鋼モルタル板を用いた座屈拘束ブレースにおける
芯材と拘束材のクリアランス調整工法に関する研究CLEARANCE ADJUSTMENT CONSTRUCTION FOR CORE PLATE AND RESTRAINING
PART OF THE BUCKLING-RESTRAINED BRACE USING STEEL MORTAR PLANKS中村 慎^{*1}, 藤田正則^{*2}, 岩田 衛^{*3}

Makoto NAKAMURA, Masanori FUJITA and Mamoru IWATA

The clearance of the buckling-restrained brace is a factor that has a significant influence on its failure mode and mechanical behavior. In this study, the clearance adjustment construction for the buckling-restrained brace using steel mortar planks is improved. Further, the clearance adjustment construction of partially pasting fluororesin sheets or butyl rubbers to a core plate or spacers is proposed. The requirements for workability, cost performance, reliability for fabrication, and structural performance for safety is examined. Finally, based on a comprehensive evaluation, it is verified that the practicality of the proposed clearance adjustment construction.

Keywords : Buckling-restrained brace, Steel mortar plank, Clearance adjustment construction, Clearance adjustment material, performance evaluation

座屈拘束ブレース, 鋼モルタル板, クリアランス調整工法, クリアランス調整材, 性能評価

1. 序

座屈拘束ブレース (以降, BRB という) とは, 軸方向力を伝達する芯材が座屈しないよう外周を拘束材で補剛した部材である^{1) 2)}。安定した復元力特性を有するため, 中低層建築物では耐震部材として, 超高層および高層建築物では制振部材として広く利用され, サステナブル建築にも利用されている。今日では, さまざまな断面形状の芯材と拘束材の組合せが提案されており, いずれの形状でも BRB としての性能が実験的に確認されている^{例えば 3)~7)}。

あわせて, 設計における基本事項が鋼構造制振設計指針¹⁾や鋼構造座屈設計指針²⁾等で整理されている。設計上の配慮を要する項目として, 拘束材や接合部の設計, 拘束材の局部破壊の防止, 適切なクリアランスの確保などが挙げられており, 中でも適切なクリアランスの確保が BRB の性能に大きく影響することが指摘されている。その値が大きすぎると芯材の一部で座屈モードの振幅が大きくなり, 局部変形が生じやすくなる。小さくなりすぎると圧縮時の芯材の体積膨張で芯材と拘束材間に摩擦力が生じ, 圧縮力が上昇して拘束材ごと部材座屈を生じる²⁾。その値の適切な設定, 製作上の厳密な管理が必要であり, BRB のクリアランスを対象とした研究も進められている^{例えば 5), 8)}。

ただし, その具体的な値は BRB の形状, 製作上の都合も勘案して決定する必要がある, 一概に設定することは難しい。現実にはさ

まざまな BRB で最適なクリアランスを個別に検討する必要がある, 各々の BRB でクリアランス調整工法や調整に用いる材料, 品質管理手法を追究することが重要となる。

著者等はの一つとして, 鋼モルタル板を用いた座屈拘束ブレース (Buckling-Restrained Brace using Steel Mortar Planks, 以降, BRBSM という) に関する継続的な研究を行っている^{7) 9)~15)}。Fig.1 に示す拘束材となる 2 つの鋼モルタル板 (溝形鋼にモルタルを充填したもの) を両側にクリアランス調整材を貼付けた芯材に被せ, 溶

Fig.1 Buckling-restrained braces using steel mortar planks

^{*1} 神奈川大学工学部建築学科 助手・修士 (工学)

^{*2} 神奈川大学工学部建築学科 教授・博士 (工学)

^{*3} 神奈川大学 名誉教授・工博

Research Assoc., Dept. of Architecture and Building Eng., Kanagawa Univ., M.Eng.
Prof., Dept. of Architecture and Building Eng., Faculty of Eng., Kanagawa Univ., Dr.Eng.
Prof. Emeritus, Dept. of Architecture and Building Eng., Kanagawa Univ., Dr.Eng.

接により一体化したものである。芯材端部のディテールが拘束材より大きくなる場合においても、鋼モルタル板を後から挟み込む製作手順となることから、両端部ディテールの設計自由度が高い。また、拘束材と芯材の併合前に拘束材のモルタル充填の程度、平坦度、クリアランスなどを目視で確認できるため、品質管理を厳密に行える。

既往の研究では、BRBSMの各構成部をパラメータとした実験を行い、累積塑性歪エネルギー率についての性能評価下限式を提示した⁹⁾。また、首都直下地震や長周期・長継続時間の地震動における予想以上の地震入力に対応するため、累積塑性歪エネルギー率の大きなBRBSMの設計要件を分析し、芯材形状、幅厚比などの設計条件を定めた¹³⁾。あわせて、BRBSMではクリアランスをクリアランス比（芯材と拘束材の間のクリアランス寸法を芯材の板厚で除した値）で管理している。最小のクリアランス比は最大軸歪に鋼材の塑性時ポアソン比を乗じた値（最大軸歪 3.0%においては $3.0\% \times 0.5 = 1.5\%$ ）とし、最大のクリアランス比は 15%未満とすることを推奨し、その値を実現するクリアランス調整工法として、これまでにブチルゴムを芯材全面に貼付ける工法を採用してきた。

ブチルゴムは芯材の位置を保持しつつ、モルタル表面の不陸にも追従可能な硬度を有している。ロール状で市販されており、芯材形状にあわせた切断、貼付けが可能でクリアランスを調整することができる。一方で、自己粘着力が強く、一度貼付けるとその位置の調整および貼替えが困難なため、貼付け作業に時間を要すること、圧縮復元性が 100%でなく過度に加圧して塑性変形させると目標とするクリアランス寸法を満たせなくなることで、押出機の吐出力の関係上 1mm 以下の厚みでの安定した材料供給が難しく、より小さいクリアランス比を実現するためには、モルタル表面の精密な平滑化処理が必要不可欠になることといった製作性に関する課題を有している。

本論では、これらの製作性の課題のうち、貼付けの作業性を改善するクリアランス調整工法に関する検討を行う。まず、BRBSMの種類と構成部品、クリアランス調整に用いる材料とその貼付け位置、方法を整理し、クリアランス調整工法を分類する。次いで、クリアランス調整工法の中から材料の総量や製作時間、コストに大幅な増加がなく、製作性の改善が期待できる工法とそれに対応した要求性能を抽出し、評価項目を設定する。設定したクリアランス調整工法が従来のクリアランス調整工法と同等以上の性能を有することを実験的に確認し、あわせて実例を踏まえた材料の総量および製作時間に関する一検討も行い、その有効性について検討する。

2. BRBSMにおけるクリアランス調整工法

2.1 BRBSMの種類と構成部品

BRBSMでは芯材の形状の異なる基本タイプ（以降、Bタイプという）と高性能タイプ（以降、Hタイプという）の2種類が実用化されている¹⁴⁾。それぞれの平面、断面を Fig.2 に示す。

1) Bタイプ

BタイプはBRBSMの標準タイプである。芯材塑性化部の幅を一定としており、クリアランス調整材の貼付けが容易で製作性に優れる。拘束材に挟み込まれる芯材弱軸方向には表裏全面にクリアランス調整材を貼付けており、強軸方向には丸鋼を配置している。両端部のリブの断面と長さにより剛性を調節することができ、リブの長さによって塑性化部の長さを調節できる。ただし、塑性化部の端部

