

共同プロジェクト研究（実用化試験）
〔研究論文〕

災害後の機能維持を目的として屋根支承部に免制振部材を
組み込んだ鉄骨置屋根構造の動的挙動に関する解析的研究

船木 尚己¹⁾, 畑中 友¹⁾, 藤田 智己²⁾

Dynamic Response Characteristics of Cantilevered RC Walls in Gymnasium with
Isolation Bearings for Steel Roof Aiming at Sustaining Function After Earthquake

Naoki FUNAKI¹⁾, Tomoyuki HATANAKA¹⁾, Tomomi FUJITA²⁾

Abstract

A large number of steel roof bearings in RC gymnasium were damaged by The 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake and The 2016 Kumamoto Earthquake. An investigation of the gymnasium after the earthquakes showed that typical types of damage included: damage to roof bearings due to stress concentration in the four corners of roof bearings; the collapse of structural and non-structural elements due to amplified horizontal and vertical seismic response of the roof. To keep the function of the gymnasium as shelters after earthquakes, it is necessary to prevent damage not only structural members but non-structural elements such as ceiling board, lighting equipment which were mounted to the steel roof truss. In the present paper, the basic characteristics of vibration response of the gymnasium equipped with base isolation system to roof bearings are discussed based on numerical simulation. Also, the effect of seismic response reduction of the steel roof is investigated based on the obtained analysis results.

1 はじめに

2011年東北地方太平洋沖地震や2016年熊本地震など、近年、我が国で多発している大規模地震により、鉄骨置屋根構造の体育館に多くの被害が生じた。鉄骨置屋根構造とは、鉄骨造の屋根が、屋根支承部にまで立ち上がった鉄筋コンクリート造架構で支持された形式のものである。これまでの地震による主な被害として、屋根と下部構造をつなぐ接合部（以降、支承部とする。）の損傷、鉄骨屋根部材の座屈や落下といった構造的な被害に加え、屋根に取り付けられた天井材や照明等の非構造部材の損傷や落下が挙げられる。鉄骨置屋根体育館等の大空間施設は、震災時における地域の防災拠点であり、人々の安全・安心な

1) 東北工業大学 工学部 建築学科

Department of Architecture, Faculty of Engineering, Tohoku Institute of Technology

2) 仙台高等専門学校 建築デザインコース

Architectural Course, National Institute of Technology, Sendai College

避難生活の場として機能する必要があることから、構造部材の損傷を抑制することに加えて、非構造部材に対しても地震動による落下等を防ぐなどの設計上の配慮が求められる。

筆者らは、鉄骨置屋根構造の基本的な力学的特性について、これまでに行ってきた実験および解析的な検証^{例えば1)～5)}により、以下に示すような知見を得ている。

- ① 外力の入力方向に直交する構面には「戻し作用の力」が発生し、その分だけ増幅された地震力が屋根部分に作用する。
- ② 屋根面がRC下部構造により2辺支持される鉄骨置屋根構造の場合、梁間方向の入力に対して、妻構面の支承部には屋根面を通じて水平力が集中する。
- ③ 梁間方向の振動においては、水平振動に対して屋根面に大きな上下振動が励起される。

戻し作用の力の発生については、RC下部構造である外周壁の面内方向と面外方向の剛性の差が大きいことに起因する。梁間方向の応答に対して、屋根面に作用した地震力と桁行壁の面外方向の応答に伴う戻し作用の力が屋根面を通じて妻構面に伝達され、妻構面の支承部に大きな水平力が作用する。それに対して、支承部の保有耐力を高める補強が一つの解決策となるが、水平力は屋根面を通じて作用するため、屋根面のせん断耐力がそれを満足できるか検証し、必要に応じて屋根面の水平ブレースの補強を行わなければならない。また、RC下部構造の面外剛性を面内剛性と均一化させることで屋根面に作用する地震力を各通りに均等に分配させ、支承部の損傷を制御する方法も考えられるが、面内方向と面外方向の剛性の差が極端に大きいため、大掛かりな補強を必要とすることが予想される。加えて、これらの耐震補強方法では屋根面の上下応答の抑制にはつながらず、天井や照明といった非構造部材に対する損傷の危険性を無くすることはできない。

屋根面の応答低減、および支承部に生じる反力の抑制が期待できる免震部材の導入は、建物の機能維持を可能にする有効な手法の一つになると思われることから、本報告においては、山形の立体トラス屋根を有する鉄骨置屋根体育館を想定したフレームモデルに対して、梁間、桁行方向の地震動入力下におけるモデルの応答値と支承部の2方向反力分布を各々整理し、支承部に積層ゴムアイソレータ等の免震装置を適用した場合の地震に対する有効性について、時刻歴応答解析を行って得られた結果に基づき検証する。

