

低層鉄骨造建物における ガラススクリーン構法の地震時挙動に関する一考察

小林 礼奈*・渡壁 守正**・脇山 善夫***・稲井 慎介****・石田 琢志****

(平成30年11月1日受付)

Numerical Study on Dynamic Behavior of Glass Screen System of Law-rise Steel Frame Building Based on Seismic Observation Records

Reina KOBAYASHI, Morimasa WATAKABE, Yoshio WAKIYAMA,
Shinsuke INAI and Takushi ISHIDA

(Received Nov. 1, 2018)

Abstract

Serious damage to nonstructural elements such as glass and ceiling materials was reported after the 2011 earthquake off the Pacific coast of Tohoku. The purpose of this report is to describe the development of the technical references for structural performance verification by targeting nonstructural components of buildings which are damaged by earthquakes, the field that have not been explored so much in past studies. Strong-motion earthquake measurement was conducted using a low-rise steel-frame building to examine the vibration characteristics of a building that could generate force on the glass screens. Buildings with structural glass walls responded differently from conventional buildings. Because there is insufficient experimental data to draw firm conclusions, this study carried out a simulation analysis in an attempt to measure the effect of structural glass walls on damage to nonstructural elements.

Key Words: glass screens system, dynamic behavior, earthquake observation, simulation analysis

1. はじめに

2008年の岩手県沿岸北部地震、2011年の東北地方太平洋沖地震では、大判の面ガラスと方立ガラスから成るガラススクリーン構法において多数の被害が報告されている^{1), 2)}。2017年6月25日に発生した長野県南部を震源とする地震での自動車ショールーム被害がマスコミ報道されている。報告事例の中には、ガラスの飛散状況から、面ガラスの面外方向(以下、単に面外方向)への振動・変形に起因すると推測される被害も確認されている。こうしたガラススク

リーン構法の地震被害の軽減化を目的に、2014年に面外方向を対象とした振動台実験を実施した他、2013年から2015年の2年間、某建物において地震観測を実施している³⁾。また、自動車ショールームにおけるガラススクリーンを構築するガラス板の地震時挙動を把握する目的で、地震観測記録の分析とともに地震記録によるシミュレーション解析を実施し、その解析モデルの検証も行っている⁴⁾。

本報では、実建物で観測された地震記録に基づき当該構法の地震時挙動に関してさらに分析を加え、シミュレーション解析を実施し、建物振動特性を考慮した大判ガラス

* 広島工業大学大学院工学系研究科環境専攻

** 広島工業大学環境学部建築デザイン学科

*** 国土交通省国土技術政策総合研究所

**** 戸田建設株式会社, 技術開発センター

の損傷メカニズムについて検討した結果を紹介する。

2. ガラススクリーンの概要

2.1 ガラススクリーン構法の概要

ガラススクリーン構法は、商業施設などの低層部の開口部として用いられる構法で、床から天井までを大きなガラス面で構成する構法である。通常の金属製方立の代わりにガラスを方立として用い、面ガラスと方立ガラス管はシリコン系シーリング材によって接合される工法である⁵⁾。

2.2 ガラスの許容値の算出

ガラスの許容値は風圧で決まっており、許容風圧力は以下の式に基づき算出する⁵⁾。

$$P=300 \times k_1 \times k_2 / A \times (t+t^2/4) = 0.113 \text{ kN/cm}^2 \quad (1)$$

ここで、 k_1 はガラスの種類による係数(0.9)、 k_2 はガラスの構成による係数(1)、 A はガラスの見付け面積(17.12 m^2)、 t はガラスの板厚(15 mm)、 P は許容風圧力を示す。

この許容風圧力を用いて、対象建物の許容曲げ応力度と許容変位を求めると以下となる。

$$\sigma_c = \beta_1 \times P \times a^2 / t^2 = 2.746 \text{ kN/cm}^2 \quad (2)$$

$$\delta_c = \alpha_1 \times P \times a^4 / E_g t^3 = 4.99 \text{ cm} \quad (3)$$

ここで、 α_1 、 β_1 はガラスの辺長比により決まる係数(それぞれ0.100、0.535)、 a はガラスの短辺長さ(320 cm)、 E_g はヤング係数(7.16×10^4 MPa)、 σ_c はガラスの許容曲げ応力、 δ_c はガラスの許容変位を示す。

