十字形断面をもつ座屈拘束ブレース接合部の 構面外曲げ剛性と降伏曲げ耐力

OUT-OF-PLANE STIFFNESS AND YIELD STRENGTH OF CRUCIFORM CONNECTION FOR BUCKLING-RESTRAINED BRACE

木下 智 裕*, 聲 高 裕 治**, 井 上 一 朗***, 飯 谷 邦 祐****

*Tomohiro KINOSHITA, Yuji KOETAKA, Kazuo INOUE
and Kunihiro IITANI*

In order to prevent out-of-plane buckling of buckling-restrained brace, its connections must have enough out-of-plane stiffness and be kept elastic. This paper deals with out-of-plane stiffness and yield strength of buckling-restrained brace's connection whose section is cruciform. Firstly, methods of calculating both out-of-plane stiffness and yield strength of connection are proposed by means of RBSM. And secondly, experimental verifications to load connection specimens were conducted. As a result, it is clarified that out-of-plane stiffness is very small if fin-stiffener is not connected to beam-flange. Therefore, it is recommended that fin-stiffener should be welded to beam-flange to satisfy required out-of-plane stiffness and yield strength.

Keywords : *Buckling-restrained Brace, Connection, Out-of-plane Stiffness, Yield Strength, Loading Test*

座屈拘束ブレース, 接合部, 構面外剛性, 降伏耐力, 載荷実験

1. 序

座屈拘束ブレースは、図1に示すように芯材の周囲を座屈拘束材で覆っている座屈拘束部、および柱や梁との接合部から構成される。本研究は、このような座屈拘束ブレースの構面外座屈を防止する設計法の構築をめざしている。これまでに、接合部を含む座屈拘束ブレースの構面外座屈防止条件を提示し^{1), 2)}、その妥当性を実験的に確認している²⁾。ただし、これらの研究では、接合部は弾性を維持し、接合部の構面外剛性は既知であることを前提条件としている。

接合部は、本論2章で詳述するように、ガセットプレート接合部(図1のグレーのハッチ領域)と接合部母材、およびそれらを接合

するための添板で構成される変断面材である。座屈拘束ブレースの構面外座屈を検討する過程では、このように複雑な形状の接合部の構面外剛性を算定しなければならない。

また接合部には、図2のA断面に示すように直交構面の層間変形や不可避の偏心等に伴って偏心圧縮軸力が作用する。芯材の塑性化に伴って座屈拘束部の両端がヒンジとみなせる条件下²⁾では、偏心圧縮軸力に対してガセットプレート接合部や添板が塑性化すると、座屈拘束ブレースが不安定状態となるため、接合部は弾性を維持するように設計しなければならない。

ガセットプレート接合部の構面外剛性および降伏曲げ耐力の算定

図1 座屈拘束ブレース

図2 接合部の設計応力 (構面外)

本論文の一部は、日本建築学会近畿支部研究報告集、第47号・構造系(2007.6)に発表している。

* JFE スチール(株)建材センター 部員・修士(工学)
** 大阪工業大学工学部建築学科 講師・博士(工学)
*** 京都大学大学院工学研究科建築学専攻 教授・工博
**** JFE スチール(株)西日本製鉄所 主任部員・修士(工学)

Staff, Construction Materials & Services Center, JFE Steel Corporation, M. Eng.
Lecturer, Dept. of Architecture, Osaka Institute of Technology, Dr. Eng.
Prof., Dept. of Architecture and Architectural Engineering, Kyoto University, Dr. Eng.
Staff Deputy Manager, West Japan Works, JFE Steel Corporation, M. Eng.

方法は、これまでに竹内ら³⁾, Tsai ら^{4), 5)}によって検討されている。ただし、これらの研究で対象としているガセットプレート接合部は、本論で対象としている図3のガセットプレート接合部（2章参照）とは異なる。

本論では、図3に示すガセットプレート接合部を対象として、まずはKブレース交点側のガセットプレート接合部の構面外剛性と降伏曲げ耐力（ほぼ弾性とみなすことができる接合部の限界曲げ耐力）を、ガセットプレート接合部の形状や板厚などの幾何学的情報に基づいて簡易に算定する方法を提案する。提案した算定法に基づくガセットプレート接合部の構面外剛性と降伏曲げ耐力の予測結果と、座屈拘束ブレース接合部の載荷実験結果を比較・考察する。また、柱梁接合部側のガセットプレート接合部についても、Kブレース交点側のガセットプレート接合部と同様の方法で構面外剛性と降伏曲げ耐力を算定できることを示す。最終的には、芯材の塑性化に伴って座屈拘束部の両端がヒンジとみなせる場合を対象として、図2に示すように直交構面の層間変形や不可避の偏心等に伴う偏心圧縮軸力に対して、接合部を弾性に保つための設計法を提案する。なお、ガセットプレートが接合される柱や梁には、ガセットプレート接合部に作用する応力を伝達するため⁶⁾に、スチフナが適切に配置されていることを前提とする。

図3 ガセットプレート接合部の形状と名称

2. ガセットプレート接合部の形状

図3に、ガセットプレート接合部各部の名称を示す。フィンスチフナは、高力ボルト接合用に座屈拘束ブレース材軸と平行に設けられる構面外スチフナプレートであり、サイドスチフナとセンタースチフナは、ガセットプレートの構面外剛性を高めるために設置されるスチフナプレートである。これらのスチフナプレートを含まない板材を単にガセットプレートと呼ぶ。また、接合部のうち、図3中の長さ l_j の区間をブレース側接合部と呼び、A断面において添板を含まない十字断面を接合部母材と呼ぶ。

