

高力ボルト摩擦接合部の繰返し载荷実験を反映した履歴モデルによる検討  
(強度のばらつきを考慮した座屈拘束ブレースの接合部耐力要求値 その2)

正会員 ○久米建一<sup>\*1</sup> 同 吹田啓一郎<sup>\*2</sup>

2. 構造 -10 鋼構造

座屈拘束ブレース 接合部係数 高力ボルト接合 支圧

1. 序

制振ダンパーとして用いられている座屈拘束ブレース (Buckling Restrained Brace, 以下 BRB) は一般に高力ボルトによって主体骨組に接合され、接合部は終局時も弾性に留まるように設計される。その際、BRB の実際の降伏軸力は公称値よりも大きい値にばらつき、歪硬化により軸力がさらに上昇することなどを考慮する必要があり、前報<sup>1,2)</sup>で強度の統計データに基づくばらつきを反映した解析モデルによる時刻歴応答解析を行い、所定の確率で接合部の降伏と主体骨組の損傷を抑えるための接合部係数を決定する手法を提案し、その標準的な値を提示した。しかしその解析では、高力ボルト摩擦接合部の履歴特性が十分に明らかではないため、支圧を受けた後の繰返しすべり耐力を無視するなど損傷を受けた接合部の耐力を過小評価しており、接合部係数は大きめの値が示されている。ボルト接合部の履歴特性に関する既往の研究には沼田<sup>3)</sup>、吹田ら<sup>4)</sup>、辻岡<sup>5)</sup>、下條ら<sup>6)</sup>による実験的研究が挙げられるが、すべり後の支圧による変形が大きい領域での繰返しや動的载荷の影響を調べたデータは少ない。本研究では高力ボルト摩擦接合部の繰返し载荷実験を行い、過大な支圧変形も含む変位振幅の大きさの影響、すべり先行と被接合材降伏先

すべり耐力 降伏耐力

の相違などを明らかにし、実験結果を反映した接合部の履歴モデルを作成した。さらにこのモデルを用いて BRB 付制振骨組の地震応答解析を行い、より精度の高い接合部の履歴特性に基づく接合部係数を提示する。

2. 高力ボルト摩擦接合部繰返し载荷試験

2.1 試験体

試験体の形状を図1に示す。鋼材は試験体側中板を SN400B、治具側中板と添板に SS400 用い、トルシヤ形高力ボルト F10T M20 を2本使用し2面摩擦によって接合する。板厚は中板 12mm、添板 9mm としている。摩擦面処理はショットブラスト、赤錆の2種類とした。また、試験体は幅  $w$  を変えることにより鋼材の降伏耐力  $P_y$  の異なる2種類を設定し、すべり耐力  $P_s$  に対して  $P_y$  が3割大きいものをすべり先行タイプの試験体、 $P_s$  に対して  $P_y$  が3割小さいものを鋼材降伏先行タイプの試験体として設計した<sup>7)</sup>。摩擦面処理と降伏形式の組み合わせで4種類の試験体を作成し、それぞれ5とおり計20体の実験を行った。ただし、設計において  $q_{by}$  と  $\sigma_y$  については規格値ではなく文献8~10)の統計値を参考

表1 SN400B 材の機械的性質

板厚 (mm)	降伏点 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強さ (N/mm <sup>2</sup> )	降伏比 (%)	破断伸び (%)
11.8	279	424	65.8	32.1

表2 降伏耐力一覧 (素材試験の結果を用いた計算)

試験体	設定	$w$ (mm)	$P_s$ (kN)	$P_{y1}$ (kN)	$P_{y2}$ (kN)	$P_y$ (kN)	$P_y/P_s$
BS シリーズ	$P_y=1.3P_s$	153	408	507	512	507	1.24
RS シリーズ	$P_y=1.3P_s$	153	443	512	512	512	1.16
BY シリーズ	$P_y=0.7P_s$	83	408	272	278	272	0.667
RY シリーズ	$P_y=0.7P_s$	83	443	278	278	278	0.628

