

超高層建物の地震応答を受ける カーテンウォールの耐震性能 — E-ディフェンス振動台実験 —

PERFORMANCE OF AN EXTERIOR METAL CURTAIN WALL 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 城戸史郎 — * 4

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

キーワード：
メタルカーテンウォール, 耐震性能, 超高層建物, 振動台実験

Keywords:
Metal curtain wall, Seismic performance, High-rise building, Shaking
table test

A two-story, two-span by two-bay frame was set up on E-Defense shaking table, and curtain walls made of metal sashes and glasses were attached with typical connection details. In a series of tests, seismic responses of a high-rise building were reproduced in the frame. First, damage of the curtain walls in expected seismic responses (the maximum inter-story drift angle is 0.02 rad) was observed. The possibility that the curtain walls 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

兵庫県と防災科学技術研究所は、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¹⁾。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²⁾が行われた。

本論では、上記実験に組み込まれたカーテンウォールの結果を報告する。実験では、超高層建物に多く採用されている方立方式のメタルカーテンウォール^{3),4)}を対象とした。カーテンウォールにおいては、層間変形角(0.01 radまでの数段階)に対する要求性能を満たす設計が主流で⁵⁾、大規模な工事の場合には、2-3層分の実大実験も行われる⁶⁾。一方、兵庫県南部地震で記録された地震動、さらには現在予測される長周期地震動⁷⁾等を鑑みれば、大地震を受ける超高層建物の応答が設計用の層間変形角を上回る可能性は十分にある。本実験では、従来の設計で扱われてきた層間変形角を超える変形レベルにおけるデータを取得しており、内容を以下の2つに分類し、カーテンウォールの応答性状と損傷状況について報告する。

(1) 想定応答変形実験

想定される最大レベルの応答変形を被った後に、建物が補修されることを想定してカーテンウォールの損傷を観察する。本実験では、事前に30階建ての一般の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0.02 rad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カーテンウォールは脱落しないことが必要条件となる。ここでは、カーテンウォール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する状況をつくり、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0.04 radを架構に与えることとした。

2. 試験体

2.1 概要

構造体の立面と平面を図1に示す。平面8.6 m×10.6 m、階高3.4 m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612 tで積層ゴム支承を外径1000 mm、ゴム総厚285 mm(せん断剛性公称値0.3 N/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160 tとし、架構は、層がせん断変形することで前述の最大層間変形角を外壁に与える「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0.017-0.02 rad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層目の柱C1, C2を2点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

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⁾ 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, NIED, Dr. Eng.

²⁾ Prof., Kobe Univ., Dr. Eng.

