

# 天井の地震被害および動的基本特性

元結正次郎<sup>1)</sup> 後藤裕晃<sup>2)</sup> 佐藤泰章<sup>3)</sup>

- 1) 東京工業大学大学院 人間環境システム専攻 准教授, motoyui@enveng.titech.ac.jp  
2) 東京工業大学大学院 人間環境システム専攻 大学院生, gotohiro.titech.ac.jp  
3) 東京工業大学大学院 人間環境システム専攻 大学院生, yasuki.s.aa@m.titech.ac.jp

## 1. はじめに

天井を含む非構造材の被害報告は以前からなされてきてはいたが、注目され始めたのは 2001 年の芸予地震からである。この理由は地震被害で主要構造物の被害が減少する中で天井などの被害が相対的に増加してきたことによると思われる。特に、2003 年 9 月十勝沖を震源とする地震および 2005 年 8 月 16 日宮城県沖を震源とする地震における天井落下被害は大規模なものであった。これらの被害が問題視された理由は、それらに取り付く主要構造体の損傷がほとんど見られなかったにも関わらず、従来には見られなかった大規模な被害が発生したこと、また、これらの天井の仕様が鋼製下地在来工法天井と呼ばれる一般的なものであることによる。このことは、中規模の地震程度で悲劇的な損傷を発生させる可能性を有している天井が首都圏をはじめとする日本各地に多数存在することを意味している。

天井の落下被害は、直接的には人的被害を招く可能性および間接的には避難経路の遮断などの可能性を含んでいることから避けなければならない。特に、首都圏では大規模な集客施設が他の地域と比べ多数存在し、それらは一般に大規模な天井を設置していることが多いことから、天井落下被害の抑制・防止は重要な課題と考えられる。

一般に耐震設計法を確立するためには、被害事例の調査・検討および実験的・解析的検討を通して、対象物に作用する外力の推定法、各部位に発生する応力の算定法、各部位の耐力などの許容値などを把握する必要がある。これらのうち各部位の耐力については文献 1~8 に示す研究がなされてきており、徐々に分かりつつあるが、一方で天井の固有周期を算定することすら満足にできないのが現状である。固有周期は構造体の動的性状を述べる上で最も基本的な値であるにも関わらず、鋼製下地在来工法天井の固有周期の推定を困難にしている理由は、独特な金物による部材の接合形式が採用されているためであり、建物の躯体のような剛接合やピン接合などといった力学的に明快な接合条件となっていないことによる。

本報告では、最初に近年の地震における鋼製下地在来工法天井の被害事例を示し、耐震設計法の確立の重要性を確認する。次に、地震荷重の設定にあたり重要な特性である天井の固有周期に着目し、実験的・数値解析的検討を通して、固有周期を高精度で再現することを可能とするモデル化を提示するとともに、設計時に用いるための簡便な手法について提案する。

## 2. 鋼製下地在来工法天井の概要と地震被害

### 2.1 鋼製下地在来工法天井の概要

在来工法天井の構成について説明する。写真 1 に一般的に用いられている天井の構成ならびに各部位を接続する金物の呼称を示す。上から折板用インサート金物（天井が設けられる箇所の屋根が金属製屋根折板の場合に用いられる）、吊りボルト、ハンガー、野縁受け、クリップ、野縁と呼ばれる部材および接続金物から成り、これらを総称して天井鋼製下地材と呼んでいる。吊りボルトは、その上端部を屋根折板に緊結された折板インサート金物により支持され、その下端部に野縁受けを支えるハンガーが取り付けられる。野縁受けはハンガーに嵌め込むように設置され、この野縁受けに野縁がクリップによって接続される。このように鋼製下地が組み上がった後、天井面を構成するボードがビスにより野縁に張り付けられる。なお、振れ止めのブレースは、通常、吊りボルトに溶接される。

