

高力ボルト摩擦接合部の繰返し載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－

SEISMIC RESPONSE ANALYSIS CONSIDERING HYSTERESIS CHARACTERISTIC OF
HIGH STRENGTH BOLT CONNECTION OBTAINED FROM LOADING TEST－ Demand of strength for connection of buckling-restrained brace
considering variation of mechanical properties Part 2－

久米 建一*, 吹田 啓一郎**

Kenichi KUME and Keiichiro SUITA

Seismic response of the passive controlled structure using buckling-restrained braces (BRB) can be ensured when the BRB connection have sufficient strength. This paper investigates demand of connection strength considering hysteresis characteristics of high-strength bolt connections. Cyclic loading test are conducted to clarify hysteresis characteristics of connection including slip behavior under excessive bearing displacement, and the analytical model of connection is proposed from test results. By using the proposed analytical model, seismic response of steel frames with BRB dampers are numerically analyzed and the strength of BRB bolt connections necessary to secure sufficient energy dissipation and dumping effect is suggested as connection factor.

Keywords : High-Strength Bolt Connection, Slip Strength, Bearing,

Hysteresis Characteristic, Buckling-Restrained Brace, Connection Factor

高力ボルト接合, すべり耐力, 支圧, 履歴特性, 座屈拘束ブレース, 接合部係数

1. はじめに

高層ビルなどに履歴型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, 塑性化に伴うエネルギー吸収により建物の応答を抑制しつつ主体骨組の損傷を軽減することを意図して設けられている. BRB は一般に高力ボルト摩擦接合によって主体骨組に接合され, 接合部のすべりや降伏を避けて終局時も弾性に留まるように設計される. その場合, BRB の実際の降伏軸力は公称値よりも大きい値となり, 歪硬化により軸力がさらに上昇することを考慮する必要がある. BRB の降伏軸力を N_y とすると, 設計時に接合部の降伏耐力 jN_y が満足すべき条件は (1) 式のように定められる.

$$jN_y \geq j\alpha \cdot N_y \quad (1)$$

ここで, $j\alpha$ は接合部係数と呼ばれ, 上述の影響を考慮して定められる値であるが, その適切な値を定める手法が示されていないため, 構造設計の実務では確実な性能確保のために過大な接合部耐力が要求されることがある. したがって, 定量的な性能評価に基づく適正な耐力要求値を提示することは制振構造の設計のために重要な課題である.

筆者らは前報¹⁾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. しかしながらその解析では, 高力ボルト接合部の履歴特性がまだ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ると考えられる. ボルト接合部の履歴特性に関する既往の研究には沼田^{2,3)}, 吹田ら⁴⁾, 辻岡^{5,6)}, 下條ら⁷⁾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載荷の影響を調べたデータは少ない.

そこで, 本研究では高力ボルト摩擦接合部の繰返し載荷実験を行い, やや大き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行の相違, 静的載荷と動的載荷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する. 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がもたらす接合部係数の値を提示することが本論文の目的である.

* 京都大学大学院工学研究科建築学専攻 修士課程

** 京都大学大学院工学研究科建築学専攻 教授・博士(工学)

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

2. 高力ボルト摩擦接合部繰返载荷試験

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に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である。摩擦面処理、降伏形式、载荷方法の異なる20体の実験を行い、これらを表1にまとめる。摩擦面処理はショットブラスト、赤錆の2種類とした。ショットブラストの試験体は黒皮除去程度のブラスト処理を行い、赤錆の試験体は黒皮除去後に赤錆を発生させ、ボルト締付け前に浮き錆を除去した。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。 P_s は(1)式を用いて計算し、 P_y についてはボルト欠損部分の降伏耐力 P_{y1} とボルト欠損の無い部分の降伏耐力 P_{y2} をそれぞれ(2)、(3)式から計算し、小さいほうの値とした⁸⁾。本実験では添板よりも中板の全断面積が小さいため、 P_y の値はすべて中板で決まっている。

$$P_s = n \cdot q_{by} \quad (1)$$

$$P_{y1} = A_n \cdot \sigma_y + n_r \cdot q_{by} / 3 \quad (2)$$

$$P_{y2} = A_g \cdot \sigma_y \quad (3)$$

n : 接合部の高力ボルト本数

n_r : 想定破断面上のボルト本数

q_{by} : 高力ボルト1本当たりのすべり耐力

σ_y : 母材または添板の降伏応力

A_n : ボルト孔欠損を差し引いた母材または添板の正味断面積

A_g : 母材または添板の全断面積

ただし、設計において q_{by} と σ_y については規格下限値ではなく実勢値を用いて、より実際に近い値で計算している。 q_{by} は摩擦面処理がブラスト、赤錆の試験体とも、ブラストのすべり係数の平均値0.560と標準ボルト張力を用いている⁹⁾。SN400B材の σ_y は既往の研究を基にした統計データから平均値である295N/mm²を用いている¹⁰⁾。

表2には試験体に用いたSN400B材の素材試験から得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3にまとめる。ただしここでは摩擦面処理が赤錆の試験体については、赤錆のすべり係数の平均値0.609を用いて計算している¹¹⁾。試験体に用いた鋼材の降伏点が平均値の295N/mm²よりも若干小さかったため、 P_y/P_s の値が設計時に設定した1.3(すべり先行の試験体)や0.7(鋼材降伏先行の試験体)よりも小さくなっているが、それでも降伏形式は想定どおりになると考えられる。

