

斜行ケーブル吊り天井の地震応答性状と実建物への適用について

SEISMIC RESPONSE PROPERTIES OF CEILING SUSPENDED BY DIAGONAL CABLES AND ITS APPLICATION TO ACTUAL BUILDINGS

建築構造学分野 多田 光汰
Structural Engineering Kota TADA

過去の大震災において在来工法の吊り天井が多数落下し、現在対策が急務となっている。本研究では、吊り材全てをケーブルとしこれを3次的に斜行配置させた吊り天井について、構造体との連成を考慮し、実設計に近い吊り天井の応答性状を追求する。解析において、斜行ケーブル吊り天井はブレースを密に配置した在来工法の吊り天井と遜色ない程度まで応答を低減することができ、実建物への適用も十分に可能であることが確認できた。

Many conventional type ceiling have been fallen by great earthquakes, so now it is urgently necessary to take measures for this problem. In this study, we have considered the linkage with a structure and pursue the seismic response property of the cable ceiling, the ceiling suspended by diagonal cables, near the actual design. At analyses, the cable ceiling could reduce a reply to a suspended ceiling of the conventional method which arranged a brace densely and we have confirmed that the application to actual buildings of the cable ceiling is possible sufficiently.

1. 序

体育館等施設で最もよく用いられる従来の吊り天井(在来工法)は、天井下地材である野縁・野縁受け・天井板、吊り材である吊りボルトで構成されている(以降「吊りボルト吊り天井」とする)。吊りボルト吊り天井は安価で施工が容易であるというメリットを有していた。しかし、水平地震動に抵抗する要素である吊りボルトとブレース材のうち、吊りボルトは曲げ剛性のみで抵抗し、かつ細長い部材であるために振動しやすく、鉛直方向に対して座屈が発生すると天井の挙動が不安定になる問題も有している。実際、東日本大震災では大規模空間を有する建築物において、非構造材による被害が多く発生し、吊り天井もこの例外ではなく、高所に吊るされた大面積の吊り天井が多数落下し、天井の落下防止対策は現在急務となっている。

東日本大震災を受け 2014 年には建築基準法の改正より吊り天井に関する規定が改められ、主構造体と同様の耐震設計法の考え方での設計が要求されるようになった。この規定では吊りボルトを増やす、接合金物の強度を上げる、ブレースを多数配置するなどの落下防止措置が定められたが、コストの増加・施工性の低下・天井材重量の増加などの問題が指摘されており、抜本的な落下対策となっていないのが現状である。

一方、著者はできるだけシンプルな部材構成で耐震性能と施工性に優れた構法として、3次的に斜行配

置させたケーブルで構成される構法を提案している¹⁾。著者の構法を「斜行ケーブル吊り天井」と称し、本研究の研究対象とする。本研究では、実設計に近い斜行ケーブル吊り天井の応答性状を追求することを目的とし、吊り天井と構造体の連成を考慮して解析を行う。また、斜行ケーブル吊り天井では吊り材にケーブルを使用しているため、張力消失を起こすことがある。この特性が構造体との連成にどのように影響を及ぼすのかについて検証する。

2. 斜行ケーブル吊り天井の基本振動性状

2.1 三次元解析モデル概要

斜行ケーブル吊り天井と在来工法で使用される吊りボルト吊り天井を三次元空間でモデル化する。在来工法の吊りボルト吊り天井はブレース材を取り付けたものと取り付けていないものをそれぞれ作成した。また斜行ケーブル吊り天井は隣り合う2つの節点について単純にケーブルを斜行して配置したモデルと(以下、「NCモデル」)、既論²⁾で提案されたグランドストラクチャ法を用いたケーブル配置としたモデル(以下、「GSモデル」)の2つを作成した。グランドストラクチャ法とは、トラスの位相最適化問題に使われる方法のひとつであり、節点間に配置できる部材をすべて配置し、力が伝播されない不要な部材を取り除くことで部材配置を決定させる方法である。以下に各モデルの図を載せる。

