

# 大規模空間を有する建築物の天井脱落被害に関する研究



稲井 慎介 \*<sup>1</sup>

藤堂 正喜 \*<sup>1</sup> 渡壁 守正 \*<sup>1</sup>  
石岡 拓 \*<sup>1</sup> 桑 素彦 \*<sup>1</sup>

## 概 要

2008年岩手・宮城内陸地震において、窓や軒天に被害を受けた体育館を対象とした振動測定を実施、大規模空間構造の振動特性を把握するとともに、被害原因の解明や非構造部材の耐震対策に資するデータを取得した。また、並行してシミュレーション解析を実施、解析モデルの妥当性を検証するとともに、実際の非構造部材の被害原因を検証した。

## Study of Large Space Building on Nonstructural Components Failed

Shinsuke INAI\*<sup>1</sup> Masanobu TODO\*<sup>1</sup>  
Morimasa WATAKABE\*<sup>1</sup> Taku ISHIOKA\*<sup>1</sup>  
Motohiko KUWA\*<sup>1</sup>

In this paper, oscillatory properties of school gymnasiums on nonstructural components failed during the Iwate-Miyagi Nairiku earthquake are investigated based on microtremor observation, forced vibration tests. And the simulation analysis was executed, and the data to verify the cause of damage was obtained. The results are following that,

- 1) The characteristic frequency, the mode of vibration and the damping coefficient of the gym were clarified.
- 2) It was confirmed that the vertical vibration amplified at the center of the beam.
- 3) The vibrational property of the simulation results and the experimental results corresponded well.

\*<sup>1</sup> 技術研究所

\*<sup>1</sup> Technical Research Institute

# 大規模空間を有する建築物の天井脱落被害に関する研究

稲井 慎介<sup>\*1</sup> 藤堂 正喜<sup>\*1</sup>  
渡壁 守正<sup>\*1</sup> 石岡 拓<sup>\*1</sup>  
桑 素彦<sup>\*1</sup>

## 1. はじめに

近年の地震では主要な構造部材の耐震性が増したことから、それに取り付けられる非構造部材に関する地震被害報告が多く見られる。なかでも、大地震時での避難拠点として重要な体育館等の大規模空間建築についての非構造部材に関する地震被害が取り上げられる機会が多い。大規模空間に張られる天井については、2001年の芸予地震、2003年の十勝沖地震、2005年の宮城県沖地震の際に比較的大面積での脱落被害が報告されている。2004年の新潟県中越地震の際には、天井だけでなく、大規模空間建築の横連窓ガラス・サッシの破損や脱落、舞台上部の内壁の脱落などが報告されている。2008年6月の岩手・宮城内陸地震では、その他に小学校体育館のALC外壁パネル、軒天の脱落も報告されている。これらの被害においては、大規模空間建築特有の地震応答が被害の一因と考えられるケースもあるが、それがどの程度非構造部材の応答に影響を与えるかは定量的に把握されていない。

このような現状を踏まえ、微動測定、強制加振実験などによる振動測定調査の必要性が指摘されている。大規模空間の屋根形状としては、陸屋根、山形屋根、円筒屋根、方形屋根などさまざまな形態を想定することができる。昨年度は、2001年芸予地震で被害報告のあった学校体育館（寄棟屋根）と閉校となった学校体育館（山形屋根）の2棟の体育館を選定して調査を実施し、その結果を報告した。

本報では昨年度に引き続き、2008年6月の岩手・宮城内陸地震において横連層ガラス・サッシやALC外壁パネル、軒天に被害を受けた、宮城県某所の小学校体育館（山形屋根）を選定して実施した常時微動測定、および強制加振実験結果について報告する。また、この体育館をモデルに実施したシミュレーション解析結果についてもあわせて報告する。

## 2. 体育館の振動特性調査

### 2.1 対象建物概要

対象とした体育館は1985年竣工の物件であり、構造種別は1階がRC造、2階がS造、屋根は鉄骨造の切妻である。体育館の外観・内観を写真-1に示す。天井高は端部7m、頂部11mで屋根勾配は約16.7°である。2階には地震被害を受けた横連窓ガラスがあり、軒下には軽量鉄骨下地を介して天井板が張られている。