本論では図3に示す2種類のガセットプレート接合部を対象とする。図3(a)に示す標準ディテール1は、フィンスチフナが梁フランジに溶接接合されている場合である。図3(b)に示す標準ディテール2は、フィンスチフナが梁フランジまで到達していないが、ガセットプレートがサイドスチフナによって補強されている場合である。標準ディテール1では、ガセットプレート接合部の構面外剛性と降伏曲げ耐力は接合部母材のそれぞれと等しいとすれば、どちらも過小評価になる。しかし、標準ディテール2の場合には、ガセットプレート接合部の構面外剛性と降伏曲げ耐力は、接合部母材と同等以上であるとはいえない。本論では、標準ディテール2を対象として、ガセットプレート接合部の構面外剛性と降伏耐力の算定方法を提案する。

3. Kブレース交点側ガセットプレート接合部の構面外剛性と降伏耐力

3.1 剛体-バネモデル

本章では、図3(b)を対象としてKブレース交点側のガセットブ

図4 剛体-バネモデルの概要

表1 剛性マトリックス $\mathbf{K}_{XY}$ の成分 ($\times k_{XY}$)

	w_1	w_2	w_3	w_4
P_1	$(\frac{\sqrt{l_{23}^2 - XY h_X^2}}{l_{13} XY h_X} + \frac{\sqrt{l_{34}^2 - XY h_Y^2}}{l_{13} XY h_Y})^2$	$-\frac{\sqrt{l_{23}^2 - XY h_X^2}}{l_{13} XY h_X^2} - \frac{\sqrt{l_{34}^2 - XY h_Y^2}}{l_{13} XY h_Y^2}$	$(\frac{\sqrt{l_{23}^2 - XY h_X^2}}{l_{13} XY h_X} + \frac{\sqrt{l_{34}^2 - XY h_Y^2}}{l_{13} XY h_Y}) \cdot \{ \frac{1}{XY h_X} (1 - \frac{\sqrt{l_{23}^2 - XY h_X^2}}{l_{13}}) + \frac{1}{XY h_Y} (1 - \frac{\sqrt{l_{34}^2 - XY h_Y^2}}{l_{13}}) \}$	$-\frac{\sqrt{l_{23}^2 - XY h_X^2}}{l_{13} XY h_X XY h_Y} + \frac{\sqrt{l_{34}^2 - XY h_Y^2}}{l_{13} XY h_Y^2}$
P_2		$\frac{1}{XY h_X^2}$	$-\frac{1}{XY h_X^2} (1 - \frac{\sqrt{l_{23}^2 - XY h_X^2}}{l_{13}}) - \frac{1}{XY h_X XY h_Y} (1 - \frac{\sqrt{l_{34}^2 - XY h_Y^2}}{l_{13}})$	$\frac{1}{XY h_X XY h_Y}$
P_3			$\{ \frac{1}{XY h_X} (1 - \frac{\sqrt{l_{23}^2 - XY h_X^2}}{l_{13}}) + \frac{1}{XY h_Y} (1 - \frac{\sqrt{l_{34}^2 - XY h_Y^2}}{l_{13}}) \}^2$	$-\frac{1}{XY h_X XY h_Y} (1 - \frac{\sqrt{l_{23}^2 - XY h_X^2}}{l_{13}}) - \frac{1}{XY h_Y^2} (1 - \frac{\sqrt{l_{34}^2 - XY h_Y^2}}{l_{13}})$
P_4	sym.			$\frac{1}{XY h_Y^2}$

図5 解析モデル

図6 添板の効果

図7 スチフナの構面外変形

レート接合部の構面外剛性と降伏耐力を、剛体バネモデル⁷⁾(以下、RBSMと略記する)を用いて算定する方法を構築する。簡単のため、ガセットプレート接合部は2次元部材として扱い、せん断変形は無視する。以下に文献7)に従い、RBSMの概略を示す。

RBSMでは板要素を複数の三角形要素に分割する。図4に示すように、隣り合う三角形要素(XとY)を取り出して考える。各三角形要素は剛体とし、その境界に設けられた回転バネで連結されている。回転バネ剛性 k_{XY} は次式で与えられる(寸法記号は図4参照)。

$$k_{XY} = \frac{2I_{13}}{XY h_X + XY h_Y} \cdot \frac{Et^3}{12(1-\nu^2)} \quad (1)$$

ただし、 t は三角形要素の板厚、 ν はポアソン比である。

図4に示すように各三角形要素は z 方向(構面外方向)のみに移動可能とする。このとき、回転バネの回転角 θ_{XY} は各節点の構面外変位 $w_1 \sim w_4$ を用いて表すことができ、各節点に作用する構面外荷重を $P_1 \sim P_4$ とすると、剛性方程式は次式で与えられる。

$$\{P_1, P_2, P_3, P_4\}^T = \mathbf{K}_{XY} \{w_1, w_2, w_3, w_4\}^T \quad (2)$$

ここで、 $\mathbf{K}_{XY}$ は三角形要素XとYの要素境界に関する剛性マトリックスであり、 $\mathbf{K}_{XY}$ の成分は表1に示すように図4の各三角形要素の寸法を用いて表される。これらの寸法は、図5における①～⑥の座標から算定される(付録1参照)。

3.2 ガセットプレート接合部のモデル化

図5に示すように、 $\mathbf{K}$ ブレース交点側のガセットプレート接合部の半分を取り出してモデル化する。図5で一点鎖線で囲った三角形領域は、ガセットプレート接合部の構面外剛性と降伏耐力に影響を与えないものとして無視し、その他の領域を図5に示すように5つの三角形要素(A～E)に分割する。節点①と節点③はフィンスチフナの両端部に位置し、節点②と節点④はそれぞれサイドスチフナとセンタースチフナに連結されている。各三角形要素は、辺②⑤、辺④⑥、辺⑤⑥において各辺まわりの回転を拘束されているものとする。フィンスチフナ、溶接部の余盛、ボルト孔欠損は無視する。

