

令和 4 年 6 月 9 日現在

機関番号：12501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2021

課題番号：17K06632

研究課題名(和文) ルーズホール設置型ローラー支承の3次元動的特性の解明と保有耐震安全性の評価

研究課題名(英文) Elucidation of 3-D Dynamic Characteristics and Evaluation of Retained Seismic Safety of Loose-Hole type Roof Joints

研究代表者

島田 侑子 (Shimada, Yuko)

千葉大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号：90586554

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：立体トラス屋根の支承部において多用されるルーズホール設置型のローラー支承を対象に、二方向からの地震入力を受けてどのように破壊し、また構成する要素がどのように関連しているのか、要素実験や試験体を模した有限要素解析等での挙動を検討した。この結果、すべり最大速度が100 mm/s以下の場合には、速度依存性は弱く、最大速度が100mm/sを超え、速度の上昇を伴い線形的に摩擦抵抗が低下すること、ベースプレートに傾きがついてすべった場合、摩擦係数が0.1程度大きくなること、水平二方向載荷ではアンカーボルトがベースプレート側面に接触し、その後変形してスライドしなくなった傾向が確認できた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

他のすべり支承より安価で簡単に施工でき、立体トラスを有する既存建物で一般的に用いられているルーズホール形式のローラー支承について、これまで検討がほとんどなされてこなかった水平二方向入力や動摩擦力の影響を含めた検討により、よりリアルな支承部の挙動と特徴を明らかにできた。本研究の成果は、即時に実務に直結できる内容であり、新築建物のみならず、既存建物に対して耐震補強を行う場合、更には被災した建物を復旧させる場合においても、ルーズホール設置型のローラー支承を安全かつ最大限に活用できるようになる面で、耐震工学に大きな貢献をもたらすものである。

研究成果の概要(英文)：The behavior of a loose-hole type roller bearing, which is often used in the bearing section of a vertical truss roof, was investigated by elemental experiments and finite element analysis simulating the specimen to determine how the bearing fails under seismic input from two directions and how the component elements are related to each other. The results show that when the maximum sliding velocity is less than 100 mm/s, the velocity dependence is weak; when the maximum velocity exceeds 100 mm/s, the frictional resistance decreases linearly with increasing velocity; when the base plate slides at an angle, the friction coefficient increases by about 0.1; and when the anchor bolts contact the sides of the base plate in the two-directional horizontal loading, the friction resistance increases by about 1.0. In the case of two-directional horizontal loading, the anchor bolts contacted the sides of the base plate, which then deformed and stopped sliding.

研究分野：鋼構造，合成構造，耐震工学

キーワード：定着部 せん断力伝達 アンカーボルト破断 ルーズホール 水平二方向載荷

## 1. 研究開始当初の背景

立体トラス屋根と RC 躯体を持つ体育館等において、両者の間はピン支承、またはピン支承とローラー支承の組み合わせで設定されている。ピン支承に相当する接合部（以下、定着部）について、申請者らなどによる研究<sup>1)</sup>により力学的性状が把握されてきた。一方で、ベースプレート（以下、B.PL）にルーズホールを設置し、アンカーボルト周りを水平移動可能とした、安価で簡便なローラー支承については、過去の地震において、ルーズホールにアンカーボルトが衝突し、B.PL やモルタルの損傷が報告されている<sup>2)</sup>にもかかわらず、詳細な挙動は明らかになっていない。ルーズホール設置型のローラー支承に関する研究としては、適宜スリップモデルを設定して構造物の応答解析を行い、ルーズホール端部の衝突による支承部のせん断力の増大や周辺部材の損傷の可能性、ルーズホールのサイズと応力との関係を述べた研究例<sup>3)4)</sup>等があるが、いずれも既往の柱脚などを基に設定された履歴モデルを基に行った解析であり、ローラー支承自体の弾性範囲から破壊に至るまでの履歴挙動に関する研究は少ない。特に地震時に水平二方向から力を受けた場合は、ルーズホール側面にアンカーボルトが衝突して設計通りに滑らず、早期に支承部に大きなせん断力がかかり、アンカーボルトが破断する可能性もあるが、この点については既往の研究では考慮されていない。また、ルーズホールとアンカーボルトが接触しない場合でも、B.PL とベースモルタル間の摩擦力がローラー支承の滑り挙動に影響する。鋼とモルタル間の摩擦力に関しては、実験に基づく静摩擦抵抗機構の検討など研究例<sup>5)</sup>があるが、地震荷重のように動摩擦力を繰り返し受け続け、かつベースモルタルが破壊して刻々と摩擦力が変化する場合は摩擦抵抗機構についてはわかっていない。ルーズホール設置型のローラー支承が実際に受ける3次元荷重や動的載荷条件下での履歴挙動、破壊への過程を把握することは、立体トラスを有する多くの既存建物で一般的に使用されていることからそれら建物の安全性を確保するための急務である。中でも体育館は災害時の避難所として使用されることが多いことから、より重要である。