³⁾ Visiting Researcher, Hyogo EERC, NIED

⁴⁾ Officer, Hyogo Prefectural Government

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。

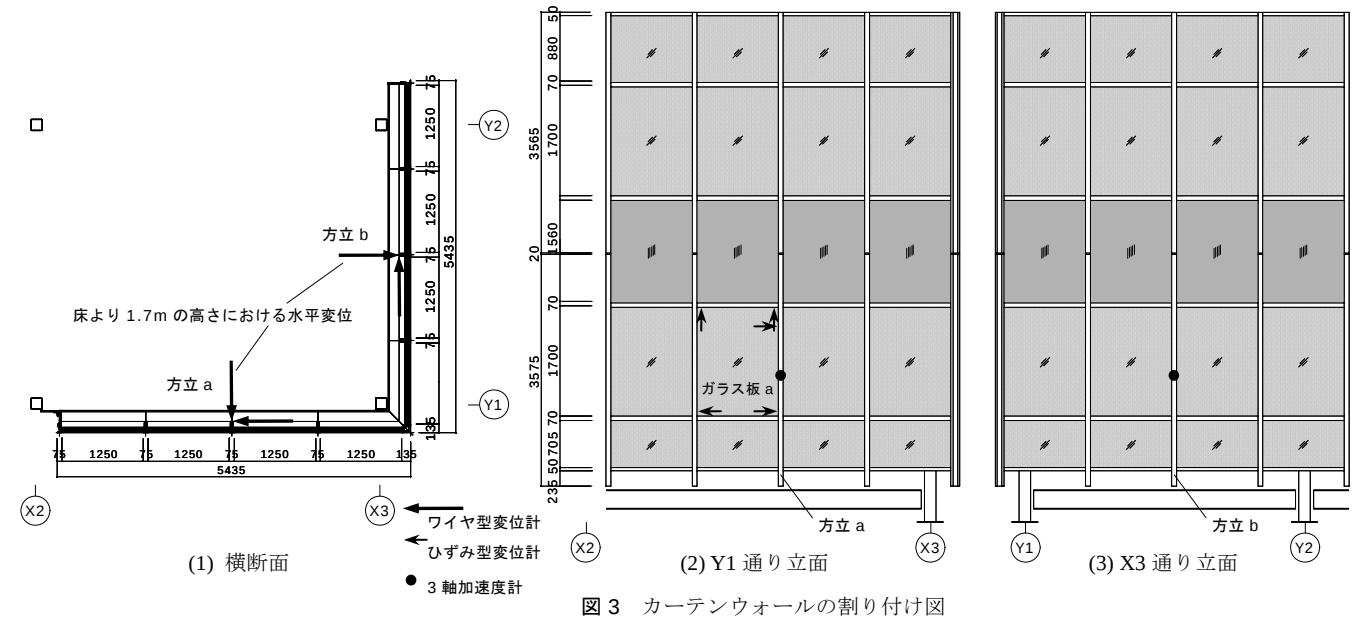
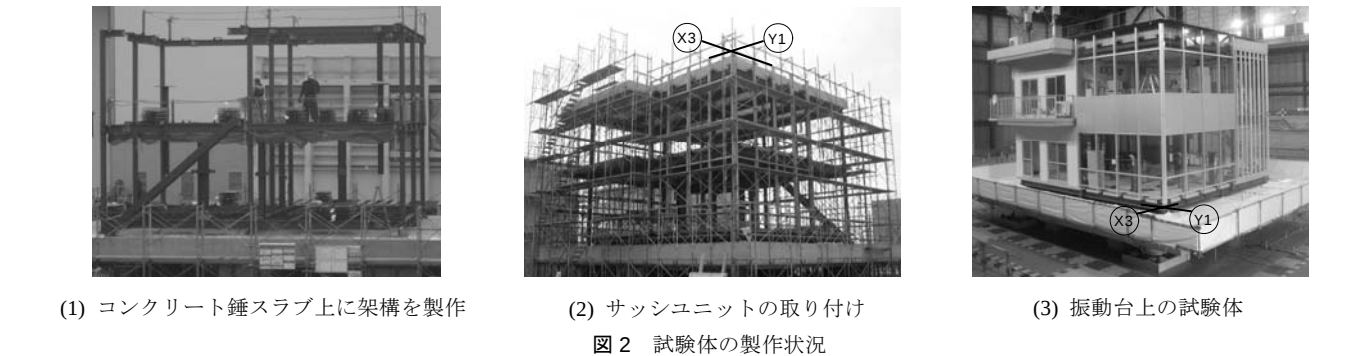
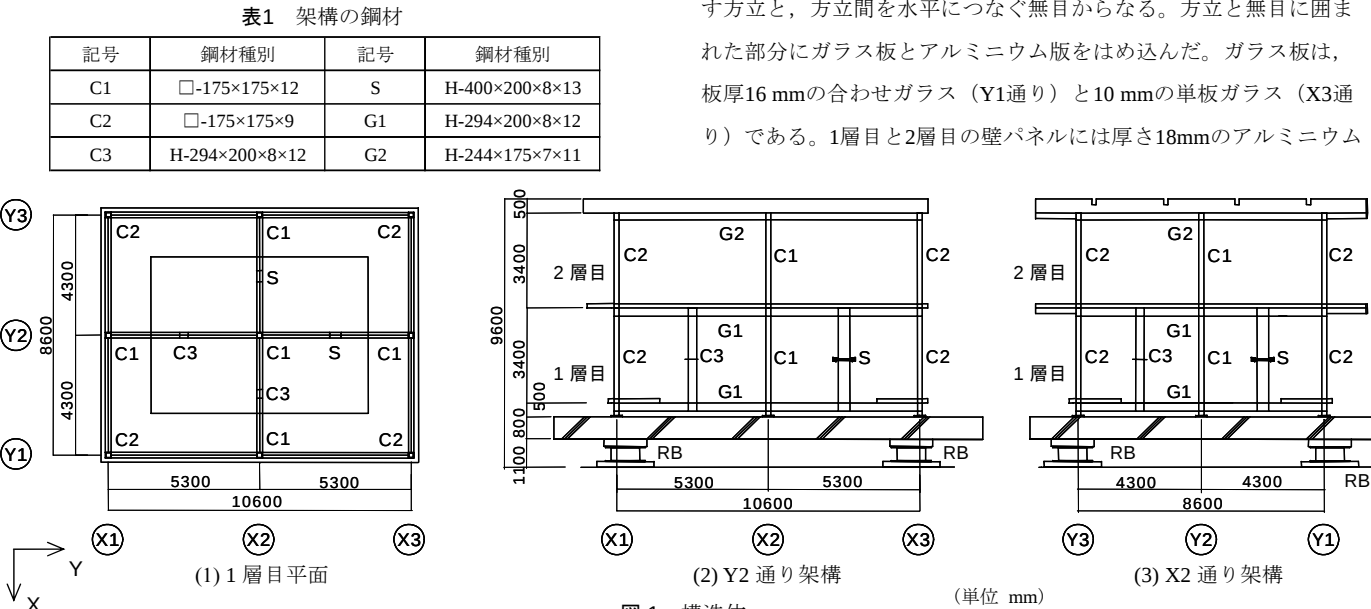
2.2 製作状況