本体育館は、2008年6月14日午前8時43分に発生した岩手・宮城内陸地震において、写真-2に示すようにサッシや軒天などに被害を受けている。

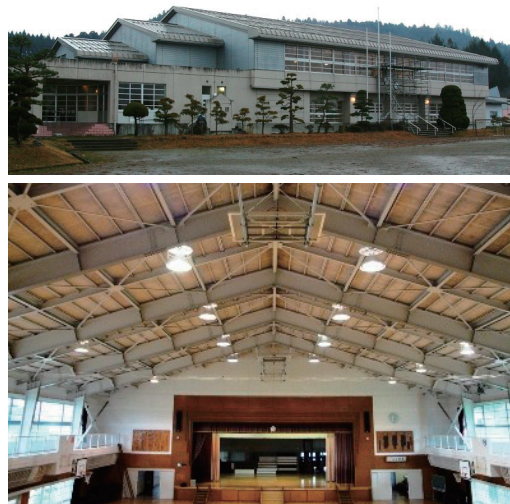


写真-1 体育館の外観・内観



写真-2 体育館の被害状況

### 2.2 常時微動計測および強制加振実験概要

常時微動計測および強制加振実験における計測と加振の機器配置を図-1に、センサと加振機の設置状況を写真-3に、計測システムを図-2にそれぞれ示す。体育館全体の挙動を把握するために配置Aを、張間方向フレームの挙動を把握するために配置Bを、窓サッシ、軒天の挙動を把握するために配置Cを設定した。各配置において加速度計と起振器の方向を張間、桁行、上下方向に盛り替えながら、常時微動計測と強制加振実験を実施した。

計測はサーボ型加速度計を用いた16ch同時計測とし、加振は大梁に取り付けた2台の起振器（最大加振力水平50kgf/台、最大鉛直加振力19kgf/台）を用いた。入力波は、0.1～25Hzの線形スイープ波（継続時間300秒）、および固有振動数を用いた正弦波とし、さらに減衰特性の把握のため、定常加振後の自由振動波形を計測した。

また、実際に被害を受けた軒天の振動特性を把握するために、軒天に加振機を1台設置（写真-3）したスイープ加振も実施した。全体の測定状況を写真-4に示す。

<sup>\*1</sup> 技術研究所

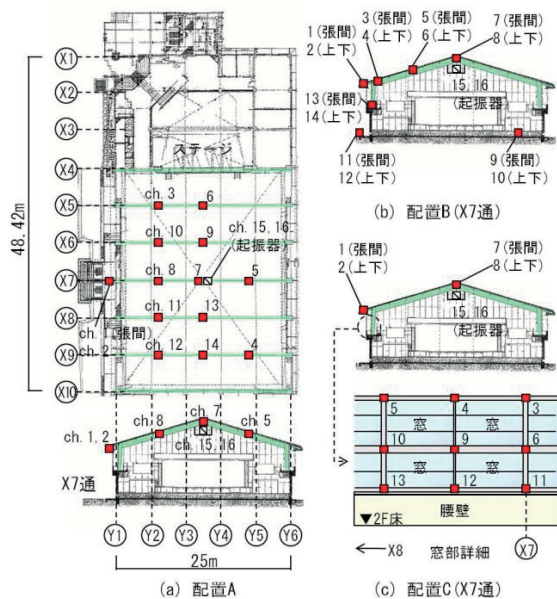


図-1 計測および加振機の配置

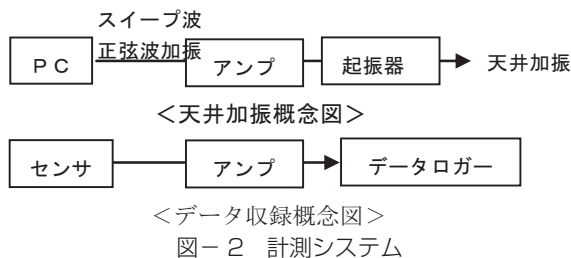


図-2 計測システム

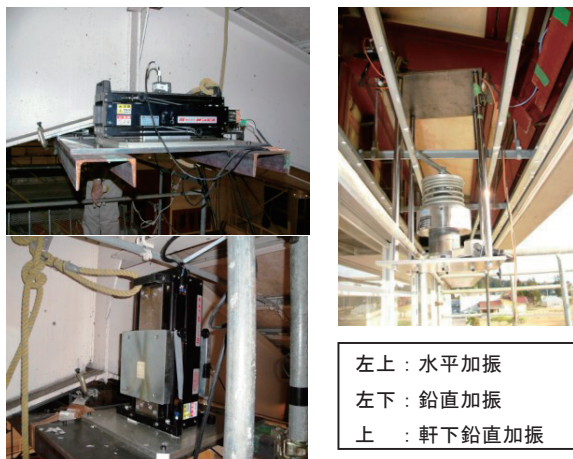


図-3 フーリエスペクトル

### 3. 振動測定結果

#### 3.1 固有振動数とモード形状

スィープ加振から得られたフーリエスペクトルと固有振動数の一覧をそれぞれ図-3、表-1に示す。固有振動数は、張間方向で4.52Hz、桁行方向で6.87Hz、上下方向で4.84Hzであり、上下方向では複数のピークが確認でき、1次よりも2次に明確なピークが確認できる。また、図には示していないが、常時微動測定においても同様な振動数にピークが確認できた。

