

角形鋼管柱に対するガセットプレート形式の 方杖ダンパー接合部の構面外剛性と構面外座屈防止設計法

2. 構造—10. 鉄骨構造

方杖ダンパー 角形鋼管 構面外座屈
構面外剛性 接合部

正会員 ○ 河合 大*1 同 聲高 裕治*2
同 吹田啓一郎*2 同 井上 一朗*3
同 宇野 暢芳*4

1. はじめに

本研究は、柱を従来の H 形断面部材から角形鋼管に変えることで、2 方向ラーメンを構成するのに適した方杖ダンパー接合構造の開発を目指している¹⁾。柱に角形鋼管を用いた場合の方杖ダンパーの柱側接合部は、図 1 に示すように方杖ダンパー芯材端部、添板、ガセットプレート接合部で構成されるため、これをガセットプレート形式と呼ぶ。これまでの載荷実験では、2 次設計用地震荷重レベルをこえる大変形領域において、ガセットプレート形式の方杖ダンパー接合部に構面外座屈が生じることが確認されている^{1), 2)}。また、接合部の構面外変形の増大に伴って曲げモーメントが作用することによって、添板が塑性化することも確認されている²⁾。

方杖ダンパー接合部の構面外座屈を防止するためには、接合部を含む方杖ダンパー全体の座屈荷重に基づき、接合部に作用する曲げモーメントを元たわみを考慮して求め、この曲げモーメントと軸力の相関のもとで接合部を弾性に留める必要がある。また、座屈荷重を評価するためには、複雑な形状をした接合部の構面外剛性を評価しなければならない。本論では、ガセットプレート形式の方杖ダンパー接合部の構面外剛性の算定法を提案し、文献 2) に示された構面外剛性確認実験の結果と比較する。また、添板を弾性に留め、構面外座屈を防止するための接合部の設計法を構築する。

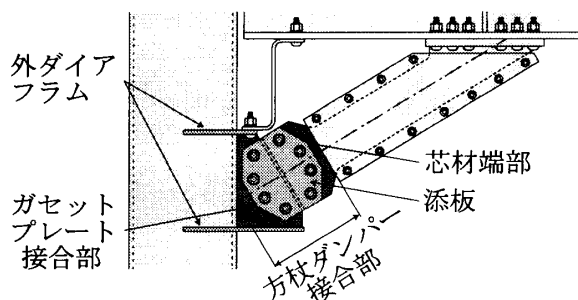


図1 ガセットプレート形式の方杖ダンパー接合部

2. 方杖ダンパー接合部の構面外剛性

2.1 剛体-バネモデル

図 1 に示すガセットプレート接合部の構面外剛性を算定するために、剛体-バネモデル³⁾を採用する。簡単のため、ガセットプレートは 2 次元部材として扱い、せん断変形は無視する。文献 3) に基づいて、以下に剛体-バネモデルの概略を示す。

剛体-バネモデルでは、対象とする板要素を複数の三角形要素（剛体）に分割し、それらを回転バネで連結したモデルを構築する。図 2 に示すように、隣り合う 2 つの三角形要素 (X・Y) を取り出して考える。三角形要素の各節点は z 方向（面外方向）にのみ移動可能とする。このとき、回転バネの回転角 θ_{XY} は各節点の構面外変形を用いて表すことができ、三角形要素 X・Y の要素境界における各節点の構面外荷重 $P_1 \sim P_4$ と構面外変形 $w_1 \sim w_4$ に関する剛性マトリックス K_{XY} が求められる。 K_{XY} の各成分は図 2 の三角形要素の寸法を用いて表され、三角形要素 X・Y の要素境界における回転バネ剛性 k_{XY} は、(1) 式で求められる。

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

ただし、 t は三角形要素の板厚、 ν はポアソン比である。

図 2 に示す三角形要素 X について、辺①③が固定

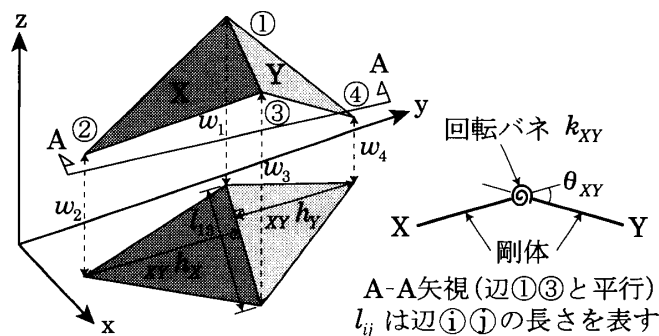


図2 剛体-バネモデルの概略

Out-of-plane stiffness and design criteria to prevent out-of-plane buckling of knee brace damper connections

