

## 学校体育館の振動特性調査



渡壁 守正<sup>\*1</sup>

藤堂 正喜<sup>\*1</sup> 稲井 慎介<sup>\*1</sup>  
石岡 拓<sup>\*1</sup>

### 概 要

本報告では、大規模空間の振動特性を定量的に把握することを目的に、屋根形状の異なるふたつの体育館（寄棟屋根、切妻屋根）を対象として、振動測定および解析を実施し、得られた知見について紹介する。主に大規模空間の天井脱落に関する耐震対策の検討を想定して、それぞれの体育館において常時微動測定と強制加振実験を実施し、その結果をもとに解析モデルの妥当性を検討する。測定および解析結果から、各体育館の固有振動数や固有モード、減衰などの振動特性を把握し、水平入力動によって山形ラーメン梁中央部の上下動が大きく増幅する可能性があることを定量的に確認している。また、過去に地震により天井材が脱落した寄棟屋根の体育館においては、脱落箇所が一次固有振動モードの腹に当たる箇所である可能性を示している。

### INVESTIGATION OF OSCILLATORY PROPERTIES OF SCHOOL GYMNASIUMS

Morimasa WATAKABE<sup>\*1</sup> Masanobu TOHDO<sup>\*1</sup>  
Shinsuke INAI<sup>\*1</sup> Taku ISHIOKA<sup>\*1</sup>

In this paper, oscillatory properties of two school gymnasiums are investigated based on microtremor observation, forced vibration tests and seismic observation. The roof forms of the gymnasiums are different, one is a hip roof and the other is a gable roof. At each gymnasium, influences of the roof forms on the natural frequency or damping ratio, etc. are investigated. And using the observation and tests results, the validity of the dynamic analysis model is discussed.

<sup>\*1</sup> 技術研究所

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

# 学校体育館の振動特性調査

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

## 1. はじめに

近年の地震では構造体の耐震性の向上もあり建築物の構造体の被害報告は比較的少ないものの、非構造部材について、体育館等の大規模空間建築の地震被害が多く報告されている。特に大規模空間に設置される天井については、2001年芸予地震<sup>13)</sup>、2003年十勝沖地震<sup>4)</sup>、2005年8月16日の宮城県沖の地震<sup>5)</sup>の際に比較的大面積での脱落被害が報告されている。非構造部材の損傷は場合によっては建築物の継続使用に影響を与え、脱落すると人身に危害を及ぼすことも考えられる。建築物の内装材については建築基準法施行令第39条の規定があり、技術的助言により対策の方向性が示されているものの、具体的な仕様や設計方法などは必ずしも明確にされていないため、具体化のための検討が必要とされている<sup>6)</sup>。

非構造部材の耐震対策を検討するにあたっては、非構造部材自体の耐震性の検討を行うことは言うまでもなく、必要に応じて構造体の挙動を含めた建物全体の耐震性、応答特性を踏まえて検討することも必要と考える。今回の調査は主に大規模空間の天井脱落に関する耐震対策の検討の一環として、実建築物の振動特性の計測を実施した。写真-1のように勾配屋根中途付近の下部で天井が脱落した被害例<sup>1)</sup>もあり、構造体の応答による影響も想定される。このような天井等の非構造部材の地震被害要因や耐震対策を考える上で構造体の振動特性を把握しておくことは有用である。

本報告では、大規模空間の振動特性を定量的に把握することを目的として、写真-2に示す寄棟屋根の体育館Aと写真-3に示す切妻屋根の体育館Bの2棟の異なる屋根形状を持つ体育館を対象に、微振動測定および強制加振実験、地震応答解析を実施し、得られた知見について報告する。

## 2. 対象建物概要

寄棟屋根の体育館Aは、1989年に竣工した広島県内の小学校体育館である。構造種別は、1階が鉄筋コンクリート造、2階が鉄骨鉄筋コンクリート造、屋根は鉄骨造の寄棟である。スパンは張間方向で26m、桁行方向で40m、天井高さは頂部で13m、端部で8m、屋根勾配は約30°である。本体育館は2001年芸予地震において、天井（在来天井、せっこうボード+吸音板+吸音材）の一部が落下する被害を受けている。現在は、天井仕様をせっこうボード直張りに変更して修復されており、天井のふところ深さは約0.7mである。