次に固有振動数での定常波加振実験結果から算出した張間方向のモード形状を図-4に、屋根面のモード

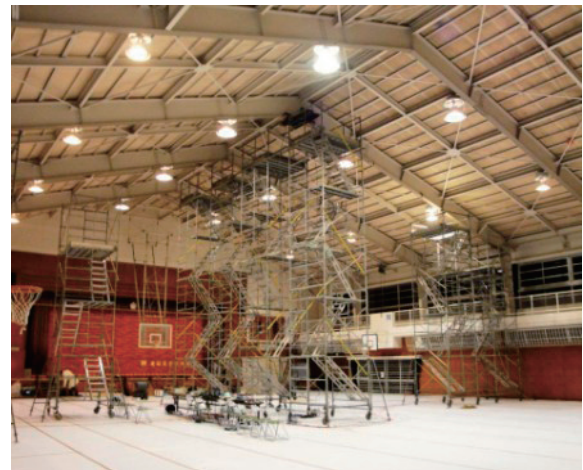


写真-4 測定状況（全体）

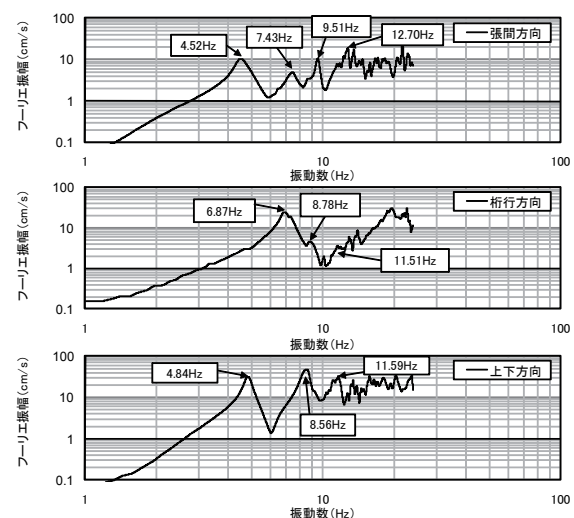


図-3 フーリエスペクトル

表-1 固有振動数一覧 [Hz]

| 張間1次 | 張間2次 | 桁行1次 | 桁行2次 | 上下1次 | 上下2次 |
|------|------|------|------|------|------|
| 4.52 | 7.43 | 6.87 | 8.78 | 4.84 | 8.56 |

形状を図-5に示す。モード形状の各点の振幅は、屋根頂部の振幅で基準化している。

張間方向1次固有振動数である4.52Hzでは、柱が1次モードで振動して屋根面での上下振動は小さいが、張間方向2次固有振動数である7.43Hzでは、柱が2次モードで振動して屋根面での上下振動が比較的大きな形状となった。上下方向の1次と2次の固有振動数4.84Hz、8.56Hzにおいては、柱のはらむ方向が反対で、屋根面は同じモード形状となっている（後述、屋根面全体のモード形状は異なる）。

屋根面のモード形状は、張間方向、桁行方向では各点でほぼ同位相の並進モードであり、上下方向は、1次では各点で同位相のモードであるが、2次では端部に対して、中央付近が逆位相となるモードとなっている。

#### 3.2 減衰定数

各方向の固有振動数で加振した後の自由振動波形から減衰定数を求めた。各加振は、加速度振幅を段階的に変化させ、減衰定数の振幅依存性について確認した。



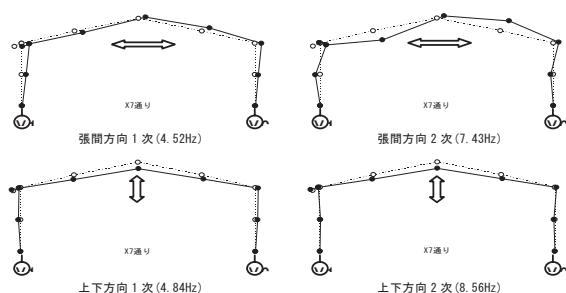


図-4 張間方向のモード形状

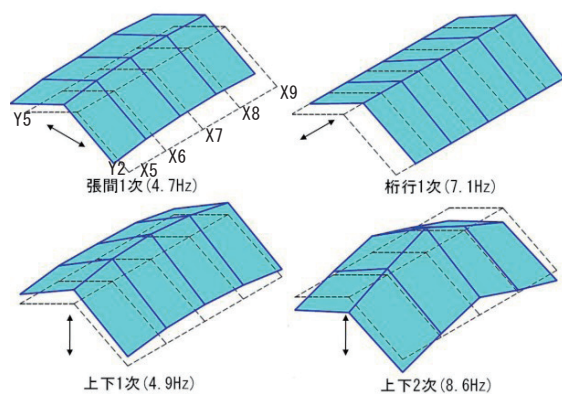


図-5 屋根面のモード形状

表-2、図-6に、それぞれ減衰定数の一覧と加速度振幅と減衰定数の関係を示す。表中の減衰定数は、各加振振幅レベルの平均値を示している（RD法除く）。また、図中のRD法は常時微動測定からRD波形を求めて減衰定数を算出したことを示す。本体育館の減衰定数は、およそ2.5～4.5%であった。また、図-6に示すように、加振振幅によらず減衰定数はほぼ一定であり、減衰定数の振幅依存性はみられなかった。

