

1. 序論

制振構造では、主体骨組にエネルギー吸収を目的とした座屈拘束ブレース (Buckling-Restrained Braces, 以下BRB) などの制振部材を取り付けて地震時の応答低減を図っている。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るが、接合部にすべりや降伏が生じると、期待する制振性能を発揮できない場合があるため、接合部の破断防止を目的とする耐震ブレースの接合部設計方法¹⁾をそのままBRB接合部に用いることはできない。BRBの制振性能に関する設計資料は種々刊行されているが、接合部に必要な耐力を定量的に決定する方法は示されていない。本研究ではBRBの制振効果を確保するための接合部耐力の必要値の決定法を提案する。接合部必要降伏耐力 ${}_bN_y$ は接合部係数 ${}_b\alpha$ を用いて(1)式で定義する。

$${}_bN_y \geq {}_b\alpha \cdot N_y \quad (1)$$

N_y はBRBの降伏軸力を表す。本研究ではBRBと接合部の実際の耐力が変動することを鋼材、接合部の実データに基づいて統計的に考慮し、地震応答解析を行う。また、BRBの耐力、フレームとの剛性比や歪硬化係数などの構造物のパラメータを変えることで、接合部係数を決定する際にどの因子が大きく影響するかを分析する。その結果から、制振効果を十分に発揮できるBRB接合部の接合部係数 ${}_b\alpha$ の決定法を検討する。

2. 解析方法

2.1 1質点系モデルの設定

接合部係数を決定するには様々な影響因子が想定できるが、本研究ではこれらの条件を明確にするため、BRB付骨組を図1のような1質点系にモデル化して、地震応答解析を行う。フレーム、BRBは全ての層で同一の挙動をするものとして扱う。構造物は固有周期 T 、剛性比 $k(=K_D/K_F)$ 、 K_D :BRBの剛性、 K_F :フレームの剛性)の異なる

9モデルを設計する。 T は0.6, 1.2, 1.8(s)の3通り、 k は0.4, 0.7, 1.0の3通りと設定した。フレーム、BRBの復元力特性は図2のようにバイリニアとし、系全体ではトリリニアとする。解析時にはフレーム、BRBの歪硬化係数 K_F 、 K_D を考慮する。構造物は1次設計レベルのせん断力でBRBが塑性率 μ_1 となり、2次設計レベルのせん断力でフレームが塑性化するように設計する。

2.2 高力ボルト摩擦接合部のモデル化

高力ボルト摩擦接合部はすべり耐力 Q_{Jy} に達するまでは剛とし、すべりが生じた後は支圧状態になり一定の剛性を保つものと仮定してモデル化する。接合部のボルト孔はボルト軸径に対して両側1mmのクリアランスがあると仮定し、ボルト接合部1カ所につき2mmのすべりが生じるものとし、これから1質点系全体の接合部のすべり距離 δ_s を設定した。接合部の荷重-変形関係を図3に示す。また、一度支圧状態になったあとはボルト張力が抜けてすべり耐力が0になると仮定する。すなわち、図3の破線の挙動を示し、支圧変形に伴ってすべり量も増加すると設定する。これは支圧到達後にエネルギー吸収が無く最も制振性能に悪影響を及ぼす場合を想定している。以降ではこの履歴モデルを残存耐力無視モデルと呼ぶ。

2.3 鋼材と接合部の強度統計値と解析上の設定

本解析では構造設計時のBRBの降伏耐力 Q_{Dy} 、高力ボルト接合部のすべり耐力 Q_{Jy} に対してばらつきを与え、地震応答解析を繰り返し行うことで統計的に分析する。ただし、フレームの降伏耐力 Q_{Fy} は規格下限値で一定であるものとし、ばらつきは設定していない。

Q : 層せん断力	Q_{Fy} : フレーム降伏時の耐力
δ : 水平変位	Q_{Dy} : BRB降伏時の耐力
Q_1 : 1次設計レベルの耐力	δ_{Fy} : フレーム降伏時の水平変位
Q_2 : 2次設計レベルの耐力	δ_{Dy} : BRB降伏時の水平変位