2 解析モデルの概要

解析モデルの概要を図1から図4に示す。図示のとおり、鉄骨屋根を支持する下部構造は、桁行方向（X方向）が40.0m、梁間方向（Y方向）が41.5mの平面形状を有する鉄筋コンクリート造架構である。階高は、1階が5.6m、2階が4.05m、屋根は円形鋼管を用いた山形の立体トラス構造で、比較的規模の大きな公共施設の体育館を想定したものである。屋根を支持する支承部をY₁とY₉構面の柱頭に設置し、1構面9か所、計18か所で屋根を支持する2辺支持型モデルとした。屋根勾配を3/10とし、妻面ではトラス梁下までRC造の壁を立ち上げている。ここでは、屋根架構の応答特性を分析するために、下部構造を構成するRC造の柱、梁および壁は弾性とした。また、下部構造の柱脚はピン接合としている。各部材の接合条件について、RC下部構造の柱と梁は剛、屋根部材はピンとした。減衰は部材剛性比例型とし、減衰定数は下部構造を構成するRC造の各部材を3%、S造の屋根部材を2%に設定した。なお、免震装置に減衰は与えていない。アンカーボルトを用いた従来の支承部についてはピン接合と仮定し、せん断および軸方向に対して大きな剛性（ $1.0 \times 10^6 \text{ kN/m}$ ）を与え、回転方向に対しては剛性の低い（ 10.0 kN/m ）スプリ

ングによりモデル化した。支承部に組み込む免震部材として、表1に示す高減衰ゴム系積層ゴムアイソレータとすべり支承を採用した。本論においては表2に示すとおり、支承部をピン接合とした従来型のモデルと、免震部材の組み合わせが異なる3つのモデルについて解析を行った。解析には、(株)構造システムのSNAP Ver.7⁶⁾を使用した。

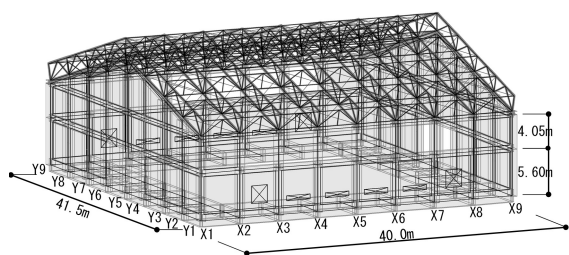


図1 解析モデル全景

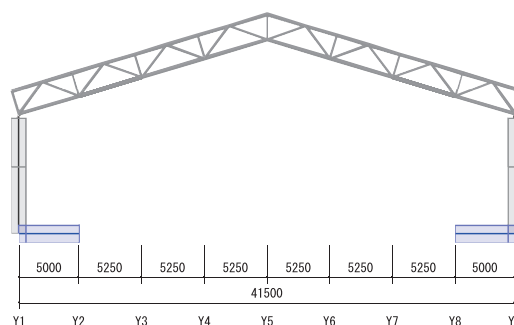


図2 解析モデル (X₃ ~ X₇ 通り軸組図)

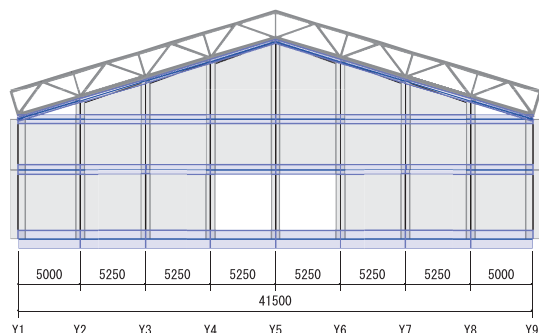


図3 解析モデル (X₁, X₉ 通り軸組図)

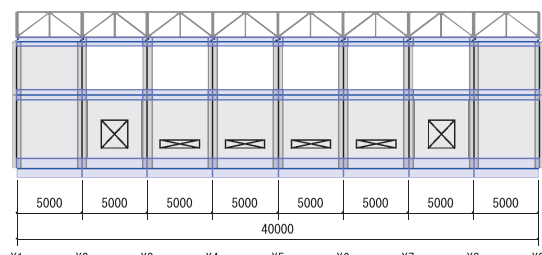


図4 解析モデル (Y₁, Y₉ 通り軸組図)

表1 免震部材の諸元⁶⁾

高減衰ゴム系 積層ゴムアイソレータ		すべり支承	
外径 [mm]	600.0	すべり材径 [mm]	150.0
水平1次剛性 [kN/mm]	6.40		
水平2次剛性 [kN/mm]	0.64	摩擦係数	0.013
限界変形 [mm]	600.0	限界変形 [mm]	450.0