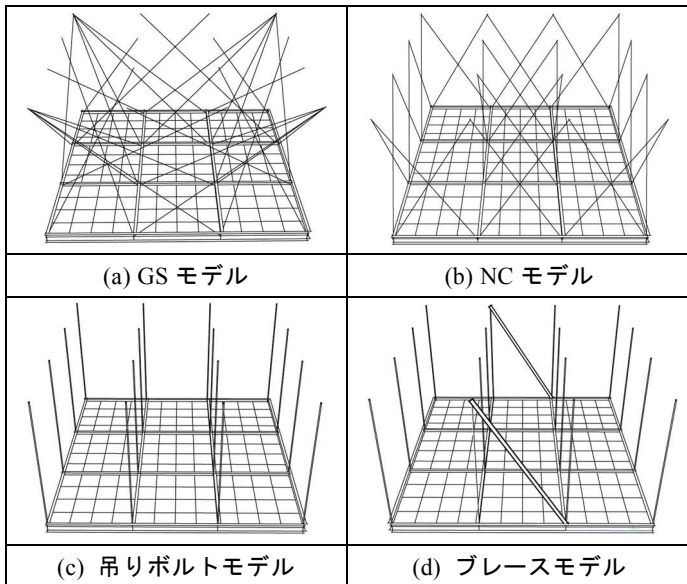


図1 三次元吊り天井解析モデル

三次元吊り天井モデルでは、文献³⁾をもとに野縁受けは直角に交わるように同方向4本ずつ0.9m間隔で設置し、吊り長さは1.5mとしている。野縁受けとブレースはC-38×12×1.6を、吊りボルトは径が7.78mmのものを使用し、鋼材はSS400を設定している。ケーブルの径も吊りボルトと同じ大きさとしているが、材料定数は文献⁴⁾の構造用ストランドロープを参考にしている。また天井板構成材量は石膏ボードの使用を仮定している⁵⁾。

2.2 ケーブルの張力消失設定

本解析の解析プログラムには汎用構造解析ソフトNX Nastranを用いる。ケーブルは圧縮に抵抗しないため、加振中のケーブルの張力消失を考慮し、曲げ応力の生じないロッド材に、弾性範囲で図2のような非線形性を与え、圧縮勾配を引張勾配の1/100に設定した。また解析を行う際、幾何学的非線形性を考慮している。

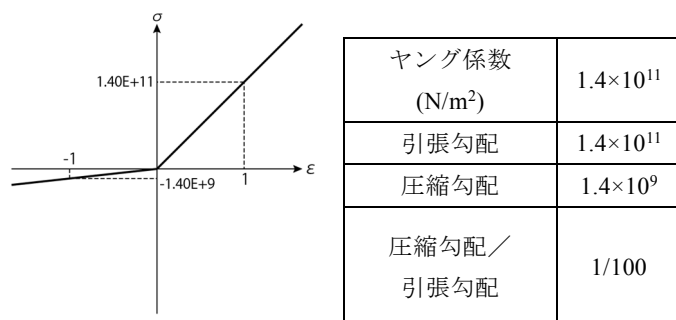


図2 ケーブル材料特性

2.3 各吊り天井モデルの地震応答性状比較

図1に示した4つのモデルを加振し、天井板に生じる応力を比較する。入力する地震動は鉛直方向の加速度の値が高いという特徴を有する、2011年3月11日に生じた東北地方太平洋沖地震の内、宮城県石巻市柿岡で観測されたもの(以下、「石巻波」と)、この地震波のうち、鉛直方向加速度のみを10倍に係数倍した地震動を使用する。以下に上述した2つの地震波をそれぞ