ガセットプレート接合部と接合部母材は、添板を介して高力ボルト摩擦接合されるが、図5の解析モデルでフィンスチフナは剛体移動するだけであるので、フィンスチフナにとりつく添板は無視する。また、ガセットプレートにとりつく添板のうち、図6に示すように、上側の添板(白抜き)はガセットプレート接合部の構面外挙動に与える影響は小さいと考えられるので無視し、下側の添板(色つき)だけを考慮する。この添板は三角形要素AとCの境界に位置するので、その境界における回転バネ剛性 k_{AC} にその効果を反映させる。ただし、ガセットプレートと

添板からなる断面は、平面保持が成立しないものとする。回転バネ剛性 k_{AC} の算定式は次節(9.b)式で示す。

3.3 ガセットプレート接合部の構面外剛性

図5の解析モデルにおいて節点⑤、⑥が不動点であることを考慮すると、節点①の構面外荷重 P_1 と構面外変位 w_1 の関係は、全体剛性マトリックスを $\mathbf{K}_G$ として次式で与えられる。

$$\{P_1, P_2, P_3, P_4\}^T = \mathbf{K}_G \{w_1, w_2, w_3, w_4\}^T \quad (3)$$

$\mathbf{K}_G$ は、図5で隣り合う三角形要素(AとB、AとC、BとD、CとE、DとE)について、3.1節の方法によって求めた要素境界に関する剛性マトリックスを、(3)式中の対応する自由度に重ね合わせることで求められる。

節点③には構面外荷重が作用しないため、 $P_3 = 0$ である。また、サイドスチフナとセンタースチフナは、図7に示すように回転バネと剛棒でモデル化し、節点②と節点④の構面外変位 w_2, w_4 が、サイドスチフナとセンタースチフナを上端固定の片持ち梁とみなしたときの曲げ変形と等しくなるように回転バネの剛性を定める。サイドスチフナ下端(節点②)に節点反力 $-P_2$ が、センタースチフナ下端(節点④)に節点反力 $-P_4$ が作用すると考えれば、構面外変位 w_2, w_4 はそれぞれ次式で表される。

$$w_2 = -\frac{h_s^3}{3EI_s} P_2, \quad w_4 = -\frac{h_c^3}{3EI_c} P_4 \quad (4.a), (4.b)$$

ただし、 EI_s はサイドスチフナの構面外曲げ剛性、 EI_c はセンタースチフナの構面外曲げ剛性である。

以上より、(3)式の全体剛性マトリックス $\mathbf{K}_G$ は節点①の自由度だけに縮約して表すことができ、節点①に作用する構面外荷重 P_1 と節点①の構面外変位 w_1 の比をガセットプレート接合部の構面外剛性 K_G と定義すると、 K_G は次式で与えられる。

$$K_G = {}_G K_{11} - (\lambda_2 \cdot {}_G K_{12} + \lambda_3 \cdot {}_G K_{13} + \lambda_4 \cdot {}_G K_{14}) \quad (5)$$

ただし、上式で ${}_G K_{11}$ 、 ${}_G K_{12}$ 、 ${}_G K_{13}$ 、 ${}_G K_{14}$ は全体剛性マトリックス

図8 構面外剛性とスチフナの板厚 t_s

図9 検討対象ディテール

K_G の第 1 行の成分であり, $\lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$ はそれぞれ次式を満足する係数である.

$$\lambda_2 = -w_2/w_1, \lambda_3 = -w_3/w_1, \lambda_4 = -w_4/w_1 \quad (6.a) \sim (6.c)$$

図 8 にガセットプレートの板厚 t_g をパラメータとして, (5) 式の右辺第 2 項～第 4 項の和と, サイドスチフナ・センタースチフナの板厚 t_s との関係を示す. ただし, 縦軸は (5) 式の K_G で無次元化している. 対象とするガセットプレート接合部は図 9 に示すものである. これは, ガセットプレートの板厚 t_g が 16mm の場合に, 後述の載荷実験の試験体 No.2 と同一であり, 降伏軸力が 1500kN 程度の座屈拘束ブレースの接合部に相当する. 添板の板厚 t_{sp} は, t_g のワンサイズダウンとした.

図 8 より, 各スチフナの板厚 t_s がガセットプレートの板厚 t_g と同程度であり, 幅 (奥行き) B_s が梁フランジ幅程度 (図 8 では $B_s = 200\text{mm}$ とした) 確保されていれば, 縦軸の値は高々数 % 程度であり, (5) 式の右辺第 2 項以降は無視できるといえる. すなわち, 節点②, ③, ④は構面外に移動しないものと考え, ガセットプレート接合部の構面外剛性 K_G は次式で略算できる (各寸法記号は図 4 参照).

$$K_G = {}_G K_{11} = {}_{AB} K_{11} + {}_{AC} K_{11} + {}_{BD} K_{11} \quad (7)$$

ここで,

$${}_{AB} K_{11} = k_{AB} \cdot \left(\frac{\sqrt{l_{23}^2 - {}_{AB} h_A^2}}{l_{13} {}_{AB} h_A} + \frac{\sqrt{l_{34}^2 - {}_{AB} h_B^2}}{l_{13} {}_{AB} h_B} \right)^2 \quad (8.a)$$

$${}_{AC} K_{11} = k_{AC} / {}_{AC} h_A^2, \quad {}_{BD} K_{11} = k_{BD} / {}_{BD} h_B^2 \quad (8.b), (8.c)$$

$$k_{AB} = \frac{2 l_{13}}{{}_{AB} h_A + {}_{AB} h_B} \cdot \frac{E t_g^3}{12 (1-\nu^2)} \quad (9.a)$$

$$k_{AC} = \frac{2 l_{23}}{{}_{AC} h_A + {}_{AC} h_C} \cdot \frac{E (t_g^3 + 2 t_{sp}^3)}{12 (1-\nu^2)} \quad (9.b)$$

$$k_{BD} = \frac{2 l_{34}}{{}_{BD} h_B + {}_{BD} h_D} \cdot \frac{E t_g^3}{12 (1-\nu^2)} \quad (9.c)$$

以降, K_G は (7) 式の略算式により算出する.