2.2 载荷, 計測方法

静的な载荷には1500kN油圧ジャッキを用い、動的な载荷には500kNアクチュエーターを用いる。図2に静的载荷の場合の実験装置の全体と試験体の取付状況を、写真1に载荷状況を示す。ロードセルと試験片の間に取り付けけた治具の構面外変位を拘束し、材軸方向にだけ変形するように設置されている。引張を正とし、接合部変位の制御により正負交播繰返し载荷した。図1の試験体の試験部分の右側のボルトの中心位置において中板と添板に取り付けけたスタッドボルトを用いて4カ所に高感度変位計を設置し、接合部の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。

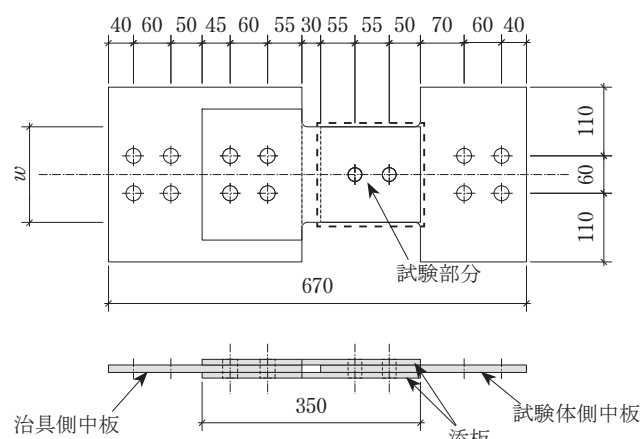


図1 試験体

単位: mm

表1 実験一覧

実験名称	降伏形式	摩擦面処理	載荷方法	載荷速度	変位
BS-SO	摩擦面	ブラスト	単調引張	静的	
BS-SC4			正負繰返		片側 4mm
BS-SC6				片側 6mm	
BS-SI				変動	
BS-DC4		動的	片側 4mm		
RS-SO	すべり先行	赤錆	単調引張	静的	
RS-SC4			正負繰返		片側 4mm
RS-SC6				片側 6mm	
RS-SI				変動	
RS-DC4			動的	片側 4mm	
BY-SO	鋼材	ブラスト	単調引張	静的	
BY-SC4			正負繰返		片側 4mm
BY-SC6				片側 6mm	
BY-SI				変動	
BY-DC4			動的	片側 4mm	
RY-SO		赤錆	単調引張	静的	
RY-SC4			正負繰返		片側 4mm
RY-SC6				片側 6mm	
RY-SI				変動	
RY-DC4			動的	片側 4mm	

実験名称

RS-SC4 (赤錆, 摩擦面すべり先行-静的繰返一定振幅 4mm)

载荷方法 SO: 単調引張, SC: 静的繰返一定振幅

SI: 静的繰返変動振幅, DC: 動的繰返一定振幅

B: ブラスト, R: 赤錆

S: 摩擦面すべり先行, Y: 鋼材降伏先行

表2 試験体 (SN400B 材) の機械的性質

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

(JIS Z2201 1A 号試験片による)

表3 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

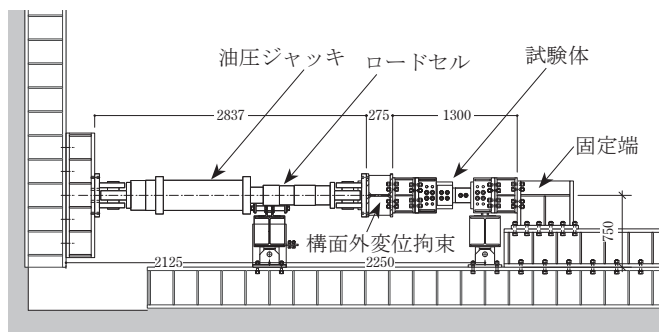


図2 荷重装置セットアップ 単位: mm



写真1 荷重装置に試験体を取り付けた状況

BS-SC4, BS-DC4, RS-SC4, RS-DC4の4体の実験については高力ボルトに貼付した歪ゲージの値を基にボルト張力も測定した。

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(4mm)の4種類、動的に一定振幅繰返し(4mm)の合計5種類の方法で行った。静的一定振幅で荷重する実験は正負に15サイクルの荷重を行った。振幅4mm, 6mmはボルトの両側に1mmずつのクリアランスがあるとした場合、すべりによる変位が2mmとなるため、この値の2倍、3倍の変位である。静的変動振幅による荷重では片振幅1.5, 3.0, 4.5, 6.0mmの順に5サイクルずつ繰返し、合計20サイクルの繰返し荷重とした。静的な荷重については1サイクル約300秒の速度で行う。また、動的に荷重する場合は片振幅4mmで200サイクルの繰返し荷重を行う。このときは、まず挙動が安定するまでは1サイクル100秒程度で準静的に荷重し、10サイクルほど繰返して挙動が安定してから速度を少しずつ上げ、最終的には1サイクル10秒で荷重した。