れ入力した時の各モデルが示した最大面内垂直応力コンター図を以下に載せる。

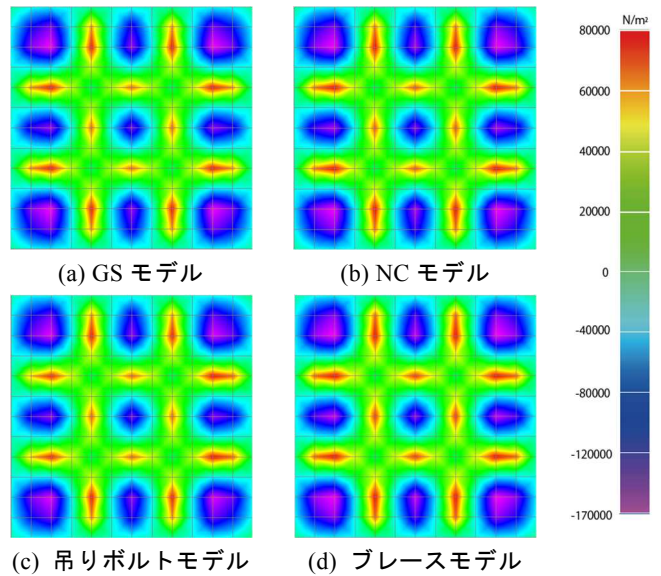


図3 通常の石巻波に対する吊り天井の面内垂直応力

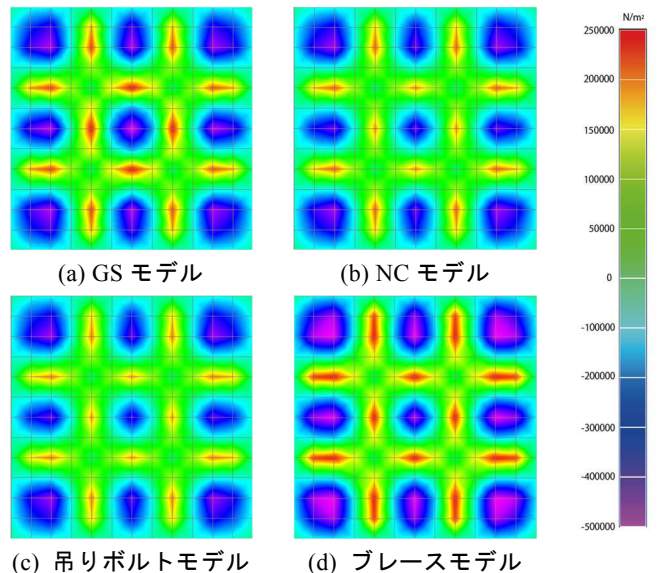


図4 鉛直動係数倍石巻波に対する吊り天井の面内垂直応力

図3、図4より、両地震波において最大面内垂直応力はブレースモデルの値が最も大きくなっていることが窺える。吊りボルトモデルの値が小さいことから、ブレース材を設置したことで応力が上昇したと考えられる。また斜行ケーブル吊り天井においては、通常の石巻波入力時はGSモデルの応力値はNCモデルの値よりも少し小さくなっている。しかし、鉛直動を係数倍した石巻波に対しては、GSモデルの応力値はNCモデルよりも大きくなった。また、各方向の面外曲げモーメントや面内最大せん断応力でも各モデルに同様の傾向が見られた。本章の解析結果から、斜行ケーブル吊り天井はグランドストラクチャーケーブル配置方法を用いる事によって張力消失を起こしづらくし、応答を低減することができる一方で、大きく張力が抜けてしまうと天井板に生じる応力等が応答低減効果の低い通常のケーブル配置を用いたものよりも大きくなってし

まうことが分かった。

3. 構造物に取り付けた二次元吊り天井モデルの地震応答性状

本章では、構造物に取り付けた吊り天井についてのモデルを二次元平面上で簡易的に作成して地震動を加えることで実際に構造躯体に設置された斜行ケーブル吊り天井の基本的な応答性状を確認する。尚、地震動は吊り天井被害の報告が特に多かった1995年1月17日に発生した阪神淡路大震災の水平加速度(以下、「神戸波」と)、2011年3月11日に生じた東北地方太平洋沖地震で岩手県大船渡市にて観測された水平加速度(以下、「大船渡波」)を使用する。

3.1 二次元吊り天井モデル概要

以下に二次元平面で作成した吊り天井のモデル図を載せる。吊り材は吊りボルトと斜行ケーブルに加え、ロッド材から図2で述べた材料特性を取り除き、引張圧縮勾配を1:1にした材(以下ではブレース材として扱う。)の3種類を用いる。2章の三次元モデルと同様、天井の長さは0.9mの長さを持つ野縁受けを3つ組み合わせて2.7mとし、吊り長さは1.5mとする。

