鉄骨骨組に取り付けた窓と扉を含む ALC 外壁の大変形時まで再現した実大載荷実験

FULL SCALE LOADING TEST UP TO LARGE STORY DRIFT ON EXTERIOR WALL OF ALC PANEL WITH WINDOW AND DOOR ATTACHED TO STEEL MOMENT FRAME

八木尚太朗 — * 1 清家 剛 — * 2
山田 哲 — * 3 石田孝徳 — * 4
吉敷祥一 — * 5 上瀧敬太 — * 6
テンデランランディ — * 7

Shotaro YAGI — * 1 Tsuyoshi SEIKE — * 2
Satoshi YAMADA — * 3 Takanori ISHIDA — * 4
Shoichi KISHIKI — * 5 Keita KOHTAKI — * 6
Randy TENDERAN — * 7

キーワード：
ALC 外壁, ロッキング構法, 実大載荷実験, 大変形, 損傷観察

Keywords:
ALC Exterior Wall, Rocking System, Full Scale Loading Test, Large Story Drift, Damage Observation

Full scale loading test up to large story drift on Exterior Wall of ALC panel with window and door attached to steel moment frame was conducted. No damage was observed on the surface without openings except for the bottom of the panel. On the surface with openings, many damages such as cracks in the panel and breaks in the welding of the substrate were observed especially at large story drift angle of 1/50 or more. In addition, degrading of the openability of the window and door according to residual story drift angle were examined.

1. はじめに

近年、構造部材の耐震化や耐震補強が進み、地震被害において建物の躯体の倒壊などの被害は極めて少なくなっている。一方で、天井や間仕切り壁などのいわゆる非構造部材の被害が非常に多く発生している。また、庁舎や避難所、病院など地震後に拠点となる重要施設を中心に、安全性だけでなく地震後の建物の機能継続などの要求性能も高くなってきている¹。さらに、実際の鉄骨造の設計においては、時刻歴応答解析を行うと、ごく稀に発生する地震に対して層間変形角 1/50 以上になることも多い（この状態を躯体の大変形時と称する）。このような状況から、今後建物の機能継続などの要求性能を考慮するためには、躯体の大変形時における、非構造部材の状況を把握していく取り組みが重要になっている。

非構造部材のうち ALC 外壁は、ALC（軽量気泡コンクリート）と補強筋で構成されるパネルを、ボルトを介して構造部材に取り付ける仕様で、鉄骨造および鉄筋コンクリート造において広く普及し、採用されている。過去の地震ではパネルの脱落等の深刻な被害の発生が報告されている²が、これらの多くは 2002 年までに採用されていた縦壁挿入筋構法である。一方、2002 年以降に普及した縦壁ロッキング構法は、縦長のパネルを鉄骨に取り付けた金物にボルトで接続する構法である。この構法は、躯体の層間変形角に対してパネルが 1 枚ごとに面内方向にロッキングして追従することによる、地震時の層間変形への追従性が確認されている^{3,4,5}。ただし、ALC 外壁には窓や扉といった開口部を取り付けることが多く、これらを考慮した ALC 外壁の地震時の状況については完全には解明されていない。

本報告ではまず既往研究を整理し、ALC 外壁の地震時の研究の状況について示す。次に開口部が取り付けられた ALC 外壁を試験体とし、躯体の大変形時まで再現した実大載荷実験を行った結果について報告する。なお本報告では、縦壁ロッキング構法を対象とする。

2 既往の研究の整理

ALC 外壁の加力実験に関する研究は 1987 年に坂本ら³によるものに始まり、これまでに 20 ほど報告されている。試験体である ALC 外壁に生じた損傷の情報は、地震時の状況を把握するため有効なものであるが、ALC 外壁の損傷について詳しい記述のあるものは 9 つであった。表 1 にこれらの加力方法、開口部の有無、そして観察された損傷の概要をまとめた（参考文献 3~11）。なお本研究では、外力により部材に生じた不可逆的な変化のことを総じて損傷と称する。