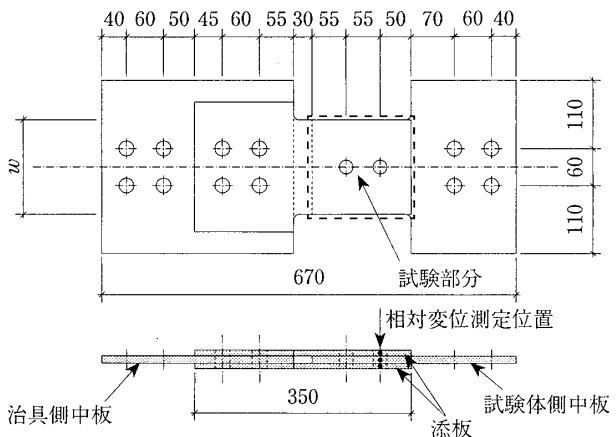


図1 試験体 (単位: mm)

実験名称

RS-SC4 (赤錆, 摩擦面すべり先行-静的繰返し一定振幅 4mm)  
 载荷方法 SO: 静的単調引張, SC: 静的繰返し一定振幅  
 SI: 静的繰返し変動振幅, DC: 動的繰返し一定振幅  
 試験体 B: プラスト, R: 赤錆  
 S: 摩擦面すべり先行, Y: 鋼材降伏先行

Analytical Investigation Based on Hysteresis Characteristic of High Strength Bolt Friction Joint Obtained from Loading Test (Demand of Strength for Connection of Buckling Restrained Braces Considering Variation of Mechanical Properties Part 2)

KUME Kenichi and SUITA Keiichiro

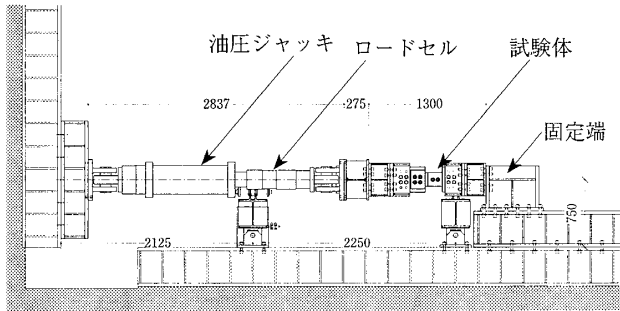


図2 荷重装置セットアップ図 (単位:mm)

にして確実に意図した破壊形式となるように設計している。表1には試験体に用いたSN400B材の素材試験から得られた機械的性質を示す。これらの値を用いて計算した試験体の各耐力を表2にまとめる。 $P_{y1}$ は前面摩擦を考慮したボルト孔欠損部での降伏耐力、 $P_{y2}$ はボルト孔欠損が無い部分の降伏耐力である。

## 2.2 荷重, 計測方法

図2に静的荷重の場合の実験装置の全体と試験体の取付状況を示す。正負交播繰返し荷重は引張を正として変位によって制御する。図1に示す位置において中板と添板の相対変位を測定しこれらの平均値を接合部の変位とする。一部の試験については高力ボルトに貼付した歪ゲージの値を元にボルト張力も測定する。荷重は静的に単調引張, 一定振幅繰返し(4mm, 6mm), 変動振幅繰返しの4とおり, 動的に一定振幅繰返し(4mm)の1と

おりで合計5とおりとする。

## 2.3 実験結果とその考察

### 2.3.1 荷重-変形関係

BSシリーズの静的に繰返し荷重を行った試験体の荷重-変形関係を図3に示す。まず, 初期すべり耐力(図中の▼)において, すべり音が発生し, それに合わせて変位が瞬間的に急増する現象が見られた。どの試験体も初期すべり発生後2サイクルほどは耐力が漸減するが, 3サイクルほどで履歴が安定し, 初期のすべり耐力に対し4割ほどの200kN程度に低下した。履歴が安定した状態は20~30回の繰返しで見られ, そのときのすべり耐力を残存すべり耐力と呼ぶことにする。摩擦面処理が赤錆のRSシリーズでは最初にすべりが発生する際のすべり耐力が大きな値となったが, 履歴挙動や残存すべり耐力に関しては差が見られなかった。鋼材の降伏が先行するBYシリーズの結果を図4に示す。表3における計算通り275kN前後で鋼材が降伏している。降伏後は変位の増大に伴って歪硬化により少しずつ荷重が上昇し, その後310kN前後に達すると接合部にすべりが生じた。このすべり耐力は鋼材に降伏が生じていない場合に比べると7~8割の値である。引張側は鋼材が降伏しているため最大耐力が頭打ちになっている。