2.3 実験結果とその考察

2.3.1 静的荷重結果

まず、4種類の試験体の単調引張の実験結果を図3に示す。すべり耐力が大きく、大きな変形まで変形しているのがすべり先行の試験体である。これらはすべりが生じたあとと支圧状態で20mm以上の変形が生じた時点で最大耐力となり、最終的にはしぬけ破断で終局状態となった。一方、降伏が先行する試験体はすべり耐力が小さく、支圧状態で5mm程度の変形が生じたあとと耐力が低下し、有効断面での破断に至った。次に、摩擦面をブラストとするBSシリーズの静的に繰返し荷重を行った実験の荷重-変形関係を図4に示す。まず、初期すべり発生時(図中の▼)にすべり音が発生し、それに合

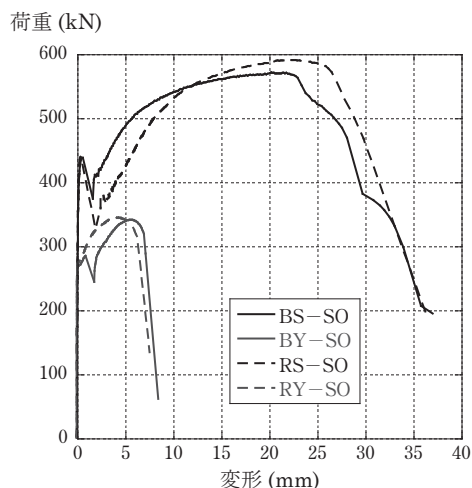


図3 単調荷重 荷重-変形関係

わせて瞬間的に変位が急増する現象が見られた。どの実験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程度にすべり耐力が低下した。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は変動が少ない。本論文の以降では、履歴が安定した後のすべり耐力を残存すべり耐力と呼ぶ。この残存すべり耐力は片振幅4, 6mm、変動振幅の場合について比べると、3サイクル目での差はほとんどないが、支圧の距離が大きいBS-SC6の実験では15サイクル目には150kN程度まですべり耐力が低下している。これは大きな支圧変形を受けるとボルト張力が抜けやすくなるため、すべり耐力が低下しやすいことが理由として考えられる。BS-SIにおいては振幅を大きくした最初のサイクル(1, 6, 11, 16サイクル目)は支圧時に荷重が大きくなっているのが確認できるが、一度大きな支圧変形を受けた後はボルト孔が広がっているため荷重の増加は起こりにくく、すべり距離が大きくなっていることがわかる。

図5には摩擦面を赤錆とするRSシリーズでの結果を示す。ブラストの場合と比べるといずれも最初のすべり耐力がやや大きな値となった。しかし、履歴挙動や残存すべり耐力に関しては図4, 5を比較するとわかるように差が見られなかった。

鋼材の降伏が先行する試験体について実験結果を示す。摩擦面の違いによる差は見られなかったため、BYシリーズのみの荷重-変形関係を図6に示す。まず、最初に表3における計算どおり275kN前後で鋼材に降伏が生じている。降伏が生じた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、図6の3つの実験では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。鋼材が降伏しているため、引張時の最大荷重は圧縮時より小さく頭打ちとなっている。

2.3.2 動的荷重結果

動的に荷重した実験の例として、BS-DC4の荷重-変形関係を図7に示す。3つの図は1つの実験をサイクルごとに3つに分けて示している。2サイクル目で初期のすべり耐力の半分ほどになり、50サイクルほどで4分の1程度まで低下した。200サイクル目には残存すべり耐力はほぼ0となった。初期のサイクルではすべりが生じる