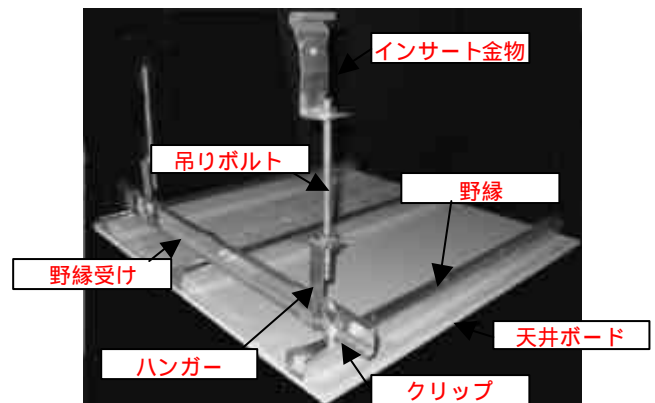


写真 1 鋼製下地在来工法天井

## 2.2 地震被害の概要

2001年芸予地震以来天井の被害報告はなされているが、極めて大規模な落下が発生したのは2003年9月に起きた十勝沖を震源とする地震での釧路空港ターミナルビルおよび2005年8月の仙台市にある屋内プールである。当然ながら、実際の被害はこれら以外にも複数発生したと思われるが、民間の施設においては地震後速やかに改修工事が行なわれてしまうために被害実体の全容を明らかにすることは困難であるのが現状である。このことが天井の耐震設計法構築の大きな障害の一つとなっている。

図1に釧路空港ターミナルビルの被害状況を示す。被害のあったロビーは東西18m(9m×2スパン)、南北36m(9m×4スパン)、高さ19.6mの空間となっている。図中の塗りつぶした部分が天井が落下した箇所である。当該部分を撮影したものが写真2である。ほとんどの領域が落下していること、および、天井面は落下しているものの写真1で示す野縁受けは所定の位置に残っていることが分かる。

図2は仙台屋内プールの被害状況である。建物は直径60mの円形の平面となっており、被害のあった屋内プール部はその1/3程度の空間となっている。この場合には塗りつぶした領域のみが残存している状態であった。この場合も写真3に示すように、野縁受けのほとんどは所定の位置に残っていることが分かる。

両者ともに本報告で対象とする鋼製下地在来工法天井であり、野縁受けが所定の位置に残った状態で天井面が落下していることから、落下の直接的な原因としては写真1に示したクリップと呼ばれる接合金物であることが推定される。そのために、既往の研究ではクリップ接合の力学的性状を中心に研究がなされてきており、徐々にその力学的性状は明らかにされつつある。

一方で、現在までに、当該天井に作用した地震荷重がどの程度であったかを推定した研究はなされていない。当時、躯体の調査も併せて行なわれているが、構造物本体には損傷は全く見られなかったことも共通しており、このことから建物に入力された加速度はさほど大きくなかったことは推定されている。しかしながら、建物の床(屋根)応答を推定することが成し得たとしても、鋼製下地在来工法天井の固有周期を高精度で予測する方法が確立されていないために、地震時に天井面に作用した加速度あるいは変位などを推定することができないのが現状である。地震被害を説明するため、あるいは、天井の耐震設計法における地震荷重を論理的に設定するためには、基本的な動的特性である固有周期に対する高精度の算定方法を確立しなければならず、この課題も耐震設計法を構築する上で急務とされている。