3. 地震観測概要及び分析結果

3.1 対象建物概要

対象建物の概要を表1に、1階平面図と地震計の設置位置を図1にそれぞれ示す。

3.2 観測地震概要

地震観測は、茨城県内にある某建物で2014年2月から2016年2月の約2年間実施した。2年間で45の地震が観測され、その中から1階床に設置された地震計記録での計測震度が2.1以上の地震を解析対象とした。表2に選定した観測地震の諸元を示す。地震計は、1階床に1点(ID12)、天井裏に2点(ID10、ID11)の計3点を設置し(図1)、それぞれガラス面に対し面内(X)・面外(Y)・上下(Z)の3方向を同時観測した。面ガラスの地震時挙動は地震

表1 対象建物の概要

規模階	地上2階(ショールーム部分は1階)
建物高さ	7.6 m
主体構造	鉄構造
XY方向	ラーメン構造
地業	既成杭

計により直接観測することが出来なかったため、後述する観測記録に基づいたシミュレーション解析により、考察を加えることとした。地震計は、富士電機製「感振器CPUKSNS00」を使用した。地震記録の収集設定は、マスターをID11(中央部)とし、トリガー値は水平X・Y方向 5 cm/s^2 と鉛直Z方向 30 cm/s^2 のand、サンプリング周波数は200 Hzとした。

3.3 観測地震の加速度分布

表2に示す地震において、面内、面外、上下の3方向について、床から天井への応答倍率を求めた。応答倍率は、天井裏に設置したID10(端部)、ID11(中央部)の最大加速度値をID12(1階床面)の最大加速度で除した値とし図2にそれぞれ示す。

図2の結果から、面内方向(X方向)はほとんどの地震においてID10/ID12(端部)とID11/ID12(中央部)の応答倍率値に差はないが、面外方向(Y方向)と上下方向(Z方向)では端部と中央部で応答倍率値に差が出ている事が確認できる。面外方向の揺れは、中央部より端部の応答倍率値が大きいことからねじれの影響が考えられる。また、上下方向も面外方向と同様に応答倍率値が端部ほど大きく増幅されていることから、面ガラスの応答に少なからず影響していると考えられる。

3.4 振動特性の分析

表2に示した各地震がガラススクリーンに作用する加速

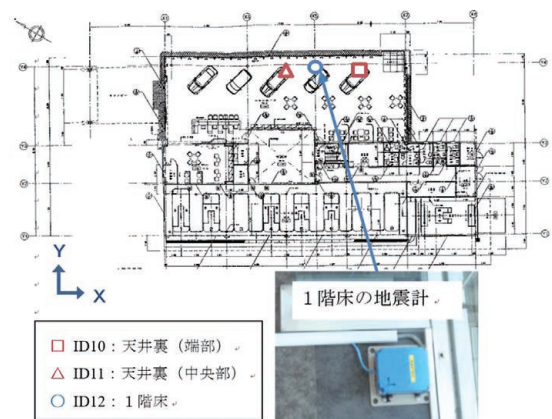


図1 対象建物1階平面図および地震計位置

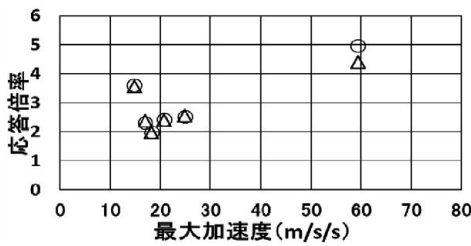
表2 観測地震の諸元

日時	深さ(km)	震央距離(km)	計測震度
2014/5/5 5:18	156	112	2.8
2015/1/30 20:31	40	7	2.1
5/25 12:28	56	56	3.7
5/30 20:23	682	701	2.9
9/12 5:49	57	53	2.9
10/21 15:04	37	161	2.3

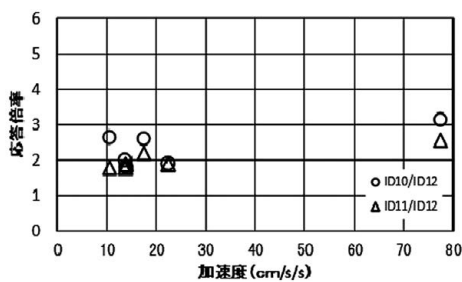
度の伝達特性について検討するため、天井裏に設置した地震計 (ID10, ID11) と 1 階床面に設置した地震計 (ID12) の各観測点間で ID10/ID12 (端部) ID11/ID12 (中央部) のスペクトル比を求めた。一例として計測震度が最も大きかった 2015 年 5 月 25 日の地震記録のスペクトル比を図 3 に示す。

