

2 段積み ALC 間仕切壁の地震時面外挙動に関する検討

AN INVESTIGATION ON SEISMIC OUT-OF-PLANE BEHAVIOR OF LARGE WALL OF ALC PANEL

石田 琢志*¹, 渡壁 守正*², 稲井 慎介*¹, 森田 泰弘*¹

Takushi ISHIDA, Morimasa WATAKABE, Shinsuke INAI and Yasuihiro MORITA

In the Great East Japan Earthquake, many steel buildings were damaged. Particularly, damages of non-structural components were severe. Many large scale partition walls made of ALC panels were also damaged. Those walls are usually composed of intermediate sub beams to shorten the length of panels. From the investigation, it is estimated that a main cause of damages in those walls is deformations and vibrations of sub beams. In this paper, the investigation on seismic out-of-plane behavior of large walls of ALC panels based on the analysis of the microtremor measurement and strong motion observed on a damaged warehouse with large partition walls, vibration characteristics including partition walls are discussed. In addition, the investigation on the shaking table tests of full-scale large wall of ALC panel composed of intermediate sub beam is discussed.

Keywords : Great East Japan Earthquake, Non-structural component, ALC panel, Sub beam
東日本大震災, 非構造部材, ALC パネル, 構造 2 次部材

1. はじめに

東日本大震災では、構造躯体の被害に加え内外装材の大破・脱落等の地震被害が、構造躯体に被害が見られた地域に限らず、東北地方から関東地方に至る広範囲に渡って発生した¹⁾。内装材では、ALC 間仕切壁に多くの被害が見られ、特に階高が高くスパンが大きい場合において、中間梁と呼ばれる構造 2 次部材に ALC パネルを支持させた 2 段積みの間仕切壁で多数の被害が報告されている^{2), 3)}。中間梁等の構造 2 次部材の振動・変形が被害要因の 1 つと推察されているものの²⁾、こうした構造 2 次部材については、地震動に対する構造計算の具体的な検証方法が明確になっているとは言えず、またその振動特性や地震時挙動も明らかになっていない。今回の地震による間仕切壁の被害原因の解明には、中間梁等の構造 2 次部材および ALC パネルの振動特性や地震時挙動を把握することが必要不可欠である。

本報では、こうした間仕切壁の被害原因を探り今後の対策に役立てるべく、東日本大震災で被災した倉庫において常時微動測定および地震観測を実施し、2 段積み ALC 間仕切壁の振動特性や地震時挙動を調査した結果について報告する。更に、2 段積み ALC 間仕切壁のほぼ実大 1 スパンを切り出した振動台実験を行い、その面外方向の振動特性や地震時挙動を把握するとともに、ALC パネルの損傷・破壊状況の検証を行った結果についても報告する。

2. 東日本大震災における ALC 間仕切壁の被害

東日本大震災における ALC 間仕切壁の被害は、

ALC 協会が保有している被害情報および建築研究開発コンソーシアム「ALC パネルを対象とした鉄骨構造における二次的な構造部材および内外装材（帳壁）の地震力に対する設計条件整理に関わる研究会」のメンバー各社による独自調査 45 件に基づいた調査結果により示されており、それによれば、階高 6m 以上、柱スパン 8m 以上の物件で ALC パネルの脱落（図中の表記：C2）といった重大な被害が生じたことが報告されている³⁾（図-1）。また、変形追従性が高いとされるロッキング構法においても ALC パネルの脱落被害（C2）が 10 件以上で報告されている。こうした被害調査の結果を受け、3 章では、実際に被災した倉庫を対象として、常時微動測定および地震観測を実施した結果について報告する。

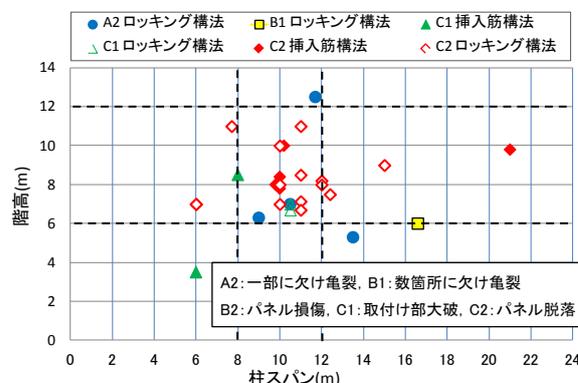


図-1 被害の見られた間仕切壁の階高と柱スパンの関係（参考文献 3）より抜粋

*1 戸田建設(株)開発センター 修士 (工学)

*2 戸田建設(株)開発センター 工学博士

Research and Development Center, TODA CORPORATION, M.Eng.

Research and Development Center, TODA CORPORATION, Dr.Eng.

3. 被災建築物での振動測定

3.1 対象建築物の概要と地震被害の概況^{4),5)}

測定対象の建築物は、宮城県仙台市にある物流倉庫で、2007年（平成19年）竣工の物件である。地上2階建ての鉄骨造建築物であり、1階は事務所スペース等で、2階が倉庫となっている。図-2に2階平面図を示す。短辺(X)方向が80m、長辺(Y)方向が136.5mのほぼ整形な建物である。2階は倉庫機能の目的で外壁と間仕切壁に沿って柱が配置された大空間であり、間仕切壁により複数に区画されている。スパン割はX方向が10m、Y方向が10.5m、階高は1階が8.4m、2階が6.4~8.4mである。高い階高に対応するため、中間梁(H-194×150×6×9)を階高の中間高さに設け、図-3に示すロッキング構法により上・下段のALCパネルを支持している。

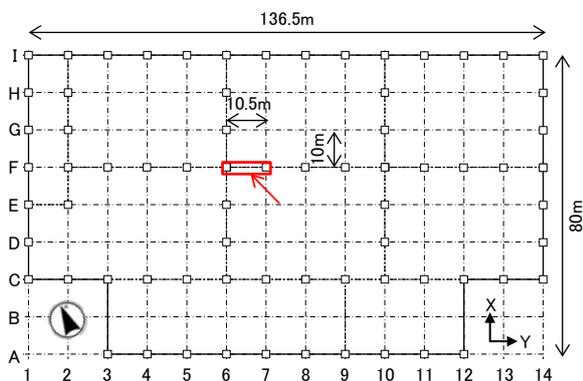


図-2 2階平面図

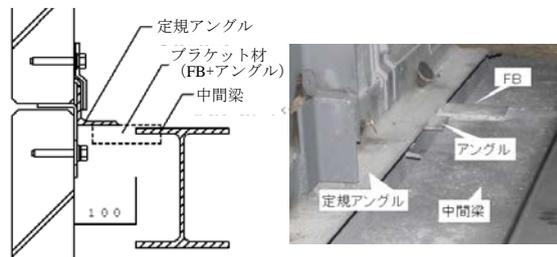


図-3 ALCパネルの取付け部（ロッキング構法）

東日本大震災およびその一連の余震により、当該倉庫ではALC間仕切壁の破損や脱落といった被害が数多く見られ、2階部分における2段積みALC間仕切壁の上段パネルの約30%、シャフト廻りの80%以上に破損や脱落といった被害が発生し、特にF通りでの被害が甚大であった。F通り⑥⑦間の被害状況を一例として写真-1に示す。

