

論文 部材実験と建物モデルの解析による躯体改造後の既存壁式鉄筋コンクリート造建物の構造特性評価

日高 悠樹*1・向井 智久*2・衣笠 秀行*3・松田 頼征*4

要旨： 出入り口用の新設開口を設けた耐力壁の部材実験を行い、スタブに開口補強筋として打ちつけたあと施工アンカーの挙動も含め部材性能の評価を行った。また 5 層壁式建物に対して新設開口を設け静的非線形増分解析を行い躯体改造前後でどのような構造特性の変化が現れるか検討を行った。部材実験ではアンカーの性能が十分確認でき、増分解析では開口を設けた構面の負担せん断力は低下するが、他の構面で負担するため、開口を設けたモデルにおいても大幅なベースシアの低下にはつながらなかった。

キーワード： 新設開口, 耐力壁, あと施工アンカー, 擬似立体解析, ベースシア係数

1. はじめに

近年、既存建築ストックを有効に活用する要求が高まっており、躯体改造をすることで既存建物の機能性能を高められると考えている。具体的な躯体改造法には耐力壁への新設開口があるが、それにより構造性能が低下するため、それがどう影響するのか部材および建築物の構造性能を把握する必要がある。

既往の検討¹⁾で耐力壁部材実験に関する実験方法と実験結果を示したが、本論では検討されていない項目として剛性低下率に使用する鉄筋降伏時曲げモーメントを場合分けし検討した。また既存建物に新設開口を設けることで建物の構造特性にどのような影響が生じるのか擬似立体解析モデルを用いて検討を行った。さらに新設開口により各構面間でスラブを介し大きなせん断力の受け渡しが予想される。そこで解析により求めたスラブが負担するせん断力とスラブの短期許容せん断力を比較し、スラブに十分せん断力が伝わっているか、またせん断力が伝わったことでスラブがせん断破壊するか否かを確認する必要があるため検討を行った。

2. 耐力壁加力実験とその分析

2.1 試験体概要と加力計画

既存耐力壁に対して、直交壁近くに新設開口を設けた場合のせいの短い壁を実験対象とした。新設開口を設けた場合には、新たに壁端部となる新設開口周辺部に曲げ補強筋を設ける必要があり今回は接着系あと施工アンカーを用いた。図-1 に加力計画図を示す。正負交番載荷を行い詳細は既往の検討¹⁾に示しているため本論では割愛する。試験体の配筋図を図-2 に示す。試験体のスケールは 1/1 とした。試験体のパラメータは開口補強詳細

である。想定する耐力壁は、壁厚 150mm であり、壁縦横筋がシングル配筋されている。また、直交壁側については、直交壁有効幅を壁厚の 6 倍とした場合の有効縦筋量と同等の縦筋を入れた柱型とした。

試験体 No.1 は、既設開口周辺耐力壁試験体として、壁式構造設計指針²⁾で規定される開口補強筋(2-D16)が先付け鉄筋として配された基準試験体であり、先付け鉄筋は鋼板定着されている。試験体 No.2 は、試験体 No.1 と同等の曲げ補強量(2-D16)をあと施工アンカーにより導入した補強試験体である。補強部の厚さは既存部壁厚と同等とし、特に大きい圧縮力が作用するため端部を補強するという目的で新設部のコンクリート強度を大きくしている。試験体 No.2 については、新設開口周辺の施工において開口よりも大きくはつり出すことを想定して、壁端部をはつり出した状態を模した既存部試験体を作成し、補強部との接合部に目荒しを施した後スタブに接着系あと施工アンカーを打ち込んだ。あと施工アンカーの有効埋め込み長さは、アンカー母材が降伏する 15da (da : アンカー径) とし、コーン状破壊強度の算定は、各種合成構造設計指針³⁾を参考とした。試験体概要を表-1 に示す。なお、使用材料の機械的性質は既往の検討¹⁾に示しているため本論では割愛する。

