

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 28 日現在

機関番号：82727

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420576

研究課題名(和文)座屈拘束ブレースの間隙が補剛材必要剛性に与える影響

研究課題名(英文)The influence of the clearance of the buckling restrained brace on the required stiffness of its cover

研究代表者

吉田 競人(YOSHIDA, Keito)

独立行政法人高齢・障害・求職者雇用支援機構職業能力開発総合大学校(能力開発院、基・能力開発院・准教授)

研究者番号：70648914

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究ではBRBの摩擦と間隙の影響を考慮した必要剛性比を算出するために、有限要素法を用いて大きな間隙を有する座屈拘束ブレース(BRB)の挙動を調べた。得られた結果は、軸方向の力を受けたときに中央のBRB拘束材の中央面外方向のたわみに摩擦が与える影響は無視できることを示している。また、間隙はBRBの完全な性能を維持するために必要なBRB拘束材のたわみおよび剛性要件の両方に影響を与えることが判明した。最後に、得られた結果を日本建築学会の設計指針による結果と比較した。その結果、日本建築学会の設計指針では広い間隙を有する場合に対してFEMよりも少ない剛性、即ち危険側の結果を与えることを示した。

研究成果の概要(英文)：Using finite element method, this study investigated Buckling Restrained Brace (BRB) behavior with large clearance to propose effective stiffness requirements that include consideration of the influences of friction and clearance of the BRB. The obtained results demonstrate that friction is negligible for calculating the deflection of the BRB cover at the center when subjected to axial force. In addition, the clearance influences both the deflection and the stiffness requirements of the BRB cover to sustain the complete performance of the BRB. Finally, the obtained results were compared with those of the AIJ codes. The results demonstrated that the AIJ codes estimate stiffness as less than FEM does for a large clearance in the case of a wide clearance.

研究分野：工学

キーワード：座屈拘束ブレース 有限要素法 接触解析 摩擦 間隙

1. 研究開始当初の背景

座屈拘束ブレース (以下 BRB と称する) は軸方向力を伝達する芯ブレースと座屈を拘束する補剛材から構成されている。この補剛材により芯ブレースの座屈は拘束されるだけでなく、これら部材間相互の付着力が排除されているため、BRB の引張時と圧縮時における剛性は等しくなる。そのため履歴曲線はスリップ形状にならず、エネルギー吸収に優れた紡錘形状となり建物の耐震性を向上させることが可能となる。これまでは大規模な構造物に用いられた BRB であるが、今後はその優れた制震性能の特性故に広く一般的な構造物への利用が想定される。それに伴い、BRB 断面の低減や軽量化が要求され、座屈拘束材としてのモルタルやアンボンド材の見直しが必要となる。BRB の性能を左右する主たる要因として補剛材の剛性と強度が挙げられる。このほか、芯ブレースと補剛材間に存在する間隙も BRB の性能に影響を与える要因である。そのためこの要因が補剛材に及ぼす影響を把握しておくことは、日本建築学会「鋼構造座屈設計指針」に述べられているように BRB に要求される性能を担保するための補剛材の設計において重要である。

この点から多くの研究者が BRB の解析を試み報告を行ってきた。特に、BRB の芯材に生じる波状の変形を解析的に取扱い、間隙量が荷重-変位特性に与える影響については名古屋大学の加藤氏や宇佐美教授らが (座屈拘束ブレースの繰り返し弾塑性挙動に関する数値解析研究, 構造工学論文集, Vol.48A, pp.641-648, 2002.3) や (制震ダンパーとしての座屈拘束ブレースの要求性能, 構造工学論文集, Vol.50A, pp.527-538, 2004.3) において報告している。このなかで BRB の芯材に生じる波状の変形を解析的に取扱い、繰り返し載荷時のモード移行を再現しているが、補剛材を剛材としているため補剛材全体を含む挙動の解析はできていない。補剛材を含めた芯ブレースの変形挙動解析については神奈川大学の和泉田氏ら (鋼モルタル板を用いた座屈拘束ブレースの有限要素法による弾塑性大変形の解析, 日本建築学会構造系論文集, No.618, pp.207-213, 2007.8) の報告がある。この報告においては芯ブレースの高次モードの発生が解析的に再現されている。しかし、解析仮定として平衡計算の収束性を図るために芯材と補剛材の法線方向に同一変位をモデル毎に変えて設定しており、この仮定がモード分岐に与える影響については触れていないなど BRB の解析は十分とはいえない。以上、耐震性能を左右する補剛材と芯材に存在する間隙の影響は、定性的には判明しているものの、定量的には不明である。このため、BRB の設計にあたり準拠すべき日本建築学会「鋼構造座屈設計指針」においては、補剛材の剛性・耐力条件は提案されているものの、間隙の影響については、注意を喚