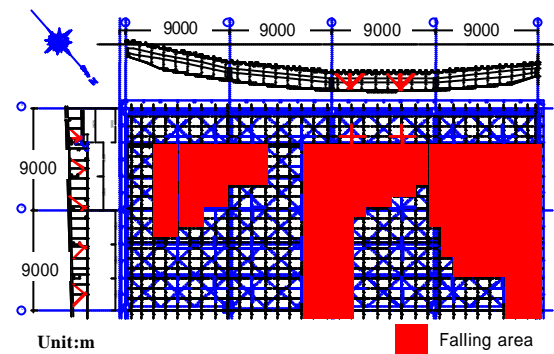


図1 釧路空港ターミナルビル



写真2 釧路空港ターミナルビル

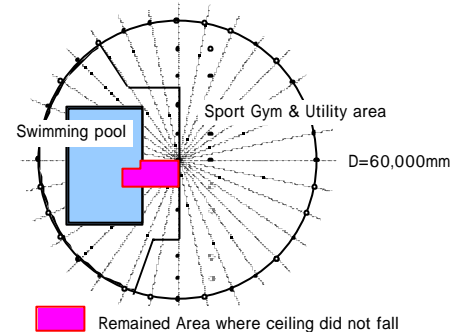


図2 仙台屋内プール



写真3 仙台屋内プール



写真4 クリップの損傷状況

### 3. 鋼製下地在来工法天井の固有周期および剛性に関する実験的検討

図3に示す部分天井試験体を用い、自由振動実験および静的水平加力実験を行った。

鋼製下地在来工法天井では斜め振れ止めが吊りボルトに取り付けられる。そのために不可避免的な偏心が生じる。この斜め振れ止めの偏心に着目し実験を行なっている。自由振動実験では斜め振れ止め取り付け位置  $L_b$  (図3参照)をパラメータとして  $L_b=0, 100, 300\text{mm}$  および斜め振れ止めを取り付けない場合の4種類として、さらにそれぞれについて天井ボード1枚の場合、天井ボード2枚の場合および天井ボード2枚+付加質量の場合の3種類(振れ止めあり試験体の場合: 58kg, 90kg, 149kg; 振れ止めなし試験体の場合: 55kg, 88kg, 147kg)を設定している。また、静的加力実験においては  $L_b=0, 100, 200, 300, 400, 500\text{mm}$  および  $1,370\text{mm}$  (斜め振れ止めなし)の7種類を設定している。表1に使用した鋼製下地材の断面リストを記しておく。

図4は  $L_b$  を変化させて行った自由振動実験から得られた固有周期をまとめたものである。図から解るように、 $L_b$  が長くなるにつれて天井の固有周期が長くなっている。これは、 $L_b$  が長くなるに伴い局部的な曲げ変形が大きくなり、剛性が急激に低下するためである。実際の施工に際しては従来  $L_b$  は施工者の判断で決定されているが、天井の振動特性に大きな影響を及ぼす重要な値であり、設計者によって監理されるべきものであることが本結果からも明らかである。

ここで予備的解析として斜め振れ止めが取り付け吊りボルトに対して図5に示すような比較的単純なモデルを設定し解析を行い、実験結果との比較を行った。結果を図6に示す。図中の実験結果は天井ボード2枚貼りとした試験体の結果である。いずれのモデルを用いても自由振動から得られた固有周期とは差があり、天井の剛性を適切に評価しているとは言い難い。そこで次に、天井の剛性に着目し静的加力実験を行なった。

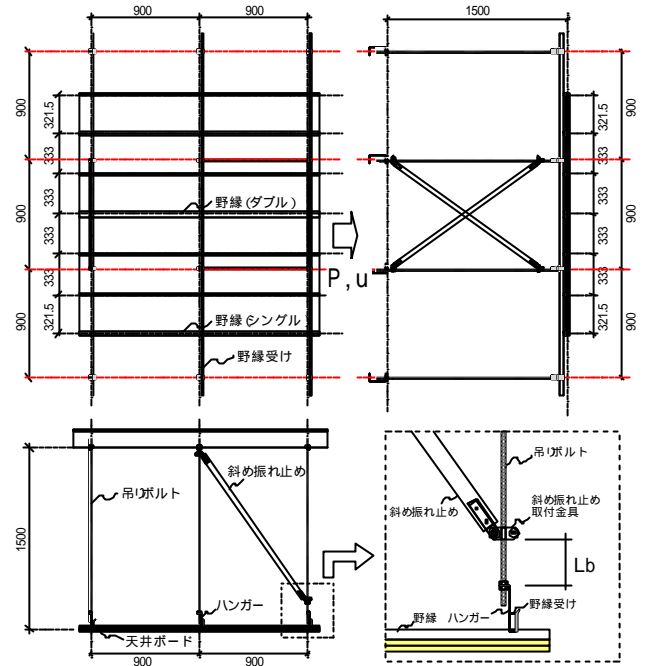


図3 試験体

表1 部材断面

天井部材	断面公称寸法	天井部材	断面公称寸法
吊りボルト	9 mm	クリップ(シングル)	23 × 0.6 mm
斜め振れ止め	38 × 12 × 1.2 mm	クリップ(ダブル)	46 × 0.6 mm
ハンガー	24 × 2 mm	野縁(シングル)	25 × 19 × 0.5 mm
野縁受け	38 × 12 × 1.2 mm	野縁(ダブル)	50 × 19 × 0.5 mm