KAWAI Dai, KOETAKA Yuji, SUITA Keiichiro, INOUE Kazuo and UNO Nobuyoshi

端の場合は、辺①③で三角形要素 X と接する任意形状の三角形要素 Y を導入し、回転バネで連結する。このとき、三角形要素 Y の高さ $_{XY}h_Y$ を 0 とみなすことで、上述の要素境界に関する K_{XY} を用いることができる。回転バネ剛性 k_{XY} は、(2)式で求められる。また、三角形要素 X について、辺①③がピンの場合は、回転バネ剛性を 0 とすればよい。

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

2.2 ガセットプレート接合部の構面外剛性

剛体-バネモデルを用いて、ガセットプレート接合部の構面外剛性 K_G を算定する。図 3 に示すように、ガセットプレートを 3 つの三角形要素 (A-C) に分割する。点線で囲った三角形領域は構面外剛性に影響を与えないものとして無視する。辺②③はガセットプレートと柱スキンプレートの境界であり、辺②⑤と辺③④はそれぞれガセットプレートと上側・下側の外ダイアフラムの境界である。節点④と節点⑤はそれぞれ下側・上側の外ダイアフラムの端部に連結されている。また、ガセットプレート接合部の構面外剛性の算定において添板の影響は無視する。

図 3 の分割モデルにおいて、辺②③・辺②⑤・辺③④をピンとし、節点②・節点③を不動点とみなす。節点①の構面外荷重 P_i と構面外変形 w_i の関係は、全体剛性マトリックスを K_G として(3)式で与えられる。

$$\begin{Bmatrix} P_1 & P_4 & P_5 \end{Bmatrix}^T = K_G \begin{Bmatrix} w_1 & w_4 & w_5 \end{Bmatrix}^T \quad (3)$$

K_G は、図 3 で隣り合う三角形要素 (A と B, A と C) について、2.1 節に示し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。

図 4 に示すように、下側外ダイアフラムと上側外ダイアフラムを、図中のハッチング領域を対象とし、柱スキンプレートを固定端とする片持梁にモデル化する。節点反力 $-P_4$ 、 $-P_5$ がそれぞれ下側と上側の外ダイアフラム端部に作用すると考えると、節点④と節点⑤の構面外変形 w_4 、 w_5 はそれぞれ下側と上側外ダイアフラム端部の面内変形 (曲げ変形とせん断変形の和) によって(4)式で表される。

$$w_1 = -\left(\frac{l_{dd}^3}{3EI_{dd}} + \frac{1.2l_{dd}}{GA_{dd}}\right)P_4 \quad (4.a)$$

$$w_5 = -\left(\frac{l_{ud}^3}{3EI_{ud}} + \frac{1.2l_{ud}}{GA_{ud}}\right)P_5 \quad (4.b)$$

ただし、 I_{dd} と A_{dd} は等断面材の曲げ変形、せん断変形と等しくなるように置換した下側外ダイアフラムの等価断面 2 次モーメントと等価断面積で、 I_{ud} と A_{ud} はそれぞれ上側外ダイアフラムの等価断面 2 次モーメントと等価断面積である。

(4)式より、(3)式の全体剛性マトリックス 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の構面外変形 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(5)式で与えられる。

$$K_G = K_{11} - (\lambda_4 K_{14} + \lambda_5 K_{15}) \quad (5)$$

ただし、(5)式で K_{11} 、 K_{14} 、 K_{15} は全体剛性マトリックス K_G の第 1 行の成分であり、 λ_4 、 λ_5 はそれぞれ(6)式を満たす係数である。

$$\lambda_4 = -w_4/w_1, \quad \lambda_5 = -w_5/w_1 \quad (6.a), (6.b)$$

2.3 方杖ダンパー接合部の構面外剛性

図 5 に示すように、ガセットプレート接合部が剛棒とバネ剛性 $K_G l_F^2$ の回転バネ、芯材端部と添板で構成される接合部が曲げ剛性 EI_J の線材で表されるものと考え、方杖ダンパー接合部全体を剛棒とバネ剛性 K_R の回転バネで表したモデルに置換する。図 5 に示す 2 つのモデルにおいて、接合部先端に荷重 P が作用したときの構面外変形 δ を等置することで、

