実験概要とスライド支承の実験結果

鉄骨置屋根支承部の地震時破壊挙動と耐力に関する研究（その1）

OUTLINE OF EXPERIMENTAL STUDY AND OBSERVATION ON SLIDE BEARINGS

— Study on failure and strength in earthquake response of bearings of steel spatial roofs on RC lower frames (Part 1) —

山下哲郎 — * 1 白鳥和希 — * 2

Tetsuo YAMASHITA — * 1 Kazuki SHIRATORI — * 2

キーワード:

鉄骨屋根, 支承部, テフロンパッド, 摩擦, アンカーボルト, ベースモルタル損傷

Keywords:

Steel roofs, Bearings, Teflon pad, Friction, Anchor bolts, Damage of base mortar

The present study experimentally simulates and analyzes the damage of bearings in steel large roofs that was observed after the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake. In this study, cyclic shear force is given to three models of slide bearings and four models of semi-fixed bearings. In the slide bearing tests, mobility is the first interest and in the semi-fixed bearing tests, damage and crush of base mortar are focused and the shear strength is evaluated according to the AIJ recommendation. In the Part1, the overview of the experiment and the behavior of slide bearings is described.

1. はじめに

2011年に発生した東日本大震災では、RC造のフレームの上に鉄骨大スパン屋根構造が載ったいわゆる置屋根の体育館において鉄骨屋根版とRC造躯体を接合する支承部(図1)の被害が多発した^{1,2)}。

置屋根構造の支承部は一般的な重層構造の露出柱脚と一見類似しているが異なる点も多い。重層構造の露出柱脚では支配的な応力は軸力と曲げモーメントであり、せん断力はベースプレート底面の摩擦で支持される³⁾。一方、置屋根構造の支承部では鉄骨屋根版自重による軸力は小さく支配的な応力はアンカーボルトで直接支持されるせん断力である。さらにせん断力の加力芯は通常ベースプレートより上方にあり、その偏心により支承部に回転モーメントが生じる。屋根側鉄骨骨組側に十分な曲げ剛性と耐力がある場合はその偏心モーメントを屋根架構側で負担でき、アンカーボルト側をピンと仮定して設計しても支承部に大きな回転は生じない(図2(a))。逆にシステムトラス構造など屋根側の回転剛性が低い場合には、屋根鉄骨側を反曲点としてアンカーボルト側にモーメントを負担させる設計を行う(図2(b))。

また、空間構造では鉛直荷重による水平方向のスラストや温度変化による屋根版の伸縮を逃がすため、アンカーボルト孔をルーズホール(長孔)とし、ベースプレート下にテフロンパッドとステンレスシートを敷いて屋根外周の法線方向に支承部を滑らせるスライ

ド支承が多用される。システムトラス支承部の例を図3に示す。このときルーズホールと直交方向にはスライド機構のない半剛支承(以下スライド機構のない支承部を半剛支承と呼ぶ)と同様に水平力に抵抗する。

以上の特徴を有する空間構造支承部の東日本大震災における被害は、アンカーボルトの破断、抜け出し、ベースモルタルの粉碎や顕著なひび割れ、RC躯体の側方破壊である。スライド支承については支承の水平変位が可動域を越えてアンカーボルトやモルタルに損傷を生じたものが多いが、一部にはスライドした形跡がないままモルタル層とRC躯体の側方破壊を生じたものもある^{1,2)}。1995年の阪神大震災においては、支承部の破壊によるPC円筒シェル置屋根(通称シルバークール)の落下が生じている⁴⁾。このように置屋根構造における支承部は耐震上の弱点と言ってもよい。

一方、既往の露出柱脚のせん断耐力に関する研究では、アンカーボルトそのものと側方破壊耐力を対象とした研究^{5,6)}や、ベースプレートとモルタル層の摩擦に関する研究^{7,8)}などがある。本実験は屋根版側をピンとしたシステムトラス構造の支承部のような、せん断力とモーメントを受ける支承部(図2(b))を対象とするが、軸力が小さくせん断力が支配的で、モルタル層の本格的破壊を伴う大きなせ

図1 置屋根構造の支承部

図2 せん断力の偏心に伴うモーメント分布

図3 スライド支承の例

*1 工学院大学建築学部 教授・博士(工学)
(〒163-8677 東京都新宿区西新宿1-24-2 A2514)

*2 工学院大学大学院建築学専攻修了 修士(工学)

*1 Prof., School of Architecture, Kogakuin Univ., Dr. Eng.

*2 Completed Master Course of Architectural Program in Kogakuin Univ., M. Eng.

