

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 —

PERFORMANCE OF EXTERIOR ALC WALLS IN SEISMIC RESPONSES OF A HIGH-RISE BUILDING — E-Defense shaking table tests —

長江拓也 — *1 藤谷秀雄 — *2
福山國夫 — *3 梶原浩一 — *4
城戸史郎 — *5

Takuya NAGAE — *1 Hideo FUJITANI — *2
Kunio FUKUYAMA — *3 Kouichi KAJIWARA — *4
Shirou KIDO — *5

キーワード：
ALC版, 外壁, 振動台実験, 超高層建物

Keywords:
ALC panel, Exterior wall, Shaking table test, High-rise building

A two-story, two-span by two-bay frame was set up on E-Defense shaking table, and exterior walls made of ALC panels were attached to the frame with typical connection details. In a series of tests, seismic responses of a high-rise building were reproduced in the frame. First, damage of ALC panels in expected seismic responses (the maximum inter-story drift angle is 0.02 rad) was observed. The possibility that the ALC panels come off and drop from the frame was also considered in an ultimate deformation range (the maximum inter-story drift angle is 0.04 rad).

1. はじめに

独立行政法人防災科学技術研究所と兵庫県は、大地震を受ける超高層建物の室内安全性および非構造部材の挙動に関する共同研究を2006年度より実施している。共同研究は、E-ディフェンス振動台を用いる大規模な実験に基づくもので、2007年3月に、大地震を受ける超高層建物の床応答と層間変形を実架構に与える実験¹⁾が行われた。

本論は、上記実験に組み込まれたALC版外壁の結果を報告する。ALC版外壁のロッキング構法は、地震時における建物の変形にALC版が追従することを目的に開発され^{2),3),4)}、標準仕様⁵⁾が確立している。その耐震性は、静的な一方向加力実験をもとに評価されてきたが^{2),3),6)}、性能評価に基づく今後の設計を考えれば、補修性および安全性を直接表現できる実験資料が必要である。

実験では、超高層建物が被る地震応答条件のもとで、ALC版外壁の耐震性を検証することとし、住宅系の超高層建物において、ベランダ床スラブ間、梁下と床スラブ間にALC版が取り付けられる状況を再現して、そこに水平2方向の揺れを同時に与えた。本論では、設計者が要求するであろうALC版外壁の性能を念頭に、内容を以下の2つに分類し、それぞれの観点から、得られた資料を報告する。

(1) 想定応答変形実験

想定される応答変形を被った後に、建物が補修されることを想定し、ALC版の損傷度と補修性を考察する(補修性に関しては、補修費用と初期投資費用の比⁷⁾に言及する)。本実験では、事前に30階建ての一般的超高層建物に対する地震応答解析を実施し、応答変形レベルを検討した。入力地震動として、神戸市に予測される長周期

地震動(以降、東遊園地波)⁸⁾、兵庫県南部地震で記録されたJR鷹取波を選定した。その結果、最大層間変形角は0.017radおよび0.02radとなり⁹⁾、これらを架構に与えることとした。

(2) 超大変形実験

想定を超える大変形によって、建物の構造体を始め多くの部分が補修不可能な損傷を被りつつも倒壊を免れているとき、建物の外周に取り付くALC版は脱落しないことが必要条件となる。ここでは、ALC版の脱落の危険性に焦点を当てる。実験では、ある層に変形が集中してしまう状況をつくり、想定応答変形の2倍に及ぶ超大変形、最大層間変形角にして0.04radを架構に与えることとした。

2. 実験概要

2.1 実験方法

構造体の立面と平面を図1に示す。平面8.6m×10.6m、階高3.4mで2層の鋼構造架構を試験部分とした。超高層建物の揺れを模擬するために振動台に固定した4基の積層ゴム支承(図1, RB)の上にコンクリート錘スラブと架構を設置した。総重量は612tで積層ゴム支承を外径1000mm、ゴム総厚285mm(せん断剛性公称値0.3N/mm²の天然ゴム)とすることで、全体の1次固有周期を約2.8秒とした。

架構に水平慣性力が加わるように屋上床の重量を約160tとし、架構は外壁に変形を与えるための試験装置という観点から設計した。想定応答変形実験では、架構が弾性にとどまりながら、層間変形角が1層目、2層目ともに0.017-0.02radになるように、架構の部材を選定した。表1に使用した鋼材を示す。超大変形実験では、中央部分でボルト接合していた間柱C3の接合を解除して、1層目柱C1, C2を2点