図 3 より 2015 年 5 月 25 日の地震では ID10/ID12 (端部) と ID11/ID12 (中央部) の面外 (Y 方向) のスペクトル比を比較すると、中央部の 1 次の固有振動数は 2.88 Hz と明確なピーク値を示しているが、端部の 1 次の固有振動数は 2.88 Hz と 4.11 Hz の 2 つのピークが確認できる。4.11 Hz がねじれの固有振動数と考えられる。さらに、端部の面外方向 (Y 方向) の 1 次固有振動数と上下方向 (Z 方向) の 1 次固有振動数が近接していることも確認できる。

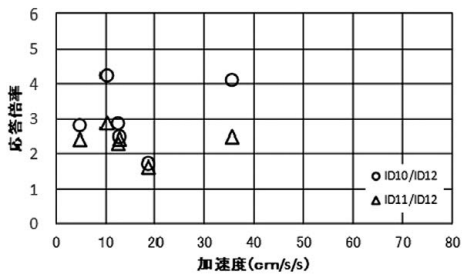
表 2 に示した残り 5 地震についても、ID10/ID12 (端部) と ID11/ID12 (中央部) の各方向のスペクトル比を求め平均した結果を図 4, 図 5 にそれぞれ示す。図 4 に示した端部面外方向のスペクトルと図 5 に示した中央部面外方向のスペクトル比から地震によらず端部面外方向のスペクトルにねじれ成分の影響が表れていることが確認できる。図 4, 図 5 から求めた各固有振動数を表 3 にまとめて示す。



(a) 面内方向 (X 方向)



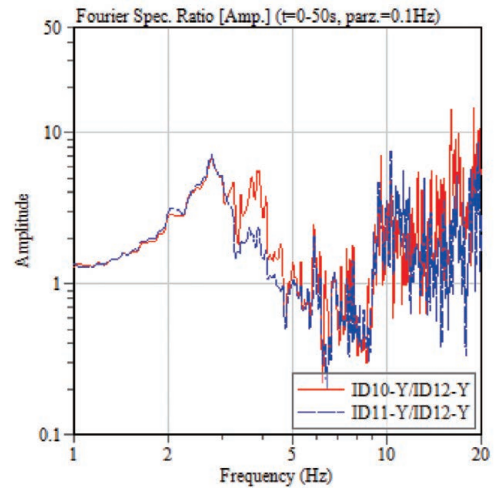
(b) 面外方向 (Y 方向)



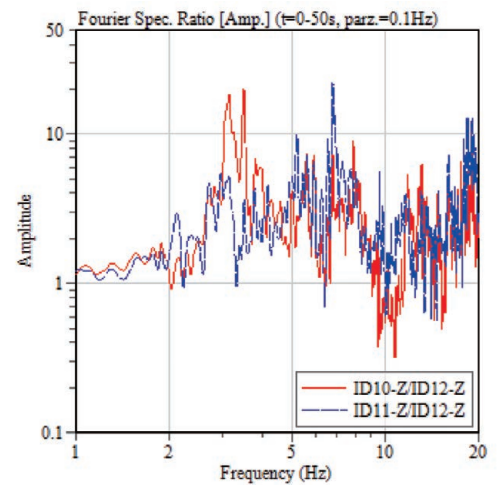
(c) 上下方向 (Z 方向)

図 2 入力加速度と応答倍率の関係

表 3 より天井裏に設置した地震計 ID10 (端部) と ID11 (中央部) の分析結果から、面内方向の 1 次の固有振動数は 3.80 Hz, 2 次の固有振動数は 11.73 Hz と端部, 中央部とも同じ値になっている。一方で、面外方向の固有振動数は ID10 (端部) は 2.88 Hz, ID11 (中央部) は 2.97 Hz と多少の差がある。図 4-(b) より面外方向について、端部のスペクトル比の 3.8 Hz のピーク振動数の乱れはねじれによる影響だと考えられる。また、ID10 (端部) の 1 次固有振動数が面外方向 2.88 Hz, 上下方向 3.93 Hz となっている一方で、ID11 (中央部) は 1 次固有振動数が面外方向 2.97 Hz, 上下方向 5.18 Hz となっている。ID11 (中央部) に比べ ID10 (端部) の面外方向と上下方向の固有振動数の値が近接していることが確認できる。これは加速度応答倍率の分布で考察した結果と同様に面ガラスの破壊メカニズムの要因として上下の振動特性も関係があることを示唆することも考えられる。