にリブ溶接の熱影響部を有しており、その疲労性能は歪振幅 1.0%未満の範囲でHタイプよりも小さくなる¹⁵⁾。よって、主に風外力などによる小振幅の繰返し載荷の影響が少ない中低層建築物に用いるブレース（以降、耐震ブレースという）としての利用を想定している。

2) Hタイプ

Hタイプはエネルギー吸収性能（累積塑性歪エネルギー率や疲労性能）を高める目的で、芯材塑性化部の両端部に絞り（R部）を設け、塑性化部からリブ溶接による熱影響部を無くしたタイプである。芯材の弱軸方向はBタイプと同じく表裏全面にクリアランス調整材を貼付けており、強軸方向の空いたスペースには変形を抑制するスペーサー（芯材厚と同じ鋼板）を配置している。R部の位置で塑性化部の長さが調節可能であり、降伏耐力と軸剛性が調節し易い。よって、一般に中低層建築物よりも高いエネルギー吸収性能が求められる、きめ細かい降伏耐力と軸剛性の調節が求められる時刻歴応答解析を要する高層建築物等に用いるブレース（以降、制振ブレースという）としての利用を想定している。

2.2 クリアランス調整工法の種類

BRBSMのBタイプ、Hタイプは芯材の形状、構成部品に多少の違いがあるものの、クリアランス調整に関しては共通してブチルゴムを芯材全面に貼付ける仕様としていた。

しかし、製作性の改善に焦点を置くと、クリアランス調整材をブチルゴムに限定する必要はなく、その貼付け面も芯材全面に限定する必要はない。そこで、考えられるクリアランス調整材の貼付け位置、貼付け方法とクリアランス調整に用いる材料の一例を抽出し、Fig.3 に示す。貼付け位置は芯材以外にもモルタル表面、芯材強軸方向に配置するスペーサー（丸鋼等）の表面などが考えられ、貼付け方法は各々で全面に貼付けする、または部分的に貼付けすることが考えられる。材料は2つの鋼モルタル板と芯材を重ね合わせ、溶接で一体化するまでの間に芯材を一定の位置に保持できるものであれば採用できる可能性があり、代表的な建築材料を文献 16) から抽出して示している。ただし、現実的に採用可能な材料は組立時に芯材の位置保持が可能な硬度を有し、その一方で、地震力等による圧縮力負担時にはポアソン比による体積膨張に適切に追従、変形し、

Fig.2 Components of BRBSM

座屈モード形成時における芯材と拘束材の接触時にも芯材と拘束材間に過度な摩擦力を生じさせない硬度あるいは変形追従性、低摩擦性を有することが求められる。また、1.0mm以下の精度で微調整が可能な製作性、溶接で併合する際の熱に対する耐熱性なども求められるため、例えば芯材と同材質の鋼材や1.0mm以下の精度での微調整に手間を要する石材、ガラスなどは採用するには不適である。

2.3 クリアランス調整工法抽出のための予備実験

本論では2.2で考えられる組合せのうち、材料については従来のブチルゴム以外に高分子材料の樹脂シート（フッ素樹脂シート）に着目する。フッ素樹脂シートは従来のクリアランス調整でも使用する金尺（直尺、曲尺）、カッターのみで切断が可能であり、貼付けも手作業で行える。従来の工法と大差ない作業でクリアランス調整が可能であり、同等の製作性を実現できる可能性が高い。Fig.4に抽出したクリアランス調整工法の模式図を示し、あわせて実施した各工法の予備実験の結果をTable 1に示す。予備実験は各工法の材

Fig.3 Clearance adjustment materials and setting location of BRBSM

Fig.4 Clearance adjustment construction

料の総量、製作時間、コストを検討する目的で実施し、材料の切断、貼付け、貼付けた材料の除去およびその再利用をFig.5に示す範囲で検討している。なお、Table 1ではクリアランス調整にかかる時間とコストをCase4を基準に比率で示しており、材料単価は2020年12月時点での流通価格とし、ブチルゴムは0.19円/cm²、フッ素樹脂シートは0.2mm厚で0.50円/cm²、1.0mm厚で2.66円/cm²とし、製作単価は国交省が示す2020年3月から適用する公共工事設計労務単価表¹⁷⁾の普通作業員（東京）の単価21,500円を使用し、1日の所定労働時間を8時間として計算する。

予備実験の範囲では、ブチルゴムを芯材を模した平板全面に貼付けし、その縁に沿って材料を切断するだけのCase1の製作時間が最短となる。実際のクリアランス調整においては、芯材が長く、貼付け面積が増大すること、拘束材リブ付近や芯材中央のズレ止め付近、Hタイプにおいては塑性化部端部のR部での切断、貼付けに手間を要するため、Case1と他のCaseの製作時間の差はこれよりも小さくなる。また、前述の通り、ブチルゴムは自己粘着力が強く、一度貼付るとその位置の調整及び貼替えが困難である。実際に予備実験の範囲においても、工具を用いずに手作業でその全てを除去することは困難であり、除去した材料の再利用も不可能であった。

一方、フッ素樹脂シートを用いたCase4~6では、フッ素樹脂シートは簡単に除去でき、その再利用も可能である。位置の調整、貼替えが容易であり、これまでの課題の改善が期待できる。ただし、フッ素樹脂シートを芯材を模した平板全面に貼付けるCase4は、予備実験の範囲でも材料にかかるコストがその他のCaseの7倍以上となり、コスト面でその他のCaseに劣るため、本論では検討から除く。従って、本論では芯材または芯材の側面に配置するスペーサーにクリアランス調整材を部分的に貼付け、目標のクリアランス比を満たす工法を抽出し、検討する。

ブチルゴムを芯材全面に貼付ける従来のクリアランス調整工法をBA工法とし、フッ素樹脂シートを芯材または芯材の側面に配置するスペーサー（丸鋼、角鋼）に部分的に貼付けるクリアランス調整工法をFP工法とする。あわせて、ブチルゴムを芯材またはスペー

Fig.5 Preliminary experiment of clearance adjustment

Table 1 Results of preliminary experiments

Preliminary experiment	Clearance adjustment					Production time				Price (Excluding removal)			Clearance adjustment material reuse
	Material			Pasting Location	Pasting area	Cutting	Pasting	Cutting + Pasting	Removal	Material	Production	Total	
	Type	Thickness mm	Adhesive area cm ²										
Case1	Butyl rubber	1.0	1056	Core plate	All	0.27	0.20	0.23	Difficult	0.07	0.23	0.08	Impossible
Case2		1.0	140		Partially	1.83	0.50	1.07		0.01	1.07	0.05	
Case3		1.0	110	Spacer		1.50	0.75	1.07		0.01	1.07	0.05	
Case4	Fluororesin sheet	1.0	1056	Core plate	All	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	Possible
Case5		1.0	140		Partially	1.67	1.00	1.29	1.33	0.13	1.29	0.17	
Case6		0.2	540	Spacer		1.08	1.25	1.18	1.20	0.10	1.18	0.13	

サーに部分的に貼付けるクリアランス調整工法を BP 工法とし、本論ではブチルゴムの貼付け面積を減らしても BA 工法と同等以上のクリアランス調整が可能か確認すること、BP 工法と FP 工法で性能に差が生じるか確認することを目的に、ブチルゴムを芯材に貼付ける組合せを抽出して検討する。各工法の比較実験をもって、FP 工法、BP 工法で BA 工法と同等以上に BRBSM のクリアランス調整が可能か確認する。

