

# クロスアーチ架構とケーブル併設型骨組膜構造の 振動特性および減衰定数に関する測定報告

大竹克浩\*1

屋内プール屋根に鋼管、膜材料B種、ケーブルで構成したクロスアーチ架構と骨組膜構造を設計した。膜材料B種の減衰特性を計測する為、膜の展張前後でクロスアーチ鉄骨構造に対して常時微振動計測とハンマー打撃加振計測を実施した。膜展張前の計測結果の一次固有振動数は約 11.05 Hz となった。RD 法により減衰定数を推定した結果、減衰定数は最大 1.72% であった。膜初期張力導入後は、固有振動数 12.80 Hz で減衰定数は最大 4.85 % であった。さらに、地震時応答計測、風荷重時応答計測を実施し、振動特性および減衰定数に関する検討を行った。

## 1. はじめに

本プロジェクトは屋内プールを建設する計画である。本計画において、施主より、「太陽光によるプールの温熱効果」、「明るく開放的な大空間の実現」の2点が要求された。この要求に対し、鋼管を用いたクロスアーチ架構と透光性に優れた膜材料B種とケーブルを併設した骨組膜構造として構造計画を行った。写真1に内観写真を示す。

施工中に膜展張前のクロスアーチ架構単独の鉄骨構造における常時微振動計測およびハンマー打撃加振計測を実施した。さらに、膜展張後のクロスアーチ架構の鉄骨構造と膜構造における常時微振動計測およびハンマー打撃加振計測を実施した。

本稿は参考文献 7,8,9)の内容を発展させ膜展張後の解析を追加したものである。明るく開放的な大空間の実現を行ったクロスアーチ架構と膜構造の構造計画と常時微振動、ハンマー打撃加振、地震時応答、風荷重時応答計測の結果として、固有振動数・減衰定数に関して報告する。



写真1 内観写真

## 2. 構造計画

図1に構造架構図、図2に屋根架構図を示す。スパン方向 13.8m、桁行方向 30m、ライズ 2m とした。膜屋根を支持する鉄骨フレームは曲率半径 9.6m の円弧形状アーチを傾斜し、スパン中央で接合するクロスアーチ架構とした。クロスアーチ架構を 5m 間隔で配置し、下部構造の柱位置をアンカーボルトで接合した。両妻面下部にスラスト力処理用のつなぎ梁を設置した。各々のアーチの脚部とスパン中央部で接合する架構であり、地震荷重や風荷重を立体的に処理する事を意図し、屋根面ブレースを不要とする架構システムである。クロスアーチ架構は外径 190.7mm の鋼管を用いた。立体的に取り合う接合部における溶接線干渉を回避する為、外周梁は外径 216.3mm の鋼管を用いた。

太陽光の透過性に配慮して、膜材は膜材料B種(CMX-220)

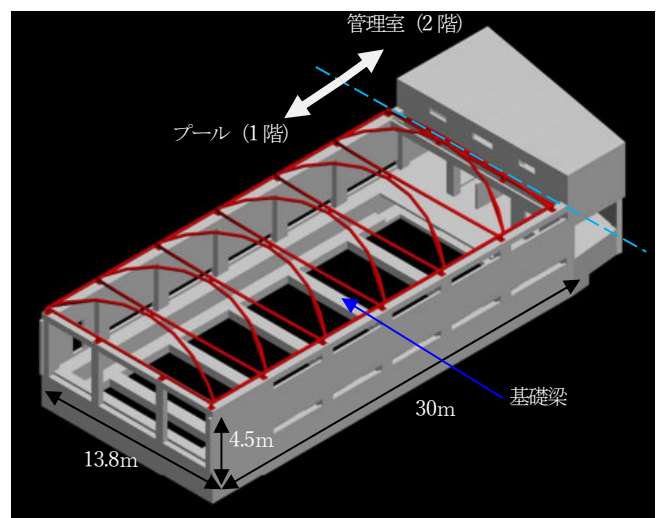


図1 構造架構図

\*1 大成建設株式会社

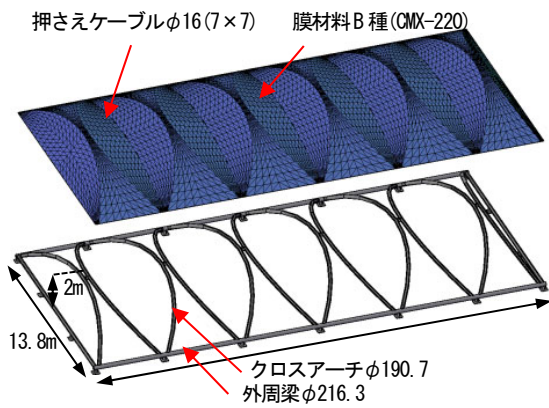


図2 屋根架構図

表1 使用材料

鉄骨材料	ヤング係数 N/mm <sup>2</sup>	せん断弾性係数 N/mm <sup>2</sup>	ポアソン比	線膨張係数 1/°C
鋼材	$2.05 \times 10^5$	$0.79 \times 10^5$	0.3	$1.2 \times 10^{-5}$

膜材	引張剛性 $E_t$	ポアソン比 $\mu$	せん断剛性 $G_t$	自重 $W$
タテ糸	2120 kN/m	0.59	14.3kN/m	7.7 N/m <sup>2</sup>
ヨコ糸	1340 kN/m	0.37		

ケーブル材料	有効断面積 $A_e$ [mm <sup>2</sup> ]	破断荷重 $T_p$ [kN]	基準強度 $F$ [N/mm <sup>2</sup> ]	自重 $W$
構造用ストランドロープ 7×7 16φ (ST1570)	125	176	704	10.1 N/m

を採用した。風吹き上げ時の膜のばたつきをおさえる為、クロスアーチ架構中間部に押さえケーブルを併設した。ケーブル断面は、風荷重時の吹き上げ荷重に対する膜材の引張応力および変形制御に必要な剛性により外径16mmとした。

### 3. 使用材料

表1に使用材料一覧を示す。鋼管はSTK400を使用した。膜材料はフックの法則が成立する直交異方性材料とした。膜材料のタテ糸方向は桁行方向、ヨコ糸方向はスパン方向に設定した。ケーブル材は構造用ストランドロープ7×7、ST1570を使用した。

### 4. クロスアーチ架構解析

クロスアーチ架構を有限要素法を用いて解析を行った。図3-1に長期、図3-2に積雪荷重時、図3-3に風荷重時の解析結果を示す。積雪荷重は0.6kN/m<sup>2</sup>(等分布)、風荷重は速度圧1.0kN/m<sup>2</sup>、風力係数を-1.0と設定し解析を行った。

長期荷重時は、最大で変形量2.1mm、圧縮軸力5.8kN、鉛直方向曲げモーメント2.0kNm、積雪荷重時は、最大で変形量5.7mm、圧縮軸力11.6kN、鉛直方向曲げモーメント3.8kNm、風荷重時は、最大で変形量13.6mm、引張軸力27.9kN、鉛直方向曲げモーメント9.2kNmとなった。

各荷重時の力の流れは、アーチに沿って軸力が流れ、鉛直方向(アーチ面内方向)曲げモーメントはアーチ端部でつり上る結果となった。変形量は風荷重時において最大13.6mmとなり、スパン比1/1000程度となった。