起し現状使用されている値を紹介するにとどめている。

2. 研究の目的

研究対象である座屈拘束ブレース (以下 BRB と称す。) は日本で考案され発展した制振部材である。地震力を大幅に低減することが可能であることから、米国の建築設計基準である AISC (2005 年版) にも反映され、日米の多くの高層建物に使用されている。BRB 補剛材の性能を発揮するために必要な要因は、剛性と強度および芯材と補剛材の間隙である。これらを決定するための設計基準は、日本建築学会「鋼構造座屈設計指針」に掲げられているが、間隙の影響については未だ同定されておらず、実験計測値に頼るのが現状である。そこで本研究は、応募者の直近の研究をさらに発展させ、建築学会基準式に掲げられていない BRB の間隙の影響を含む設計条件式の原案に寄与し、建築物や土木構造物の耐震性向上を図ることを目的とするものである。

3. 研究の方法

解析モデルは図 1 のような 2 次元モデルである。研究計画の中心である解析概要は以下に記すとおりである。

(1) 解析プログラム

BRB のモードの分岐を追跡するために、有限要素法解析においては、幾何学的非線形 (大変形問題)、材料非線形 (弾塑性問題)、状態変化 (接触問題) を考慮した。解析には汎用解析コード ANSYS 9.0 を用いる。経路追跡を行うために変位制御法を採用する。解析概要は以下の通りである。

(2) 非線形解析手法

非線形問題の反復解析には Newton-Raphson 法を用いる。収束方法は、イタレーション毎に接線剛性マトリックスおよび残差を更新し、設定した収束基準より残差が下回ったとき収束達成とする。

(3) 接触問題の解析手法

接触解析の解法には、接触の適合性を定義し平衡状態を達成し、食い込み許容量が許容範囲内になるまでイタレーションを行うペナルティ法とラグランジェ乗数法を組み合わせたペナルティ+ラグランジェ法を用い

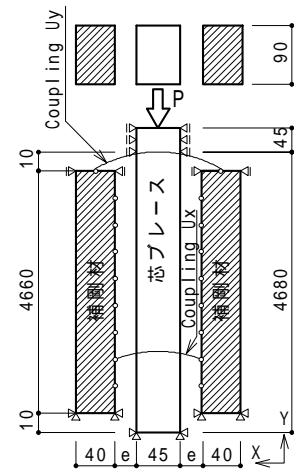


図 1 BRB 解析モデル

る。本接触解析における食い込み許容量は芯ブレース要素の 0.1 倍の距離と設定する。芯ブレースの厚さは 45mm, 要素分割は 5, 一要素の厚さは 9mm とする。また, 接触時設定食い込み許容量は 0.9mm とする。

(4) 解析モデル

解析対象の芯ブレース断面形状及び補剛材断面形状は過去の実験を参考にそれぞれ PL-45×90×4680, 40×90×4660 とした。芯ブレース材料特性は表 1 に示すとおりである。ヤング係数(E_{B1})は 206GPa, 材料の復元力特性はバイリニア, 第 2 勾配(E_{B2})は第 1 勾配(E_{B1})の 1/100 とする。芯ブレースと補剛材の間隙はパラメータとする。また補剛材の降伏応力度(σ_{cy})は芯ブレース降伏応力度(σ_{By})の 0.1 倍とし, 復元力特性は芯ブレース同様バイリニア, 第 2 勾配(E_{C2})は第 1 勾配(E_{C1})の 1/100 とする。芯ブレースに存在する基本的な材料特性は表 1 に掲げるとおりとする。

表 1 材料特性

ブレース	ヤング係数 (E_{B1}) GPa	206
	降伏応力度 (σ_{By}) N/mm ²	パラメータ
	第二勾配 (E_{B2})	0.01 E_{B1}
	ポアソン比	0.3
補剛材	ヤング係数 (E_{C1})	6 E_{B1}
	降伏応力度 (σ_{cy}) N/mm ²	26.1
	第二勾配 (E_{C2})	0.01 E_{C1}
	ポアソン比	0.3