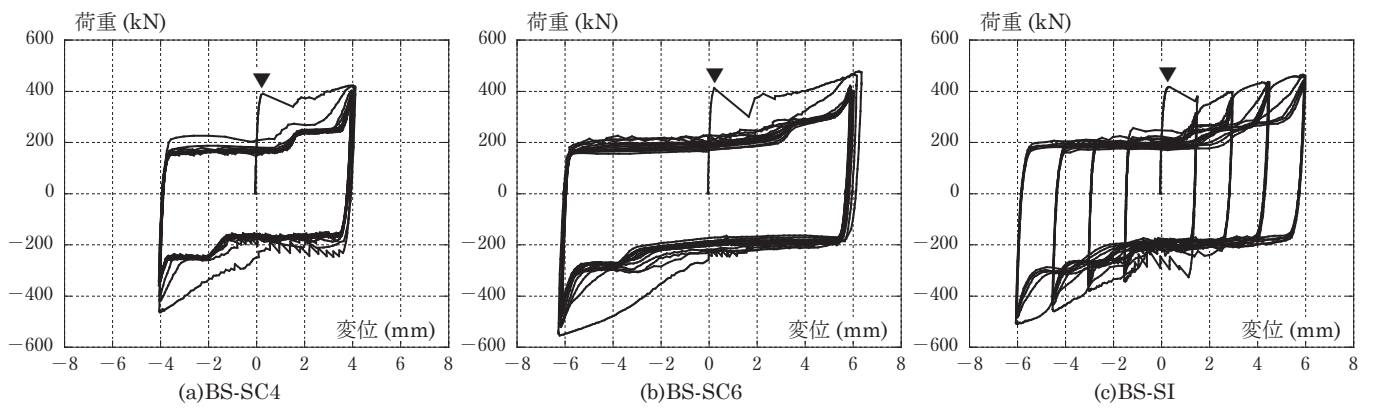


図4 接合部荷重-変形関係（静的載荷，BS シリーズ）

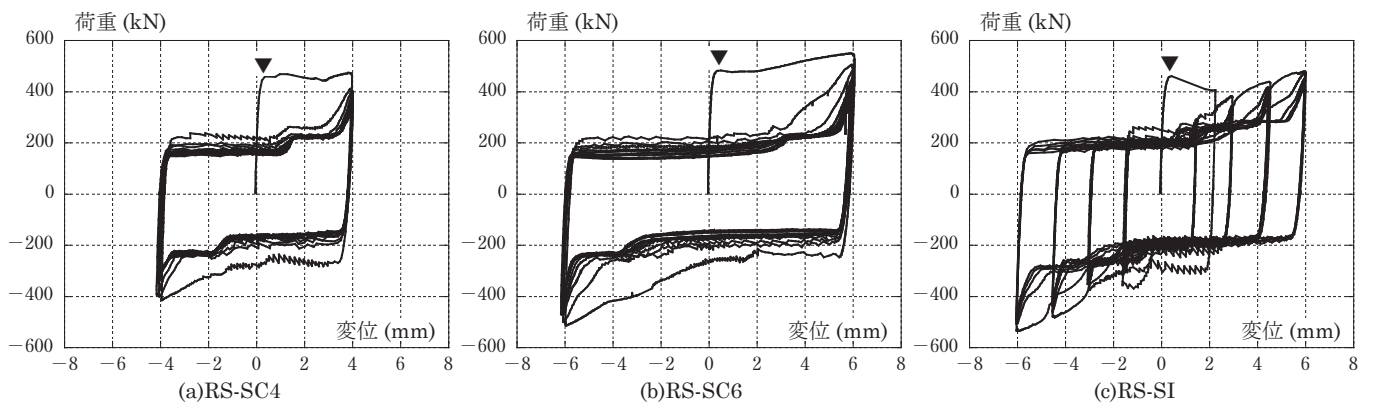


図5 接合部荷重-変形関係（静的載荷，RS シリーズ）

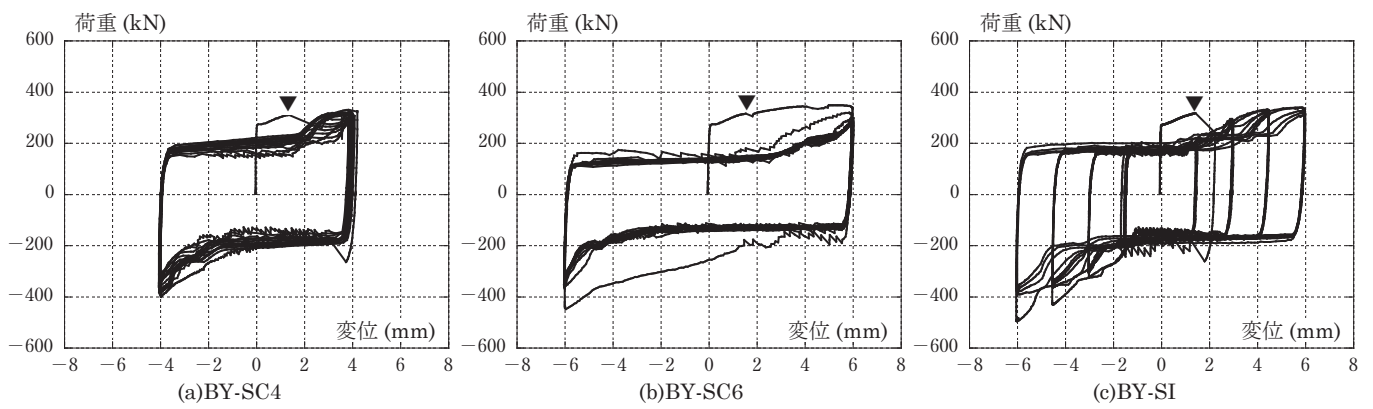


図6 接合部荷重-変形関係（静的載荷，BY シリーズ）

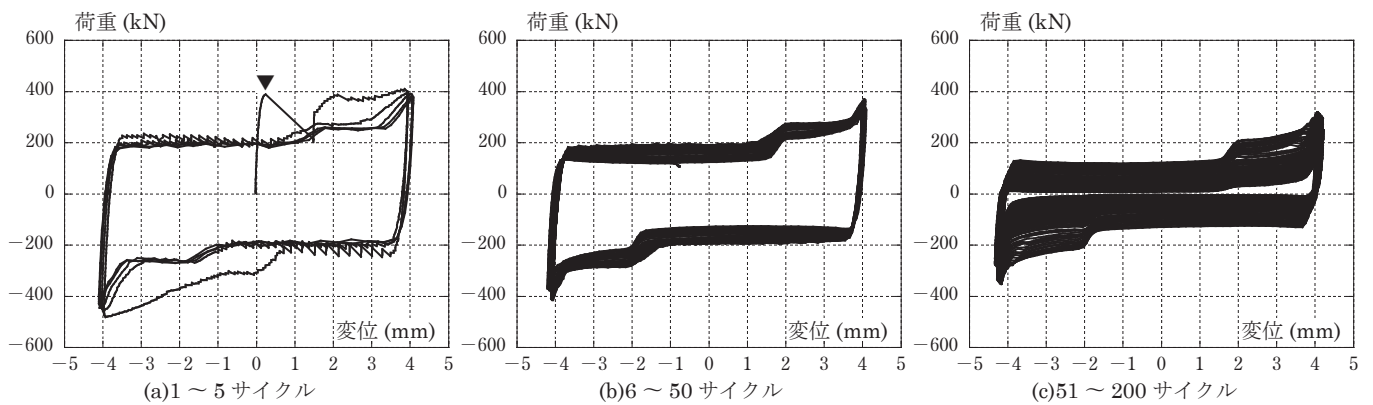


図7 接合部荷重-変形関係（BS-DC4）

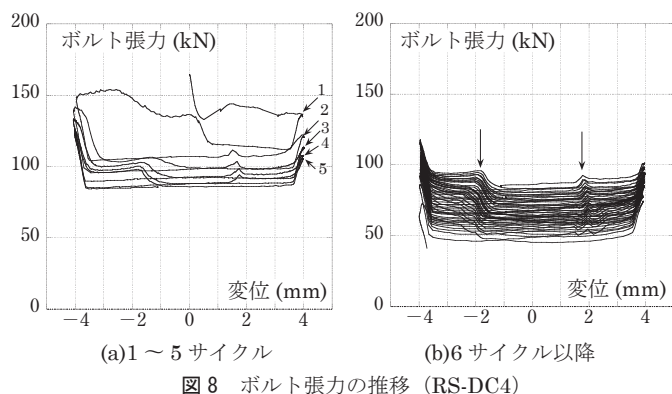


図8 ボルト張力の推移 (RS-DC4)

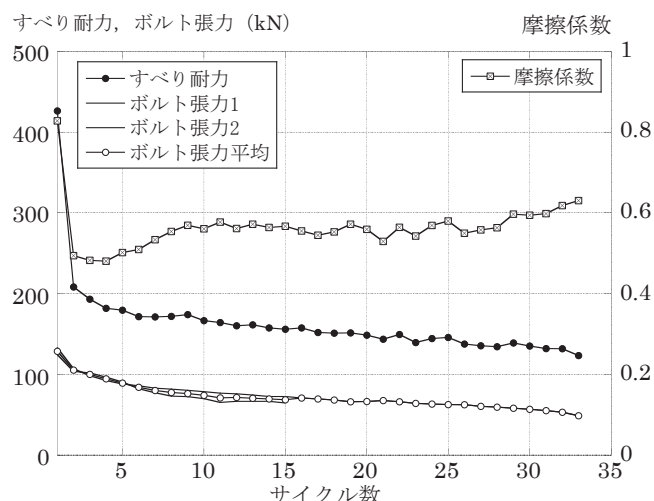


図9 すべり耐力、ボルト張力、摩擦係数の推移 (RS-DC4)

たびに大きな音が発生したが、100サイクルを超えたあたりからはすべり音もかなり小さくなった。また、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载荷を行った。ただし、このときトルシア形ボルトのピンテールはすでに切っており、ボルト張力を測定するゲージも切れていたため、正確なボルト張力は計測できていない。そのためボルトは一次締めの後、さらにそこからナットが60度程回転するように締め付けた。この結果、すべり耐力は200kN前後まで回復し、さらに载荷を繰り返すと再びすべり耐力が減少した。この結果から、繰返し履歴によりすべり耐力が低下するのはボルト張力が抜けることがおこな原因であると考えられる。

次に、最も長い間ボルト張力を測定できたRS-DC4の試験体の結果を図8に示す。これは試験体の2本のボルトのうち長く測定できたボルト張力を歪ゲージが切れるまで示している。まず図8(a)の1サイクル目の最初にすべりが生じるとボルト張力が130kN前後まで低下する。その後、1サイクル目では支圧に達していると見られる領域でボルト張力が増大する。2サイクル目以後は、安定した挙動で徐々にボルト張力は低下しており、図8(b)の6サイクル目以降も低下の度合いは緩やかになるものの徐々にボルト張力は低下している。