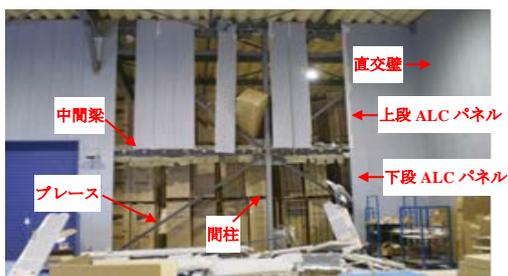


写真-1 ALC間仕切壁の被害状況（F通り⑥⑦間）

3.2 常時微動測定⁶⁾

(1) 測定概要

対象建物では地震観測が計画されており、事前に常時微動測定を実施し、間仕切壁の振動特性を調査した。測定点を図-4に示す。測定対象とした間仕切壁は、東日本大震災により最も大きな被害が見られた(写真-1)F通りの⑥⑦間の1スパンとした(図-2)。以下では、この間仕切壁の面外方向(図-2のX方向)を単に面外方向、壁の面内方向(図-2のY方向)を単に面内方向と呼ぶ。サーボ型加速度計を2階床(ch3)、中間梁(ch4, 6, 7, 9)、定規アングル(ch5)および屋根大梁下(ch8)に設置した。なお、図示はしていないが、地盤(ch1: X, ch2: Y)の測定も実施した。測定長さは5分間、サンプリング周波数は500Hzとし、面外、面内、上下方向をそれぞれ別々に測定した。

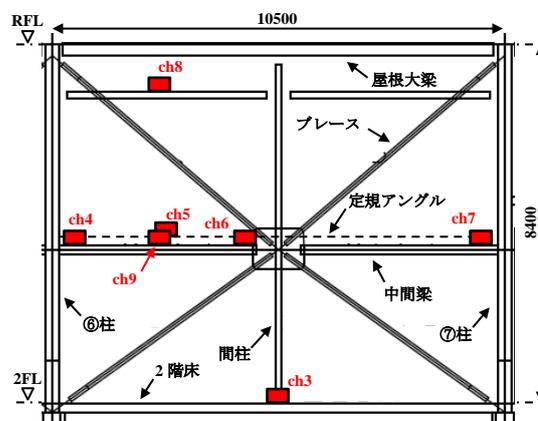


図-4 常時微動測定点

(2) 固有振動数

地盤(ch1, 2)を入力とした2階床(ch3)の加速度フーリエスペクトル比を面外(X)・面内(Y)方向について図-5に示す。面外方向は3.0Hz、面内方向は3.2Hzがそれぞれ卓越しており、これらが躯体の固有振動数であることが確認できた。

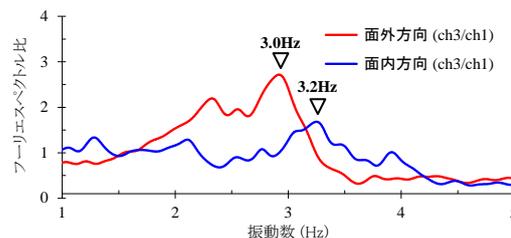
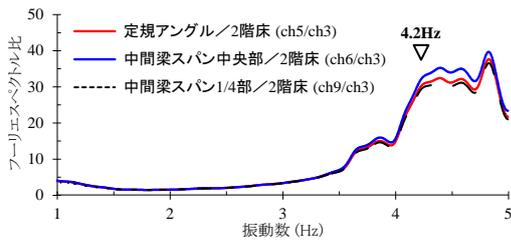


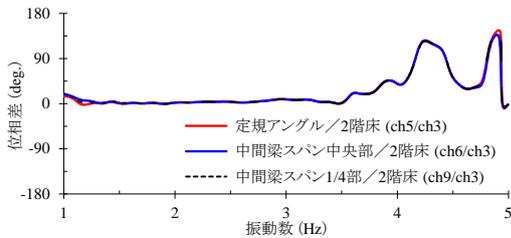
図-5 2階床/地盤の加速度フーリエスペクトル比

続いて、2階床(ch3)を入力とした中間梁(ch6, 9)、定規アングル(ch5)の加速度フーリエスペクトル比を面外(X)、面内(Y)方向について図-6, 7に示す。面外方向については位相差も併せて示す。図-6の面外方向では、1~5Hzの範囲において中間梁と定規アングルのスペクトル比および位相差はほぼ同じであり、両者は同じ挙動を示すことが確認できた。固有振動数は、スペクトル比からでは4~5Hzにあるピークが潰れており判断が難しいが、図-6(b)に示す位

相差との対応から間仕切壁の面外方向の固有振動数を 4.2Hz と推定した。



(a) 加速度フーリエスペクトル比



(b) 位相差

図-6 中間梁、定規アングル/2階床の加速度フーリエスペクトル比と位相差（面外方向）

図-7 に示す面内方向においても、面外方向と同じ 4.2Hz にピークが確認できた。⑥通り側には測定対象と直交する間仕切壁（直交壁）があり（図-2、写真-1）、⑥⑦間の境界条件が異なるため、面外方向の卓越成分が面内方向にも見られたと考えられる。また、面内方向にはブレースが設けられていることもあり、面外方向に比べて増幅率が低い傾向にある。

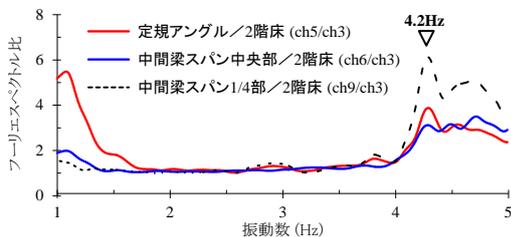
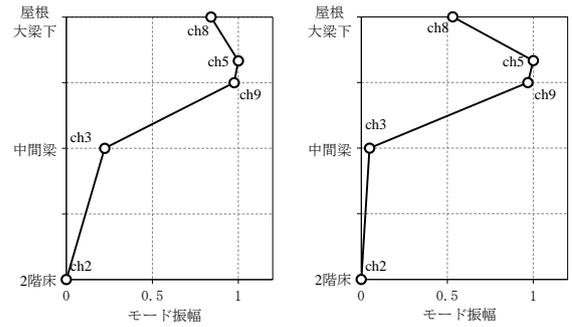