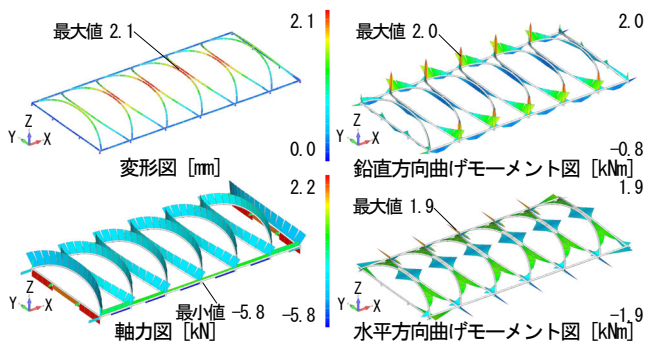


図3-1 鉄骨自重+仕上荷重 解析結果

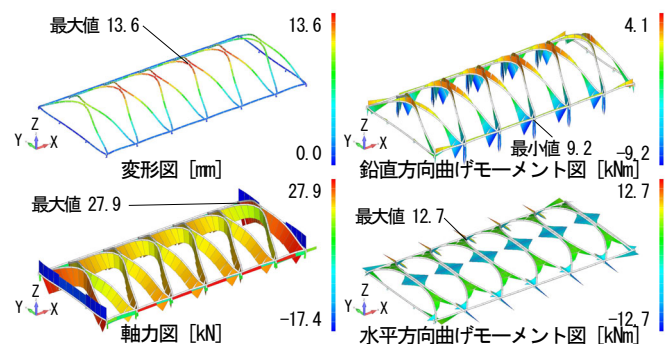


図3-3 風荷重時 解析結果

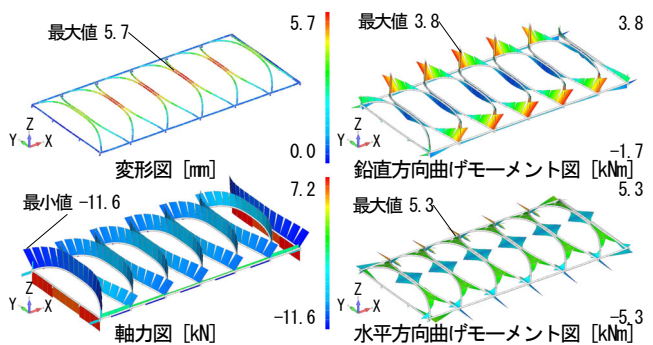


図3-2 積雪荷重時 解析結果

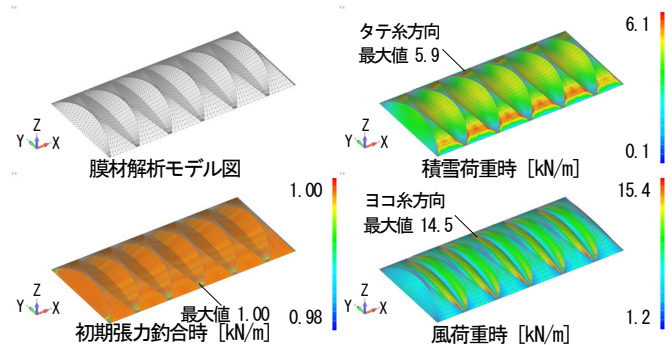


図4 膜材解析結果

## 5. 膜材解析

タテ糸、ヨコ糸方向の張力比を 1:1 の等張力曲面として、膜の形状解析を行った。膜材の初期張力をタテ糸、ヨコ糸方向共に 1.0kN/m とし、膜自重に対する釣合形状を算定する為、応力変形解析を実施した。この解析結果による釣合形状を初期モデルとし、静的な応力変形解析を行った。有限要素法により、荷重増分法、ニュートンラフソン法を組み合わせ、幾何学的非線形問題として解析を行った。膜材・ケーブル材は圧縮・曲げに抵抗しない非抗圧材料とした。膜面形状解析及び膜面応力変形解析は膜面を三角形平面要素、ケーブル材を線材要素として両者を複合した有限要素モデルを用いた。

膜材解析結果として Von Mises 応力図を図 4 に示す。初期釣合時の最大膜張力はタテ糸、ヨコ糸方向共に 1.0kN/m、積雪荷重時はタテ糸方向 5.9kN/m、ヨコ糸方向 3.5kN/m、風荷重時はタテ糸方向 7.4kN/m、ヨコ糸方向 14.5kN/m となった。ケーブルの最大張力は、初期釣合時 8.0kN、風荷重時 42.6kN となった。

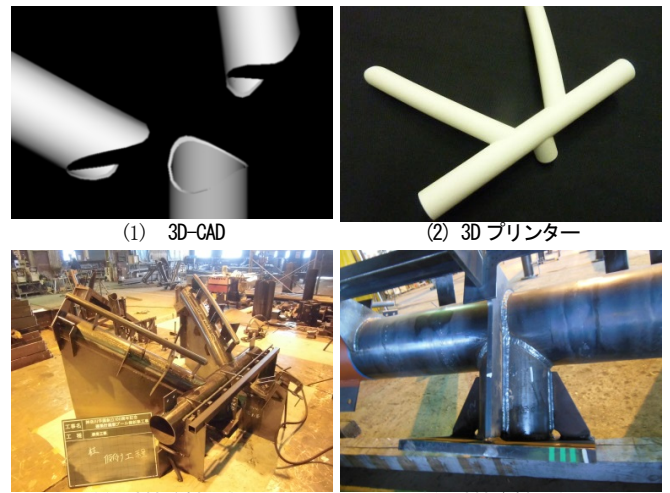
## 6. 鉄骨製作・鉄骨施工

鋼管断面については、3D-CAD や 3D プリンターを用いて鋼管接合部の溶接部の検討を行い、鋼管径を決定した。溶接については、全周隅肉溶接の耐力で溶接部の検討を行った。写真 2 に接合部を示す。接合部製作時は鋼管の架台を設置する事で接合部の品質を確保した。鋼管現場溶接部は突合せ溶接とした。クロスアーチの中央接合部はボルト接合とした。写真 3 にクロスアーチ架構の施工状況を示す。

## 7. クロスアーチ架構の振動計測

### 7-1. 常時微振動計測

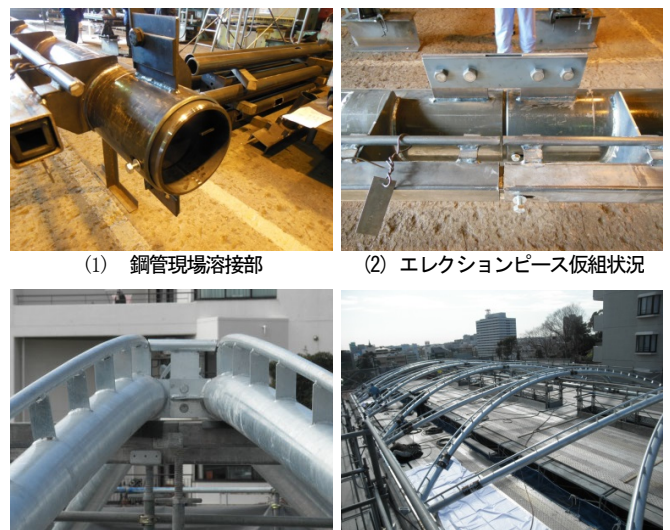
常時微振動計測は 2014 年 3 月 11 日から 3 月 12 日までの 12 時間実施した。本計測に使用した加速度センサーはサンシ



