

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の決定法 その2)

座屈拘束ブレース 高力ボルト接合 すべり耐力
支圧 地震応答解析 接合部係数

正会員 ○ 久米建一
同 吹田啓一郎

1. 序

座屈拘束ブレース (Buckling-Restrained Braces, 以下 BRB) などの制振部材の接合部にすべりや支圧変形が生じると、期待する制振性能を発揮できない場合がある。著者らは BRB を含む多層骨組を 1 質点系にモデル化し地震応答解析を行うことで、BRB が十分にエネルギー吸収を行えるような接合部耐力を評価している¹⁾。ただしそこで用いた接合部の履歴モデルは、ボルトが一度支圧に達したあとはすべり耐力が 0 になるものとして接合部がエネルギー吸収をしない場合を想定しており、実際の接合部に近い履歴モデルは用いていない。そこで、高力ボルト摩擦接合部繰返し載荷試験を行い、接合部の履歴挙動について考察する。この結果を基に設定した高力ボルト摩擦接合部の履歴モデルを作成し、BRB を含む構造物の地震応答解析に適用することで制振性能を発揮するための接合部係数を算定する。

2. 高力ボルト摩擦接合部繰返し載荷試験

2.1 試験体、載荷方法

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 を用い、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 を 2 種類に設定し、摩擦面処理をブラストと仮定して計算したすべり耐力 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²⁾。設計では規格値ではなく、統計値を用いることで確実に意図した破壊形式になるように設計している。これら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 体、計 20 体の実験を行った。表 1 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 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。また、すべり耐力 P_s はブラスト、赤錆のすべり係数の統計データ平均値 0.560 と 0.609 を用いて再計算した値である。

この試験体を正負交播繰返し載荷実験した。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歪ゲージによりボルト張力も測定する。載荷は静的に単調引張、一定振幅繰返し (4mm, 6mm)、変動振幅繰返しの 4 通り、動的に一定振幅繰返し (4mm) の 1 通りで合計 5 通りとする。静的変動振幅の実験については片振幅 1.5, 3.0, 4.5, 6.0mm の各変位をそれぞれ 5 サイクルずつ漸増で繰返し載荷する。

2.3 実験結果とその考察

BS シリーズの静的に繰返し載荷を行った試験体の荷重-変形関係を図 2 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、瞬間的に変位が急増した。すべり発生後 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。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。摩擦面処理が赤錆の場合 (RS) は最初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場合 (BY) の結果を図 3 に示す。表 2 の P_y に近い 275kN 前後で鋼材に降伏が生じ、その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、310kN 前後に達すると接合

表 1 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

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_{sr} (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

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)

載荷方法 SO: 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: ブラスト, R: 赤錆

S: 摩擦面すべり先行, Y: 鋼材降伏先行

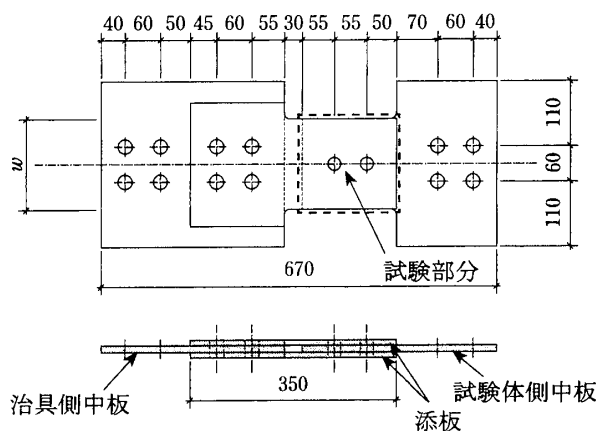


図 1 試験体

単位: mm

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

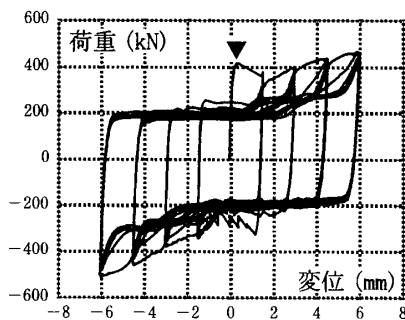


図2 接合部荷重-変形関係 (BS-SI)

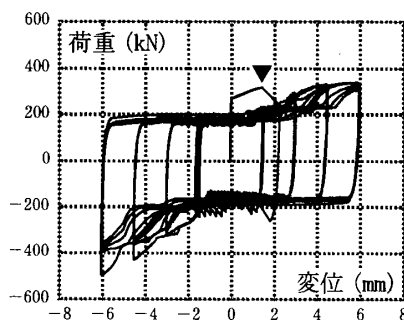


図3 接合部荷重-変形関係 (BY-SI)

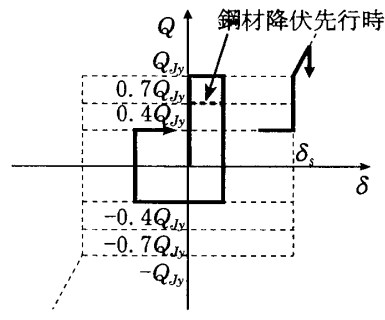


図4 接合部履歴モデル

部にすべりが生じた。このすべり耐力は鋼材が降伏しない場合の7～8割の値である。また、鋼材の降伏のため引張時の最大荷重は圧縮時より小さく、頭打ちとなる。

また、動的載荷実験では繰返し数200サイクル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サイクル終了後にボルトを締め直して再び載荷すると、すべり耐力は200kN前後まで回復し、さらに載荷を繰り返すとまたすべり耐力が減少した。この結果から、繰返し載荷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。また、ボルト張力とすべり耐力から算出した摩擦係数は最初のすべり発生で大きく低下した後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解析への実験結果の適用

3.1 高力ボルト摩擦接合部のモデル化

残存すべり耐力を考慮した接合部の履歴モデルを図4に示す。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。また、鋼材の降伏が初期のすべりに先行した場合は、すべり耐力が7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の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の接合部の摩擦によるエネルギー吸収を再現している。

3.2 座屈拘束ブレース接合部の接合部係数の算定

文献1)の1質点系BRB付骨組モデルに図4の履歴モデルを適用した解析を行う。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つである。本研究ではBRBの歪硬化係数は3%、接合部の摩擦面処理はブラストを想定し、接合部に耐力が必要となる条件で接合部係数を導く。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 μ_1 を1～4に変化させてBRBの降伏レベルを設定する。これらの条件と接合部履歴モデルから導いた接合部係数を表3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の2通りの条件で導いた。 μ_1 を大きく設定すると、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必要となる。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おり³⁾、これは $\mu_1=2$ 程度に相当する。また、残存耐力考慮モデルを用いると同じ制振性能を確保

表3 BRB接合部の接合部係数の算定例

BRB 芯材鋼種	1次設計レベル BRB 塑性率 μ_1	すべりを 防ぐ設計	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

するのに、小さめの接合部係数を設定することができる。これらのことから表3の*の値が標準的な接合部係数と考えられる。

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4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導いた接合部係数推奨値を表4に示す。ただし、BRBと異なる鋼材を用いたガセットプレートの降伏に対する接合部係数は、その鋼種に応じて設定する必要がある。

4 結論

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

高力ボルト接合部にやや大きな支圧を伴う繰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接合部の接合部係数を導いた。

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の決定法、日本建築学会大会学術講演梗概集(北陸)、pp981-982, 2010.9.
- 2) 日本建築学会：鋼構造接合部設計指針、第2版、2006.3.
- 3) 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.

* 京都大学大学院建築学専攻・修士課程

** 京都大学大学院建築学専攻・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