層間変形角 1/50 を超える躯体の大変形時まで再現した実験は、更に 5 つに絞られる。特に、2009 年の松岡ら⁴の実験により、ALC パネルだけであれば 1/66 までは損傷が起きないことが確認されている。同実験では、引き違い窓が取り付けられた試験体を対象とした実験も行っており、ALC パネルだけの試験体と比べ、損傷が大きいことが確認されている。しかし、松岡らの論文を含め、試験体に生じた損傷について記述されている論文は、いずれも ALC 外壁の挙動を量的に評価することに重きを置いている。そのため、生じた損傷については、表に簡単にまとめる程度に留まっているものが多く、生じた位置やその原因について考察したものは少ない。

また、開口部の地震時の性能を把握することは、建物からの避難に

¹ 東京大学大学院新領域創成科学研究科 博士課程
(〒277-8563 柏市柏の葉 5-1-5)

² 東京大学大学院新領域創成科学研究科 教授・博士 (工学)

³ 東京大学大学院工学研究科 教授・博士 (工学)

⁴ 東京工業大学科学技術創成研究院 助教・博士 (工学)

⁵ 東京工業大学科学技術創成研究院 准教授・博士 (工学)

⁶ 元東京工業大学環境・社会理工学院 修士課程

⁷ 東京工業大学環境・社会理工学院 博士課程

¹ Doctoral Course, GSFS, The Univ. of Tokyo

² Prof., GSFS, The Univ. of Tokyo, Dr. Eng.

³ Prof., GSE, The Univ. of Tokyo, Dr. Eng.

⁴ Assistant Prof., IIR, Tokyo Tech., Dr. Eng.

⁵ Assoc. Prof., IIR, Tokyo Tech., Dr. Eng.

⁶ Former Master Course, Tokyo Tech.

⁷ Doctoral Course, Tokyo Tech.

としては、重要である。1998 年の伊藤ら⁵⁾による実験では、扉、引き違い窓、滑り出し窓が取り付けられた躯体を 1/50 まで加力し、加力のピーク時に開口部の開閉実験も行っている。しかし実際に避難するときは、地震により建物が繰り返し変形した後の水平外力が作用していない状態となるが、こうした検討は行っていない。

以上より、ALC 外壁に地震時を想定した変形時に生じる損傷の正確な位置、原因、開口部の詳細までは報告されていないことが分かった。また、開口部の開閉機能は、加力ピーク時の状態は確認されているが、繰り返し载荷の除荷時の状態は確認されていないことが分かった。

表 1 生じた損傷について記述のある既往研究

年	研究者	加力方法	開口部	生じた損傷の記述内容（層間変形角）
1987	坂本他文献 3	静的	○	・外壁一般部分はきわめてスムーズに追従した ・最下階壁面のパネル下端部にごく微小なひび割れ (1/60) ・開口部周り壁面の上階側パネルの下端部の一部と下階側パネルの下端部金物廻りに微小なひび割れが生じた ・隅角部壁面は全く異常なく追従した ・脚部のボルトがわずかに回転した (1/200)
1997	桑野他文献 6	静的動的		
1998	永井他文献 7	静的動的	○	・窓中央下パネル上部隅角部角欠け 1 か所 (1/100)
1998	伊藤他文献 5	静的	○	・パネル左上角部ひび割れが発生、ドア開不能、引き違い窓クレセント閉不能、滑り出し窓閉不能 (1/150) ・パネル左上角部ひび割れ伸張 (1/120) ・ドアノブ回転不能、引き違いクレセント閉不能、滑り出し障子閉不能 (1/120) ・左上角部ひび割れ裏面に貫通 (1/100) ・ドアノブ回転不能、引き違い窓開不能、滑り出し窓閉不能 (1/100)
2002	萩原他文献 8	静的	○	・開口部右上にひび割れ発生 (1/500~1/300) ・頂部で ALC 母材のひび割れ発生 (1/100)
2002	高橋他文献 9	静的動的		・脚部金物付近で発音 (1/800) ・パネルの相互ズレ (1/200) ・頂部及び脚部金物付近ではく離 (1/200) ・頂部で割れ (1/100)
2009	松岡他文献 4	静的	○	・ALC パネル下端角部にひび割れ (1/50)
2009	長江他文献 10	動的	○	・開口部上部の ALC パネルにひび割れ (1/100) ・ALC 下部取り付け金物廻りにひび割れ (1/25) ・上部取り付け金物廻りにひび割れ (1/13) ・剥離多数、アンカー鋼棒露出 (1/10)
2016	法身他文献 11	静的動的	○	・開口補強材と ALC 間のスペーサーにズレ (1/400) ・モルタルと開口補強材間に隙間 (1/200) ・モルタルにクラック (1/100) ・ALC パネル間の縦目地シール破断、一部のボルト緩み、ワッシャーズレ、下部 ALC パネルにひび割れ (1/50)