(1) 溶接前製作状況

(2) 溶接後製作状況

写真 2 接合部



(1) 鋼管現場溶接部

(2) エレクションピース仮組状況

(3) クロスアーチ中央接合部

(4) クロスアーチ全景

写真 3 クロスアーチ架構施工状況

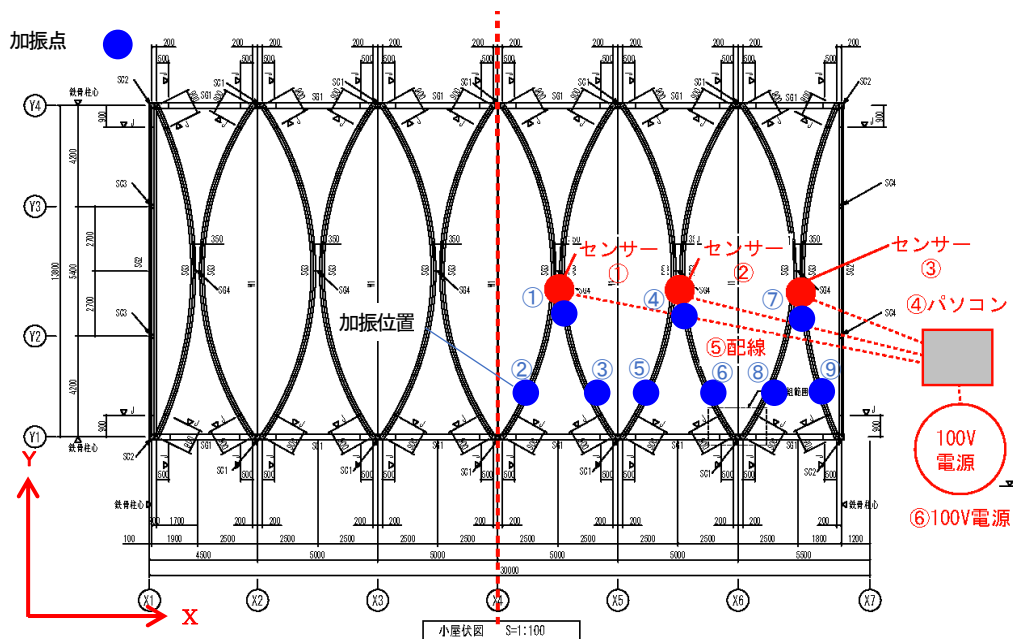


図 5 膜展張前加速度計測箇所



センサー仕様	
質量	2.1kg
電圧感度	2V/g ± 5%
計測範囲	± 3g (FS)

gは重力加速度を表し、  
g=979.800cm/sec<sup>2</sup> (東京)

写真4 加速度センサー固定状況 (センサー仕様)

計測はパソコンにより 10 分間毎に 200Hz サンプリングの時刻歴波形 72 個(6×12 時間)の記録を収集した。写真4に膜展張前の加速度センサー固定状況とセンサー仕様を示す。

### 7-2. クロスアーチ架構固有値解析

クロスアーチ架構の1ユニットを抽出し、有限要素法を用いて固有値解析を行った。1次から4次の結果を図6に示す。1次、3次はYZ平面で見て逆対称モード、2次はYZ平面で見て鉛直方向にたわむ1次モード、4次はXY平面で見て平面的なねじれモードであった。11Hz から 12Hz 近傍に複数のモードが有る結果となった。

### 7-3. 常時微振動計測結果

10分間時刻歴波形のフーリエスペクトルを計算し、チャンネル毎にアンサンブル平均した結果を図7に示す。膜展張前のフーリエスペクトルはチャンネル毎に明瞭なピークを有する。各センサーともアーチ直交方向(X方向)は10Hz付近、20Hz付近および30Hz付近に、アーチ方向(Y方向)は10Hz付近に、鉛直方向(Z方向)は10Hz付近および20Hz付近にピークが見られることから、減衰定数の推定はそれぞれの振動数帯域において行う。具体的には10Hz付近は9~12Hz、20Hz付近は20~22Hz、30Hz付近は29~31Hzとして、それぞれバンドパスフィルターをかけてRD法<sup>④</sup>により各10分間データの減衰定数を同定し、そのアンサンブル平均値を評価した。表2にその結果を示す。

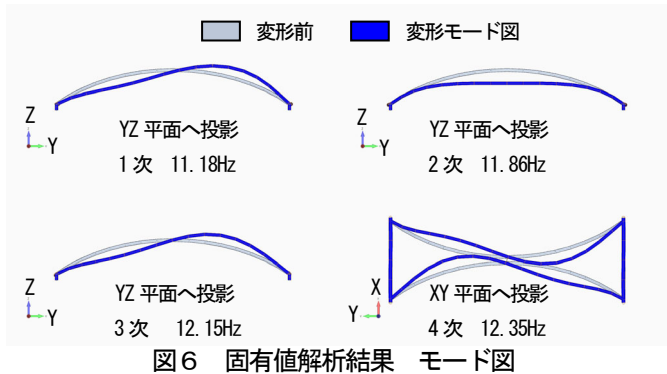


図6 固有値解析結果 モード図

表2 膜展張前の減衰定数の推定

センサー番号	方向	9~12Hz		20~22Hz		29~31Hz	
		振動数 (Hz)	減衰定数 (%)	振動数 (Hz)	減衰定数 (%)	振動数 (Hz)	減衰定数 (%)
センサー1	X	11.05	1.72	20.30	0.43	30.02	0.32
	Y	10.15	1.50	-	-	-	-
	Z	10.06	0.52	20.40	0.55	-	-
センサー2	X	11.09	0.98	20.35	0.38	30.09	0.37
	Y	10.10	1.29	-	-	-	-
	Z	10.07	1.54	20.39	0.59	-	-
センサー3	X	10.14	1.01	21.35	1.65	30.08	0.26
	Y	10.27	0.19	-	-	-	-
	Z	11.49	0.51	20.49	0.82	-	-

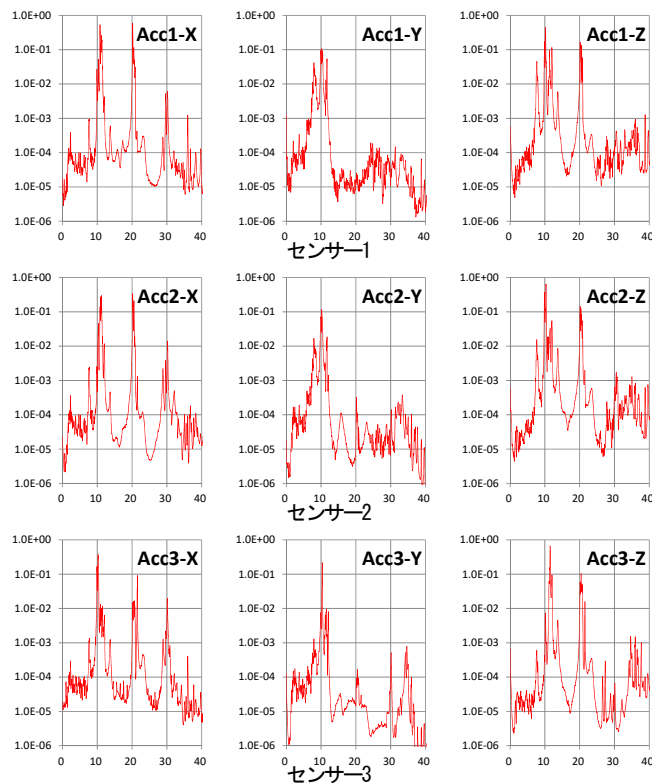


図7 膜展張前の加速度フーリエスペクトル

ステムサプライ製サーボ型加速度計 SS500 シリーズであり、施工中で計測時間が 12 時間と制約を受けており、センサー設置位置は施工に影響の無い図5に示すアーチ中央部3箇所とし、それぞれX,Y,Z方向成分の加速度を計測した。X方向アーチ直交方向、Y方向アーチ方向、Z方向鉛直方向とし、