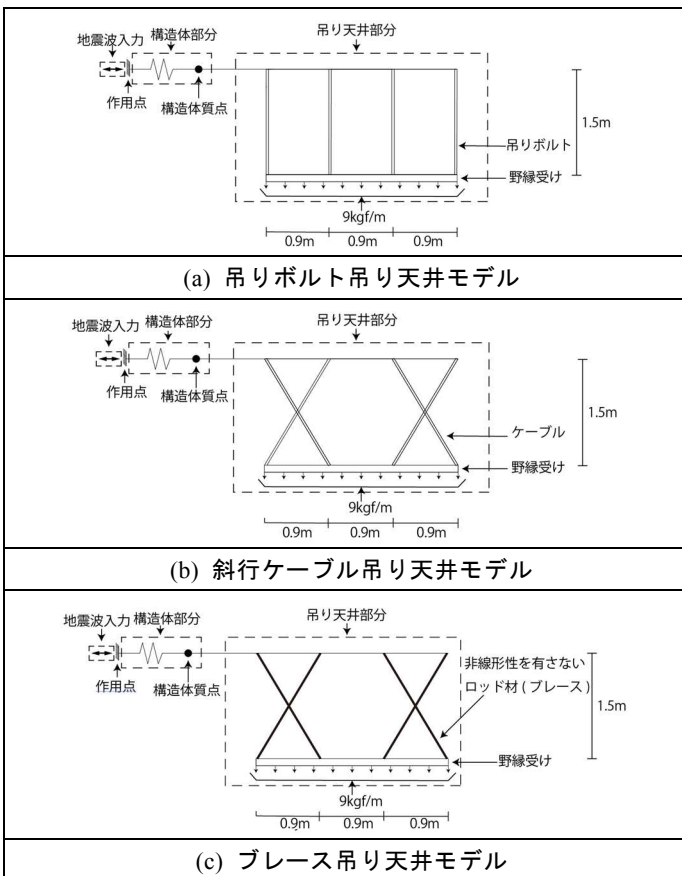


図5 二次元吊り天井モデル形状

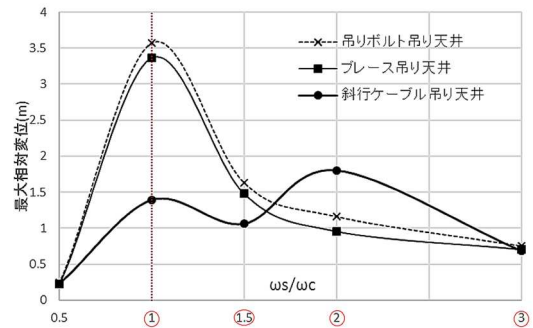
野縁受け、吊りボルトの部材諸元と材料特性は2章と同様のものとする。また野縁受けは単位面積質量 10.0kg/m^2 の天井板を負担すると仮定し、 9.0kgf/m の非構造質量を設定する⁶⁾。構造体は簡易的な一質点系で模擬し、吊り天井部分と構造体部分を剛体によって接続する。図5の天井部分の重量は約 28.53kg であった

為、文献7)を参考に、天井と構造体の重量比を1:100とし、構造体の重量を約 2853kg とした。

3.2 構造体の剛性値を変動させた時の応答変位

図5に示した3つのモデルにおいて、吊り天井部分の剛性を一定とし、構造体の剛性を変化させて加振する。吊りボルト吊り天井モデルとその他2つの吊り天井モデルの剛性値を近づけるため、ケーブルとブレースの径を約 0.083mm に設定した。以下ではこの吊り天井部分の固有値を ω_c として扱い、一定としている。対して構造体部分の固有値を ω_s とし、 ω_c を基準に0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 3.0倍にした値とする。以下のグラフでは縦軸に最大応答変位、横軸に ω_s/ω_c という指標を用いる。また斜行ケーブル吊り天井モデルのケーブル内で張力消失が見られた指標の値は赤色の円で囲っている。

・神戸波



・大船渡波

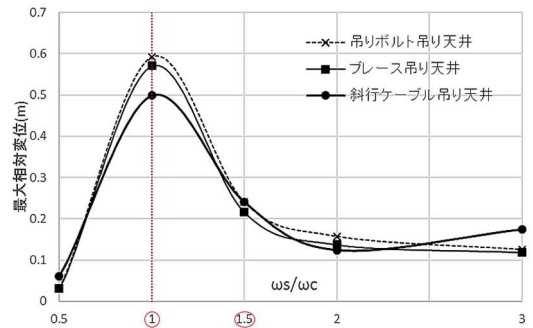


図6 各 ω_s/ω_c における水平方向最大変位

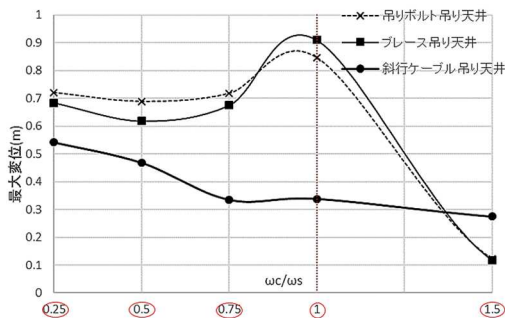
図6より、剛性の近い吊りボルト吊り天井モデルとブレース吊り天井モデルの最大変位は構造体の各剛性値においてほぼ同じ値となっている。しかし、斜行ケーブル吊り天井モデルに関してはその応答変位が上下していることが分かる。

3.3 吊り天井の剛性値を変動させた時の応答変位

次に、図5に示した3つのモデルにおいて、構造体の固有値 ω_s を入力する地震動の最大加速度応答周期から算出して一定とし、吊り天井部分の固有値 ω_c を変化させて解析を行う。神戸波と大船渡波の最大加速度応答時の周期はそれぞれ約 0.35(s) 、 0.21(s) であるため、構造体の固有値 ω_s は神戸波入力時には約 2.857[Hz] 、大船渡波入力時には約 4.76[Hz] に設定した。また吊り天井部分の固有値 ω_c は、 ω_s を基準に0.25、

0.5, 0.75, 1.0, 1.5 倍にした値とする。以下のグラフでは $\omega c/\omega s$ の指標を用いる。また前節同様斜行ケーブル吊り天井モデルのケーブル内で張力消失が見られた指標の値は赤色の円で囲っている。