切妻屋根の体育館Bは、1973年に竣工した茨城県



写真-1 天井材の脱落<sup>1)</sup>



写真-2 体育館A 外観



写真-3 体育館B 外観

内の高校体育館であり、1998年には耐震改修が行われている。

構造種別は、1階が鉄筋コンクリート造、2階が鉄骨造、屋根は鉄骨造の切妻である。スパンは張間方向で32.6m、桁行方向で38m、天井高さは頂部で10.7m、端部で7.5m、屋根勾配は約11°である。天井は有孔ラワン合板目透かし張りの在来工法であり、天井のふ

<sup>\*1</sup> 技術研究所

ところ深さは頂部付近で約1.3mである。なお、構造的な特徴として、2～3通りおよび6～7通りの柱は、それぞれの通りの間で剛性の高い梁によって桁行方向に連結されている。(通り番号は図-1(b)参照)

### 3. 常時微動測定・強制加振実験

#### 3.1 測定・加振概要

体育館 A,Bにおいて常時微動測定後に、起振器による強制加振実験を実施する。両測定時とも、主に固有振動数と固有モード形状、減衰の確認を目的としている。

測定状況を写真-4に示す。測定は体育館内に仮設足場を設置して、測定点付近の天井板を一時的に取り外した状態で行い、加速度センサーは屋根を支持する大梁に取り付ける。大梁には屋根形状に合わせた勾配があり、専用の治具を用いてセンサーが水平または鉛直になるように設置する。測定にはサーボ型加速度センサーを用い、サンプリング周波数は体育館 Aで150Hz、体育館 Bで256Hzとする。

体育館 Aと体育館 Bにおける代表的な測定点を図-1に示す。体育館 Aでは、張間方向である5通りに集中して測定点を設定し、張間方向および上下方向のモード形状を把握することを目的としている。体育館 Bでは、体育館 Aと同様に、張間方向である3通りに集中して測定点を設定し、張間方向および上下方向のモード形状を把握するとともに、平面的に測定点を分散させて屋根面の面的なモード形状も把握することを目的としている。また、両体育館において天井の固有振動数を確認するために、梁中央部と頂部の野縁の張間方向および上下方向に測定点を設定した。

強制加振に用いた起振器の設置状況を写真-5に示す。加振は、加振力500Nの電磁式起振器2台を用いて、加振方向に合わせて起振器を盛り替えて実施する。起振器は、体育館 Aでは5通り頂部に2台まとめて設置し、体育館 Bでは3通りと6通り頂部に1台ずつ設置し、並進および上下加振を実施する。

加振波は、振幅一定で振動数を連続的に上げていく線形スイープ波と、線形スイープ波加振から得られる固有振動数を用いた正弦波加振とする。線形スイープ波の振動数範囲は、体育館 Aで1Hz～15Hz(天井固有振動数確認時は1Hz～25Hz)、体育館 Bで1Hz～20Hz(天井固有振動数確認時は1Hz～25Hz)とし、測定時間はそれぞれ300秒と400秒とする。また、減衰を求めるために強制加振後に自由振動波形を測定する。

#### 3.2 固有振動数・固有モード形状

強制加振実験、常時微動測定より推定した一次固有振動数の一覧を表-1に、張間方向への強制加振実験より求めた、張間方向および上下方向の頂部と梁中央部のアクセランス(各点の加速度/起振器2台による加振力)を図-2にそれぞれ示す。張間方向加振時の張間方向および上下方向のアクセランスを図-2(a)、(b)に、桁行方向加振時の桁行方向のアクセランスを図-2(c)に、上下方向加振時の上下方向



(a) 体育館 A (b) 体育館 B  
写真-4 測定状況

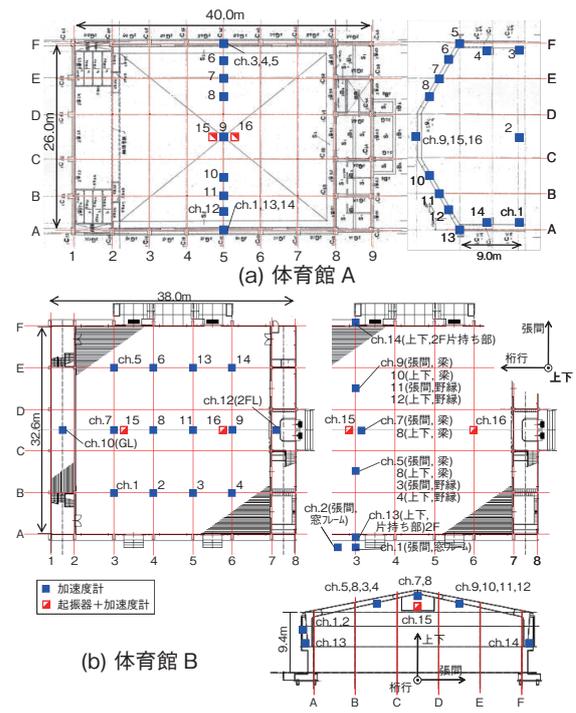
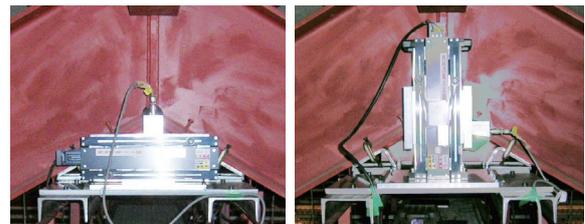