### 7-4. ハンマー打撃加振および計測結果

常時微振動計測の他、ハンマー打撃加振計測を実施した。センサー位置は図5に示す3箇所とし、加振位置は9箇所とした。加振は加振位置において上部よりハンマー打撃による方法とした。計測結果の1例として図8に加振位置①を加振した場合のセンサー1におけるX方向の加速度時刻歴波形を示す。計測で得られた時刻歴波形からフーリエスペクトルを計算した結果、常時微振動計測結果と同等の結果となった。

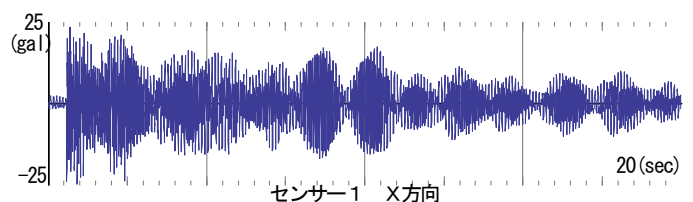


図8 加振位置①の加速度時刻歴波形 (センサー1)

## 8. 膜構造・ケーブル構造施工

膜構造の初期張力導入方法はおさえケーブルに初期張力を導入する方法とした。ケーブル初期張力は、膜の短手方向の水勾配を配慮し 9kN とした。初期張力/規格破断荷重=4.5%程度であるが、予めプレストレス加工を施し、素線同士の密着度を高め、ケーブルの剛性を確保する計画とした。ケーブル初期張力導入は片引き工法を採用した。ケーブルを固定端と緊張端に分類し、緊張端側に油圧ジャッキをセットし5本のケーブルを同時に緊張し、初期張力を導入した。写真5に油圧ジャッキ設置状況、油圧ポンプ、固定端、展張後の膜の状況を示す。

このようにおさえケーブルに初期張力を導入することで、膜面に初期張力を導入し、形状解析通りの安定した形状が得られた。

## 9. 膜展張後の振動計測

### 9-1. 常時微振動計測および計測結果

膜構造・ケーブル構造施工（以下、膜展張とする）後の常時微振動計測は2014年4月4日から4月18日までの15日間実施した。図9に示す3箇所それぞれX,Y,Z方向成分の加速度を計測した。センサーは前半、後半で計測位置の盛替えを行った。センサー①は後半膜上部に設置した。加速度センサーと風向風速計の設置状況を後述する12章-写真6に示す。

10分間時刻歴波形のフーリエスペクトルを計算し、チャンネル毎にアンサンブル平均した結果を図10に示す。膜展張後のフーリエスペクトルはチャンネル毎に明瞭なピークが現れていない。膜展張後の減衰定数の推定は各チャンネルのピーク振動数±1Hzの範囲でバンドパスフィルターをかけてRD法<sup>⑥</sup>により各10分間データの減衰定数を同定し、そのアンサンブル平均値を評価した。表3にその結果を示す。

### 9-2. ハンマー打撃加振および計測結果

ハンマー打撃加振計測を実施した。センサー位置は図9に示す3箇所とし、加振位置は13箇所とした。加振は加振位置において下部よりハンマー打撃による方法とした。計測結

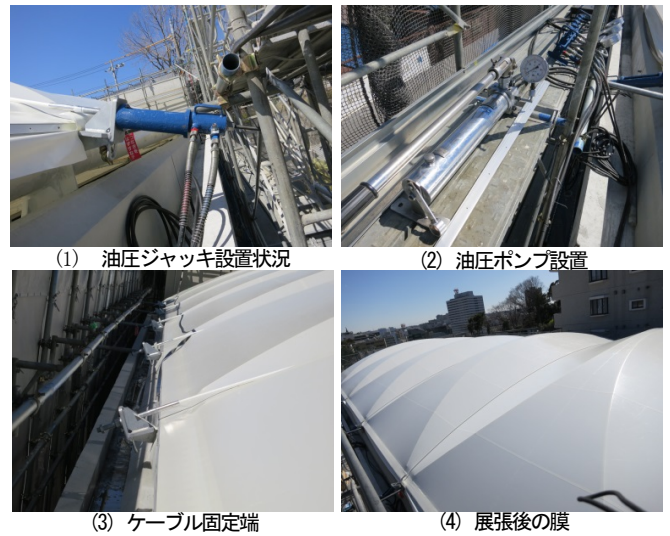


写真5 膜構造施工状況

表3 膜展張後の減衰定数の推定

Ch		バンドパス フィルター(Hz)	振動数 (Hz)	減衰定数 (%)
センサー1 (盛替前)	X	12.1~14.1	12.80	4.85
	Y	10.0~12.0	10.95	3.35
	Z	16.8~18.8	17.97	2.42
センサー1 (盛替後)	X	11.0~13.0	12.08	2.17
	Y	14.2~16.2	15.10	2.84
	Z	3.4~5.4	4.37	4.40
センサー2	X	17.3~19.3	18.03	2.46
	Y	17.3~19.3	18.20	2.28
	Z	17.4~19.4	18.41	2.07
センサー3	X	12.5~14.5	13.51	3.81
	Y	9.9~11.9	10.80	3.35
	Z	10.1~12.1	11.39	3.56