図-7 中間梁、定規アングル/2階床の加速度フーリエスペクトル比（面内方向）

(3) モード形

1 階床を入力とした加速度フーリエスペクトル比と位相差より求めた間仕切壁の高さ方向のモード形を、3.0Hz、4.2Hz について各振動数帯の最大モード振幅で基準化して図-8 に示す。なお、図-7 より面内方向の間仕切壁の増幅率は面外方向に比べて明らかに小さいことが確認できたため、ここでは面外方向についてのみ示す。図-8 より、両振動数帯とも中間梁および定規アングル部が最も増幅するモード形であるが、4.2Hz は 3.0Hz に比べ、2 階床、屋根大梁下とのモード振幅差がより大きいことが確認できた。

同様に、4.2Hz での中間梁の水平方向のモード形を最大モード振幅で基準化して図-9 に示す。スパン中央には間柱があるものの、端部に比べスパン 1/4・中央位置で大きく面外方向にはらみ出すモード形であることが確認できた。



(a) 3.0Hz (b) 4.2Hz

図-8 ALC 間仕切壁の高さ方向のモード形

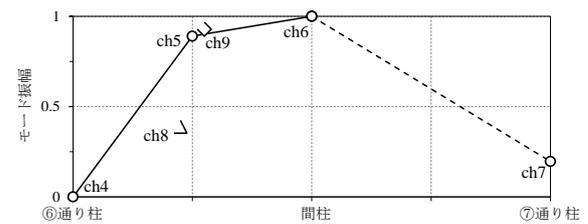


図-9 中間梁の水平方向のモード形（4.2Hz）

3.3 地震観測

(1) 観測概要⁵⁾

常時微動測定に加え、間仕切壁の振動特性や今後の耐震設計に向けた設計用地震力の評価を目的として地震観測を実施した。観測点を図-10 に、地震計設置状況を写真-2 にそれぞれ示す。図中には識別のための番号 (ID) を併記している。観測点は、常時微動測定点とほぼ対応しており、図示はしていないが、1 階床にも地震計 (ID24) を設置した。観測は面外 (X)、面内 (Y)、上下 (Z) の 3 方向についてサンプリング周波数 200Hz で行った。

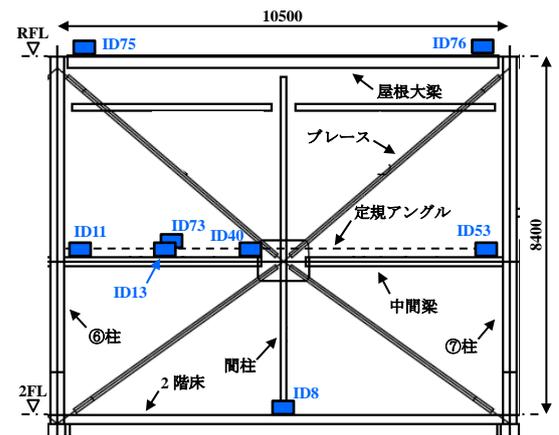


図-10 地震観測点



写真-2 地震計設置状況

(2) 観測地震と加速度記録

地震観測は2012年8月下旬から開始し、2014年3月の終了までに計26の地震が観測された。その内、1階床の震度階級が3以上のものについて観測日時と震源地、1階床の計測震度および最大加速度を表-1に示す。なお、2012年8月30日の地震時においては、地震計はID24, ID8, ID13の3台のみの設置であった。観測期間中、面外方向における最も大きな地震は2013年4月17日に発生したもので、1階床最大加速度は107.8cm/s²を記録した。当該地震における、1階床(ID24)、2階床(ID8)、中間梁スパン中央(ID40)の加速度時刻歴波形を面外、面内方向について図-11に示す。面内方向では、1階床が約82cm/s²であるのに対し、2階床は約136cm/s²、中間梁は約162cm/s²であり、中間梁の増幅率は1階床に対しては約2倍、2階床に対しては約1.2倍であった。一方、面外方向では、1階床が約107cm/s²であるのに対し、2階床は約188cm/s²、中間梁は約509cm/s²であり、中間梁の増幅率は1階床に対しては約4.8倍、2階床に対しては約2.7倍と大きく、面内方向に比べ面外方向に中間梁は大きく増幅されていることが確認できた。

表-1 観測地震一覧

年月日	時刻	震源地	計測震度	最大加速度 (cm/s ²)	
				面外 (X)	面内 (Y)
2012/8/30*	4:05	宮城県沖	4.1	115.7	127.1
2012/10/3	18:40	宮城県沖	2.7	15.7	28.3
2012/10/25	19:32	宮城県沖	3.2	46.0	72.7
2012/11/24	5:21	宮城県沖	3.6	83.8	80.8
2012/11/24	10:30	宮城県沖	3.1	38.6	43.6
2012/12/7	17:18	三陸沖	3.8	69.2	90.8
2012/12/15	13:27	福島県沖	2.5	14.6	29.5
2013/2/22	0:34	宮城県沖	3.4	42.5	85.6
2013/4/17	21:03	宮城県沖	3.9	107.1	82.3
2013/5/18	14:47	福島県沖	3.4	39.1	59.7
2013/8/4	12:28	宮城県沖	4.1	95.6	89.6

*ID24, ID8, ID13 のみの設置

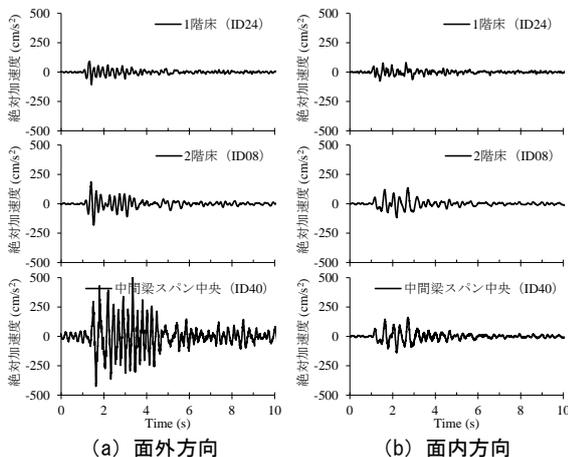


図-11 2013/4/17 観測地震の加速度時刻歴波形

(3) 加速度応答倍率

表-1に示した10余りの地震記録に対し、各観測点の最大加速度を2階床最大加速度で基準化した応答倍率分布を、高さ方向と水平方向について図-12, 13にそれぞれ示す。高さ方向では、中間梁位置はID40、屋根大梁位置はID75, 76の平均値を対象とした。水平方向では、中間梁上に設置しているID11, 13, 40, 53を対象とした。図中には、各観測点での応答倍率の平均値(以下、平均応答倍率と呼ぶ)と平均値±σを併記した。