3 実験の概要

既往研究の分析を踏まえ、開口部を含む ALC 外壁に対して、躯体の大変形時まで再現した実大载荷実験を行い、生じた損傷の観察及び、開口部の開閉機能の確認を行った。ALC 外壁は鉄骨骨組に取り付けた。オイルジャッキ（写真 1 右奥）により鉄骨骨組に载荷することで ALC 外壁に層間変形を与えた。本実験は鉄骨骨組の研究と共同で実施し、2019 年 6 月に建築研究所で行った。なお、本実験に先立ち、本実験と同様の鉄骨骨組に乾式間仕切り壁を取り付け、同様の载荷方法を採用した実験を行っている^{12, 13)}。

3. 1 試験体について

階高 3,500mm、長辺 6,000mm、短辺 2,500mm のスラブ付き鉄骨剛節骨組の 2 面に、ALC パネルをロッキング構法で取り付けた外壁を設置し、試験体とした。2 面のうち 1 面は窓（引き違い窓、W=1,800mm、H=1,240mm）と扉（鋼製片開き扉、W=920mm、H=2,065mm）および L 字アングルを用いた開口補強鋼材（写真 2 の赤銅色の部材）の付いた面で構成し（以後、開口面と称す）、もう 1 面は全面無開口の平坦壁とし

てパネルのみで構成した（以後、無開口面と称す）。開口面と無開口面を設けることにより、開口部が ALC パネルに与える影響が明確に現れるように計画した。ALC パネルの仕様は、高さ 3,490mm×幅 600mm×厚み 100mm を無開口面には 10 枚配置し、開口面には基本的には無開口面と同じ割付で開口部の廻りのみ寸法が異なるパネルを配置した。パネル間およびパネルと開口部間には、ウレタン系のシーリング材を充填した。いずれも、一般的な ALC 外壁の設置状況を再現することを目指した。ただし、試験体内部には内装材は張らず、パネルの裏面や、開口補強材の挙動を計測・観察できるようにした（図 1～3、写真 1）。

図 1 試験体 平面図

図 2 試験体 無開口面 立面図

図 3 試験体 開口面 立面図

写真 1 試験体 外観（手前が開口面）

写真 2 開口部 内観

3. 2 载荷スケジュール

载荷は、事前に設定した最大層間変形角（以降 θ_{max} ）に対して、

正負両方向に 0.4, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0 倍させながら静的に層間変形角を大きくし、同様に 0 まで漸減させる間を 1 セットと定義した(図 5)。 θ_{max} の値は 1/200 から始め、増減させながら最終的に 1/33 のセットまで、計 8 セットの载荷を行った(表 2)。各セットの载荷が、1 回の地震を想定したものになっている¹²⁾。なお、本実験では、写真 1 の右にあるオイルジャッキが押す方向を正、引く方向を負とした。

図 5 1 セットの载荷履歴

セット番号	θ_{max}
1	1/200
2	1/100
3	1/200
4	1/75
5	1/100
6	1/50
7	1/75
8	1/33

3. 3 観察の方法

実験で生じた損傷の詳細な情報を把握するため、载荷の各セット当たり最大 13 回、合計 83 回、目視による開口面と無開口面の室外側、室内側の観察を行った。観察の主なタイミングは、図 5 中に○印を付したピーク変形時と負側のピーク変形時から除荷して水平荷重がゼロとなった時点(以後除荷時)とした。また窓と扉の開閉機能把握するため、载荷の各セット当たり最大 17 回、合計で 99 回、人力による開閉確認を行った。開閉確認は、原則として損傷の観察と同時に行うと共に、一部の正側のピーク変形時からの除荷時にも行った。