・神戸波



・大船渡波

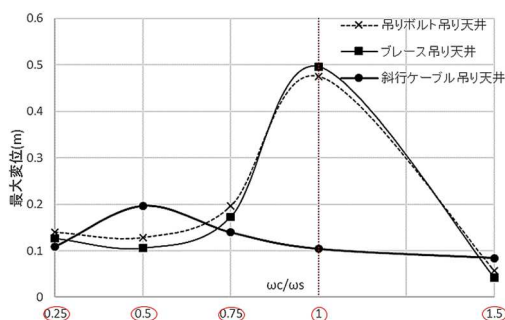


図7 各 $\omega c/\omega s$ における水平方向最大変位

図6同様、図7においても吊りボルト吊り天井モデルとブレース吊り天井モデルに対して斜行ケーブル吊り天井の最大変位が上下していることが分かる。

図6、図7中の赤色の破線は構造体と天井部分の固有値が近くなった部分である($\omega s/\omega c=1.0$, $\omega c/\omega s=1.0$)。この時吊りボルト吊り天井モデルとブレース吊り天井モデルでは共振現象によって変位が増大するのに対し、斜行ケーブル吊り天井モデルでは変位増大が抑えられていた。斜行ケーブル吊り天井モデルとブレース吊り天井モデルの相違点は図2の材料特性の有無である。つまりケーブル材が持つ張力消失という特性が、共振による変位の増大を抑えたということが分かる。

4. 屋根勾配を考慮した三次元吊り天井の応答解析

体育館などで用いられる吊り天井は吊り材を接続する屋根面が山形となっている場合が多い。そこで本章では2章で用いた三次元吊り天井モデルに新たに傾斜をつけ、地震動を入力してその応答を確認する。地震動は2章で用いた石巻波を使用し、解析は石巻波の水平加速度のみを入力した場合と、水平加速度と鉛直加速を同時に入力した場合の2つについて行う。

4.1 傾斜をつけた三次元吊り天井モデル概要

図1に示した4つのモデルに傾斜を付けて新たにモデルを作成する。傾きはEディフェンス実験で使用された実寸大体育館の試験体を参照し、縦横の比が10:3となるようにしている⁸⁾。また、モデルは接続する屋

根面のみを傾けたもの(RSモデル)と、屋根面と天井板の両方を傾けたもの(BSモデル)の2種類について作成した。

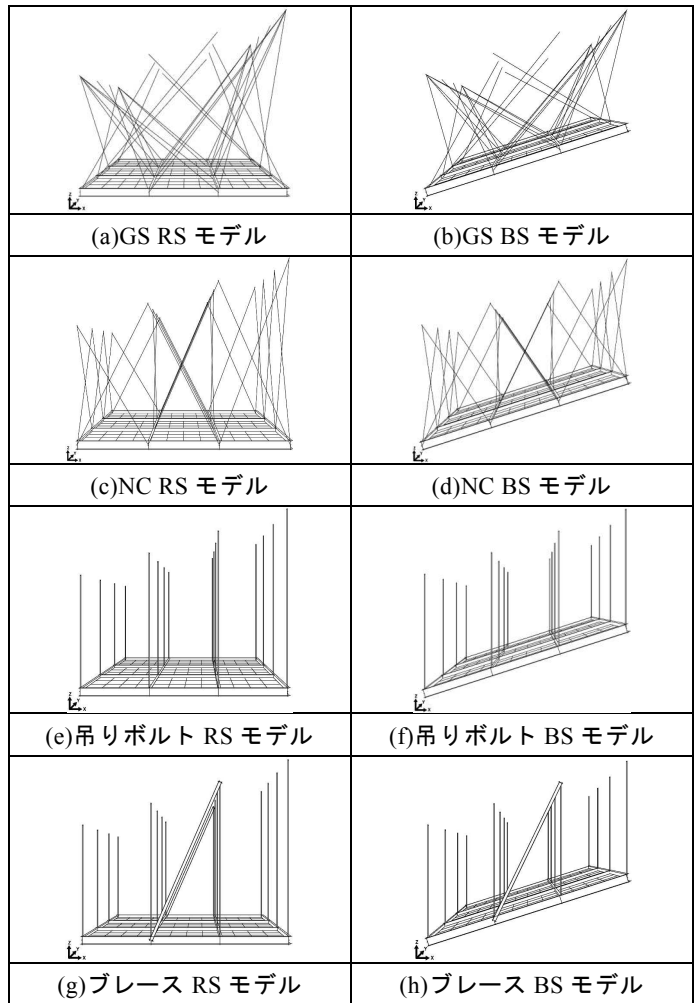
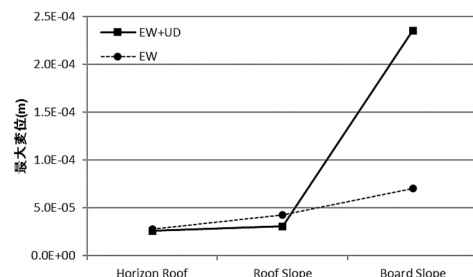


