鉄骨枠付き座屈拘束ブレースを用いたアンカーレス構法の研究

THE ANCHOR-LESS STRUCTURAL SYSTEM USING A BUCKLING-RESTRAINED BRACE AND STEEL-FRAME

菊池剛和 — * 1 小谷野一尚 — * 2
坂田弘安 — * 3 岩田 衛 — * 4

Takamasa KIKUCHI — * 1 Kazuhisa KOYANO — * 2
Hiroyasu SAKATA — * 3 Mamoru IWATA — * 4

キーワード：
アンカーレス, 座屈拘束ブレース, 鉄骨枠, 楔, RC 構造

Keywords:
Anchorless, Buckling-restrained brace, Steel-frame, Wedge, Reinforced concrete structure

The buckling-restrained braces using the steel mortal planks (BRBSM) is applied to reinforced concrete structure (RC structure). In general, it is difficult to design and construction for buildings that integrated RC structure with the buckling-restrained braces. Therefore, in this paper, we report the anchor-less structural system using bedplates and wedges. Structural performance of this system is confirmed by the experiments using specimens of low strength type and high strength type. According to the tests, the effectiveness of this system is verified. However, the improvement of the steel frame is necessary to more follow for the deformation of the RC structure.

1. 序

従来の鉄筋コンクリート構造（以下、RC 構造と呼ぶ）では、柱、梁、耐力壁などの主体構造が損傷することで地震エネルギーの吸収を行っており、大地震後の継続利用等が困難であった。建物の財産保持の観点から主体構造の損傷を抑える必要がある。

制振部材を用いることで損傷を抑える損傷制御構造がある。しかしながら、鋼構造では、耐震部材及び制振部材として座屈拘束ブレースが多用されているが、RC 構造ではほとんどない。

著者らは既往の研究で鋼モルタル板を用いた座屈拘束ブレース（以下 BRBSM : Buckling Restrained Braces using Steel Mortal planks と呼ぶ）を RC 骨組に適用するため、スタッド付きガセットプレートを柱、梁に埋込む接合部の設計法を研究した¹⁾。しかし、この構法では BRBSM が主体構造と一体化されているため、補修に手間がかかり、制振部材を含めた設計が必要であるため複雑になる。

更に、著者らは、RC 構造に鉄骨枠付き BRBSM をはめ込むだけのアンカーレス構法の提案と実験を行った²⁾。アンカーレス構法を用いることで、RC 骨組にガセットプレート等を埋め込む必要がなく、分離が可能で、設計が容易である。そのため、RC 骨組と BRBSM を要求に合わせ各々設計でき、設計が明確になる。また、巨大地震により BRBSM が損傷を受けた場合、BRBSM のみ、あるいは鉄骨枠ごと取り替えることにより、建物の継続利用が可能である。

文献 2) の構法は RC 骨組の内側に鉄骨枠を設け、BRBSM を配置している。RC 骨組と鉄骨枠の隙間にはグラウト材を用いて接触させる。しかし、この構法では鉄骨枠に局部変形が生じ、RC 骨組と鉄骨枠の密着度が十分ではなく、離間が生じ引張側では BRBSM の効果を発揮できなかった。

本報告では、文献 2) とは異なるアンカーレス構法として、グラ

ウト材の代わりにベッドプレート（以下、BP と呼ぶ）および楔を用いたアンカーレス構法（以下、本構法と呼ぶ）を考える。コンクリート強度 $F_c=48\text{N/mm}^2$ の高強度タイプ、 $F_c=18\text{N/mm}^2$ の低強度タイプによる実験を行い、本構法の構造性能を確認する。

図1 本構法および各部材詳細図

¹⁾ 神奈川大学大学院工学研究科建築学専攻 大学院
(〒221-0802 神奈川県横浜市神奈川区六角橋3-27-1)
²⁾ 神奈川大学工学部建築学科 助手・修士(工学)

³⁾ 東京工業大学環境・社会理工学院建築学系 教授・工博
⁴⁾ 神奈川大学工学部建築学科 教授・工博

¹⁾ Graduate Student, Dept. of Architecture and Building Eng., Kanagawa Univ.