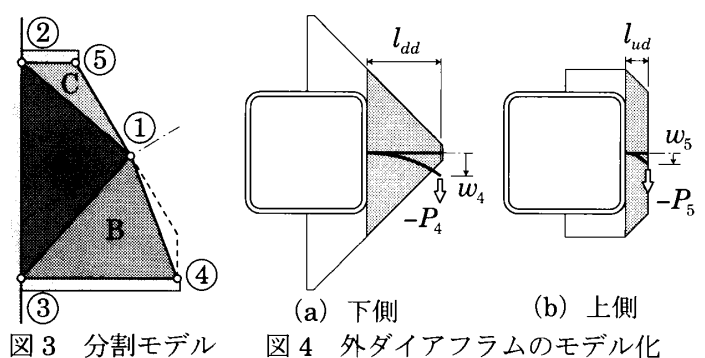


図 3 分割モデル

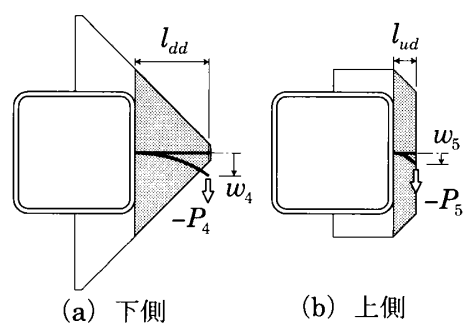


図 4 外ダイアフラムのモデル化

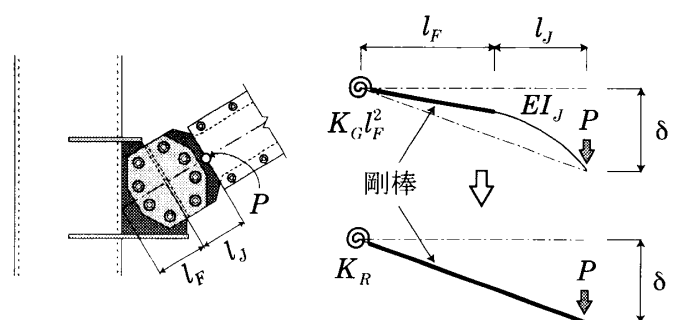


図 5 方杖ダンパー接合部のモデル化

方杖ダンパー接合部全体を表す回転バネの等価剛性 K_R が(7)式で求められる。

$$K_R = \left(\frac{1}{K_G l_F^2} + \frac{l_J / (l_J + l_F)}{3EI_J} \right)^{-1} \quad (7)$$

ここで、 I_J は芯材端部と添板の断面 2 次モーメントの単純和とする。

3. 方杖ダンパー接合部の構面外剛性算定法の検討

3.1 検討方法

本章では、方杖ダンパー接合部の構面外剛性の算定結果を、文献 2) に示された構面外剛性確認実験の結果と比較する。

文献 2) に示された S 型試験体と D 型試験体の方杖ダンパー接合部を対象として、方杖ダンパー接合部の構面外剛性 K_R を算定する。図 6 に対象とする試験体の形状を示す。 K_R は、ガセットプレート接合部の構面外剛性 K_G の算定に関する以下の 2 点をパラメータとして算定する。