また, 動的に行った実験では繰返し荷重し200サイク

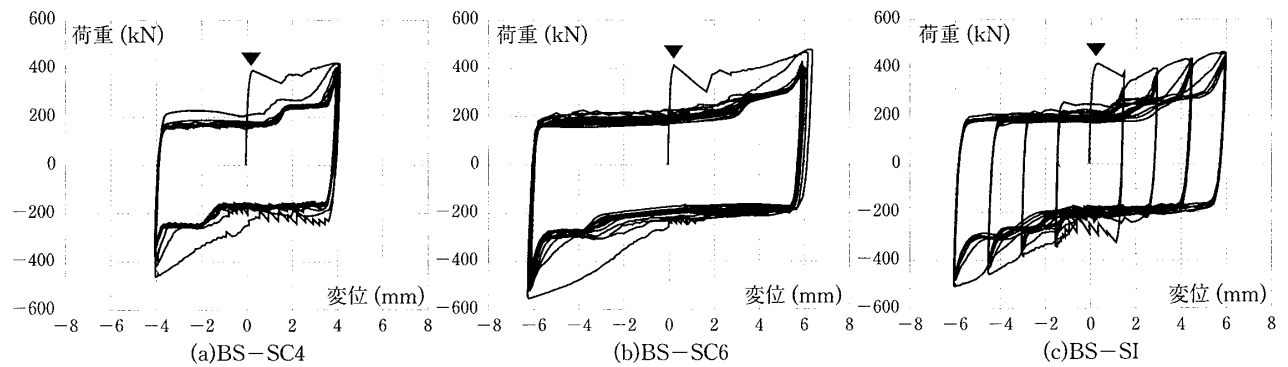


図3 すべり先行型接合部の荷重-変形関係(静的荷重, BSシリーズ)

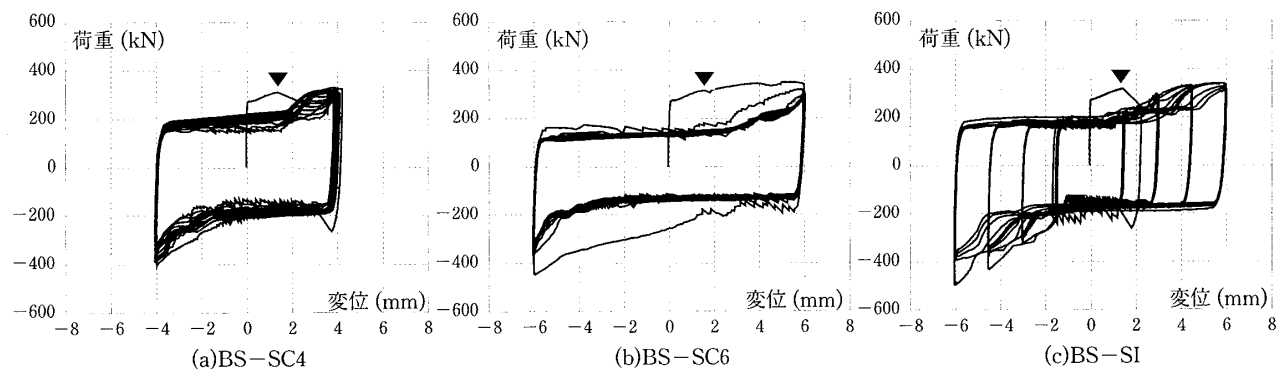


図4 鋼材降伏型接合部の荷重-変形関係(静的荷重, BYシリーズ)