## 2. 研究の目的

立体トラス屋根の支承部において、ルーズホール設置型のローラー支承が多く用いられている。この支承の破壊までの履歴特性については、水平二方向からの地震入力を受けて、ルーズホール側面にアンカーボルトが衝突して過大なせん断力がかかり、早期に支承部が大きく破壊することや、地震の動的荷重により B.PL とモルタル間の摩擦が小さくなることが影響すると考えられるが、既往研究が少ないため詳細が明らかになっていない。本研究は、このようなローラー支承を対象に水平二方向載荷実験と動的一方向載荷実験を行い、上記のような現象をふまえた力学的性状を把握する。更に実験結果を用いて簡易で精度の高い力学モデルを構築し、立体トラス構造の保有安全性を明確に評価することで新築・既存建物の耐震補強・復旧設計にも資する。

## 3. 研究の方法

研究当初は水平二方向載荷試験を実施予定であったが、その後、新型コロナウイルスの感染拡大により実験設備の使用含め実施体制や環境に大きく変更が生じたことにより、載荷実験ではなく、要素実験や試験体を模した有限要素解析等での挙動を検討することとした。

### 3.1 ベースプレートとモルタル間の動的摩擦実験

屋根の B.PL と RC 架構上部のモルタル間の接触面に対して、摩擦力が生じる。B.PL とモルタル間に働く垂直荷重は、露出柱脚よりもかなり小さいため、屋根と RC 造架構の接合部の B.PL とモルタル間の摩擦性状は、露出柱脚とは異なると考えられる。特に既往研究<sup>6)</sup>で示された露出柱脚において、黒皮付き鋼板とモルタル間の動摩擦係数の速度依存性が屋根接合部でどうなるかに着目する。既往の露出柱脚の実験<sup>6)</sup>を基に鋼板とモルタルの接触部での振動実験を行い、摩擦係数と速度の関係性に関して検討を行った。また、地震により、鉄骨屋根下部の B.PL の接触面はモルタルに対して傾きが生じることが考えられ、その状態で摩擦抵抗すると露出柱脚の場合よりもモルタルの表面を掘り起こすため、摩擦係数に影響を及ぼすことが考えられる。このことから鋼板の傾きを変えて検討した。

図1、図2に試験体を示す。モルタルは、スタッドを打った鉄板上に厚さ 50mm で施工され、モルタルの真上に、鋼材接触子があり、治具の下部は接触子をボルトで支持し、治具は、上部に置いたロードセルを介して、錘の重量を接触子に伝える。治具上に H 形鋼錘があり、加振中に外れないようシャコ万により一体化している。また、実験中の試験体の転倒を防ぐため、H 形鋼錘に鋼板の脚を溶接し、振動台の接触面には、キャスターを設置している。鋼材接触子の摩擦面は、30mm×30mm で、面圧は一定で 0.78N/mm<sup>2</sup> とした。全てのモルタル圧縮強度は参考値で 60N/mm<sup>2</sup> であった。表1は試験リストを示す。実験パラメーターは、表面仕上げ((1)黒皮付き鋼板、(2)赤錆加工した鋼板、(3)ラッカー塗装した鋼板の計3種)、入力速度、周期と傾きとした。傾きは、0°を基本とし、(1)(3)は、1.5°と(2)は、1.5、3.0°を条件として追加した。