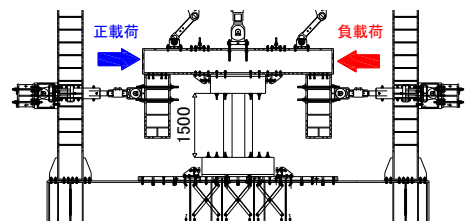


図-1 加力計画

*1 東京理科大学大学院理工学研究科建築学専攻 (学生会員)

*2 国立研究開発法人建築研究所構造研究グループ 主任研究員・博士 (工学) (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)

*4 東京理科大学理工学部建築学科 助教 (正会員)

表-1 試験体概要

試験体名	壁厚 (mm)	壁高さ (mm)	壁長さ (mm)	柱 B×D (mm)	柱主筋	柱帯筋	壁縦筋
No.1	150	500	1500	250×180	D16 (SD295A)	D10@200 (SD295A)	
No.2							

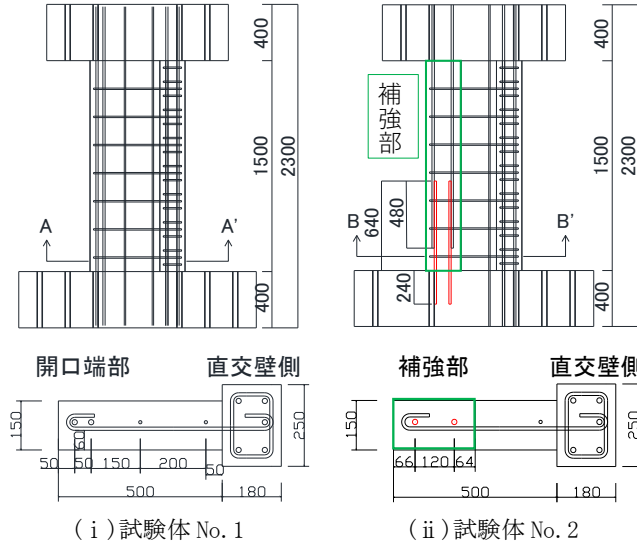


図-2 試験体配筋図

2.2 試験体 No.1 と試験体 No.2 の破壊モード

試験体 No.1 は正荷荷では R=+0.40% で曲げ補強筋が引張降伏ひずみに達した。負荷荷では R=-0.70% で直交壁縦筋が降伏した。R=-1.36% で最大耐力を記録し、正負共に曲げ破壊と断定した。試験体 No.2 は正荷荷では R=+0.22% で曲げ補強筋が引張降伏ひずみに達した。負荷荷では R=-0.51% で直交壁縦筋が降伏した。R=1.5% で最大耐力を記録し、正負共に曲げ破壊と判断した。

2.3 荷重変形と剛性低下率を踏まえた骨格曲線評価

図-3 に 2 体の試験体の実験値と算定値から求めた骨格曲線、表-2 に 2 体の算定値の精度を示す。実験値をみると試験体 No.1 と No.2 はほぼ同等の性能を有しており、本実験では開口補強にあと施工アンカーを適用しても先付け鉄筋と同性能を得ることを確認した。実験値評