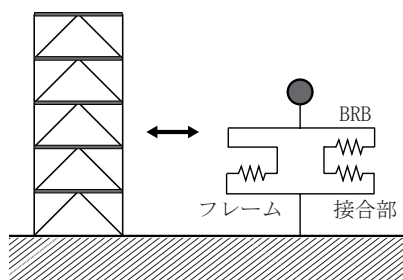


図1 1質点系モデルと多層骨組の関係

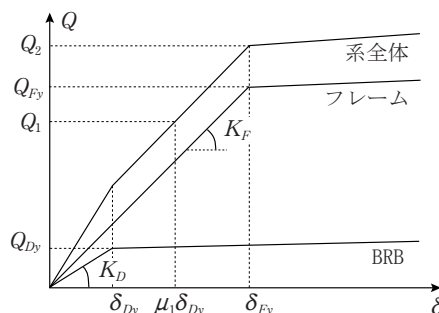


図2 1質点系のQ-δ関係の設定

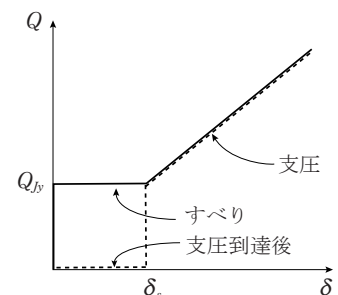


図3 接合部の復元力特性

表1 BRB 芯材の降伏応力の統計値

鋼種	設計値 (N/mm ²)	規格下限値 (N/mm ²)	規格上限値 (N/mm ²)	平均値 (N/mm ²)	標準偏差
SN400B	235	235	355	295	18.7
LY225	205	205	245	225	11.0

表2 接合部のすべり係数の統計値

摩擦面処理	設計値	平均値	標準偏差
ブラスト	0.450	0.560	0.0763
赤錆	0.450	0.609	0.0530

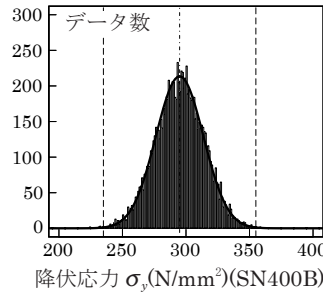


図4 降伏応力の分布

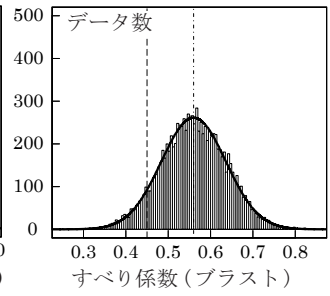


図5 すべり係数の分布

(1) BRB の降伏耐力 Q_{Dy} のばらつき

芯材鋼種はSN400B, LY225 の2種とする. これらの統計値を表1に示す²⁾. 降伏応力は正規分布と仮定して乱数によりばらつきを再現する. SN400B の場合の分布を図4に示す. 曲線で示している部分が統計値に基づく正規分布, 棒グラフが作成した1万通りのデータである. ただし, 鋼材規格の下限値と上限値を外れるものは除いた. 解析では設計時の Q_{Dy} に, 発生させた乱数によって定まる降伏応力と表1の設計値の比を乗じ, BRB 降伏耐力のばらつきを考慮した Q_{Dy} を定める.

(2) 高力ボルト接合部のすべり耐力 Q_{Jy} のばらつき

Q_{Jy} のばらつきについてもすべり係数の統計値を元に1万通りの乱数発生させたデータを用いる. 摩擦面処理が赤錆, ブラストの場合の統計値を表2に示す^{3), 4)}. すべり耐力はすべり係数のばらつきによって決定されるものとする. 図5にブラストの場合の分布を示す.