図-1 測点図



(a) 水平加振時 (b) 上下加振時  
写真-5 起振器設置状況

表-1 固有振動数

測定条件	体育館 A			体育館 B			
	張間方向	桁行方向	上下方向	張間方向	桁行方向	上下 (1次)	上下 (2次)
強制加振	4.5	6.4	5.6	4.0	4.4	3.6	5.4
常時微動	4.6	6.6	5.6	3.8	4.3	3.6	5.3

(単位: Hz)

のアクセランスを図-2(d)にそれぞれ示す。張間方向加振時の張間方向アクセランスは、体育館 A、Bともに梁中央と頂部でほぼ同様な増幅特性を示す。張間方向加振時の上下方向アクセランスは、梁中央部では水平方向と同じ振動数でピークが確認できる。

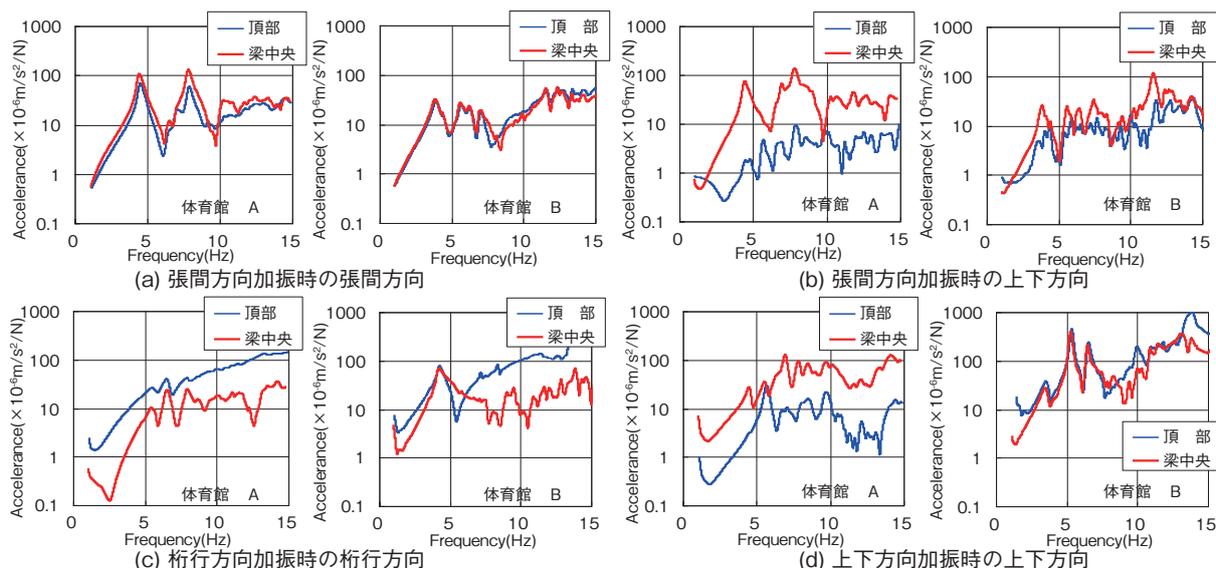


図-2 頂部および梁中央部のアクセラランス

梁中央部のアクセラランスは、頂部のそれに比べ大きくなっており、梁中央部では上下応答加速度が大きく増幅されることを示している。桁行方向加振時の桁行方向アクセラランスは、体育館 A において張間方向と比較すると頂部、梁中央ともに小さい結果である。また、上下方向加振時の上下方向アクセラランスでは体育館 A で 5.6Hz、体育館 B で 3.6Hz に一次のピークが確認できた。