入力波は、載荷時間が 10 秒の水平一方向単振動正弦波とした。振動数は、既往の研究の基準である 1Hz とそれより小さい 0.8Hz を実施した。入力速度は 400mm/s から 800mm/s まで 100mm/s 毎に大きくして載荷した。なお、鋼材接触子は種類ごとと交換せずに繰り返し用い、モルタルは、

接触子の種類・入力速度/周期・鋼材接触子の傾度ごとに1個用いた。

計測は加速度計と赤外線変位計を設置した。加速度計を振動台水平方向に1つ、試験体水平方向・鉛直方向に2つ、計3つ設置した。赤外線変位計はモルタルに対して鋼材接触子の相対変位をすべり変位として計測する。すべり変位を $\Delta 0.01$ 秒で微分した値をすべり速度とする。摩擦係数は、水平方向に設置した加速度計で得られた水平加速度に試験体全質量を乗じて求められる水平慣性力( $F = \mu N$ )を用いた。

### 3.2 有限要素解析によるルーズホール定着部の水平二方向载荷下での挙動

アンカーボルトと丸孔で構成された定着部は露出柱脚(ピン支持)に近い挙動を示し、一方向だけでなく二方向载荷を受ける場合に関しても挙動がわかってきている。一方、アンカーボルトと長孔で構成されるルーズホール定着部に関しては一方向载荷した場合の研究<sup>7)</sup>はあるものの、実際の地震動に近い二方向载荷での挙動についてほとんど解明されていない。二方向载荷の場合には、早期にアンカーボルトがルーズホール孔側面に衝突し、長孔方向への十分なスライドを行うことができずに破壊に至ることなどが考えられる。そこでルーズホール定着部に一方向载荷を行った実験<sup>7)</sup>を基として解析モデルを作成し、それに対して二方向载荷を行い、二方向载荷と一方向载荷の比較やルーズホール定着部の力学的特性について検討した。

図3に解析モデルを示す。モデルは既往研究<sup>7)</sup>の試験体を基に定着部の1/4とし、六面体要素で作成し、RC部分、ベースモルタル、敷きプレート、ベースプレート、ワッシャープレート、座金、ナット、アンカーボルト(M22)で構成される。アンカーボルトがルーズホール側面に接触するまでのクリアランスはそれぞれX方向53.4mm、Y方向3.4mmである。材料特性としてはモルタル、コンクリートの降伏点は文献<sup>7)</sup>に示されている試験で得られた圧縮強度とした。またアンカーボルトはSNR400B、その他の鋼材はSS400とし、強度は鋼材規格(JIS規格)をもとにバイリニア型で設定した。RC部と鋼材との間の摩擦係数は接触要素を用いて設定し、本解析ではB.PL下のテフロンパットを省略し、B.PLと敷きプレートの接触面の摩擦係数は3.1で行った摩擦実験に基づき0.14に設定した。

本解析におけるパラメータは载荷方向(水平一方向、水平二方向)である。水平二方向载荷は楕円履歴とし、長軸:短軸の比を3:1とした履歴を中心に、長軸:短軸の比を2:1,4:1とそれぞれ変化させた解析も行った。またアンカーボルトと孔の接触による二方向载荷への影響を検討するため、長軸:短軸の比を3:1とした楕円において初期変位を変更して解析した。荷重条件は屋根荷重を想定した鉛直力をベースプレート上面に、アンカーボルトの初期張力を与え、地震力による水平力として強制変位を与えた。

## 4. 研究成果

### 4.1 ベースプレートとモルタル間の動的摩擦実験の結果と考察

図4に摩擦係数-すべり変位関係を例示する。黒皮の場合、1Hz-500mm/sでは、履歴特性が明確でなく、摩擦係数の値は0.3~0.35の値を示した。1Hz-600/700mm/sでは、履歴特性が剛塑性型に近い型を示し、摩擦係数は、0.3~0.4の値を示した。1Hz-800mm/sでは、履歴特性は、剛塑性型の平行部が凹んだ形を示し、摩擦係数が変位ピーク値では、0.3~0.35の値を示し、すべり中は平均0.2の値を示した。

赤錆の場合も黒皮と同様に速度による履歴特性の変化が入力速度1Hz-600mm/sでみられ、黒皮よりも早い段階で示した。また、摩擦係数は、変位ピーク値の場合、平均0.4を示した。塗装の