図-12の面外方向では、後述の面内方向に比べばらつきが大きいものの、高さ方向で常時微動測定結果と同様、中間梁位置で増幅する傾向が見てとれる。平均応答倍率は、中間梁位置で約3.5倍、屋根大梁位置で約2.8倍であった。屋根大梁での応答倍率は後述の面内方向に比べ約2倍大きい。その理由として、屋根が軽量の鋼製折半かつ2階の柱が少ない大スパン架構のため、間仕切壁の面外方向への振動を抑えるだけの面内剛性が屋根面がないことなどが考えられる。図-12(b)に示す水平方向においても、常時微動測定結果と同様、スパン1/2・中央位置で大きく面外にはらみ出す傾向が確認できた。平均応答倍率は、柱際(ID11, 53)で約2.2~2.4倍、スパン1/4・中央位置(ID13, 40)で3.3倍~3.5倍であった。

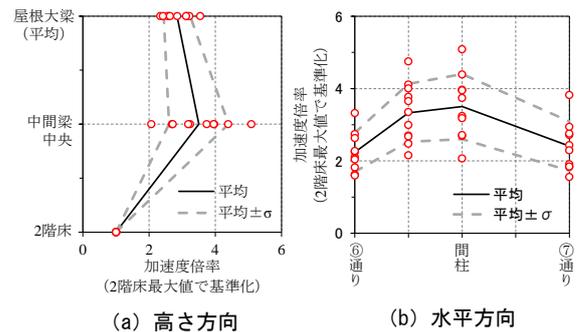


図-12 2階床に対する面外方向の加速度応答倍率分布

一方、図-13の面内方向では、同図(a)の高さ方向の結果から、高さに比例して応答倍率が増加していく傾向が確認でき、またそのばらつきも小さいことがわかる。平均応答倍率は中間梁位置で約1.2倍、屋根大梁位置で約1.4倍であった。水平方向では各観測点の平均応答倍率は1.2倍~1.4倍と小さく、これは上述した通り、ブレースを設けている影響が大きいと推察できる。

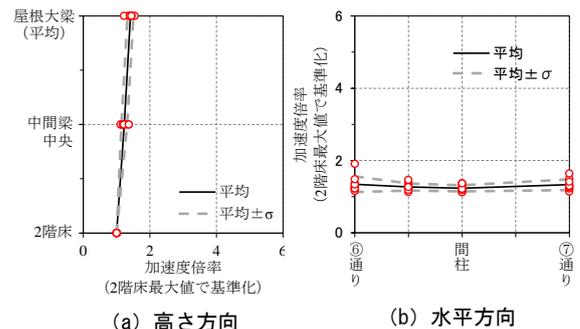


図-13 2階床に対する面内方向の加速度応答倍率分布

(4) 固有振動数

観測された全 26 の地震に対し、1 階床を入力、中間梁中央部を出力としたフーリエスペクトル比のピークから固有振動数を算出し、地震時の固有振動数を評価した。横軸を 1 階床の計測震度、縦軸を振動数とし、躯体の面外 (X) ,面内 (Y) 方向と間仕切壁の面外 (X) 方向の固有振動数をプロットしたものを図-14 に示す。同図には最小二乗法により算出した近似直線およびその近似式を併記した。また同図には、3.2 節で示した常時微動測定時の固有振動数を計測震度 0 の点にプロットした。ばらつきはあるものの、躯体の面外方向は 2.5~3.0Hz、躯体の面内方向は 2.8~3.3Hz、間仕切壁の面外方向は 3.8~4.3Hz 間にプロットされていることがわかる。また、躯体・間仕切壁とも計測震度が大きくなるに連れ、固有振動数が比例的に低下する傾向が確認できた。

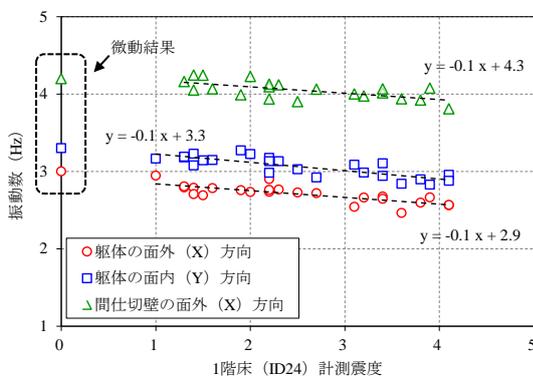


図-14 固有振動数と 1 階床計測震度の関係

3.4 地震観測のシミュレーション解析

(1) 解析モデルの作成

解析モデルは、3 次元立体フレームモデルとして作成した。解析モデルの概要を図-15 に示す。全体部分は、柱や梁、床スラブ等の主要構造部材構成でモデル化し、3.3 節で示した地震計を設置した間仕切壁構面は、主要構造部材に加え中間梁等の構造 2 次部材や間仕切壁の非構造部材までモデル化した。間仕切壁のモデル化は、ALC パネルは表-2 に示すパラメータで梁要素とし、上段の ALC パネル重量は屋根の大梁と中間梁が 1/2 ずつ支持し、下段の ALC パネル重量は中間梁と 2 階床スラブが 1/2 ずつ支持するものとした。減衰については、地震によってばらつきが大きく評価が難しかったため、ここでは試行錯誤的に躯体 X 方向の卓越振動数が 6%、間仕切壁の卓越振動数が 2.3%のモード減衰に設定した。

表-2 ALC パネルの諸元

サイズ	W0.6×H4.2×t0.1 (m)
単位体積質量	650 (kg/m ³)
重量/枚	1.61 (kN)
ヤング係数	1.75×10 ³ (N/mm ²)

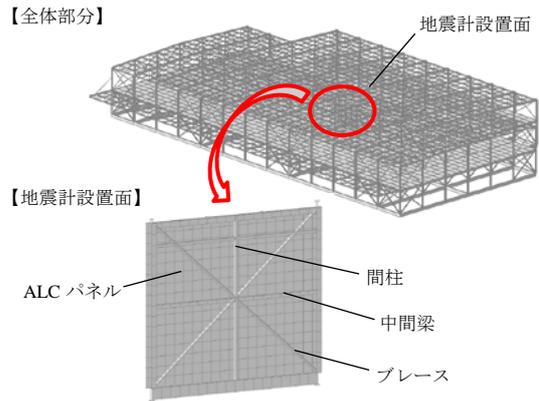


図-15 解析モデルの概要

(2) 解析モデルの妥当性の検証

表-1 で示した地震観測波の内、東日本大震災と同じく三陸沖を震源とした 2012 年 12 月 7 日の地震観測記録を用いて解析モデルの妥当性を検証した。当該地震で観測された 1 階床の面外 (X) 方向の加速度記録を図-16 に示す。同地震は、最大加速度値が 70cm/s² (計測震度 3.8) で中規模地震相当の地震動であった。1 階で観測された 3 成分加速度記録を入力とした地震応答解析を行い、2 階中間梁のスパン中央における面外方向の絶対加速度時刻歴波形、加速度フーリエスペクトルを観測と解析を比較して図-17, 18 にそれぞれ示す。同図より、解析結果は観測記録とほぼ良好な対応を示しており、本解析モデルの妥当性が確認できた。最大加速度の誤差は、観測記録が 370cm/s²で、解析値は 359cm/s²と 3%程度であった。異なる地震波での検討を行い、解析モデルの精度を検証していくとともに、東日本大震災での応答予測を行い、間仕切壁に作用した地震力の検証を今後の課題とする。