(a) 面外のスペクトル比



(b) 上下のスペクトル比

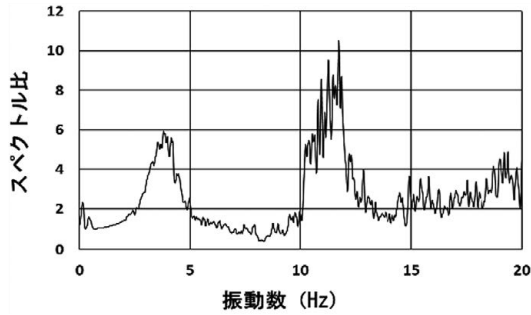
図 3 端部と中央部のスペクトル比の比較 (2015 年 5 月 25 日の地震記録)

4. シミュレーション解析

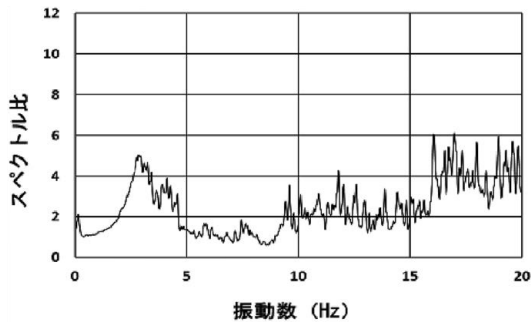
4.1 解析モデルの概要

図6に全体解析モデル，図7にガラス部分の解析モデルを示す⁴⁾。柱と梁は梁要素，屋根面ブレースは解析は弾性解析とし，モード別に減衰定数を設定しモード法により実施した。

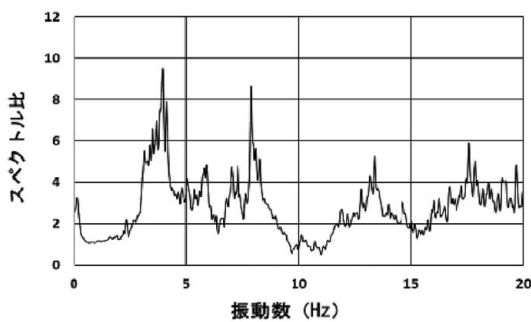
使用プログラムは，フレーム解析プログラム「MIDAS



(a) 面内方向 (X方向)



(b) 面外方向 (Y方向)



(c) 上下方向 (Z方向)

図4 ID10/ID12 (端部) の平均スペクトル比

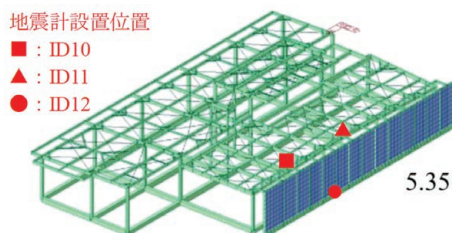
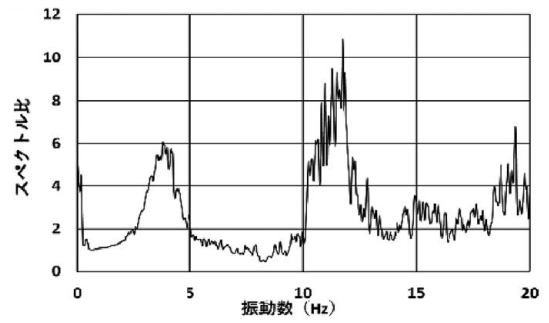
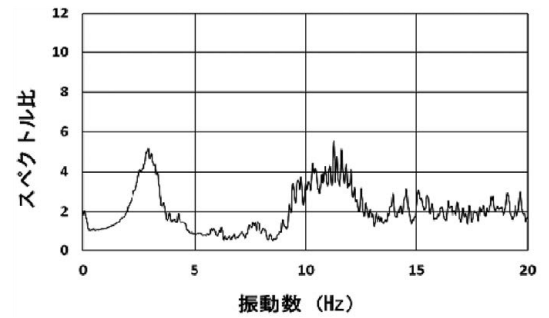


