

来たるべき超巨大地震をうける 鋼材系制振ダンパー付鉄骨造建物の水平2方向挙動の解明

聲高 裕治

(京都大学大学院工学研究科建築学専攻・准教授)

1. 研究の概要

制振ダンパーは、地震によるエネルギーを吸収して建物の揺れを低減することができる装置であり、超高層建物に限らず高層から低層のあらゆる建物の、さらには鉄骨造に限らず鉄筋コンクリート造や木造など幅広い構造種別に利用されている。

一方で、近年のたび重なる大地震の発生や、これに伴う地震学分野における研究成果の蓄積によって、これまで建物の耐震設計では考慮されていなかったような、強烈な揺れを引き起こす超巨大地震の発生が予測されるようになってきた。特に、関東平野における首都圏直下地震や大阪平野における上町断層帯地震などは、建物の変形が従来の設計で考慮される変形の3倍以上に達する可能性が指摘されている¹⁾。

本一連の研究では、鋼材系制振ダンパーの一種である座屈拘束ブレースを対象とし、耐震設計の想定をこえる超巨大地震をうける場合について、図1に示すようなダンパー（座屈拘束ブレース）ならびにその接合部や周辺部材の挙動を解明し、制振ダンパー付鉄骨造建物の倒壊防止設計法を構築することを最終的な目標に掲げている。

そこで本研究では、座屈拘束ブレースに構面内と構面外の2方向に極めて大きな変形が生ずる場合を想定し、主にブレース接合部の挙動に焦点を当てて以下の2項目について実施した。

[1] ブレース接合部の構面外剛性算定法の構築と有限要素法解析による検証 (2章)

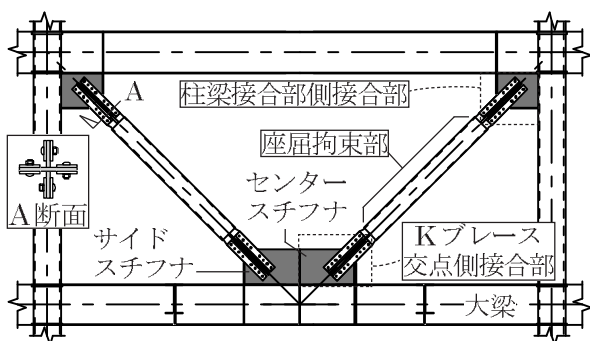


図1 座屈拘束ブレースの設置状況

[2] ブレース接合部の構面外挙動確認のための実験計画の立案 (3章)

2. ブレース接合部の構面外剛性算定法の構築と有限要素法解析による検証

2.1 はじめに

圧縮力を受ける座屈拘束ブレースに安定した履歴特性を発揮させるためには、座屈拘束材の曲げ降伏²⁾や接合部を含む座屈拘束ブレース全体の座屈^{3),4)}を防止するように設計する必要がある。本研究では、図1に示すように十字形断面の接合部を有し、高力ボルト接合された座屈拘束ブレース全体が、構面外に座屈する場合を想定する。

このような構面外座屈に関する検討は既往の研究で数多くなされており、たとえば文献5)では写真1に示す構面外座屈の発生を実験によって確認し、その結果に基づいて構面外座屈荷重の算定法を提案している。構面外座屈荷重を算定するためには、座屈拘束部の曲げ剛性の他に、接合部の構面外曲げ剛性が必要となる。文献6)では、図1と同様の接合部について構面外曲げ剛性の算定法が提案されており、Kブレース交点側を対象とした載荷実験と有限要素法解析（以下FEM解析）に基づいて、算定法の妥当性が確認されている。また、文献7)では柱梁接合部側の接合部を対象とし、接合部と柱、梁の



写真1 座屈拘束ブレースの構面外座屈⁵⁾

境界の自由度を拘束した場合には、文献6)の手法による算定結果とFEM解析結果が良い対応を示すことが明らかにされている。さらに、梁と柱の変形を考慮すると、ブレース設置角度が小さい場合に、算定結果が解析結果より大きな値を与えることが指摘されている⁷⁾。

文献6)で提案された構面外剛性算定法は、サイドスチフナやセンタースチフナの板厚が、ガセットプレートの板厚と同程度であることを前提としている。また、ブレースの耐力は1500kN程度、ブレース設置角度が45°の接合部を主な対象としている。そのため、サイドスチフナの板厚がガセットプレートの板厚よりも薄い場合や、様々な耐力と設置角度を持つブレースの接合部に対して適用できるのかを確認する必要がある。

このような背景をふまえて、本研究では、文献6)の座屈拘束ブレース接合部構面外曲げ剛性算定法に、サイドスチフナ板厚がガセットプレート板厚と比べて薄い場合に対応できるよう変更を加える。その上で柱梁接合部側の高力ボルト摩擦接合部を検討対象とし、ブレース耐力、設置角度をパラメータとしたFEM解析を行い、構築した算定法の精度を確認する。ただし、接合部が取り付く柱と梁の変形は考慮しないものとする。

2.2 構面外剛性の算定法

文献6)では剛体-バネモデル(以下RBSM)を用いた構面外剛性の算定法を提案している。本研究では、文献6)の算定法の一部を修正することで適用範囲の拡大を図る。

(1) 剛体-バネモデル(RBSM)

RBSMは川井ら⁸⁾によって提案されたモデルで、2次元板要素を複数の三角形要素に分割し、各三角形要素は剛体とし、境界に回転バネを設けることで板要素の構面外剛性を表現するものである。図2の