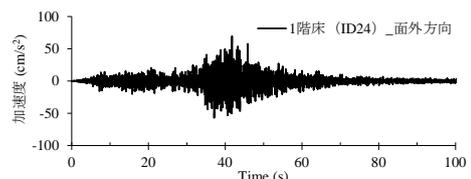


図-16 2012 年 12 月 7 日の 1 階床面外方向の観測記録

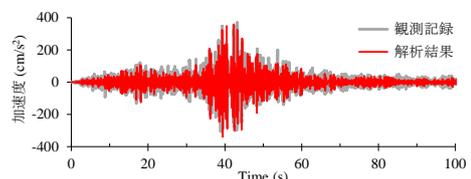


図-17 中間梁スパン中央の面外方向加速度波形の比較

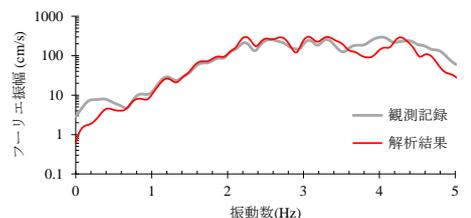


図-18 中間梁スパン中央の面外方向加速度フーリエスペクトルの比較

4. 振動台実験

3章では、東日本大震災により被災した倉庫において常時微動測定および地震観測を行い、特に構造 2 次部材である中間梁付近での壁面外方向の増幅が大きくなることを明らかにした。

4章では、更に 2 段積み ALC 間仕切壁の脱落等の被害の原因を探り対策に役立てるため、中間梁の向きと接合方法に着目した振動台実験を行い、壁面外方向の地震時挙動を把握するとともに、損傷・破壊状況の検証を行った結果について報告する⁷⁾。

4.1 試験体および測定計画

試験用フレーム及び試験体を図-19 および写真-3(a) に、ALC パネルと中間梁の取付け部を写真-3 (b) にそれぞれ示す。試験用フレームとして高さ幅が約 6m の円形フレームを製作し、2 段積み ALC 間仕切壁を模擬した。本研究では慣性力による中間梁の壁面外方向の振動・変形に着目していることから、層間変位による強制変形がほぼ生じない条件とするため円形フレームは相対的に剛となるようにした。実験施設の制約から、大きさは 3 章で示した被災倉庫の間仕切壁よりもやや小さめである。変位計測のための不動点等として利用するため、試験用フレームから独立した測定用のフレームも製作・設置した。ALC パネルは厚さ 100mm で、1 枚の幅は 600mm、長さは 2900mm であり、9 枚×2 段=18 枚で 1 つの試験体を構成する。構法は、いわゆるロッキング構法であり、パネルの取付けには ALC 協会の標準金物⁸⁾を使用している。なお、ALC パネルの取付け部や曲げ強度試験結果については紙面の都合上、本論文では割愛した。

測定は、ALC パネルや中間梁等の各部の加速度、変位、ひずみとし、サンプリングは 200Hz とした。一部の測定点のみ図-19 中に併記する。

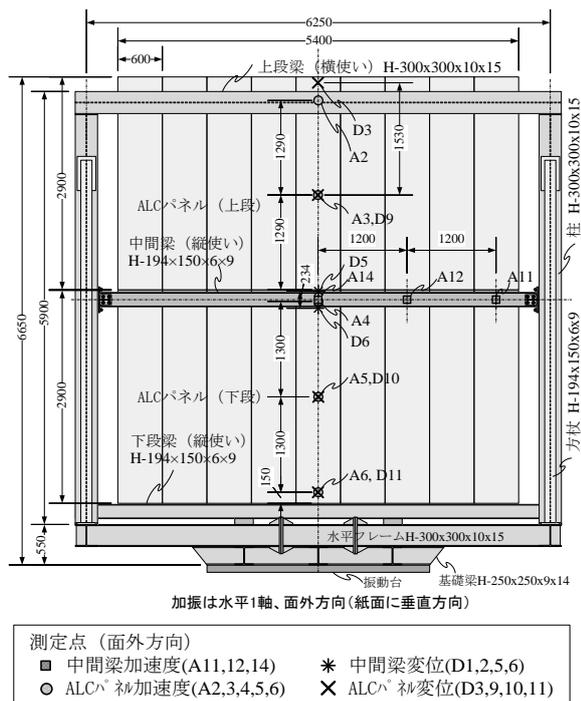


図-19 試験体図



(a) 全景 (b) 中間梁と ALC パネル取付け部
写真-3 試験体

表-3 に試験体の諸元を示す。中間梁は全試験体とも共通とし、断面は被災倉庫の中間梁と同じ H194×150×6×9、鋼材は SS400、フランジ及びウェブの降伏応力度は 316 と 336N/mm²である。中間梁の向きと端部の接合方法、ALC パネル埋設アンカーの強度をパラメータとし、計 3 体の試験体を準備した。中間梁を横使いとした No.2 ではパネル重量によるたわみ防止のため、スパン中央に吊り材を設けた。表には各試験体の固有振動数も併せて示す。減衰定数は、いずれも 1%未満であった。なお、測定機器や実験装置の破損等を防止するため、落下防止用のワイヤーを上段梁から各パネルに取り付けている。

表-3 試験体の諸元

No.	中間梁		ALC パネル		振動数 (Hz)
	向き	端部	埋設アンカー	重量 (N/枚)	
1	縦	ピン	標準	1,343	4.3
2	横	ピン	標準	1,273	5.5
3	縦	剛	高荷重	1,277	4.5

4.2 試験方法

実験は、試験用フレームを振動台上に設置した上で、中間梁及び ALC パネルを試験体ごとに施工し、壁の面外方向に水平 1 軸の加振を行った。

振動台への入力波は、入力地震動に対する 1 自由度系 (線形、減衰定数 5%) の応答絶対加速度波形 (時刻歴) である (図-20)。入力地震動は東北地方太平洋沖地震の JMA 仙台 NS 成分とし、1 自由度系の固有周期 T (0.2~0.5 秒) と地震動の入力倍率を加振パラメータとした。例として、地震動の入力倍率を 100% (原波相当)、1 自由度系の固有周期 $T=0.2, 0.25, 0.4$ 秒とした加振波の加速度応答スペクトル (減衰定数 1%) を図-21 に示す。同図には各試験体の固有周期を点線で併記した。