3.4 座屈拘束ブレース接合部の曲げ剛性 EI_J^*

座屈拘束ブレースの接合部は, 図 3 に示すように, ガセットプレート接合部と接合部母材, およびそれらを接合するための添板からなる変断面材である. しかし, 接合部を含む座屈拘束ブレースの構面外座屈荷重^{1), 2)}を求めるためには, 接合部を一樣な曲げ剛性をもつ線材に置換する必要がある. そこで, 図 10(a) に示すように, 座屈拘束ブレースの接合部全体を構面外曲げ剛性 EI_J^* をもつ長さ ξl の線材にモデル化する.

接合部の構面外曲げ剛性 EI_J^* を求めるために, 図 11 に示すよう

図 10 接合部のモデル化

図 11 構面外荷重の作用位置

図 12 降伏曲げ耐力の求め方

に芯材と接合部との境界位置 (図中 ○ 印) に構面外荷重 P が作用した場合を考え, ガセットプレート接合部の構面外挙動を図 10(b) に示すようにモデル化する. すなわち, フィンスチフナと梁フランジとの隙間 (長さ l_{NF}) およびフィンスチフナを剛とし, これらの 2 本の剛棒の間に $K_G l_F^2$ の剛性を有する回転バネを設ける. これは, 3.3 節で述べたように, RBSM ではセンタースチフナとサイドスチフナが設置されている場合, 節点③の構面外変位が無視できることに基づいている.

以上より, 芯材と接合部の境界 (図 10 の右端) に構面外荷重 P が作用したとき, その位置の構面外変位 w を図 10(a) と図 10(b) で等置して, 接合部の構面外曲げ剛性 EI_J^* を次式で与える.

$$EI_J^* = \frac{(\xi l)^3}{3 \{ (l_J + l_F)^2 / (K_G l_F^2) + l_J^3 / (3 EI_J) \}} \quad (10)$$

ただし, EI_J は接合部母材の構面外曲げ剛性である.

3.5 ガセットプレート接合部の降伏曲げ耐力

座屈拘束ブレース芯材と接合部の境界に構面外荷重 P が作用したとき, ガセットプレート接合部端部には $P \cdot \xi l$ の曲げモーメントが作用する. ガセットプレート接合部の曲げ剛性が線形を維持できる限界の曲げモーメントを接合部の降伏曲げ耐力と定義し, 本節では 2 種類の降伏曲げ耐力の算出方法を提示する.

まず 1 つ目は, サイドスチフナとセンタースチフナの構面外の曲げ耐力が十分大きい場合であり, 図 12 左側に示す崩壊機構を想定する. 図中の太線は, 図 5 に示す RBSM を用いた解析モデルにおける三角形要素 A と B の境界線であり, これらを降伏線とみなすと, 接合部の降伏曲げ耐力 ${}_G M_y$ は次式で与えられる.

$${}_G M_y = {}_G P_y \cdot \xi l \quad (11)$$

$${}_G P_y = \left(\frac{\sqrt{l_{23}^2 - {}_{AB} h_A^2}}{{}_{AB} h_A} + \frac{\sqrt{l_{34}^2 - {}_{AB} h_B^2}}{{}_{AB} h_B} + \frac{l_{23}}{{}_{AC} h_A} + \frac{l_{34}}{{}_{BD} h_B} \right) \cdot \frac{l_F}{l_F + l_J} \cdot \frac{t_g^2 \sigma_{gy}}{6} \quad (12)$$

ただし, σ_{gy} はガセットプレートの降伏応力である. また, 添板とガセットプレートからなる断面は平面保持が成立しないと考えられるので, 降伏曲げ耐力の算出では添板を無視する.

もう 1 つは, サイドスチフナの曲げ耐力が小さい場合に相当する. このとき, 図 12 左側の機構が形成される前にサイドスチフナが曲げ降伏し, ガセットプレート接合部の構面外曲げ剛性が低下する. 図 12 右側に示すように接合部に作用する曲げモーメントをすべてサイドスチフナが負担すると考えれば, ガセットプレート接合部の降伏曲げ耐力 ${}_s M_y$ は, 図 12 の記号を参照して次式で与えられる.

$${}_S M_y = {}_S P_y \cdot \xi l \quad (13)$$

$${}_sP_y = \frac{B_s^2 t_s \sigma_{sy}}{6 h_v} \quad (14)$$

ただし, σ_{sv} はサイドスチフナの降伏応力である.

