a) のようになる。層間変形角 $1/25\text{rad}$ 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 $1/100\text{rad}$ で水平力 Q の約 0.5% ， $1/25\text{rad}$ 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小さくなく，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 $\pm 300\text{mm}$ 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。

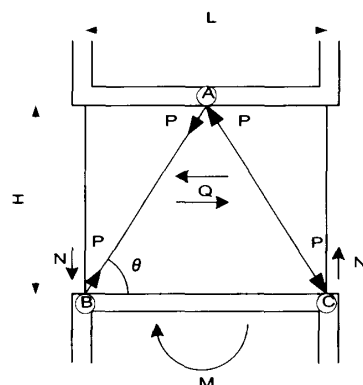
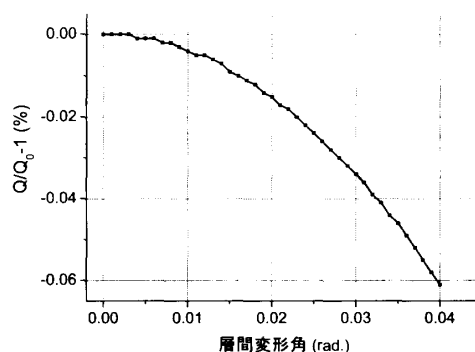
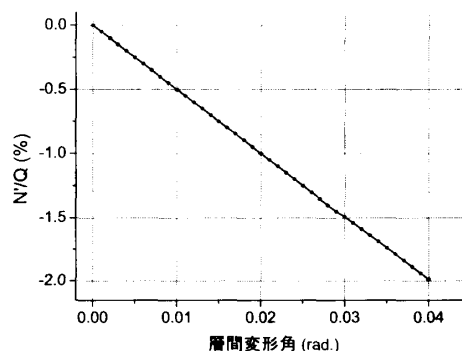


図-3 力の作用関係



(a) 水平力の誤差



(b) 軸力の誤差（引張を正とする）

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。

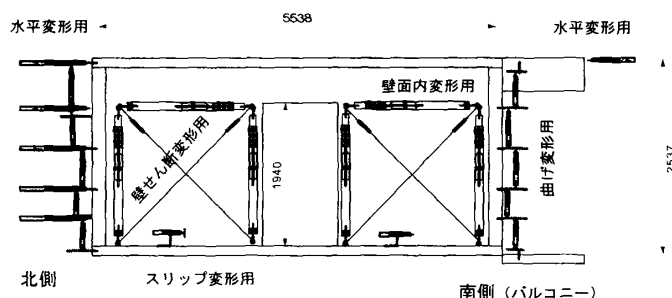


図-5 計測計画

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^2 、有開口試験体では 20.5 N/mm^2 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 9ϕ 鉄筋の降伏強度は 370.5 N/mm^2 、引張強度は 474.8 N/mm^2 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 13ϕ 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⁵⁾で用いられている数値 294 N/mm^2 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 θ は 45.9° であった。実験での加力範囲は層間変形角 $R=1/70 \text{ rad}$ 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 θ 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付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 10 kN 程度の振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、 5 kN 程度の変動幅で追隨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。

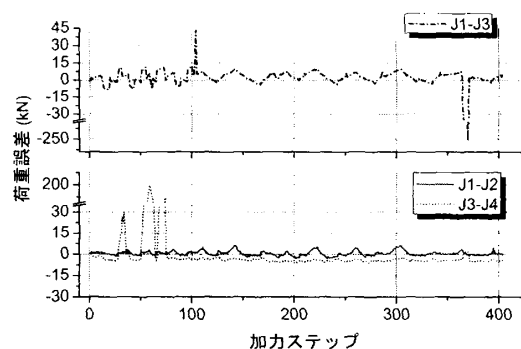


図-6 各ジャッキの荷重差（無開口試験体）

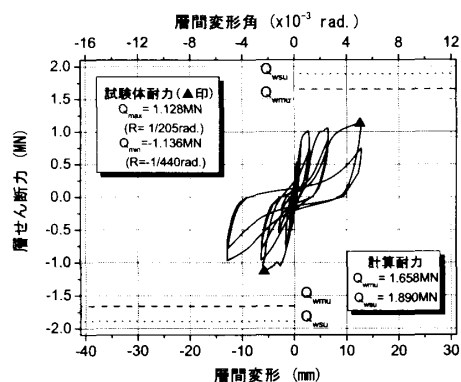
3.3 試験体性状

(1) 荷重－変形関係

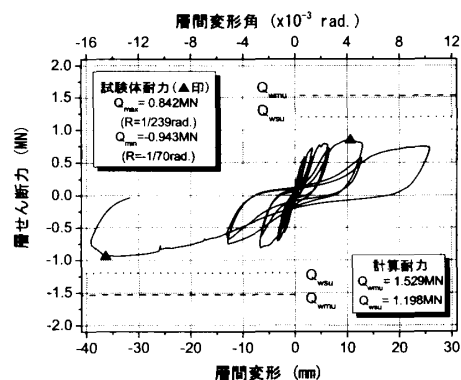
各試験体とも初めは荷重制御で加力を開始し、その後、変位制御に切り替えて正負漸増繰返し載荷を行い、試験体が最終破壊状態に達するまで加力を行った。実験から得られたせん断力－

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($R=-1/440$ rad.)で, $R=1/200$ rad.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



(b) 有開口試験体

図-7 せん断力-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 $R=1/1600$ rad.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 ($R=-1/70$ rad.)で, 最終的には $R=-1/70$ rad.を超えるあたりで大きなせんび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。

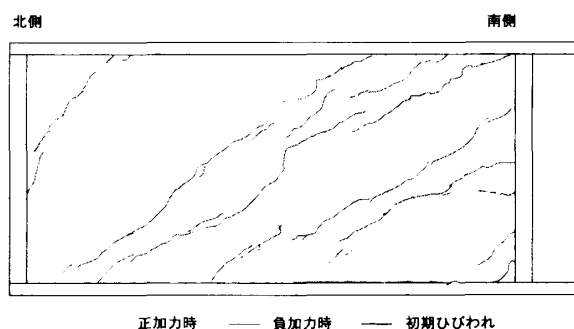


図-8 最終ひびわれ状況(無開口試験体)

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_{wsu} 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, 計算式的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²⁾、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⁶⁾、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。 $R=1/1000\text{rad}$ 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、 $R=1/400\text{rad}$ 辺りでは 9~15% 程度、 $1/200\text{rad}$ 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 回目载荷時の値は小さくなり、1 回目の約 85~60% 程度であった。

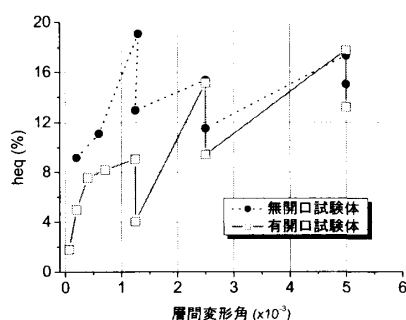


図-9 等価粘性減衰定数-変形角関係

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、(株)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

- 1) 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
- 2) 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
- 3) 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