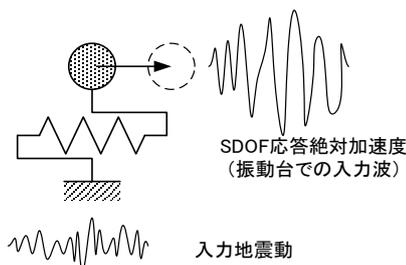


図-20 入力地震動と 1 自由度系応答の概念図

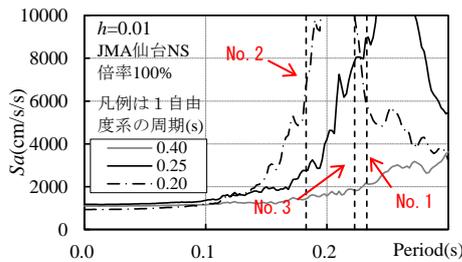


図-21 加速度応答スペクトル (減衰定数 1%)

4.3 実験結果

(1) 面外方向の振動特性

図-22 に whitenoise 加振 (最大加速度 20cm/s^2 程度) の結果から求めたモード形を示す. 幅方向の中央にある ALC パネルの各測定点 (A2, 3, 4, 5, 6) での高さ方向の 1 次モード形を求め, 最大モード振幅で基準化している. 試験体 No.1, 3 は中間梁付近 (A4) が最も増幅するモード形である. 一方, 試験体 No.2 は, 中間梁中央部よりも上段パネル中央付近 (A3) が増幅するモード形となっている. これは, 中間梁を横使いにすることで剛性が増大し, その分中間梁より上部が相対的に振られやすくなるためと考えられる.

図-23~26 に, 1 自由度系 (図-20) の周期 $T=0.4$ 秒, 倍率 40% で加振した場合の地震時面外挙動を示す. $T=0.4$ 秒は, 被災した倉庫の面外方向の躯体周期にほぼ対応する. また, 図-27 に中間梁の変位計測点 (D5, D6) を拡大して示す.

図-23 に試験体 No.1 の中間梁端部 (A11), 1/4 (A12), 中央 (A14) の応答加速度時刻歴について, 主要動部分 (58~64 秒) を拡大して示す. 中間梁の中央付近ほど応答が増大する傾向が確認できる. この傾向は試験体 No.2, 3 においても同様であった.

図-24 に各試験体の中間梁中央部の応答加速度時刻歴 (58~64 秒) を示す. 試験体 No.1 と No.3 は同程度の応答を示すのに対し, No.2 は No.1, 3 に比べ半分程度の応答であった. 中間梁を横使いにして周期が短く (振動数が高く) なっていることや, 中間梁位置よりも上段パネルの振幅が大きくなるモード形であること (図-22) が, No.2 での応答低減の主要因と考えられる.

図-25 に各試験体の下段パネル中央部の回転角 ((D10-D11)/1300) と中間梁中央部の回転角 ((D5-D6)/234, 図-27 参照) の時刻歴波形 (58~60 秒) を示す. また, 同図には上段パネル中央部の回転角を正負逆向きにして示す ((D9-D3)/1530). 試験体 No.1, 2 では, 下段パネル (点線) と中間梁 (細実線) の回転角はほぼ同じ挙動を示し, 一体となっていることが確認できる. 一方, 試験体 No.3 では, 中間梁の回転角は下段パネルの回転角よりも小さく, 半分程度である. 3 体の試験体で中間梁の回転角の大きさを比べると, No.1 が最も大きく, No.3, No.2 の順に小さくなっている. 中間梁の端部を剛接合にした No.3 は No.1 に比べて中間梁のねじれ変形による断面の回転角が小さく, 下段パネルとの回転角の差は, 定規アングルやイナズマプレート等の取付け部周辺での変

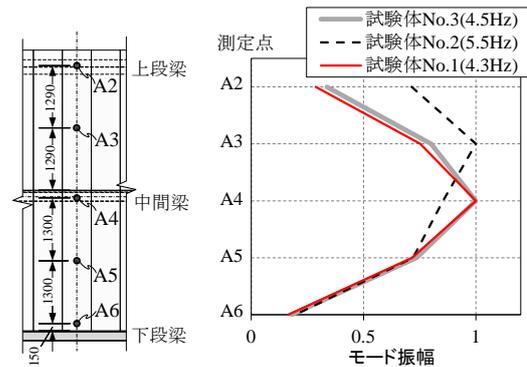


図-22 各試験体の 1 次モード形

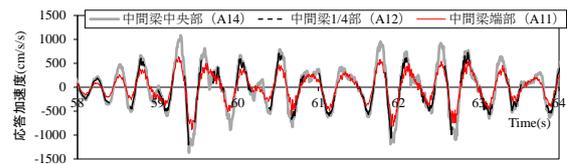


図-23 中間梁各部の応答加速度時刻歴 (No. 1)

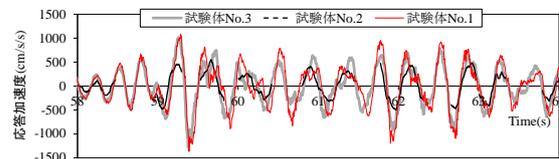


図-24 中間梁中央の応答加速度時刻歴 (No. 1~3)

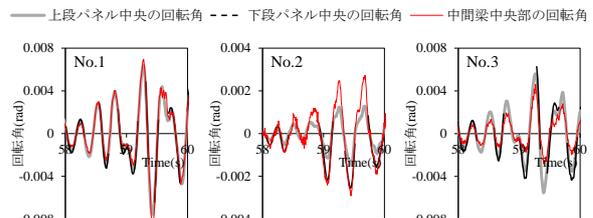


図-25 中間梁と ALC パネルの回転角の時刻歴

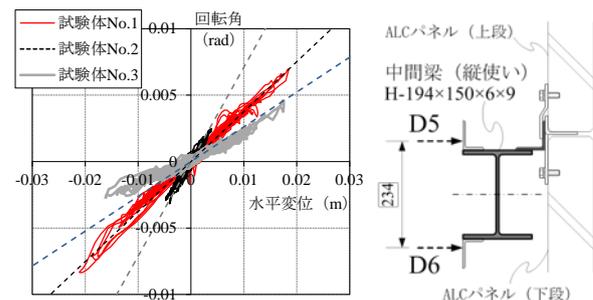


図-26 中間梁の回転角と水平変位の関係

図-27 中間梁の変位測定点 (D5, D6)

形を示唆している. また, パネルの上段と下段を比べると, No.1 では同程度の回転角となるのに対して, No.2, 3 では上段の回転角の方が小さくなっている.