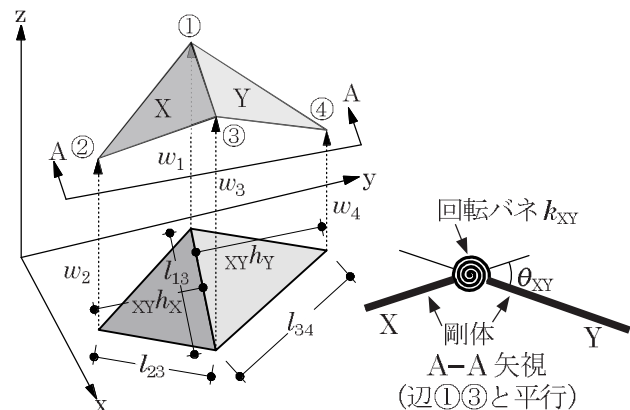


図2 剛体-バネモデル(RBSM)の概要

ように、隣接した2つの三角形要素境界における回転バネ剛性 k_{XY} は図2中の寸法を用いて(1)式で与えられる。

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

t は三角形要素の板厚で、 ν はポアソン比である。

三角形要素の頂点①~④はz方向(構面外方向)の移動だけを考慮する。ここでは詳細を割愛するが、図2に示す回転バネの回転角 θ_{XY} は①~④点の構面外変位 $\{w_1, w_2, w_3, w_4\}$ を用いて表すことができる。同様に回転バネに生じる曲げモーメントは①~④点の構面外荷重 $\{P_1, P_2, P_3, P_4\}$ を用いて表すことができる。

以上より、三角形XとYの境界(境界線①③)に関する剛性方程式は(2)式で与えられる。

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

(2)式中の剛性マトリクス K_{XY} の各成分は、回転バネ剛性 k_{XY} と図2中の寸法を用いて表現できる⁹⁾。

(2) ガセットプレート接合部のモデル化

図3のようにガセットプレートを三角形要素に分割する⁹⁾。ただし、斜線領域は構面外剛性に影響を与えないとして無視する。また、簡単のため、溶接の余盛やボルト孔は無視する。Kブレース交点側接合部では、図3(a)におけるセンタースチフナの左側の部分は無視し、センタースチフナは左側のガセットプレートによって拘束されないものとする。

各三角形要素境界に関して、(2)式の K_{XY} と同様

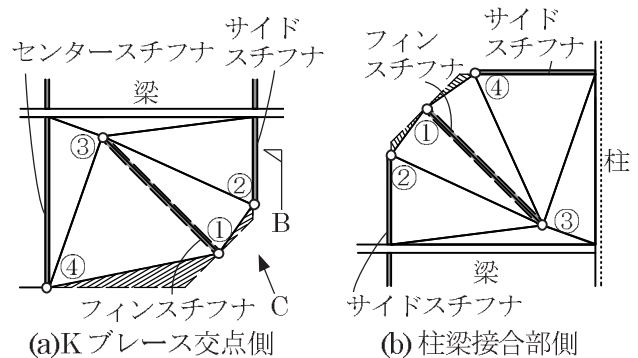


図3 三角形要素への分割

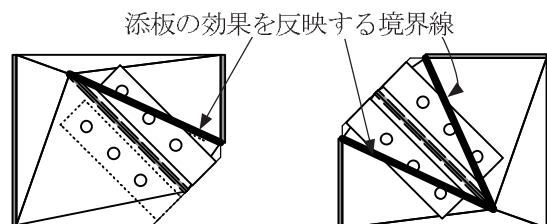


図4 添板の効果

に剛性マトリクスを導出する。接合部と柱、梁との境界は固定端とみなす。文献(6)ではスチフナとガセットプレートの境界を固定端と考えていたが、本研究ではスチフナとガセットプレートの境界を単純支持とみなす。これは、2.2節(3)で後述するようにスチフナのねじれ変形を考慮し、その影響をガセットプレートの境界条件に簡便に反映するためである。また、境界の回転バネ剛性がゼロであるため、固定端の場合と比べて剛性マトリクスの導出が容易になる。

接合部母材とガセットプレート接合部は添板を介して高力ボルト接合される。ガセットプレートに取り付く添板の内、構面外挙動に与える影響が大きいと考えられる添板が重なる境界(図4中の太実線)の回転バネ剛性には文献(6)と同様に、添板の影響を考慮した剛性を用いる。ただし、ガセットプレートと添板の間には平面保持が成立しないとす。

以上の条件で導出した各三角形要素に関する剛性マトリクスを重ね合わせて、(3)式で表される①～④点の構面外荷重 $\{P_1, P_2, P_3, P_4\}$ と構面外変位 $\{w_1, w_2, w_3, w_4\}$ に関する剛性マトリクス K_G を導出する。

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

(3) 自由度の縮約

(3)式の自由度のうち、②～④点に関するものを文献(6)にならって縮約する。

まず初めに②、④点の自由度をサイドスチフナあるいはセンタースチフナの荷重-変形関係に基づいて縮約する。文献(6)ではスチフナの変形としてスチフナ面内の曲げ変形のみを考慮していたが、本研究では図5に示すようにスチフナ面内のせん断変形とねじれ変形も考慮する。スチフナの曲げ変形とせん断変形による②点の構面外変位 w_{2b} 、 w_{2s} はそれぞれ次式で与えられる。

$$w_{2b} = -\frac{h_{s2}^3}{3EI_{s2}} P_2 \quad (4)$$

$$w_{2s} = -1.2 \frac{h_{s2}}{GB_{s2}t_{s2}} P_2 \quad (5)$$

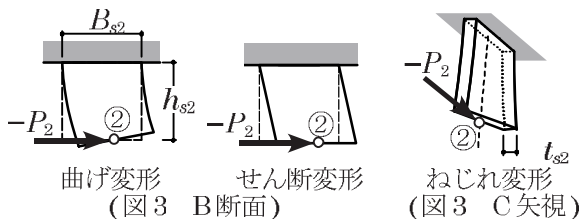


図5 スチフナの変形

I_{s2} はスチフナ強軸まわりの断面二次モーメントであり、 $I_{s2} = t_{s2} \cdot B_{s2}^3 / 12$ と表すことができる。図5に示すように、 h_{s2} はスチフナの長さ、 B_{s2} は幅、 t_{s2} は板厚である。 E はヤング係数、 G はせん断弾性係数である。(5)式ではせん断に関する形状係数として1.2を用いている。