4 実験結果

各セットで観察された損傷を表 3 にまとめる。

表 3 損傷の確認結果

载荷状態	開口面(室外側)の損傷	開口面(室内側)の損傷	無開口面(室外側)の損傷
1/200	・ 扉枠の左側の縦材の上部でシールが切れた	・ 窓枠および扉枠と開口補強鋼材との間に充填したモルタルにひび割れが生じた	・ 左から 2 枚目のパネル底面で表面が剥がれた
1/100	・ 扉枠のシールの切れが進行した ・ 左から 2, 3 枚目のパネルの底面で表面の剥がれが生じた(いずれも 30mm 角、厚み 5mm 程)	・ 特に変化は見られなかった。	・ パネル底面の剥がれが進行した
1/200 2 回目	・ 特に変化は見られなかった	・ 特に変化は見られなかった	・ 特に変化は見られなかった
1/75	・ 扉枠のシールの剥がれが進行した ・ 左から 4 枚目、右から 3 枚目でパネル底面の数 mm 程度の凹みが生じた	・ 窓上にある開口補強鋼材(横)の裏でパネルの角部にひび割れ(約 10mm)が生じた ・ 扉上にある開口補強鋼材(横)の裏でパネルの角部にひび割れ(約 10mm)が生じた	・ 右から 3 枚目と 4 枚目でパネル底面の表面の凹み(いずれも数 mm 程度)が生じた
1/100 2 回目	・ 特に変化は見られなかった	・ 特に変化は見られなかった	・ 特に変化は見られなかった
1/50	・ 右から 3 枚目、左から 3 枚目のパネルの底面に新たな数 mm の凹み(一部砕け)が生じた ・ 扉枠廻りのシールの剥がれも進行が見られ、右側の上部にまで達していた ・ 窓上にある中央のパネルに、水平方向の横断するひび割れが生じ、特に右下コーナー部のひび割れは幅約 10mm までに開いた ・ 窓下にある左側のパネルのコーナー部分に L 字型のひび割れが生じた ・ 右下端部のモルタル止めの溶接が切れた。	・ 窓上にある水平方向の開口補強材の左端部の裏で、パネルにひび割れ(約 300mm)が生じた ・ 窓上下の中央のパネルそれぞれに、ボルト付近からひび割れが生じた ・ 窓の左下角でガラスがひび割れた(約 100mm) ・ 窓の左上、右上および左下で、開口補強鋼材の水平材と鉛直材を留めていた溶接に切れが生じた	・ 左から 4 枚目、右から 2 枚目と 3 枚目のパネルの底面の表面に数 mm 程度の凹み(一部砕けていた)が生じた ・ 上下左右端部にある定規アングルとその振れ止めの溶接が切れた
1/75 2 回目	・ 右から 5 枚目のパネル底面の表面が剥がれた	・ 特に変化は見られなかった。	・ 特に変化は見られなかった。
1/33	・ 窓上下のパネル 6 枚全てにひび割れが生じ、多くのひび割れが窓周囲に位置した ・ 窓の右のパネル 2 枚では、頂部において水平方向のひび割れが生じ、長さ 200mm ほどの破片がシール材でのみ躯体に取り付いているという状態になった ・ 扉左側にあるパネルの左下コーナーには斜めに横断するひび割れが生じた ・ 扉上側にあるパネルの左下角にも斜め方向にひび割れが生じた ・ 扉と窓の間にあるパネルの中央部分にも、目地部分よりひび割れが生じた ・ 扉の枠の左上角で、水平材と鉛直材の接合部分に破断が見られ、数 mm 程度ずれが生じた ・ 左下の定規アングルの振れ止めでは、定規アングルと振れ止めの溶接と、振れ止めと鉄骨の溶接の 2 か所で切れが生じた	・ 窓右上および下の 3 枚のパネルのひび割れが進行した ・ 窓右上のボルト付近からひび割れが生じた ・ 窓右下、左下の角部からひび割れが生じた ・ 窓の左上でガラスがひび割れた(約 20 mm) ・ 窓ガラスの中央下部分で、ガラスを固定するシールに約 50mm の切れが生じた ・ 窓枠がせん断変形することで、窓枠の水平材と鉛直材の接合部が閉じる際には水平材の端部が局所的に曲げ変形し、接合部が開く際には、数 mm 程度の隙間が生じた ・ 扉右にある開口補強の鉛直材と水平材とを留めている溶接に切れが生じた ・ 扉右にある開口補強材の頂部で、鉛直材と鉄骨とを留めている溶接の切れが生じた	・ 特に変化は見られなかった。
損傷の生じた箇所			
凡例	□ : 1/200 で生じた損傷、□ : 1/100 で生じた損傷、□ : 1/75 で生じた損傷、□ : 1/50 で生じた損傷、□ : 1/33 で生じた損傷		