¹⁾ 防災科学技術研究所兵庫耐震工学研究センター 主任研究員・博士(工学)
(〒673-0515 兵庫県三木市志染町三津田西亀屋 1501-21)

²⁾ 神戸大学大学院工学研究科建築学専攻 教授・工博

³⁾ 防災科学技術研究所兵庫耐震工学研究センター 客員研究員

⁴⁾ 防災科学技術研究所兵庫耐震工学研究センター 主任研究員・博士(工学)

⁵⁾ 兵庫県企画管理部災害対策局参事 建築技術担当

¹⁾ Senior Researcher, Hyogo EERC, NEID, Dr. Eng.

²⁾ Prof., Kobe Univ., Dr. Eng.

³⁾ Visiting Researcher, Hyogo EERC, NIED

⁴⁾ Senior Researcher, Hyogo EERC, NEID, Dr. Eng.

⁵⁾ Officer, Hyogo Prefectural Government

ヒンジメカニズムにして1層目の層間変形を増加させた。0.04 radを超える過大な変形を抑止するために、所定の層間変形が生じると接触する中央分離型の間柱Sを、ストッパーとして配置した。

表1 架構の鋼材

記号	鋼材種別	記号	鋼材種別
C1	□-175×175×12	S	H-400×200×8×13
C2	□-175×175×9	G1	H-294×200×8×12
C3	H-294×200×8×12	G2	H-244×175×7×11

2.2 試験体の製作状況

図2に試験体の製作状況を示す。コンクリート垂スラブ上に鋼構造架構を製作し、床スラブを打設した。架構にALC版外壁を取り付けた後、施設内に移動し、積層ゴム支承を介して振動台上に設置した。

2.3 ALC版外壁

ALC版外壁は、標準的な仕様やおさまり等⁵⁾を参照して設計した。住宅系の超高層建物において、ベランダ床スラブ間、梁下と床スラブ間にALC版が取り付けられる場合を想定して、床スラブ(厚さ150