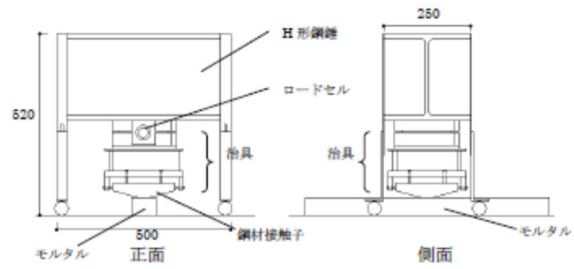


図1 試験体立面図

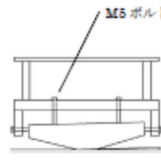
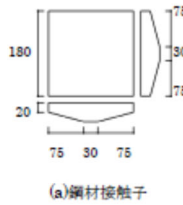


図2 試験体詳細

表1 試験体諸元

黒皮付き鋼板とモルタル		
周期と入力速度	鋼材接触子の傾き	モルタルNo.
1Hz-400mm/s	0°	1
1Hz-500mm/s	0°	
1Hz-600mm/s	0°	
1Hz-700mm/s	0°	
1Hz-800mm/s	0°	
1Hz-600mm/s	1.5°	2
1Hz-700mm/s	1.5°	
0.8Hz-500mm/s	0°	3
0.8Hz-600mm/s	0°	
0.8Hz-700mm/s	0°	
0.8Hz-800mm/s	0°	
赤錆付き鋼板とモルタル		
周期と入力速度	鋼材接触子の傾き	モルタルNo.
1Hz-500mm/s	0°	4
1Hz-600mm/s	0°	
1Hz-700mm/s	0°	
1Hz-800mm/s	0°	
1Hz-600mm/s	1.5°	5
1Hz-700mm/s	1.5°	
1Hz-600mm/s	3.0°	6
1Hz-700mm/s	3.0°	
0.8Hz-500mm/s	0°	7
0.8Hz-600mm/s	0°	
0.8Hz-700mm/s	0°	
0.8Hz-800mm/s	0°	
ラッカー塗布した鋼板とモルタル		
周期と入力速度	鋼材接触子の傾き	モルタルNo.
1Hz-500mm/s	0°	8
1Hz-600mm/s	0°	
1Hz-700mm/s	0°	
1Hz-800mm/s	0°	
1Hz-600mm/s	1.5°	9
1Hz-700mm/s	1.5°	

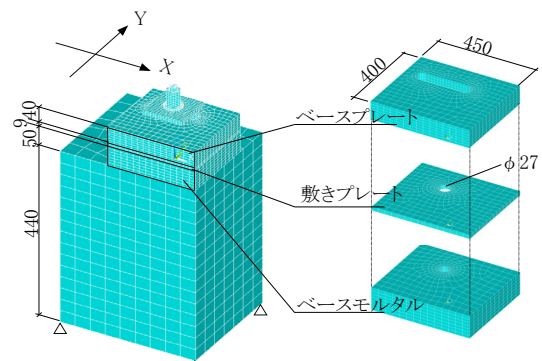


図3 解析モデル

場合も赤錆や黒皮と同様、速度による履歴特性の変化が入力速度 1Hz-500mm/s でみられ、摩擦係数は変位ピーク値の場合で 0.3 を示した。よって、赤錆>黒皮>塗装の順に摩擦係数が小さくなっており、塗装になるとすべり速度の影響を受けやすいと考えられる。

図 5 に摩擦係数-すべり速度関係を示す。これらを見ると黒皮の場合はすべり速度 100mm/s の値近くで摩擦係数が 0.35 となるが、すべり速度ピーク値での摩擦係数は、0.2 となり、振動台の入力速度が大きいほど、静摩擦係数と動摩擦係数の差も大きい。結果をまとめると、塗装>赤錆>黒皮の順にすべり速度が大きくなるほど、摩擦係数が緩やかに減少する傾向が早い段階で生じることも明らかとなった。この傾向に関して、図 6 に示す各摩擦係数-すべり速度関係の一部分の拡大図より、既往研究<sup>6)</sup>と比べ、速度依存性の境界値が異なる。黒皮の場合は速度依存性を示す境界値が 100 mm/s、赤錆や塗装の場合は多少のばらつきがみられるが、速度 100~150mm/s が速度依存性の境界値と考えられる。