4. ガセツトプレート接合部の載荷実験

本章では、ガセットプレート接合部の構面外剛性と降伏曲げ耐力について、3章で示した算定法に基づく計算結果と実験結果を比較する。

4.1 試験体と実験パラメータ

試験体は、図13に示すようにKブレース交点側のガセットプレート接合部の半分を取り出したものであり、ガセットプレート接合部とブレース側接合部母材、それらを接合するための添板で構成される。なお、試験体の最下部に溶接されたPL-40の銅板を高力ボルトによって鋼製ジグに緊結しているため、3章までに示した図(図3、図5、図6)と比べると上下が入れ替わっている。

表 2 に試験体一覧を（各記号は図 13 参照），表 3 に使用鋼材の機械的性質を示す．試験体 No.1 はフィンスチフナが梁フランジまで到達している試験体（標準ディテール 1：図 3(a) 参照）であり，試験体 No.2 ～ No.9 は到達していない試験体（標準ディテール 2：図 3(b) 参照）である．フィンスチフナが梁フランジまで到達していない試験体のうち，試験体 No.2 を基準試験体とする．実験パラメータは，サイドスチフナの構面外剛性（No.3, No.9），ガセットプレートの板厚 t_g （No.4），フィンスチフナと梁フランジとの隙間 l_{NF} （No.4 と No.5 の比較），K プレースの交点位置（No.6），プレースの取付角度 ϕ （No.7），ボルト列数（No.8）である．

4.2 実験概要

実験では、載荷点（図 13 の○）を油圧ジャッキで構面外方向に単調載荷する。ガセットプレート接合部の構面外剛性を確認するために、載荷点（図 13 の○）の構面外荷重 P とフィンスチフナ上端（図 13 の●）の構面外変位 w_1 を計測する。構面外荷重 P と構面外変位 w_1 の比を構面外剛性 K_G^* と定義し、 K_G^* の実験値を $_{exp}K_G^*$ 、RBSM による計算値を $_{cal}K_G^*$ と記す。なお、 $_{cal}K_G^*$ は次式に従って求める。

$${}_{cal}K_G^* = K_G l_E / (l_E + l_I) \quad (15)$$

図 14 に示すように、まず添板の効果を確認するため、フィンスタブナだけに添板を取り付けて構面外剛性を確認する。このとき、図 7 に示す三角形要素 A と C の境界における回転バネ剛性 k_{AC} は、(9.b) 式において添板の板厚を $t_{sp}=0$ として算出する。その後にはガセットプレートにも添板を取り付けて構面外剛性と降伏曲げ耐力を確認する。ただし、構面外剛性はすべての試験体で確認するが、降伏曲げ耐力は一部の試験体 (No. 1, 2, 5, 7, 8, 9) について確認した。

また上述した実験に先立ち、高力ボルト摩擦接合部（プレース側接合部と添板）の曲げ剛性を図 15 に示す方法で別途確認した。図 16 は実験結果であり、載荷点における荷重 P_C - 変形 w_C 関係である。図中の点線は、接合部母材の曲げ剛性 EI_J を有する等質等断面部材の荷重 - 変形関係である。図 16 より、高力ボルト摩擦接合部の曲げ剛性は、添板の効果で接合部母材の曲げ剛性より大きい³、その差はわずか 7% 程度である。

4.3 実験結果

4.3.1 降伏耐力

図 17 に、標準ディテール 2 (フィンスチフナが梁フランジまで到達していない) 試験体で、降伏耐力を確認したもの (No. 2, 5, 7, 8, 9) について、構面外荷重 P - 構面外変位 w_1 関係を示す。図 17 には、(12) 式による降伏耐力 g_{P_y} (太点線) と (14) 式による降伏耐力 s_{P_y} (太実線)、およびサイドスチフナが初期降伏した点 (○)

図 13 試験体の概要 (単位: mm)

表2 試験体一覧

試験体	l_{NF} (mm)	t_g (mm)	t_{sp} (mm)	l_{BP} (mm)	B_s (mm)	ϕ	ボルト 列数	ξl (mm)
No.1	0*	16	12	200	200	45°	3	850
No.2	170				200			
No.3								
No.4								
No.5	20	12	9					
No.6	170	16	12	0				
No.7	110			115	45°	790		
No.8	170			200		4	1010	
No.9				125		3	850	

* フィンステフナが端部まで到達している

表3 鋼材の機械的性質

名称	鋼種	板厚 (mm)	降伏点 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	伸び (%)
PL-9	SN490B	8.93	379	536	25
PL-12		11.9	360	519	26
PL-16		15.9	358	515	27

図 14 載荷手順

図 15 高力ボルト摩擦接合部の載荷実験

図 16 荷重—変形関係

図 17 構面外荷重-構面外変形関係

表 4 実験結果一覧 (構面外剛性 K_G^*)

試験体	添板なし			添板あり	
	RBSM TEST	FEM TEST	TEST (kN/mm)	RBSM TEST	TEST (kN/mm)
No.1	0.93 ¹	0.88	64.96	0.90 ¹	66.56
No.2	0.77	0.80	6.80	0.78	10.09
No.3	0.76	0.80	2.40	0.68	2.68
No.4	0.66	0.78	3.33	0.65	5.16
No.5	0.63	0.64	6.07	0.72	8.01
No.6	0.80	0.83	8.28	0.76	12.23
No.7	0.95	0.97	7.67	0.94	10.54
No.8	0.90	0.90	6.08	0.90	9.23
No.9	0.81	0.77	6.43	0.91	8.66

¹ 接合部母材の構面外剛性

図 18 K_G^* の比較

図 19 FEM 解析モデル概要

図 20 EI_j^* の比較

を併記している。サイドスチフナの初期降伏発生は、サイドスチフナに添付した歪ゲージ (図 13 参照) の計測値を、サイドスチフナ下端部の歪に換算した値に基づいて判定している。

図 17 より、試験体 No. 5 (図 13 の l_{NF} を最小限にした試験体) を除いて、(14) 式による降伏耐力 sP_y の計算値はサイドスチフナ降伏時の構面外荷重 (○) とよい対応を示していること、降伏耐力の計算値 sP_y はガセットプレート接合部の弾性限界を概ね捉えていることがわかる。なお、図 17 (b) に示すように、試験体 No. 5 のサイドスチフナ降伏時の構面外荷重 (○) が (14) 式の降伏耐力 sP_y (実線) を大きく上まわっているのは、ガセットプレートの降伏 (点線) がサイドスチフナの降伏 (実線) よりも先に生じることに起因している。ただし、(14) 式の降伏耐力 sP_y が実験結果を下まわっているため、サイドスチフナを設計する上では安全側となる。これらのことから、ガセットプレート接合部に作用する構面外の曲げモーメントは、サイドスチフナが負担すると考えることができ、ガセットプレート接合部を弾性域に保つためには sP_y に基づいてサイドスチフナの寸法を決定すればよいといえる。