また、変位が2mm付近の位置（図中に↓で示す）で5kN程度張力が大きくなる現象が見られる。これは中板と添板にすべりが生じた後、ボルト軸部が座金に接し、支圧状態のようにになっているためだと考えられる。接合部の荷重-変形関係においても2mm付近で若干荷重が上昇しているのはこのためだと想定される。また、他の1本

表4 結果一覧

実験名称	P_{s1}	すべり係数	すべり係数 平均値	P_{s3}	P_{s3}/P_{s1}	最大荷重 (kN)	
	kN			kN		引張	圧縮
RS-SO	440	0.667	0.682			590	
RS-SC4	456	0.697		191	0.419	470	-419
RS-SC6	471	0.714		200	0.425	546	-517
RS-SI	457	0.692		198	0.433	475	-537
RS-DC4	426	0.645		193	0.453	439	-497
BS-SO	437	0.662	0.616			571	
BS-SC4	387	0.586		176	0.455	419	-467
BS-SC6	409	0.620		223	0.545	474	-557
BS-SI	413	0.626		219	0.530	461	-512
BS-DC4	386	0.585		192	0.497	406	-485
RY-SO			0.558			344	
RY-SC4	374	0.567		158	0.422	344	-462
RY-SC6	315	0.477				341	
RY-SI	452	0.685		212	0.469	342	-546
RY-DC4	333	0.505		155	0.465	333	-492
BY-SO	284	0.430	0.465			341	
BY-SC4	308	0.467		148	0.481	322	-404
BY-SC6	312	0.473		122	0.391	346	-451
BY-SI	314	0.476		153	0.487	335	-500
BY-DC4	315	0.477		169	0.537	343	-368