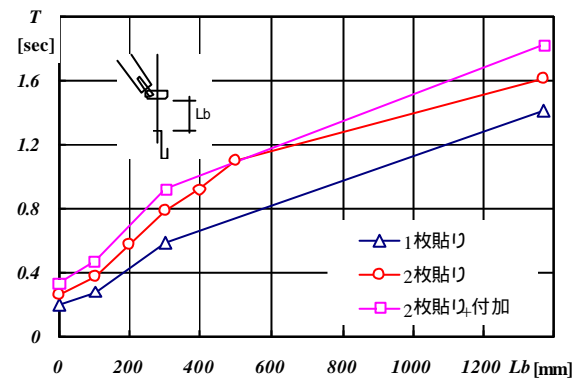


図4 自由振動による固有周期

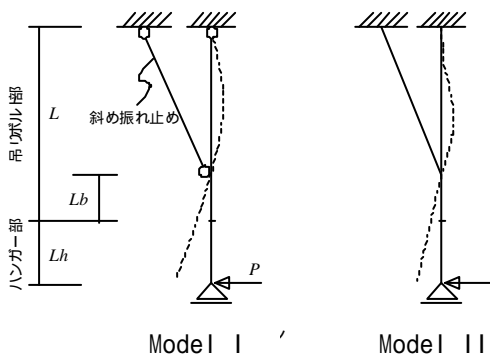


図5 予備解析モデル

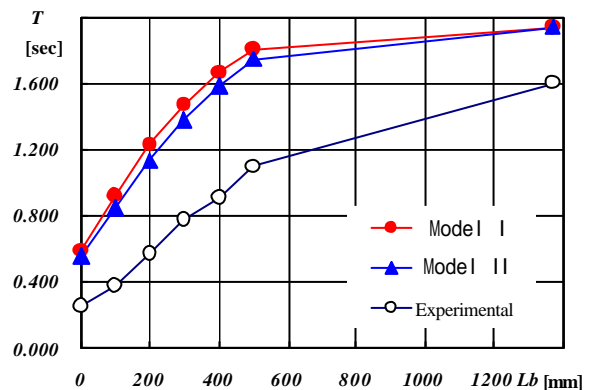


図6 実験結果と予備解析結果

図7に静的水平加力実験の結果を示す。図7(a)は斜め振れ止め取り付け位置  $L_b$  を変化させた試験体のうち代表的なものを取り出した結果であり、図7(b)は斜め振れ止めがない場合の結果である。

まず、図7(a)において、 $L_b$  の長さによって天井の水平剛性が変化すること、および、 $L_b$  が小さい場合に正側荷重負側荷重で異なる挙動となっていることが確認される。さらに、 $L_b$  が大きい場合には図7(b)に示すように全体としては荷重の方向に関係なく振舞うものの、荷重時と除荷時の挙動が異なる性状となっている。

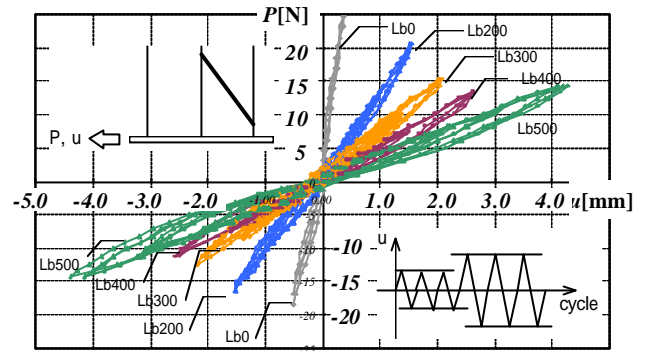
この荷重変位関係に見られる方向性をより明確にするために方向性が顕著な  $L_b$  が小さい試験体について取り出し図化したものが図8である。図中には自由振動実験により得られた固有周期から計算した剛性も示してある。この結果から、天井を正方向に加力する場合と負方向に加力する場合では剛性が異なっており、自由振動実験から得た剛性は正方向と負方向の剛性の中間にあることが解る。