表2 解析モデルの諸元

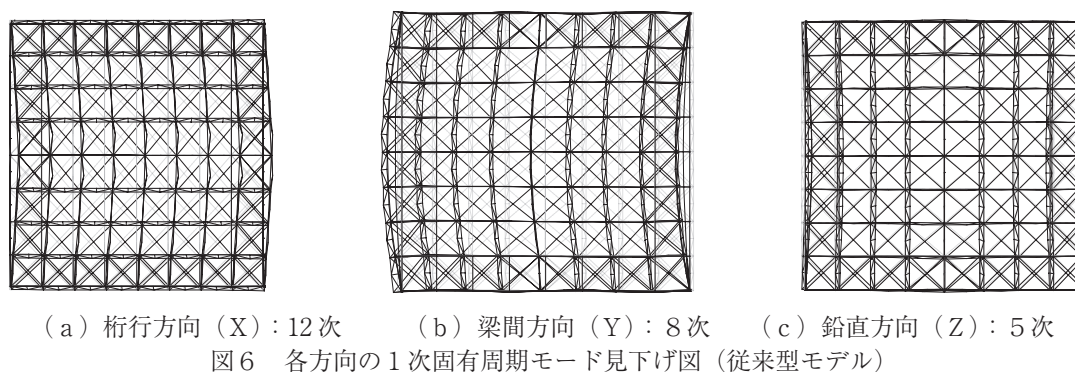
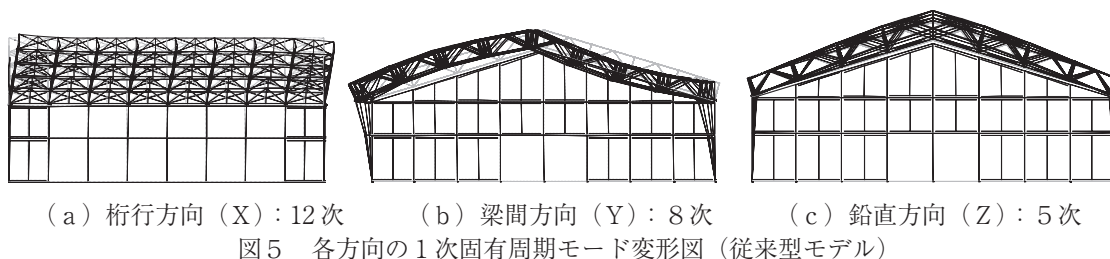
解析モデル	免震装置の数 (設置場所)		免震層の固有周期 [sec] X方向/Y方向
	高減衰ゴム系 積層ゴムアイソレータ	すべり支承	
従来型モデル (非免震)	—	—	—
免震モデル1	4 (X ₁ , X ₉)	14 (X ₂ ~ X ₈)	1.43 / 1.40
免震モデル2	6 (X ₁ , X ₅ , X ₉)	12 (X ₂ , X ₃ , X ₄ , X ₆ , X ₇ , X ₈)	1.05 / 1.03
免震モデル3	10 (X ₁ , X ₃ , X ₅ , X ₇ , X ₉)	8 (X ₂ , X ₄ , X ₆ , X ₈)	0.84 / 0.82

3 鉄骨置屋根構造の力学特性

本構造の基本的な力学特性を確認するために、固有値解析と応力解析を行った。固有値解析により得られた結果を表3および図5、6に示す。表は固有周期と有効質量比の一覧、図は各方向の1次固有周期の振動モードを表している。各方向で有効質量比が最大となる次数を1次固有周期とすると、梁間方向（以降、Y方向とする。）は0.262sec（8次モード）で、 X_5 通りに向けてはらみだす変形モードとなる。桁行方向（以降、X方向とする。）については、有効質量比が最も大きい次数は1次であるが、このモードは図7に示すとおり X_1 と X_9 通りの妻壁の独立した面外振動であること、また、6次モードについても、図8に示すとおり1次と同様、妻壁の独立した振動モードを示したことから、建物全体が振動する12次モード（0.230sec）をX方向の1次固有周期とみなした。鉛直方向（以降、Z方向とする。）の1次固有周期は0.373sec（5次モード）であった。

表3 固有値解析結果（従来型モデル）

次数	周期 [sec]	有効質量比（％）		
		Mx：桁行方向	My：梁間方向	Mz：鉛直方向
1	0.665	27.911	0	0
2	0.665	0	0	0
3	0.445	0	0	0
4	0.445	0	0	0
5	0.373	0	0	8.305
6	0.331	9.481	0	0
7	0.331	0	0	0.017
8	0.262	0	36.511	0
9	0.240	0	0	0
10	0.240	0	0.224	0
11	0.239	0.032	0	0
12	0.230	19.725	0	0
13	0.189	0	0	0.031