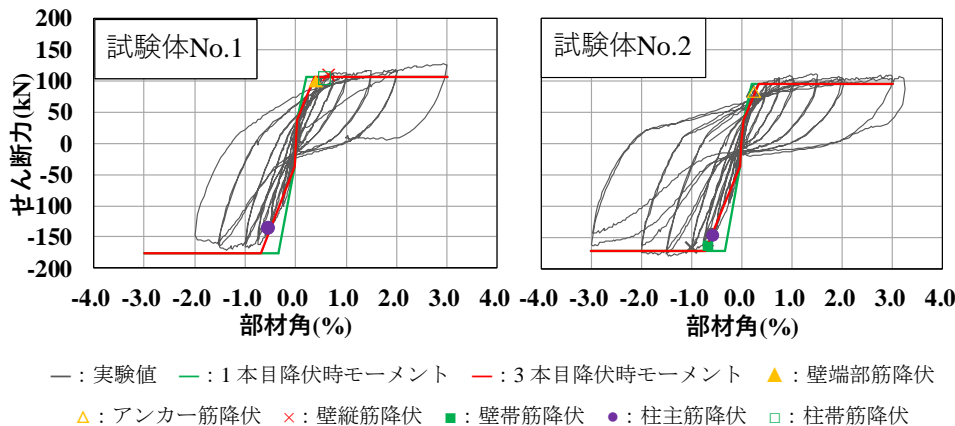


図-3 実験値と骨格曲線

価に関してコンクリート強度が 2 種類混同している試験体は、今回は低い方のコンクリート強度を全断面に適用した。終局曲げモーメントの算定は、曲げ塑性理論に基づき圧縮縁のコンクリートひずみ度 ϵ_c が 0.003 となると仮定した際の中立軸位置から引張鉄筋量およびそれらの引張合力を決定し求めた。表-4 より終局曲げ強度に関して、試験体 No.1 の負側はやや危険側に評価しているが、その他の終局曲げ強度は精度よく評価している。曲げ剛性低下率は式(1)を用いて試験体 No.1, No.2 共に図-4 に示すように正荷荷時に開口端部（補強端部）または直交壁端部から n 本目鉄筋降伏時の曲げモーメント M_y を使用した ($n=1\sim 3$)。1 本目降伏と 2 本目降伏で大きな違いはなかったため 1 本目降伏と 3 本目降伏で比較を行った。図-3 より式(1)に示す M_y について 2 つの試験体において正荷荷共に端部より 3 本目壁縦筋降伏時の曲げモーメントを使用している。

$$\alpha_y = M_y \cdot C_n / (E_c \cdot I_w \cdot \epsilon_y) \quad (1)$$

ここで $\alpha_y : M_y$ を使用した曲げ剛性低下率、 M_y : 縦筋降伏時の曲げモーメント (N・mm)、 C_n : 開口端部（補強端部）または直交壁端部から n 本目鉄筋降伏時の弾性中立軸から開口端部（補強端部）または直交壁端部から n 本目鉄筋までの距離 (mm)、 E_c : コンクリートのヤング係数 (N/mm²)、 I_w : 断面 2 次モーメント (mm⁴)、 ϵ_y : 開口端部（補強端部）または直交壁端部主筋降伏ひずみとする。

表-2 終局強度算定精度

(i) 試験体 No.1			(ii) 試験体 No.2		
正側					
実験値 (kN)	算定値 (kN)	精度 (実験/算定)	実験値 (kN)	算定値 (kN)	精度 (実験/算定)
127.6	107.3	1.19	111.7	96.0	1.16
負側					
171.0	176.5	0.97	180.4	172.2	1.05

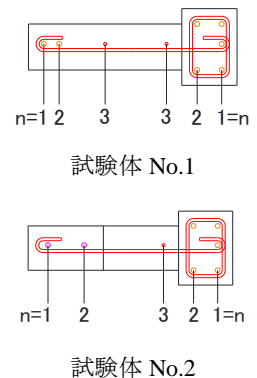


図-4 鉄筋降伏位置 (n=1~3)

3. 5 階建て現場打ち壁式 RC 造建物の躯体改造後の構造特性評価

3.1 検討概要

本論では過去に実施された5層の壁式鉄筋コンクリート構造建物⁴⁾を参照し用いている。解析手順は部材を一本柱置換モデル(図-5)でモデル化し、各構面をピン接合した擬似立体モデル(図-6)を作成しそれに対して静的非線形増分解析を行う。一本柱置換モデルの復元力特性は、耐力壁長さを剛域とする梁を有し、耐力壁中心部分上下にそれぞればねをトリリニアで設定する。なお直交壁の扱いとして、曲げ剛性は協力幅を、せん断剛性は考慮なし、曲げせん断耐力は有効幅を考慮している。建物をモデル化した後に新設開口を設け、躯体改造前後の構造特性評価を行う。