次に強制加振時のフーリエスペクトルから位相を考慮して求めたモード形状を図-3に示す。体育館 A は、水平と上下の同時測定を行っていないため、水平加振時の水平応答成分のみを示している。体育館 B は図-3 (a) で張間架構の一次モード形を、図-3 (b) では加振方向と同一方向の応答成分を面的に示している。

両体育館の張間方向の一次モード形では、梁中央部での変形が大きくなっており、特に水平と上下の同時測定をした体育館 B では梁中央部で上下方向の変形も大きくなるモードの特徴がとらえられている。

体育館 B においては、張間方向では3~6通りまではほぼ同じ挙動の並進一次モードであり、桁行方向では中央部が両端よりやや大きな変形となる並進一次モードである。上下方向は、一次モード振動数 3.6Hz では3~6通りまで同じ位相であり、二次モード振動数 5.3Hz では3.6通りに対して中央付近の 4.5 通りは逆位相になっている。

### 3.3 減衰定数

固有振動数による定常加振後の自由振動波形から減衰定数を推定する。減衰定数の振幅依存性を確認するために、体育館 A では頂部加速度が張間方向で最大 6gal、上下方向で最大 10gal となるまで段階的に加速度レベルを上げて加振した。桁行方向についてはスイープ加振結果から明確な固有振動数を判別できないため、定常加振は行わなかった。体育館 B では、張間方向で最大 2.2gal、桁行方向で最大 5.9gal、上下方向（一次）で最大 3.5gal、上下方向（2次）で最大

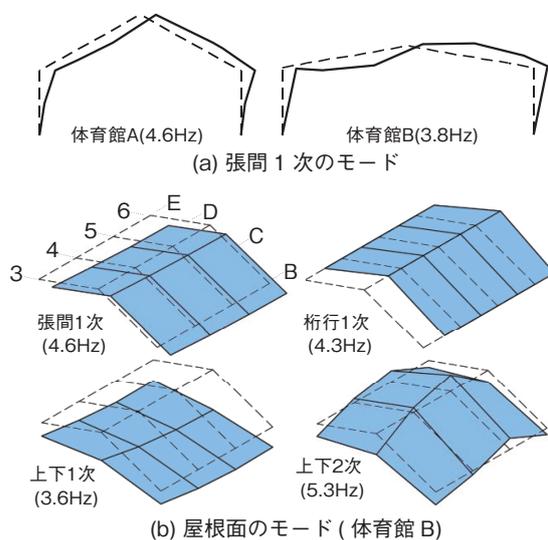


図-3 固有モード図

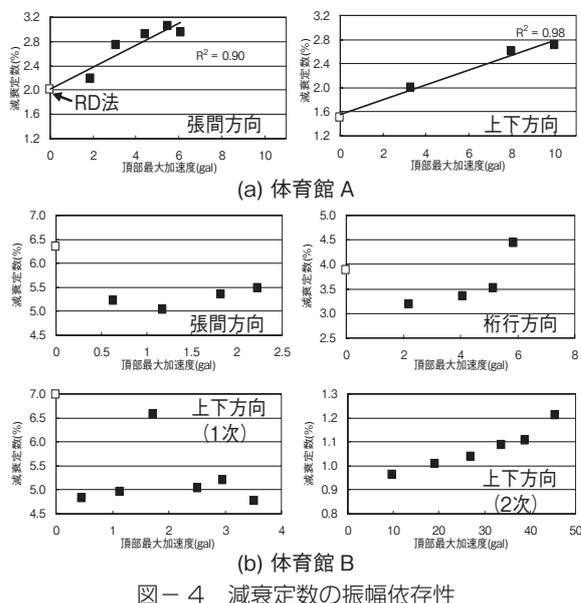


図-4 減衰定数の振幅依存性

46gal となるまで加振している。最大加速度と減衰定数の関係を図-4に示す。図中には、長時間の常時微動測定結果からRD法により求めた一次固有振動数における減衰定数をあわせて示す。

体育館Aにおいて、常時微動レベルでの減衰定数は、張間方向で約2%、桁行方向で1.8%、上下方向で1.5%である。張間方向、上下方向とも加速度レベルが大きくなるにしたがい、減衰定数も大きくなる明確な振幅依存性が確認でき、それぞれ最大加振レベルでの減衰定数は3%程度である。