ん断変形をアンカーボルトに与える点、従来研究されてこなかったスライド支承の可動性に注目した実験を実施し、また可動域を越えた場合の挙動も観察する点が特徴的である。

本報告は2編に分かれ、(その1)で実験の全体概要およびスライド支承の実験結果とその評価、(その2)で半剛支承の実験結果とその評価を述べる。

2. 実験計画

2.1 実験装置

図4、写真1に実験装置の全容を示す。アンカーボルトを埋め込んだ鉄筋コンクリートのボックスをPC鋼棒で固定してその上に支承部を再現し、試験体上方にスライダを用いて設置した鉛直加力用ジャッキで鉛直荷重を与えつつ、水平加力用ジャッキで繰り返し漸増振幅強制変位を加える。鉛直荷重用ジャッキと試験体の間には球座を設置し試験体の傾斜に対応する。水平加力用ジャッキヘッドにもピンが存在するため、当試験体はシステムトラスのような屋根側の曲げ剛性が低い支承部(図2(b))を模擬したものと言うことができる。

図4 実験装置セットアップ

2.2 試験体

図5にベースプレートの詳細、表1に試験条件を示す。網掛け部分は(その2)で述べる半剛支承の実験条件であり、本報告の対象は上3行のS275-50-100, S275-50-200とS608-50-100試験体である。パラメーターは水平加力芯からベースプレート底面までの距離 e_s 、ベースモルタル厚さ h 、鉛直荷重 P_V である。

アンカーボルトは転造ねじ ABR400 規格(軸部鋼材 SNR400)のM22を使用する。表2に機械的性質を示す。鉄筋コンクリート部への有効埋め込み深さは440mm(呼び径の20倍)⁹⁾であり、先端に抜け出し防止ナットおよび板厚12mm×70mm角の定着板を使用する。

スライド支承のベースプレートのルーズホール長さ(可動域)はアンカー芯位置で±50mm、幅は27mmである。ルーズホールの抑えにワッシャー(座金)プレート(SS400, PL-12-100×100)を使用する。試験体セット後、アンカーボルトのナットにトルクレンチで70Nmのトルクを導入する⁹⁾。著者の知る限り施工現場でスライド支承の張力導入が意図的に実施されることは少ないが、ここではボルト締付力の基準として実施した。

アンカーボルト以外では大きな変形を生じないように、ベースプレート板厚は40mm、面内に曲げを受ける十字プレート板厚は32mmとし、十分な強度と剛性を確保する。共に鋼材はSS400である。

ベースモルタルには早強無収縮モルタルを圧入する。RCボックスは側方破壊しないよう十分な端あき距離と帯筋を配置した。表3にコンクリートとモルタルの材料強度を示す。

写真1 実験装置全容

表1 試験条件

Bearing name	Type	Eccentricity (e_s)	Thickness of base mortar (h)	Vertical load (P_V)
		mm	mm	kN
S275-50-100	Slide	275	50	100
S275-50-200		275	50	200
S608-50-100		608	50	100
F275-50-100	Semi-Fixed	275	50	100
F275-100-100		275	100	100
F608-50-100		608	50	100
F608-100-100		608	100	100

図5 ベースプレート詳細

表2 アンカーボルトの機械的性質

Steel		SNR400B
Yield strength	N/mm ²	303
Tensile strength	N/mm ²	431
Elongation	%	32
Yield ratio		0.7

表3 コンクリートとモルタルの材料強度

		Concrete	Mortar
Compressive strength	N/mm ²	31.0	54.2
Splitting strength	N/mm ²	3.1	3.4
Test age	days	21	17

置屋根構造の一般的なディテールとして、スライド支承ではベースプレートとモルタルの間に厚さ 2.3mm のテフロンシートを圧着した板厚 9mm のプレートを敷き、接触するベースプレート裏面には同じく 2.3mm 厚のステンレスシートを断続溶接した (図 5)。ステンレスとテフロンシート間の摩擦係数は公称値で 0.06 である。

2.3 荷重と計測

変位計測は機械式変位計を用いる。その配置は図 4,5 に示す。計測結果からベースプレートの水平変位 δ 、モルタル層のせん断変形角 γ と支承回転角 θ を式(1)(2)(3)より定める。

$$\delta = \frac{A+B}{2} - D \quad (1) \quad \gamma = \frac{\delta}{h} \quad (2)$$

$$\theta = \left(C - \frac{A+B}{2} \right) / e_s \quad (3)$$

ここでは例えば変位計 A の計測変位を A と表記した。h はモルタル層厚である。

荷重はジャッキに装着したロードセルで計測する。最初に所定の鉛直荷重を鉛直加力用ジャッキで載荷して油圧をロックし、その後繰り返し水平加力を実施したが、鉛直加力用ジャッキ圧力弁の不調により、回転量の大きいスライド支承 S608 試験体と (その 2) で述べる半剛支承では鉛直荷重の変動が非常に大きくなった。

