

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 25 日現在

機関番号：14501

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2013

課題番号：24760453

研究課題名(和文) 鋼構造ブレース接合部の耐震設計法の高度化と残存耐震性能評価手法の開発

研究課題名(英文) Improvement of seismic design of brace connections and development of residual seismic performance evaluation of steel braced frames based on damage index of brace members including their connections

研究代表者

浅田 勇人 (ASADA, HAYATO)

神戸大学・工学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：70620798

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円、(間接経費) 1,050,000円

研究成果の概要(和文)：近年の地震被害でも自明なブレース骨組の弱点となっている接合部の終局性能について、ブレースの座屈を伴う不安定挙動やブレースの偏在といった接合ディテールに着目した検討を行い、現行の設計法の高度化に必要な基礎的知見を得た。さらに、震災時の避難・防災拠点となる屋内運動場の合理的な残存性能評価手法の開発に向けて、主要な耐震要素となるブレースの、接合部を含めた損傷過程を定性的に把握することで、損傷と残余性能の関係についての基礎資料を得た。

研究成果の概要(英文)：This project aims to develop the seismic design of connections in steel concentric ally braced frames and extracted the main aspects to evaluate residual seismic performance of braced frames based on observed damage processes of brace members. First, cyclic loading tests of tension-only-bracing were conducted to evaluate effects of connection details on ultimate strength and plastic deformation capacity of brace members. It is clarified that brace connections should be designed taking into account out-of-plane stiffness of gusset plate since additional bending moment due to the local deformation of gusset plate occurred at net section of brace. Second, Strength of Interface weld of gusset plate connections was studied. Improved stress identification model of interface weld was proposed and is applicable to various gusset plates connected to main frame with various stiffness and strength. Based on the proposed models, Strength can be estimated in good accuracy.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：建築学・建築構造・材料

キーワード：ブレース接合部 耐震設計法 ガセットプレート 引張耐力 塑性変形能力

## 1. 研究開始当初の背景

本研究が対象とするブレース骨組は、屋内運動場や倉庫をはじめとする中低層建築物に多く採用されている。このようなブレース骨組ではブレースが地震による慣性力(水平力)に対して直接軸抵抗させる合理的な耐震骨組であるが、ラーメン骨組のように梁・パネル・柱の各部材の耐力および塑性変形能力を活かし、協力し抵抗するのではなく、ブレースが支配的な耐震要素となり、十分な耐力・塑性変形能力を発揮しなければならない。しかしながら、過去の地震被害によれば、ブレースが十分な性能を発揮する以前に、その接合部で破断する被害が多く生じており、結果として倒壊は免れるものの、非構造部材を含めて深刻な被害が生じている。

このような現状に対して、我が国のみならず地震国である米国でもブレース骨組の耐震性能に関する研究は近年精力的に行われ、接合部ディテールに踏み込んだ設計法の提案が行われ始めている。一方我が国の接合部設計の現状は、明快な応力条件下での耐力評価法は下記を除き、概ね確立しているものの、接合部ディテールの影響を十分に反映した設計指針を得ているとは言い難い。実際に、接合部ディテールによっては、単純な軸方向応力だけでなく、取り付けによる偏心などによって付加的な応力が作用することや、引張・圧縮の繰り返し塑性変形を受けるブレースではその変形能力が、接合部ディテールに大きく左右されることが知られている。

また、ブレースの十分な耐震性能を発揮する上では、接合部の適切な耐力評価が前提となるが、ブレース接合部のうち、ガセットプレートと柱・梁部材の接合箇所にあたるガセットプレート溶接接合部は、その応力状態が複雑であり、その同定が困難な故に、合理的な耐力評価法の確立には至っていない。

以上のような接合部の保有性能評価にかかる課題が解決されることで、新規ブレース骨組全般の耐震性能向上および接合部設計の合理化が図れる。

その一方で、既存建築物、特に被災後の避難施設となる屋内運動場では、その構造形式としてブレース骨組が採用されている現状がある。これらの建築物では被災後の継続使用の可否を適切かつ早急に判定できることが肝要である。従って、骨組の主要な耐震要素であるブレースの現実的な終局性能と損傷過程を把握し、それに基づく合理的な残存耐震性能評価手法を構築することは重要かつ早急な課題である。