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

ルカーテンウォールを取り付けた。その試験体を施設屋内に移動し、積層ゴム支承を介して振動台上に設置した。

2.3 メタルカーテンウォール

標準的な方立方式のメタルカーテンウォールを採用した。割り付け状況を図3に示す。アルミニウム製のサッシは、上下の梁に掛け渡す方立と、方立間を水平につなぐ無目からなる。方立と無目に囲まれた部分にガラス板とアルミニウム版をはめ込んだ。ガラス板は、板厚16 mmの合わせガラス（Y1通り）と10 mmの単板ガラス（X3通り）である。1層目と2層目の壁パネルには厚さ18mmのアルミニウム



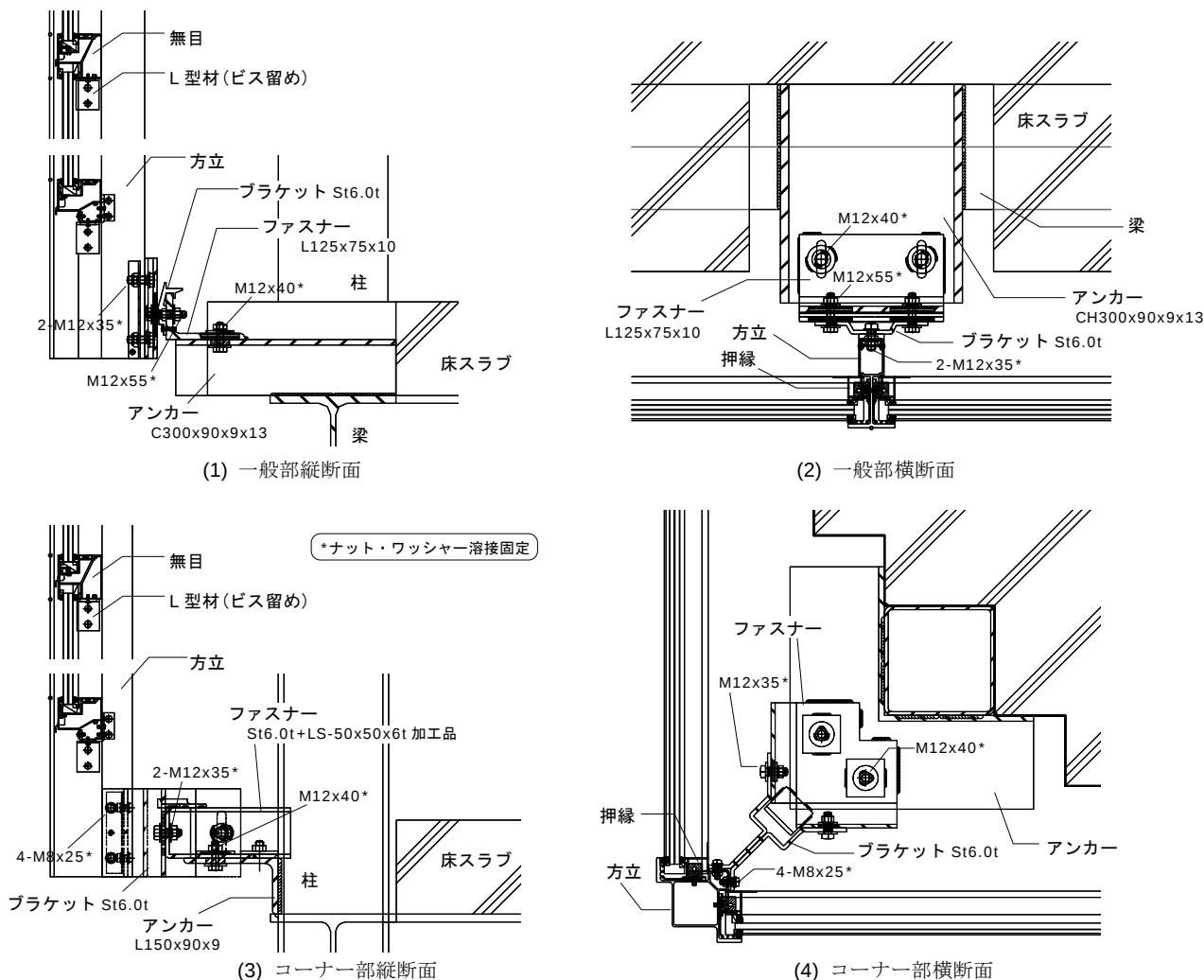


図4 カーテンウォールの取り付け詳細

版曲げ材（肉厚2.0 mm）を用いた。以降、平面の一般部に対して、X3-Y1の凸をコーナー部と呼ぶ。

図4にカーテンウォールの取り付け詳細を示す。カーテンウォールと架構の固定方法は、まずアンカーとなる金物を架構の梁に直接溶接し、これに連結用のファスナーとなる金物、部材取付用のブラケットとなる金物を緊結し、方立を取り付けた。方立の変形追従性については、一般部、コーナー部ともに方立自身の柔性に期待する設計とした。方立と無目の接合部はL型材を介してのビス留めとした。ガラス板を設置して、押縁によって挟み込んだのちに、周りに弾性シーリング材（2成分形シリコン）を充填した。シーリングの最小目地幅は、水平目地で6 mm、鉛直目地で8 mmである。