2.4 クリアランス調整工法における要求性能

2.2, 2.3 の検討をもとに BRBSM を製作する上でクリアランス調整工法に求められる主な要求性能として、以下の 4 点を抽出する。

1) 製作性

クリアランス調整に要する製作の工数、製作時間が少ないこと。

2) コスト (材料の総量および製作時間)

クリアランス調整に用いる材料の総量および製作時間が少なく、低コストなクリアランス調整を実現すること。

3) 生産信頼性

クリアランス調整の際の組立後のクリアランス比の平均値が推奨値である 15% 未満に納まること。

4) 安全性 (構造性能)

クリアランス調整の工法が BRBSM に求められる構造性能 (エネルギー吸収性能 (累積塑性歪エネルギー率)), 安定した復元力特性 (圧縮引張耐力比等) を実現すること。

本論ではこれらの 4 つの要求性能を評価軸とし、実験的な検討による定量的な評価を以て、FP 工法および BP 工法が BA 工法と同等以上の性能を有することを確認する。

3. 要求性能に対する比較実験

3.1 試験体の設定

FP 工法、BP 工法と BA 工法の比較にあたり、B タイプと H タイプの試験体を設定する。試験体一覧を Table 2 に、各試験体の平面

Fig.6 BRBSM specimens

Table 2 List of specimens

Specimens	Core plate (SN400B)								Restraining part (SS400)							Mortar compressive strength N/mm ²
	Width	Thick- ness	Cross- sectional area mm ²	Width- thickness ratio	σ _y	P _y	L	L _p	B	H	Thick- ness	L _r	I	P _E	R	
	mm	mm			N/mm ²	kN	mm	mm	mm	mm	mm	mm	(× 10 ⁴)mm ⁴	kN		
B11-BA1	176	16	2816	11	291.3	820.3	2351	1251	206.4	118	3.2	1605	631	2309	2.8	60.9
B11-FP1									218.4				663	2427	3.0	
B11-FP2																
B11-FP3																
B7-BA1	112	16	1792	7	301.1	539.6	2351	1251	142.4	114	3.2	1765	421	1541	2.9	69.9
B7-FP1					289.7	519.1			572				2093	3.0	54.7	
B7-BP1																
H7-BA1																291.3
H7-FP1																

Remark: σ_y : Yield strength stress, P_y : Yield strength, P_E : Euler buckling load, R: Restraining index (P_E/P_y)

と断面を Fig.6 に示す。試験体名称は芯材のタイプ、芯材の幅厚比、クリアランス調整工法、数字の組合せとしており、例えば B タイプの幅厚比 11, BA 工法の試験体は B11-BA1, H タイプの幅厚比 7, FP 工法の試験体は H7-FP1 としている。芯材の鋼種は SN400B, 拘束材は SS400 とする。クリアランス調整材にはブチルゴム、フッ素樹脂シートを採用する。

1) B タイプ試験体

B タイプの試験体は BA 工法によるものを 2 体, FP 工法によるものを 4 体, BP 工法によるものを 1 体製作する。

B11-BA1, B7-BA1 は芯材表裏全面にブチルゴムを貼付けた試験体とし, B11-BA1 の芯材, 拘束材寸法などは既往の研究¹⁰⁾の標準的な試験体 (S1, K1 試験体) に揃え, 拘束指標 $R \approx 3.0$ とする。B7-BA1 は, 芯材の塑性化部長さ, リブの長さとは高さ, 拘束材へのリブ貫入部長さを B11-BA1 に揃え, 芯材の幅厚比を H7-BA1 に揃えている。拘束材寸法は拘束指標 $R \approx 3.0$ になるよう設定する。芯材強軸方向には各々, 丸鋼を配置する。

B7-FP1, B7-BP1 は芯材の表裏に Fig.6 に示す通り, ブチルゴムまたはフッ素樹脂シートを部分的に貼付けた試験体とする。1 か所あたりのブチルゴムまたはフッ素樹脂シートのサイズは 30mm×100mm とし, 貼付け枚数は B7-FP1 で全ての位置で 2 枚, B7-BP1 で芯材中央部と端部が 2 枚, その他の位置が 1 枚とする。芯材, 拘束材寸法などは B7-BA1 と揃え, 芯材強軸方向には各々, 丸鋼を配置する点も同じとする。

B11-FP1, B11-FP2, B11-FP3 は芯材側面の丸鋼または角鋼にフッ素樹脂シートを巻付けまたは貼付ける試験体とする。芯材寸法は B11-BA1 と同一だが, フッ素樹脂シートを巻付けまたは貼付ける芯材側面の丸鋼または角鋼の直径が増えるため, その分拘束材の幅を増やしている。巻付けまたは貼付けの仕様は, B11-FP1 は丸鋼 10φに 0.4mm 厚のフッ素樹脂シートを 7.5 回, その上に重ねて 0.2mm 厚のフッ素樹脂シートを 1.5 回巻付けている。B11-FP2 は丸鋼 16φに 0.2mm 厚のフッ素樹脂シートを 2.5 回巻付けている。B11-FP3 は角鋼 16×16mm の表に 0.4mm 厚のフッ素樹脂シートを 1 枚, 裏に 0.2mm 厚のフッ素樹脂シートを 2 枚貼付けている。巻付けまたは貼付けには市販の強力両面テープ (0.23mm 厚) を用い, それぞれ両面テープの厚みも加算したクリアランス調整材の厚みで目標のクリアランス寸法を確保するよう計画する。

2) H タイプ試験体

H タイプの試験体は BA 工法によるもの, FP 工法によるものを

各々 1 体製作する。芯材形状は B11-BA1 の形状をベースに芯材塑性化部に絞り (R 部) を設けている。芯材強軸方向のディテールが B タイプとは異なるため, 拘束材の幅も必要最低限に減じている。

H7-BA1 は芯材表裏全面にブチルゴムを貼付けた試験体とし, H7-FP1 は芯材の側面に配置するスペーサーの表裏に 0.2mm 厚のフッ素樹脂シートを 2 枚貼付けた試験体とする。

3.2 製作性

製作実験は試験体にクリアランス調整材を実際に貼付け, その工数, 製作時間等の比較を行う。クリアランス調整にかかる工数, 製作時間, コストの一覧を B11-BA1 を基準に比率とし, Table 3 に示す。BA 工法の試験体に着目すると, B11-BA1, B7-BA1 が H7-BA1 よりも製作にかかる時間に優れており, B タイプの製作に関する優位性が数値化されている。

1) B タイプ試験体

B タイプにおける BP 工法, FP 工法と BA 工法の試験体を比較すると BP 工法は材料の切断, 貼付けまたは巻付け時間とも減少しており, 貼付けまたは巻付け位置を限定することで, 製作性が向上している。FP 工法は全ての試験体で貼付けまたは巻付けの時間が減少しているが, 材料の切断においては, B7-FP1, B11-FP2 が若干の製作時間の減少となっており, B11-FP1, B11-FP3 については, 製作にかかる時間が増加した。これは複数の厚みのフッ素樹脂シートを使用していること, それにより貼付けに要する両面テープの切断回数が増えることによる。