スチフナの材軸と P_2 の作用点はスチフナの板厚 t_{s2} の1/2だけ離れており、スチフナにはねじりモーメントが作用する。スチフナは長方形中実断面なので、サンブナンのねじれが卓越して現れ、スチフナに作用するねじりモーメント M_{TS2} と②点のねじれ角 ϕ はそれぞれ次式で与えられる。

$$M_{TS2} = -P_2 \frac{t_{s2}}{2}, \quad \phi = \frac{M_{TS2}}{GJ} h_{s2} \quad (6), (7)$$

J はサンブナンのねじり定数($=B_{s2} \cdot t_{s2}^3 / 3$)である。ねじれによる②点の構面外変位 w_{2d} はスチフナ板厚 t_{s2} の1/2に(7)式のねじれ角 ϕ を乗じて次式になる。

$$w_{2d} = \frac{t_{s2}}{2} \phi = -\frac{P_2 t_{s2}^2}{4GJ} h_{s2} \quad (8)$$

(4)、(5)、(8)式より、②点の構面外変位 w_2 は次式で表される。

$$\begin{aligned} w_2 &= w_{2b} + w_{2s} + w_{2d} \\ &= -\left(\frac{h_{s2}^3}{3EI_{s2}} + 1.2 \frac{h_{s2}}{GB_{s2}t_{s2}} + \frac{3h_{s2}}{4GB_{s2}t_{s2}^2} \right) P_2 \\ &= -\frac{1}{Et_{s2}} \left\{ 4 \left(\frac{h_{s2}}{B_{s2}} \right)^3 + 3.9(1+\nu) \left(\frac{h_{s2}}{B_{s2}} \right) \right\} P_2 \quad (9) \end{aligned}$$

④点に関しても同様に構面外変位が求められる。

ここで図6に、(9)式で表されるスチフナの構面外変形 w_2 に占める曲げ変形 w_{2b} 、せん断変形 w_{2s} 、ねじれ変形 w_{2d} の比率を例示する。横軸はスチフナのせん断スパン比 h_{s2}/B_{s2} である。図6より、スチフナのせん断スパン比の減少に伴って、せん断変形とねじれ変形の割合が大きくなるのがわかる。

つぎに、③点には外力が作用しないので $P_3=0$ と考えることで③点の自由度を縮約する。以上より(3)式の②～④点の自由度を①点の自由度だけに縮約することができ、荷重 P_1 と変位 w_1 の関係が(10)式で求められる。

$$P_1 = ({}_G K_{11} + {}_G K_{12} \lambda_2 + {}_G K_{13} \lambda_3 + {}_G K_{14} \lambda_4) w_1 \quad (10)$$

ただし(10)式中の $\lambda_2 \sim \lambda_4$ は以下の式を満たす。

$$\lambda_2 = w_2 / w_1, \quad \lambda_3 = w_3 / w_1, \quad \lambda_4 = w_4 / w_1 \quad (11)$$

(10)式中の ${}_G K_{ij}$ は(3)式中の剛性マトリクス K_G の*i*行*j*列の成分を表す。

図7に、(10)式の括弧内の値に占める各項の割合

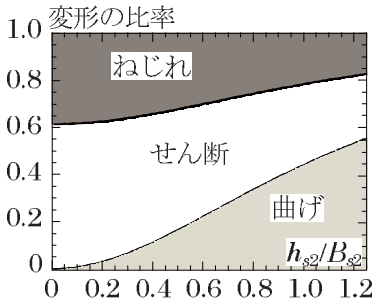


図6 スチフナの変形の比率

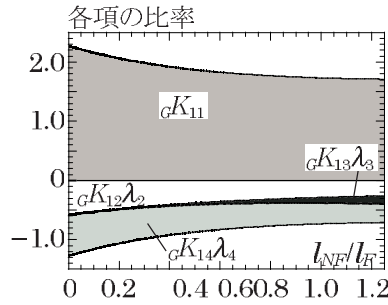


図7 l_{NF}/l_F と各項の比率

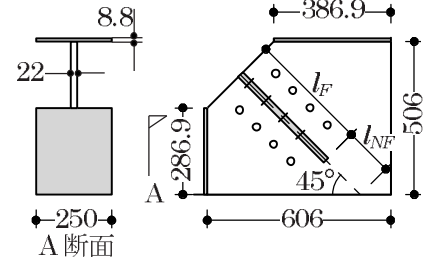


図8 検討対象接合部 (単位: mm)

と l_{NF}/l_F の関係を示す. l_{NF} は図8に示すようにガセットプレートがフィンスチフナで補剛されていない領域の長さを表し, l_F はフィンスチフナの長さを表す. 対象とした接合部は図8に示すもので, ブレース取付角度が 45° でブレース耐力が 2200kN の柱梁接合部側の接合部であり, 添板の板厚は 19mm とした. 一般に, 本研究で対象とする図1の詳細を有する接合部の場合, l_{NF}/l_F の値は最大でも 1.0 程度であり, 図7より, $G K_{13} \lambda_3$ の値は(10)式の括弧内の値に比べて小さく, 無視しても差し支えないと考えられる.