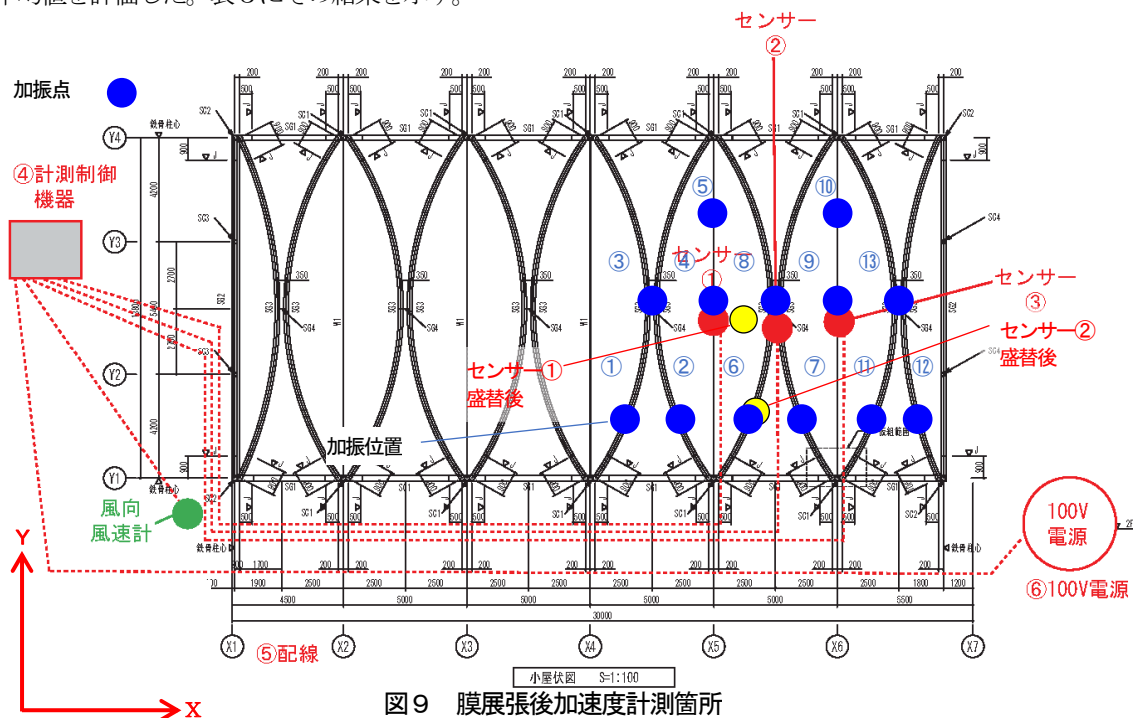


図9 膜展張後加速度計測箇所

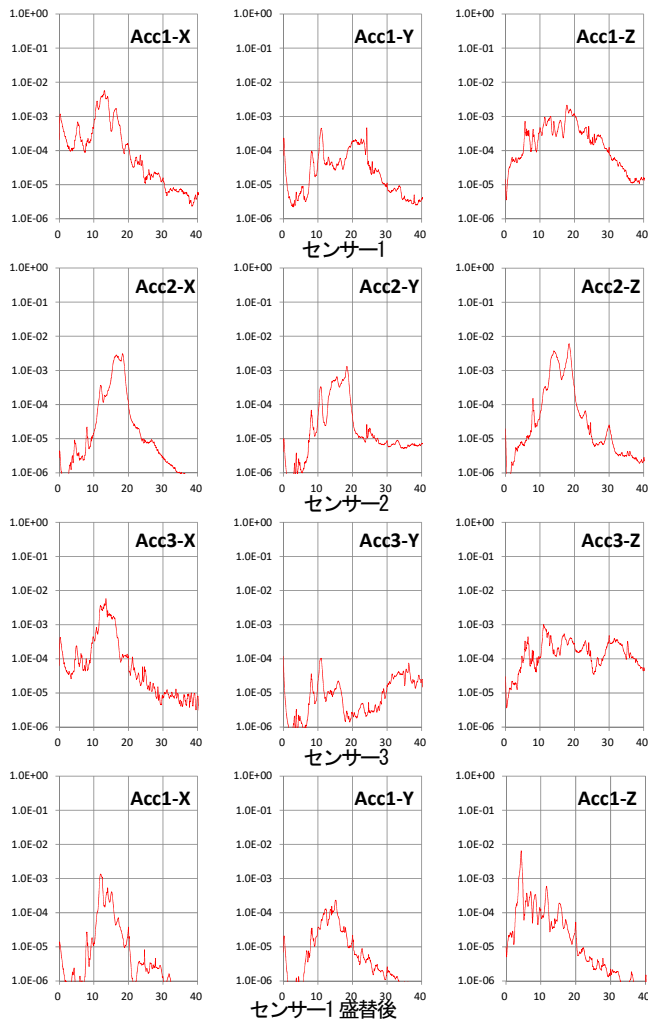


図 10 膜展張後の加速度フーリエスペクトル

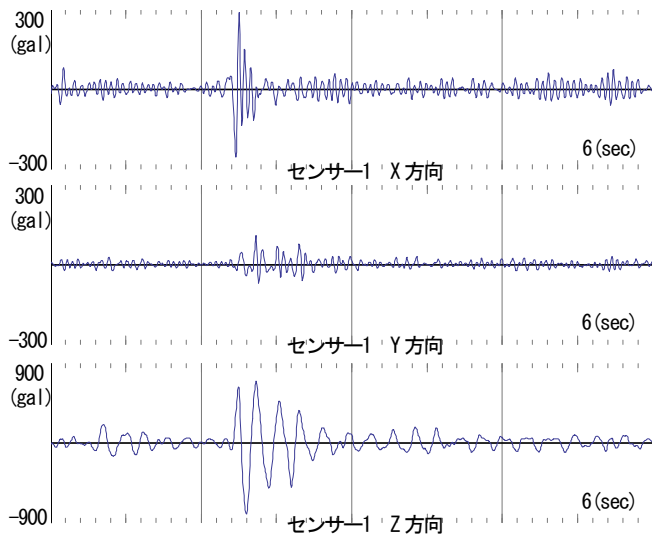


図 11 加振位置④の加速度時刻歴波形(センサー 1 盛替後)

果として図 11 に加振位置④を加振した場合のセンサー 1 における各方向の加速度時刻歴波形を示す。計測で得られた時刻歴波形からフーリエスペクトルを計算した結果を図 12 に示す。常時微振動計測と同様な傾向となった。

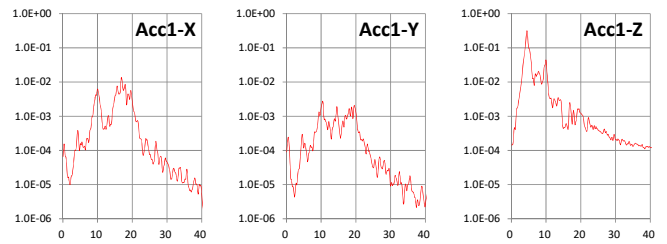


図 12 加振位置④の加速度フーリエスペクトル (センサー 1 盛替後)

## 10. 地震時応答計測

### 10-1. 抽出方法

常時微振動計測時に地震が発生した。地震発生時刻前後のデータを抽出し分析を実施する。

### 10-2. 膜展張前地震時応答計測結果

地震発生時刻：3月12日5時5分頃、震源：千葉県北西部、震度3または2の地震時の時刻歴波形を図13に示す。計測可能レンジを超過した部分はデータが欠損している。計測可能レンジを超過しているが、加速度が低減し始める5時5分31秒頃を始点とする時刻歴波形を対象に振動特性を評価した。図14に加速度フーリエスペクトルを示す。減衰定数は常時微動の場合と同様にそれぞれ9~12Hz, 20~22Hz, 29~31Hzのバンドパスフィルターを施したRD法<sup>6)</sup>により推定した。その結果を表4に示す。

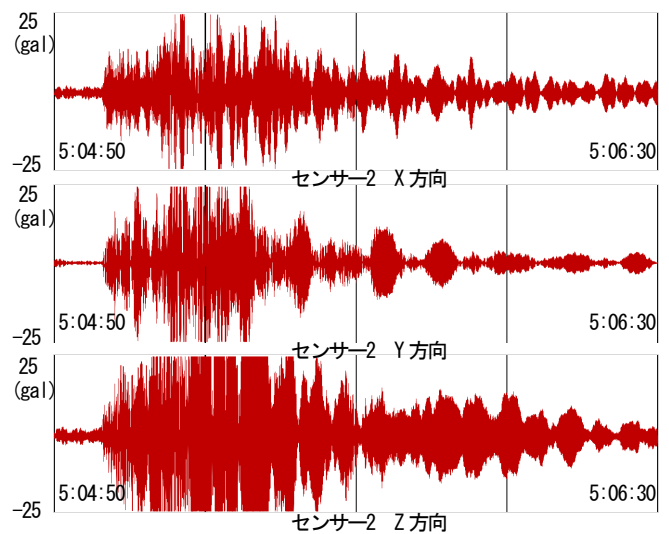


図 13 膜展張前の地震時の加速度時刻歴波形(センサー 2)