3. 1 質点系モデルの応答解析と接合部係数の算定

3.1 地震応答解析結果

まず, 接合部にすべりが生じる場合の一例として耐力のばらつきを考慮せずに行った解析結果を図6に示す. $T=1.2$, $k=0.7$ でBRBの降伏耐力の実勢値が設計値と等しいとした場合の結果である. 構造特性係数 $D_s=0.35$, $\mu_1=2$, $\kappa_F=2\%$, $\kappa_D=3\%$ とし, 地震波はBCJ-L2原波を用いた. 接合部のすべり耐力はBRB降伏耐力の1.05倍と設定しており, BRBが降伏し, 歪硬化の影響で耐力上昇することで接合部にすべりが生じている.

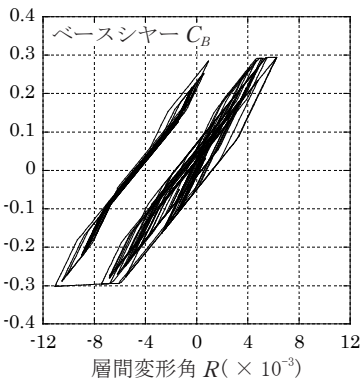
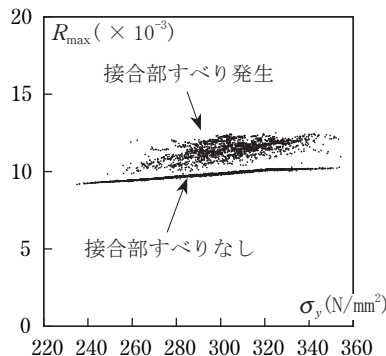


図6 地震応答解析の結果例

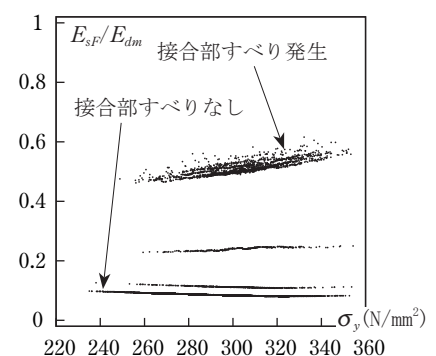
この解析にばらつきを考慮して1万通りの解析を行った. 結果を図7に示す. R_{max} : 最大層間変形角, E_{sF} : フレームの弾塑性歪エネルギー, E_{dm} : 損傷に寄与するエネルギーである. 接合部のすべり耐力はBRB降伏耐力の1.2倍と設定している. 図の線状に連なった部分が接合部にすべりが発生していない場合であり, ばらついた部分がすべりが発生している場合である. すべりが発生すると応答変位, フレームの損傷ともに増加する. この解析を構造物に関するパラメータを変化させて行い, 接合部のすべり発生確率やフレームの損傷の増加の程度にどのような影響があるかを考察した結果, 接合部係数に影響を与えるのはBRB 芯材の鋼種, 接合部の摩擦面処理, BRBの歪硬化係数, BRB降伏レベルの4つのパラメータであった.

3.2 接合部係数の算定法

接合部係数の算定例を示す. 図8はBRBにSN400Bを用い, 摩擦面処理ブラスト, $\kappa_D=3\%$, $\mu_1=2$ の場合に, 接合部係数と接合部にすべりが発生する確率の関係を示している. 接合部係数を0.05ごとに変化させ, 1万通りずつ解析を行った T と k の異なる9モデルの平均値に標準偏差を加えた値を1本の線で示している. 地震波にはBCJ-L2の他に最大速度50cm/sの観測波3波でも解析を行った. すべり発生確率やフレームの損傷が最も大きいBCJ-L2の結果を元に接合部係数を考える. 信頼性指標1を基準にすべり発生確率を15%以下に抑えることを目標とすれば接合部係数は1.50が必要である.