図-26 に中間梁中央部の回転角 ((D5+D6)/234) と水平変位 ((D5+D6)/2) の関係を示す. 図中には, 変位の正側 (パネル側) で最大回転角となる時と原点を結ぶ点線を併記した. この点線の傾きが大きいほどねじれの影響が大きいことを表す. 試験体 No.3 は No.1 に比べ端部を剛に接合しているためねじれの影

表-4 加振の履歴と損傷・破壊状況

加振ケース			試験体の損傷・破壊状況		
番号	周期 T (s)	倍率	No.1	No.2	No.3
[1]	0.4	40%	異常なし A14=1371cm/s/s, D5=22.1mm	異常なし A14=596cm/s/s, D5=5.1mm	異常なし A14=1271cm/s/s, D5=18.0mm
[2]		45%	異常なし A14=1460cm/s/s, D5=24.5mm	異常なし A14=687cm/s/s, D5=5.9mm	異常なし A14=1248cm/s/s, D5=19.7mm
[3]		100%	ひび・欠け (取付け部破壊なし) A14=3963cm/s/s, D5=45.5mm	異常なし A14=2804cm/s/s, D5=24.4mm	ひび・欠け (取付け部破壊なし) A14=4567cm/s/s, D5=51.5mm
[4]	0.25	35%	取付け部破壊 A14=7942cm/s/s, D5=96.0mm	異常なし ([3]の前に実施) A14=998cm/s/s, D5=8.3mm	取付け部破壊 縦目地欠け A14=7917cm/s/s, D5=91.0mm
[5]		50%	脱落 A14=8441cm/s/s	異常なし A14=1718cm/s/s, D5=13.1mm	上段パネル上側 取付け部破壊 A14=11183cm/s/s
[6]		75%			上段パネル破壊 (中間梁付近) A14=10836cm/s/s
[7]		100%		パネル取付け部 破壊 A14=4598cm/s/s, D5=25.9mm	
[8]	0.2	100%		脱落 A14=7470cm/s/s, D5=39.6mm	



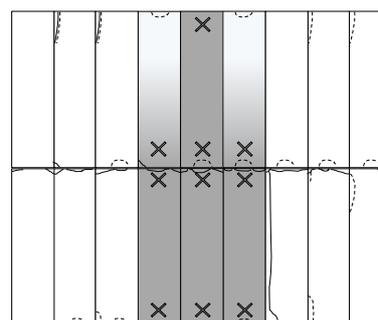
(a) 全景



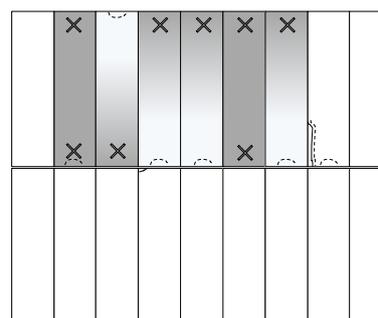
(b) 中間梁付近 ((a) の右側裏面)

写真-4 試験体 No. 1 のパネル脱落状況 (加振[5])

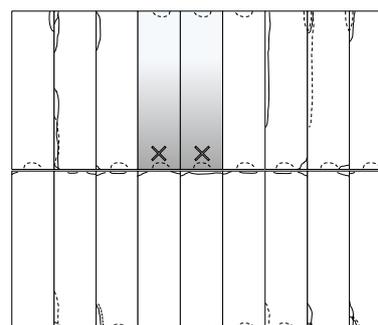
ひび等を点線（裏側、中間梁側）と
実線（表側）で表示。
×印は取付け部が外れた箇所を示す。



(a) 試験体 No. 1 (加振[5])



(b) 試験体 No. 2 (加振[8])



(c) 試験体 No. 3 (加振[6])

図-28 最終破壊状況

響が小さい。正側と負側で傾きが異なることについてはさらなる分析が必要と考えられる。試験体 No. 1, 2 では、端部の接合条件は同じだが、No.2 の方が直線の傾きが大きくねじれの影響が大きい。No.2 の最大回転角は No.3 と同程度以下であるが、横使いにした場合でもねじれの影響に注意する必要があると言える。

(2) 損傷・破壊状況

表-4 に加振の履歴と試験体の損傷・破壊状態を示す。一部を除き、表の番号順に加振を行い、斜線部の加振は行っていない。表中には損傷状況とともに中間梁中央部での水平方向の最大応答加速度 (A14) と最大応答変位 (D5) の値を示している。「脱落」とは、取付け部等の破壊により ALC パネルがフレームにもたれかかったり落下防止用ワイヤーにぶら下がったりする状態を指す。

加振[1]~[3]は被災倉庫の躯体周期にほぼ対応する周期 $T=0.40$ 秒の場合で、加振[1]は図 23~26 で示した

レベル、加振[3]の倍率 100%は東北地方太平洋沖地震での応答のレベルである。加振[2]では応答が最も大きい No.1 で最大応答加速度が 1.5G 弱、最大応答変位が 25mm 弱（下段パネルの最大応答変形角 $\theta_L \doteq 25/2900=1/116$ ）に達するが、いずれの試験体でも損傷は生じなかった。加振[3]では被災建築物に類似の仕様とした No.1 で、最大応答加速度 4G と最大応答変位 45mm ($\theta_L \doteq 1/64$) となったが、パネルのひびや欠けが生じたものの、脱落には至らなかった。この理由として、被災倉庫ではスパンや階高が試験体よりも大きいこと、中間梁と ALC パネルの距離が試験体よりも離れていたこと、層間変形によって壁の面内・面外方向に強制変形が加わったこと、試験体の方がパネル取付け部の耐力が大きかったこと等が考えられる。中間梁を横使いとした No.2 には異常は見られず、端部を剛接合とした No.3 は No.1 と同様の損傷状態であった。

加振[4]~[7]の周期 $T=0.25$ 秒での加振は、共振によって縦使いの No.1 (振動数 4.3Hz) の応答を大きくし破壊状況を確認することを意図するとともに、被災倉庫の間仕切壁の振動数も念頭に置いて実施した。加振[4]では No.1 と No.3 がパネル取付け部で ALC のコーン破壊を生じた。このときの応答は約 8G と 96~91mm ($\theta_L \approx 1/30$) であり、ロッキング構法の ALC パネルは大きな強度と面外方向の変形追従性を有することが分かる。加振[5]では No.1 でパネルが脱落した (写真-4, 図-28 (a))。No.3 では上段パネルの上側の取付け部が破壊したが脱落はしていない。No.2 はこの加振でも異常はなかった。加振[6]で No.3 は中間梁への取付け部付近で上段パネルが破壊した (図-28 (c))。しかし No.1 のようにパネルが脱落することはなく、破壊したパネルは上側取付け部にぶら下がった状態となった。No.3 では埋設アンカーが高荷重仕様であり、パネル脱落を抑える効果があると言える。コスト高となるため高層等の特別な場合にしか使用されていないようだが、安全性を考えると高荷重仕様を選択することは脱落回避の有効な手段の一つと考えられる。加振[7]で No.2 の最大応答変位は 26mm ($\theta_L \approx 1/112$) であり、No.1 の加振[2]と同程度であった。一方、最大応答加速度は 4.6G に達し、取付け部破壊が生じた。No.1 および No.3 で取付け部破壊が生じた加振[4]での最大応答加速度は 8G で、それよりも小さい。その理由として図-22 のモード形からも推定されるように、No.2 では中間梁付近よりも上段パネルの応答が大きくなることが考えられる。