(5) 解析モデル

解析モデルの細長比は, 表 2 に示す 4 種類である。ここで規定する細長比 λ は, 有効細長比である。なお, $L_B (=L+20(\text{mm}))$ は芯ブレース材長, i は断面二次半径である。解析パラメータは摩擦と間隙とし, 使用した摩擦係数 (μ) は 0.1 と 0.5, 間隙量 (s) は芯ブレース幅に対し, 指針に記載されている 0.5% に近い 0.44% ($s=0.2\text{mm}$) と間隙の影響を確認するために大きめの 4.4% ($s=2\text{mm}$) とした。解析はそれぞれの細長比を有するモデルに対し, 摩擦係数と間隙を変えた表 2 に掲げる解析モデル 16 種類に対し行った。BRB がその性能を発揮するために拘束材に必要な剛性と強度の代わりに, 本解析においては剛性の代わりに剛性比を, 曲げ強度の代わりに拘束材中央部面外変形を採用し, 剛性比 - 拘束材中央部面外変形との関係を解析的に求めた。ここで拘束材曲げ強度ではなく拘束材中央部面外変形としたのは, 芯ブレースが拘束材に及ぼす補剛力を集中荷重として仮定することにより, 概略の必要曲げ強度が推測可能であるからである。なお, 剛性比 Sr の定義は, 拘束

材の曲げ剛性を芯ブレースの曲げ剛性で除した値, つまり $Sr = E_C \cdot I_C / (E_B \cdot I_B)$ である。ここで E_C, I_C, E_B, I_B はそれぞれ拘束材のヤング係数, 断面二次モーメントおよび芯ブレースのヤング係数, 断面二次モーメントである。なお拘束材の曲げ剛性の変化は, 断面は一定とし拘束材のヤング係数を変化させることにより行った。

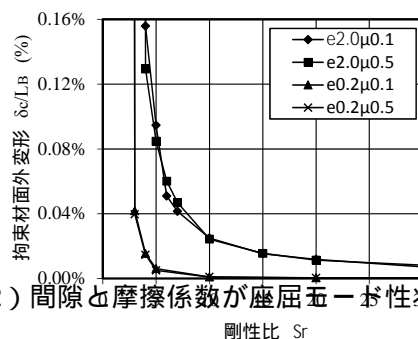
表 2 解析モデル名一覧

モデル名	細長比 λ	解析モデル名			
		$s=2.0(\text{mm})$ $s/D_B=4.4(\%)$		$s=0.2(\text{mm})$ $s/D_B=0.44(\%)$	
		$\mu=0.1$	$\mu=0.5$	$\mu=0.1$	$\mu=0.5$
L3	135	$s2.0\mu0.1$	$s2.0\mu0.5$	$s0.2\mu0.1$	$s0.2\mu0.5$
L4	180	$s2.0\mu0.1$	$s2.0\mu0.5$	$s0.2\mu0.1$	$s0.2\mu0.5$
L7	270	$s2.0\mu0.1$	$s2.0\mu0.5$	$s0.2\mu0.1$	$s0.2\mu0.5$
L9	360	$s2.0\mu0.1$	$s2.0\mu0.5$	$s0.2\mu0.1$	$s0.2\mu0.5$

4. 研究成果

(1) 剛性比 - 拘束材中央部面外変形

図 2 に剛性比と拘束材中央部面外変形の解析結果の一例として L_3 モデルの結果を掲げる。なお面外変形 c は, 最大変位を示す。横軸と縦軸はそれぞれ剛性比 Sr と拘束材中央部面外変形 (c/L_B) である。縦軸の c/L_B の算出に当たり使用した材長は有効座屈長さ ($L_B/2$) ではなく, 拘束材全長 L_B を用いている。全体座屈を十分に拘束するに足る剛性を有する場合, 拘束材中央部面外変形は少ない。しかし, 剛性比が減少するにつれ面外変形は少しずつ増大し, 全体座屈を生じさせる剛性比近傍において急激に増大する。また, 同じ細長比と剛性比を有し間隙量のみが異なるモデルの拘束材中央部面外変形量は, 大きな間隙を有するモデルが, 小さな間隙を有するモデルと比較し大きい。このことから, 間隙量の増大に伴い拘束材中央部面外変形量が增大するといえる。次に摩擦が及ぼす影響をみると, 同じ間隙を有する場合拘束材面外変形 - 剛性比の解析結果がほぼ重なっていることから, 摩擦が拘束材の剛性比と面外変形に与える影響は少ないといえる。この傾向は細長比に関わらず見られたことから, 摩擦係数が 0.5 までの範囲においては, 摩擦が拘束材中央部面外変形に及ぼす影響は少ないといえる。