のボルトについても同様の挙動が得られている。

図9はRS-DC4ですべり耐力、ボルト張力、摩擦係数がどのように変化したかを示している。本論文での摩擦係数はある瞬間のすべり耐力をそのときのボルト張力で除した値として定義している。2本のボルトのゲージが共に切れてしまった33サイクル目までの推移である。ただし15サイクル目で1本のボルトのゲージが切れてしまったため16サイクル目から33サイクル目までのボルト張力の平均値は残ったもう1本の値である。これらの値は1サイクル目はすべりが生じる瞬間の値を示し、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。この推移を見ると、ボルト張力は小さくなっていくのに対し、摩擦係数に関しては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。

2.3.4 実験まとめ

表4に全実験の結果の一覧を示す。ただしここでのすべり耐力は、明瞭な変位の増大やすべり音が発生した際の荷重である。1サイクル目の最初にすべりが発生した時のすべり耐力を P_{s1} 、履歴が安定し始める3サイクル目の最初の変位が0の状態でのすべり耐力を P_{s3} としている。1サイクル目の引張側で明瞭なすべりが見られず、圧縮側ではっきりとすべりが生じた場合は圧縮側での値を用いている。RY-SOについては鋼材降伏後に明瞭なすべりを確認できないまま破断に達したため、ここにはすべり耐力を掲載していない。また、RY-SC6は1サイクル目の圧縮载荷時に座屈が生じてしまったため、 P_{s3} の値を掲載していない。すべり係数の値はすべり耐力 P_{s1} と設計ボルト張力から算出した値である。すべりが先行するRS,BSシリーズでは過去の統計値（赤錆0.609、ブラスト処理0.560）よりも0.07程度大きな値となっている。一方、降伏が先行すると引張時にはかなりすべり耐力が低下することがわかる。また、残存すべり耐力は初期のすべり耐力の4～5割程度となり、すべり先行の場合と同じ程度の値である。

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モデル化

実験結果を基に高力ボルト摩擦接合部の繰返し荷重時の履歴挙動をモデル化する。残存耐力考慮モデルを図10に示す。一度すべりが生じると残存すべり耐力が4割に低下する。実験ではその後も繰返し載荷するとすべり耐力が少しずつ低下したが、低下の速度は遅いため、ここでは4割のすべり耐力を維持するものとした。また、すべりよりも接合部の鋼材が先に降伏した場合には、初期のすべり耐力が7割に低下するものとしている。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、実際と同じように繰返し載荷時に接合部が摩擦によってエネルギー吸収を行う現象も再現できる。なお、設計によっては接合部のガセットプレート等の面外変形や座屈¹²⁾、あるいは柱、梁の局部変形が生じることもあるが、ここではこれらの影響を考えずにBRB材軸方向の挙動だけを考えている。

3.2 座屈拘束ブレース接合部の接合部係数の算定

3.1節で設定した高力ボルト摩擦接合部の履歴モデルを用いて、前報¹⁾と同様に図11のような1質点系の地震応答解析を行いBRB接合部の必要耐力を検討する。図12は設計時の復元力特性、図13はこの接合部モデルを用いて解析を行った場合の1質点系全体の履歴挙動の一例である。これは固有周期 $T=1.2$ 秒、剛性比 $k=0.7$ での結

Q : 層せん断力	δ : 水平変形
Q_{Fy} : フレーム降伏時の耐力	δ_{Fy} : フレーム降伏時の水平変位
Q_{Dy} : BRB降伏時の耐力	δ_{Dy} : BRB降伏時の水平変位
Q_{Jy} : 接合部すべり時の耐力	δ_{I_1} : 1次レベルの水平変位
Q_1 : 1次設計レベルの耐力	δ_s : 接合部のすべりによる水平変位
Q_2 : 2次設計レベルの耐力	