ここで、層間変形を受けるサッシとガラス板の相対変形について、概念を図5に示す。ガラス板がサッシに接触して図5-③の状態に達すると、ガラス板に大きな力がかかり始める。ただし、通常の設計では、それよりもかなり前の段階でシーリング目地のせん断変形による許容値があり、限界層間変形角（1/200, 1/150, 1/100等）⁵⁾ に対して検討が行われる。目地幅に対するせん断変形の比（変形率）を計算し、その値を60 %未満とするのが一般的で、本試験体の縦に長い

ガラス板（方立間隔1325 mm、無目間隔1700 mm）は、ガラス板のスライドによる回転角とローリングによる方立変形角を1:1と仮定すると、層間変形角0.008 rad (1/125)で、水平目地変形率が57%、鉛直目地変形率33%となる。図5-③の層間変形角は、本試験体における上下左右の平均クリアランス（図5のd, c）、12mmと21mmから0.04 radとなる。

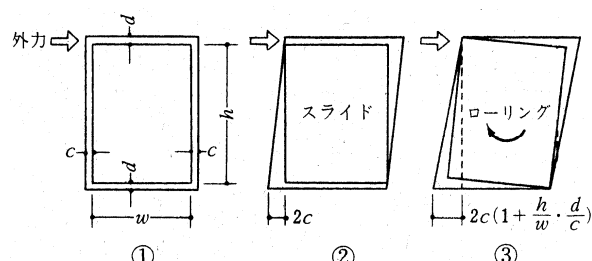


図5 層間変形角を受けるサッシとガラス板の相対変形
（「非構造部材の耐震設計施工指針・同解説」⁶⁾から転載）

2.4 計測

各層床の加速度を計測した。架構の層間変形として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。カーテンウォールの計測箇所を図3に示す。1層

目床から方立中央の水平変位を計測した。図3のガラス板aについて、方立および無目との相対変位を計測した。図6に示すように、鉛直の変位計でガラス板と無目の相対鉛直変位を、水平の変位計でガラス板と方立の相対水平変位を計測した。ガラス板と無目の相対回転角 R_a およびガラス板と方立の相対回転角 R_b を、鉛直、水平それぞれ対となる計測値を設置間距離で除して求めた。また、方立a、方立bの中央高さにおいて、水平方向の加速度を計測した。