新設開口した耐力壁のモデルは第2章で評価した試験体 No.2 のモデルを使用する。なお躯体改造前の加力方式、解析結果とその妥当性は既往の検討⁵⁾を引用しているので詳細は割愛する。

3.2 解析条件

本構造の建物は、主要な耐力壁のせん断破壊が起きた時点で層の水平耐力が低下することが予想される。そこで本検討では、躯体改造前と後共にいずれかの耐力壁部材が初めてせん断破壊した時点で解析を終了し分析を行う。また、躯体改造前モデルの加力方式について加力分布⁶⁾はR,5,4階床位置に各10:6:2の割合で水平加力とし、制御方法⁶⁾は頂部変形制御である。躯体改造後についてもせん断力の変化を比較するため加力分布、制御方法ともに躯体改造前と同じにした。

3.3 躯体改造後の解析モデル

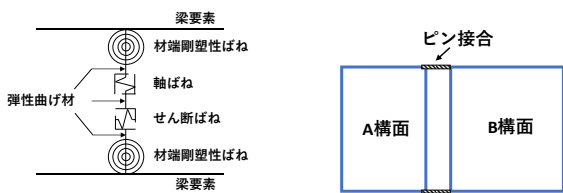


図-5 一本柱置換モデル 図-6 擬似立体解析モデル

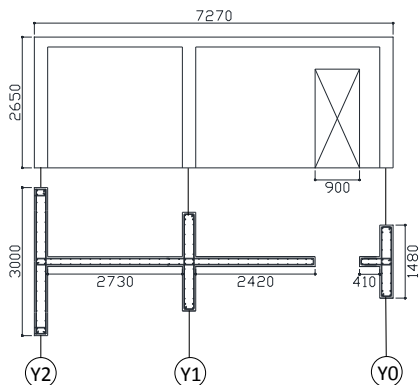


図-8 X2 構面新設開口詳細

3.3.1 新設開口設置方針

本検討では、開口を設けることにより構造性能にどのような影響を及ぼすのかを検討する。本建物では住戸の拡張を想定し、短辺方向(X構面)に新設開口を設けた場合を対象に解析を行う。なお図-7に新設開口を行う箇所(赤△印)と载荷方向を示す。载荷方向に関しては以降、载荷①を正载荷とし、载荷②を負载荷と定義する。また、開口を設けた後における建物総重量の変化による基礎に対する影響を考慮しないものとする。

図-8に示すように開口規模は高さ2000mm、通り幅900mmの小開口であり、新設開口を設ける箇所はX2構面の(a)偶数階のみと(b)奇数階のみの計2パターンについて検討する。ここで開口を設ける際に、偶数階のみと奇数階のみとした理由は、補強した壁梁の部材実験を行っておらず現時点ではモデル化の諸元が確立していないためである。

連層耐力壁に開口を設けると奇数開口の場合、壁梁部分が出てくる。そこで本検討では元々壁梁が存在していると仮定しモデル化を行った。また実験を行った耐力壁を適用する際に使用する材料、配筋は本建物と同様のものを使用する。

3.3.2 新設開口後の部材のモデル化

新設開口耐力壁は第2章で評価した骨格曲線モデルを使用する。その際図-9に示すように開口補強筋に用いたあと施工アンカーの定着は十分に定着されており降伏する前提とした。

また、(b)奇数階のみに新設開口を設けた場合の最上階の梁の断面を図-10に示す。今回の解析では一般階開口上部は剛梁としてモデル化しており、最上階にもその断面

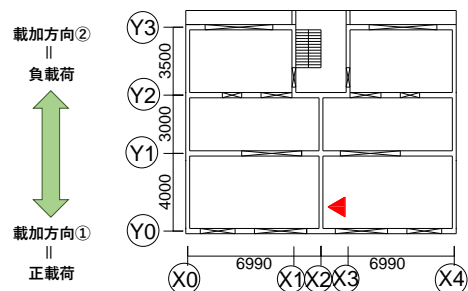
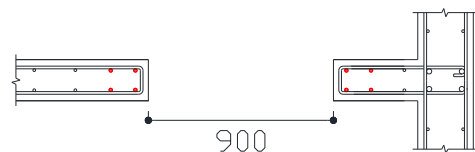