また本実験における静摩擦係数は平均 0.35 と、既往研究<sup>6)</sup>で示されている 0.68~0.8 よりも小さい値であった。これは、モルタルの圧縮強度が既往研究より 2 倍近いこと、垂直荷重が小さいため、摩擦面での面圧力が既往研究の 1/5 程度となっているため、早い段階で速度に依存した挙動となったと考えられる。

鋼材接触子が傾きを有する場合のすべり挙動は、振動台の入力速度が大きいほど大きくなるが、傾きがない場合よりすべりは小さくなった。また摩擦係数は平均 0.4、最大で 0.45 の値を示した。さらに、すべり速度は、傾きがない場合よりも接触面がかなり小さいことから、すべり速度負方向だけ、急激にすべる挙動がみられた。よって、傾きが変わると摩擦抵抗が大きくなることが明らかとなった。

以上をまとめると以下の知見が得られた。(1)本実験では、黒皮付き鋼板の静摩擦係数は平均 0.35、赤錆付き鋼板の静摩擦係数は平均 0.4、ラッカー塗装した鋼板の静摩擦係数は平均 0.3 の値を示した。

(2)すべり速度ピーク値での、それぞれの動摩擦係数を以下に示す。黒皮付き鋼板の動摩擦係数は、0.2~0.25、赤錆付き鋼板の動摩擦係数は、0.25~0.3、ラッカー塗装した鋼板の動摩擦係数は、0.15~0.2 の値を示した。

(3)黒皮付き鋼板の場合、すべりの最大速度が 100 mm/s 以下の場合、速度依存性は弱く、最大速度が 100mm/s を超え、速度の上昇を伴い線形的に摩擦抵抗が低下した。

(4)黒皮付き鋼板の場合、ベースプレートに傾きがついた場合、傾きがない場合よりも摩擦係数が 0.4 以上となり、大きくなった。

#### 4.2 有限要素解析によるルーズホール定着部の水平二方向载荷下の挙動

二方向载荷で長軸：短軸の比を変更した場合について、荷重-変形関係を図 7 に、応力コンター図を図 8 に示す。荷重-変形グラフより、X 方向は接触後に緩やかに荷重は増加し、楕円の軌道に合わせて、円を描くように荷重が変化している。Y 方向は一方向载荷に似た荷重変形を示して