2) H タイプ試験体

H タイプにおける BA 工法および FP 工法の試験体を比較すると, FP 工法の H7-FP1 が材料の切断および貼付けまたは巻付け時間とも減少している。H タイプは芯材塑性化部に絞り (R 部) を設けていることで, BA 工法においても材料の切断回数が多くなる。従って, B タイプと異なり, 材料の切断においても FP 工法が製作性に優れる結果となった。

以上より, B タイプの B7-BP1, B7-FP1, B11-FP2, H タイプの H7-FP1 で製作性の改善を確認し, BP 工法と FP 工法が, BA 工法同等以上の製作性を実現できることを確認した。

3.3 コスト (材料の総量および製作時間)

BRBSM のコストはクリアランス調整に用いる材料の総量および製作時間を用い, 実際にコストを算出して比較検討する。Table 3 にクリアランス調整に用いる材料の総量および製作時間, コストを B11-BA1 を基準に比率で示す。

Table 3 Economic performance for fabricating clearance adjustment material

Specimens	Clearance adjustment material			Processing of clearance adjustment material				Production time			Price		
	Materials	Thickness mm	Adhesive area cm ²	Cutting		Pasting		Cutting	Pasting	Total	Material	Production	Total
				Number	Length	Number	Area						
B11-BA1	Butyl rubber	1.0	5491.8	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
B11-FP1	Fluororesin sheet	0.2, 0.4	3950.0	1.21	0.62	5.63	0.72	2.55	0.75	1.31	4.29	1.31	2.56
B11-FP2		0.2	1350.0	0.61	0.25	1.56	0.25	0.91	0.44	0.58	0.66	0.58	0.61
B11-FP3		0.2, 0.4	450.0	1.64	0.64	1.88	0.08	2.46	0.39	1.03	0.33	1.03	0.74
B7-BA1	Butyl rubber	1.0	3437.4	1.00	0.96	1.00	0.63	0.95	0.93	0.93	0.63	0.93	0.80
B7-FP1	Fluororesin sheet	0.2	1200.0	1.50	0.55	2.50	0.22	0.89	0.50	0.62	0.58	0.62	0.60
B7-BP1	Butyl rubber	1.0	1200.0	0.36	0.38	2.00	0.22	0.44	0.17	0.26	0.22	0.26	0.24
H7-BA1		1.0	4339.4	1.14	0.94	1.00	0.79	1.59	1.42	1.47	0.79	1.47	1.18
H7-FP1		0.2	1200.0	1.50	0.55	2.50	0.22	0.89	0.47	0.60	0.58	0.60	0.59

なお、材料単価、製作単価は2.3と同様とし、フッ素樹脂シートの0.4mm厚は2020年12月時点での流通価格である1.26円/cm²を用いて計算し、一例を示す。

1) Bタイプ試験体

BタイプにおけるFP工法、BP工法とBA工法の試験体を比較するとB7-BP1、B7-FP1、B11-FP2、B11-FP3でクリアランス調整にかかる合計費用が減少している。B11-FP1については、1か所あたりのクリアランス調整材の巻付け回数が多いこと、複数の厚みを使用していることなどが原因で材料費および製作費がともに増加している。

2) Hタイプ試験体

HタイプにおけるBA工法およびFP工法の試験体を比較すると、FP工法のH7-FP1がクリアランス調整にかかる材料費、製作費ともに減少している。とくにH7-FP1については、BタイプのB7-BA1と比較しても材料費、製作費ともに減少しており、FP工法を用いることでHタイプでも製作性に優れるBタイプと同等以上の製作性を実現し、製作にかかるコストの低減が図れることを確認した。

3.4 生産信頼性

生産信頼性に関する実験は試験体を実際に組立てし、組立後のクリアランス比の平均値を推奨値とした15%未満に納めることを確認する。組立は特別な機器、重機を使用せず、人力で実施する。拘束材の長さ方向の中央部と両端部の計3か所をC字形の万力で同程度に締付け、加圧にて調整する。モルタル面の平滑度は組立後寸法に影響しないよう、各試験体で同等に仕上げる。

クリアランスの計測位置をFig.6に示す。①から⑭の片側7か所、両側14か所とし、Bタイプは拘束材中央から両側に各々190mmピッチで、Hタイプは210mmピッチで計測位置を設ける。計測内容はFig.7に示す芯材厚 t 、スペーサー厚 t_s 、鋼モルタル板高さ H_{m1} 、 H_{m2} 、試験体組立後の H_a と組立前のクリアランス調整材の厚み C_b とし、ノギスを用いて0.01mm単位まで計測する。

各試験体の組立前（加圧調整前）のクリアランス比を芯材厚 t 、クリアランス調整材を貼付けまたは巻付けする部品の厚み t_1 （芯材 t

Fig.7 Contents of measurement

またはスペーサー厚 t_s), クリアランス調整材の厚み C_b とあわせてTable 4に示し、組立後のクリアランス比をTable 5に示す。組立前のクリアランス比は C を $C_b + t_1 - t$ で計算し、組立後のクリアランス比は C を $H_a - (t + H_{m1} + H_{m2})$ にて計算している。

試験体組立後のクリアランス比の平均値は全て推奨値以内に納まっている。あわせて組立前後の値を比較すると、BA工法で0.69から0.80、FP工法で0.29から0.82、BP工法で0.36、クリアランス比が小さくなっており、各工法で最低でも18%、クリアランス比を調整することができる。なお、B11-FP1は0.29、B7-BP1は0.36と組立後にクリアランス比が特に小さくなっているが、これは組立前のクリアランス調整材の厚みが他の試験体よりも厚いこと、部分貼りではクリアランス調整材とモルタル表面の接触面も小さいため、同程度に加圧して調整した際の縮み代が大きいことによる。

標準偏差を比較すると、BA工法は1.32%から2.18%、BP工法は2.34%、FP工法は1.04%から2.28%となっており、バラツキの最大値はほぼ同等の値となっている。以上より、FP工法、BP工法でも、BA工法と同等のクリアランス調整が可能である。

3.5 安全性（構造性能）

組立後の試験体を既往の研究と同様に水平載荷し、安全性（構造性能）を確認する。

1)実験モデル

既往の研究⁷⁾と同じくプレースの組込まれた中小建築物が水平力を受け、せん断変形した場合を想定する。試験体の全長(2351mm)とその塑性化部長さ(1251mm)を考慮すると、芯材に生じる軸方向歪は層間変形角とほぼ等しくなる。すなわち、中地震動に対応して想定される層間変形角1/200相当の芯材の軸方向歪は0.50%となり、大地震動に対応して想定される層間変形角1/100相当の芯材の軸方向歪は1.00%となる。

Table 4 Clearance ratio before assembly

Specimens	Clearance ratio %	Measured value			
		t mm	t _s mm	t ₁ mm	C _b mm
B11-BA1	12.42	16.10	10.00	16.10	2.00
B11-FP1	7.39			10.00	7.29
B11-FP2	7.02			16.00	1.23
B11-FP3	8.32		15.95	1.49	
B7-BA1	12.42		11.00	16.10	2.00
B7-FP1	10.68	16.10		1.72	
B7-BP1	24.46	16.35		4.00	
H7-BA1	12.42	16.10	10.00	16.10	2.00
H7-FP1	7.27		15.55	15.55	1.72