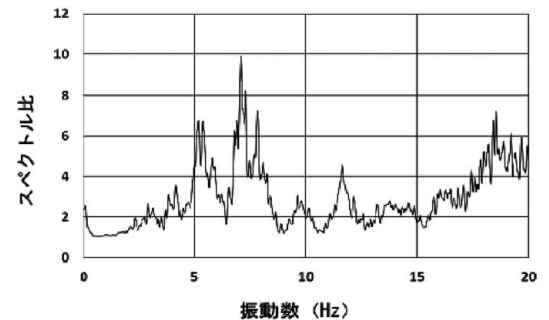
図6 全体の解析モデル



(a) 面内方向 (X方向)



(b) 面外方向 (Y方向)



(c) 上下方向 (Z方向)

図5 ID11/ID12 (中央部) の平均スペクトル比

表3 固有振動数 (Hz)

モード	ID10 (端部)			ID11 (中央部)		
	X方向	Y方向	Z方向	X方向	Y方向	Z方向
1次	3.8	2.88	3.93	3.8	2.97	5.18
2次	11.73		7.88	11.73	11.63	7.06

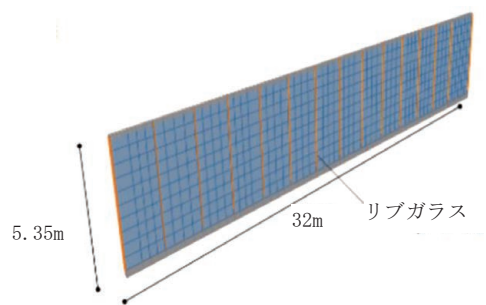


図7 ガラス面の解析モデル

Gen」(MIDAS IT社)を用いた。本解析モデルは妥当性についてはすでに文献4で検討されている。

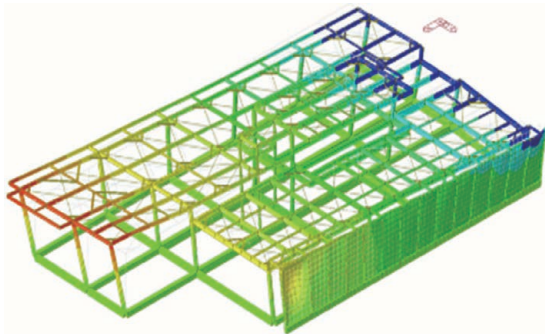
4.2 固有値解析結果

解析モデルの固有振動数は、面内方向(X方向)1次は3.2 Hz、面外方向(Y方向)1次は2.8 Hz、ねじれ1次は3.8 Hzである。図8に並進とねじれの振動モードをそれぞれ示す。

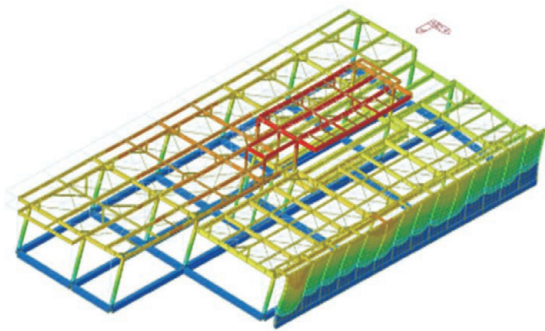
同図より面ガラスが面外にはらむモード形を示すことが確認できた。特に中央部(地震計ID11の設置位置付近)よりも端部(地震計ID10の設置位置付近)が面外方向のモードだけでなく、ねじれのモードにおいても面外方向にはらむ様子が顕著である。

4.3 シミュレーション解析結果

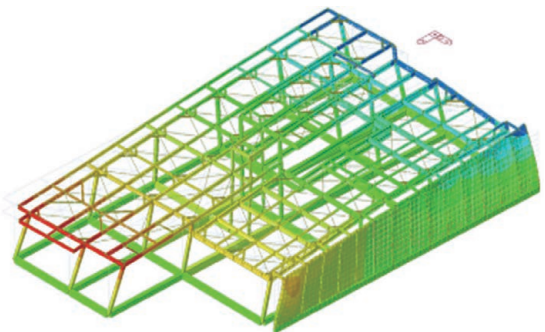
シミュレーション解析は2011年3月11日に発生した東北



(a) 面内方向 (X方向)