体育館Bにおける減衰定数は、張間方向で5.0~6.4%、桁行方向で3.2~4.4%、上下方向の一次で4.8%~7.0%、二次で1.0%~1.2%である。上下方向の二次の固有振動数では加速度レベルが大きくなるにしたがって減衰定数が大きくなる明瞭な振幅依存性を確認できるが、各方向の一次固有振動数ではばらつきが大きい。

### 3.4 天井の固有振動数

天井板を支える野縁とその直上の梁の張間方向加振時のアクセランスを図-5に示す。体育館Aの上下方向のアクセランス（上下応答/起振器2台による張間方向加振力）については、明確な固有振動数が認められないため図示していない。

両体育館とも野縁と梁はほぼ同様の挙動を示しているが、体育館Aの張間方向では14Hz付近においてわずかに野縁の振動が増幅している。体育館Bの張間方向では9~10Hzの帯域で野縁部分のみが大きく増幅しており、天井の水平方向の固有振動数であると推測される。また、体育館Bの上下方向では20Hzを超える振動数帯で野縁部分のみが増幅している。今後、解析的検討を含めて詳細に分析する必要がある。

## 4. 立体地震応答解析

### 4.1 解析概要

解析モデルは、図-6に示す三次元FEMモデルであり、RC造およびSRC造の柱、梁は梁要素、RC壁、床、ギャラリーは板要素、鉄骨屋根は梁要素とトラス要素としてモデル化している。

入力地震動は、2001年芸予地震において体育館Aの近隣で観測された記録波形であり、その最大加速度はNS成分で357.9gal、EW成分で830.4gal、UD成分で178.1galである。これらの地震波の加速度応答スペクトル ( $h = 0.03$ ) を図-7に示す。観測された地震動のNS成分、EW成分の加速度応答値は、0.1~0.3秒の短周期領域において非常に大きな値になっている。体育館への入力は、張間方向にNS成分、桁行方向にEW成分、上下方向にUD成分の地震動をそれぞれ入力する。地震応答解析では直接積分法(Newmark  $\beta$  法  $\beta = 0.25$ ) を用い、減衰は実測結果に基づいて3%とし、剛性比例型で設定する。応答解析における地震動継続時間は50秒とし、数値積分の時間間隔は0.01秒とする。