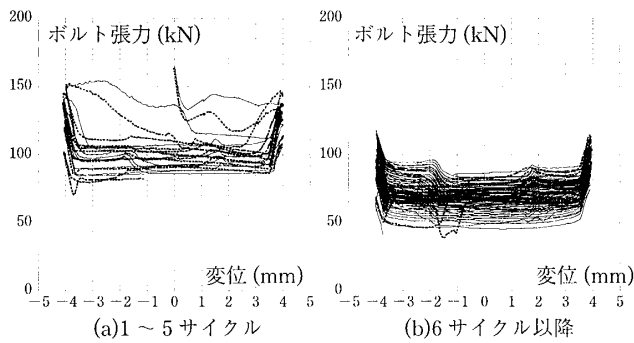


図5 ボルト張力の推移 (RS-DC4)

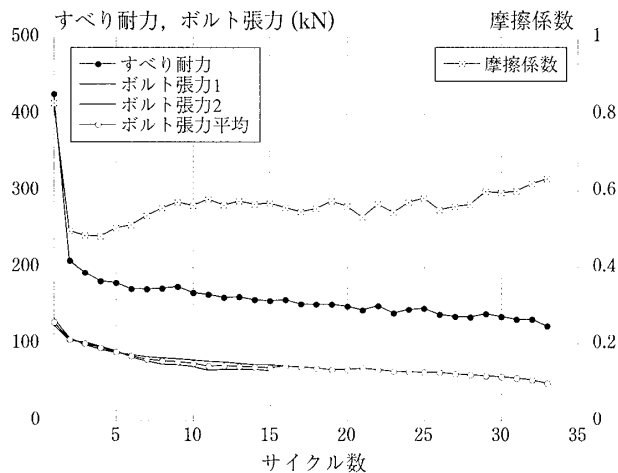


図6 すべり耐力, ボルト張力, 摩擦係数の推移 (RS-DC4)

目に残存すべり耐力はほぼ0となった。RS-DC4の試験体では200サイクル終了後に、再びボルトを締め直して荷重を行うと、すべり耐力は200kN前後まで回復し、更に荷重を繰り返すと再びすべり耐力が減少した。この結果から、繰返しによるすべり耐力の低下はボルト張力が抜けることが主な原因であると考えられる。

### 2.3.2 ボルト張力

RS-DC4のボルト張力を図5に示す。2種類の線種は試験体の2本のボルトを示しており、ゲージが切れるまでのボルト張力を示している。1サイクル目にすべりが生じるとボルト張力が130kN前後まで低下し、支圧

に達していると思われる領域でボルト張力が増大する。その後は安定した挙動で徐々にボルト張力は低下していく。また、変形が2mm付近の位置で少し張力が大きくなっている傾向がある。これは中板と添板にすべりが生じた後、ボルトが座金に接して、支圧状態になったためだと考えられる。図6にすべり耐力、ボルト張力、摩擦係数の変化を示す。1サイクル目はすべりが生じる瞬間の値、2サイクル目以降は接合部の変位が0になる瞬間の値を示している。摩擦係数は2サイクル目に大きく低下したあとは少しずつ増大する傾向にある。

## 3. 座屈拘束ブレース接合部の耐力要求値

### 3.1 高力ボルト摩擦接合部の履歴モデル

実験結果を基に、残存すべり耐力を考慮した「残存耐力考慮モデル」を設定する(図7)。一度すべりが生じたあとは残存すべり耐力が4割に低下するものとしてモデル化する。実験ではその後も少しずつ耐力は低下し続けるが、その速度はかなり遅いため履歴モデルでは考慮していない。また、鋼材の降伏が初期のすべりに先行する場合は、最初にすべりが生じる際の耐力が7割に低下し、その後同様に残存耐力が4割に低下する。一度支圧が生じるとボルト孔が広がるため、過去に経験した変形の最大値まですべりの距離が大きくなるものとする。このモデルは、実験と同様に繰返し荷重時には摩擦によるエネルギー吸収を行う。