図-7 新設開口箇所と载荷方向



● : あと施工アンカー導入位置 (4-D16)

図-9 新設開口後 X2 構面配筋図

を適用し剛梁を解除したものである。

図-11 に示すように建物を一本柱置換モデルでモデル化するためにあたって新設開口した耐力壁は、開口を含んだ1つの耐力壁としてではなく、2つの耐力壁としてモデル化を行う。

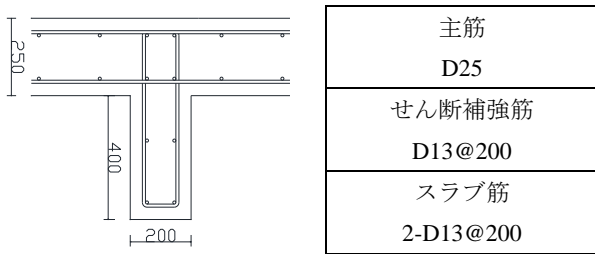


図-10 最上階梁概要図

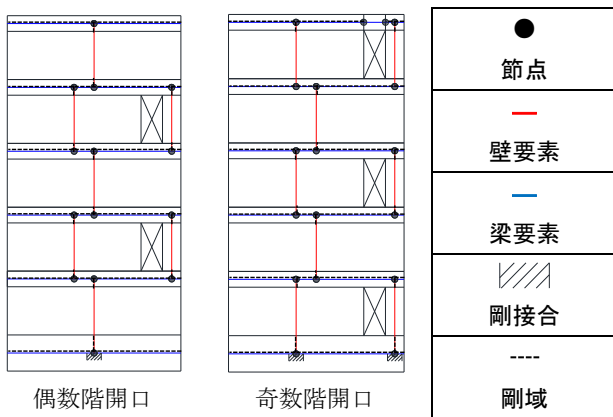


図-11 新設開口モデル図

4. 解析結果

4.1 躯体改造前(無開口)の構造特性

図-12 より躯体改造前に初めてせん断破壊した箇所は正負荷共に X2 構面 1 層の耐力壁であった。また、このときの建物全体変形角に関して正載荷時 1/193(rad)、負載荷時 1/192(rad)であり、ベースシア係数に関して正負荷共に 0.98 と載荷方向による違いはほとんどなかった。

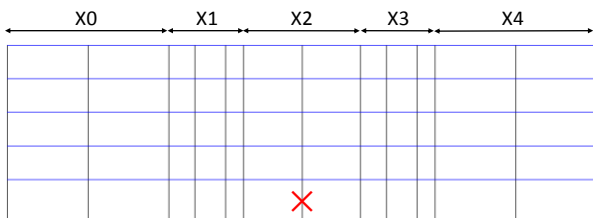


図-12 耐力壁が初めてせん断破壊した位置 (改造前)

4.2 解析結果を用いた躯体改造による影響

(a) 偶数階にのみ新設開口を設けた場合の影響

図-13 より初めて耐力壁がせん断破壊した箇所は正負荷共に X2 構面 1 層の耐力壁であり、躯体改造前と

同一箇所であった。表-3 に初めて耐力壁がせん断破壊した時点での全体変形角とベースシア係数を示す。表-6 に耐力壁が初めてせん断破壊した時点において、各層のせん断力が躯体改造前後でどの程度変化したかを示す。

表-3 より負載荷時で、躯体改造前後で耐力壁のせん断破壊箇所が同一にもかかわらずベースシア係数が 0.99 と以前 (0.98) より増えている現象を確認した。これは開口を設けた X2 構面の水平剛性が低下し、X0, 4 構面が負担するせん断力が無開口に比べ大きくなり、X2 構面の 1 階の壁がせん断破壊する力に達するまでに猶予があったためである。表-4 より X2 構面の開口を設けていない (奇数階の) 壁の負担せん断力も減少しており、特に開口階の間である 3 層の減少が大きいことを確認した。