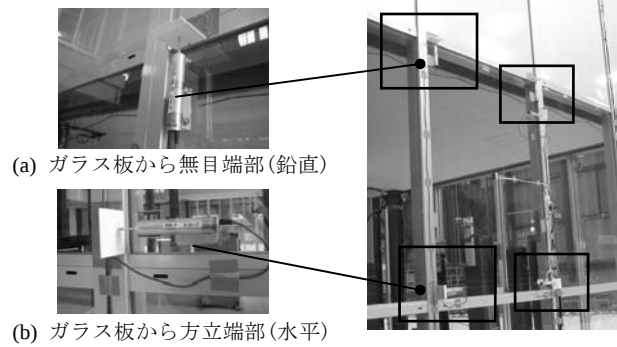


図 6 ガラス板 a の計測状況

表 2 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

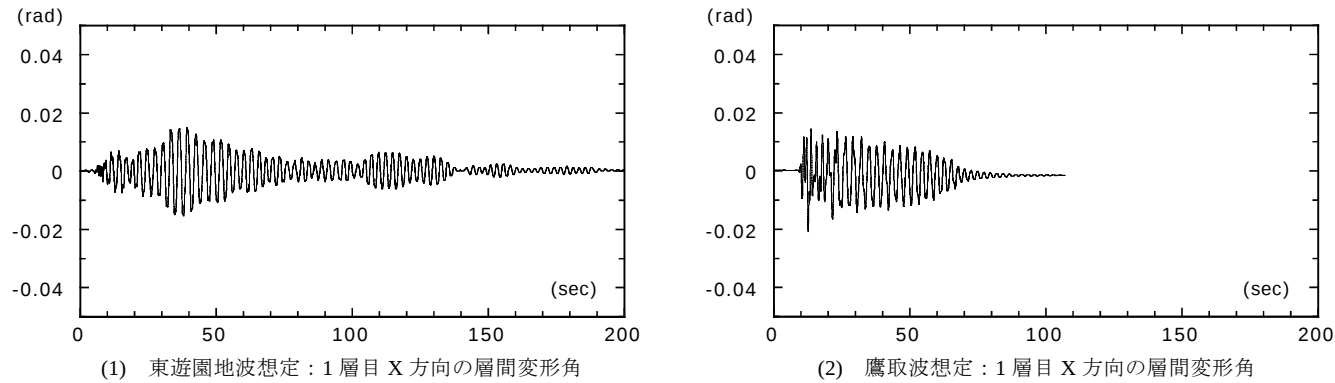


図 7 想定応答変形実験

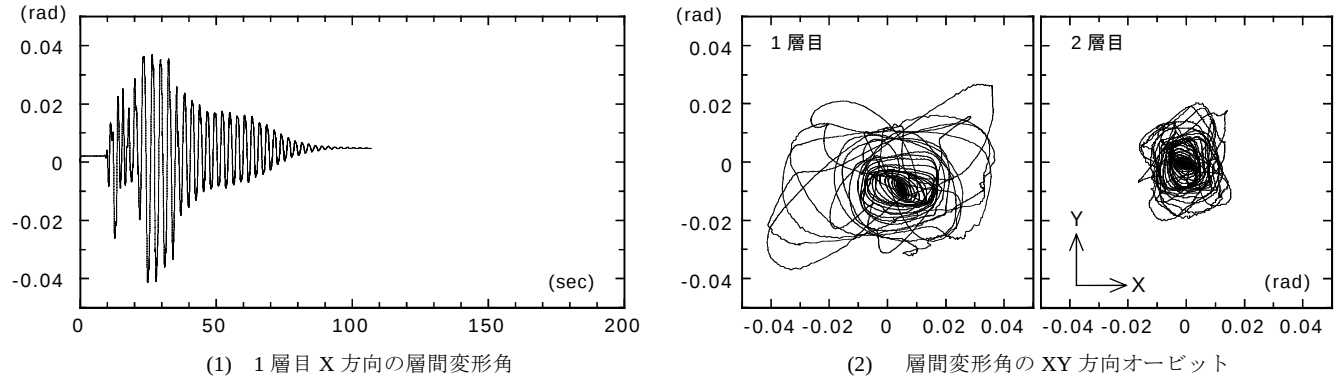


図 8 超大変形実験

従するが、それらの時刻歴波形を図9に示す。方立の部材角は、対応する層間変形にほぼ一致している。観察において、サッシやその取り付け部に損傷は無かった。

図6における(a)の計測値をガラス板と方立の鉛直せん断変形 S_v 、(b)の計測値をガラス板と無目の水平せん断変形 S_h とみなして、その関係を図10(1)に示す。水平目地の最大値は約9mm、鉛直目地の最大値は約5mmである。最大せん断変形率に置換すると、許容値とされる60%を超え、水平目地では150%に達した。ただし、観察において、ガラス板とサッシ間のシーリング目地に目視で確認できる損傷は無かった。

ガラス板と無目の相対回転角 R_v とガラス板と方立の相対回転角 R_h はほぼ比例の関係にある(図10(2))。理想的にはガラス板のスライドによる方立変形角とローリングによる方立変形角を足し合わせると層間変形角になる(図5-③)。 R_h をガラス板のスライドによる方立変形角、 R_v をガラス板のローリングによる方立変形角とみなして、この手順から計算した変形角を図11に示す。計算による変形角は、層間変形角とよく対応している。

3.3 超大変形実験(最大層間変形角 0.04 rad)

最大層間変形角 0.04 rad を被った1層目の実験後の状況を図12に示す。図12(1)は、ガラス板とサッシ間のシーリング目地の状況である。幅が6mmと8mmの水平目地に亀裂が生じた。鉛直目地には亀裂が生じなかった。図12(2)は、方立と無目の接合部の状況で

ある。L型材を留めていたビスが完全に抜け出て、無目に2mm程度の浮き上がり変形が残留した。一般部、コーナー部とも方立の固定部に損傷は確認されなかった。

S_h と S_v の関係、 R_h と R_v の関係を図13に示す。想定応答変形実験と比較すると、最大値がほぼ2倍になっている。 S_h と S_v をせん断変形率にすると亀裂が生じた水平目地は300%に達していた。鉛直目地は150%を下回っていた。

方立の中央の水平変位から求めた部材角は、想定応答変形実験と同様に層間変形角とほぼ一致した。図14に R_h と R_v を足した変形角と層間変形角をあわせて示す。よく対応しているが、層間変形角が0.02 radを超えるあたりから、計算した変形角が下回る傾向にある。観察においてガラス板が強く拘束された痕跡はなかった。方立と無目の接合部の状況から、ガラス板のローリングに伴い接合部が変形したことがうかがえる。ガラス板の上のクリアランス $c=12$ mm(図5を参照)と R_v の最大値5mmを比較すれば、ガラス板が無目に接触する前に、目地を通して無目を押上げ始めたと考えられる。

最後に、大変形時の方立の応答加速度について述べる。骨組はX方向とY方向ともに約0.4gの床加速度を受けた。方立中央において計測された加速度の時刻歴波形を図15に示す。方立の中央部における加速度は、面外方向、面内方向ともに床加速度を線形補間したものと一致し、方立の加速度が増幅されるような現象は見られなかった。