4.3.2 剛性

構面外剛性 K_G^* について、実験結果を図 18 に、実験結果一覧を表 4 に示す。図 18 の縦軸は RBSM による計算結果 $cal K_G^*$ ((15) 式) を実験結果 $exp K_G^*$ (降伏耐力の計算値の 1/3 の点における割線剛性) で無次元化したもので、横軸は試験体 No. である。ただし、試験体 No. 1 については、ガセットプレート接合部の構面外曲げ剛性が接合部母材の構面外曲げ剛性に等しいものとして $cal K_G^*$ を計算している。また、図 18 や表 4 で "添板なし" は添板をフィンスチフナだけに取り付けた場合を意味し、"添板あり" はガセットプレートにも取り付けた場合を意味する。

図 18、表 4 より、RBSM による構面外剛性の計算結果 $cal K_G^*$ は、実験結果 $exp K_G^*$ を 1 割 ~ 4 割程度過小評価するが、算定式の簡易さを考慮すれば十分な精度といえる。また、フィンスチフナが端部まで到達していない試験体 No. 2 ~ No. 9 (標準ディテール 2) の構面外剛性は、試験体 No. 1 (標準ディテール 1) の構面外剛性の高々 15% 程度であることがわかる。このことから、接合部母材と同等以上の曲げ剛性を接合部に確保するためには、標準ディテール 1 を採用すべきであるといえる。

また、図 18 と表 4 には FEM 解析結果を併記している (ただし、"添板なし" の場合のみ)。FEM 解析には解析プログラム ADYNA を用い、節点の間隔は約 25mm、節点数は約 1500 点とし、板厚方向に 1 層のシェル要素でモデル化している。図 19 の解析モデルでは、接合部母材をガセットプレートおよびフィンスチフナに剛接合し、添板、ボルト孔欠損、溶接部の余盛を無視している。

図 18 と表 4 によれば、FEM 解析結果は RBSM による計算結果とほぼ一致している。すなわち、節点を 6 点だけ設けた RBSM であっても、FEM と同程度の精度で構面外剛性が求められるといえる。

図 20 には、(10) 式による座屈拘束ブレース接合部の構面外曲げ剛性 EI_j^* と実験結果 (ただし、"添板あり" の場合のみ) を比較して示す。図 20 の縦軸は (10) 式による計算値を実験結果で除したものであり、横軸は試験体 No. である。ただし、接合部の構面外曲げ剛性の実験結果は、載荷点の構面外変位を w として、次式で算定

図 21 解析モデル

図 22 添板の配置

している。

$$EI_J^* = P(\xi l)^3 / 3w \quad (16)$$

図 20 より、 K_G^* の場合と同様に、(10) 式による座屈拘束ブレース接合部の構面外曲げ剛性 EI_J^* の計算結果は、実験結果を 1 割～4 割程度過小評価していることがわかる。

5. 柱梁接合部側ガセットプレート接合部の構面外剛性と降伏耐力

本章では、柱梁接合部側のガセットプレート接合部を対象にして、3 章と同様の方法を用いて、接合部の構面外剛性と降伏曲げ耐力の算定方法を示す。

5.1 構面外剛性

柱梁接合部側のガセットプレート接合部では、図 21 に示すように、水平方向にもサイドスチフナが設けられる場合を対象とする。この接合部の構面外剛性を求めるために、ガセットプレートを図 21 に示すように 6 つの三角形要素 (A～F) に分割する。節点⑤～⑦は不動点なので、K ブレース交点側のガセットプレート接合部の場合と同様に、 4×4 の全体剛性マトリックス K_G が求められる。サイドスチフナの板厚がガセットプレートの板厚と同厚であり、幅 (奥行き) が梁幅程度確保されている場合には、節点①に作用する構面外荷重 P_1 と構面外変位 w_1 の比 K_G は (7) 式で与えられる。た

図 23 接合部の構面外曲げ剛性

図 24 検討ディテール (単位: mm)

図 25 降伏曲げ耐力の求め方

だし、図 22 に示すように、三角形要素 A と C の境界における回転バネ剛性 k_{AC} 、および三角形要素 B と D の境界における回転バネ剛性 k_{BD} に、添板の効果を反映させるために、 k_{BD} には (9.c) 式の代わりに次式を用いる。

$$k_{BD} = \frac{2 l_{34}}{BD h_B + BD h_D} \cdot \frac{E(t_g^3 + 2 t_{sp}^3)}{12(1-\nu^2)} \quad (17)$$

接合部全体の構面外曲げ剛性 EI_J^* は K ブレース交点側と同様に (7) 式を (10) 式に代入して求められる。

図 23 に、(10) 式による接合部の構面外曲げ剛性 EI_J^* を、K ブレース交点側と柱梁接合部側のそれぞれについて例示する。対象とする接合部は図 24 に示すものである。図 23 の縦軸は、 EI_J^* を接合部母材 (+ - 250 × 250 × t_g) の曲げ剛性 EI_J で無次元化したもので、横軸はフィンスチフナと梁フランジとの隙間 l_{NF} (図 24 参照) である。図 23 より、K ブレース交点側の接合部の構面外曲げ剛性は、柱梁接合部側の接合部の構面外曲げ剛性の半分程度で、接合部母材の曲げ剛性 EI_J よりかなり小さいといえる。