## 2. 研究の目的

上記背景の下、本研究で接合部性能すなわち耐力および剛性の評価から、塑性変形能力に立脚したブレース部材の性能を包括的に検討することで、合理的な接合部設計の構築を目指した。また、既存ブレース構造建築物の現実的な残存性能評価法を確立する上で

の基礎資料となる、接合部を含めたブレースの現実的な損傷過程を把握した。

以下に具体的な検討項目を示す。

- (1) 接合部ディテールがブレース接合部の最大耐力および塑性変形能力に与える影響
- (2) ガセットプレート溶接接合部の応力伝達機構と耐力の評価

## 3. 研究の方法

- (1) 接合部ディテールがブレースの最大耐力および塑性変形能力に与える影響

本課題では、接合部ディテールが引張ブレースの最大耐力および塑性変形能力に与える影響を調べるために、引張ブレースとしての使用が想定される山形鋼あるいは溝形鋼のブレースと、それに取り付くガセットプレート接合部で構成される試験体を用いて、正負漸増繰り返し載荷実験を行った(図1)。試験体は表1に示す計12体である。実験因子は、ブレース断面形状、ガセットプレートの板厚、形状(図2)、およびブレース-ガセットプレート接合部のボルト本数である。

- (2) ガセットプレート溶接接合部の応力伝達機構と耐力の評価

本課題では、G.PL 接合部の合理的な耐力評価法を構築するために、部分架構実験(図3)および有限要素解析(図4)を行い、G.PL 接合部の現実的な応力伝達機構を把握するとともに、主架構の変形およびブレース軸力を同時に受ける G.PL 接合部の耐力について検討を行った。試験体一覧を表2に示す。試験体は計3体であり、実験因子はブレースの水平力分担率(ブレースの水平耐力とブレース+主架構の水平耐力の比)と柱断面形状である。部分架構実験では主にブレースの水平力分担率と柱スキンプレートの面外剛性がガセットプレート周辺の応力伝達に与える影響を検討する。また、実験結果はガセットプレート接合部の詳細な応力伝達機構を把握するために必要な数値解析モデルの構築に援用した。また、実験結果に対する妥当性が検証された解析モデルを用いて、ブレース水平力分担率と柱断面形状を変動因子としたパラメトリックスタディーを実施し、ブレース水平力分担率および柱断面形状の影響を適切に反映できる耐力評価法の構築を目指した。

## 4. 研究成果

- (1) 接合部ディテールがブレースの最大耐力および塑性変形能力に与える影響

接合部面外曲げ剛性の影響

荷重-変形関係の一例を図5に示す。ガセットプレートの面外曲げ剛性が低下するにつれて、接合部耐力が低下するので、塑性変形能力も低下する傾向にあることがわかる。特筆すべきは、最もガセットプレートの面外曲げ剛性が低い試験体(L75-5-6)では保有耐力接合の接合ディテールを有しているにもかかわらず、ブレースが十分に塑性化する以前に接合部で破断している。実験より得られ

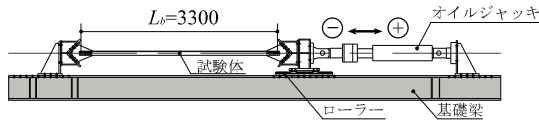


図1 単体ブレース実験セットアップ

表1 試験体一覧

試験体	ブレース	ボルト本数 $n$	食い込み長さ $l_0$ [mm]	ガセット板厚 $t_g$ [mm]
L75-4-6				6
L75-4-9				9
L75-4-12		4	-40	12
L75-4-9(40)				9 (サイドスチフナ有)
L75-4-9S	L-75×75×6		40	9
L75-5-6				6
L75-5-9				9
L75-5-12		5	-40	12
L75-4-9S				9 (サイドスチフナ有)
C75-4-6				6
C75-4-12	C-75×40×5×7	4	40	12
C75-4-9S				9 (サイドスチフナ有)