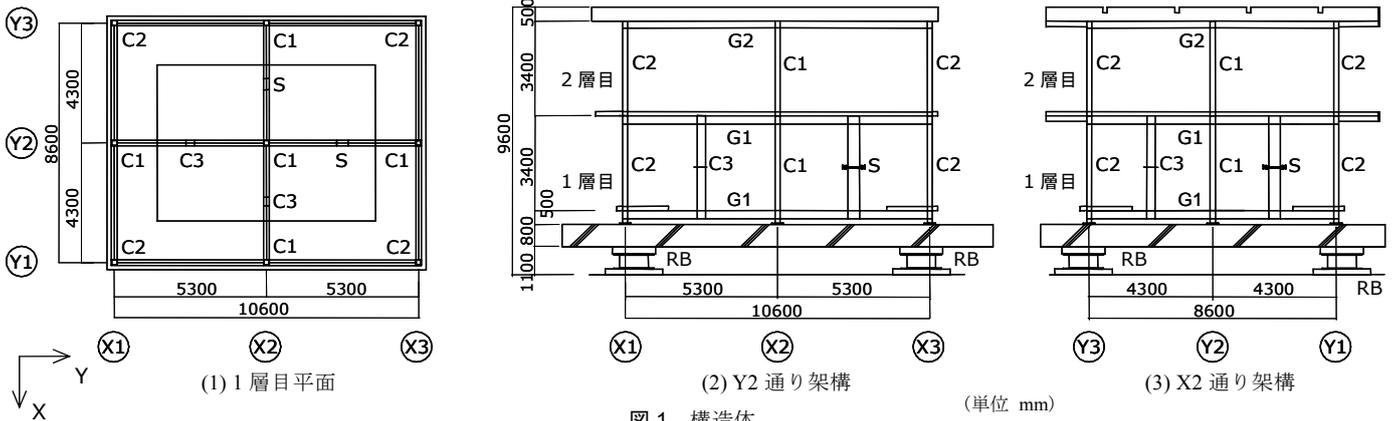


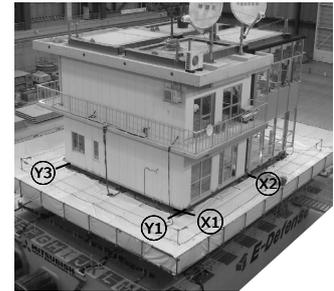
図1 構造体



(1) コンクリート垂スラブ上に架構を製作



(2) 架構にALC版外壁を取り付け



(3) 試験体を振動台上に設置

図2 試験体の製作状況

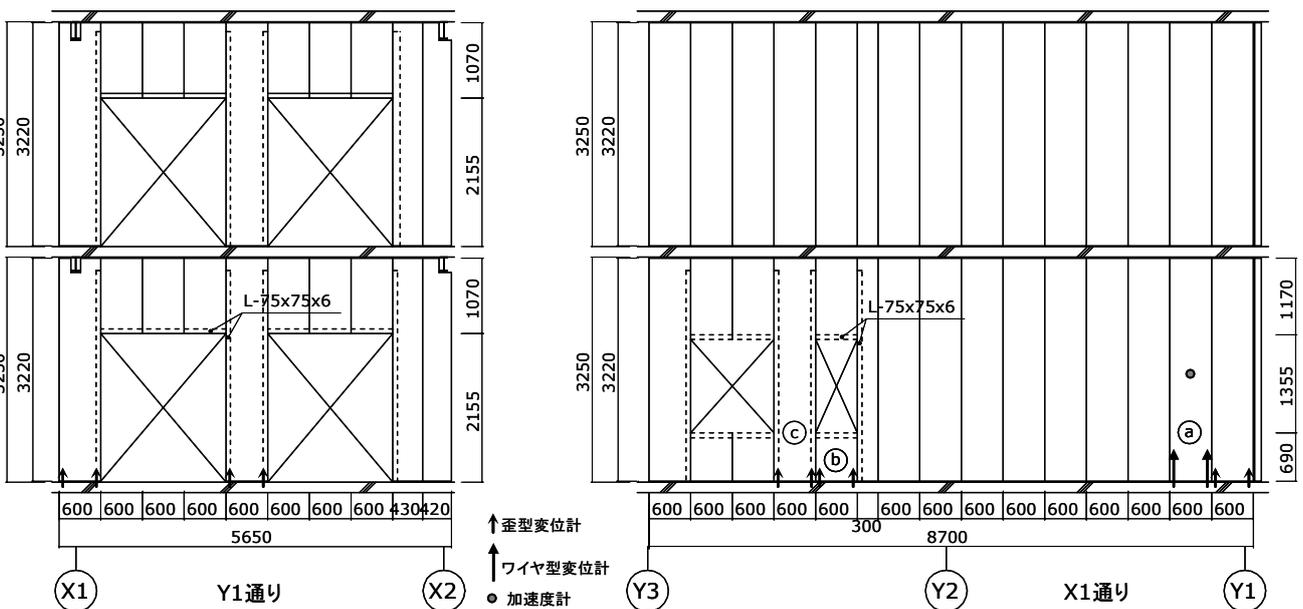


図3 ALC版立面割り付け図 (I)

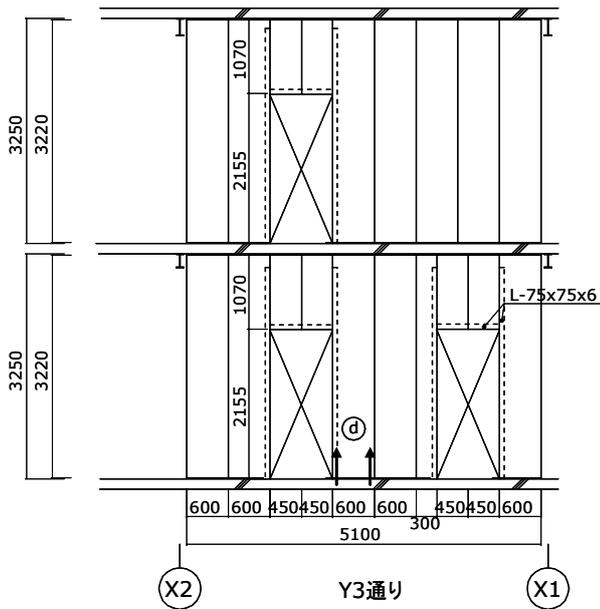


図4 ALC版立面割り付け図 (2)