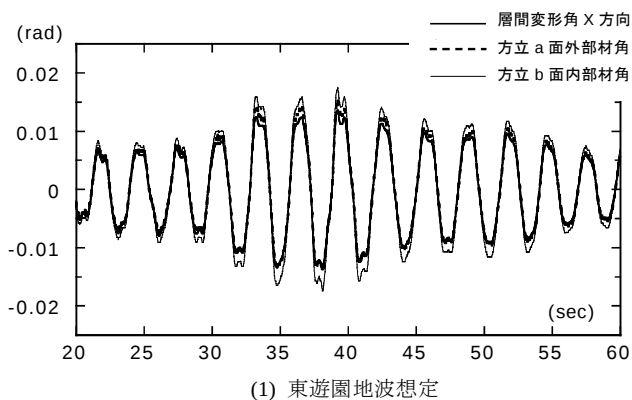


図9 想定応答変形実験：方立中央における部材角

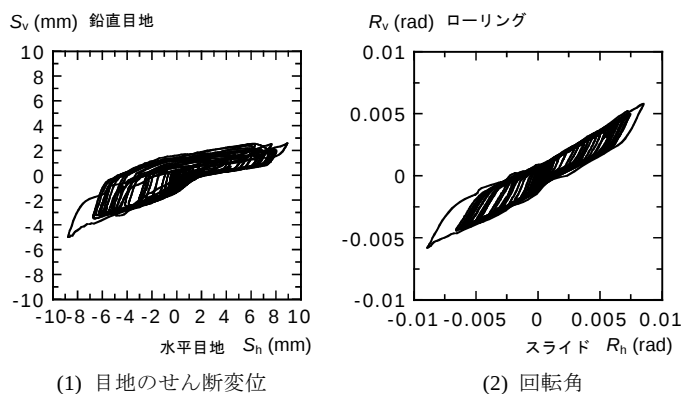


図10 ガラス板と方立・無目の相対変位(鷹取波想定)

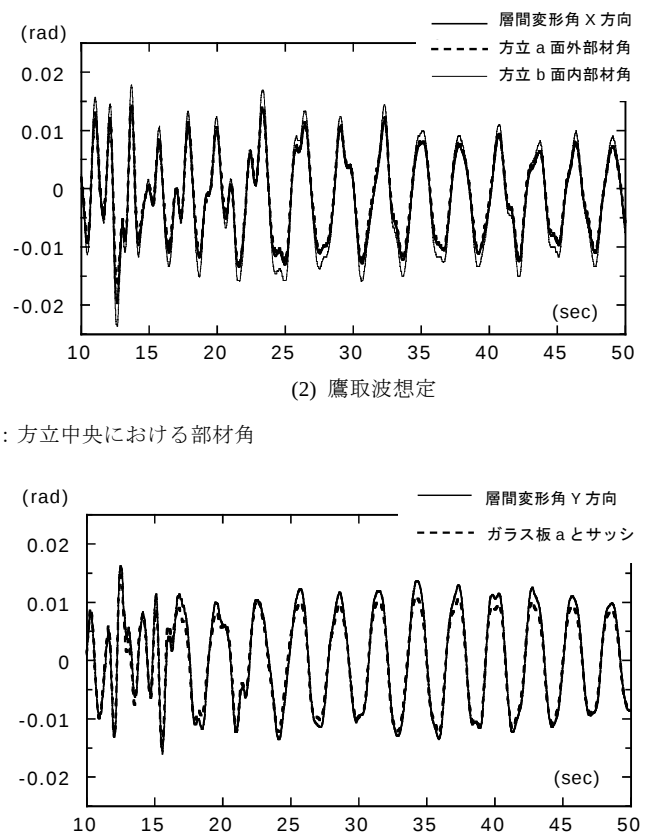


図11 ガラス板とサッシの相対変形角(鷹取波想定)