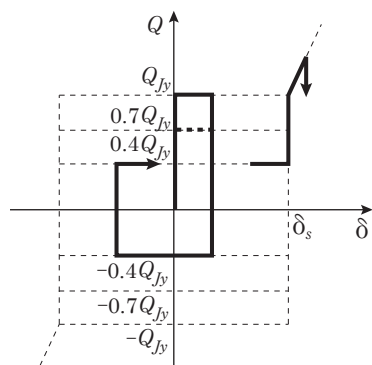


図10 残存耐力考慮モデル

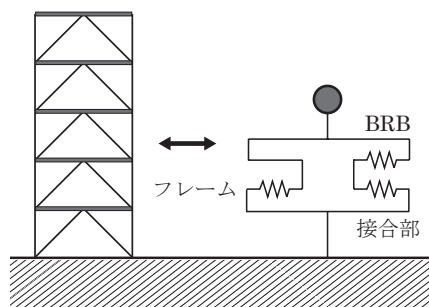


図11 1質点系モデルと多層骨組の関係

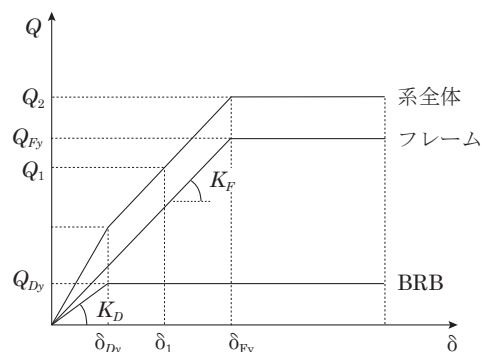


図12 フレーム、BRBの $Q-\delta$ 関係

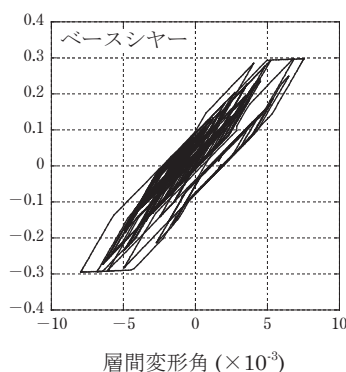
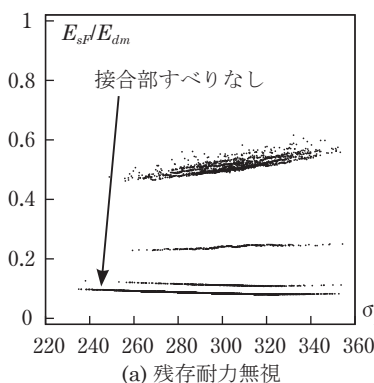


図13 地震応答解析の結果例



(a) 残存耐力無視

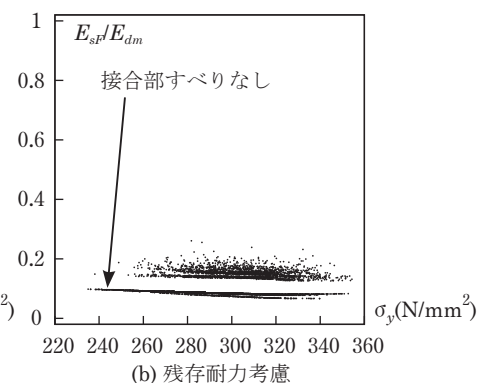


図14 フレームの損傷量のばらつき

果である。さらにBRBの降伏応力や接合部のすべり耐力のばらつきを考慮して解析を行った場合のフレームの損傷量を図14に示し、残存耐力を考慮しない前報と3.1節の接合部モデルでの結果を比較する。 σ_y はBRBの降伏応力、 E_{sF} はフレームが吸収したエネルギー、 E_{dm} は損傷に寄与したエネルギーである。残存耐力を考慮すると、接合部にすべりが生じた場合も接合部がエネルギー吸収を行うため、フレームの損傷はかなり小さくなる。

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つであることを前報で示している。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ので一般的に適用される条件の中で接合部係数に大きい値が必要となる条件としてBRBの歪硬化係数は3%、接合部の摩擦面処理はプラストを設定して接合部係数を算定する。BRB芯材鋼種はSN400BとLY225の2種類とし、1次設計レベルでのBRBの塑性率 μ_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15に示す。この図は固有周期やBRBの剛性比の異なるモデルで行った解析の結果を統計的に処理し、平均値に標準偏差を加えた値を1本の線で表している。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にエネルギー吸収を期待できるため、フレームの損傷はある程度抑えることが可能である。

これらの結果を基に接合部係数を算定し、表5に示す。接合部係数はすべり発生確率を15%以下にする設計(設計I)と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(設計II)の2通りの算定を行っている。 μ_1 を大きく設定すると、

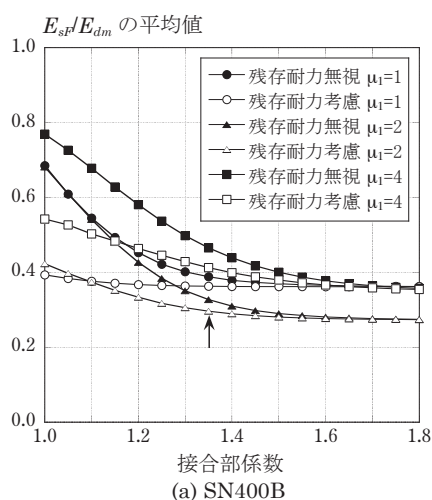
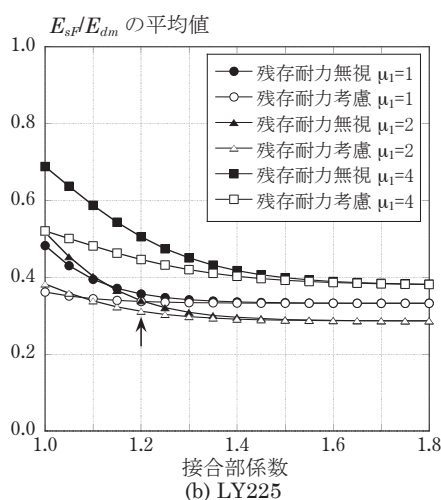