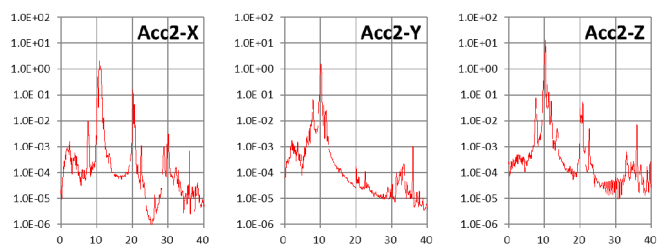


図 14 膜展張前の地震時の加速度フーリエスペクトル

表4 膜展張前の地震時の減衰定数の推定

センサー番号	バンドパスフィルター 方向	9~12Hz		20~22Hz		29~31Hz	
		振動数 (Hz)	減衰定数 (%)	振動数 (Hz)	減衰定数 (%)	振動数 (Hz)	減衰定数 (%)
センサー1	X	10.82	0.99	20.27	0.38	30.03	0.33
	Y	10.20	0.32	-	-	-	-
	Z	10.17	0.31	20.65	0.69	-	-
センサー2	X	11.02	1.40	20.30	0.37	30.06	0.54
	Y	10.24	0.56	-	-	-	-
	Z	10.30	0.40	20.58	0.80	-	-
センサー3	X	10.26	0.31	21.04	2.23	30.08	0.29
	Y	10.32	0.11	-	-	-	-
	Z	11.50	0.43	20.59	0.73	-	-

表5 膜展張後の地震時の減衰定数の推定

Ch	バンドパスフィルター(Hz)	振動数 (Hz)	減衰定数 (%)
センサー1 (膜上)	X	10.5~12.5	11.86
	Y	7~9	8.13
	Z	3~5	4.33
センサー2	X	15~17	16.08
	Y	7~9	8.07
	Z	7~9	7.94
センサー3	X	12~14	13.32
	Y	7~9	8.08
	Z	10.5~12.5	10.94

10-3. 膜展張後地震時応答計測結果

地震発生時刻:4月18日7時53分頃、震源:茨城県南部、震度2地震時の時刻歴波形を図15に示す。加速度が低減し始める7時53分26秒頃を始点とする時刻歴波形を対象に振動特性を評価した。図16に加速度フーリエスペクトルを示す。膜展張後のフーリエスペクトルはチャンネル毎に明瞭なピークが現れていない。膜展張後の減衰定数の推定は各チャンネルのピーク振動数±1Hzの範囲の振動数帯域においてバンドパスフィルターをかけRD法<sup>6)</sup>により減衰定数を同定した。その結果を表5に示す。

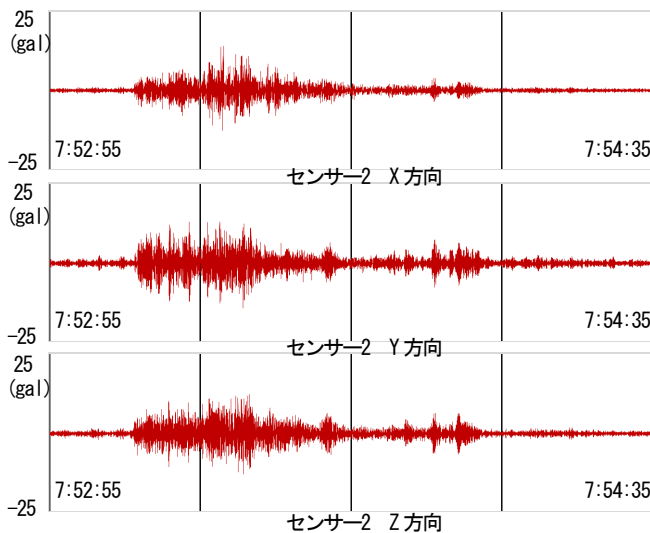


図15 膜展張後の地震時の加速度時刻歴波形(センサー2)

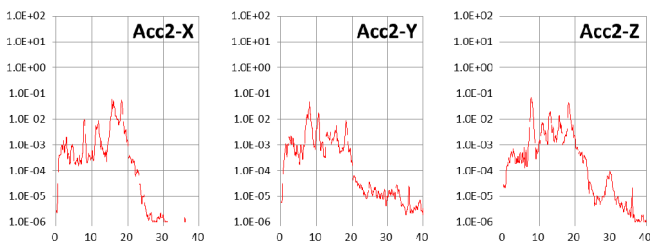


図16 膜展張後の地震時の加速度フーリエスペクトル

11. 膜展張後固有値解析

11-1. 固有値解析

クロスアーチ架構の間に配置される膜とケーブルの1ユニットを抽出し、膜材の初期張力をタテ糸、ヨコ糸方向共に

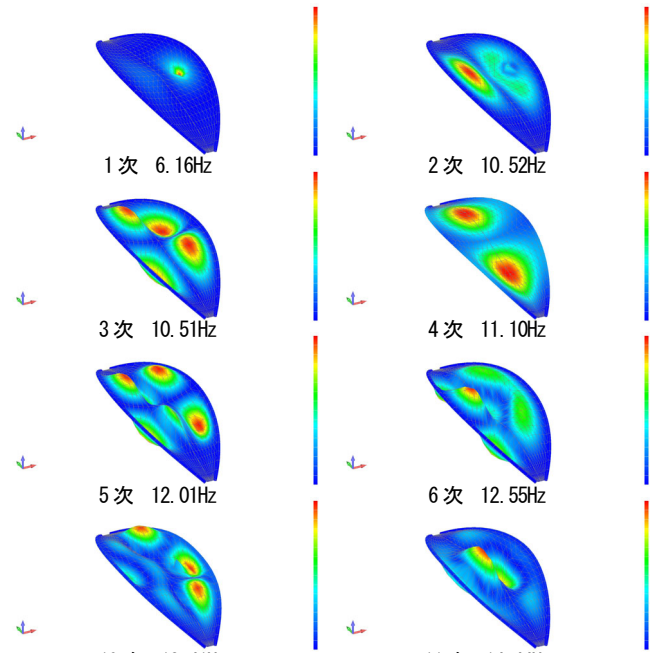


図17 膜展張後固有値解析結果 モード図

表6 有効質量比

次数	固有振動数	X	Y	Z	RX	RY	RZ
1	6.16	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00
2	10.05	0.02	0.00	0.00	0.00	0.07	0.02
3	10.51	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4	11.10	0.00	0.22	0.00	0.00	0.00	0.00
5	12.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00
6	12.55	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00
7	12.89	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04
8	12.96	0.00	0.04	0.00	0.06	0.00	0.00
9	13.28	0.04	0.00	0.07	0.05	0.14	0.03
10	13.41	0.02	0.00	0.16	0.11	0.05	0.01
11	14.44	0.11	0.00	0.00	0.00	0.34	0.08