4. 1 開口面と無開口面の比較

無開口面では、躯体の大変形時を含め、パネル底面の損傷のみ生じた。パネル底面の損傷は接合部や目地の損傷でないため、耐震性や密閉性に特に影響しないと考えられる。開口面では大変形となる層間変形角 $1/50$ を境に、損傷が多数生じた。損傷状況を以下にまとめる。

層間変形角 $1/100$ までは、シールの切れとパネル底面の損傷のみが生じた。ただし、シールの切れは除荷時に閉じた。層間変形角 $1/75$ では、開口補強鋼材に接するパネルの角部が一部欠けた。層間変形角 $1/50$ では、パネルの接合部周辺や目地部から、パネルのひび割れが多数生じた。また、下地の溶接の一部に切れが生じた。層間変形角 $1/33$ では、パネルのひび割れが引き続き増えたほか、窓サッシ、扉枠に損傷が生じた。

4. 2 実験で生じた損傷の原因の考察

複数のパネル底面で、表面の剥がれや凹みが生じた。底面中央の損傷は、ウケプレート及び目地プレート等の取り付け金物がパネル底面と接触したことが原因と考えられる。底面の目地付近の損傷は、パネルのロッキングにより、底面に付着したシーリング材が伸縮しパネル表面を引っ張ったことが原因と考えられる。

パネルのひび割れは多くが開口廻りに集中した。パネルの角部が欠けたことは、ロッキングによりパネルが開口補強鋼材に衝突したことが主な原因と考えられる。接合部周辺や目地部からのひび割れ(写真3,4)は、開口補強鋼材によりパネルのロッキングが拘束された結果、この原理でボルトに応力が生じたこと(図6)やパネル間でロッキングの程度に差が生じたこと(図7)が原因と考えられる。

写真3 接合部周辺のひび割れ
(層間変形角 $1/50$ の時点)

図6 ボルトに生じる応力

写真4 パネルのひび割れ
(層間変形角 $1/33$ の時点)

図7 パネル間のひび割れ
(層間変形角 $1/33$ の時点)

5 窓と扉の開閉機能の確認結果

窓と扉の開閉機能を確認した結果を、セットごとの載荷履歴にプロットしたものを表4にまとめ、構造体の荷重変形曲線上にプロットしたものを表5にまとめた。各開閉確認時に、開閉機能について、「簡単に開けることができる」、「力を入れれば開けることができる」、「力を入れても開けることができない」の指標で評価した。

5. 1 窓の開閉機能の確認結果

層間変形角 $1/200$ 時に、初めて窓が開かなくなった。また、層間変形角 $1/100$ を境に、開閉不良が多く見られた。

障子がずれてクレセント錠が開かなくなったこと、障子が十分に

水平移動できなくなったことが確認時に観察された。いずれも、層間変形角により開口補強鋼材及び窓枠が歪んだことが原因と考えられる。また、障子の面外への脱落を防止するために取り付けられたストッパーが、水平移動の可不可を大きく左右させたとも考えられる(写真5)。ストッパーが中央にある時は、層間変形角 $1/200$ であっても開閉が困難となったが、ストッパーが端によっていれば、層間変形角 $1/75$ であっても開閉可能であった。