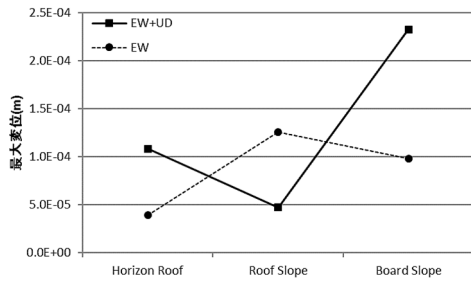
図8 傾斜をつけた三次元吊り天井モデル形状

4.2 各モデルの水平方向最大変位比較

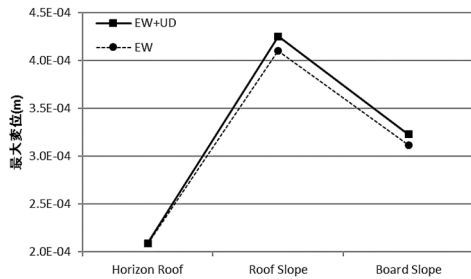
斜行ケーブル吊り天井と在来工法吊り天井の傾斜をつけたものとつけていないものそれぞれについて、石巻波を入力した時の水平方向最大変位を比較する。以下に載せる4つのグラフは傾斜を有しない水平なモデル(Horizon Roof), 接続する屋根面のみ傾斜をつけたモデル(Roof Slope), 屋根面と天井板の両方に傾斜をつけたモデル(Board Slope)のそれぞれについての最大変位を表す。また波線が石巻波の水平加速度(EW波)のみを入力した時、実線が石巻波の鉛直加速度と水平加速度(EW+UD波)を同時に入力した時の応答を示す。



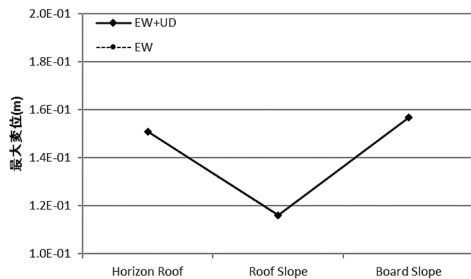
(a) 各GSモデルの最大変位



(b) 各 NC モデルの最大変位



(c) 各ブレースモデルの最大変位



(d) 各吊りボルトモデルの最大変位

図9 石巻波入力時の各モデル水平方向最大変位

図9より斜行ケーブル吊り天井では、ケーブル配置に関わらず、屋根面と天井板を傾けた状態で水平動と鉛直動を同時に入力すると、応答変位が少し大きくなる現象が見られた。傾斜の無い水平なモデルに比べ、天井板に傾斜をつけたモデルのケーブル材にかかる初期張力が上下していたことから、天井板が傾いたことによるケーブルの設置角度の変化や、ケーブルが負担する重量の変化などが原因であると考えられる。また屋根面のみを傾けたモデルでは、通常のケーブル配置を使用したモデルは傾斜の無いモデルと比較して水平動、鉛直動に対してその変位が上下していたが、グラウンドストラクチャケーブル配置を用いたモデルでは最大変位がほとんど変化しなかった。本章では斜行ケーブル吊り天井について天井板や屋根面に傾斜をつけることによって上記のような特徴が確認されたが、変位の値は非常に小さく、またブレースを取り付けた在来工法吊り天井よりも応答を低減することができていることから、勾配による影響はほとんどないと言える。