(2) 間隙と摩擦係数が座屈モード性状に与

図 2 剛性比 - 拘束材 中央部面外変形 (L3 モデル)

える影響

間隙の大小が芯ブレースの座屈モード形状に与える影響を探るため、表2に掲げる4タイプの異なる細長比の解析結果を整理し、主要な軸歪量毎の芯ブレースの座屈モード形状を求めた。さらに各間隙を有するモデルに対し、摩擦係数を0.1と0.5に変化させた解析をおこない、軸歪(δ/L_B)が0.1%、0.15%と0.2%に達した時の座屈モード形状を掲げている。なお、拘束材剛性比 Sr は十分に全体座屈を拘束できるように、間隙比が0.44%のモデルに対しては $Sr=50$ 、間隙比が4.4%のモデルに対しては $Sr=100$ としている。

これらの結果から、間隙が大きくなると座屈モード次数は少なくなる傾向がみられた。この理由は芯ブレースの軸変形に伴う座屈により生じる面外変形量によるものである。芯ブレースに軸変形が生じると、座屈により中央部に面外変形が生じる。その変形量が拘束材との間隙量よりも少ないと座屈モードの移行は生じないが、間隙量が少ないと、芯ブレースが拘束材に接触しその箇所が支点となり、高次座屈モードに移行するためである。このため、同じ軸歪量に対しても、間隙が多い場合に比べ少ない場合のモード次数は少なくなる。また、摩擦係数が拘束材中央面外変形に及ぼす影響は前述のように少ないが、モード形状に与える影響は、摩擦係数が大きいほどブレース上部(荷重点付近)に波状の変形が集中しブレース下部の波状の変形は上部と比較し少なくなるという相違が顕著にみられた。

(3) 応力 - 軸歪

図3に応力 - 軸歪曲線の一例としてL3モデルの結果を掲げる。解析モデルの剛性比 Sr は前節同様に全体座屈を拘束するために十分な剛性比となるように、間隙比が0.44%と4.4%のモデルに対しそれぞれ $Sr=50$ と100としている。横軸は芯ブレース材長に対する軸歪(δ/L_B)を示し、表示範囲は荷重低下の影響を明確にするために0.2%までとした。縦軸は、芯ブレースのみが負担する軸力のみを降伏強度で除した値であり、芯ブレースが拘束材に接触し拘束材に生じる軸力は考慮し

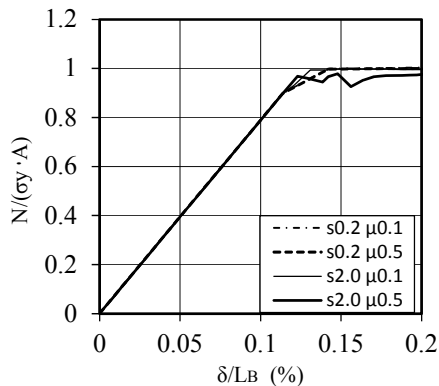


図3 応力 - 軸歪曲線 (L3モデル)

ていない。降伏強度に達せずに降伏変位が増大しているモデルは拘束材が軸力を負担したためである。なおいずれも、芯ブレースが降伏するまでの剛性はほぼ変わらないが、間隙が大きく細長比が小さいモデルでは、荷重低下の頻度が増大する傾向を示した。

(4) 応力 - 拘束材中央部面外変形

芯ブレースに圧縮力が作用し、高次モードに移行後、降伏強度に達するまでの拘束材の中央面外変形量に間隙と摩擦力が与える影響をモデル毎に示したものが、図5である(L_3 モデル)。横軸と縦軸はそれぞれ材長(L_B)に対する中央面外変形(δ_c)の割合(δ_c/L_B)と降伏強度に対する軸力($N/(A \cdot \sigma_y)$)を示す。 L_3, L_4, L_7, L_9 の各モデルの拘束材剛性比はそれぞれ $Sr=10, 20, 30, 30$ である。これらの剛性比の下での拘束材面外変形割合(δ_c/L_B)は、荷重が増加し降伏強度に達するまで増加し、降伏強度に達する直前で最大となりその後収束する。その変形量の大きさは、摩擦係数による影響は少なく間隙による影響が大きい。