表7 刺激係数

次数	固有振動数	X	Y	Z	RX	RY	RZ
1	6.16	0.06	0.00	0.05	332.2	249.8	414.2
2	10.05	0.14	0.00	0.02	169.0	342.0	944.8
3	10.51	0.00	0.01	0.00	0.0	0.0	179.0
4	11.10	0.00	0.42	0.00	160.3	0.0	84.0
5	12.01	0.00	0.06	0.00	630.2	0.0	12.1
6	12.55	0.06	0.00	0.01	79.1	279.4	398.3
7	12.89	0.00	0.00	0.00	0.9	0.0	1424.9
8	12.96	0.00	0.18	0.00	1741.4	0.0	35.6
9	13.28	0.17	0.00	0.24	1634.2	759.3	1170.3
10	13.41	0.12	0.00	0.35	2422.4	439.7	840.0
11	14.44	0.29	0.00	0.02	161.6	1196.2	1994.6

1.0kN/m をとし、釣り合い形状を初期モデルとし、リスタート解析により固有値解析を行った。センサー位置にはセンサ

一質量2.1kgを考慮した。1次～6次、10次、11次の結果を図17に示す。1次はセンサー位置周辺の膜がたわむ1次モード、2次はケーブルを線対称軸とした膜の1次モード、3次はケーブルを線対称軸とした逆対称モードの2次モード、4次はアーチ方向に逆対称モードのクロスアーチ架構の1次モードと同じモード・固有振動数、5次・6次はアーチ方向(Y方向)に2波、アーチ直交方向(X方向)に3波のモードとなった。有効質量比(表6)と刺激係数(表7)が大きいモードはアーチ方向(Y方向)が4次、アーチ直交方向(X方向)が11次、鉛直方向が10次となった。

### 11-1. 常時微振動計測結果と解析結果の比較

ケーブル上部に設置したセンサー3のアーチ方向(Y方向)

表8 計測結果、解析結果固有振動数一覧表

センサー番号	方向	常時微振動	地震動	解析	
		振動数 (Hz)	振動数 (Hz)	振動数 (Hz)	次数
センサー1 (膜上)	X	12.08	11.86	12.55	6
	Y	15.10	8.13	11.10	4
	Z	4.37	4.33	6.16	1
センサー2	X	18.03	16.08	14.44	11
	Y	18.20	8.07	11.10	4
	Z	18.41	7.94	13.41	10
センサー3	X	13.51	13.32	14.44	11
	Y	10.80	8.08	11.10	4
	Z	11.39	10.94	13.41	10

の常時微振動計測結果振動数 10.80Hz と解析結果 11.10Hz、アーチ直交方向(X方向)の振動数 13.51Hz と解析結果 14.44Hz、鉛直方向の振動数 11.39Hz と解析結果 13.41Hz は近似した値となった。

膜上部に設置したセンサー1のアーチ直交方向(X方向)の常時微振動計測結果振動数 12.08Hz と解析結果 12.55Hz は近似した値となったが、アーチ方向(Y方向)の振動数 15.10Hz と解析結果 11.10Hz、鉛直方向の振動数 4.37Hz と解析結果 6.16Hz は差がある結果となった。差の要因は加速度センサーの質量の影響範囲によるものと推定される。

### 12. 風荷重時応答計測

#### 12-1. 計測方法

風荷重に対する振動計測は膜展張後2014年4月4日～18日の15日間実施した。センサー1は図10のように前半ケーブル上部、後半膜上部で計測位置の盛替えを行った。加速度センサーと風向風速計の設置状況を写真6に示す。風向風速計は地上面から10mの高さに設置した。

#### 12-2. 最大加速度と平均風速の相関結果

計測期間前半2014年4月4日17:30～4月11日0:00のケーブル上部(センサー1)の10分間の平均風速と最大加速度の相関について、工事を行っていない夜間～早朝の時間帯(19:00～翌7:00)の結果を図18に示す。本建物の工事を

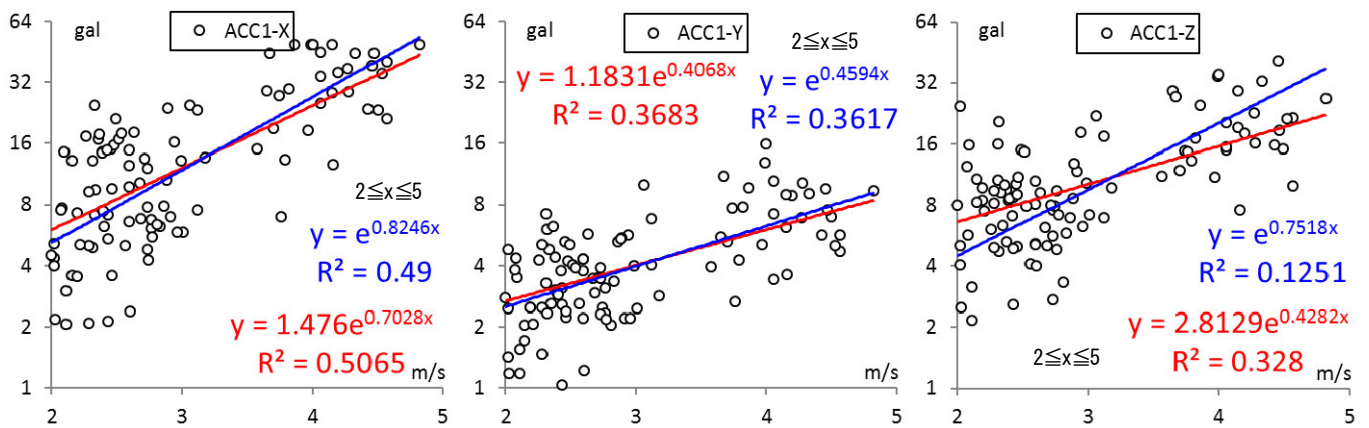


図18 最大加速度と平均風速の相関結果(ケーブル上部)

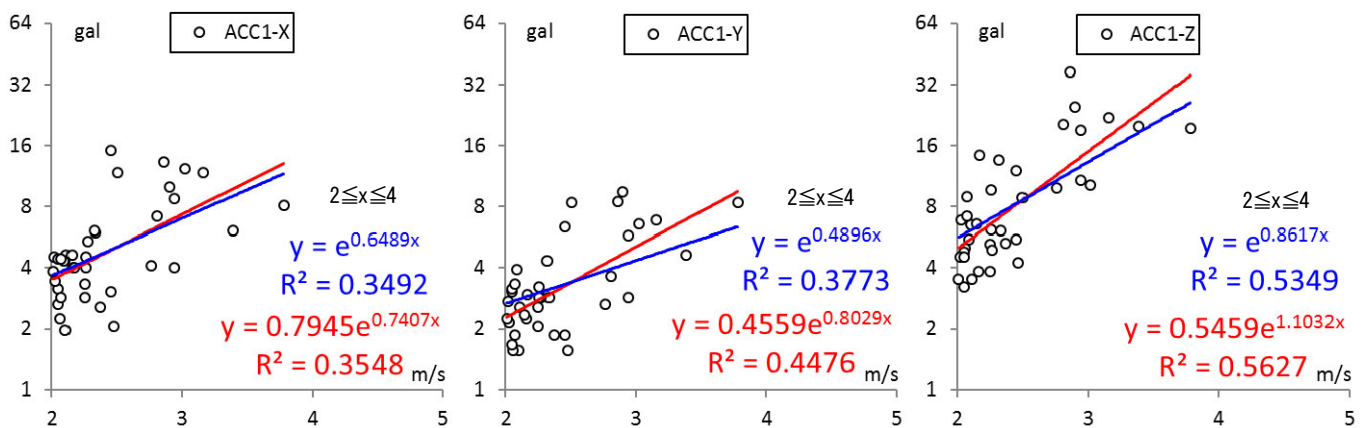


図19 最大加速度と平均風速の相関結果(膜上部)