以上より P_1 と w_1 の比をガセットプレートの構面外剛性 K_G と定義し, (10)式括弧内の第3項を省くと, 柱梁接合部側では(12)式でガセットプレートの構面外剛性 K_G を求めることができる.

$$K_G = {}_G K_{11} + {}_G K_{12} \lambda_2 + {}_G K_{14} \lambda_4 \quad (12)$$

同様の検討を K ブレース交点側に対しても行くと, K ブレース交点側のガセットプレートの構面外剛性は(13)式となる.

$$K_G = {}_G K_{11} + {}_G K_{12} \lambda_2 \quad (13)$$

(4) 構面外剛性の導出

(12), (13)式は図3の①点に構面外荷重 P_1 が作用したときの剛性であるが, 実際には接合部と座屈拘束部の境界(図9のA点)に荷重が作用する. これは, 文献5)で述べられているように, ブレース芯材の塑性化に伴い芯材の応力点が降伏曲面の特異点に位置すると, 芯材端部(座屈拘束部と接合部の境界)では曲げモーメントがゼロのまま回転角の増加が可能となり, この断面を曲げ剛性がゼロのヒンジとみなすことができることによる.

図9のA点に構面外荷重 P_H が作用した場合の接合部全体の構面外曲げ剛性を求めるため, 剛棒と回転バネから成るモデルを構築する. 図10(b)は文献6)で提案したモデルであり, B点(図3の③点)にのみ回転バネを設けている. 一方で, 図10(a)は本研究で提案するモデルであり, B点だけでなくC点(ブレースの材軸延長線と梁フランジの表面(または柱

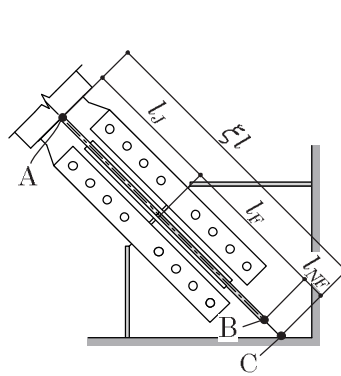


図9 接合部詳細

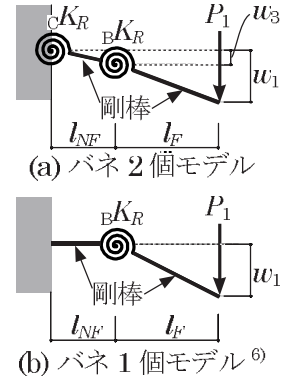


図10 ガセットプレートのモデル化

の表面)の交点)にも回転バネを設けている. これは, サイドスチフナの板厚がガセットプレートの板厚を下まわる場合や, 図9中の l_{NF} (フィンスチフナで補剛されていない領域) が長い場合に, B点の構面外変位 w_3 が無視できないケースが想定されるためである.

図9におけるB点の回転バネ剛性を ${}_B K_R$, C点の回転バネ剛性を ${}_C K_R$ とし, ガセットプレート先端(図3の①点)に P_1 が作用したとき, 図10(a)のモデルの w_1 と w_3 が, (12), (13)式で求めた w_1 と w_3 と一致するように, 次式で ${}_B K_R$, ${}_C K_R$ を定める.

$${}_B K_R = l_F^2 \cdot l_{NF} K_G / \left\{ (1 - \lambda_3) l_{NF} - \lambda_3 l_F \right\} \quad (14)$$

$${}_C K_R = (l_F + l_{NF}) l_{NF} K_G / \lambda_3 \quad (15)$$

(14), (15)式と図9中の寸法を用いて, 構面外荷重 P_H が作用した場合の w_1 を求めることで, 図10(a)のバネ2個モデルの構面外剛性 $K_t (= P_H/w_1)$ は(16)式で求められる.

$$K_t = \left\{ l_F (l_F + l_j) / {}_B K_R + \xi l (l_F + l_{NF}) / {}_C K_R \right\}^{-1} \quad (16)$$

一方, 図10(b)に示すように, C点を固定とし, B点の回転バネのみを考えるバネ1個モデルの場合, 文献6)より K_t は(17)式で与えられる.

$$K_t = {}_B K_R l_F (l_F + l_j) \quad (17)$$

ただし、(17)式中の ${}_B K_R$ には(12)または(13)式の K_G を代入する。

2.3 有限要素法解析

2.2節で示した構面外剛性の算定法の妥当性を確認するため、柱梁接合部側接合部を対象としたFEM解析によるパラメトリックスタディを行い、解析結果と算定結果を比較する。

(1) 解析パラメータと接合部の詳細

解析パラメータは表1に示すようにブレース耐力(設計用最大軸力) N_{max} 、梁せいと柱径の比 D_b/D_c 、ブレース設置角度 ϕ 、サイドスチフナ板厚とガセットプレート板厚の比 t_s/t_g 、サイドスチフナ幅と梁フランジ幅の比 B_s/B_b 、サイドスチフナ高さ h_s とガセットプレート頂部までの高さの比 h_g/h_g である(各寸法は図11を参照)。また表1には、各ブレース耐力に応じた柱径 D_c 、梁フランジ幅 B_b の値も示している。

これらのパラメータのうち、 D_b/D_c に関しては、 N_{max} が1100kN、3300kN、4400kNの場合は1.5のみ、2200kNの時は1.0と1.5の2通りを検討する。ブレースの設置角度 ϕ に関しては、 N_{max} が2200kNの場合は30°、45°、60°の3通りに対して解析を行い、その他の N_{max} については45°のみを検討する。 t_s/t_g 、 B_s/B_b 、 h_s/h_g については、 N_{max} によらず、表1に示すすべての組合せについて解析する。