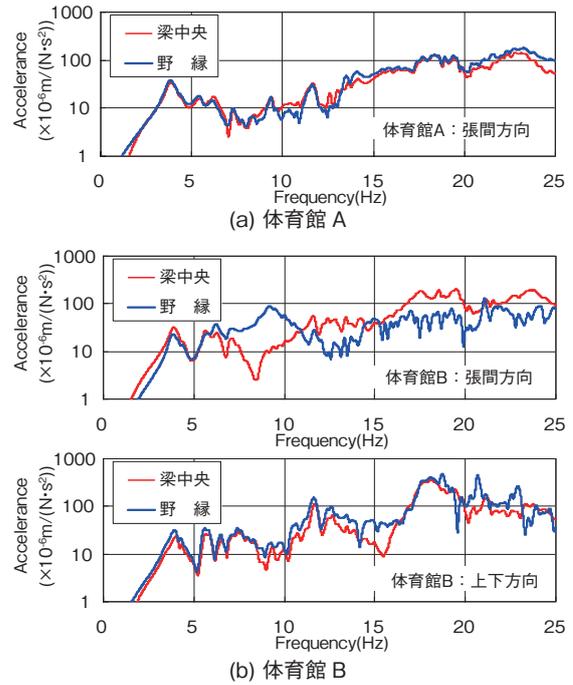


図-5 梁中央部と野縁のアクセランス

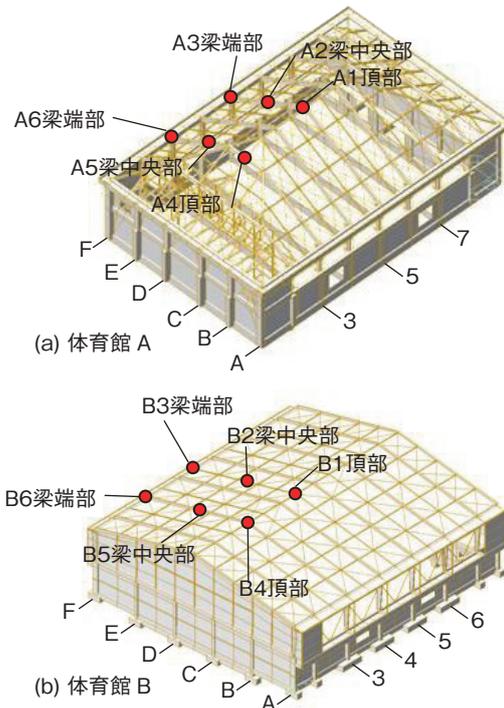


図-6 解析モデルおよび主要な節点番号

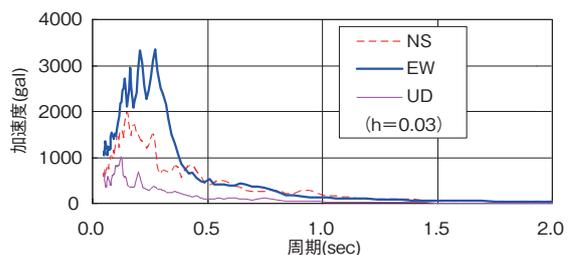


図-7 2001年芸予地震の加速度応答スペクトル

表-2 固有振動数

測定条件	体育館 A			体育館 B		
	張間 方向	桁行 方向	上下 方向	張間 方向	桁行 方向	上下 方向
実測値 (Hz)	4.6	6.6	5.6	3.8	4.3	3.6
解析値/実測	1.04	1.00	0.98	1.00	0.98	0.97

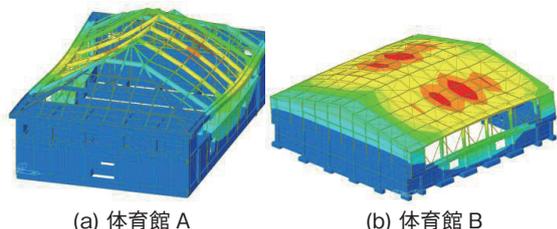


図-8 固有モード形状

### 4.2 固有値解析結果

固有値解析結果と実測結果との比較を表-2に、体育館 A,Bそれぞれの体育館全体としての張間方向並進一次の固有モード形状を図-8にそれぞれ示す。体育館 A,Bともに解析モデルの一次固有振動数は、実測結果とよく整合していることがわかる。また、体育館中央部屋根の山形ラーメン梁中央部で変形が最も大きくなる様子がわかる。

### 4.3 地震応答解析結果

地震応答解析の加速度応答時刻歴の一例として、体育館 Aにおいて張間方向のみに入力したときの張間方向と上下方向の結果を図-9に示す。図中の節点番号は図-6に併せて示している。3通りに比べ、5通りの応答が大きくなっている。5通りの張間方向の加速度は、梁中央のA2が、A1、A3に比べ大きく、A2点の最大加速度は3200galである。また、上下方向は、A2では2000gal以上であるが、A1、A3では小さい。図-10はA2点の張間方向と上下方向の加速度記録の加速度応答スペクトルである ( $h = 0.03$ )。0.2秒(構造体の張間方向の一次固有振動数)付近にピークがあり、この周期では非常に大きな応答加速度が生じる可能性があることがわかる。また、この体育館の天井部分の固有振動数は、実測結果から14Hz(0.07秒)と推定されており、同図から天井部分では4000gal程度の加速度応答が生じる可能性がある。

体育館 A、Bにおける入力地震動と梁の各点(頂部A1,B1、梁中央A2,B2、梁端部A3,B3)の応答加速度のスペクトル比(伝達率)を図-11に示す。本スペクトルの算出において、張間方向および桁行方向入力時にはそれぞれの入力方向と上下方向の応答結果を用い、上下方向入力時には張間方向と上下方向の応答結果を用いている。

体育館 Aにおいて、張間方向入力時には張間方向の1次固有振動数4.8Hz付近で、張間方向の伝達率は3点とも同程度であるが、上下方向では梁中央のA2の値が大きくなっている。また、桁行方向入力時には桁行方向の一次固有振動数6.6Hz付近で、桁行方向の伝達率はA1、A2で同程度であるが、梁端部のA3ではそれほど大きくない。上下方向入力時には