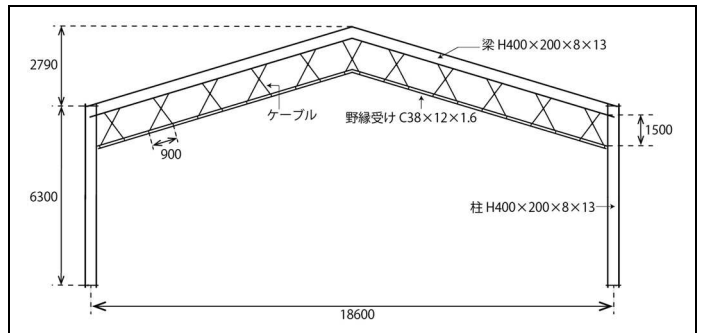
5. 山形屋根の体育館に取り付けた二次元吊り天井の応答解析

本章では斜行ケーブル吊り天井の大規模空間への適用性を確認する為、体育館構造躯体を二次元平面上でモデル化し、吊り天井を接続して加振する。

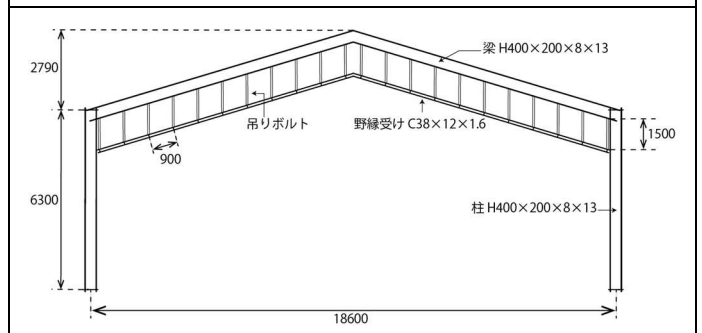
また加振の際に用いる地震波は3章で使用した神戸波と大船渡波としている。

5.1 二次元吊り天井体育館接続モデル概要

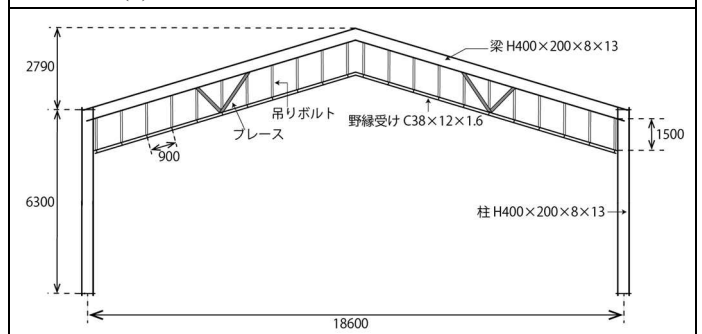
モデル化の対象とする体育館として、E-ディフェンス実験で用いられた実大鉄骨造体育館を参照する。吊り天井部分の吊り材に用いるケーブル、吊りボルト、ブレース材は2章で用いたものを、野縁受けは二次元吊り天井モデルの解析を行った3章と同じものを使用し、単位面積質量 10.0kg/m^2 の天井板が吊るされると仮定して、 9.0kgf/m の非構造質量を設定する。また吊り天井と接続する二次元体育館の梁、柱の部材には鋼種 SS400 の H-400×200×8×13 を用いる。



(a) 斜行ケーブル吊り天井体育館接続モデル



(b) 吊りボルト吊り天井体育館接続モデル



(c) ブレース吊り天井体育館接続モデル

図9 二次元体育館接続モデル形状

体育館躯体の平面寸法は $30 \times 18.6[\text{m}]$ で、屋根の頂部の高さは $9.09[\text{m}]$ としている。また吊り天井と屋根間の吊り長さは $1.5[\text{m}]$ とし、天井周囲のクリアランスは $60[\text{mm}]$ に設定している。使用するケーブル本数は吊りボルトと同数とし、ブレース吊り天井体育館接続モデルのブレース材は梁の中心部にV字型に配置する。