ガセットプレート接合部の寸法については、ブレース耐力 N_{max} に適合するように別途定められた、十字形ブレース接合部と添板の寸法等に基づいて決定している。その際、フィンスチフナ端部から梁フェイスか柱フェイスのどちらか近い方までの距離を50mmとする。また、ガセットプレートの斜辺の長さは十字形ブレース接合部の幅に片側25mmずつを加えた長さとする。十字形ブレース接合部母材とガセットプレートとの間には10mmの隙間を設けている。

(2) 解析モデルと解析条件

FEM解析には非線形有限要素法解析プログラムAbaqus(ver.6.14)を用いる。解析モデルはソリッド要素で構成し、図11のうちガセットプレート接合部(ガセットプレート、フィンスチフナ、サイドスチフナ)と十字形ブレース接合部、これらを接合する添板をモデル化する。添板とガセットプレート・フィンスチフナ・十字形ブレース接合部との接触面(高力ボルト摩擦接合部)ならびにガセットプレートと各スチフナの境界(溶接部)はいずれも剛結合とする。要素の分割は、板面内に10mm四方とし、

板厚方向に3等分している。境界条件はガセットプレート接合部と柱フェイス・梁フェイスの境界において全要素の自由度を固定している。柱と梁は剛体として扱う。

弾性域の材料特性はヤング係数 $E=205000\text{N/mm}^2$ とポアソン比 $\nu=0.3$ を用いる。塑性域の材料特性には、図12に示すように二次勾配をヤング係数の0.01倍とし、三次勾配をゼロとするトリリニア型の応力-ひずみ関係を与えている。材料強度は、 490N/mm^2 級鋼材を想定して、降伏応力・引張応力ともに規格下限値の1.1倍の値とする。降伏条件にはMisesの降伏条件を、硬化則には等方硬化則を採用する。

载荷については、ブレース接合部と座屈拘束部の境界に、構面外方向の強制変位を単調に与える。

以上のように作成したFEM解析モデルの概要を図13に示す。なお作成した解析モデルの妥当性に関しては、文献6)の実験結果と比較して概ね良い対応を示すことを確認している(付録参照)。

(3) 算定結果と解析結果の比較

まず、2.2節で示した構面外剛性算定法で、文献6)から修正を加えた、スチフナとガセットプレート間

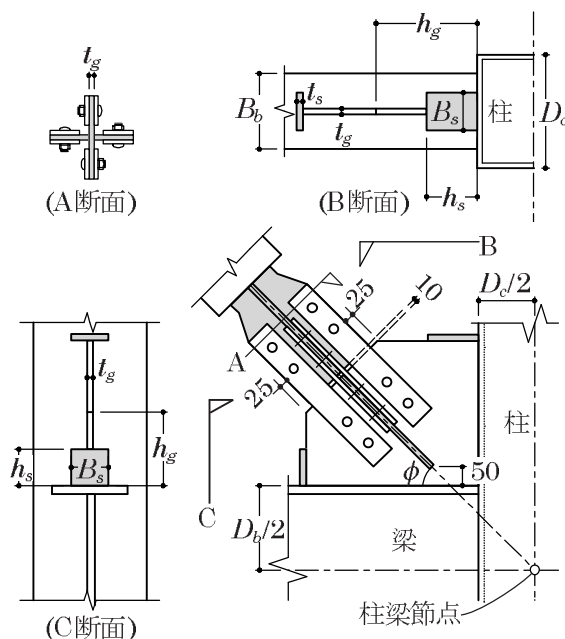


図11 接合部の寸法 (単位: mm)

表1 解析パラメータ

N_{max} (kN)	D_b/D_c	$\phi(^{\circ})$	D_c (mm)	B_b (mm)	t_s/t_g	B_s/B_b	h_s/h_g
1100	1.5	45	300	200	0.4 0.6 0.8 1.0	0.5 1.0	0.5 1.0
2200	1.0	30	400	250			
	1.5	45					
3300	1.5	45	500	300			
4400	1.5	45	600	350			

の境界条件および図 10 のモデルにおける回転バネ個数の差異による影響を確認する。図 14 の縦軸は (16) 式または (17) 式による算定結果を FEM 解析結果で除した値であり、横軸はサイドスチフナ板厚とガセットプレート板厚の比 t_s/t_g である。図 14 は、 $N_{max}=2200\text{kN}$ 、 $D_b/D_c=1.5$ 、 $\phi=45^\circ$ の場合に限定して示している。(16)、(17) 式による算定では、スチフナの曲げ変形、せん断変形、ねじれ変形をすべて考慮している。

図 14(a) は、ガセットプレートとスチフナ間の境界条件を単純支持として、図 10(a) のバネ 2 個モデル ((16) 式) と図 10(b) のバネ 1 個モデル ((17) 式) とで、構面外曲げ剛性の算定精度を比較したものである。図 14(a) より回転バネの個数による算定精度の差異は小さいことがわかる。また、図 14(b) は、図 10(b) のバネ 1 個モデルを用いて、スチフナとガセットプレート間の境界条件が単純支持の場合と固定端支持の場合で、算定精度を比較したものである。図 14(b) より境界条件の違いによる算定精度の差は見られない。これらの傾向は図 14 に示していない他のパラメータでも同様であった。以上より、接合部の構面外曲げ剛性を求める際には、算定式が簡単な (17) 式を用いれば良いといえる。

図 15 に $B_s/B_b=1.0$ の全解析結果と (17) 式の算定結果の比較を示す。縦軸は (17) 式による算定結果で、横軸は FEM 解析結果である。図中に斜めに引かれた黒実線は解析結果と算定結果が合致することを表しており、点線は黒実線に対して $\pm 20\%$ と $\pm 40\%$