5.2 降伏曲げ耐力

4.3.1 節で述べたように、柱梁接合部側のガセットプレート接合部においても、構面外の曲げモーメントはすべてサイドスチフナが負担すると考える。ただし、ガセットプレート接合部の降伏曲げ耐力 sM_y の算定にあたっては、水平方向と鉛直方向のサイドスチフナのうち剛性の高い方が応力負担が大きいことを考慮して、(13) 式の sP_y に次式を用いる (各記号は図 25 参照)。

$$sP_y = \max\left(\frac{B_s^2 t_s \sigma_{sy}}{6 h_V}, \frac{B_s^2 t_s \sigma_{sy}}{6 h_H}\right) \quad (18)$$

6. ガセットプレート接合部の設計

6.1 設計用応力

図 26 に示すように、座屈拘束ブレース付構面の直交構面の層間

図 26 直交構面の層間変形に伴う座屈拘束ブレースの変形

図 27 接合部と芯材のなす角 θ_j

変形が生じると、ガセットプレート接合部端部には構面外の曲げモーメント $N_{\max} \xi l \theta_j$ が作用する。ここで、 $N_{\max}$ は座屈拘束ブレースの設計用最大軸力、 θ_j は図 26(c) に示すように図 2 の A 方向から見たときの軸力の作用線と接合部のなす角度であり、芯材と座屈拘束材の間の隙間を無視すると、 θ_j は図 26 (b) を参照して次式で求められる。

$$\theta_j = \frac{h_c \theta_c}{(1-2\xi)l} = \frac{\theta_c \sin \phi}{1-2\xi} \quad (19)$$

ただし、 ϕ は座屈拘束ブレースの取付角度である。また、図 26 (b) の θ_c と θ_b は、直行構面内における柱端の節点回転角および梁端の節点回転角であり、 θ_c は以下の考え方に基づいて算定する。

図 26 (a) に示すように、座屈拘束ブレース付構面の直交構面に層間変形角 R が生じた状態を考える。ただし、図 26 の骨組では、柱と梁は弾性を保ち、左右の柱の曲げ剛性、および上下の梁の曲げ剛性はそれぞれ等しいものとし、座屈拘束ブレース接合部は剛と考えている。また、図中の記号は以下のように定義している。

- ・ l_s : 梁の内法長さ
- ・ h_c : 柱の内法高さ
- ・ I_b : 梁の断面 2 次モーメント
- ・ I_c : 柱の断面 2 次モーメント

ここで、柱梁剛比を $k_c = (I_c/h_c)/(I_b/l_s)$ として、 θ_c と R には以下の関係を用いる。

$$\theta_c = \frac{R}{k_c + 1} \quad (20)$$

(20) 式を (19) 式に代入すると θ_j が求められる。図 27 は、(19) 式で得られる θ_j と ξ の関係である。図より、 θ_j は直交構面の層間変形角 R より小さく、 $\theta_j = R$ と考えれば接合部設計用の曲げモーメントを過大評価することになる。

(19) 式の θ_j は接合部を剛と見なした場合であるが、実際には剛ではないから、接合部設計用の曲げモーメント M_j は、拡大係数を乗じて次式で与えるものとする。

$$M_j = \frac{N_{\max} \xi l \theta_j}{1 - N_{\max}/p N_{cr}} \quad (21)$$

$$\text{ただし、 } p N_{cr} = (1 - 2\xi) \pi^2 E I_j^* / (2\xi l)^2 \quad (22)$$

6.2 ガセットプレート接合部の設計

4.3.1 節の検討結果より、標準ディテール 2 の場合、(21) 式で表される接合部設計用の曲げモーメント M_j は、サイドスチフナで負担されるものと考えることができる。したがって、 M_j に対して接合部が弾性を保つための条件を次式で与える。

$$\frac{M_j}{s M_y} < 1 \quad (23)$$

ここで、ガセットプレート接合部の降伏曲げ耐力 $s M_y$ は (13) 式によって算定する。

一方、標準ディテール 1 の場合は、フィンスチフナが塑性化するとガセットプレート接合部の曲げ剛性が急激に低下するので、次式を満たすように設計しなければならない。

$$\frac{N_{\max}}{G N_y} + \frac{M_j}{G M_y} < 1 \quad (24)$$

ここで、 $G N_y$ はガセットプレート接合部の降伏軸力、 $G M_y$ はガセットプレート接合部の降伏曲げモーメントである。標準ディテール 1 の場合、ガセットプレート接合部の耐力は接合部母材 (図 3 参照) の耐力と同等以上とみなせるので、 $G N_y$ および $G M_y$ は接合部母材の幅 B_j 、板厚 t_j 、降伏応力 σ_{jy} を用いて次式で求める。

$$G N_y = (2B_j - t_j) t_j \sigma_{jy} \quad (25.a)$$

$$G M_y = \frac{(B_j^3 t_j + B_j t_j^3 - t_j^4) \sigma_{jy}}{6 B_j} \quad (25.b)$$

7. 結論

本論では、座屈拘束ブレース芯材の塑性化に伴って座屈拘束部の両端がヒンジとみなせ、フィンスチフナが梁フランジまで到達していないガセットプレート接合部を有する場合 (標準ディテール 2) を対象として、剛体-バネモデルを用いた座屈拘束ブレース接合部の構面外曲げ剛性と降伏耐力の算出方法を示し、その結果を載荷実験結果と比較した。また、ガセットプレート接合部に作用する構面外の曲げモーメントの算出方法を示し、ガセットプレート接合部の設計法を提案した。本論で得られた知見を以下に要約して記す。