#### 4 ハンガー-接合部加力実験

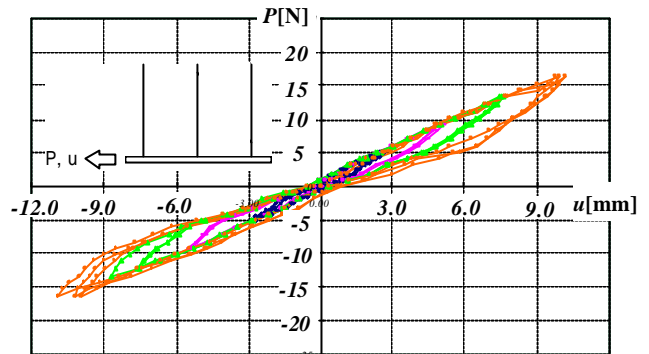
前節で述べた荷重方向によって異なる挙動を示す要因として、ハンガーによる接合部の非対称性が考えられる。そこで、ハンガー-接合部を抽出した要素実験を実施した。

図9に示す加力装置を用いて荷重実験を行った。荷重方法は野縁受け両端およびハンガー上端を治具に固定し、ハンガー上端に強制変位を与える方法としている。荷重パターンは正負繰り返し一回荷重または繰り返し漸増荷重とし、それぞれハンガーが閉じる方向(正方向)から荷重を開始する場合とハンガーが開く方向(負方向)から荷重を開始する場合の2パターン行っている。

実験結果を図10に示す。加力方法によって多少の違いはあるものの、いずれの場合も正側荷重時の挙動と負側荷重時の挙動は全く異なる性状を示している。図11は実験結果による荷重変位関係の概念図である。この荷重方向の差異は図8の天井全体の方方向性と酷似していることから、天井全体としての方向性はハンガーの接合部が原因と考えられる。