また、層間変形角を繰り返し与えると、同じ層間変形角に対し、開閉機能が向上することが分かった。これは、開口補強鋼材や窓枠に、接合部の破断や歪みなどの損傷が生じたことが原因として挙げられる。例えば、層間変形角 $1/33$ のセットで60%載荷後の除荷時、100%載荷後の除荷時には力を入れなければ開けられなかったが、窓枠の歪みが目視で観察された80%載荷後の除荷時には問題なく開いた。

実際に避難するときは、地震の揺れがおさまった後であり、除荷時に相当する。このときに残留変形が $1/100$ 以上残っている場合、窓の開閉機能は低下していることが考えられる。表5に赤曲線で示した層間変形角 $\pm 1/33$ の80%(約 $1/41$)以上の履歴を見ると、この時は除荷時が0の時に残留変形が $1/100$ 以上残っていることがわかる。しかし、残留変形が $1/100$ 以上残っている場合であっても問題なく開閉できることが多くあった。更に、層間変形角 $1/50$ からの除荷時など、残留変形が $1/100$ 未満の場合でも開閉不良が見られることがあった。このように層間変形角と開閉機能に明確な関係が見られなかったことには、上述の窓のストッパーの位置の影響が考えられる。

5. 2 扉の開閉機能の確認結果

層間変形角 $1/200$ 時に、初めて窓が開かなくなった。また、層間変形角 $1/200$ を境に、開閉不良が多く見られた。

扉枠が歪んだことにより、扉が枠に押し付けられ開けられなくなったこと、ノブのツメが穴の底面に押し付けられノブが回らなくなったこと、鍵のツメが穴の底面に押し付けられ鍵が回らなくなったことが、開閉確認時に観察された。ノブや鍵が機能しなかったことで扉の開閉ができなかった事態も生じたが、もし機能していたとしても、扉が枠に強く押し付けられており、開閉はできなかったことが、全体の傾向から推察される。いずれも層間変形角により開口補強鋼材及び窓枠が歪んだことで生じたと考えられる。

層間変形角を繰り返し与えると、同じ層間変形角に対し、開閉機能が上がるのが分かった。これは、開口補強鋼材や扉枠に、接合部の破断や歪みといった損傷が生じたことが影響している可能性も考えられる。例えば、層間変形角 $1/33$ のセットで60%載荷後の除荷時、80%載荷後の除荷時には力を入れなければ開けられなかったが、枠の破断(写真6)が観察された100%載荷後の除荷時には問題なく開いた。

実際に避難するときは、地震の揺れがおさまった後であり、実験でいう除荷時に相当する。このときに残留変形が $1/200$ 以上残っている場合、窓の開閉機能は低下していることが考えられる。表5に赤曲線で示した層間変形角 $\pm 1/50$ の80%以上の履歴を見ると、除荷時に残留変形が $1/200$ 以上残っていることがわかる。この除荷時には開閉不良が見られた。

5. 3 開閉機能の確認結果の既往実験との比較

1998年の伊藤らによる実験⁵⁾では層間変形角 $1/120$ を超えると窓が、層間変形角 $1/200$ を超えると扉が開不能になることが報告されている。これは本実験の結果と概ね整合する。ただし本実験では、