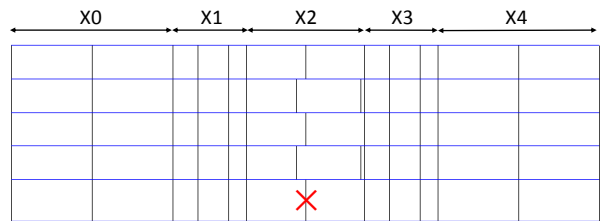


図-13 耐力壁が初めてせん断破壊した位置 (偶数開口)

表-3 耐力壁が初めてせん断破壊した時点での全体変形角とベースシア係数 (偶数開口)

	正載荷	負載荷
全体変形角(rad)	1/203	1/180
ベースシア係数	0.92	0.99

表-4 各層に着目したせん断力の変化 (偶数開口)

	正載荷			負載荷		
	X0,4	X1,3	X2	X0,4	X1,3	X2
	改造後 / 改造前			改造後 / 改造前		
5F	0.99	0.86	1.17	1.08	0.90	0.94
4F	0.98	1.09	0.73	1.09	1.17	0.72
3F	0.98	0.92	0.77	1.08	0.99	0.77
2F	0.97	1.13	0.76	1.08	1.20	0.76
1F	0.92	0.69	1.00	1.02	0.77	1.00

(b) 奇数階にのみ新設開口を設けた場合の影響

図-14 より初めて耐力壁がせん断破壊した箇所は正負荷共に X0, 4 構面 2 層の耐力壁であり、躯体改造前 (図-12) とは異なる箇所であった。表-5 に初めて耐力壁がせん断破壊した時点での全体変形角とベースシア係数を示す。表-6 に初めて耐力壁がせん断破壊した時点での躯体改造前後で各層に着目しどの程度せん断力が

変化したかを示す。表-6 より躯体改造前と比べ、開口を設けていない他構面（特に X1, 3 構面）で負担せん断力が増加した。また表-4 と比較し X2 構面の開口を設けていない（偶数階の）壁の負担が、躯体改造前および偶数階開口モデルと比べても大幅に減っていることを確認した。偶数階開口の結果も含めて、偶数階開口の負荷時を除き開口を設けた X2 構面の負担せん断力は低下するが、他の構面で負担するため、開口を設けたモデルにおいても大幅なベースシアの低下にはつながらなかった。

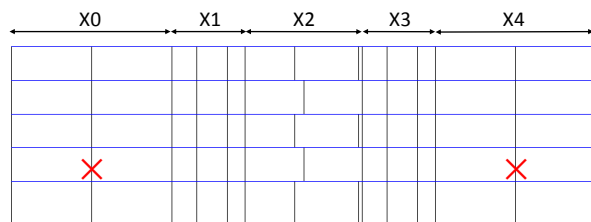


図-14 耐力壁が初めてせん断破壊した位置（奇数開口）

表-5 耐力壁が始めてせん断破壊した時点での全体変形角とベースシア係数（奇数開口）

	正載荷	負載荷
全体変形角(rad)	1/174	1/176
ベースシア係数	0.97	0.95

表-6 各層に着目したせん断力の変化（奇数開口）

	正載荷			負載荷		
	X0,4	X1,3	X2	X0,4	X1,3	X2
	改造後 / 改造前			改造後 / 改造前		
5F	1.10	0.90	0.30	1.10	0.83	0.20
4F	1.15	1.42	0.31	1.14	1.50	0.25
3F	1.04	0.64	0.82	1.02	0.48	0.82
2F	1.13	1.50	0.37	1.13	1.71	0.26
1F	1.07	0.70	0.70	1.05	0.52	0.71

また、新設開口を設けた影響により躯体改造前と比べると、各構面が負担するせん断力はスラブを介し、弱い構面から強い構面へよりせん断力の受け渡しが行われている。これに伴いせん断力がスラブを伝達するにあたって、スラブがせん断破壊するか否かを確認する必要があるため次節で検討を行った。