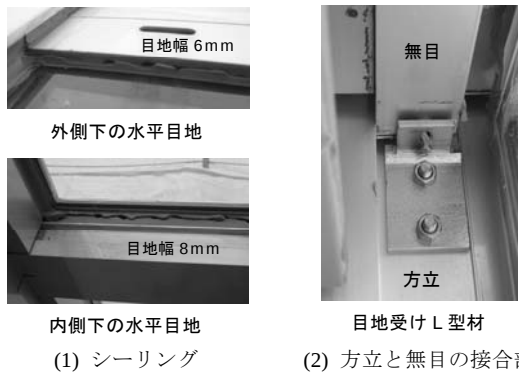


図 12 超大変形実験（最大層間変形角 0.04 rad）後の状況

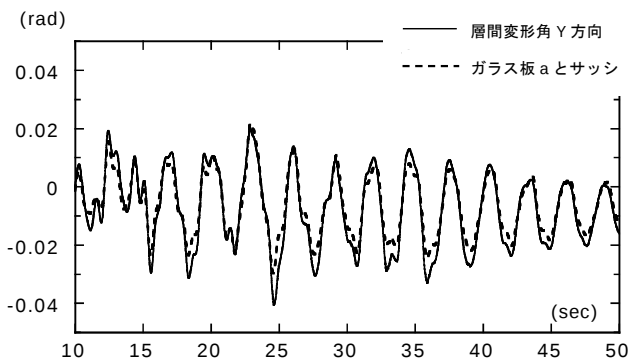


図 14 ガラス板とサッシの相対変形角（超大変形実験）

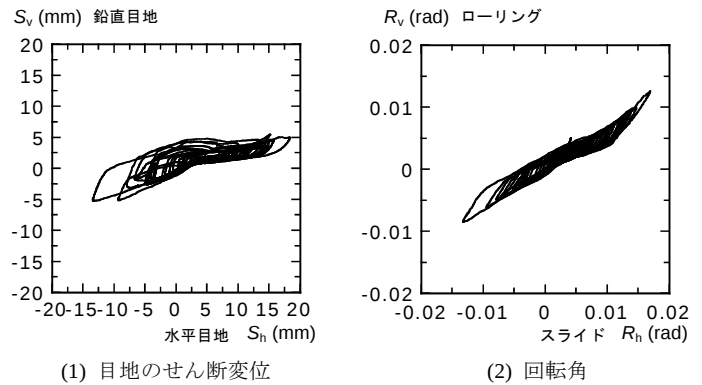


図 13 ガラス板と方立・無目の相対変位（超大変形実験）

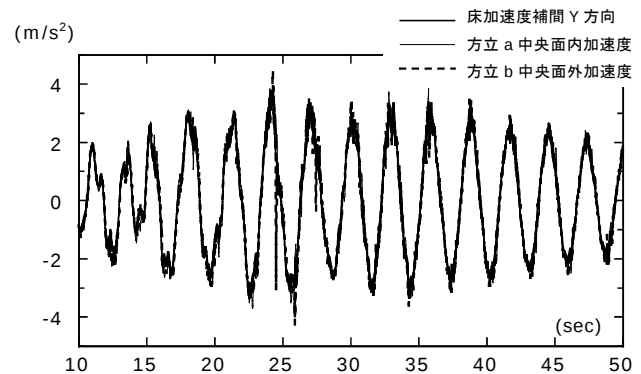


図 15 方立の応答加速度（超大変形実験）

4. まとめ

本実験では、大規模な架構に超高層建物を模擬した地震応答を与え、取り付くメタルカーテンウォールの耐震性を検証した。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。

いずれの場合も、方立の部材角は架構の層間変形角とほぼ一致した。ガラス板と方立、ガラス板と無目の相対変位によって算出された相対変形角は、層間変形角とよく対応した。想定応答変形実験では、シーリング目地のせん断変形率が 150 % に達したが、補修を必要とする損傷は生じなかった。超大変形実験では、方立と無目の接合部に変形が生じ、ガラス板が強く拘束されることはなかった。水平目地はせん断変形率が 300 % に達し亀裂が生じたが、鉛直目地はせん断変形率が 150 % を下回り亀裂は生じなかった。方立の加速度が増幅されることはなかった。本実験においてカーテンウォールの脱落の危険性は認められなかった。

ただし、開口の大きさなどにより無目の寸法などは変化し、接合部の強度も異なる。常に本実験のように方立と無目の接合部が変形し、ガラス板の破損を防ぐとは限らない。個々の条件に対する検討と実験による確認が重要である。

謝辞

本実験では、社団法人カーテンウォール・防火開口部協会、および板硝子協会に多大なご協力をいただきました。不二サッシ株式会

社技術本部に技術的な支援をいただきました。「E-ディフェンスを活用した減災対策推進委員会（岡田恒男委員長）」の委員各位から貴重なご助言をいただきました。ここに記して深い感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 城戸史郎, 藤谷秀雄, 大西一嘉, 長江拓也, 梶原浩一, 福山國夫, 中島正愛: 兵庫県と防災科学技術研究所の共同研究概要・研究目的・実験概要 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 1, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2, pp.551-552, 2007
- 2) 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.628, pp.1007-1014, 2008.6
- 3) カーテンウォール性能基準, 社団法人カーテンウォール・防火開口部協会, 2003
- 4) 建築工事監理指針 平成 16 年版 (下巻) 国土交通省大臣官房官庁営繕部監修, 社団法人公共建築協会
- 5) 清家剛: カーテンウォールの性能設計の変遷, 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-1, pp.1079-1082, 2005
- 6) 非構造部材の耐震設計施工指針・同解説および耐震設計施工要領, 日本建築学会, 2003.
- 7) (社)土木学会, (社)日本建築学会: 海溝型巨大地震による長周期地震動と土木・建築構造物の耐震性向上に関する共同提言, 2006. 11
- 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) 実験映像の入手先 → <http://www.bosai.go.jp/hyogo/movie.html>

[2009 年 10 月 11 日原稿受理 2010 年 1 月 8 日採用決定]