表 4 開閉機能の確認結果

対象部位 載荷状態	窓		扉	
	開閉結果確認	詳細な状態	開閉結果確認	詳細な状態
1/200		80%時: 鍵が開まらない -100%時: 鍵が開かない		-80%時: 扉上部が枠に引っ掛かる 100%時: 扉下部が枠に引っ掛かるが、力を入れれば開く -100%時: 扉下部が枠に押し付けられ開かない
1/100		60%時: 鍵が閉めにくい 80%時: 障子を持ち上げれば開閉できた 100%時: 片方の障子は10cm程度しか開かず、片方は一切開かない - 除荷時: 正常に機能する		60%時: ノブが回らない -60%時: ノブは回るが開かない 100%時: 鍵のツメが少し引っかかる枠に押し付けられ開かない -100%時: ノブも鍵も引っ掛かり枠に押し付けられ開かない
1/200 2回目		常に正常に機能する		100%時: ノブが回しづらくなるが、一度力を入れて回すとスムーズになる
1/75		80%時: 障子がストッパーに引っ掛かる10cm程度しか開かない -80%時: 力を入れればストッパーごと動く 100%時: 片方の障子が途中でしか開かない -100%時: 力を入れればストッパーごと動く - 除荷時: 正常に機能する		-60%時: 枠に押し付けられ開かない 80%時: ノブが回らず開かない 蝶番が歪む -80%時: ノブは回るが開かない 100%時: ノブも周り、扉も開くが鍵が閉まらなくなる - 除荷時: 全て正常に機能する、ただし蝶番は歪んだまま
1/100 2回目		80%時、100%時、-100%時: 鍵が開まらない、力を入れればストッパーごと動く - 除荷時: 正常に機能する		-100%時: ノブと鍵は機能するが枠に押し付けられ開かない
1/50		40%、±60%時: 力を入れればストッパーごと動く 80%時: 両方の障子共に30cm程度しか開かない - 除荷時: スペーサーに引っ掛かる -80%時: スペーサーに引っ掛かる 100%時: 鍵が開かない - 除荷時: 鍵は開くが障子が片方途中でしか開かない -100%時: 鍵が開かない - 除荷時: 鍵は開くが、障子が片方途中でしか開かない - 終局時: 力を入れれば開く		-60%時、80%時: ノブは回るが、鍵が開かない -80%時: ノブと鍵は機能するが枠に押し付けられ開かない 100%時: 鍵は開くが、ノブが回らない -100%時: 鍵が開かない
1/75 2回目		100%時: 開閉に問題無し(ストッパーが右に寄っている) -100%時: 鍵が開かない - 終局時: 力を入れれば開く、サムタンの黒い部品が外れかける		-80%時: 蝶番のビスが一部緩む -100%時: ノブと鍵は機能するが枠に押し付けられ開かない
1/33		40%時: 開閉に問題無し(ストッパーが左に寄っている) -40%時、60%時、-60%時、80%時、-80%時: 鍵が開かない - 除荷時: 鍵が閉まらない 100%時: 障子が動かない - 除荷時: 力を入れれば開く -100%時: 障子が動かない - 除荷時: 障子は動く鍵は閉まらない - 終局時: 鍵が閉まるようになるが、金具がかみ合っておらず、鍵としては機能していない		60%時: ノブが回らない -60%時: ノブも鍵も機能するが枠に押し付けられ開かない 80%時: 鍵が開かない - 除荷時: 開ける時はノブも鍵も問題ないが閉めた時には動かなくなる -80%時: 鍵はかかっているが開かない - 除荷時: ノブも鍵も動かないが、力を入れれば開く - 終局時: 開閉でき、ノブも回るが、カギは閉まらない
凡例※	● : 簡単に開けることができる ● : 力を入れれば開けることができる ● : 力を入れても開けることができない			

※ マーカーは避難のための開機能について示した

表5 荷重変形曲線状にプロットした開閉機能の確認結果

写真5 窓の障子のストッパー

写真6 扉枠の破断

1/120、1/200 より小さい層間変形角であっても開閉不良が発生する場合があることも判明した。また、1/120、1/200 より大きい層間変形角であっても問題無く開閉できる場合があることも判明した。

6 研究のまとめ

本報告ではまず、既往研究を整理し、ALC 外壁について、地震により生じる損傷について正確な位置や原因や開口部の詳細までは報告されていないこと、開口部の開閉機能は、加力ピーク時の状態までは確認されているが、繰り返し载荷の除荷時を含む状態までは確認されていないことを示した。

この点を踏まえ、次に開口部が取り付けられた ALC 外壁を試験体とし、躯体の大変形時まで再現した実大载荷実験を行った。実験時の観察により、損傷の正確な位置や生じた層間変形角について情報を得ることができ、その原因について考察することができた。無開口面

ではパネル底面以外損傷は生じなかったが、開口面では特に大変形となる層間変形角 1/50 以上でパネルのひび割れや下地の溶接の切れ等の損傷が多く見られた。特に開口補強鋼材にパネルのロッキングが拘束されたことが原因と考えられる、パネルのひび割れが開口部周辺に複数生じた。