5. せん断伝達のためのスラブの構造性能評価

4.2 節の (a) (b) の検討において各スラブを伝達したせん断力とスラブのせん断終局強度を比較しスラブがせん断破壊するか否か検討した。図-15 にスラブの分割図、図-16 にスラブ情報を示す。図-17 に示すようにスラブを伝達するせん断力は i 階と (i+1) 階で耐力壁が負担して

いるせん断力がどう伝達したかで求める。

また表-7、表-8 に偶数開口時と奇数開口時のスラブを伝達するせん断力を示す。

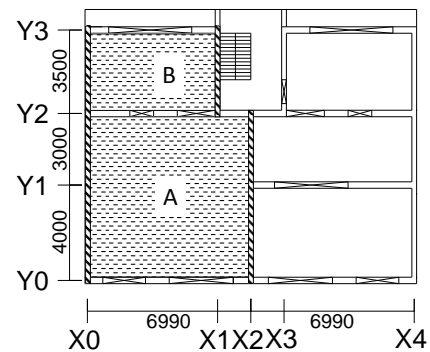


図-15 スラブ分割図

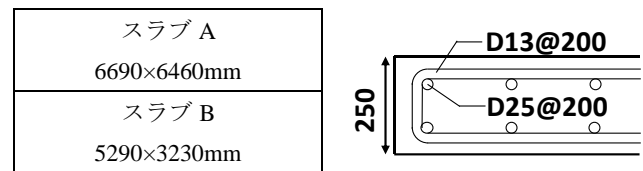
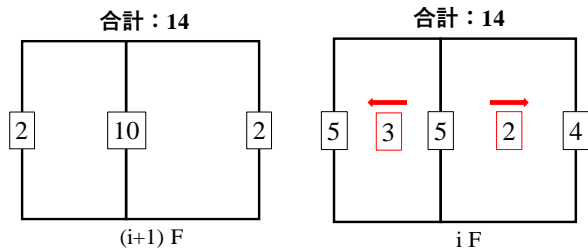


図-16 スラブ情報



(a) (i+1) 階の壁せん断力 (b) i 階の壁せん断力

図-17 スラブを伝達するせん断力の算出法

表-7 スラブが負担するせん断力 (kN) (偶数開口)

	正載荷		負載荷	
	A	B	A	B
5F	50.7	5.2	76.2	22.1
4F	18.7	61.8	139.7	31.1
3F	6.4	16.0	2.0	15.4
2F	562.5	147.0	573.9	128.2

表-8 スラブに伝達するせん断力 (kN) (奇数開口)

	正載荷		負載荷	
	A	B	A	B
5F	94.7	35.5	93.6	76.8
4F	638.9	204.8	722.7	226.9
3F	640.6	124.2	804.1	181.0
2F	654.8	216.2	820.0	236.8

今回使用したスラブの短期許容せん断力式は式(2)のように文献 7)の壁板の算定式を参照してスラブに適用した。

表-9 に各スラブの短期許容せん断力を表-10、表-11 にそれぞれの判定結果とその安全率（スラブが負担するせん断力/スラブの短期許容せん断力）を示す（せん断破壊した場合は×、しなかった場合は○とする）。いずれもスラブはせん断破壊をしない結果となった。

$$Q=tdf_s \quad (2)$$

ここで Q：スラブの短期許容せん断力(kN), t：スラブ厚さ(mm), l：梁を含むスラブの全せい(mm), f_s：コンクリートの短期許容せん断応力度(N/mm²)とする。

表-9 スラブの短期許容せん断力(kN)

スラブA	スラブB
1768.4	884.2

表-10 判定結果（偶数開口）

	正載荷		負載荷	
	A	B	A	B
5F	○(0.029)	○(0.006)	○(0.043)	○(0.012)
4F	○(0.011)	○(0.07)	○(0.079)	○(0.035)
3F	○(0.0036)	○(0.018)	○(0.001)	○(0.017)
2F	○(0.32)	○(0.17)	○(0.32)	○(0.14)