Remark : t : Core plate thickness, t_s : Spacer thickness
 t_1 : Thickness of parts to which clearance adjustment material is pasted
 C_b : Clearance adjustment material thickness

Table 5 Clearance ratio after assembly

Specimens	Clearance ratio (%)																Clearance ratio (after assembly (average) / before assembly)
	Measured position														Average	Standard deviation	
	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪	⑫	⑬	⑭			
B11-BA1	11.46	13.08	10.72	10.90	10.34	9.91	6.29	12.77	10.40	8.29	7.48	7.29	8.41	6.98	9.60	2.08	0.77
B11-FP1	1.80	2.05	1.43	2.55	2.17	1.49	0.75	3.60	5.84	1.06	0.12	2.36	3.11	1.68	2.14	1.35	0.29
B11-FP2	6.21	5.09	5.28	5.84	6.09	3.91	3.48	4.78	3.66	4.16	2.73	3.60	4.84	5.47	4.65	1.04	0.66
B11-FP3	8.88	6.96	6.52	2.42	4.66	4.41	3.17	9.50	7.45	9.13	6.77	7.89	9.63	8.70	6.86	2.28	0.82
B7-BA1	10.53	12.21	11.96	9.42	7.99	10.10	8.05	10.84	14.93	11.34	7.68	6.51	10.16	7.81	9.97	2.18	0.80
B7-FP1	9.29	10.78	10.47	10.22	8.12	8.49	8.49	4.71	9.11	9.42	8.49	6.94	2.48	6.88	8.13	2.20	0.76
B7-BP1	9.72	11.56	8.81	7.34	9.66	9.05	3.98	10.21	7.58	7.16	10.03	13.09	8.69	4.77	8.69	2.34	0.36
H7-BA1	11.30	8.63	9.25	8.76	9.07	9.44	7.33	9.25	9.38	7.95	5.84	6.83	9.32	7.39	8.55	1.32	0.69
H7-FP1	3.79	5.59	5.65	8.88	5.40	5.09	4.47	3.17	3.48	4.41	4.35	4.66	3.23	1.74	4.57	1.59	0.63

Fig.8 Loading equipment

Table 6 Loading cycles

No	$\epsilon(\%)$	Number of loading
1	$\epsilon_y / 3$	1
2	$2\epsilon_y / 3$	1
3	0.25	1
4	0.50	2
5	0.75	2
6	1.00	5
7	1.50	2
8	2.00	2
9	2.50	2
10	3.00	2

(a) B11-BA1

(d) B11-FP3

(g) B7-FP1

(b) B11-FP1

(e) B7-BA1

(h) H7-BA1

(c) B11-FP2

(f) B7-BP1

(i) H7-FP1

Fig.9 P/Py—strain curve

2) 載荷方法

載荷装置を Fig.8 に示す。試験体は 45 度の角度で設置し、載荷柱の柱脚部はピン支持、柱頭部には面外方向の変形を拘束するためのパンタグラフを設置する。加力は 1000kN アクチュエータを使用し、軸方向変位制御による正負交番増繰返し載荷とする。載荷パターンは既往の研究と同じく Table 6 としており、本論では 3.0% 歪 2 回目までの性能を確認する。なお、所定の歪振幅において、圧縮または引張側の耐力が最大耐力の 80% まで低下、または引張破断した場合はその時点で実験を終了する。試験体の軸方向変位 δ は、芯材の第一ボルト孔間 (Fig.8, A~B 間) の変位を試験体の両サイドに設置した変位計で測定し、その平均値とする。

3) 実験結果

各試験体の降伏耐力比 (P/P_y) と芯材の軸歪 (ϵ = 軸変形量/塑性化部長さ) の関係を Fig.9 に示す。全ての試験体で 3.0% 歪 2 回目載荷まで安定した復元力特性を示している。

次に、各試験体の圧縮引張耐力比 α (各軸歪時における圧縮時の最大耐力 P_c を引張時の最大耐力 P_t で除した値) を Fig.10 に示す。圧縮引張耐力比 α の値については、現時点で明確な構造規定、規・基準は存在せず、その上限や下限に関する決まりがない。ただし、その値が過度に上昇した場合、例えば K 形ブレース付き骨組では引張ブレースと圧縮ブレースの軸力差による鉛直力が梁に付加せん断力として作用し、設計時の想定を外れる恐れがある。ここで、現行の構造設計で考えると、梁の継手部の強度確保には一般に保有耐力接合が用いられる。保有耐力接合における安全率 α の最低値は継手部の曲げ・せん断に対し、400 ニュートン級炭素鋼で 1.2 倍、490 ニュートン級炭素鋼に対し、1.1 倍となる。本論ではこの値を参考とし、 $\alpha = 1.10$ 未満を設計に与える影響が少ない (仮に大梁に 490 ニュートン級炭素鋼が用いられた場合でも、付加せん断力が安全率の中に収まる) 値として比較、検討する。

Compression-to-tension strength ratio

Fig.10 Compression-to-tension strength ratio

現行の構造設計で確認される層間変形角 (令第 82 条の 2) 1/200 相当にあたる芯材の軸方向歪 0.50% 時において、各試験体の圧縮引張耐力比 α は 1.055 から 0.985 となる。あわせて、現行の構造設計で確認される鉄骨造の大地震動時の層間変形角 1/100 相当にあたる芯材の軸方向歪 1.00% 時において、圧縮引張耐力比 α は 1.026 から 1.077 となる。それぞれ、1.10 未満となり、FP 工法、BP 工法も実用上で問題ないものとする。

なお、個別の試験体ごとに確認すると、B11-FP1 はクリアランス比の最小値で推奨値 (1.5%) を下回る箇所があるが、その圧縮引張耐力比 α は他の FP 工法の値と同等か、それ以下となる。これは、推奨値を下回った計測位置の対となる計測位置 (⑩に対して④、⑦に対して⑭) のクリアランス比が推奨値を満たすため、同一断面でクリアランスが完全に閉塞せず、過度な摩擦力が生じなかったためと考える。また、H7-FP1 は軸方向歪 2.50% 以上で他の試験体よりも顕著に圧縮引張耐力比 α が上昇した。これは芯材塑性化部の両端部の R 部とリブ先端部までの間に無補剛区間 (I 形断面) があるこ

とによる。 $P/Py-\varepsilon$ 関係によると、2.5%至 1 回目の圧縮側で P/Py の値が 1.59 となり、I 形断面と塑性化部の断面積の比率（幅厚比 11 / 幅厚比 7 $\div$ 1.57）を上回る。本論ではこの部位にクリアランス調整材を設けていないため、この部位に塑性化が生じた際、座屈モードの進展等による芯材とモルタル面の摩擦が生じ、圧縮力が上昇したものと考える。

最後に、累積塑性歪エネルギー率 ω と拘束指標 R の関係を Fig.11 に示す。 ω は復元力特性から算出した累積塑性歪エネルギー E_t を芯材の降伏荷重 P_y と弾性限界変形量 δ_y を乗じた値 W_y で除した無次元化量であり、拘束指標 R は拘束材のオイラー座屈荷重 P_E を芯材の降伏荷重 P_y で除した値である。Fig.11 には既往の研究⁹⁾で提案した性能評価下限式（ $\omega_r=150\times R$ （ $R\leq 6$ ））もあわせて示している。各試験体とも性能評価下限値を上回る性能を示しており、エネルギー吸収性能についても、BP 工法および FP 工法で BA 工法とほぼ同等の性能を実現することが可能である。