(b) 面外方向 (Y方向)



(c) ねじれ

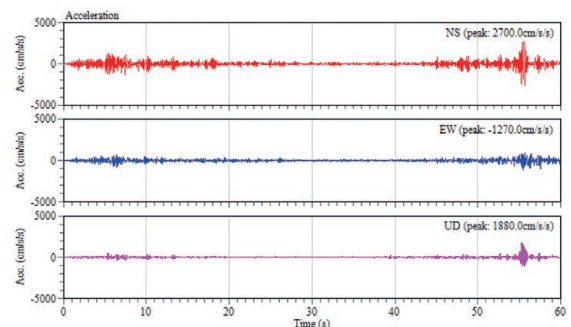
図8 1次振動モード

地方太平洋沖地震において、K-netで観測された築館の観測記録(計測震度6.6)の主要動部分を1階床加速度記録として、X・Y方向の2方向同時入力として実施した。当該記録の加速度波形及びSa-Sdスペクトルと解析モデルの固有周期0.36 s(黒の破線)を図9にそれぞれ示す。

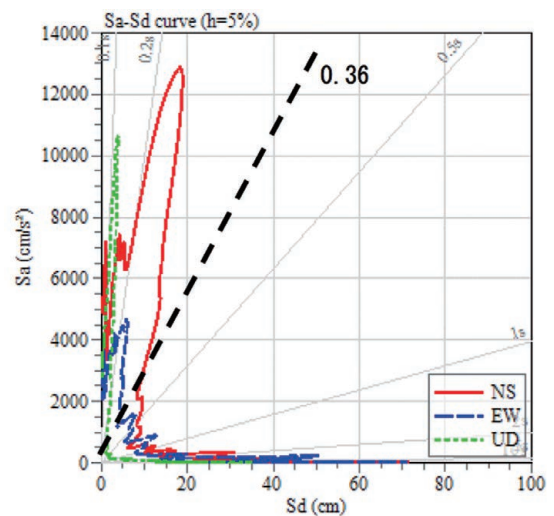
シミュレーション結果の相対変位等高線図を図10に示す。同図より面ガラスの端部が面外方向にはらむ状況が確認でき、ねじれを伴った面外モード形での揺れが卓越していることがわかる。図10で最大相対変位を示した左端のガラス板において、四隅それぞれの点と中央部の差をとり、相対変位として時刻歴波形にしたものを、許容風圧力で求めた許容変位値(赤の破線)と併せて図11に示す。応答結果は、最初の断層破壊の波で許容変位値を超えており、面外方向の揺れにより破壊していることが確認できる。また、シミュレーション結果の応力度等高線図を図12に、同図で最大応力度を示した箇所の応力度時刻歴波形と2.2節で求めた許容応力度(赤の破線)を図13にそれぞれ示す。

図13より、応力度についても図12で確認した変位と同様な傾向が確認できた。

また、ガラス面中央部と端部での振動特性は、図4と図5で示したと同様に、面内はほぼ同一の挙動をしているに



(a) 入力地震動の時刻歴波形



(b) 観測記録のSa-Sdスペクトル

図9 対象とした観測記録：2011年3月11日(K-net：築館)

も関わらず、面外は前述したモードの特性が含まれた複雑な挙動をしていることがわかった。前述した観測記録の解析結果より ID11（中央部）に比べ ID10（端部）には面外方向にねじれの固有振動数が接近していることが確認されている。この結果を踏まえると大判ガラスの損傷メカニズムには面外応答に加えねじれ振動の影響が起因する可能性があると考えられる。先日の2017年6月25日に発生した長野県南部地震では、震度5弱程度の揺れにもかかわらず、自動車ショールームの大判ガラスの破損した被害が報告されている。この被害状況においても、本解析で検討した結果と類似の現象が起きている可能性があると考えている。