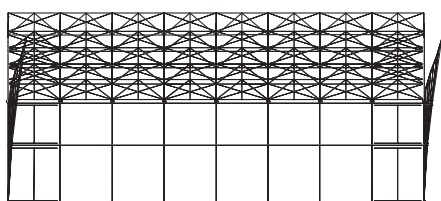


図7 桁行方向（X方向）の1次モード変形図（従来型モデル）

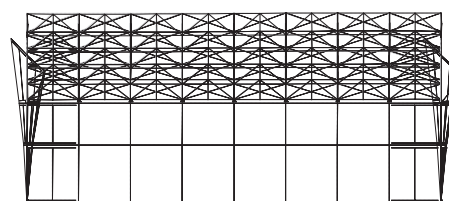
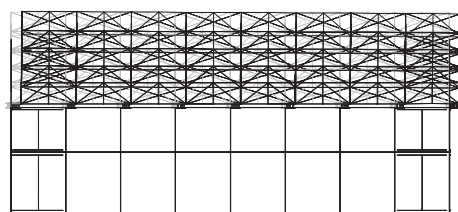
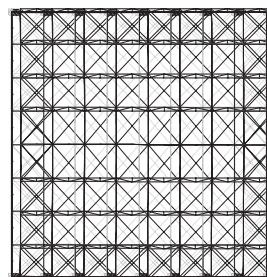


図8 桁行方向（X方向）の6次モード変形図（従来型モデル）



(a) X構面

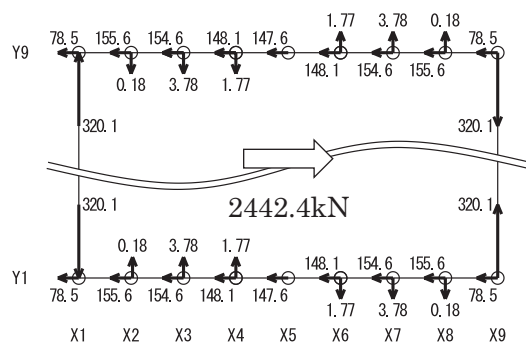


(b) 見下げ図

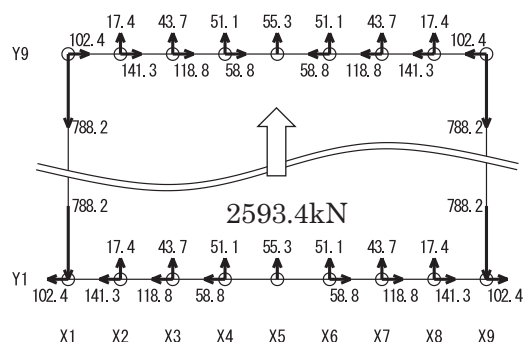
図9 桁行方向（X方向）の1次モード変形図（免震モデル1）

免震モデルの固有値解析結果として、免震層の固有周期を表2に併せて示している。免震層の固有周期は、剛性を有する積層ゴムアイソレータの数に関係し、その数が多いほど短周期となる。固有値解析により得られた代表的な例として、免震モデル1の1次固有周期の振動モードを図9に示す。X方向の1次固有周期は1.43秒（有効質量比16.5%）、Y方向については1.40秒（有効質量比16.7%）となり、いずれのモデルも免震層がスウェイし、屋根面が並進振動するモードが卓越する。

次に、応力解析により得られた支承部の反力分布を図10に示す。各方向の外力分布は、固有値解析から得られた各方向の主要モード（X方向は12次モード、Y方向は8次モード）の刺激関数値に節点質量と重力加速度を乗じて設定した。図10（a）より、X方向入力の場合、 X_2 から X_8 通りの支承部がほぼ均一に外力を負担し、四隅支承部の反力は、その他の通りの約1/2となっている。また、外力に対して直交する成分の反力も生じ、特に四隅の支承部にその力が集中していることがわかる。図10（b）に示すY方向入力の場合は、四隅の支承部に生じる反力が、その他支承部のものと比較して極端に大きく、屋根面を通じて妻面に水平力が集中していることがわかる。また、 X_2 から X_8 通りの支承部に生じる



(a) 桁行方向（X方向）加力



(b) 梁間方向（Y方向）加力

図10 支承部反力分布（単位：kN）

反力の方向が入力と同じ向きになっており，RC 下部構造に作用した地震力が戻し作用の力として屋根面へ伝達されていることも確認できる。また，外力に直交する方向に対して X_5 通りを中心に対称な反力が発生している。