(a) 斜め振れ止めがある試験体



(b) 斜め振れ止めがない試験体

図7 静的加力実験結果

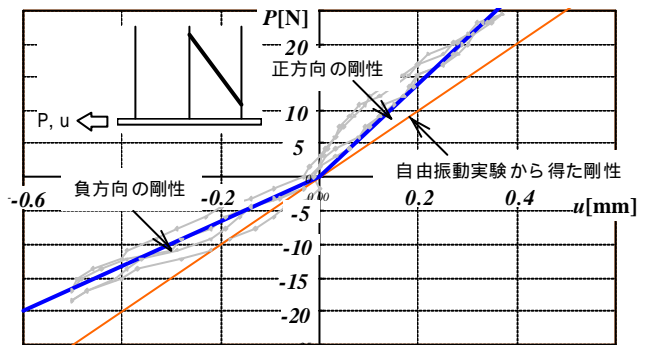


図8 剛性の方向性

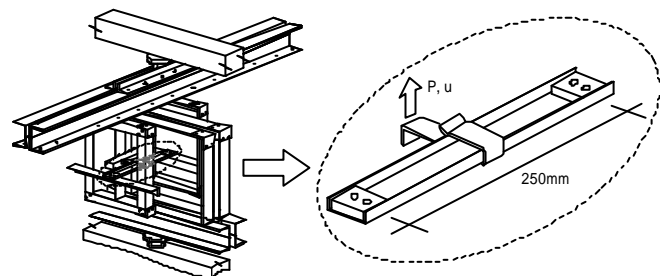


図9 ハンガー-接合部要素実験

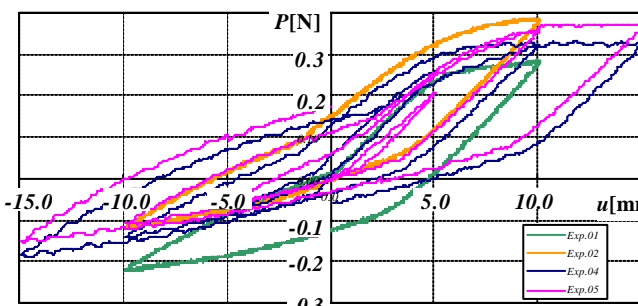


図10 ハンガー-静的加力実験

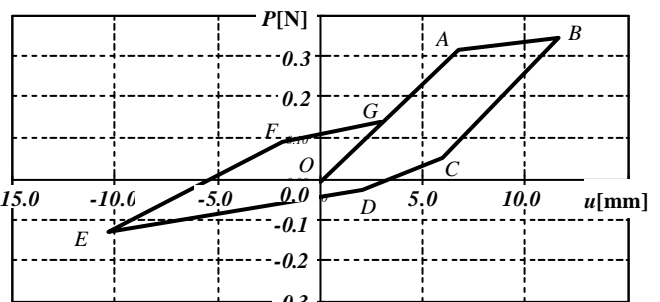


図11 荷重変位関係概念図

荷重変位関係の概念図のそれぞれのフェーズで、ハンガーがどのような状態にあるのかを把握するため、数値解析により実験の再現解析を行った。解析対象を図 12 に示す。境界条件は野縁受けの両端をピンとし、ハンガー上端に回転を拘束しながら強制変位を与えている。ハンガー近傍のモデル化詳細図を図 13 に示す。ハンガーと野縁受けは接触要素にて接合されており、その影響の有無を明らかにするため、接触要素の取り付く位置を変えて解析を行った。代表的なものを図 14 に示す。

まず model A, B による解析結果を図 15 に示す。model A は最小限の接触要素を入れたモデルであるが、実験と比べると正方向（ハンガーが閉じる方向）の剛性および耐力が低くなっており、実際接触しているはずの部分が表現されていないと考えられる。一方、model B は想定される最大限の接触要素を入れたモデルである。この場合には、実験結果と比し、負方向（ハンガーが開く方向）の剛性および耐力が途中から大きくなっている。これは過剰に接触要素を入れてしまったため、本来は効かない部分が力を負担してしまったためであると考えられる。このようにハンガーの挙動は野縁受けによる拘束効果が大きな影響を及ぼすために、実際の挙動を正確に評価するためにはハンガーと野縁受けとの相互作用を実態に即したモデルとすることが重要であることが解る。

試行錯誤的に求めた最適な接触要素配置の解が model C である。model C による解析結果を図 16 に示す。model A, B と比較すると、こちらは正方向、負方向ともに実験結果の特徴を捉えていると言える。この解析結果からハンガーの履歴特性が図 11 のような強い非線形性を有する性状となることを以下のように説明することができる。

<0-A-B 間> この区間では、active となる接触要素は および となる。したがって、変形の概略は図 17 右のような状態になるために、可撓部分は野縁受け上部のみとなる。

<C-D-E 間> この区間では、active となる接触要素は および となる。したがって、変形の概略は図 17 左のような状態となり、上記の 0-A-B 間と比べて剛性・耐力ともに小さなものとなる。

## 5. 天井の水平剛性および固有周期の簡易推定手法

前節において、ハンガー接合部の力学的性状はハンガー単体ではなく、野縁受けとの相互作用にて決定されることが明らかとなった。これを忠実に評価するためには複雑な解析モデルが必要となる。天井の損傷を追跡するためには忠実なモデルが不可欠であり、この目的において前節で示したモデル化は有意義な結論ではあるが、実際の設計においては損