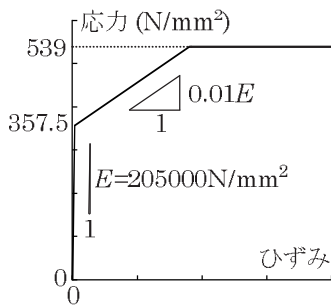


図 12 応力 - ひずみ関係

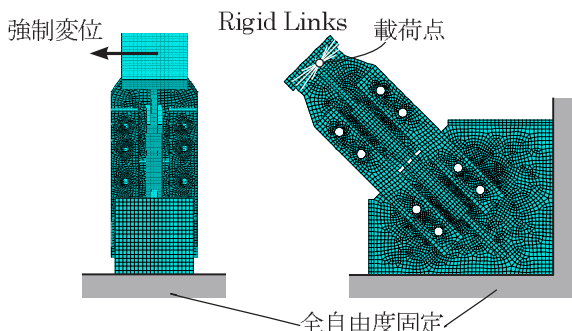


図 13 FEM 解析モデル概要

の誤差を表している。

$\phi=45^\circ$ の場合では、(17) 式による算定結果が解析結果より若干小さくなる傾向が見られる。特に N_{max} が 3300kN や 4400kN の解析ケースではこの傾向が顕著に現れているが、その差は高々 2 割である。 $\phi=30^\circ$ 、 60° の場合は、特に図 15(a) に示す $h_s/h_g=1.0$ のときに算定結果と解析結果との差が大きく、最大で 3 割程度である。これは図 3(b) のようにガセットプレートを分割した際、 $\phi=30^\circ$ 、 60° の接合部は $\phi=45^\circ$ の接合部と比べて扁平な三角形要素を持ち、RBSM の剛性がやや過大に算定される傾向を有するためである。なお、ここで示していない $B_s/B_b=0.5$ の場合は、 h_s/h_g の値に関わらず図 15(b) と同様の傾向を示していた。

(4) 既往の算定法との比較

本研究と文献 (6) の算定法の差異を確認するため、図 16 に本研究 (17) 式、文献 (6) の略算式、文献 (6) の精算式による構面外曲げ剛性の算定精度を比較する。ここで、文献 (6) の略算式とは、サイドスチフナの変形を無視した算定式で、文献 (6) の精算式と

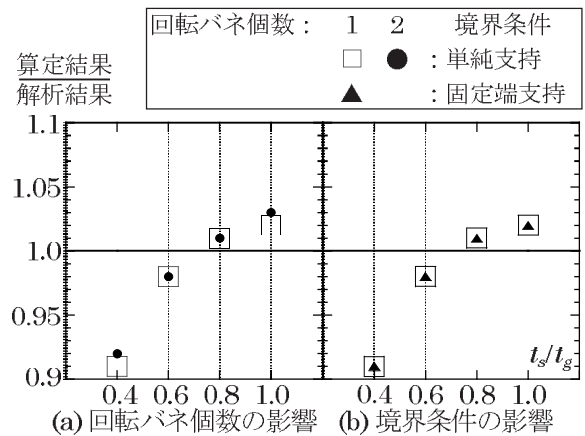


図 14 回転バネ個数と境界条件の影響

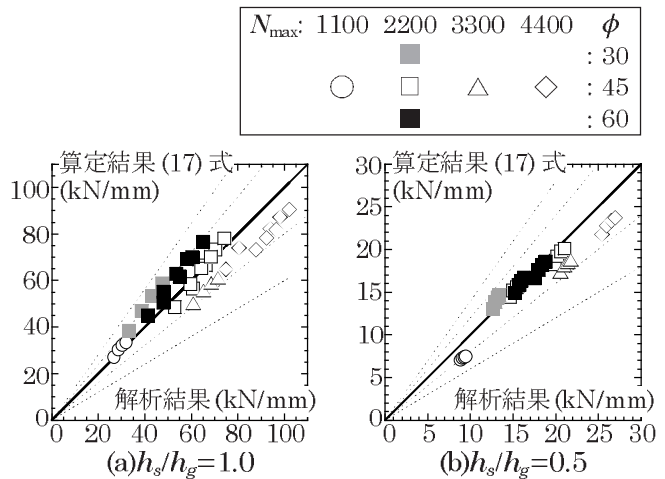


図 15 算定結果と解析結果の比較 ($B_s/B_b=1.0$)

はサイドスチフナの曲げ変形のみを考慮した算定式である。図 16 の縦軸は算定結果を FEM 解析結果で除した値であり、横軸は t_s/t_g である。図の上部にはパラメータである N_{max} と ϕ の値を示す。図 16 では $D_b/D_c=1.5$, $h_s/h_g=1.0$, $B_s/B_b=1.0$ の場合に限定して示している。

図 16 より、 $\phi=45^\circ$ の場合、3 種類の算定法の精度の差異は小さく、特に文献 6) が対象としている $t_s/t_g=1.0$ ($t_s/t_g \geq 1.0$ を含む) の条件下では略算式でも十分な精度を有しているといえる。ただし、 t_s/t_g が小さくなると略算式による算定結果は解析結果を最大で 5 割程度上まわっている。

一方、 $\phi=30^\circ, 60^\circ$ の場合、略算式の精度が極めて低いことがわかる。 $\phi=30^\circ, 60^\circ$ の接合部は $\phi=45^\circ$ の接合部と比べて、片方のサイドスチフナが長く、曲げ変形が無視できないため、略算式では構面外曲げ剛性を十分に評価できないと言える。他のパラメータの組合せでは、スチフナのせん断スパン比 h_s/B_s が大きくなるほど、略算式の精度が低くなる傾向が見られた。略算式の適用範囲については今後の課題と考えている。また、精算式と (17) 式による算定精度の差は小さく、 t_s/t_g によって両者の差はほとんど変わらないが、(17) 式では、サイドスチフナのせん断変形とねじれ変形を考慮しているため、精算式と比べて算定精度が若干向上している。