表2 ALC版外壁の内訳

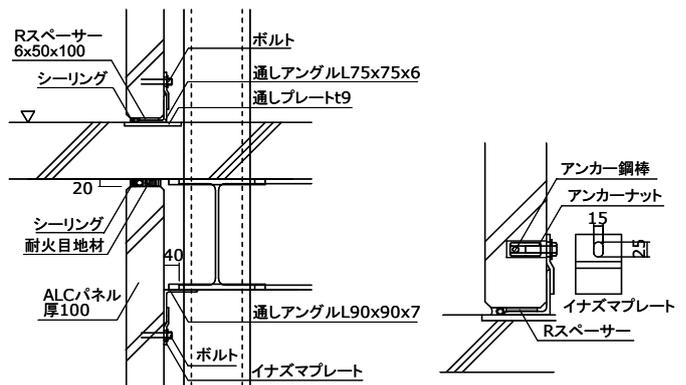
取り付け	種類	Rスペーサー	枚数 (1層/2層, 合計)
床スラブ間	通しALC版	6 mm	27/31, 58
	開口部上ALC版		13/8, 21
	開口部下ALC版		3/0, 3

mm) 間にALC版を設置した。

ALC版は幅600 mm、高さ3220 mmを基本とし、全て厚さ100 mmとした。ALC版立面割り付けを図3と図4に示す。X1通り、Y1通り、Y3通りにALC版外壁を設置した。Y1通りのX1-X2間では、1層目と2層目に掃きだし窓を組み込んだ。X1通りのY1-Y3間では、外開き窓を1層目に組み込んだ。X1-X2間では、1層目、2層目ともに、ドアを組み込んだ。表2にALC版外壁の内訳を示す。

図5(1)に取り付け部 (1層目、2層目とも同様) を示す。下部において、床スラブに、通しプレート(9x150)を埋め込み、通しアンクル(L75x75x6)を固定した。通しアンクルの上にRスペーサー (ALC版の幅方向中央位置) を介してALC版を設置し、ALC版とアンクルにクリアランスを設けた。図5(2)に金具による取り付け状況を示す。幅方向に配したアンカー鋼棒と中央位置で接続するインサートをALC版に埋め込み、これとイナズマプレートとをボルトで固定した。この状態で、イナズマプレートと通しアンクルを溶接した。上部は架構のH形鋼に通しアンクル(L90x90x7)を固定し、同様の手順でイナズマプレートを溶接した。開口部上下のALC版の開口側は、開口補強用のアンクルに上記と同様の方法で取り付けした。図6に内部から見た取り付け状況を示す。

ALC版下部では、Rスペーサーの厚さと等しいクリアランスにより、初期は角部を支点とせずに回転が生じる。角部がアンクルに接触する計算上の回転角は、Rスペーサーが6 mmのとき0.02 radで、本実験では、想定応答変形実験における最大層間変形角を踏まえて、この



(1) 1層目上部と2層目下部 (2) 取り付け金具

図5 ALC版取り付け詳細



図6 内部から見た取り付け状況

条件を採用した。

2.4 計測

各床の加速度を計測した。架構の1層目と2層目の層間変形として、1層目床と2層目床、2層目床と屋上床の相対水平変位を計測し、階高3.4 mで除して層間変形角とした。ALC版の面内方向の回転は幅方向2ヶ所の鉛直変位を測定し、差を水平距離で除して求めた。ALC版中央の面外加速度を計測した。測定箇所を図3と図4に示す。

3. 実験結果

3.1 架構の応答状況

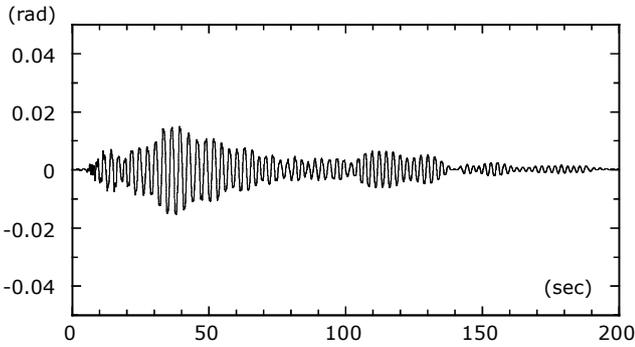
実験は、水平2方向の同時加振である。架構の応答値を表3に示す。想定応答変形実験を1. 東遊園地波応答再現、2. 鷹取波応答再現の順序で実施し、その後に3. 超大変形実験を実施した。東遊園地波応答再現と超大変形実験の場合では、1次の固有周期2.5-2.8秒の揺れが卓越した。鷹取波応答再現の場合では、2次の固有周期0.7秒の揺れにおいて最大変形が生じた。