表-11 判定結果（奇数開口）

	正載荷		負載荷	
	A	B	A	B
5F	○(0.053)	○(0.04)	○(0.05)	○(0.087)
4F	○(0.36)	○(0.23)	○(0.41)	○(0.26)
3F	○(0.36)	○(0.14)	○(0.45)	○(0.21)
2F	○(0.37)	○(0.24)	○(0.46)	○(0.27)

6. 総括

本論では、新設開口を設けた耐力壁の部材実験と既存壁式鉄筋コンクリート造建物の新設開口設置後の構造特性評価を行った。

・開口補強筋が先付け鉄筋として配された基準試験体 No.1 と、開口補強をあと施工アンカーにより導入した補強試験体 No.2 が同等の性能を発揮したことにより、曲げ補強筋をあと施工アンカーを適用した場合、曲げ補強筋を先付け鉄筋とした場合と同等の性能であることを確認した。また剛性低下率の検討から、せいが短い耐力壁は引張縁より 3 本目鉄筋降伏時モーメントを使用するモデル化が示された。

・偶数階開口モデル（負載荷側）の壁のせん断破壊箇所は無開口モデルと同じ（X2 構面の 1 階の壁のせん断破壊）にも係わらず、開口新設後のベースシアが大きくなる結果が得られた。これは開口を設けた X2 構面の水平剛性が低下し、X0,4 構面がせん断力を負担したことで、

X2 構面の 1 階の壁のせん断破壊を遅らせる効果があったためである。

・上記以外の場合、開口を設けた X2 構面の負担せん断力は低下するが、他の構面で負担するため、開口を設けたモデルにおいても大幅なベースシアの低下にはつながらなかった。

・新設開口を設けることにより耐力壁のせん断力の受け渡しはスラブを介して行われておりスラブがせん断破壊する懸念があったが、本検討では新設開口を設けた影響でスラブがせん断破壊することはなかった。

・本論で対象とする既存壁式建物の梁間方向の住戸間耐力壁にドア開口(900×2000mm)を設ける際、せん断力の流れ方が変わることがあるため非線形増分解析等によりせん断破壊する壁の破壊位置等を把握することが望ましい。また流れ方が変化するせん断力はスラブを介するため、スラブの検討も踏まえ新設開口の計画を行うことが望ましい。

謝辞

本研究は、国立研究開発法人建築研究所の研究課題「既存中低層鉄筋コンクリート造建物の空間拡大技術の開発」の一環として実施され、実験は建築研究所強度実験棟の実験施設において実施されました。関係各位に謝意を表します。

参考文献

- 丸山瑛平他 9 名：躯体改造後の壁式鉄筋コンクリート造建物の構造性能評価その 1 耐力壁実験による検討，2018 年度日本建築学会大会,pp.417-418,2018
- 日本建築学会：壁式鉄筋コンクリート造設計・計算基準・同解説，pp.40-44，日本建築学会，2015
- 日本建築学会：各種合成構造設計指針・同解説，pp.39-42，pp.45-49，日本建築学会，2010
- 日高悠樹他 5 名：躯体改造後の壁式鉄筋コンクリート造建物の構造性能評価その 2 新設開口を設けた建物モデルの解析による検討，2018 年度日本建築学会大会,pp.419-420,2018
- 丸山瑛平，雨宮彰弘，向井智久，衣笠秀行：壁式鉄筋コンクリート造建物の立体挙動を考慮した解析モデルの検討，2017 年度日本建築学会大会，pp.877-878，2017
- 広沢雅也，後藤哲郎，平石久廣，芳村学：中層壁式実大建物の耐震破壊実験，天然資源の開発利用に関する日米会議耐風・耐震構造専門部会第 12 回合同部会会議録，pp.223-249，1980.5.19-22
- 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説，pp.30-31，日本建築学会，2010