2.4 まとめ

2 章では、既往の座屈拘束ブレース接合部の構面外剛性算定法⁶⁾の適用範囲の拡大を目的として、文献 6) の算定法に以下の 3 点の修正を加えた。

- サイドスチフナやセンタースチフナの変形として、面内の曲げ変形だけではなく、面内のせん断変形とねじれ変形を考慮したこと。
- 上記のスチフナとガセットプレートとの境界を単純支持とみなしたこと。

- ガセットプレートの構面外剛性の導出にあたって、フィンスチフナ端部の構面外変形を考慮したこと。

その上で、ブレース耐力や設置角度に起因する接合部の寸法をパラメータとした FEM 解析を実施し、提案した算定法の精度を確認した。得られた知見を以下に示す。

- 1) 既往の算定法⁶⁾ (略算式) は、ブレースの設置角度が 45° で、スチフナの板厚がガセットプレートの板厚と同程度以上であれば、十分な精度を有している。一方で、ブレースの設置角度が $30^\circ, 60^\circ$ で、スチフナのせん断スパン比が大きい場合には精度が極めて低くなる。
- 2) 上述した修正点のうち、2 点目と 3 点目が算定精度に与える影響は極めて小さい。したがって、算定法の簡便さから、スチフナとガセットプレートの境界は単純支持とし、フィンスチフナ端部の構面外変形を無視した算定法 ((17) 式) を用いれば良い。
- 3) (17) 式による算定結果は、ブレースの設置角度が 45° の場合は、解析結果との差が 2 割以下である。ブレースの設置角度が $30^\circ, 60^\circ$ の場合には、最大で 3 割程度の差が見られるが、既往の算定法⁶⁾ と比べて精度の向上が図れる。

3. ブレース接合部の構面外挙動確認のための実験計画の立案

3.1 はじめに

2 章で示したブレース接合部の構面外剛性算定法の適用性を確認し、さらに超巨大地震時のブレース接合部の終局状態を把握するために、ブレース接合部だけを取り出した要素試験体に対して載荷実験を行う。同様の実験は文献 6) でも実施しているが、2.1 節で述べたように文献 6) では K ブレース交点側の

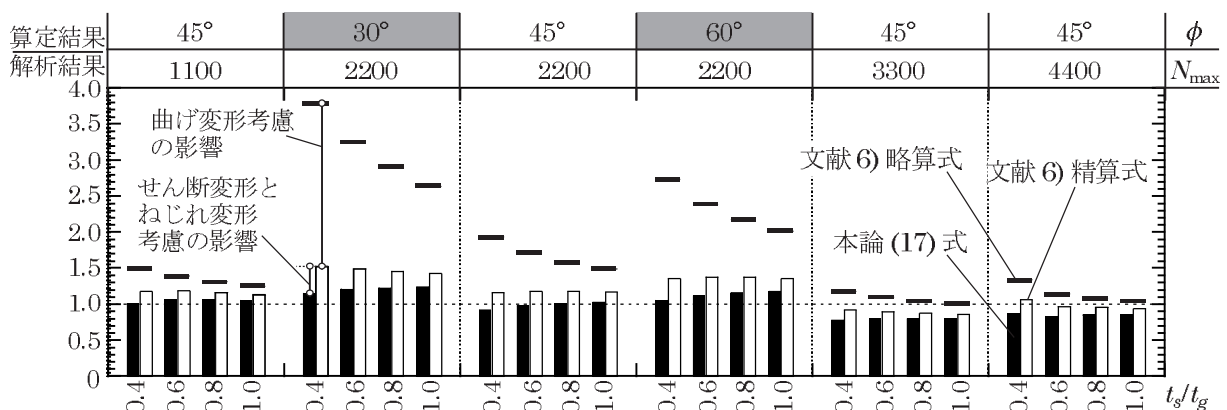


図 16 本研究と文献 6) の算定法の精度検証 ($D_b/D_c=1.5$, $h_s/h_g=1.0$, $B_s/B_b=1.0$)

ガセットプレート接合部に限定していることから、本研究では柱梁接合部側のガセットプレート接合部に対して検討する。

なお本実験は、2019年度に実施予定である座屈拘束ブレースとその接合部、ならびに周辺の柱や梁から成る部分骨組試験体に、水平2方向に極めて大きな変形を与える実験において、接合部の仕様を定めるための予備的な実験に位置づけている。

3.2 実験概要

(1) 試験体・実験パラメータ

試験体は、図17に示すようにブレース材軸を鉛直方向としたもので、十字形ブレース接合部母材・添板・ガセットプレート・サイドスチフナ・フィンスチフナから成る接合部と、それを設置・補強するためのプレートや鋼板で構成される。十字形ブレース接合部母材・ガセットプレート・スチフナの板厚は16mm、添板の板厚は12mmとし、いずれも鋼種はSN490Bとする。

十字形ブレース接合部母材とガセットプレートの間には10mmの隙間を設け、ガセットプレートの斜辺の長さは、十字形ブレース接合部の幅(240mm)に片側25mmを加えた長さとする。フィンスチフナや添板の端部から、梁フランジを模擬したV字プレートの表面までの距離を50mmとしている。高力ボルトはF10T M22とし、実ディテールを参考にして高力ボルトのレイアウトを定めている。