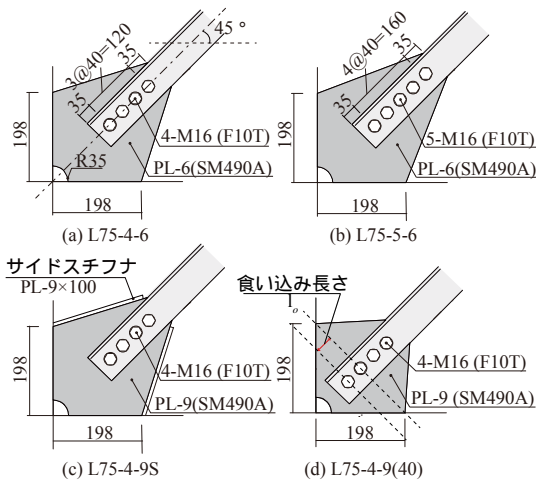


図2 ガセットプレート形状

た最大耐力  $jN_u$  をブレース降伏耐力  $bN_y^c$  で除した  $jN_u/bN_y^c$  と材端拘束度の関係を図6に示す。図中には既往の実験結果 20) (L-65×65×6,  $n=4$ ) も併せて示す。接合部耐力は材端拘束度 (ガセットプレートの面外曲げ剛性) を高めることで上昇しており, 最大で 10% 程度上昇することが確認できる。また, 山形鋼ブレースで接合ボルトの本数が 5 本の場合に着目すると, 計算上の  $jN_u/bN_y^c$  は 1.06 であったが, 材端拘束度が 2.5 以下では継手効率の低下が大きいので, 材料強度のばらつきを除いて要求される接合部係数 (1.05) を下回っている。また, 材端拘束度が 2.5 を超えると材端拘束度の上昇に伴う耐力上昇は緩やかとなりほぼ横ばいとなることがわかった。

#### 塑性変形能力

ブレースの累積塑性変形倍率  $\eta$  と  $jN_u/bN_y^c$  の関係を図7に示す。接合部耐力が上昇するにつれて, 塑性変形能力が大きくなっている。概ね材料強度のばらつきを除いて要求され

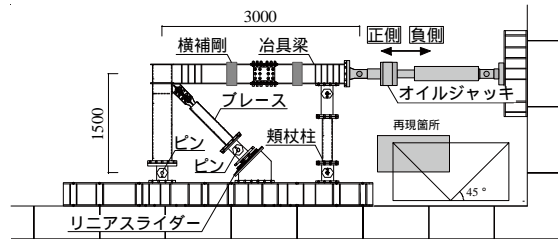


図3 部分架構実験セットアップ

表2 試験体一覧

試験体	柱断面	ブレース断面	水平力分担率 $\beta$	溶接サイズ $S^*$ [mm]
B-S	-300×300×12	12×90 (A=1080mm <sup>2</sup> )	0.70	4.5 (4.3)
H-S	BH-300×300×24×12	12×90 (A=1080mm <sup>2</sup> )	0.70	5.2 (3.1) <sup>2*</sup>
B-W	-300×300×12	12×75 (A=900mm <sup>2</sup> )	0.58	4.8 (2.6) <sup>2*</sup>

1\* 溶接サイズは実測値, ( ) 内はのど厚

2\* 溶接後グラインダ処理

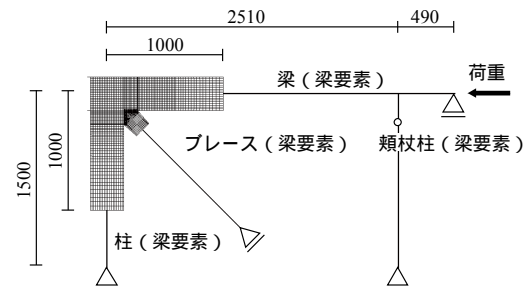


図4 解析モデル

る接合部係数に対応する  $jN_u/bN_y^c = 1.05$  以上のとき, 接合部の破断に先行してブレースが十分に塑性化し, 大きな塑性変形能力を示すことがわかった。