5. まとめ

本報では、実建物で観測された地震記録に基づき建物振動特性の詳細分析とその結果を考慮した地震時シミュレーション

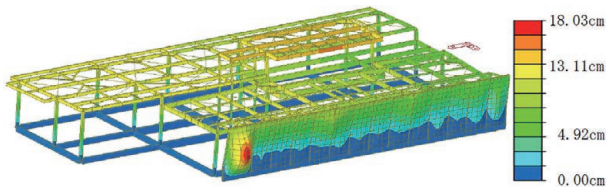


図10 相対変位等高線図（面外方向）
（東北地方太平洋沖地震2011年3月11日，K-NET：築館）

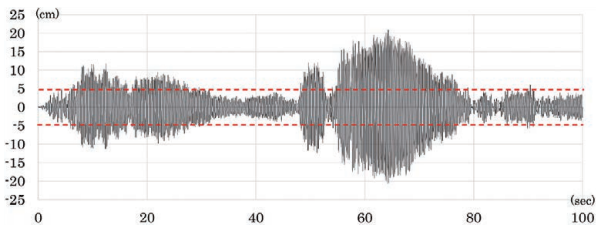


図11 最大相対変位を示した部分の面外応答変位時刻歴波形
（東北地方太平洋沖地震2011年3月11日，K-NET：築館）

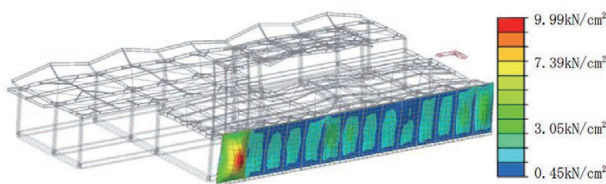


図12 板要素応力度等高線図（面外方向）
（東北地方太平洋沖地震2011年3月11日，K-NET：築館）

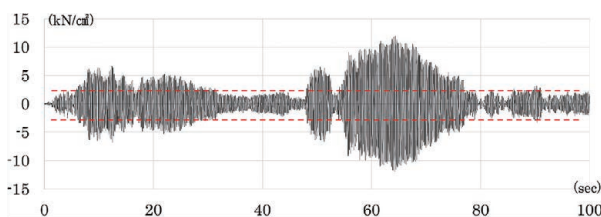


図13 最大応力度を示した部分の面外応答応力度時刻歴波形
（東北地方太平洋沖地震2011年3月11日，K-NET：築館）

シミュレーションにより、ガラススクリーン構法の損傷メカニズムの検討を試みた。これら検討結果よりガラススクリーン構法の地震時挙動・振動特性および破壊に至る許容値などについて以下の知見を得た。

- (1) 面内方向では応答倍率に差はないが、面外方向と上下方向では応答倍率に明確な差が認められた。特に、端部に配置された大判ガラスは、面外方向への応答に加えねじれ応答が影響していることが確認できた。
- (2) 建物の1次固有振動数はガラス面中央部に比べ端部の面外方向の揺れにねじれ成分の影響が確認できた。さらに、端部の面外方向の1次固有振動数と上下方向の1次固有振動数が近接していることも確認できた。
- (3) 震度7クラスの地震を対象にしたシミュレーション結果から、端部の面ガラスは、面外の並進の揺れに加えねじれ成分との連成の影響で破壊し易い傾向にあることが確認できた。

今回の解析では、震度7クラスの巨大地震を対象に大判ガラスの破壊状況を検討したが、2017年6月25日に発生した長野県南部地震では、震度5弱程度の揺れにもかかわらず、自動車ショールームの大判ガラスが破損しており、大判ガラスの地震時損傷メカニズムを検討するためには、建物の振動特性を踏まえたさらなる検討が必要である。今後は、建物の振動特性と入力地震動特性などを考慮したシミュレーション解析を実施することで、さらに詳細な検討を継続する予定である。

謝 辞

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震での築館観測記録は、防災科学技術研究所のK-NETの記録を利用しています。ここに記して謝意を表します。

文 献

- 1) 俵田忠明，清家剛，他：平成23年度東北地方太平洋沖地震におけるガラスの被害調査報告（その2），学術講演梗概集 DVD，巻号 2012，pp. 81-84，2012.9
- 2) 国土技術政策総合研究所，建築研究所：「岩手県沿岸北部の地震建築物被害調査報告」，2008
- 3) 石田琢志，脇山善夫，他：ガラススクリーン構法の地震面外挙動に関する振動台実験，日本建築学会学術講演梗概集，材料施工，pp. 961-962，2015.9
- 4) 渡壁守正，脇山善夫，他：ガラススクリーンを有する某建物の地震観測とシミュレーション解析，日本建築学会学術講演梗概集，2016.8
- 5) 旭硝子株式会社：総合カタログ技術資料編2015年版，04強度・安全，2015