5.2 各吊り天井モデルの水平方向変位

図9で示した3つの体育館接続吊り天井モデルに神

戸波，大船渡波の水平方向加速度をそれぞれ入力し，その応答を見る．以下のグラフでは値の最も大きくなった構造躯体と野物受けの端部における相対変位を確認している．

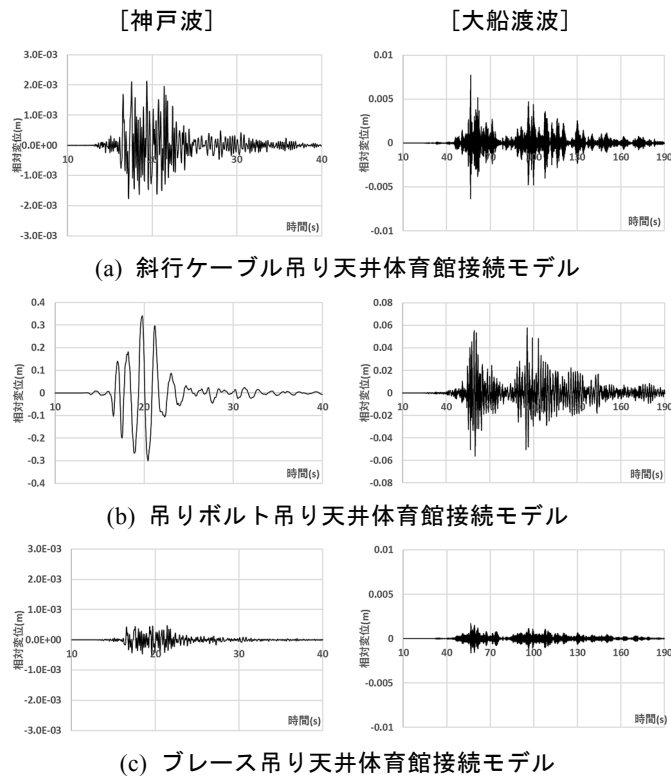


図 11 端部水平方向相対変位

図 11 より，吊りボルト吊り天井体育館接続モデルの応答変位に比べ，斜行ケーブル吊り天井体育館接続モデルとブレース吊り天井体育館接続モデルの応答変位が小さくなっていることが窺える．また斜行ケーブルを使用した吊り天井は大船渡波入力時の最大変位でも 1cm 以内に収まっており，在来工法のブレースを使用した吊り天井と比較しても遜色ない程度に応答を低減することができていることが分かる．

5.3 各吊り天井モデルの天井材内最大応力比較

神戸波，大船渡波を入力した際の各体育館接続モデルについて，以下で天井材の一部である野縁受けに生じる最大軸力を比較し，天井板や吊り材の留め具への影響を確認する．また軸力を確認する野縁受けは図 12 に示す赤色の部分とし，それぞれ「梁端部」，「梁中心部」，「躯体頂部」という名称を付ける．

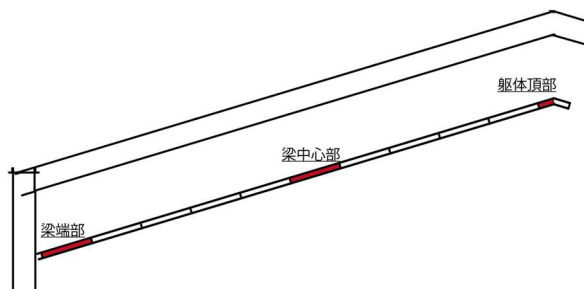
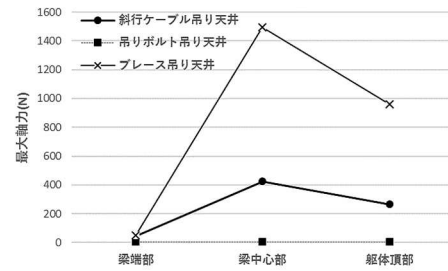
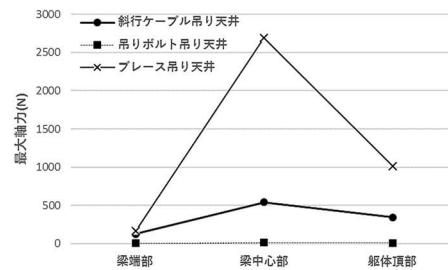


図 12 野縁受け軸力確認部分



(a) 神戸波入力時最大軸力



(b) 大船渡波入力時最大軸力

図 13 各モデルの野縁受けに生じた最大軸力

図 15 より，両地震波に対してブレース吊り天井の梁中心部の軸力が他のモデルと比較して大きくなっていることが分かる．梁中心部はブレース材の設置個所となっている為，ブレース材に働く応力の影響を受け，野縁受け内の軸力が局所的に大きくなったと考えられる．対して分散配置とした斜行ケーブル吊り天井では軸力の差が比較的小さくなっていることが見て取れる．

6. 結論

本研究では単体の吊り天井のみでなく，構造体に取り付けた吊り天井の応答性状について着目し，ケーブルの有する張力消失という特性がその応答性状にどのような影響を及ぼすのかについて検証し，その実用性を確認した．

参考文献

- 1) 吉中進「吊り天井，特願 2016-028045」 2016,2
- 2) 大庭直「斜行ケーブル吊り天井の地震応答に及ぼすケーブル配置の効果」大阪市立大学大学院 修士論文 2016,3
- 3) 財団法人日本建築センター「体育館等の天井の耐震設計ガイドライン」 pp51-pp67,2005,5
- 4) 日本建築学会「ケーブル構造設計指針・同解説」 pp32 1994,6
- 5) 船積宏彰，元結正次郎，仁科雄太郎，吉川昇「在来工法による鋼製地下天井の力学的特性に関する研究：その 1：天井各構成部位の力学的特性」日本建築学会大会学術講演集，第 2005 巻・構造 I，pp.911-912, 2005,7
- 6) 建築性能基準推進協会「建築物における天井脱落対策に係る技術基準の解説」 pp22-pp23, 2013, 10
- 7) 中村志帆「吊り天井の振動応答に及ぼす減衰効果に関する基礎的研究」大阪市立大学大学院 修士論文 2014,2
- 8) 佐々木智大「E-ディフェンス実験に基づく大規模空間吊り天井の脱落被害低減技術開発 その 2 試験体構造設計および未対策天井の設計」日本建築学会大会梗概集 2014,9