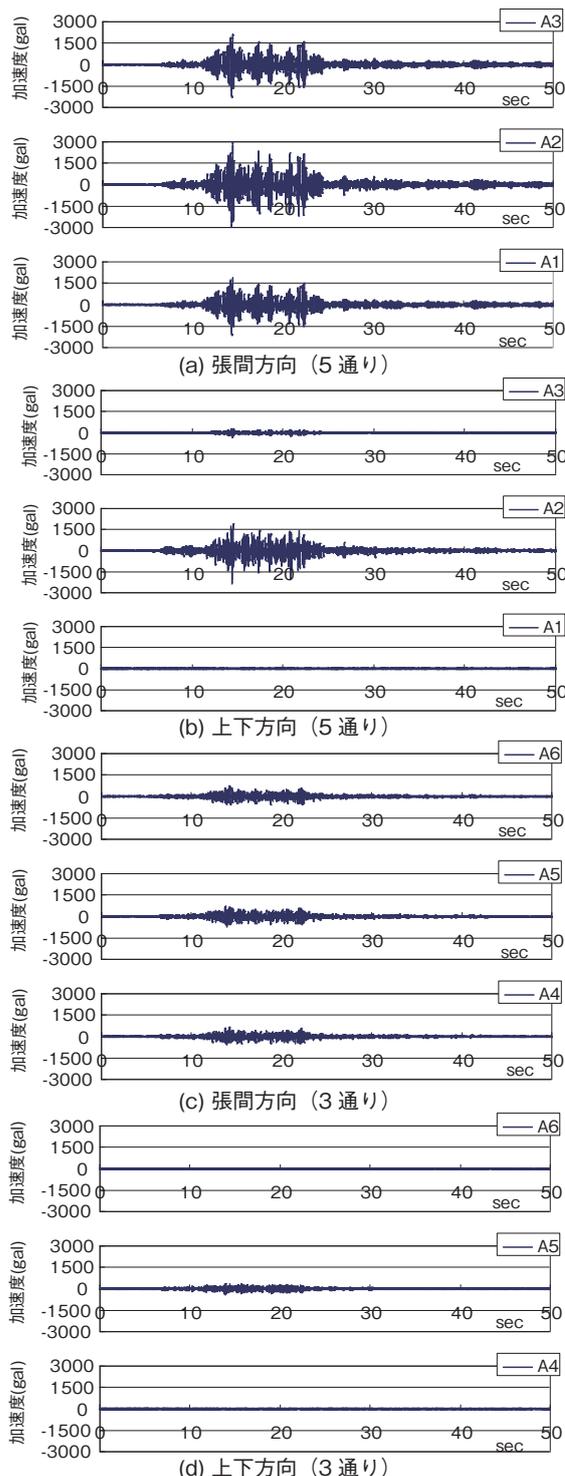


図-9 張間方向入力時の加速度時刻歴(体育館 A)