水平加力は式(1)のベースプレート水平変位 δ が正負交番漸増繰り返し変位となるよう手動で制御した。スライド支承の振幅は $\pm 15\text{mm} \rightarrow \pm 30\text{mm} \rightarrow \pm 45\text{mm} \rightarrow \pm 60\text{mm} \rightarrow \pm 75\text{mm}$ であり可動域 $\pm 50\text{mm}$ を越えた状態も観察する。一方でスライド支承 S608 試験体と半剛支承の回転は大きく、片側のアンカーボルトが塑性伸びを生じると傾斜したままとなり、正負同振幅の交番変位とすることが困難になったため、正確なプロトコルに従った加力ではできなかった。なお加力速度は遅く、静的加力である。

3. スライド支承の実験結果

スライド支承 3 体の水平荷重 P_H (黒線)、鉛直荷重 P_V (点線) と式(1)の δ の関係を図 6 に、 P_H と θ の関係を図 7 に示す。また写真 2(a)-(f)に S275-50-100 の試験体の状況を荷重変形関係と併せて示す。

(1) 偏芯の小さいスライド支承 (S275) の挙動

偏芯の小さい S275-50-100 と S275-50-200 試験体では、支承が安定して摺動した (写真 2(a)) が、初期の水平荷重は S275-50-100 で概ね 40kN、S275-50-200 で概ね 60kN であり、スライディングパッドの摩擦係数から期待される 6kN (S-275-50-100)、12kN (S-275-50-200) を大幅に上回った。

変位が可動域を越えてルーズホール端にアンカーボルトが接触した後、地震被害例¹²⁾に見られるようにアンカーボルトは傾斜し (写真 2 (b))、せん断と曲げによる塑性変形を生じ、若干の抜け出しも生じた。このようにアンカーボルトに塑性伸びが生じてナットが弛緩すると、水平荷重は前述の摩擦係数から想定される値付近まで低下した。±75 mm の振幅で、球座の変形角がほぼ限界に達したため加力を中止した。

モルタルは、変位が可動域以内では無損傷であったが、接触後にアンカーボルト側面の位置に引張によるひび割れが生じた後 (写真 2 (c))、アンカーボルトから外側のモルタルがアンカーボルトの変形により押し出され (写真 2 (d))、かつベースプレートの回転により徐々に圧壊し、最終的には被害例¹²⁾と同様になった (写真 2 (e))。しかしながら試験終了後ベースプレートを取り除いて観察すると、アンカーボルトより内側のモルタルは健全で、鉛直荷重支持能力は喪失しておらず実際 P_V も保持されている。

図 7 の破線は学会指針³⁾による弾性剛性 K_B (式(4)) を示す。

$$K_B = \frac{K_{BS}}{e_s}, \quad K_{BS} = \frac{E \cdot n_t \cdot A_b \cdot j^2}{2l_b^2} \quad (4)$$

図 6 スライド支承の荷重変形曲線(P_H - δ)

図 7 スライド支承の荷重変形曲線(P_H - θ)

写真2 スライド支承試験体(S275-50-100)の状況

E , A_b はそれぞれアンカーボルトのヤング係数と軸部断面積, n_t は引張側アンカーボルトの本数, l_b はアンカーボルト有効長さである. j は回転中心から引張側アンカーボルト重心までの距離であるが, スライド支承の場合, 図8のように回転中心をテフロンパッド端部と仮定して j を定めると式(4)と実験結果は良好に一致する (図7).

(2) 偏芯の大きいスライド支承(S608)の挙動

偏芯の大きい S608 試験体では, 最初の $\pm 15\text{mm}$ 振幅の加力の途中で引っ掛かりが生じ, 傾斜が生じた. 次に正負反転の際引っ掛かった部分がすべり, 荷重変形曲線に凸部が生じた. その後負加力の途中で再度引っ掛かりが生じた. 引っ掛かりの様子を観察すると,

- 1) 最初は引張側アンカーのワッシャープレートとベースプレート上面が摩擦により固着する.
- 2) 固着によりベースプレートが移動なくなると支承の回転が急激に増加する.
- 3) ベースプレート端とテフロンシートを固定する鉄板が接触して支点 (回転中心) となり, テフロンシート接触部が離間して浮き上がる (写真3).