## (2) ガセットプレート接合部の応力伝達機構と耐力評価

### ガセットプレート周辺の応力伝達

部分架構実験より, まずガセットプレート溶接部周辺の応力伝達に関する検討を行った。G.PL 接合部近傍の主歪分布を図8に示す。層間変形角  $R=1/200$  では, ブレースの水平力分担率が 90% 程度であり, G.PL に加わる外力はブレース軸力が支配的である。このとき, 主歪は柱側, 梁側ともほぼ一様に分布している。一方,  $R=1/33$  では, ブレースの水平力分担率は 50~60% 程度であり, 架構変形による影響が増加している。このとき, 梁側での主歪が柱側に比べて大きくなっており, 特に柱が角形鋼管の場合, 柱の面外曲げ剛性が低いためにその傾向が顕著となる。また, 梁側の端部において最大主歪の向きはやや水平になっている。以上のように, ブレースの水平力分担率と, 柱の面外曲げ剛性によって応力伝達が大きく変化することがわかった。

降伏耐力時の応力分布

実験結果に対する妥当性が確認された解析モデルを用いて、各試験体の溶接部降伏耐力の評価を行った。試験体の降伏耐力は、プレースの水平力分担率の大きい試験体すなわち、架構変形による応力が相対的に小さくなるほうが大きくなることがわかった。ここで、降伏耐力時の G.PL 接合部の応力分布を図 9 に示す。全試験体において、柱梁とも垂直応力に比べ、せん断応力の値が大きく、溶接部の応力は主にせん断力で伝達されていることがわかる。柱が角形鋼管の B\_S、B\_W では、降伏耐力時に梁側が全域にわたって主にせん断降伏し、柱が H 形鋼の H\_S では、柱梁ともほぼ均等に応力が伝達されるので、両側とも全域にわたって塑性化していることがわかった。

提案式および既往の耐力評価式と解析結果の比較

主架構変形に伴う応力をストラット線材力学モデルによって同定し、それとプレース軸力による応力を組み合わせることで得られる耐力評価式  $c_j N_y$  (提案式) と、接合部設計指針に示される溶接部の有効抵抗領域を考え、溶接継目を斜方隅肉溶接継目とした耐力評価式  $c_j N_y^l$  によって算出した計算値と解析結果の比較を図 10 に示す。図中には水平力分担率が 0.3~0.6 の範囲で変動された解析モデルの結果も併せて示す。

既往の耐力評価式は、プレース軸力のみを考慮し、さらに溶接部への応力の作用方向をプレース軸力と平行となるように仮定しているため、解析結果を過大評価する傾向がある。特に、主架構変形によって生じる応力が相対的に大きくなるプレース水平力分担率が小さいモデルに対しては、大幅に過大評価している。一方、提案式は、主架構変形による応力適切に考慮できるため、プレース水平力分担率の大小にかかわらず、解析結果と良好に対応することがわかった。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表](計 5 件)

田中未咲, 浅田勇人, 田中剛, 前田晋吾: プレース付き骨組におけるガセットプレート溶接接合部の耐力評価に関する研究, 日本建築学会近畿支部研究報告集, 2014 年 6 月 21 ~ 2014 年 6 月 22 日, 大阪

田中秀典, 浅田勇人, 田中剛: 引張プレースの弾塑性挙動へ与えるガセットプレート面外曲げ剛性の影響, その 2 二面せん断山形鋼プレースの繰り返し載荷実験, 日本建築学会近畿支部研究報告集, 2014 年 6 月 21 日 ~ 2014 年 6 月 22 日, 大阪

前田晋吾, 浅田勇人, 田中剛, 田中未咲:

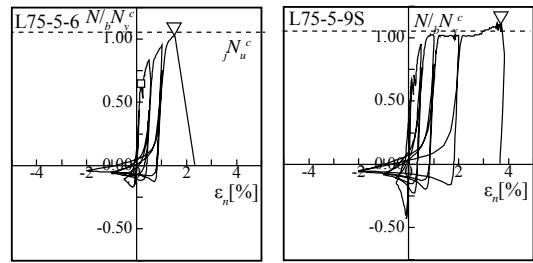


図 5 荷重 - 変形関係

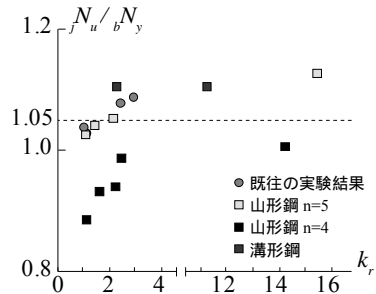


図 6 最大耐力 - 材端拘束度関係

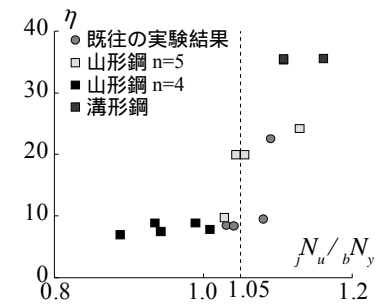


図 7 塑性変形能力

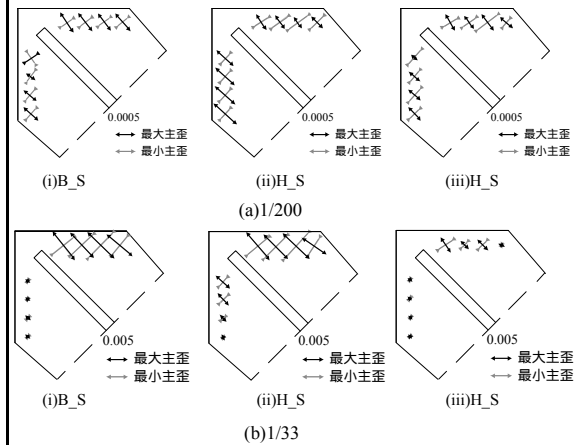


図 8 主歪分布

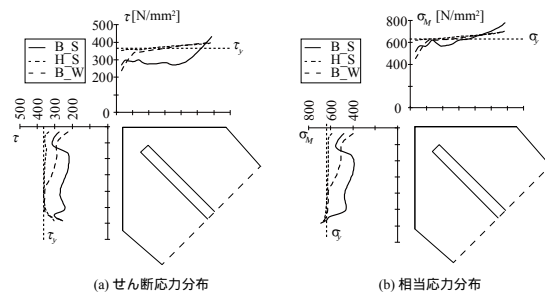


図 9 降伏耐力時の応力分布

柱と梁に接合されたガセットプレート端溶接部の応力伝達に関する実験的検討，日本地震校学会・大会 - 2013 梗概集，2013 年 11 月 11 日～2013 年 11 月 12 日，東京。

Hayato ASADA, Hiroaki MATOBA, Tsuyoshi TANAKA, Satoshi YAMADA: Seismic Retrofit on Beam-to-column Connections in Existing Steel Buildings Using Supplemental H-shaped Haunch, The Seventh International Symposium on Steel Structures(ISSS-2013), 2013 年 11 月 7 日～2013 年 11 月 9 日，Jeju, Korea.

Hayato ASADA, Tsuyoshi TANAKA, Hidenori Tanaka: Effects of Out-of-plane Stiffness of Gusset Plate on Elasto-plastic behavior of Single Angle Braces, Pacific Structural Steel Conference(PSSC 2013), 2013 年 10 月 8 日～2013 年 10 月 11 日，Singapore

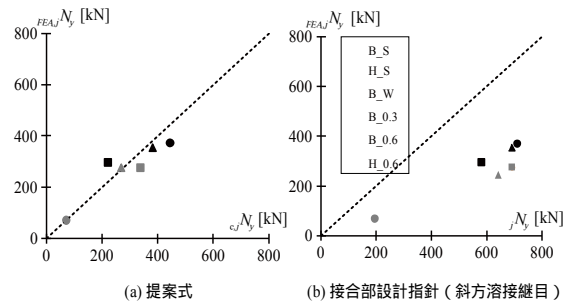


図 10 溶接部耐力の評価

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

浅田 勇人 (ASADA Hayato)

神戸大学大学院・工学研究科・助教

研究者番号：70629798

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携研究者

なし