表-2 減衰定数一覧

| 張間1次(%) | 桁行1次(%) | 上下1次(%) | 上下2次(%) |
|---------|---------|---------|---------|
| 4.3     | 2.99    | 2.55    | 3.28    |

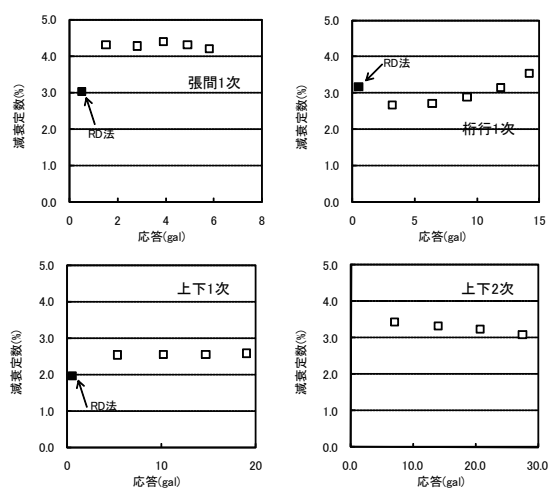


図-6 加振振幅と減衰定数の関係

### 3.3 アクセラランス

スイープ加振結果より求めた、体育館頂部と梁中央のアクセラランス（各点の加速度／起振器2台による加振力）を図-7に示す。

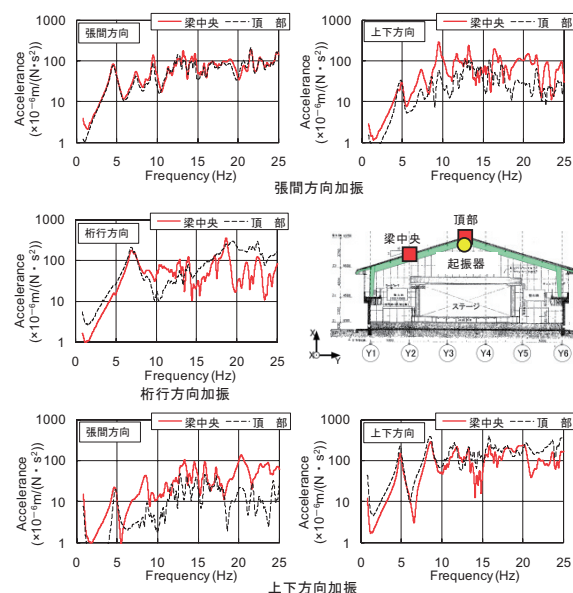


図-7 各点のアクセラランス

張間方向加振時、および上下方向加振時においては、張間方向および上下方向のアクセラランスを示し、桁行方向加振時は、桁行方向のアクセラランスのみ示した。

図より、張間方向加振時の梁中央部での上下方向アクセラランスが大きくなっており、梁中央部では上下応答加速度が大きく増幅されることが確認できる。また、桁行方向加振時の桁行方向アクセラランスは、10Hz付近において頂部に比べて梁中央部で大きく増幅された。これらの振動特性は、前報2棟の体育館の振動特性と同様な傾向であった。

### 3.4 非構造部材の振動特性

前述したように本体育館は2008年の地震により、軒天、窓部が破壊、落下する被害を受けている。これらの被害原因を検証するため基礎的データを収集するための軒天、窓部の振動特性について測定した。

#### (1) 軒天の振動特性

軒天部のスイープ上下加振より算出した各測定点のフーリエスペクトルを図-8に示す。図中のフーリエ振幅は、各測定点のフーリエ振幅の最大値で基準化している。

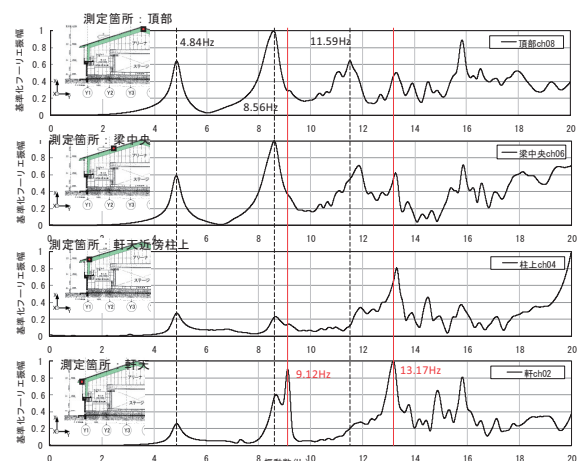


図-8 各点のフーリエスペクトル

軒の上下振動では体育館頂部や梁中央で卓越する1次～3次固有振動数とは別に9.12Hzと13.17Hzでも振動が大きくなっており、これが軒点部の固有振動数であると推測される。