(a) 最大層間変形角のばらつき



(b) フレームのエネルギー吸収のばらつき

図7 ばらつきの影響 (SN400B, 摩擦面処理ブラスト, $\kappa_D=3\%$, $\mu_1=2$)

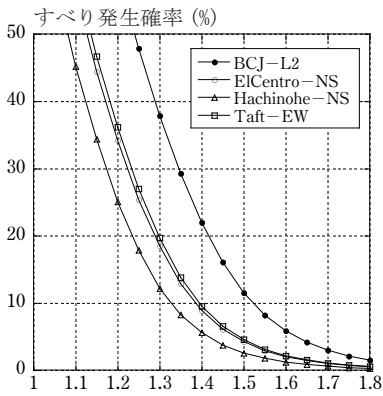


図8 接合部係数 α

接合部係数とすべり発生確率の関係

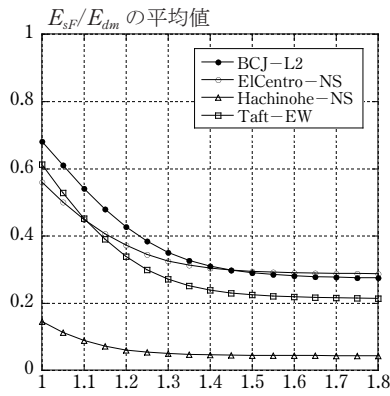


図9 接合部係数 α

接合部係数とフレーム損傷量の関係

一方、すべりが発生しても制振効果が保持されれば若干のすべりを許容することが可能である。図9に接合部係数とフレームのエネルギー吸収の割合の関係を示す。縦軸は E_{sF}/E_{dm} の1万通りの平均値をさらに9モデルで平均し、標準偏差を加えた値である。接合部係数を大きくするに従いフレームの損傷は低下し、一定値に漸近している。図9では接合部係数1.3から1.4程度以上ではほとんど変わらない。接合部が十分な耐力を持つ場合に比べ、フレームの損傷の増加量を1割以下とする観点では接合部係数1.45が必要である。

4. 高力ボルト接合部繰返载荷試験

2. の残存耐力無視モデルよりも、より実際に近いモデルとするため高力ボルト摩擦接合部の繰返し载荷実験を行った。試験体を図10に、载荷方法を図11に示す。摩擦面処理は赤錆、プラス

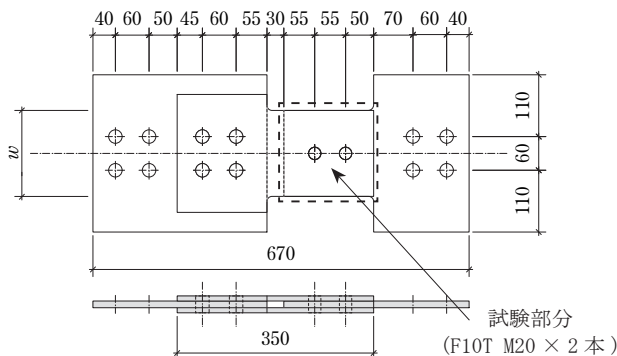


図10 試験体(単位: mm)

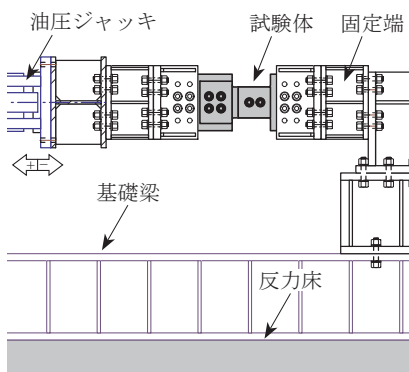


図11 载荷方法

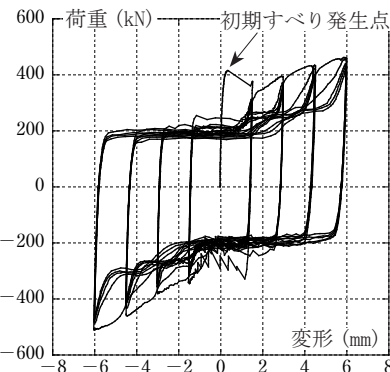


図12 荷重-変形関係(変動振幅)