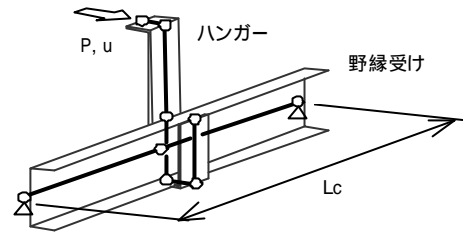


図 12 解析対象

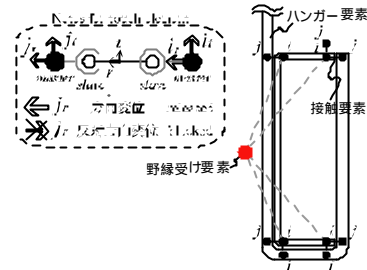


図 13 ハンガー近傍のモデル化

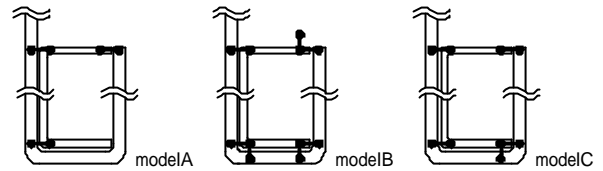


図 14 接触要素の配置例

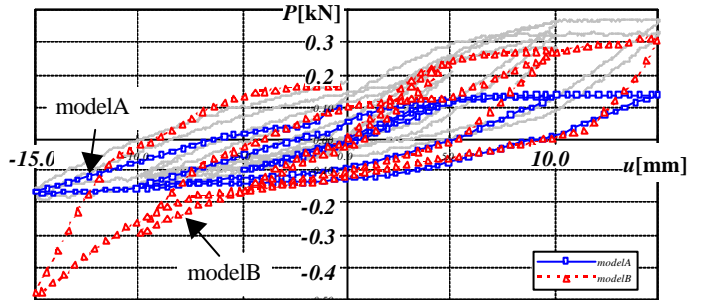


図 15 数値解析結果 - model A & model B -

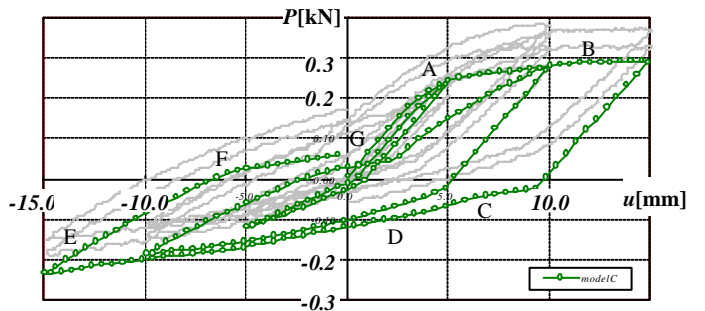


図 16 数値解析結果 - model C -

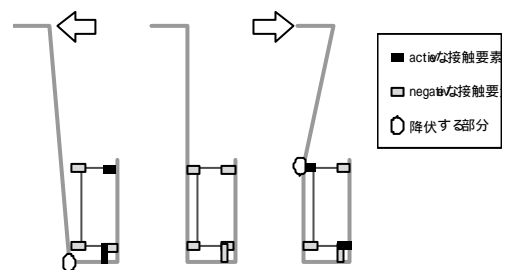


図 17 方向による変形の差異

傷以前に天井という系が線形システムにある段階の情報が用いられることから、前節のような詳細な解析モデルを用いることは非現実的である。そこで本節では、天井が線形システムにある場合の固有周期を算定するという目的に対して、簡易に剛性を推定する方法を提示する。

まず、前述したように野縁受けの剛性がハンガー接合部の剛性を決定するための重要な因子となるが、野縁受けの剛性は野縁受けの材長および支持条件により決定される。ここでは支持条件を共通として材長  $L_c$  をパラメータとする数値解析結果を通して、材長の変化がハンガー接合部の水平剛性に及ぼす影響を検討する。図 18 は野縁受けの材長を変化させたときの正側負側の初期剛性を図化したものである。 $L_c$  が大きくなるほど剛性が低下しているとともに方向性が小さくなる様子が確認される。方向性が減少するのは野縁受けの変形が主たる変形となるためである。

通常、野縁受けはクリップ（写真 1 参照）で約 300mm ピッチで野縁に連結される。クリップおよび野縁は野縁受けの変形を完全に拘束する剛性は有していないことを勘案して  $L_c=340$  のときのハンガーの水平剛性を採用するものとする。

この値を用いて 3 節で用いた試験体の剛性を算定した結果を図 19 に、それを用いて求めた固有周期を図 20 に示す。両者はよく対応していることから、上記で採用したハンガーの水平剛性は妥当であり、そのときの野縁受けの材長  $L_c=340$  が天井下地として組み込まれたときの野縁受けの有効長さを見なすことができる。

#### 4. まとめ

本報告では、近年の鋼製下地在来工法天井の地震被害について事例を示すとともに、従来明らかにされていない当該天井の水平剛性に及ぼすハンガー接合部の影響を定量的に示すとともに、この固有周期を精算するためのモデル化ならびに簡易に求めるための方法を提示した。