また、開口部の開閉機能の確認も行った結果、窓は層間変形角 1/100、扉は層間変形角 1/200 を境に、開閉不良が多く見られた。ただし、特に窓は層間変形角が小さい場合にも開閉不良が見られた。

謝辞

本研究の一部は JST 産学共創プラットフォーム共同研究推進プログラム（領域統括：山田 哲）の支援によるものである。実験に際しては、一般社団法人 ALC 協会に協力していただいた。また、合成スラブ工業会にはデッキプレートを提供いただいた。ここに謝意を示す。

参考文献

- 国土交通省住宅局：防災拠点等となる建築物に係る機能継続ガイドライン（新築版），2018.5
- 日本建築学会：東日本大震災合同調査報告 建築編 6 非構造部材，2019.2
- 坂本功，大橋好光，山田誠，渡辺拓文，横木光一郎：ALC パネル外壁の耐震性に関する実験的研究 その 1～3，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.201-206，1987. 8
- Matsuoka, Y., et al.: Evaluation of Seismic Performance of Exterior Cladding in Full-Scale 4-Story Building Shaking Table Test, Journal of Structural Construction Engineering (Transactions of AIJ), Vol. 74, No.641, pp. 1353-1361, 2019. 7 (in Japanese)
- 松岡祐一，吹田啓一郎，山田哲，島田侑子，赤澤資貴，松宮智央：実大 4 層鉄骨造建物の振動台実験における外装材の耐震性能評価，日本建築学会構造系論文集，第 74 巻，第 641 号，pp.1353-1361，2009. 7
- 伊藤弘，西田和生，浜崎仁，水谷吉克，相子恒夫，廣波純二，高橋光雄，富田和男：ALC ロッキング構法実大変形追従性試験 その 1～7，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.107-120，1998. 7
- 桑野和彦，幅裕司，高橋大祐：大型 ALC 外壁パネルのロッキング構法に関する実験的研究 工法概要と層間変位追従性能試験結果，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.429-430，1997. 7
- 永井昌志，河辺伸二：現場タイル張り ALC 縦壁ロッキング構法の層間変形追従性能に関する実験的研究 その 1，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.121-122，1998. 10
- 萩原達也，細内正紀，横家尚，横木光一郎：現場タイル張り ALC パネルの層間変形追従性能に関する実験的研究 その 2，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.355-356，2002. 6
- 高橋大裕，橋本敏男，池田賢，清家剛：内装仕上げを施した ALC 二次壁の動的変形能試験 その 1～2，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.359-362，2002. 8
- Nagae, T., et al.: PERFORMANCE OF EXTERIOR ALC WALLS IN SEISMIC RESPONSES OF A HIGH-RISE BUILDING -E-Defense shaking table test-, AIJ Journal of Technology and Design, Vol.15, No.31, pp. 667-672, 2009. 10 (in Japanese)
- 長江拓也，藤谷秀雄，横山國夫，梶原浩一，城戸史郎：超高層建物の地震応答を受ける ALC 版外壁の耐震性能 -E-ディフェンス振動台実験-，日本建築学会技術報告集，第 15 巻，第 31 号，pp.667-672，2009.10
- 法身祐治，林徹，太田匡信，佐藤高行：集合住宅の雨掛かり非構造壁への乾式工法採用検討 その 1～3，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.1135-1140，2016. 8
- Yamada, S., Kohtaki, K., Ishida, T., Tenderan, R., Seike, T., Kishiki, S., Hasegawa, T., Iyama, J., Yagi, S., and Sakurada, S.: Experimental Study on Full Scale Steel Frame Considering Multiple Strong Earthquakes Part1,2, 日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.1187-1190，2019. 10
- 清家剛，山田哲，吉敷祥一，石田孝徳，伊山潤，巽信彦他：鉄骨骨組に取り付けられた乾式間仕切り壁の繰り返し载荷実験 その 1～5，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.1431-1440，2019. 10

[2020 年 2 月 5 日原稿受理 2020 年 4 月 28 日採用決定]