### 3.2 座屈拘束ブレース接合部の接合部係数の算定

3.1節で設定した接合部履歴モデルを用いて前報<sup>1, 2)</sup>と同様にして、図8のような1質点系を用いた地震応答解析を行う。BRB接合部の必要耐力に影響を与えるパラメータはBRBの鋼種、降伏レベル、歪硬化係数、接合部の摩擦面処理の4つであった。しかし、これらすべてを考慮して接合部係数を算定するのは煩雑なため、本研究ではBRBの歪硬化係数は3%、接合部の摩擦面

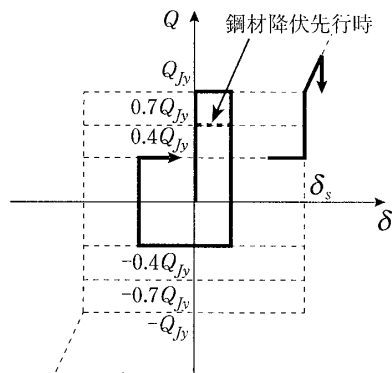


図7 接合部履歴モデル

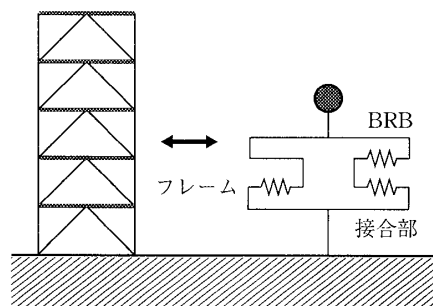


図8 1質点系モデルと多層骨組の関係

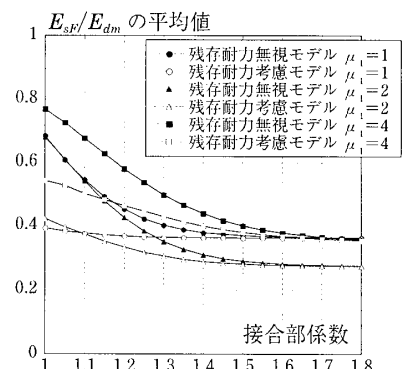


図9 接合部係数とフレームの損傷量の関係

表3 BRB 接合部の接合部係数の算定例

BRB 芯材鋼種	1次設計 塑性率 $\mu_1$	(1) すべり 防止	(2) フレームの損傷抑制	
			残存耐力無視	残存耐力考慮
SN400B	1	1.35	1.35	1.00
	2	1.50	1.45	1.35 *
	4	1.80	1.60	1.50
LY225	1	1.20	1.20	1.00
	2	1.35	1.30	1.20 *
	4	1.65	1.40	1.35

処理はプラストを想定し、接合部に必要な耐力が大きくなる条件で接合部係数を算定する。BRB 芯材鋼種は SN400B と LY225 の 2 種類を想定し、1 次設計レベルでの BRB の塑性率  $\mu_1$  を 1 ~ 4 に変化させて BRB の降伏レベルを設定する。これら 2 つのパラメータを基に接合部係数を変化させた場合のフレームのエネルギー吸収量を図 9 に示す。ただし、BRB は SN400B 材とし、接合部の鋼材は弾性と仮定している。 $E_{sp}$  はフレームに入力したエネルギー、 $E_{dm}$  は構造物の損傷に寄与したエネルギーである。この図は固有周期や BRB の剛性比の異なるモデルによる解析結果を統計的に処理し、1 本の線で表現している。残存耐力無視モデルを用いた場合は、接合部係数が小さくなるほどすべりが発生しやすくなり、フレームの損傷量は増加する。一方、残存耐力を考慮した場合、すべりが生じても接合部のエネルギー吸収が生じるため、フレームの損傷はある程度低下することがわかる。これらの結果を基に接合部係数を算定し、表 5 に示す。接合部係数は (1) すべり発生確率を 15% 以下にする設計と、(2) 接合部が十分強い場合に比べてフレームの損傷の増加量を 1 割以下に抑える設計の 2 つの条件で設定した。 $\mu_1$  が大きいと BRB の歪硬化により大きな接合部係数が求められる。BRB は芯材の断面形状や座屈拘束方法など様々であるが、一般に最大歪を 1.5% 程度として設計することが推奨されている<sup>11)</sup>。これは  $\mu_1=2$  程度に相当し、図 9 においても  $\mu_1=2$  の場合がフレームの損傷が最も少なく制振性能に優れていると言える。また、残存耐力考慮モデルによれば制振性能を確保した上で、接合部係数を小さめに設定すること