加振[8]は No.2 について共振しやすい周期 $T=0.2$ 秒の加振波を入力し、破壊状況を確認した。横使いとすることで中間梁の変形はさほど小さくなく、破壊は主に上段パネルの上側取付け部で発生した (図-28 (b))。

なお、残留変形は、中間梁には生じなかったが、ALC パネルを取り付けるための山形鋼 (定規アングル, ピースアングル) の一部には生じていた。

(3) 中間梁中央での最大応答加速度と最大応答変位の関係

図-29 に中間梁中央での水平方向の最大応答加速度 ($A14$) と最大応答変位 ($D5$) の関係を損傷状況とともに示す。+ はパネルのひび・欠け、* は取付け部破壊、x は脱落を表している。図中の破線は ($A14$) = ω^2 ($D5$) の関係 (ω は各試験体の固有円振動数) を示しているが、小振幅時にはこの関係にあり、損傷が生じて大きく離れることはない。A14 の最大応答加速度で見ると、4G 前後で No.1 と 3 にひび・欠けが、No.2 には取付け部破壊が生じている。この際、図示はしていないが、No.2 では上段パネルで 8G 弱の応答となっている。A14 で 8G 前後になると No.1 と 3 に取付け部破壊、No.2 に脱落が発生した。変位で見ると No.2 が脱落に至った 40mm を超えてから No.1 と 3 のひび等が発生し始めている。振動特性も踏まえながら、慣性力 (応答加速度) か変形 (応答変位) のいずれかではなく、両者を考慮した設計が必要になると考えられる。

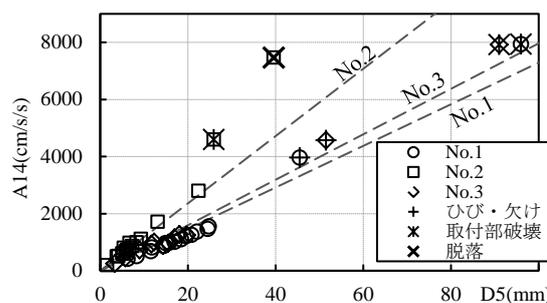


図-29 最大応答加速度-最大応答変位関係 (中間梁中央)

5. まとめ

東日本大震災により多数の被害が報告された 2 段積み ALC 間仕切壁の被害原因の解明および今後の対策に役立てるべく、実被害に遭った倉庫を対象とした常時微動測定および地震観測、更にはほぼ実大規模での振動台実験を行った。得られた知見を以下に示す。

【常時微動測定および強震観測】

- 1) 常時微動測定から、躯体の面外 (X) 方向の固有振動数は 3.0Hz、面内 (Y) 方向は 3.2Hz であり、間仕切壁の面外 (X) 方向は 4.2Hz と躯体と異なる振動数帯であった。
- 2) 3.0Hz は躯体と中間梁中央付近が、4.2Hz は中間梁中央付近が増幅するモード形であることが確認できた。
- 3) 地震観測結果から、中間梁中央付近での 2 階の床に対する壁面外方向の増幅率は、ばらつきは大きいものの平均で 3.3~3.5 倍と大きく、屋根大梁の増幅率と同等以上であった。
- 4) 一方、壁面内方向の 2 階床に対する増幅率は平均で 1.2~1.4 倍と小さかった。

【振動台実験】

- 1) 中間梁を横使い (No.2) にした場合には、縦使い (No.1) に比べ応答加速度や中間梁の変形は半減した。
- 2) ねじれ変形による中間梁の回転角は発生するが、ALC パネルの傾きと同程度以下であった。
- 3) 中間梁を横使いにした試験体 (No.2) は、縦使いの試験体で脱落や破壊が生じるような大きな加振に対しても損傷を被らずに済んだ。
- 4) 縦使いの中間梁の端部を剛接合 (No.3) にすると、ピン接合 (No.1) に比べて若干振動数が増加し、中間梁の回転角は減少するが、損傷状況はピン接合と同様であり、剛接合にする効果はさほど見られなかった。
- 5) 高荷重仕様の埋設アンカーには、地震時のパネル脱落を抑える効果がある。

実験を踏まえた今後の対策として、中間梁については、横使いとして地震時の面外変形を抑えるのが効果的であると考えられる。また、ALC パネルについては、埋設アンカーを高荷重仕様とすることで脱落を回避でき、安全性が高まると考えられる。

謝辞

本報は（独）建築研究所，ALC 協会，戸田建設の共同研究の成果の一部によるものです。ここに記して謝意を表します。

ALC 間仕切壁の被害調査結果では，建築研究開発コンソーシアム「ALC パネルを対象とした鉄骨構造における二次的な構造部材および内外装材（帳壁）の地震力に対する設計条件整理に関わる研究会」の被害調査結果の一部を使用させていただきました。また，常時微動測定は建築研究開発コンソーシアムの助成金によって行われました。ここに記して謝意を表します。

地震観測および振動台実験には 2012 年度及び 2013 年度「鋼構造研究・教育助成事業」（(一社)日本鉄鋼連盟）による助成金が活用されました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 国土交通省国土技術政策総合研究所，独立行政法人建築研究所：平成 23 年（2011 年）東北地方太平洋沖地震調査研究（速報）（東日本大震災），2011.5
- 2) 塩出有三 他：2011 年東北地方太平洋沖地震における ALC 帳壁地震被害調査報告，日本建築学会大会学術講演梗概集（東海），pp.65-68，2012.9
- 3) 寺本隆幸 他：ALC 間仕切壁の地震被害と今後の対策その 1 東日本大震災における ALC 帳壁の地震被害と課題，日本建築学会学術講演梗概集（北海道），pp.1421-1422，2013.8
- 4) 渡壁守正 他：ALC 間仕切壁の地震被害と今後の対策その 4 ロッキング構法による間仕切壁の被害分析，日本建築学会学術講演梗概集（北海道），pp.1427-1428，2013.8
- 5) 石原直 他：大規模な間仕切壁を有する物流倉庫の地震観測，鋼構造年次論文報告集，第 21 巻（2013 年 11 月），pp.725-730
- 6) 伊藤真二 他：ALC 間仕切壁の地震被害と今後の対策その 5 常時微動測定，日本建築学会学術講演梗概集（北海道），pp.1429-1430，2013.8
- 7) 石原直 他：中間梁に支持された 2 段積み ALC 間仕切壁の地震時面外挙動に関する実験 その 1~3，日本建築学会学術講演梗概集（近畿），pp.445-450，2014.9
- 8) ALC パネル構造設計指針・同解説，ALC 協会，2013.12