本構造を材料力学的な観点に基づき，図 11 (a) に示すような矩形の薄肉中空閉断面材とした場合，その力学的挙動は薄肉断面材の力学（せん断流理論^{例えば7)}）に従った性状を含んでいると考えられる。すなわち，板厚の中心線に沿うせん断力を τ とすれば，これに板厚 t_w を乗じたせん断流 ($q = \tau \times t_w$) が板厚の中心線に沿って流れることになり，その応力分布は図 11 (b) のようになる。この理論に基づき，支承部に生じる反力の分布について，図 10 に示した解析結果を検証する。X 方向入力の場合，入力方向に対して平行な Y_1 と Y_9 構面の壁には，壁の長さに比例したせん断力が流れることから，壁 1 m あたりに作用するせん断力の大きさは $31\text{kN} (= 2,442.4\text{kN}/(40\text{m} \times 2))$ となる。したがって，1 つの支承部が負担するせん断力は， X_2 から X_8 通りの支承部については，支承部間のスパンが 5 m であるから $155\text{kN} (= 31\text{kN/m} \times 5\text{m})$ ，両端部は $78\text{kN} (= 31\text{kN/m} \times 2.5\text{m})$ となる。また，支承部には入力に対して直交する成分の反力が生じるが，四隅の支承部の反力の大きさは図 11 (b) に示したせん断応力分布図における三角形の面積に相当し， 321.6kN と算出される。 X_1 ， X_9 構面の中間部には支承部が存在しないため，その反力は四隅の支承部が負担することとなる。Y 方向入力の場合では，戻し作用の力を考慮した X_1 と X_9 構面の壁におけるせん断流れは，屋根面に作用する地震力 $3152.8\text{kN} (= 2593.4\text{kN} + (51.1\text{kN} + 43.7\text{kN} + 17.4\text{kN}) \times 4 + 55.3\text{kN} \times 2)$ を用いて， $38\text{kN/m} (= 3152.8\text{kN}/(41.5\text{m} \times 2))$ となる。三角形となるせん断応力分布に対して， Y_1 および Y_9 構面の各支承部が負担する X 方向のせん断力を支配面積より算出すると， X_1 通りから 89.1kN ， 146.3kN ， 100.0kN ， 49.1kN となる。計算により得られた数値は，Y 方向入力で 3.5% から最大で 19.8% の差が生じているものの，図 10 に示した解析値と概ね対応することを確認できた。このように，本構造の力学性状が，せん断流理論により説明できるとした場合，地震入力に対して四隅の支承部には極めて大きな反力が発生することになり，被害は四隅支承部に集中することが考えられる。宮城県内に所在する 2 辺支持型鉄骨置屋根体育館の，2011 年東北地方太平洋沖地震における被害⁸⁾ は，1 構面 11 箇所ある支承部のうち，スパン中央付近の 3 か所は無被害であったのに対し，残る 8 か所については，支承部のア

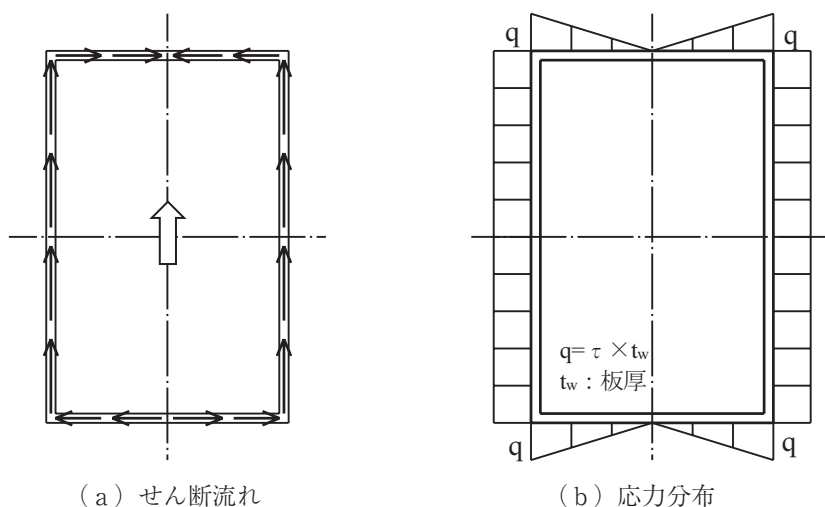
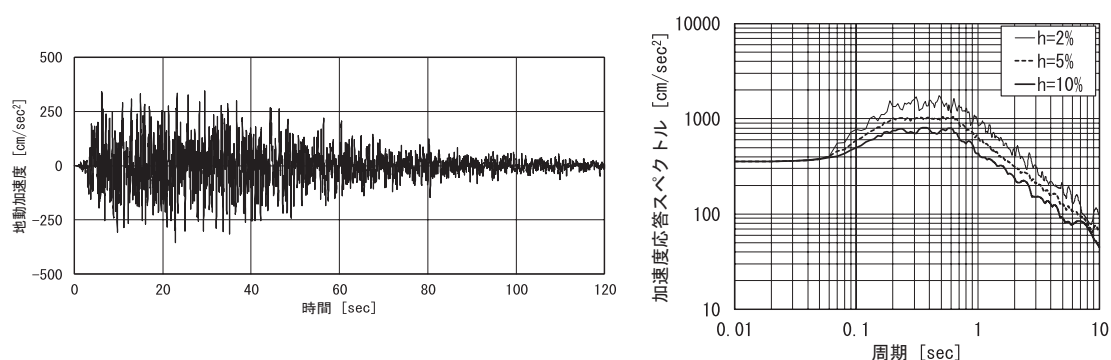