想定応答変形実験では1層目と2層目の最大層間変形角がほぼ等しく、最大値は東遊園地波応答再現で0.015 rad、鷹取波応答再現で0.02 radとなった。超大変形実験では、1層目が0.043 rad、2層目が0.02 radとなった。1層目のX方向における層間変形角の時刻歴波

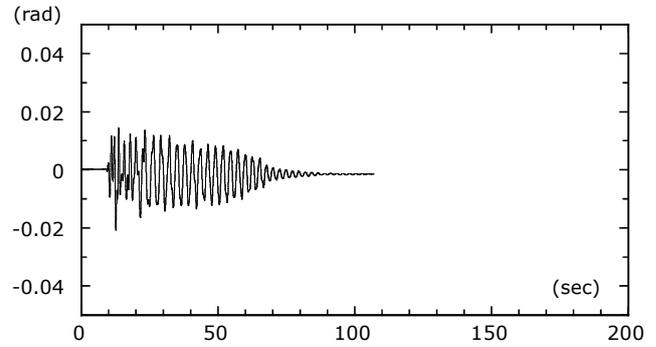
表 3 架構の応答値

実験		1層目最大変形角 (rad)		2層目最大変形角 (rad)		最大加速度 (m/s ²)		最大速度 (m/s)		最大変位 (m)	
		X方向	Y方向	X方向	Y方向	X方向	Y方向	X方向	Y方向	X方向	Y方向
想定応答変形	東遊園地波	0.015	0.013	0.013	0.012	4.3	3.5	1.6	1.3	0.79	0.61
	鷹取波	0.020	0.018	0.018	0.020	3.0	3.6	1.0	1.2	0.52	0.52
超大変形	-	0.043	0.037	0.020	0.016	4.9	4.4	1.7	1.3	0.84	0.64

*最大加速度, 速度, 変位は2層目床の値

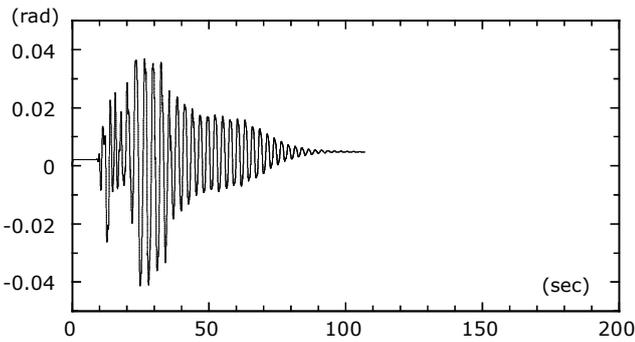


(1) 東遊園地波応答再現：1層目 X 方向の層間変形角

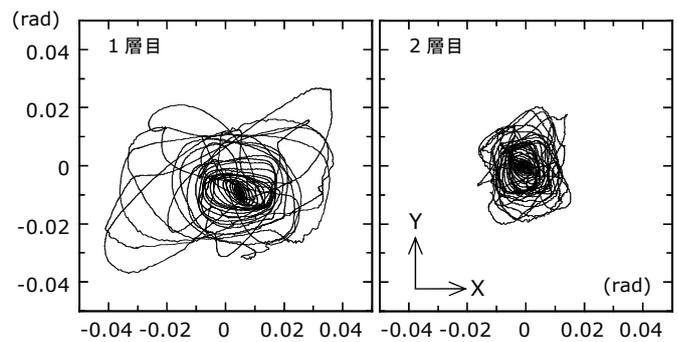


(2) 鷹取波応答再現：1層目 X 方向の層間変形角

図 7 想定応答変形実験



(1) 1層目 X 方向の層間変形角



(2) 層間変形角の XY 方向オービット

図 8 超大変形実験

形を図 7 と図 8 に示す。加振時間は、東遊園地波応答再現で約 200 秒、鷹取波応答再現で約 100 秒である。超大変形実験は鷹取波応答再現の入力を基本としており、加振時間は約 100 秒である。図 8(2) に示す層間変形角の XY 方向オービットにおいて、最大に近い層間変形を 2 方向同時に被ったことがわかる。