3.6 総合評価

製作性、コスト（材料の総量および製作時間）、生産信頼性、安全性（構造性能）の検討結果をもとに総合評価を行う。本論における評価基準は以下の通り設定する。

1) 製作性

3.2 で検討したクリアランス調整に要する製作時間の合計を用い、その値の逆数とする。

2) コスト（材料の総量および製作時間）

3.3 で検討したクリアランス調整材のコストの合計を用い、その値の逆数とする。

3) 生産信頼性

3.4 で検討した試験体組立後のクリアランス比の平均値が品質管理上の推奨値（15.0%）を上回る場合には推奨値（15.0%）を試験体組立後のクリアランス比の平均値で除して用いる。下回る場合には 1.00 とする。

4) 安全性（構造性能）

3.5 で検討した各試験体の累積塑性歪エネルギー率 ω が性能評価下限値を上回る場合 1.00 とし、各試験体の累積塑性歪エネルギー率 ω が性能評価下限値を下回る場合は各試験体の累積塑性歪エネルギー率 ω を性能評価下限値 ω_r で除して用いる。

なお、総合評価においては、製作性、コスト、生産信頼性、安全性（構造性能）の各項目に対し、使用する状況に応じた重み係数を乗じることが適切と考えるが、重み係数は使用する状況に左右され、一概に決定することが困難である。従って、本論では重み係数はそれぞれ 1.00 とし、総合評価の評価点は各項目の評価点を単純累加することで算出する。

総合評価の結果を Table 7 に示す。本論の評価では B タイプについて B7-BP1、H タイプについて H7-FP1、全試験体において B7-BP1 が最も優れた評価となった。ともに製作性、コストが従来の BA 工法よりも向上し、安全性（構造性能）においても従来の BA 工法と同等の構造性能を有することを確認している。また、B タイプの FP 工法に着目すると、B11-FP2、B7-FP1 が H タイプの H7-FP1 とほぼ同等の評価になっている。よって、本論で検討した FP 工法、BP 工法は従来の BA 工法と同様に耐震、制振ブレースの製作に用いることが可能なクリアランス調整工法であると考えられる。

Fig.11 Cumulative plastic strain energy ratio and restraining index

Table 7 Comprehensive evaluation

Specimens	Workability	Cost	Reliability	Structural safety	Comprehensive evaluation
B11-BA1	1.00	1.00	1.00	1.00	4.00
B11-FP1	0.76	0.39	1.00	1.00	3.15
B11-FP2	1.72	1.64	1.00	1.00	5.36
B11-FP3	0.97	1.35	1.00	1.00	4.32
B7-BA1	1.08	1.25	1.00	1.00	4.33
B7-BP1	3.85	4.17	1.00	1.00	10.01
B7-FP1	1.61	1.67	1.00	1.00	5.28
H7-BA1	0.68	0.85	1.00	1.00	3.53
H7-FP1	1.67	1.69	1.00	1.00	5.36

4. 実例を踏まえた材料の総量および製作時間に関する一検討

BA 工法の BRBSM で施工された建物のクリアランス調整工法を FP 工法、BP 工法に置き替えた場合を想定し、材料の総量および製作時間に関する一検討を行う。3.3 の検討結果から求めたクリアランス調整の製作に関する単価を Table 8 に示す。BA 工法はロール状のブチルゴムを芯材に必要なだけ送り出して貼付け、都度カットする製作手順を取ることから、切断時間と貼付け時間およびその合間の時間を厳密に分けることが困難となる。よって、ここでは製作にかかる合計の単価のみ示している。以降、本単価を利用して実案件を踏まえた材料の総量および製作時間に関する一検討を行う。

4.1 B タイプの BRBSM を用いた鉄骨造中層建築物

BA 工法（B11-BA1 と同一のクリアランス調整工法）の採用された鉄骨造（一部 RC 造）、地上 5 階、延べ面積約 11,500m² の建物で検討する。BRBSM リストを Table 9 に示す。想定建物の BRBSM のクリアランス調整工法を BA 工法から FP 工法、BP 工法に置き替えた場合のコストを比較する。検討は BA 工法を想定したケースで B11-BA1 の製作単価を、FP 工法を想定したケースで B11-FP3 の製作単価を、BP 工法を想定したケースで B7-BP1 の製作単価を各々使用する。また、材料単価は 2.3、3.3 で用いた 2020 年 12 月時点での流通価格を使用する。検討結果を Table 10 に示す。検討結果は BA 工法を基準に比率で示している。BP 工法とした場合、材料費が 0.11、製作費が 0.14、合計費用が 0.13 まで低減し、FP 工法とした場合、材料費が 0.43、製作費が 0.81、合計費用が 0.65 に低減する。B タイプのクリアランス調整において、FP 工法、BP 工法とも、コストの削減が可能であることを確認した。

4.2 H タイプの BRBSM を用いた鉄骨造超高層建築物

BA 工法（H7-BA1 と同一のクリアランス調整工法）の地上 22 階、延べ面積約 50,500m² の鉄骨造（一部 SRC、RC 構造）建物で検討

Table 8 Price for fabricating clearance adjustment material

Specimens	Price (yen / cm ²)		
	Cutting	Pasting	Total
B11-BA1	—	—	0.25
B11-FP1	0.28	0.18	0.46
B11-FP2	0.29	0.31	0.60
B11-FP3	2.37	0.84	3.20
B7-BA1	—	—	0.38
B7-BP1	0.16	0.14	0.30
B7-FP1	0.32	0.40	0.72
H7-BA1	—	—	0.47
H7-FP1	0.32	0.38	0.70

Table 9 BRBSM lists of the mid-rise steel building

Members	Core plate				Restraining part				Quantity
	Width	Thick-ness	Py	L	H	B	Thick-ness	Lr	
	mm	mm	kN	m	mm	mm	mm	m	
V1	96	16	500	3.3	140	186	6	2.6	34
V2	144	16	750	3.5	140	190	9	2.8	47
V2A	144	16	750	3.9	140	196	12	3.2	12
V3	162	19	1000	3.5	140	220	12	2.8	8
V3A	162	19	1000	3.6	150	214	9	2.9	8
V4	202	19	1250	3.6	150	254	9	2.8	12
V4A	202	19	1250	3.9	170	254	9	3.0	1
V11	96	16	500	3.6	150	186	6	2.9	26
V12	144	16	750	3.6	150	184	6	2.9	15
V12A	144	16	750	4.0	150	190	9	3.3	19
V13	162	19	1000	3.7	150	214	9	3.0	22
V13A	162	19	1000	4.1	150	220	12	3.4	10
V14	202	19	1250	3.7	150	254	9	2.9	8

Table 10 Cost evaluation of the mid-rise steel building

Clearance adjustment construction	Clearance adjustment		Price		
	Material	Quantity m ²	Material	Production	Total
BA	Butyl rubber (1.0mm)	182.2	1.00	1.00	1.00
FP	Fluororesin sheet (0.4mm)	11.6	0.43	0.81	0.65
BP	Butyl rubber (1.0mm)	20.5	0.11	0.14	0.13