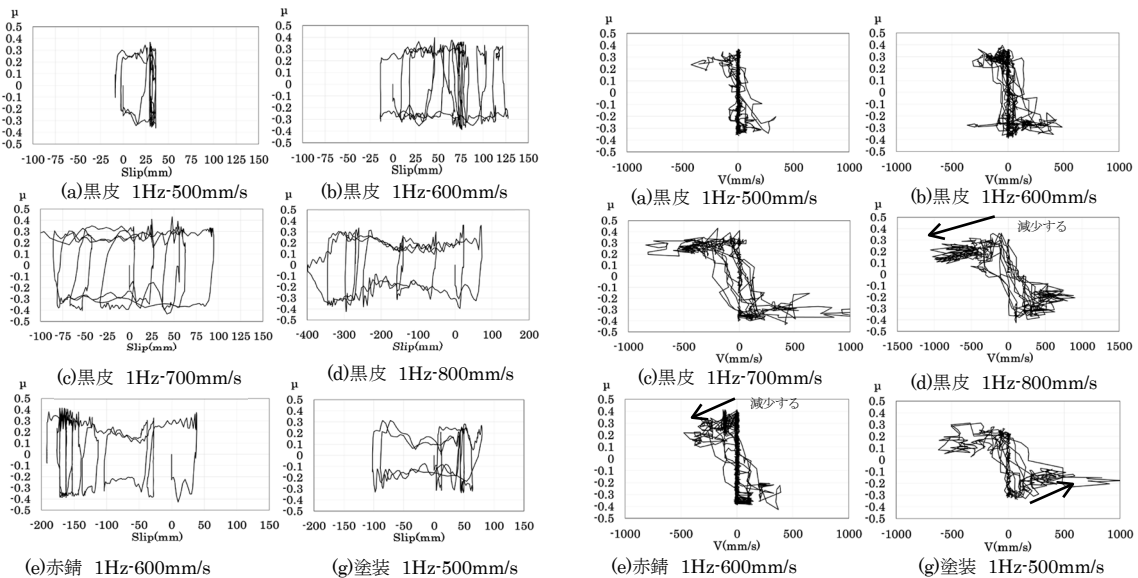


図4 摩擦係数-すべり変位関係

図5 摩擦係数-すべり速度関係

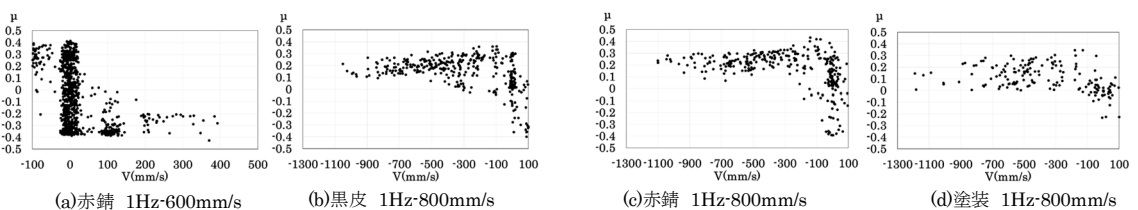


図6 摩擦係数-すべり速度関係 拡大図



いる。楕円の形による荷重の変化は見られなかった。応力コンター図および変形図より、アンカーボルトの応力は二方向载荷によるねじれを受けていた。また楕円の半周点 ( $X=15\text{mm}, Y=0\text{mm}$ ) において B.PL との接触はないものの、楕円の軌道により残留応力が発生した。Y 方向変位が最大となる 2 点 ( $X, Y=(0, 5), (0, -5)$ ) について B.PL とコンクリートとの接触エリアで降伏している箇所があった。

二方向载荷で初期変位を変更した場合について、荷重-変形関係を図 9 に、応力コンター図および変形図を図 10 に示す。荷重-変形関係より、Y 方向については孔との接触により荷重が増加し、その後 Y 方向変位 12.67mm 以降でさらに荷重が増加した。応力コンター図および変形図より、最初にモルタルの降伏があり、その後生じる荷重の増減はアンカーボルト孔周辺のモルタルの降伏位置の変化が影響していると考えられる。B.PL との接触位置ではアンカーボルトに食い込みが発生した。アンカーボルトとモルタルの接触面は徐々に変化し、ねじ切られるようにアンカーボルトに引張強度に至る範囲が広がっていた。またアンカーボルトとコンクリートの接触面でも降伏範囲が拡大していた。アンカーボルトの降伏の影響によりアンカーボルトが変形したままとり、楕円サイクルのサイクルの途中 ( $X, Y=(-41, 10.11)$ ) で逆側のベースプレート側面と接触し、アンカーボルトの接触点がベースプレートとコンクリートの二点になりスライドしなくなった。

以上をまとめると以下の知見が得られた。

- (1) アンカーボルトの降伏エリアについて大きな降伏が発生したのはベースプレート、コンクリートとの接触エリアであった。二方向载荷については、アンカーボルトにねじれの影響と残留応力が発生していた。
- (2) 水平二方向载荷で初期変位を変化させた場合においてアンカーボルトがベースプレート側面に接触し荷重が上昇した後、さらに荷重が増加していた。これはモルタルが降伏し接触応力がコンクリートに移動したためと考えられる。
- (3) 水平二方向载荷で初期変位を変化させた場合において最終的にアンカーボルトの変形により、接触点が 2 点となりスライドしなくなった。これは実際に起こることも考えられ、二方向载荷の場合スライドがうまくいかない場合がある。