図 11 矩形薄肉閉断面におけるせん断流れと応力分布

ンカーボルトがすべて破断し、また、四隅支承部ほど均しモルタルの損傷が激しかったことから、せん断流れ図から予想される被害分布と一致する。以上のことから、本構造の力学特性は、薄肉断面材のせん断流理論により説明できるものと思われる。

4 時刻歴応答解析

表2に示したモデルを対象として時刻歴応答解析を行い、得られた結果に基づき、支承部に免震部材を適用した場合の効果について確認する。解析に用いた入力波の概要を図12に示す。入力波として、日本建築センターBCJ-L2波（最大加速度：355.7cm/sec²）を用い、X方向とY方向に対してそれぞれ1方向ずつ入力した。



（a）時刻歴波形（最大値：355.7cm/sec²）

（b）加速度応答スペクトル

図12 入力地震波（BCJ-L2波）

表4 最大応答値一覧

（a）X方向入力

モデル名	最大層間変位 [mm]			最大相対変位 [mm]			最大応答加速度 [cm/sec ²] (加速度応答倍率)			最大層せん断力係数		
	1層	2層	屋根面	2階	柱頭	屋根面	2階	柱頭	屋根面	1層	2層	屋根面
従来型モデル	12.7	45.9	59.7	12.7	58.6	9.45	391.8	580.8	771.6 (2.30)	0.452	0.502	0.923
免震モデル1	11.2	40.5	167.0	11.2	51.7	148.7	369.6	498.0	268.6 (0.76)	0.384	0.436	0.273
免震モデル2	11.8	42.7	80.5	11.8	54.5	83.6	379.0	531.0	303.2 (0.85)	0.415	0.454	0.313
免震モデル3	12.6	45.5	62.4	12.6	58.1	70.1	397.2	581.0	428.1 (1.20)	0.439	0.499	0.459

（b）Y方向入力

モデル名	最大層間変位 [mm]			最大相対変位 [mm]			最大応答加速度 [cm/sec ²] (加速度応答倍率)			最大層せん断力係数		
	1層	2層	屋根面	2階	柱頭	屋根面	2階	柱頭	屋根面	1層	2層	屋根面
従来型モデル	3.47	1.83	10.2	3.47	5.30	15.5	417.5	474.2	900.4 (2.53)	0.492	0.555	0.932
免震モデル1	4.07	2.15	144.7	4.07	6.22	144.0	440.3	487.1	267.0 (0.75)	0.397	0.377	0.272
免震モデル2	3.96	2.11	88.7	3.96	6.08	88.5	402.7	433.0	319.5 (0.90)	0.364	0.342	0.325
免震モデル3	4.07	2.19	83.0	4.07	6.26	85.7	406.3	429.2	503.0 (1.41)	0.363	0.340	0.514

解析により得られた代表的な例として、ここでは、X方向およびY方向の入力に対する、各層に属する節点から求めた平面および立面的な重心位置の最大応答値と最大層せん断力係数を表4に示す。これらの結果、各方向とも下部構造の応答については、従来型モデルと免震モデルとの間に大きな差は見られないものの、免震モデルの屋根面応答加速度は、従来型モデルと比較して1/2から1/3程度に低減していることがわかる。免震モデルの屋根面の最大層せん断力係数は最大で従来型モデルの約1/3となった。また、解析結果を免震モデルで比較した場合、免震層の固有周期が長い免震モデル1の屋根面の加速度応答倍率が最も小さく、各モデルの応答値の大小関係は、図12に示したスペクトルに対応する。