#### 参考文献

- 1) 森田佑輔、佐藤泰章、元結正次郎、吉川昇：クリップの素材試験およびクリップ接合実験概要、日本建築学会大会講演集 B-1, p.807-808、2008 年
- 2) 佐藤泰章、元結正次郎、吉川昇：クリップの取付状態が脱落耐力に及ぼす影響、日本建築学会大会講演集 B-1, p.809-811、2008 年
- 3) 元結正次郎、佐藤泰章、船積宏彰：クリップ接合部に対する力学モデルの提案、日本建築学会大会講演集 B-1, p.811-812、2008 年

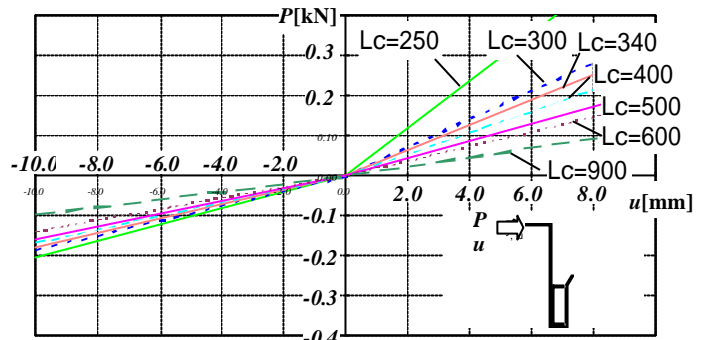


図 18 野縁受けの材長が及ぼす影響

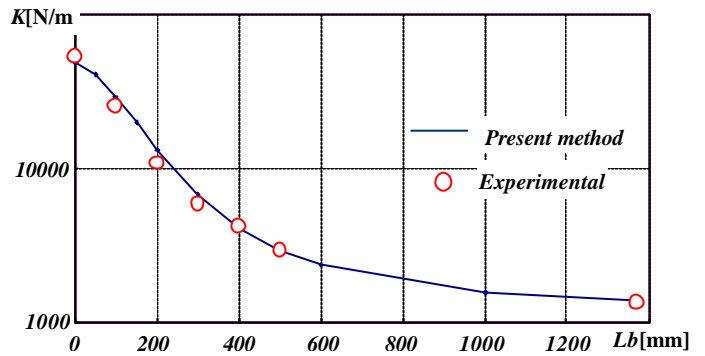


図 19 簡便法による天井の剛性

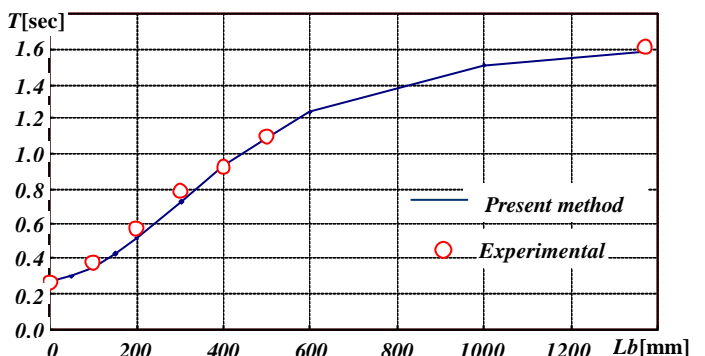


図 20 簡便法による天井の固有周期

- 4) 船積宏彰、元結正次郎、佐藤泰章：クリップ接合部に対する力学モデルの解析手順および妥当性検証、日本建築学会大会講演集 B-1, p.813-814、2008 年
- 5) Ferdy Ferdian Sodik、元結正次郎、吉川昇：クリップの力学的特性に関する実験的検討、日本建築学会大会講演集 B-1, p.859-860、2007 年
- 6) 中川祐介、元結正次郎、森田佑輔：クリップの脱落および連鎖脱落発生条件、日本建築学会大会講演集 B-1, p.863-864、2007 年
- 7) 森田佑輔、元結正次郎、中川祐介：天井の動的特性およびすべり発生条件、日本建築学会大会講演集 B-1, p.865-866、2007 年
- 8) 中川祐介、元結正次郎：鋼製下地在来工法天井におけるクリップの力学的特性に関する研究、日本建築学会大会講演集 B-1, p.847-848、2006 年