## (2) 窓部の振動特性

頂部スweep加振より得られた窓部のアクセラランスを図-9に示す。張間方向加振時のアクセラランスが特に大きく、常時微動測定結果と同様に9.5Hzの窓サッシの面外方向および12.7Hzの野縁の張間方向にピークがみられる。桁行方向、上下方向のアクセラランスは張間方向のそれに比較して小さく、また窓位置による振動性状に大きな差はみられなかった。

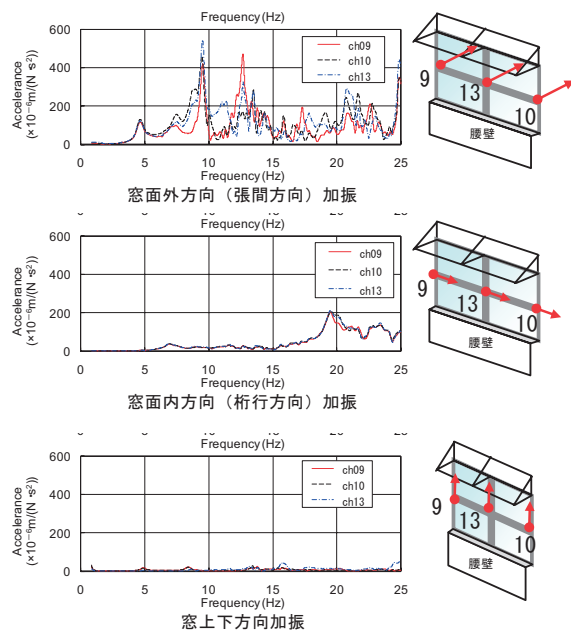


図-9 窓部のアクセラランス

## 4. シミュレーション解析

振動測定を実施した体育館をモデルにシミュレーション解析を実施、解析モデルの妥当性を確認するため、これまでに述べた実測値との振動特性の比較を行った。

また、2008年岩手・宮城内陸地震観測波（JMA 栗駒）をもとに非構造部材の被害原因を確認するための地震応答解析を行った。

### 4.1 解析モデル

解析モデルを図-10に示す。モデルは3次元フレームモデルとし、RC柱梁は梁要素、RC壁、床は版要素、屋根鉄骨は梁要素またはトラス要素、2階柱はテーパー材とした。屋根、外壁は仕上材重量としてそれぞれ16kgf/m<sup>2</sup>、22kgf/m<sup>2</sup>を考慮した。なお、非構造部材の軒天下地・ボード、窓サッシについてはモデル化していない。境界条件は基礎梁ピン支持とし、計算は直接積分法（ニューマークβ法）とし、減衰は実測結果をもとに3%の剛性比例型とした（張間、桁行、上下1次の平均程度）。図中のA1～A4点は後述する結果の評価点を示す。

### 4.2 入力地震動

シミュレーション解析に用いた入力波は、本体育館

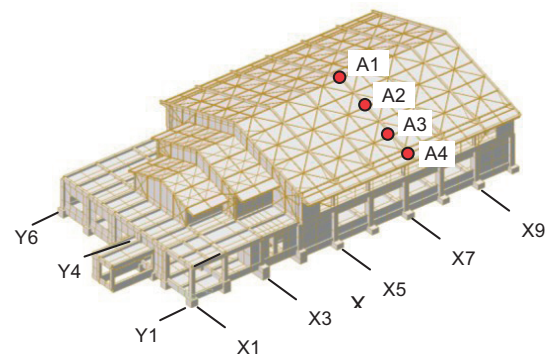


図-10 解析モデル

が実際に被害を受けた2008年6月14日の岩手・宮城内陸地震の観測波（JMA 栗駒観測地点の記録で、本体育館から約2kmの距離）とした。観測記録を建物の構造軸にあわせて座標変換した。座標変換後の各方向の最大加速度と計測震度を表-3に、フーリエスペクトルと応答スペクトルを図-11に示す。本観測波は、0.5～5Hz程度までほぼフラットな形状を示し、広い周波数範囲においてパワーを持つことがわかる。