図13および図14に、Y方向入力時におけるY₁構面の応答値を示す。図13は最大相対変位、図14は最大応答加速度について、支承部に接続する柱頭と屋根面の応答値をそれぞれ示している。これらの結果より、全てのモデルで柱頭部の応答は中央構面(X₅)を中心にはらみ出す挙動を示しているのに対して、屋根面については、従来型モデルは柱頭部と同様に中央構面を中心に大きくはらみ出していることがわかる。その一方で、免震モデルの場合、屋根面の各通りの応答はほぼ等しく、入力方向に対して並進の挙動を示していることが確認できる。また、X₅構面における屋根面の鉛直方向の応答変位および応答加速度を図15および図16に示す。図より、従来型モデルの場合、水平方向の入力に対し

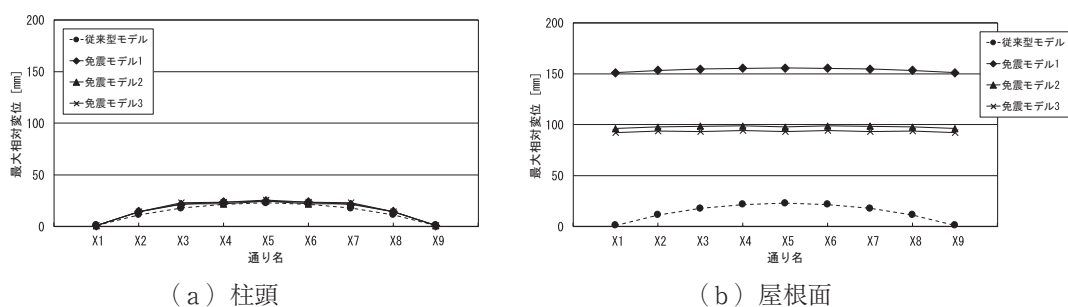


図13 最大相対変位（水平方向・Y1通り）

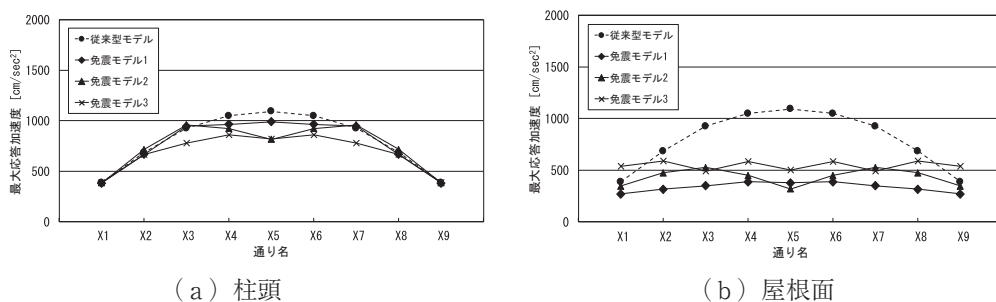


図14 最大応答加速度（水平方向・Y1通り）

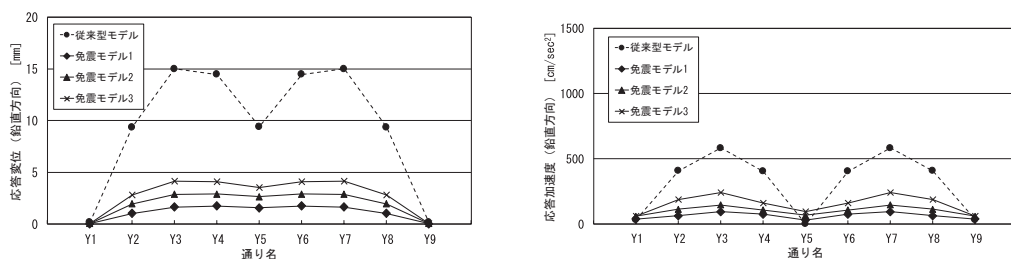


図15 屋根面の最大応答変位図
（鉛直方向・X5通り）

図16 屋根面の最大応答加速度
（鉛直方向・X5通り）

て屋根面は上下方向の振動応答が励起されていることがわかる。免震装置を適用することにより、屋根面の応答変位、応答加速度ともに従来型モデルと比較して1/2から1/3程度に低減することが確認された。

支承部に生じる最大反力を表5に示す。従来型モデルの場合、X方向入力時に、四隅の支承部に極めて大きな直交成分の反力が発生していることがわかる。それに対し、免震モデルの場合、四隅支承部への反力の集中が抑制され、全体的にその大きさも小さくなっている。

表5 支承部の最大反力（単位：kN）

(a) 従来型モデル

入力方向	通り名 反力の方向	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅
	X方向	79.4	138.2	129.4	118.7	112.0
X	Y方向	418.2	62.0	27.7	24.1	22.1
	X方向	110.3	144.5	114.8	54.2	0
Y	Y方向	862.3	61.4	67.9	66.6	70.8