3.2 ALC版外壁

3.2.1 想定応答変形実験

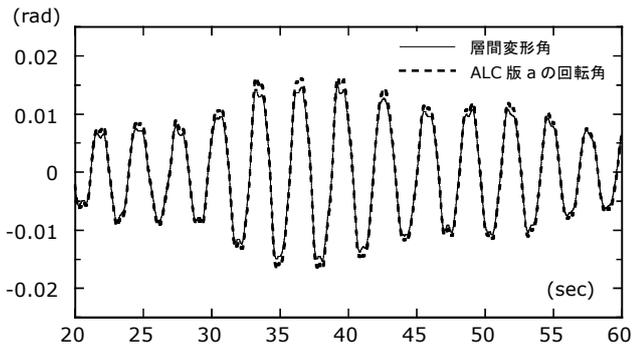
ALC 版の面内回転角（以降、回転角）の時刻歴応答波形を図 9 に示す。なお、ここでは、最大層間変形が生じた時刻を含む 40 秒間を取り出している。ALC 版は、a-d（図 3 と図 4 を参照のこと）において代表する。ALC 版 a は標準の通し ALC 版、ALC 版 b は窓開口部下の ALC 版、ALC 版 c は窓開口部横の ALC 版、ALC 版 d はドア開口部横の ALC 版である。

ALC 版 a を見ると、東遊園地波応答再現、鷹取波応答再現のいずれも、面外に対する変形を受ける条件下において、対応する X 方向の層間変形角と回転角がほぼ一致している。ドア開口部横の ALC

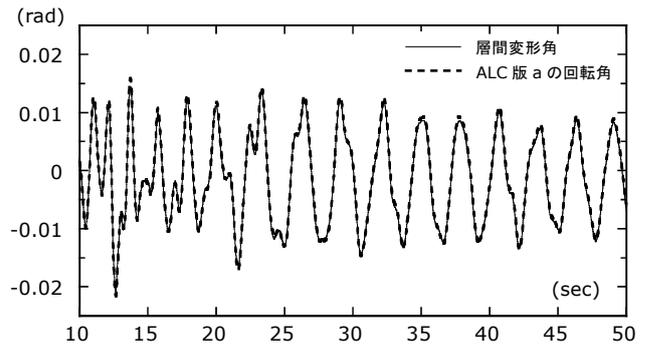
版 d の回転角も層間変形角とほぼ一致したことを確認している。一方、窓開口部下の ALC 版 b と隣り合う通し ALC 版 c の回転角を比較すると、開口部下の ALC 版は、開口補強アングルとの相関により通し ALC 版の 0.45-0.7 倍程度の振幅となった。

鷹取波応答再現後における損傷状況を図 10 に示す。図 10(1) に示すような下端角部の軽微なひび割れが、通し ALC 版全 58 枚のうち 3 枚に観察された。それらとは別に、開口部下の ALC 版 3 枚のうち 1 枚に開口補強の拘束によるひび割れが生じた（図 10(2)）。開口部上の ALC 版 21 枚に損傷は無かった。

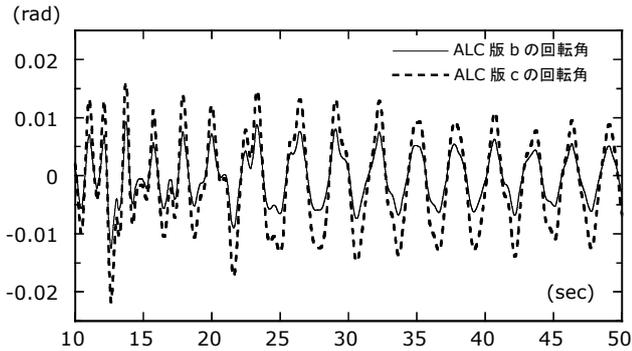
観察されたひび割れは、長さ 0.3 m 程度、幅 0.3 mm 程度で、U カットシール充填工法¹⁰⁾において補修が可能である。施工関係者に対するヒアリングよれば、1ヶ所に必要な補修時間は 20~30 分である。これらの損傷に対する補修費用（平均ひび割れ長さ 0.3 m、4ヶ所；U カットシール充填工法 4020 円/m¹¹⁾は、ALC 版施工費-材料込み（ALC 版 161 m²；乾式ロッキング工法、取り付け、シーリング副資材共 6730 円/m²）¹¹⁾の 0.5%と試算された。