表-3 入力波の最大加速度と計測震度

| 最大加速度 (gal) |       |       | 計測震度 | 震度 |
|-------------|-------|-------|------|----|
| 張間方向        | 桁行方向  | 上下方向  |      |    |
| 409.8       | 659.7 | 280.7 | 5.9  | 6弱 |

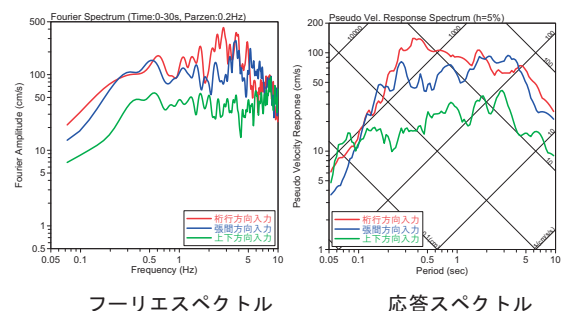


図-11 フーリエスペクトルと応答スペクトル

### 4.3 固有値解析結果

固有値解析結果を上述測定結果と比較して表-4に示す。両者を比較するとおよそ15%の差で、比較的良好に対応していることがわかる。

### 4.4 伝達率

伝達率は、各方向の特性を明確にするために、張間方向、桁行方向、上下方向それぞれ1方向ごとでの解析とした。

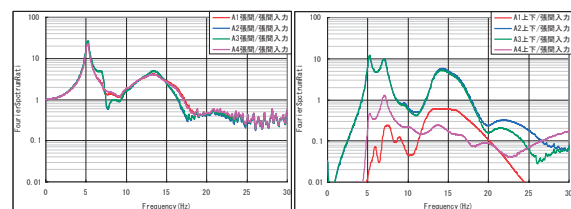
#### (1) 張間方向の伝達率

張間方向入力時の水平（張間方向）、上下伝達率をそれぞれ図-12(a)に示す。水平伝達率は、図-10に示す各点の張間方向加速度のフーリエスペクトルを、張間方向入力加速度のフーリエスペクトルで除した値とし、上下方向伝達率は、同様に各点の上下方向フーリエスペクトルを、張間方向入力加速度のそれで除した値とした。

水平伝達率は、いずれの点においても張間方向の1次固有振動数5.3Hz付近で増幅し、頂部、梁中央部、

表－４ 固有値解析結果

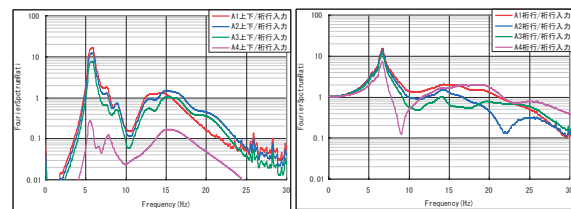
| 次数   | 解析       |       | 測定       |       | 比率   |
|------|----------|-------|----------|-------|------|
|      | 振動数 (Hz) | モード形状 | 振動数 (Hz) | モード形状 |      |
| 張間１次 | 5.28     |       | 4.52     |       | 0.86 |
| 上下１次 | 5.52     |       | 4.84     |       | 0.88 |
| 桁行１次 | 6.78     |       | 6.87     |       | 1.01 |
| 張間２次 | 7.19     |       | 7.43     |       | 1.03 |
| 上下２次 | 7.97     |       | 8.56     |       | 1.07 |



張間方向

上下方向

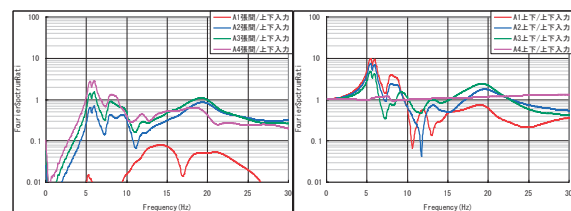
(a) 張間方向入力時



桁行方向

上下方向

(b) 桁行方向入力時



張間方向

上下方向

(c) 上下方向入力時

図－１２ 入力方向毎の伝達率

梁端部で大きな違いは見られない。また、上下伝達率については、梁中央部の２点（Ａ２とＡ３点）で増幅度大きくなっており、梁端部と頂部での増幅はほとんど見られなかった。これらの結果は、前述の測定結果と良く対応している。

## (2) 桁行方向の伝達率

桁行方向入力時の水平（桁行方向）、上下伝達率をそれぞれ図－１２（b）に示す。伝達率の算出方法については前述張間方向と同様である。

桁行方向の固有振動数 6.8Hz 付近においてピークが見られる。増幅度は桁行方向で頂部、梁中央部が梁端部に比較して大きく、上下伝達率についても同様な傾向が見られる。