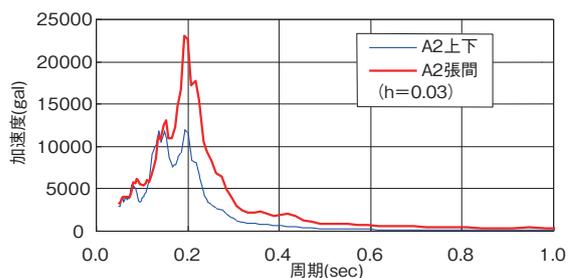


図-10 A2点の加速度記録の加速度応答スペクトル

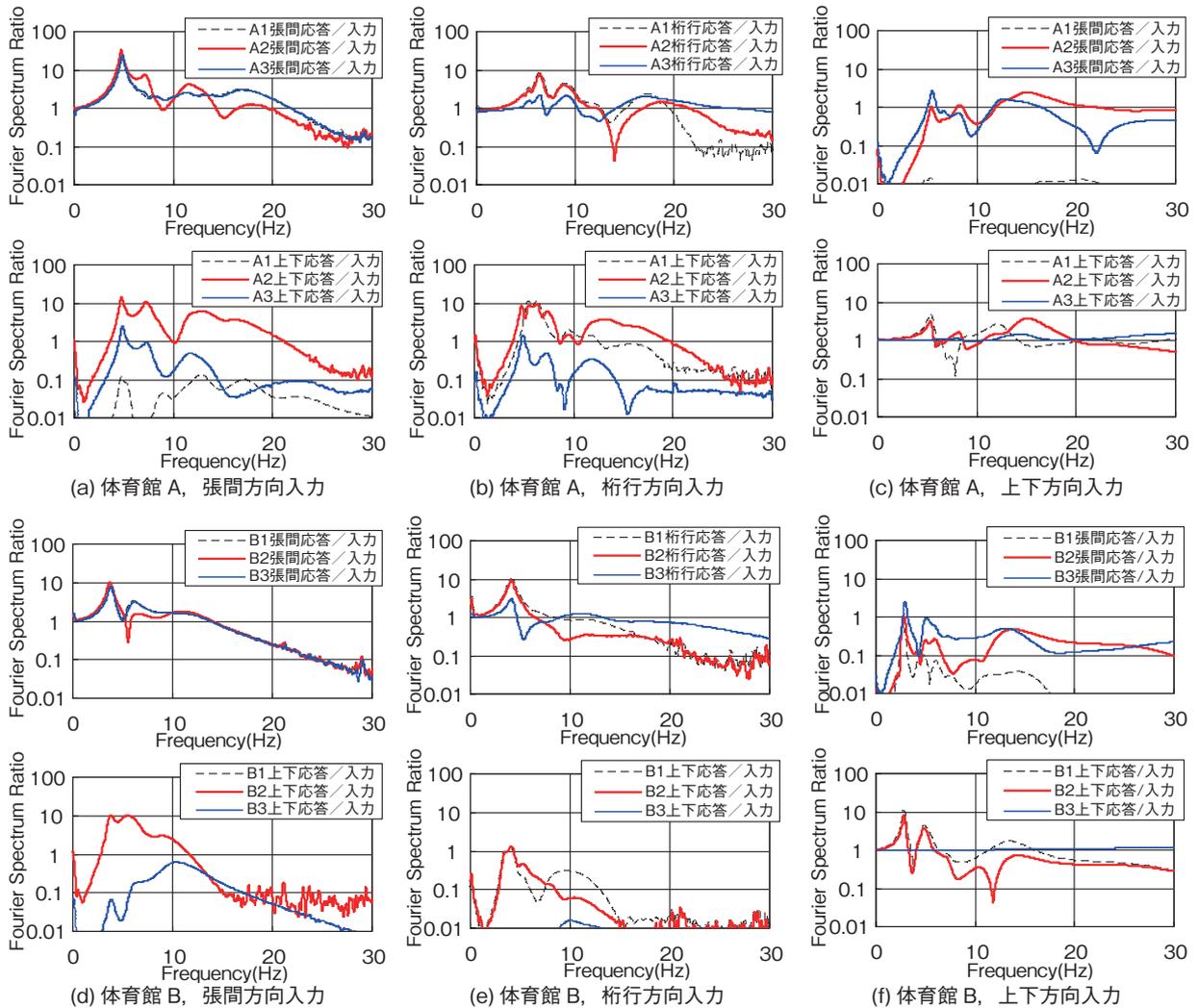


図 11 地震入力時の水平・上下方向の伝達率

張間方向では梁端部がわずかに増幅する程度で、上下動が水平方向の応答に与える影響は小さく、上下方向では上下の一次固有振動数で頂部と梁中央部でほぼ同じ伝達率となっている。

体育館 B においても体育館 A とほぼ同様の傾向がみられる。

## 5. まとめ

寄棟屋根の体育館 A と切妻屋根の体育館 B の振動測定および解析を行い、得られた知見を以下にまとめる。

- (1) 各体育館の固有振動数、固有モード、減衰などの振動特性を定量的に把握した。
- (2) 水平入力動により、山形ラーメン梁中央部の上下動が大きく増幅する可能性があることを定量的に確認した。
- (3) 実測と解析結果を比較し、解析モデルの妥当性を確認した。
- (4) 地震被害を受けた体育館 A の天井の脱落は、実測や解析により求めた一次固有振動モードの腹にあたる箇所において生じている可能性のあることが確認できた。

## 謝辞

応答解析に用いた地震動は広島県よりご提供いただいた震度計波形データである。また、本研究は(独)建築研究所、戸田建設(株)、西松建設(株)および(財)日本建築センターの共同研究として、平成 20 年度国土交通省建築基準整備促進補助金事業により実施したものである。記して、関係各位に心より感謝申し上げる。

## 参考文献

- 1) 腰原幹雄：芸予地震における建物の被害，建築技術，pp.194-197，2001.7
- 2) 日本建築学会：2000 年鳥取県西部地震災害調査報告・2001 年芸予地震災害調査報告，2001.10
- 3) 西山功，伊藤弘，西田和生，梁一承：芸予地震による体育館天井の落下被害の調査とその対策，日本建築学会技術報告集，pp.367-372，2002.12
- 4) 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：2003 年十勝沖地震における空港ターミナルビル等の天井の被害に関する現地調査報告，2003.10
- 5) 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：スポパーク松森における天井落下事故調査報告－大空間を有するスポーツ等施設の天井落下－，2005.8
- 6) 国土交通省住宅局建築指導課：平成 20 年度建築基準整備促進補助金事業募集要領，2008.8