(1) 東遊園地波応答再現：通し ALC 版 a

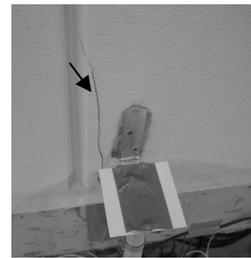


(2) 鷹取波応答再現：通し ALC 版 a



(3) 鷹取波応答再現：通し ALC 版 c と開口部下 ALC 版 b

図 9 想定応答変形実験における ALC 版の回転角 (X 方向)



(1) ALC 版 c



(2) ALC 版 b

(通し ALC 版 58 枚中 3 枚) (開口部下 ALC 版 3 枚中 1 枚)

図 10 想定応答変形実験後の損傷

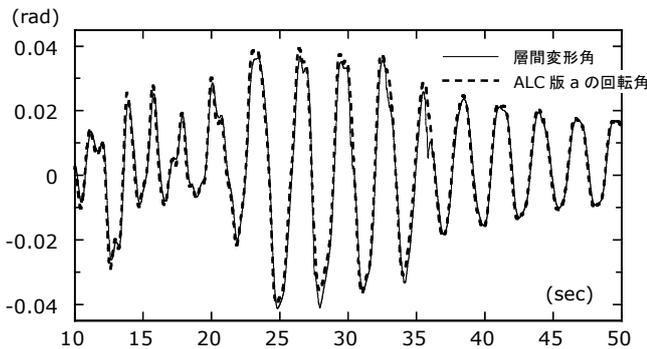


図 11 超大変形実験における通し ALC 版の回転角 (X 方向)

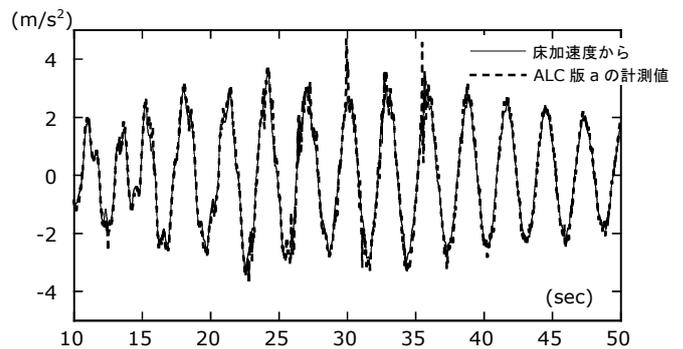


図 12 超大変形実験における通し ALC 版の面外加速度



図 13 超大変形実験後の損傷

3.2.2 超大変形実験

超大変形実験で特に着目したのは、ALC 版の脱落の可能性である。通し ALC 版 a の回転角を図 11 に示す。通し ALC 版の回転角と層間変形角は、想定応答変形実験と同様に、ほぼ一致している。ここで ALC 版の面外方向の性状を確認する。同じ ALC 版 a の中央高さに

において測定した面外方向の加速度を図 12 に示す。ALC 版が面外方向の層間変形に、剛体回転により追従するという条件に基づき、図中では、1 層目と 2 層目の床加速度を平均して求めた波形と比較する。ALC 版における測定値は床加速度による波形とほぼ一致しており、面外にガタつくような乱れは認められない。面外方向に、問題なく追従したことが裏付けられる。

実験後における取り付け金具付近の状況を図 13 に示す。超大変形を被った 1 層目の ALC 版下端角部に亀裂と剥離が生じた。ALC 版の回転角が 0.04 rad に達すれば、ALC 版には面内方向に角部を中心とする回転が生じ、ALC 版中心位置は上昇しようとする。このとき、ボルトが下向きにせん断力を与える可能性がある (ダボ作用)。これが原因で生じたと判断されるボルト付近のひび割れ (図中の矢印) が、1 層目通し ALC 版 33 枚のうち 2 枚に確認された。ただし、ボルトに緩みはなく、ひび割れの幅は 0.4 mm 程度で、アンカー鋼棒に接