上下方向伝達率において、頂部と梁中央部がほぼ同じ伝達率であることは、前述の測定結果とおおむね同じ傾向であった。

## (3) 上下方向の伝達率

上下方向入力時の張間、上下伝達率をそれぞれ図－１２（c）に示す。

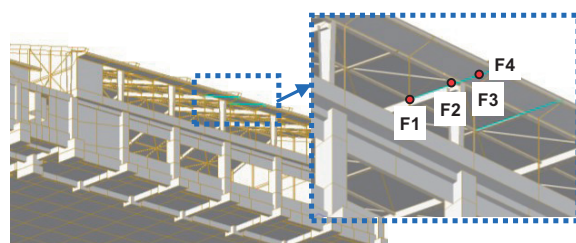
上下入力時の張間方向伝達率は、いずれの点においても上下方向の１次固有振動数 5.5Hz 付近にピークが見られる。増幅度は梁端部が特に大きく、頂部に行くにしたがい小さくなる傾向がみられた。頂部よりも梁中央の伝達率が高いのは、前述の測定結果とよく対応している。上下方向の伝達率は、頂部で最も大きく、梁端部になるにしたがい小さくなり、これも前述した測定結果とおおむね同じ傾向である。また、図には示していないが、桁行方向の伝達率は、いずれの点においても増幅度は１以下であり、上下方向入力が桁行方向の応答に与える影響は小さいといえる。

## 4.5 非構造部材の地震応答解析結果

入力波は前述した 2008 年岩手・宮城内陸地震の観測波の３方向入力（観測記録を建物の構造軸に合わせて座標変換）とした。なお、前述したように、非構造部材の軒天下地・ボード、窓サッシはモデル化していないため、解析結果はそれらの非構造部材が取り付くフレームの結果を示している。

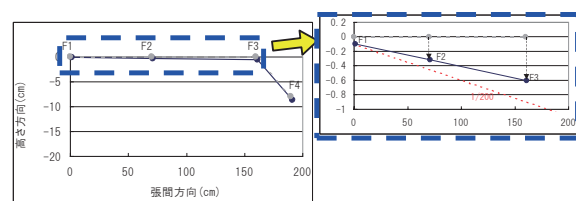
## (1) 軒天部の応答解析結果

評価点は、図－１３に示すように、実際に落下被害が生じた桁行方向中央部の軒天が取り付くフレーム部とした。



図－１３ 地震応答解析の軒天部評価点

図－１４に最大変形時の上下方向の変形図を示す（図は軒天斜め部を水平に表示）。軒天フレームの最大変形は約 0.6cm、変形角は約 1/200 以下であった。これは、落下被害が生じる変形レベルではなく、本解析結果からは、実際に生じた軒天の落下被害を説明できない。今後、軒天フレームの他に、それに取り付ける下地材、ボードを含めて詳細にモデル化する必要があると考える。



図－１４ 軒天部の最大変形（上下方向）



## (2) 窓部の応答解析結果

窓部の評価点を図-15に示す。上述軒天部と同じ実際に落下、破損被害が生じた桁行方向中央部の窓が取り付くフレーム部とした。

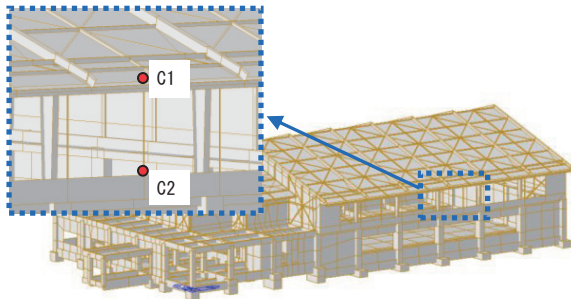


図-15 地震応答解析の窓部評価点

図-16、図-17にそれぞれ張間方向の層間変形時刻歴、加速度のフーリエスペクトル比（窓上部／腰壁部）を示す。最大層間変形角は1/200程度であった。また、水平方向のスペクトル比でみると、窓上部のC1点は5.3Hzの張間1次モード、腰壁部のC2点では、それに加え張間2次の7.2Hzにピークが確認できる。上下方向のスペクトル比においては、20Hz以上の比較的高振動数成分の増幅がみられるものの、10Hz以下の増幅はみられなかった。

次に桁行方向の層間変形角時刻歴、加速度のフーリエスペクトル比（窓上部／腰壁部）を図-18、

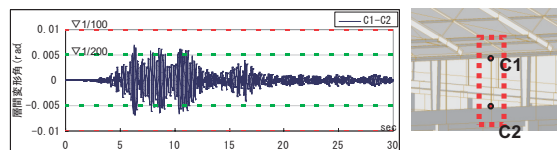
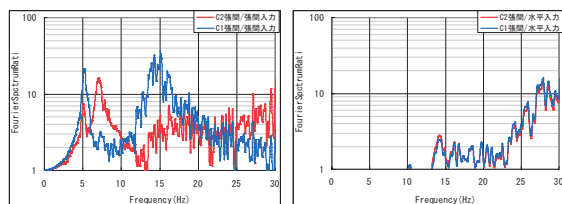