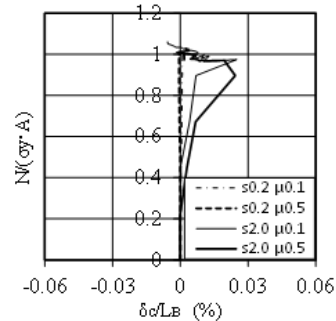


図4 応力 - 中央面外変形(L3モデル)

(5) 断面形状が解析結果に与える影響

本解析ではBRB解析モデルの芯ブレース断面形状は一定とし、BRBの細長比の影響は材長を変化させることにより考慮した。この仮定が妥当であるかを検討するために、芯ブレースの断面形状は異なるが、同じ細長比を有する解析モデルの拘束材中央部面外変位を算出し、比較検討を行った。解析モデルとして、図5に掲げるような L_7 モデルと L_{7a} モデルを設定した。 L_{7a} モデルはブレース断面面積が同じで、細長比270の L_7 モデルと同じ細長比となるように、芯厚さを1/2、幅を2倍、材長を1/2としたものである。なお、拘束材断面は両者とも変更せず $90\text{mm} \times 40\text{mm}$ と共通である。このほか間隙比 s/D_g も同じとした。このモデルを解析した結果と L_7 モデルの結果一覧と剛性比 - 拘束材中央部面外変形の関係を図5に掲げる。中間部の剛性比 $Sr=20$ と30において幾分の相違がみられるが、そのほかではほぼ同じ結果を示していることから、本解析の手法による結果は、少なくとも局部座屈を生じさせない矩形断面の場合は適用可能といえる。

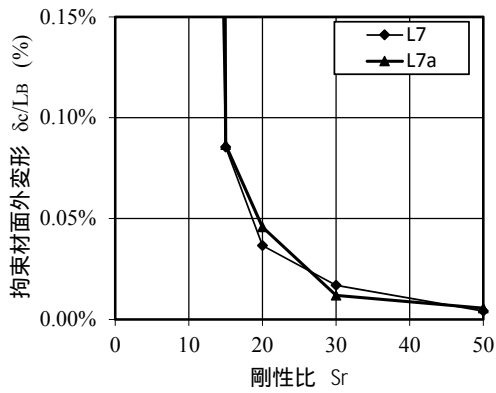


図5 断面形状の相違による影響

(6) 必要剛性比の解析結果と指針式との比較

BRB 芯ブレースは軸力を負担することにより高次の座屈モードに移行した後に、全断面が塑性化領域に達し材料特性どおりの復元力特性を示す。しかし拘束材の剛性比が低い場合、芯ブレースが降伏強度に達した後に、高次の座屈モードに達する場合は解析結果からみられた。そこで、建築学会指針の解説に従い降伏点に達する直前あるいは達した時点で座屈モードが高次の座屈モードに移行しているような剛性比を必要剛性比 (S_{req}) とし、それぞれのモデルに対し解析結果と学会指針式から求めた結果及びそれらの比較を示すと図6に示す通りになる。指針式から得られる剛性比は、間隙が少ない場合には、摩擦係数に関わらず大きめの値を、特に細長比が増大するにつれて示す。しかし間隙が大きくなると逆の結果となり、指針式による結果は解析による結果を下回る。この傾向は摩擦係数が大きいほど顕著となった。これより指針式において評価される以上に間隙の影響は大きいという結果となった。

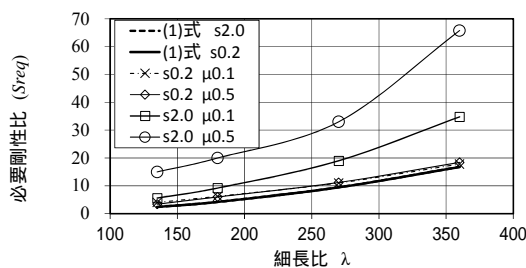


図6 細長比 - 必要剛性比 (S_{req}) 図

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌発表](計1件)

吉田競人, 西澤秀喜, 船木裕之,
大きな間隙を考慮した座屈拘束ブレース

拘束材の必要剛性, 構造工学論文集, 査読有, Vol64B, 2017, pp.141 - pp.146

6. 研究組織

(1) 研究代表者

吉田 競人 (YOSHIDA, Keito)

独立行政法人高齢・障害・求職者雇用支援機構職業能力開発総合大学校(能力開発院、基盤整備センター)・能力開発院・准教授
研究者番号: 70648914

(2) 研究協力者

栗山 好夫 (KURIYAMA, Yoshio)