- 1) ガセットプレート周縁 (辺②③・辺②⑤・辺③④) の境界条件 (ピン・固定)
- 2) 外ダイアフラム端部 (節点④・節点⑤) の構面外変形の有無

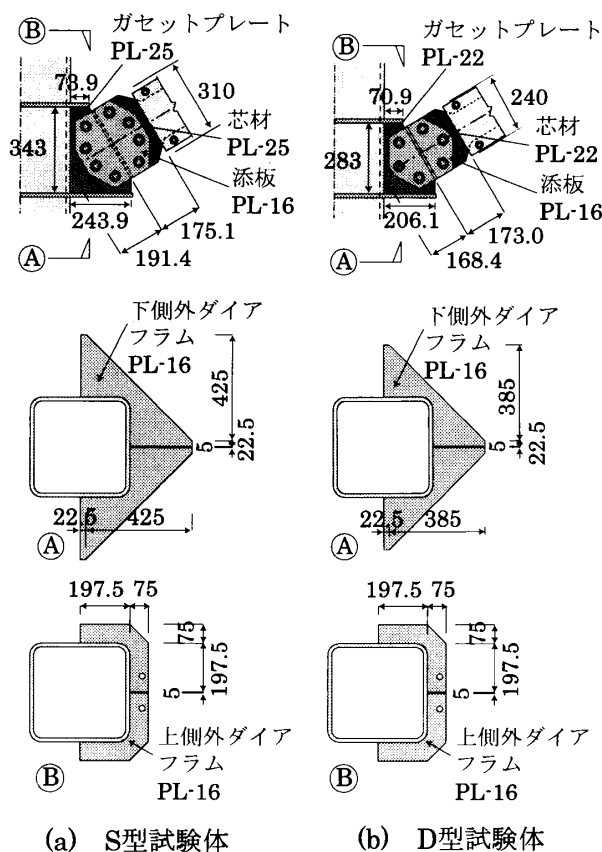


図6 検討対象の形状 (単位: mm)

ガセットプレートの周縁 (辺②③・辺②⑤・辺③④) の境界条件を固定とする場合の K_G は、(5)式における K_{11} , K_{14} , K_{15} に関して、三角形要素 A・B・C とそれぞれの固定端を表す任意形状の三角形要素の境界における回転バネを考慮して求められる。外ダイアフラム端部 (節点④・節点⑤) の構面外変形が生じないとする場合の K_G は、(5)式で λ_4 , λ_5 を 0 として求められる。

3.2 検討結果

表 1 にガセットプレート接合部の構面外剛性 K_G と方杖ダンパー接合部の構面外剛性 K_R の計算結果を示す。比較のため、 K_R に関して、計算結果を文献 2) に示された実験結果で除した値を示す。

表 1 より、外ダイアフラム端部の構面外変形が生じる場合の K_R の計算結果は、構面外変形が生じない場合の計算結果と比べて数%小さい程度であり、外ダイアフラム端部の構面外変形を考慮しても計算結果に与える影響が小さいことがわかる。また、境界条件を固定とした場合の K_R の計算結果は、実験結果の約 2 倍となっている。境界条件をピンとした場合の K_R の計算結果は実験結果を 2 割程度上まわるが、固定の場合と比べて実験値に近い計算値を与えていることがわかる。

以上より、図 3 に示す分割モデルにおいて、周縁 (辺②③・辺②⑤・辺③④) をピン、節点②～節点⑤を不動点とみなし、ガセットプレート接合部の構面外剛性 K_G を次式で求めることを提案する。

$$K_G = \left(\frac{\sqrt{l_{23}^2 - AB h_A^2}}{l_{13 AB} h_A} + \frac{\sqrt{l_{34}^2 - AB h_B^2}}{l_{13 AB} h_B} \right)^2 k_{AB} + \left(\frac{\sqrt{l_{25}^2 - AC h_C^2}}{l_{12 AC} h_C} + \frac{\sqrt{l_{23}^2 - AC h_A^2}}{l_{12 AC} h_A} \right)^2 k_{AC} \quad (8)$$

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

表1 構面外剛性の計算結果

モデル化		S 型試験体			D 型試験体		
(1) 境界条件	(2) 構面外変形	K_G kN/mm	K_R kNm	計算 実験	K_G kN/mm	K_R kNm	計算 実験
固定	無	136.4	3271	2.21	127.2	2133	2.09
	有	133.6	3226	2.18	124.7	2108	2.07
ピン	無	58.1	1738	1.17	55.0	1201	1.18
	有	56.9	1708	1.15	54.0	1185	1.16

$$k_{AC} = \frac{2l_{12}}{AC h_A + AC h_C} \cdot \frac{Et_g^3}{12(1-\nu^2)} \quad (9.b)$$

4. 方杖ダンパー接合部の構面外座屈防止設計法

4.1 構面外座屈荷重

図7に方杖ダンパーの構面外座屈に関する力学モデルを示す。方杖ダンパー芯材の応力-歪関係を完全弾塑性型と仮定し、芯材の軸力が降伏軸力に到達し、そのときの応力点が降伏曲面上の特異点に位置するものと考え、座屈拘束材の両端をピンとみなす⁴⁾。回転バネとピンを剛棒で連結した図7の力学モデルより、構面外座屈荷重 N_{cr} は(10)式で求めることができる²⁾。

$$N_{cr} = \frac{K_R l_B}{l_R(l_B + l_R)} \quad (10)$$

4.2 添板に作用する曲げモーメント

元たわみを有する方杖ダンパーに軸力 N が作用すると、添板には軸力だけでなく、曲げモーメントも作用する。軸力 N が座屈荷重に近づくと、その座屈モードと同じ形状のたわみが顕著に現れるため、添板に作用する最大曲げモーメント M_{max} は、図7に示す座屈モードと同じ形状の元たわみを想定して(11)式で求められる⁴⁾。

$$M_{max} = \frac{N_{max} l_J \theta_B}{1 - N_{max} / N_{cr}} \quad (11)$$

ここで、 N_{max} は方杖ダンパー接合部の設計用軸力、 θ_B は図7に示す座屈モードと同じ形状の元たわみを与えた場合の方杖ダンパーと元の材軸がなす角度である。