実験パラメータは、ブレースの設置角度(45°・30°)、サイドスチフナの幅(200mm・100mm)・サイドスチフナの長さ(ガセットプレート角部までの長さ h_G の1.0倍・0.5倍)である。これらの組合せから、試験体数は6体とする。

(2) 荷重方法

図18に荷重装置の全景を示す。鉛直油圧ジャッキでブレース接合部に圧縮軸力を作用させ、水平油圧ジャッキによってブレース接合部に構面外曲げモーメントを作用させる。

実験では、高力ボルトの締付けの有無と軸力の大きさとを変更しながら、同一の試験体で複数ケースの弾性荷重を行う。これによって、高力ボルト摩擦接合部のすべり発生前後における構面外剛性の差異や構面外剛性に及ぼす軸力の影響を把握する。

また、高力ボルトを本締めし、圧縮軸力をゼロとする条件下で、大変形領域まで一方向に荷重することで、ブレース接合部の終局状態を確認する。

上述した実験については、2018年12月から実施予定である。

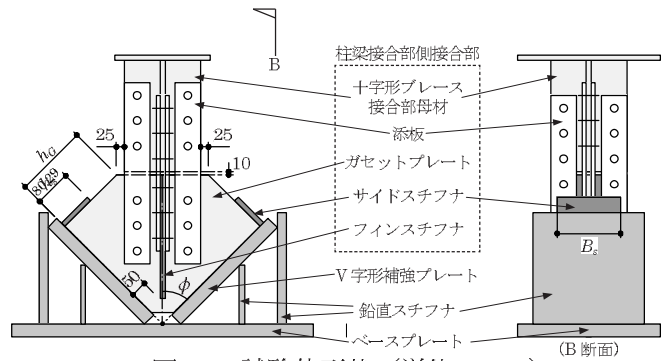


図17 試験体形状 (単位: mm)

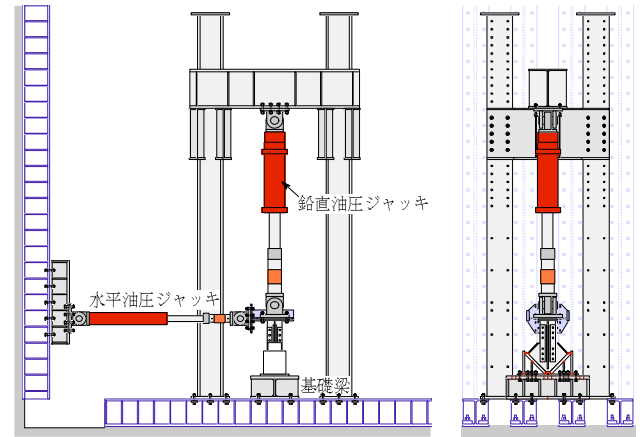


図18 荷重装置

4. 研究の成果と今後の課題

本研究では、座屈拘束ブレースに極めて大きな変形が生ずる場合を想定し、ブレース接合部の構面外剛性算定法を構築し、有限要素法解析によって妥当性を検証した。提案した構面外剛性の算定法は、ブレースの設置角度が45°から外れるに従って解析結果との乖離が見られるが、文献(6)の手法と比べて精度の向上が図れる。また、ブレース接合部の構面外挙動を確認するための実験計画を立案した。

今後は、図19に概要を示す座屈拘束ブレースとその接合部ならびに周辺の柱や梁から成る部分骨組試験体によって、構面内と構面外の2方向に過大な

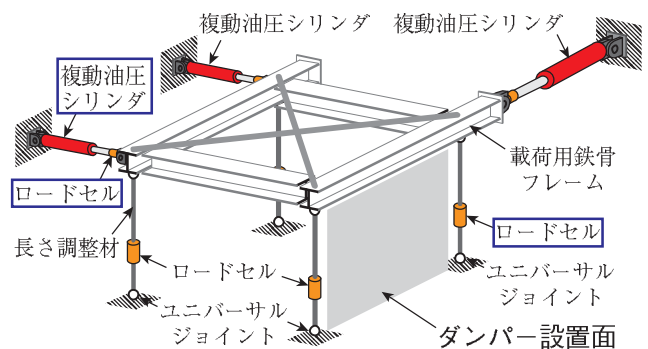


図19 ブレース付部分骨組実験の概要

変形をうける座屈拘束ブレースの挙動の解明に取り組み。なお、図 19 中の枠付き文字で示す装置の一部に、貴財団の助成を充当した。

【謝辞】

本研究は、公益社団法人 大畑財団による助成によって実施されたものである。付記して深甚なる感謝の意を表す。

【参考文献】

- 1) 蘇鐘鈺, 佐藤浩太郎, 川辺秀憲, 吹田啓一郎, 林康裕, 佐藤篤司: 上町断層帯の予測地震動に対する超高層建物の平面骨組モデルによる解析, 日本建築学会技術報告集, 第 16 巻 第 32 号, 2010.2
- 2) 藤本盛久, 和田章, 佐伯英一郎, 渡辺厚, 人見泰義: 鋼管コンクリートにより座屈を拘束したアンボンドブレースに関する研究, 構造工学論文集, Vol.34B, pp.249-258, 1988.3
- 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, 2004.1
- 4) 天昌秀秋, 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
- 5) 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
- 6) 木下智裕, 聲高裕治, 井上一朗, 飯谷邦祐: 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, 日本建築学会構造系論文集, 第 632 号, pp.1865-1873, 2008.10
- 7) 小崎均, 小西克尚, 松井良太, 竹内徹: 片流れ配置された座屈拘束ブレース機構安定条件の要因分析, 日本建築学会構造系論文集, 第 79 巻, 第 706 号, pp.1919-1929, 2014.12
- 8) 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