Table 11 BRBSM lists of the super-high-rise steel building

Members	Core plate				Restraining part				Quantity
	Width	Thick-ness	Py	L	H	B	Thick-ness	Lr	
	mm	mm	kN	m	mm	mm	mm	m	
BR10	168	28	1000	3.3	180	300	9	2.30	12
BR15	209	32	1500	3.3	184	357	9	2.10	16
BR20	247	36	2000	3.3	198	411	9	2.20	29
BR25	278	40	2500	3.8	264	460	9	2.60	52
BR30	334	40	3000	4.5	334	516	9	3.20	42

Table 12 Cost evaluation of the super-high-rise building

Clearance adjustment construction	Clearance adjustment		Price		
	Material	Quantity m ²	Material	Production	Total
BA	Butyl rubber (1.0mm)	265.8	1.00	1.00	1.00
FP	Fluororesin sheet (0.4mm)	65.6	1.68	0.37	0.74
BP	Butyl rubber (1.0mm)	26.0	0.10	0.06	0.07

する。BRBSM リストを Table 11 に示す。

以下、4.1 と同様に BRBSM のクリアランス調整工法を BA 工法から FP 工法, BP 工法に置き替えた場合のコストを比較する。検討は BA 工法を想定したケースで H7-BA1 の製作単価を, FP 工法を想定したケースで H7-FP1 の製作単価を, BP 工法を想定したケースで B7-BP1 の製作単価を各々使用する。材料単価は 2.2, 2.3 で用いた 2020 年 12 月時点での流通価格を使用する。検討結果を Table12 に示す。検討結果は BA 工法を基準に比率で示している。

FP 工法を採用した場合, 材料費は 0.68 増加しているが, 製作費が 0.63, 合計のコストが 0.26 低減し, H タイプのクリアランス調整においてもコスト削減が可能であることを確認した。BP 工法とした場合, 材料費が 0.10, 製作費が 0.06, 合計費用が 0.07 まで低減することを確認した。4.1 および 4.2 の検討より, FP 工法, BP 工法は BRBSM のタイプによらず, コストの削減が期待できることを確認した。

5. 結

本論では鋼モルタル板を用いた座屈拘束ブレースを対象に, 製作性の課題のうち, 貼付けの作業性を改善するクリアランス調整工法に関する検討を行い, 以下の知見を得た。

- 1) FP 工法, BP 工法で BA 工法と同等以上に座屈拘束ブレースのクリアランスを調整することが可能である。座屈拘束ブレースのクリアランス調整においては, クリアランス調整材を必ずしも芯材全面に貼付ける必要はなく, 芯材の一部, または芯材周囲のスペーサー (丸鋼または角鋼) に貼付け, 適切にクリアランスを確保することで BA 工法と同等以上の製作性, コスト (材料の総量および製作時間), 生産信頼性, 安全性 (構造性能) を実現できる。
- 2) FP 工法のうち製作性に最も優れるのは, 太径の丸鋼にフッ素樹脂シートを 1 回巻付ける工法であり, 試験体 B11-FP2 となる。
- 3) FP 工法のうちコスト (材料の総量および製作時間) に最も優れるのは, スペーサーにフッ素樹脂シートを貼付ける工法であり, 試験体 H7-FP1 となる。
- 4) 生産信頼性において, FP 工法, BP 工法で BA 工法と同様に推奨値のクリアランス比 15% を満たすことができる。
- 5) 安全性 (構造性能) において, FP 工法, BP 工法, BA 工法はほぼ同等となり, いずれのクリアランス調整工法を用いても耐震, 制振ブレースとして使用できる性能を有する。
- 6) クリアランス調整工法に対する要求性能として, 製作性, コスト (材料の総量および製作時間), 生産信頼性, 安全性 (構造性能) を総合評価した結果, B タイプは B7-BP1, H タイプは H7-FP1 が優れている。
- 7) 実例を踏まえた材料の総量および製作時間に関する一検討においては, BA 工法を FP 工法に置き替えることで, クリアランス調整にかかる製作費を B タイプで 19%, H タイプで 63% 低減することができる。同様に BA 工法を BP 工法に置き替えることで, クリアランス調整にかかる製作費を B タイプで 86%, H タイプで 94% 低減することができる。

謝辞

本実験の試験体の計画，製作にあたり，有限会社 ISBT の村井正敏氏にご協力頂きました。また，本実験の遂行にあたり，神奈川大学工学部建築学科教務技術職員の佐藤宏貴氏，神奈川大学大学院生の瀧澤裕貴氏にご協力頂きました。ここに記して深謝いたします。