トの2種類とし、降伏形式は試験体の幅 w を変えることですべり先行と鋼材降伏先行の2種類、これらの組み合わせで計4種類を準備した。それぞれに対し5通りの载荷パターンとし、合計20体の実験を行った。試験部分の高力ボルトはF10TM20を用い、実験結果の一例として摩擦面ブラスト処理、すべり先行の実験結果を図12に示す。20体の試験から次のような知見が得られた。まず、接合部に一度すべりが生じたあと3サイクルほどで挙動が安定し、残存すべり耐力は初期のすべり耐力の4~5割程度に低下する。これはボルト張力が抜けることが主な原因であり、支圧に至ったかどうかはほとんど関係無い。さらに载荷を200サイクル繰り返すと残存すべり耐力はほぼ0となるが、高力ボルトを締め直すとある程度すべり耐力が回復する。摩擦面処理は赤錆のほうがブラストよりも初期のすべり耐力はやや大きい、その後の挙動に関しては大差が無い。また、鋼材降伏が先行する場合も繰返時の履歴は同じような傾向である。

まず、接合部に一度すべりが生じたあと3サイクルほどで挙動が安定し、残存すべり耐力は初期のすべり耐力の4~5割程度に低下する。これはボルト張力が抜けることが主な原因であり、支圧に至ったかどうかはほとんど関係無い。さらに载荷を200サイクル繰り返すと残存すべり耐力はほぼ0となるが、高力ボルトを締め直すとある程度すべり耐力が回復する。摩擦面処理は赤錆のほうがブラストよりも初期のすべり耐力はやや大きい、その後の挙動に関しては大差が無い。また、鋼材降伏が先行する場合も繰返時の履歴は同じような傾向である。

5. 実験に基づく接合部履歴モデルによる解析

4. の結果に基づく接合部の履歴モデルを図13に示す。これを残存耐力考慮モデルと呼ぶ。接合部にすべりが生じた後はすべり耐力が4割に低下するように設定した。このモデルでは接合部に繰返しすべりが生じると接合部が摩擦ダンパーのように、ある程度のエネルギー吸収が期待できる。このモデルを用いて3.2節と同様の方法で接合部係数を算出し、それらをまとめた結果を表3に示す。ここではBRBの芯材鋼種をSN400B, LY225の2種類、1次設計レベルでのBRB塑性率 μ_1 を1, 2, 4の3種類で接合部係数を算定した。 $\mu_1=2, 4$ の場合は1次設計レベルからBRBが塑性化する設計であるが、2次設計レベルでのBRB最大歪を1.5%程度に抑える場合には $\mu_1=2$ 、それ以上の歪を許

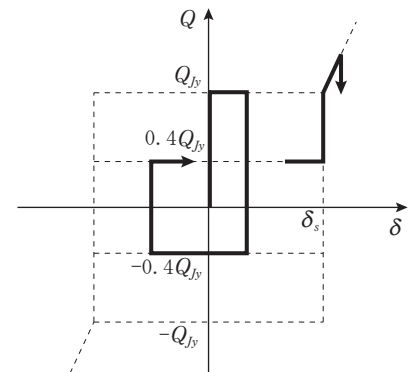


図13 残存耐力考慮モデル

表3 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	フレームの損傷を抑える設計		
		すべりを 防ぐ設計	残存耐力無視モデル	残存耐力考慮モデル
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)

容する場合には $\mu_1=4$ とした接合部係数を設定すればよい。接合部摩擦面処理はブラスト, κ_D は 3% として接合部に耐力を必要とする設定としている。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を 1 割以下に抑える設計の 2 通りの算定を行っている。残存耐力考慮モデルを用いると、接合部係数を小さめに抑えることができ、表 3 の * の値が標準的な値として推奨される。