- [1] ガセットプレート接合部が弾性を保つためには、接合部に作用する構面外の曲げモーメント ((21) 式) に対して、(23) 式または (24) 式を満たすように設計しなければならない。ただし、芯材と座屈拘束材の間の隙間が (21) 式に及ぼす影響については課題として残されている。
- [2] 座屈拘束ブレース接合部の設計に必要な構面外曲げ剛性は (10) 式によって、また降伏曲げ耐力は (13) 式によって算定できる。
- [3] 接合部の構面外曲げ剛性の計算値は、実験結果を 1 割～4 割程度過小評価する。また、降伏曲げ耐力の計算値は、ガセットプレート接合部の弾性限界を概ね捉えている。
- [4] K ブレース交点側のガセットプレート接合部では、標準ディテール 2 (図 3 (b) 参照) の構面外曲げ剛性と降伏曲げ耐力が、標準ディテール 1 (図 3 (a) 参照) に比べて非常に小さい。したがって、K ブレース交点側のガセットプレート接合部には標準ディテール 1 を採用すべきである。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、JFE 技研 (株) 加村久哉 氏、石井匠 氏、JFE スチール (株) 清水孝憲 氏に貴重なご意見を賜りました。また、剛体-バネモデル (RBSM) について、(独) 防災科学技術研究所 招聘研究員 井根達比古 氏にご指導いただきました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 天島秀秋，聲高裕治，井上一朗：接合部を含む座屈拘束ブレースの構面外座屈荷重，日本建築学会構造系論文集，第 581 号，pp.127-134，2004.7
- 2) 木下智裕，聲高裕治，井上一朗，飯谷邦祐：接合部を含む座屈拘束ブレースの構面外座屈防止条件，日本建築学会構造系論文集，第 621 号，pp.141-148，2007.11

- 3) 竹内 徹, 山田 哲, 北川まどか, 鈴木一弁, 和田 章: 構面外剛性の低い接合部により接合された座屈拘束ブレースの座屈安定性, 日本建築学会構造系論文集, 第 575 号, pp.121-128, 2004.8
- 4) Lin, M. L., Tsai, K. C., and Tsai, C. Y.: Bi-directional sub-structural pseudo-dynamic tests of a full-scale 2-story BRBF, Part 2: Compressive behavior of gusset plates, Proceedings of the 8th U.S. National Conference on Earthquake Engineering, Paper No. 1642, 2006.4
- 5) Tsai, K. C., Hsiao, P. C., Lin, S. L., and Lin, K.C.: Overview of the Hybrid Tests of A Full Scale 3-Bay 3-Story CFT/BRB Frame, 4th International Symposium of Steel Structures, pp.73-84, 2006.11
- 6) 吉敷祥一, 市川 康, 山田 哲, 和田 章: ガセットプレート接合部に着目した部分架構の実験 ダンパーを組み込んだ靱性架構の総合的な耐震性能の向上 その 1, 日本建築学会構造系論文集, 第 620 号, pp.133-140, 2007.10
- 7) 川井忠彦, 近藤一夫: 新しい離散化モデルによる板の曲げ崩壊解析, 日本造船学会論文集, 第 142 号, pp.190-196, 1977.12

付録 1. 三角形要素の寸法の算定

本論で提案した標準ディテール 2 のガセットプレート接合部の構面外剛性 (7) 式は, 図 5 または図 21 の解析モデル中の三角形要素の寸法を用いて算定することができる. 以下には, 図 A-1 に示すガセットプレートの外形寸法を用いて, 図 5 および図 21 の各三角形要素の寸法を算定する方法を示す.

[i] K ブレース交点側のガセットプレート接合部

$$l_{13} = l_F \quad (\text{A-1})$$

$$l_{23} = \sqrt{\{l_F - (h_e - h_{sV}) \sin \phi\}^2 + AB h_A^2} \quad (\text{A-2})$$

$$l_{34} = \sqrt{(l_F - w_e \cos \phi)^2 + AB h_B^2} \quad (\text{A-3})$$

$$AB h_A = \frac{h_c - h_e}{2 \cos \phi} + (h_e - h_{sV}) \cos \phi \quad (\text{A-4})$$

$$AB h_B = \frac{h_c - h_e}{2 \cos \phi} + w_e \sin \phi \quad (\text{A-5})$$

(a) K ブレース交点側

(b) 柱梁接合部側

図 A-1 ガセットプレート接合部の寸法

$$AC h_A = \frac{l_F}{l_{23}} AB h_A \quad (\text{A-6})$$

$$AC h_C = \frac{h_{sV}}{l_{23}} \left\{ \frac{w_b - w_e}{2} + l_F \cos \phi \right\} \quad (\text{A-7})$$

$$BD h_B = \frac{l_F}{l_{34}} AB h_B \quad (\text{A-8})$$

$$BD h_D = \frac{h_c}{l_{34}} \left\{ \frac{w_b + w_e}{2} - l_F \cos \phi \right\} \quad (\text{A-9})$$

[ii] 柱梁接合部側のガセットプレート接合部

柱梁接合部側のガセットプレートでは, (A-3) 式, (A-5) 式, (A-8) 式, (A-9) 式の代わりに次式を用いる.

$$l_{34} = \sqrt{\{l_F - (w_e - h_{sH}) \cos \phi\}^2 + AB h_B^2} \quad (\text{A-3}')$$

$$AB h_B = \frac{h_c - h_e}{2 \cos \phi} + (w_e - h_{sH}) \cos \phi \quad (\text{A-5}')$$

$$BD h_B = \frac{l_F}{l_{34}} AB h_B \quad (\text{A-8}')$$

$$BD h_D = \frac{h_{sH}}{l_{34}} \left\{ \frac{h_c - h_e}{2} + l_F \sin \phi \right\} \quad (\text{A-9}')$$

(2008年 2 月 6 日原稿受理, 2008年 7 月17日採用決定)