表4 接合部係数の推奨値

BRB 芯材鋼種	接合部の降伏形式	
	接合部のすべり	BRB 端部の降伏
SN400B	1.35	1.35
LY225	1.20	1.25

ができる。これらのことから表 3 の \* の値を標準的な接合部係数と考えることができる。

また、接合部のすべりに対して BRB 端部の鋼材の降伏が先行する場合を想定して、図 7 の点線のように初期のすべり耐力が 7 割に低下するモデルでも解析を行った。その結果から BRB 端部の降伏に対する接合部係数を同様の方法で算出した。これらをまとめて BRB 接合部の接合部係数推奨値として表 4 に示す。ただし、ガセットプレートは BRB と異なる鋼材を用いるため、ガセットプレートの降伏に対する接合部係数は鋼種に応じて別に設定する必要がある。

#### 4 結論

高力ボルト接合部に大きな支圧を伴う繰り返し変形が生じた場合の挙動について、摩擦面処理、降伏形式、載荷方法を変えて 20 体の実験を実施した。その結果を基に高力ボルト摩擦接合部の残存耐力考慮モデルを設定し、BRB を含む構造物の地震応答解析に適用し、BRB の接合部の接合部係数を算定した。

#### 参考文献

- 久米建一, 吹田啓一郎, 佐藤篤司: 強度のばらつきを考慮した座屈拘束プレースの接合部耐力の決定法, 日本建築学会近畿支部研究報告集, 第 50 号 (構造系), pp.229-232, 2010.6
- 久米建一, 吹田啓一郎, 佐藤篤司: 強度のばらつきを考慮した座屈拘束プレースの接合部耐力要求値, 日本建築学会構造系論文集, 第 662 号, pp.829-836, 2011.4.
- 沼田明樹: すべり荷重を上回る動的繰り返し荷重を受ける高力ボルト摩擦接合部のボルト軸力低下特性, 日本建築学会論文報告集, 第 324 号, pp.63-72, 1983.2.
- 吹田啓一郎, 金多潔, 甲津功夫, 安富正佳: 高速繰返し荷重下における鋼構造接合部の復元力特性, 日本建築学会構造系論文集, 第 463 号, pp.95-104, 1994.9.
- 辻岡静雄: 過大応力を受ける高力ボルト摩擦接合部の力学挙動, 日本建築学会構造系論文集, 第 518 号, pp.103-109, 1999.4.
- 下條晃, 牧野俊雄, 五十嵐規矩夫, 鈴木敏郎: 繰返し荷重を受ける高力ボルト摩擦接合部のすべり挙動と耐力評価, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.953-954, 2002.8.
- 日本建築学会: 鋼構造接合部設計指針, 第 2 版, 2006.3.
- 日本建築学会・材料施工委員会, 鉄骨工事運営委員会: 建築鉄骨工事の新たな課題への取り組み 鉄骨工事運営委員会調査研究報告会資料集, 2010.5.
- 志村保美, 高田啓一, 作本好文, 塩飽豊明, 藤沢一善: SN 鋼の機械的性質に関する統計調査, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (東海), C-1, 構造 III, pp.535-536, 2003.9.
- 日本建築学会: 鋼構造限界状態設計指針・同解説, 第 3 版, 2010.2.
- 建築研究所監修: 鋼構造建築物へのエネルギー法活用マニュアル, 技報堂出版, 2008.

<sup>1</sup> 京都大学大学院工学研究科建築学専攻 修士課程

Graduate student, Dept. of Architecture and Architectural Engineering, Kyoto Univ.

<sup>2</sup> 京都大学大学院工学研究科建築学専攻 教授・博士 (工学)

Prof., Dept. of Architecture and Architectural Engineering, Kyoto Univ., Dr. Eng.