続するボルトは十分固定されていた。取り付け金具に損傷は生じておらず、脱落に結びつくような損傷は確認されなかった。

4. まとめ

本研究では、E-ディフェンスを用いた振動台実験によって、超高層建物の地震応答に相当する揺れを大規模な架構に与え、ALC版外壁の耐震性を考察した。実験は「想定応答変形と位置づけた最大層間変形角 0.02 rad」と「超大変形と位置づけた最大層間変形角 0.04rad」を与える2段階で実施した。住宅系の超高層建物においてベランダ床スラブ間にALC版が取り付けられる場合を再現し、計算上、床スラブに対するALC版の回転角が0.02 radになったとき下端角部のクリアランスが無くなる条件とした。実験では、架構の水平2方向の変形に対して優れた追従性を示した。具体的な損傷状況は、以下に示すとおりである。

(1) 想定応答実験—最大層間変形角 0.02 rad

軽微なひび割れがALC版82枚のうち4枚に生じた。ひび割れは、通しALC版の場合、下端角部に生じた。窓開口部下のALC版の場合、開口補強と接する上端角部に生じた。開口部上のALC版、掃きだし窓、ドア周りの通しALC版に特別な損傷は生じなかった。観察されたひび割れに対してUカットシール充填工法を採用する場合の補修費は、初期費用の0.5%と試算された。

(2) 超大変形実験—最大層間変形角 0.04 rad

超大変形を被った通しALC版33枚のうち2枚に、取り付け部付近のひび割れが生じた。それらは、ALC版角部とアングルが強く接触したALC版下部の取り付け部において生じたが、いずれも幅が0.4 mm程度の軽微なもので、アンカー鋼棒に接続するボルトは十分固定されていた。取り付け金具に損傷は無く、本変形レベルにおいて、ALC版に脱落の危険性は認められなかった。

謝辞

本実験におきまして、ALC協会に多大なご協力をいただきました。「E-ディフェンスを活用した減災対策推進委員会（委員長：岡田恒男 東京大学名誉教授）」の委員各位から貴重なご助言をいただきました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 長江拓也, 梶原浩一, 藤谷秀雄, 福山國夫, 川辺秀憲, 大西一嘉, 城戸史郎, 中島正愛: 家具および非構造部材に着目する高層建物の地震応答再現実験, 日本建築学会構造系論文集, NO.629, pp.1185-1193, 2008.6
- 2) 横木光一郎, 崎山格, 斎藤隆幸, 永井昌志, 深沢優, 伊藤弘, 西田和生, 坂本功: ALCパネル外壁の耐震性に関する実験的研究 その1—その3, 日本建築学会大会学術講演梗概集, A, pp.201-206, 1987
- 3) 伊藤弘, 西田和生, 濱崎仁, 水谷吉克, 相子恒夫, 廣波純二, 高橋光雄, 富田和男: ALCロックンク構造実大変形追従性試験 その1—その4, 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-1, pp.429-430, 1998
- 4) 加戸貞之, 岸谷孝一, 岡田章, 廣波純二, 永井昌志, 深沢優, 富田和男: 1995年兵庫県南部地震ALC被害調査報告 その1—その3, 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-1, pp.727-731, 1995
- 5) ALCパネル構造設計指針・同解説, ALC協会, 2004
- 6) 松宮智央, 吹田啓一郎, 中島正愛, 劉大偉, 井上真木, 竹原創平: ALC版外壁が構造性能に及ぼす影響—実大3層鋼構造骨組を用いた耐震性能実証実験—, 日本建築学会構造系論, NO.629, pp.135-1193, 2004.7
- 7) 加登美喜子, 松宮智央, 吹田啓一郎, 松岡祐一, 中島正愛: 軽量鉄骨下地間仕切り壁の耐震性能と修復性の検証, 日本建築学会構造系論文集, NO.614, pp.111-118, 2007.4
- 8) 藤谷秀雄, 川辺秀憲, 長江拓也, 福山國夫, 梶原浩一, 中島正愛, 城戸史郎: 想定南海地震時の神戸市東遊園地における強震動予測と既往観測記録との比較 高層建物の非構造部材・家具什器に関するE-ディフェンス振動実験 その2, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2, pp.553-554, 2007
- 9) 長江拓也, 福山國夫, 藤谷秀雄, 梶原浩一, 中島正愛: 30階建物の床応答と応答変形に関する時刻歴地震応答解析 高層建物の非構造部材・家具什器に関するE-ディフェンス振動実験 その3, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2, pp.555-556, 2007
- 10) 日本建築仕上学会, ALCパネル補修工法指針(案)・同解説, 2000
- 11) 建設物価調査会, 建築コスト情報, 2009.1

[2009年2月18日原稿受理 2009年4月6日採用決定]