図 15 接合部係数とフレームの損傷量の関係



(b) LY225

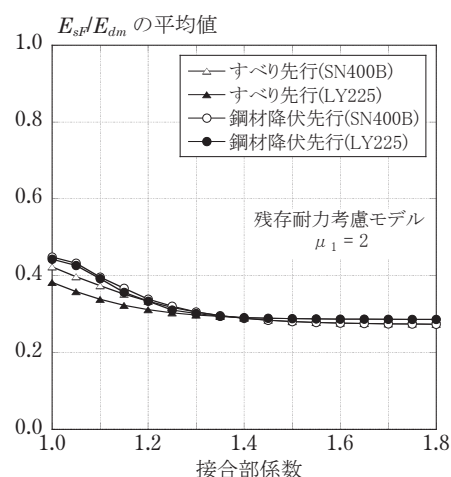


図 16 鋼材降伏先行とすべり先行の比較

表 5 BRB 接合部の接合部係数の算定例

BRB 芯材鋼種	1 次設計レベル BRB 塑性率 μ_1	設計 I すべりを 防ぐ設計	設計 II フレームの損傷を抑える設計	
			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

(摩擦面処理ブラスト, BRB 歪硬化係数 3%, 入力地震動 BCJ-L2)

表 6 接合部係数の推奨値

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

BRB の歪硬化による応力上昇が大きくなり、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が異なる様々なものが開発されているが、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¹³⁾。この値は $\mu_1=2$ 程度に相当し、図 15 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見ることができる。また、残存耐力考慮モデルを用いると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ができる。これらのことから設計 II による表 5 の * を付した値 (図 15 に ↑ で示す値) が標準的な接合部係数として推奨できる。ただし、この接合部係数は残存すべり耐力が 4 割程度となる場合の値であり、本論文での実験条件 (中板 12mm, 添板 9mm, 高力ボルト 2-F10TM22 の 2 面摩擦接合) に基づく履歴モデルを用いた解析から導いた値である。例えばボルト軸径に対して板厚が極端に薄い場合などは残存すべり耐力が 4 割に満たないことも想定されるため、そのような場合には個別の検討が必要と考えられる。

同様にして接合部の BRB 端部の鋼材の降伏が先行する場合についても解析を行い、すべりが先行する場合と比較して図 16 に示す。図には $\mu_1=2$ のときを示しており、BRB 端部の降伏が先行する場合についてもすべりが先行する場合と同様に、残存すべり耐力が 4 割

に低下するものと設定している。接合部係数が小さいと BRB 端部の鋼材の塑性化によりフレームの損傷が若干増加するが大きな差はない。この結果から接合部係数の推奨値をまとめて表 6 に示す。ただし、ガセットプレートの鋼材の降伏に対する接合部係数はガセットプレートの鋼種に応じて決定する必要がある。また、本論文では BRB 端部が塑性化して面外曲げ剛性が低下することにより接合部を含む BRB の曲げ座屈耐力が低下する場合の構造性能への影響については検討していないので、これが問題となる場合は確認が必要である。

4. 結論

BRB の接合部の履歴挙動を明らかにするために、高力ボルト接合部に大きな支圧を伴う繰返し変形が生じた場合について、摩擦面処理、降伏形式、载荷方法を変えて 20 体の実験を実施した。得られた知見を以下にまとめる。

- (1) 接合部の繰返し载荷時は、最初の 2 サイクルほどの間は荷重-変形関係の履歴が安定しないが、3 サイクル以降は各サイクルの履歴にほとんど差が無くなり安定した挙動となる。
 - (2) 3 サイクル以降の残存すべり耐力は初期のすべり耐力の 4 ~ 5 割程度を維持することが多く、その後はごくわずかなずつすべり耐力が減少する。これはボルト張力の低下が原因である。
 - (3) 摩擦面処理がブラストの場合と赤錆の場合では初期のすべり耐力は若干異なるが、一度すべりが生じたあとの残存すべり耐力には摩擦面処理の影響はほとんど見られず、繰返し载荷時もほぼ同じ履歴を描く。
 - (4) 鋼材の降伏が先行すると、引張時に板厚が薄くなりすべり耐力が想定よりも小さな値となる。また、繰返し時の残存すべり耐力も鋼材が降伏していない場合に比べやや小さくなる。
- これらの実験結果に基づいて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た。そこから得られた知見を以下にまとめる。
- (5) 接合部の残存すべり耐力を考慮すると、接合部がエネルギー吸収を行いフレームの損傷量は減少する。そのため、接合部係数を小さく抑えることが可能である。
 - (6) 一般的な BRB の設計に対する接合部係数の推奨値を示した。

参考文献

- 1) 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ブ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 76 巻，第 662 号，pp.829-836，2011.4.
- 2) 沼田明樹：すべり荷重を上回る動的繰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.
- 3) 沼田明樹：すべり荷重を上回る動的繰返し荷重を受ける高力ボルト摩擦接合部の摩擦係数変動特性，日本建築学会論文報告集，第 341 号，pp.37-45，1984.7.
- 4) 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.
- 5) 辻岡静雄：ショットプラスト摩擦面を有する高力ボルト接合のすべり荷重と履歴特性，日本建築学会構造系論文集，第 471 号，pp.173-179，1995.5.
- 6) 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.
- 7) 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（北陸）C-1 構造Ⅲ，pp.953-954，2002.8.
- 8) 日本建築学会：鋼構造接合部設計指針，第 2 版，2006.3.
- 9) 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.
- 10) 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.
- 11) 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.
- 12) 聲高裕治，木下智裕：座屈拘束ブレースの構面外座屈防止設計法，日本建築学会構造系論文集，第 74 巻，第 641 号，pp.1371-1378，2009.7.
- 13) 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.

（2011年3月27日原稿受理，2011年6月14日採用決定）