というプロセスをたどった. 回転が急激に増加する中で鉛直荷重が急上昇し, 加力ジャッキより油漏れが生じたため加力を停止した.

図8 スライド支承の回転中心

写真3 スライド途中の引っ掛かりと回転 (S608-50-100)

偏芯の大きい S608 試験体はスライドせず引っ掛かりを生じたが, 東日本大震災の被害例ではアンカーボルトがルーズホール中央付近でとどまったまま, ベースプレート下のモルタルや鉄筋コンクリート躯体が破壊したものも散見される^{1,2)}. このような破壊は, 本実験で観察されたようなスライド支承の引っ掛かりで生じた可能性があり, 現在可動条件を定量化する研究¹⁰⁾を実施中である.

4. 実験結果に関する考察

S275 試験体の初期の水平荷重が鉛直荷重とテフロンパッド摩擦係数より推定される荷重より大幅に高くなった原因は, トルク 70Nm を加えたアンカーボルトの締め付けにより, ベースプレート上面とワッシャープレート間に生じた摩擦によるものと推定される. アンカーボルト塑性伸びによりナットが弛緩すると水平荷重が低下し, その後安定した撓動が観察されたことがそのことを裏付けている. S-275 試験体のテフロンパッドの摩擦係数を, ナット弛緩後で安定撓動域の $|\delta| \leq \pm 40\text{mm}$ における P_H , P_V を用いて最小二乗法で同定すると, S275-50-100 では 0.09, S275-50-200 では 0.10 となり, 公称値の 0.06 と近い数値となった. 設計意図通り支承部をスライドさせるにはワッシャープレートとベースプレート間の摩擦を低減する工夫と施工管理が必要である.

5. まとめ

鉄骨置屋根構造の支承部を再現し, 繰り返しせん断加力実験を実施して耐力特性と破壊挙動を調べた. スライド支承については以下確認された.

- 1) 偏芯の小さい S275 試験体については安定した撓動が生じたが, 当初の水平荷重は鉛直荷重 100kN と 200kN の場合で顕著な差がなく, かつテフロンパッドの公称摩擦係数と鉛直荷重から算定される値を大きく超過した. アンカーボルトの導入張力による, ワッシャープレートとベースプレート上面の間の摩擦が原因と考えられる.

- 2) 偏心の大きい S608 試験体では途中で引っ掛かり、その後は支承が移動せず回転が生じた。地震被害例でスライド支承に動いた形跡が見られずに破壊した例ではこのような現象が生じた可能性があり、更なる検討が必要である。
- 3) 回転中心をテフロンパッド端に仮定すれば、回転剛性は学会指針の推定式で精度よく推定できる。

謝辞

本研究は工学院大学都市減災センター (UDM, 2010-2014) の研究活動の一部として実施し、研究費の支援を受けた。

参考文献

- 1) 建築研究振興協会ほか：東日本大震災における鉄骨置屋根構造の被害調査報告，2012.3
- 2) 竹内徹：学校体育館の被災状況と被災後改修の実例，大空間施設の耐震性能を考える—東日本大震災を経験して—，2012 年度建築学会大会 PD 資料，pp.40-59，2012.9
- 3) 日本建築学会：鋼構造接合部設計指針，2012.4
- 4) 日本建築学会：阪神・淡路大震災調査報告書建築編 3，日本建築学会，1997
- 5) 河野久夫，九谷和秀，増田貫志：鉄骨構造露出柱脚におけるアンカーボルトのせん断抵抗力に関する実験的研究，日本建築学会構造系論文集 第 567 号，pp.141-148，2003.5
- 6) 浅田勇人，吉敷祥一，山田哲：鉄筋コンクリート基礎立上部に設置した引張ブレース付露出型柱脚のせん断抵抗能力，日本建築学会構造系論文集 第 76 巻第 665 号 pp.1347-1356，2011.7
- 7) 長江拓也，池永昌容，中島正愛，吹田啓一郎：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
- 8) 池永昌容，長江拓也，ジェイソン・マコーミック，中島正愛：鋼構造露出柱脚と基礎モルタル間の摩擦性状に関する振動台実験，日本建築学会構造系論文集 第 73 巻第 629 号，pp.1186-1191，2008.7
- 9) 日本鋼構造協会：建築構造物アンカーボルトを用いた露出柱脚設計施工指針・同解説，2009.10
- 10) 山下哲郎，和田直記，白鳥和希：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，その 2 可動性に関する考察，日本建築学会大会梗概集，構造 I，pp.879-882，2014.9

[2015 年 2 月 17 日原稿受理 2015 年 4 月 9 日採用決定]