<引用文献>

- 1) 山田, 島田, 戸松, 白井, 松本, 長谷川, 向井, 竹内: 繰り返し荷重を受ける鉄骨置き屋根定着部の実験 鉄骨置き屋根定着部に関する研究 その 1, 日本建築学会構造系論文集 第 705 号, pp.1687-1697, 2011.11
- 2) 吉敷, 山田, 松本, 浅田, 小山, 島田: 東北地方太平洋沖地震等による鉄骨造文教施設の柱脚・定着部被害: 日本建築学会技術報告集 第 19 巻 第 42 号, pp.585-590, 2013.6
- 3) 加藤, 小西, 中澤: 振動特性の異なる 2 本の RC 柱に支持されたトラス梁の地震応答性状に関する研究 一支承部のルーズホール等の影響について, 日本建築学会構造工学論文集 Vol.47B, pp.565-573, 2001.3
- 4) 藤田, 鈴木, 木村: 鉄骨置屋根構造の損傷メカニズムに対する柱頭形式の影響 その 1, 2, 日本建築学会東北支部研究報告集 構造系第 78 号, pp.25-32, 2015.6
- 5) 長江, 池永, 中島, 吹田: 鋼構造露出柱脚におけるベースプレートと基礎モルタル間の摩擦抵抗, 日本建築学会構造系論文集 第 606 号, pp.217-223, 2006.8
- 6) 勝尾, 池永, 長江, 中島: 鋼とモルタル間の摩擦性状に与えるすべり速度の影響, 日本建築学会近畿支部研究報告集, pp.417-420, 2008.3
- 7) 和田, 白鳥, 山下: 鉄骨置屋根構造スライド支承部の可動性に関する研究: その 1 実験概要, 日本建築学会大会学術講演梗概集(近畿), pp.879-880, 2014.9

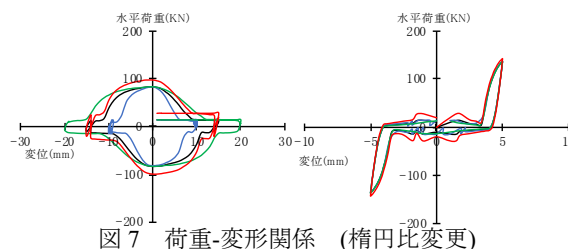


図 7 荷重-変形関係 (楕円比変更)

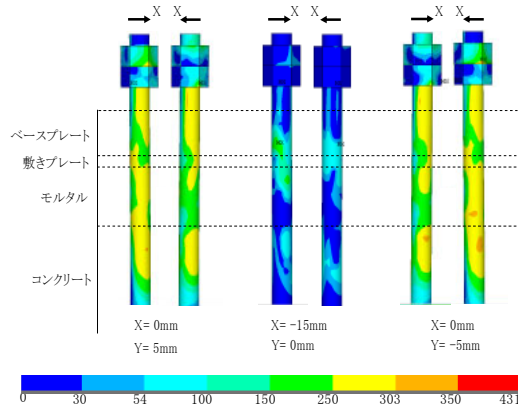


図 8 応力コンター, 変形図 (楕円比変更)

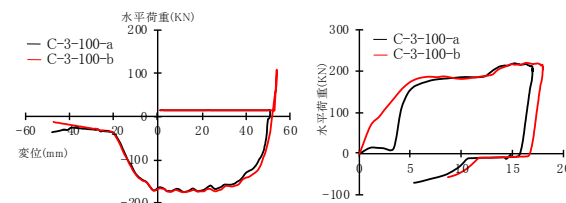


図 9 荷重-変形関係 (初期変位変更)

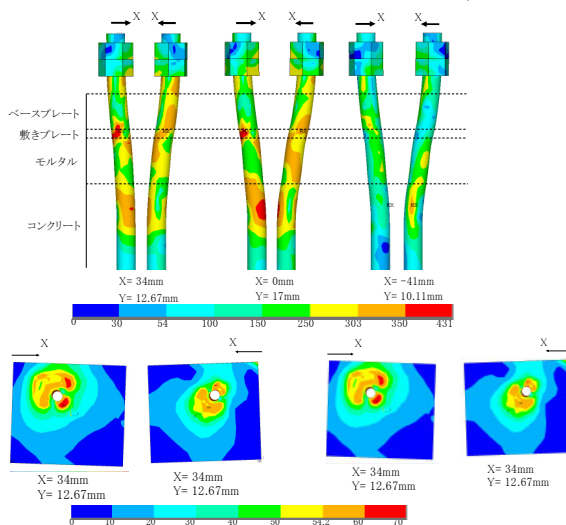


図 10 応力コンター, 変形図 (初期変位変更)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計0件

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------