6. 多質点系の応答が接合部必要耐力に及ぼす影響

5. の接合部係数は 1 質点系の解析を基に算定したが、実際の構造物では特定層の BRB 接合部のみにすべりが生じることが考えられる。そのため、接合部を含む 5 ～ 15 層の多質点系モデルを設定し、地震応答解析を行い、特定層の BRB 接合部にすべりが生じた場合の影響を検討する。図 14 には多質点系モデルと多層骨組の関係を示している。図 1 の 1 質点系を縦に積み重ねた形である。図 15 には 10 層のモデルにおいて、下層部の BRB 接合部のみにすべりが集中した場合の解析結果を示す。ただし、 E_{sF} , E_{sD} はその層のフレーム、BRB それぞれの弾塑性歪エネルギー、 $allE_{dm}$ は構造物全体の損傷に寄与するエネルギーである。また、接合部は残存耐力無視モデルを用いている。第 1 層の接合部にすべりが生じた場合に加え、1 層と 2 層、1 ～ 3 層の接合部にすべりが生じた場合も検討している。特定層の接合部にすべりが生じるとその層の BRB のエネルギー吸収量は著しく

低下し、その層で吸収できなくなった分のエネルギーは他の層に分配される。そのため構造物各層の変形はその分だけ若干大きくなる。しかし、BRB の接合部にすべりが生じて、その BRB は耐震ブレースのように働き耐力を維持するため、変形やフレームの損傷が特定層のみに集中することは無い。これは中層部や上層部の BRB 接合部にすべりが

生じた場合も同様である。以上の点から表 3 の接合部係数は多層構造物に対しても有効である。

7. 結論

本研究で得られた結論を以下にまとめる。

- [1] 接合部係数に影響するパラメータは BRB 芯材鋼種、接合部摩擦面処理、BRB 歪硬化係数、BRB の降伏レベルの 4 つである。
- [2] すべりを防ぐ観点とフレームの損傷を抑える観点で接合部係数の算定例を示した。その際、接合部が摩擦ダンパーのようにエネルギーを吸収することを考慮すると、接合部係数を小さく抑えられる。
- [3] 構造物の特定層の BRB 接合部にすべりが集中しても、変形やフレームの損傷はその層に集中しない。

【参考文献】

- 1) 日本建築学会：鋼構造接合部設計指針，第 2 版，2006. 3.
- 2) 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，C-1 構造Ⅲ，pp. 525-526，2003. 9.
- 3) 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.
- 4) 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.

【投稿論文】

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 (2011 年 4 月掲載予定)

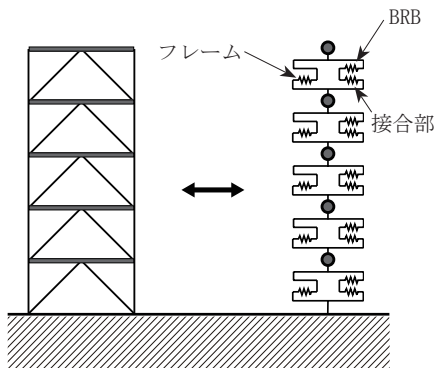


図 14

多質点系モデルと多層骨組の関係

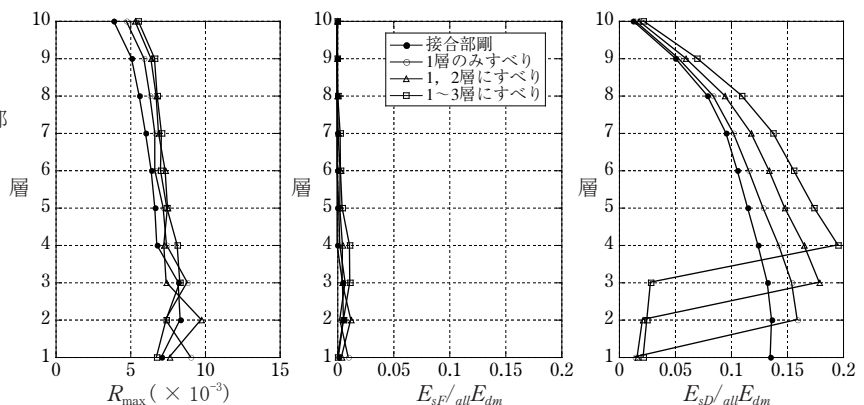


図 15 下層部の接合部にすべりが集中した場合