図-16 窓部層間変形角（張間方向）



張間方向 上下方向

図-17 窓部のフーリエスペクトル比（C1/C2）

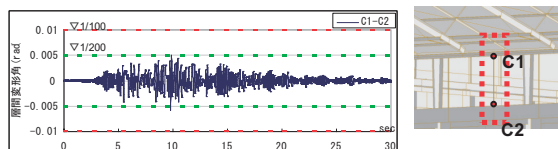
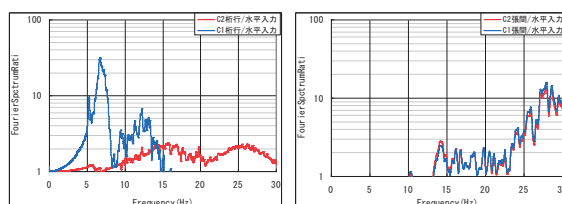


図-18 窓部層間変形角（桁行方向）



桁行方向 上下方向

図-19 窓部のフーリエスペクトル比（C1/C2）

図-19に示す。層間変形角は張間方向と同じく1/200程度であった。また、スペクトル比は窓上部のみ6.8Hzにピークが見られた。これは、桁行方向の振動モードにおいて、腰壁より下はほとんど変形が生じていない結果から当然といえる。上下方向のスペクトル比は、張間方向と同じである。

窓部の被害については、本体育館の設計目標にもよるが、本解析結果の層間変形角1/200程度で生じる可能性は低いと考えられる。今後は、前述の軒天結果と同様に窓部や窓フレーム、その接続部などをモデル化し、検討する必要がある。

## 5. まとめ

2008年岩手・宮城内陸地震において、実際に窓や軒天に被害を受けた体育館を対象に、その振動特性を明らかにするために常時微動測定、および強制加振実験を実施した。また、本体育館の解析モデルを作成、実際にこの付近で観測された地震記録をもとにシミュレーション解析を実施、実測結果と比較し解析モデルの妥当性を検証するとともに、非構造部材の被害原因を確認するための地震応答解析を行った。以下に、結果をまとめて示す。

### <振動測定結果>

- ・体育館の1次固有振動数は、張間方向で4.75Hz、桁行方向で7.13Hz、上下方向で4.88Hzであった。
- ・1次減衰定数は、張間方向で43%、桁行方向30%で、上下方向で26%と、比較的大きな値であった。
- ・窓部は9.5Hzと12.7Hz付近に面外変形が大きくなる卓越振動数が見られた。
- ・軒天部は約9Hzと約13Hzに卓越振動数が見られた。

### <地震応答解析結果>

- ・解析モデルと実測の固有振動数は最大で15%程度の差であり、解析モデルの妥当性が確認できた。
- ・張間方向の入力に対する張間方向の増幅率は、屋根頂部から、梁中央部、屋根端部までほぼ同程度であった。一方、上下方向の増幅率については、梁中央部で特に増幅が大きく、頂部ではほとんど増幅していなかった。
- ・桁行方向の入力に対しては、桁行方向、上下方向とも頂部が最も増幅が大きく、屋根端部に行くにしたがって徐々に増幅率は小さくなる傾向が確認できた。
- ・上下方向の入力地震動が水平方向の応答に与える影響は小さかった。
- ・また、上下方向の入力地震動に対する上下方向の増幅率は、頂部が最も大きく、屋根端部に行くにしたがい小さくなった。
- ・上記、増幅率の解析結果は、前報で示した2棟の体育館の測定結果とおおむね同様な傾向であった。
- ・窓部の解析結果は、最大層間変形角1/200程度であり、被害が生じるほど大きな変形角ではなかった。
- ・ただし、今回の解析モデルは窓部を含めた非構造部材がモデル化されておらず、今後測定結果を参考に、より詳細なモデル化を行うことが課題である。
- ・軒天部の最大層間変形角は1/200以下であり、窓部と同じく被害が生じるほど大きな変形角ではなかった。

た。上記窓部同様、今後より詳細なモデル化を行うことが課題である。

#### 参考文献

- 1) 防災科学技術研究所 K-NET : <http://www.k-net.bosai.go.jp/>
- 2) 建築研究所：平成 20 年岩手・宮城内陸地震建築物被害調査報告会資料、2008.8.26
- 3) 脇山善夫他：学校体育館の振動特性調査、その 1 調査の背景と概要、日本建築学会大会学術講演梗概集、B-2、pp.585-586、2009.8
- 4) 建築工事標準仕様書 JASS17 ガラス工事