(b) 免震モデル1

入力方向	通り名 反力の方向	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅
	X方向	166.2	1.77	1.43	1.47	1.48
X	Y方向	45.0	0.69	0.53	0.56	0.56
	X方向	4.82	0.55	0.44	0.46	0
Y	Y方向	170.7	1.86	1.51	1.57	1.57

(c) 免震モデル2

入力方向	通り名 反力の方向	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅
	X方向	128.0	1.23	0.98	1.11	130.4
X	Y方向	61.2	0.71	0.54	0.60	29.9
	X方向	4.85	0.56	0.45	0.50	0
Y	Y方向	142.7	1.45	1.17	1.29	142.0

(d) 免震モデル3

入力方向	通り名 反力の方向	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅
	X方向	112.5	1.16	115.0	1.06	116.1
X	Y方向	64.2	0.80	43.8	0.63	26.4
	X方向	4.91	0.60	5.07	0.54	0
Y	Y方向	140.4	1.43	133.8	1.25	132.2

※ 網掛け：積層ゴムアイソレータが設置されている支承部

5 まとめ

本報では、鉄骨置屋根体育館を模擬した立体フレームモデルによる時刻歴応答解析を行って得られた結果に基づき、本構造の基本的な力学特性と、支承部に免震部材を適用した場合の振動応答特性について検証した。その結果、以下に示す知見を得た。

- ① 本構造における屋根支承部には、外力の入力方向およびそれに直交する方向それぞれに反力が発生する。その結果として四隅の支承部には極めて大きなせん断力が作用す

る。

- ② 屋根支承部に作用するせん断力は、薄肉中空閉断面のせん断流理論に基づいた力学特性により推定することが可能である。
- ③ 支承部を免震化することにより、屋根面の応答は概ね並進の挙動を示し、水平加速度および鉛直方向の応答を低減できる。また、水平方向入力に対して励起される屋根面の上下方向の応答も大幅に軽減できる。さらに、四隅支承部の反力の集中を緩和することができる。

以上のことより、支承部を免震化することにより地震による建物の損傷を抑制でき、結果として鉄骨置屋根体育館に求められる避難施設としての機能を維持できるものと考えられる。

実地震に対する鉄骨置屋根構造の動的挙動を調べるために、本構造を模擬した縮小フレーム試験体による振動台加振試験を行っているが、得られた結果に基づいた検証については次報で報告したい。

謝辞

本研究は、東北工業大学研究支援センター「共同プロジェクト研究（実用化試験研究）」の助成を受けて実施されたものである。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 鈴木敦詞, 藤田智己, 木村祥裕: 東北地方太平洋沖地震で被害を受けた鉄骨置屋根形式を有する体育館の損傷メカニズム, 鋼構造論文集第23巻第91号 pp.17-29, 2016年9月
- 2) 小野瀬順一, 柴田明德, 竹内徹, 本間一成, 田中礼治: 鉄骨置屋根体育館の耐震診断法と避難所としての適応性 - 2016年熊本地震, 第2回 鉄骨置屋根構造体育館の動特性と耐震新診断法の考え方 (1), pp.180-184, 建築技術 2018年2月号
- 3) 小野瀬順一, 柴田明德, 竹内徹, 川邊祥一, 川島敏夫, 安岡千尋, 田中礼治: 鉄骨置屋根体育館の耐震診断法と避難所としての適応性 - 2016年熊本地震, 第3回 鉄骨置屋根構造体育館の動特性と耐震新診断法の考え方 (2), pp.166-171, 建築技術 2018年3月号
- 4) 藤田智己, 木村祥裕, 飯藤将之: RC下部構造と鉄骨置屋根の接合部への作用応力に関する横つなぎ材剛性の影響, コンクリート工学会年次大会論文集, 第40巻, pp.787-792, 2018年7月
- 5) 船木尚己, 畑中友, 藤田智己, 小野瀬順一, 田中礼治: 地震後の機能維持を目的として屋根支承部に免振振部材を適用した鉄骨置屋根体育館の動的特性 (その1) 本構造の力学特性および免震部材を適用した建物の時刻歴応答解析, 構造工学論文集, vol.65B, pp.41-47, 2019年3月
- 6) (株) 構造システム: SNAP Ver.7 テクニカルマニュアル
- 7) 高橋武雄: 構造力学入門2, 培風館, 1975年4月
- 8) 一般社団法人 日本建設技術高度化機構: 鉄骨置屋根構造の耐震診断・改修の考え方, 技報堂出版, 2015年9月