参考文献

- 1) Architectural Institute of Japan : Recommended Provisions for Seismic Damping Systems applied to Steel Structures, 2014.11
日本建築学会編：鋼構造制振設計指針，2014.11
- 2) Architectural Institute of Japan : AIJ Recommendations for Stability Design of Steel Structures, 2018.2
日本建築学会編：鋼構造座屈設計指針，2018.2
- 3) Fujimoto M., Wada A., Saeki E., Watanabe A., Hitomi Y. : A STUDY ON THE UNBONDED BRACE ENCASED IN BUCKLING-RESTRAINING CONCRETE AND STEEL TUBE, Journal of Structural Engineering, Vol.34B, pp.249-258, 1988.3
藤本盛久，和田章，佐伯英一郎，渡辺厚，人見泰義：鋼管コンクリートにより座屈を拘束したアンボンドブレースに関する研究，構造工学論文集，Vol.34B, pp.249-258, 1988.3
- 4) Imai K., Yakiyama K., Tada M., Kuwahara S., Yoneyama T. : A study on the stiffening effect of the Double Tube (Part.1 The procedure of the longitudinal loading test), Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, Structures: II, pp.1281-1282, 1991.7
今井克彦，脇山広三，多田元英，桑原進，米山隆也：二重鋼管の補剛効果に関する研究（その1，軸方向加力実験方法），日本建築学会大会学術講演梗概集，構造-II，pp.1281-1282, 1991.7
- 5) Takeuchi T., Suzuki K., Marukawa T., Kimura Y., Ogawa T., Sugiyama T., Kato S. : PERFORMANCES OF COMPRESSIVE TUBE MEMBERS WITH BUCKLING RESTRAINER COMPOSED OF MORTAL INFILLED STEEL TUBE, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), No.590, pp.71-78, 2005.4
竹内徹，鈴木一弁，丸川智輝，木村祥裕，小河利行，杉山武，加藤史郎：モルタル充填鋼管により座屈拘束された圧縮鋼管部材の変形性能，日本建築学会構造系論文集，第590号，pp.71-78, 2005.4
- 6) Jhon Alexander Segura Mateus, Tagawa H., Xingchen Chen : Buckling-restrained brace using round steel bar cores restrained by inner round steel tubes and outer square steel tube, Engineering Structures, Vol.197, 15, 109379, 2019.10
- 7) Murai M., Kobayashi F., Noda T., Iwata M. : Experimental Study on Buckling-restrained Braces Using Steel MortarPlanks, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), No.569, pp.105-110, 2003.7
村井正敏，小林史興，野田隆博，岩田衛：鋼モルタル板を用いた座屈拘束ブレースの実験的研究，日本建築学会構造系論文集，第569号，pp.105-110, 2003.7
- 8) Yoshida K., Nishizawa H., Kishikawa I. : PROPER RANGE OF CLEARANCE FOR THE DESIGN OF THE BUCKLING RESTRAINED BRACE COVER, Journal of Structural Engineering, Vol.64B, pp.237-241, 2018.3
吉田競人，西澤秀喜，岸川樹生：座屈拘束ブレース拘束材設計式のための適切な間隙，構造工学論文集，Vol.64B, pp.237-241, 2018.3
- 9) IWATA Mamoru, MURAI Masatoshi : Buckling-restrained brace using steel mortar planks -performance evaluation as a hysteretic damper-, EARTHQUAKE ENGINEERING AND STRUCTURAL DYNAMICS, pp.1807-1818, 2006
- 10) Iwata M., Murase R., Izumita Y., Murai M. : Experimental Study on Buckling-restrained Braces Using Steel MortarPlanks -Part3 Buckling behavior of the core plate-, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), No.611, pp.133-139, 2007.1
岩田衛，村瀬亮，和泉洋次，村井正敏：鋼モルタル板を用いた座屈拘束ブレースの実験的研究－その3 芯材の座屈挙動－，日本建築学会構造系論文集，第611号，pp.133-139, 2007.1
- 11) Murase R., Murai M., Iwata M. : Experimental Study on Buckling-restrained Braces Using Steel MortarPlanks -Part4 Effects on core plate width-thickness ratio, restraining force and cross section details-, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), No.620, pp.117-124, 2007.10
村瀬亮，村井正敏，岩田衛：鋼モルタル板を用いた座屈拘束ブレースの実験的研究－その4 芯材幅厚比と拘束力および断面ディテールの影響－，日本建築学会構造系論文集，第620号，pp.117-124, 2007.10
- 12) Midorika M., Sasaki D., Asari T., Murai M., Iwata M. : Experimental Study on Buckling-restrained Braces Using Steel MortarPlanks -Effects of the clearance between core plate and restraining member on compressive strength and estimation of the number of buckling mode related to compressive strength-, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), Vol.75, No.653, pp.1361-1368, 2010.7
緑川光正，佐々木大輔，麻里哲広，村井正敏，岩田衛：鋼モルタル板を用いた座屈拘束ブレースの実験的研究－クリアランスの圧縮耐力への影響と圧縮耐力に応じた座屈モード数の評価，日本建築学会構造系論文集，第75巻，第653号，pp.1361-1368, 2010.7
- 13) Iizuka R., Koyano K., Midorika M., Iwata M. : Study on Buckling-restrained Braces Having Large Cumulative Plastic Strain Energy Ratio, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), Vol.79, No.701, pp.1015-1023, 2014.7
飯塚亮太，小谷野一尚，緑川光正，岩田衛：累積塑性歪エネルギー率の大きな座屈拘束ブレースの研究，日本建築学会構造系論文集，第79巻，第701号，pp.1015-1023, 2014.7
- 14) Koyano K., Miyagawa K., Koide S., Kitamura W., Iwata M. : Study on the Buckling-restrained Brace Having High Fatigue Performance, AIJ Journal of Technology and Design, Vol.21, No.47, pp.137-140, 2015.2
小谷野一尚，宮川和明，小出秀一，喜多村亘，岩田衛：疲労性能の高い座屈拘束ブレースの研究，日本建築学会技術報告集，第21巻，第47号，pp.137-140, 2015.2
- 15) Koyano K., Tadao N., Midorika M., Iwata M. : FATIGUE PERFORMANCE OF THE BUCKLING-RESTRAINED BRACE USING STEEL MORTAR PLANKS, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), Vol.82, No.736, pp.921-928, 2017.6
小谷野一尚，中込忠男，緑川光正，岩田衛：鋼モルタル板を用いた座屈拘束ブレースの疲労性能の研究，日本建築学会構造系論文集，第82巻，第736号，pp.921-928, 2017.6
- 16) Architectural Institute of Japan : Kenchikuzairyouyoukyouzai (Teaching material for Construction materials), 1990.3
日本建築学会編：建築材料用教材，1990.3
- 17) Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism Homepage, Accessed 2021.3, <https://www.mlit.go.jp/report/press/content/001328838.pdf>, accessed 2021.3.5
国土交通省ホームページ（令和2年3月から適用する公共工事設計労務単価について），参照 2021.3.5

CLEARANCE ADJUSTMENT CONSTRUCTION FOR CORE PLATE AND RESTRAINING PART OF THE BUCKLING-RESTRAINED BRACE USING STEEL MORTAR PLANKS

Makoto NAKAMURA ^{*1}, *Masanori FUJITA* ^{*2} and *Mamoru IWATA* ^{*3}

^{*1} Research Assoc., Dept. of Architecture and Building Eng., Kanagawa Univ., M.Eng.

^{*2} Prof., Dept. of Architecture and Building Eng., Faculty of Eng., Kanagawa Univ., Dr.Eng.

^{*3} Prof. Emeritus, Dept. of Architecture and Building Eng., Kanagawa Univ., Dr.Eng.

The clearance between the core plate and mortar of the buckling-restrained brace is a factor that has a significant influence on its failure mode status and mechanical behavior. The buckling-restrained brace using steel mortar planks (BRBSM) have been put into practical use in two types, the basic type (B type) and the high-performance type (H type), which have different core plate shapes. In both cases, the butyl rubber is pasted to the entire surface of the core plate as the clearance adjustment material (BA construction). This material has excellent constructability, but it has the disadvantage of being difficult to move after being pasted because it has a strong adhesive force.

In this study, the clearance adjustment construction for a BRBSM is improved. Using fluororesin sheets in addition to butyl rubbers, we propose a construction wherein a clearance adjustment material is pasted to a part of the core plate or spacers to facilitate attachment. Further, the workability, cost performance, reliability for fabrication, and structural performance for the safety of the proposed clearance adjustment construction using fluororesin sheets (FP construction) or butyl rubbers (BP construction) are examined through construction and structural tests. In a comprehensive evaluation, the proposed clearance adjustment constructions are compared and examined. The following results are obtained.

- 1) The clearance of the buckling-restrained brace can be adjusted through the FP or BP construction equal to or better than that of the BA construction. When adjusting the clearance of the buckling-restrained brace, pasting the clearance adjustment material to the entire surface of the core plate is not always necessary. The results confirmed that the workability, cost performance, reliability for fabrication, and structural performance for safety benchmarks could be realized.
- 2) The FP construction with the best workability is the one wherein fluororesin sheets is wound once around a large-diameter round steel bar (B11-FP2).
- 3) The FP construction with the best cost performance is the one wherein fluororesin sheets is pasted to the spacer (H7-FP1).
- 4) The reliability for fabrication is almost the same for FP, BP, and BA constructions. BRBSM that satisfies the recommended value of 15% can be manufactured.
- 5) The structural performance for safety is almost the same for FP, BP, and BA constructions, and each have a performance that can be used as earthquake-resistant and seismic-response-controlled braces.
- 6) The result of a comprehensive evaluation of the workability, cost performance, reliability for fabrication, and structural performance for the safety as the required performance for the clearance adjustment construction indicate that B7-BP1 is the best B type and H7-FP1 is the best H type.
- 7) By replacing the BA construction with the FP construction considering the building steel structure, the fabrication price for clearance adjustment can be reduced by 19% for the B type and 63% for the H type. Similarly, by replacing the BA construction with the BP construction, the fabrication price for clearance adjustment can be reduced by 86% for the B type and 94% for the H type.

(2021 年 3 月 10 日原稿受理, 2021 年 9 月 13 日採用決定)