4.3 方杖ダンパー接合部の設計

方杖ダンパー接合部の構面外座屈を防止するためには、方杖ダンパー接合部を構成する添板を弾性に保つ必要がある。このためには、図8に示すように、 N_{max} と M_{max} が添板の降伏相関曲線の内部に存在する必要がある、この条件は(12)式で表される。

$$\frac{N_{max}}{sp N_y} + \frac{M_{max}}{sp M_y} < 1 \quad (12)$$

ここで、 $sp N_y$ は添板の降伏軸力、 $sp M_y$ は添板1枚の降伏モーメントを2倍した値である。

5. まとめ

本論では、ガセットプレート形式の方杖ダンパー接合部の構面外剛性算定法を提案し、方杖ダンパー接合部の構面外座屈を防止するための設計法を構築した。

方杖ダンパー接合部の構面外剛性算定法の検討の結果、提案した(7)式および(8)式で求められる方杖ダンパー接合部の構面外剛性の計算結果は、実験結果を2割程度上まわっていることを確認した。また、方杖ダンパー接合部の構面外座屈防止設計法の妥当性の確認は今後の課題とする。

参考文献

- 1) 髙裕治, 福智康之, 井上一朗, 吹田啓一郎, 宇野暢芳: 方杖ダンパー接合構造の角形鋼管柱への適用と検証実験, 日本建築学会近畿支部研究報告集, 第50号・構造系, pp.189-191, 2010.6
- 2) 髙裕治, 吹田啓一郎, 井上一朗, 宇野暢芳: 方杖ダンパー接合構造の角形鋼管柱への適用と検証実験 その3 構面外座屈荷重, 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-1構造Ⅲ, pp.1117-1118, 2011.8
- 3) 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
- 4) 髙裕治, 木下智裕: 座屈拘束ブレース接合部の構面外座屈防止設計法, 日本建築学会構造系論文集, 第641号, pp.1371-1378, 2009.7

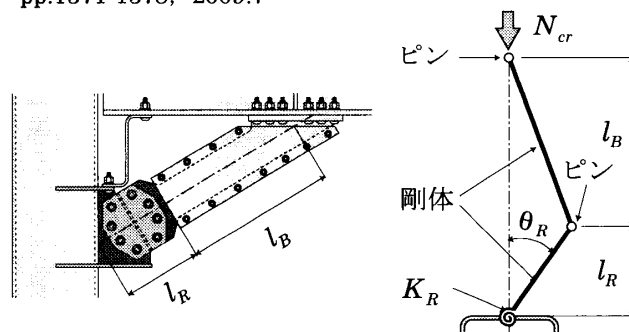


図7 構面外座屈に関する力学モデル

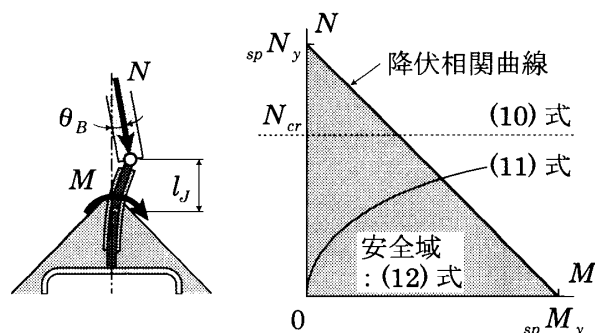


図8 添板に作用する軸力と曲げモーメントの相関

*1 大阪工業大学大学院工学研究科建築学専攻
 *2 京都大学大学院工学研究科建築学専攻
 *3 日本建築総合試験所
 *4 日鐵住金建材

Major in Architecture Graduate school of Eng., Osaka Institute of Technology
 Dept. of Architecture and Architectural Engineering, Kyoto Univ.
 General Building Research Corporation of Japan
 Nippon Steel & Sumikin Metal Products Co. Ltd.