写真6 加速度センサー、風向風速計設置状況

行っている日中時間帯(7:00~19:00)は工事振動等に起因する影響が鉛直方向で大きくみられる為、検討範囲外とした。

また、平均風速 2m/s 以下の計測結果は、風荷重以外の外乱(車の走行振動等)による影響があり、検討範囲外とした。グラフは縦軸に最大加速度(gal)、横軸に平均風速(m/s)を示し、縦軸は対数軸、横軸は線形軸とした。

計測期間後半4月11日19:00~4月18日7:00は膜上部にセンサー盛り替えを行った。結果を図19に示す。3箇所計測を実施したが、ケーブル上部と膜上部の比較検討を行う為、センサー1のみの結果を示す。

計測して得られたデータの近似曲線を指数関数にて求め、青線は関数が $(x,y)=(0,1)$ を通る場合、赤線は $(x,y)=(0,1)$ を通らない場合とし、求めた近似曲線の関数式を各々グラフに示した。2つの近似曲線の水平方向(X,Y方向)の差はケーブル・膜共に小さく、鉛直方向(Z方向)の差はケーブルが大きくなった。ケーブル上部の結果はケーブル軸方向(Y方向)の傾きが小さく、ケーブル直交方向(X方向)は大きく、鉛直方向(Z方向)はばらつきが大きい。これはケーブル軸方向の剛性が高い為と考えられる。膜上部の結果は鉛直方向の傾きが多く、水平方向XYの傾きの差が少ない。風荷重時の応答は水平方向よりも鉛直方向が大きくなる結果となった。これは膜の面外方向の剛性が小さい為と考えられる。ケーブルと膜では、膜の方が、面外方向の風荷重時の応答が大きな値となった。

### 1.3. まとめ

クロスアーチ架構単独の鉄骨構造の常時微振動計測、ハンマー打撃加振計測を実施した。計測結果と解析結果の1次固有振動数は11Hz近傍となり同等の結果が得られた。10Hz、20Hz、30Hzの振動数帯域においてバンドパスフィルターをかけRD法<sup>9)</sup>により減衰定数を同定した結果、X方向の振動数11.05Hzにおいて最大1.72%の減衰定数が推定された。ただし、計測で11Hz近傍に振動のピークが見られたものの、施工中で加速度計の設置位置に制約があった為、モードを特定するには至らなかった。

膜展張後のクロスアーチ架構の鉄骨構造と膜構造の常時微振動計測、ハンマー打撃加振計測を実施した。膜展張後の計測結果の鉛直方向の1次固有振動数は4.37Hz近傍の結果が得られた。ピーク振動数±1Hzの範囲の振動数帯域においてバンドパスフィルターをかけRD法<sup>9)</sup>により減衰定数を同定した結果、鉛直鉛直方向の振動数3.4~5.4Hzにおいて4.40%の減衰定数が推定された。ただし、常時微動の小さな振幅の

計測結果である。

膜展張前後のクロスアーチ架構の鉄骨構造と膜構造の地震時応答計測を実施した。RD法<sup>9)</sup>により減衰定数を同定した結果、膜展張前1.40%、膜展張後2.71%の減衰定数が推定された。

風荷重時応答計測における最大加速度と平均風速の相関関係として、風速2~4m/sの範囲で近似式を求め、分析を行った。ケーブル・膜共に応答は鉛直方向が大きく、水平方向は部材の剛性の影響によりX,Y,Z方向の振動性状が異なった。

ケーブル上部の常時微振動・地震時計測結果と解析結果の振動数は、ケーブル軸方向、ケーブル直交方向、鉛直方向で近似した値となった。膜上部の常時微振動・地震時計測結果と解析結果の振動数は、アーチ軸方向で近似した値となったが、アーチ直交方向、鉛直方向は差が大きい結果となった。

### 謝辞

本研究は、神奈川県立神奈川学園中学・高等学校様のプロジェクトであり、研究に際し多大なる協力を得た。当社技術センター寺崎浩氏、田口典生氏、中村良平氏、設計本部井上慶一郎氏、要知市郎氏に協力を得た。横浜国立大学大学院教授河端昌也博士に貴重なコメントを頂いた。ここに記して謝意を表す。

### 参考文献

- 1) 正岡典夫, 村中良: サスペンション膜構造の振動特性, 膜構造研究論文集'93, 日本膜構造協会, No.3, 1993
- 2) 有竹剛, 石井一夫: ケーブルネット構造の振動特性に関する研究, 膜構造研究論文集'93, 日本膜構造協会, No.4, 1993
- 3) 宋浩, 石井一夫: 二重ケーブルネット膜構造の振動特性に関する研究, 膜構造研究論文集'95, 日本膜構造協会, No.6, 1995
- 4) 宋浩, 石井一夫, 近藤一雄, 榎原健一, 神沢宏明: 二重ケーブルネット膜構造の振動特性について—実物実験の解析—, 膜構造研究論文集'96, 日本膜構造協会, No.5, 1996
- 5) 藤原淳, 大崎純, 北折智規: 1次固有振動数を剛性の指標とした膜構造物の初期応力・形状設計法, 膜構造研究論文集'99, 日本膜構造協会, No.3, 1996
- 6) 田村幸雄, 佐々木淳, 塚越治夫: RD法による構造物のランダム振動時の減衰評価, 日本建築学会構造系論文報告集 第454号, 日本建築学会, 1993.12
- 7) Katsuhiro OOTAKE, Osamu HOSOZAWA: Design and damping measurement for a framework membrane structure that combines cross arches and cables, IASS 2016 Tokyo Symposium, IASS, 2016
- 8) 大竹克浩, 寺崎浩, 田口典生, 中村良平: クロスアーチ架構とケーブル併設型骨組膜構造の振動計測 その4 鉄骨造と膜構造の地震動振動観測に関して, 日本建築学会大会学術講演梗概集 pp719-720, 日本建築学会, 2017
- 9) 大竹克浩, 寺崎浩, 田口典生, 中村良平: クロスアーチ架構とケーブル併設型骨組膜構造の振動計測 その5 最大加速度と平均風速の相関関係に関して, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp1093-1094, 日本建築学会, 2018

# MEASUREMENT REPORT ON VIBRATION CHARACTERISTICS AND DAMPING FACTOR FOR A FRAMEWORK MEMBRANE STRUCTURE THAT COMBINES CROSS ARCHES AND CABLES

Ktasuhrio OOTAKE 1 <sup>\*1</sup>

## Summary

A framework membrane structure has been designed combining cross arches formed from steel tubes, type B membrane material, and cables, as the roof over an indoor pool. In addition in order to determine the damping properties of the type B membrane material, microtremor measurements and hammer impact excitation measurements were carried out on the steel structure of the cross arches on their own before and after initial tensioning the membrane. Similar results were obtained for the measurements before initial tension of the membrane and the analysis, with a primary natural frequency of about 11.05 Hz. As a result of estimating the damping factor by the RD method, it was estimated that the damping factor was a maximum of 1.72 %. After initial tension of the membrane, the results showed that the estimated damping factor was a maximum of 4.85 % at the frequency 12.80 Hz. By conducting microtremor measurements, and hammer impact excitation measurements, and seismic load measurements, and wind load measurements, the vibration characteristics and damping factors were examined.

---

<sup>\*1</sup> Taisei Corporation