²⁾ Research Assoc., Dept. of Architecture and Building Eng., Kanagawa Univ., M. Eng.

³⁾ Prof., Dept. of Arch. and Build. Eng., Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.

⁴⁾ Prof., Dept. of Architecture and Building Eng., Kanagawa Univ., Dr. Eng.

2. 本構法

2.1 構法概要

図1に本構法および部材詳細図を示す。本構法は新規建物に用いることを想定するが、RC 骨組と鉄骨枠が分離しており施工が容易なため耐震補強として用いることもできる。

あらかじめ RC 骨組の内側 4 隅に取り付けたインサートに BP をボルトで固定する。鉄骨枠は T 形鋼を用い、施工性を考慮し、図 1b) に示すように L 字形に 4 分割とする。鉄骨枠の接合には図 1c) のように、接触面が密着するよう、傾斜を設けたエンドプレート同士の間楔を打ち込み一体化させる。楔を打ち込むことで鉄骨枠に初期圧縮力が生じ、一体化が可能である。この際、隙間が生じないようにライナープレートを適当な枚数入れる。さらに、楔と鉄骨枠はボルトで仮止めを行い、溶接をする。BP と鉄骨枠はボルト等で接合せず接触接合とし、メタルタッチにより力の伝達を行う。また、制振部材として BRBSM を用いる。BRBSM は鉄骨枠に設けたガセットプレートに高力ボルトで固定する。また、面外方向へのずれを防止するため、BP 側面に設けたボルト孔にプレートを取り付け面外方向のずれを拘束する。

躯体の損傷については、LV1 地震動に対し、RC 骨組は継続利用が可能である残留ひび割れ幅、0.2mm 以下、LV2 地震動に対しては、コンクリートは修復可能である残留ひび割れ幅、1.0mm 以下とし、いずれも修復可能範囲内に抑える。BRBSM は、早期降伏によりエネルギー吸収を行う。

2.2 BRBSM

著者らは、長年、BRBSM の研究開発を行っている^{3,4)}。BRBSM は、芯材を 2 つの鋼モルタル板を用いた拘束材で補剛することにより、圧縮時においても座屈をせず、引張時と同等の性能を発揮する部材である。芯材にはアンボンド材を貼付けることで、モルタルとの間に生じる摩擦力を抑え、復元力特性を安定させる。BRBSM は制振部材として高い性能を有しており、設定された荷重、変形で確実に降伏させ、芯材の塑性変形により、安定した復元力特性のもとでエネルギー吸収を行うことができる。

BRBSM を RC 構造に適用するには早期に降伏させ、小変形時からエネルギー吸収を行う必要がある。そのため、高い軸剛性と低い降伏耐力が要求される。本構法は文献 5) の軸剛性・耐力調節座屈拘束ブレース用いて設計する。この BRBSM は芯材塑性化部の長さを変えることで軸剛性の調節が可能であり、芯材塑性化部の断面積を変えることで降伏耐力の調節も可能となる。

3. 実験計画

3.1 試験体概要

各 RC 部材概要を表 1 に、試験体全体を図 2 に示す。高強度タイプとして強度 $F_c=48\text{N/mm}^2$ を 1 体、低強度タイプとして強度 $F_c=18\text{N/mm}^2$ を 1 体、それぞれ 1 層 1 スパン 1/3 モデルで製作する。RC および BRBSM の芯材、鉄骨枠、の素材試験結果を表 2 に示す。

BRBSM の形状を図 3 に示す。BRBSM の端部はリブを設け十字断面とし、高力ボルトを用いて摩擦接合とする。拘束材と芯材の間にはアンボンド材を設けてクリアランスを確保する。BRBSM は $R=1/500\text{rad}$ で降伏するよう、軸剛性を調整したものを用いる。また、拘束指標 $P_E/P_y(P_E$: 拘束材のオイラー座屈荷重、 P_y : 芯材の降伏荷重) は 9.4 とする。

表 1 RC 部材断面

a) 高強度タイプ			b) 低強度タイプ		
強度 (N/mm^2)	48		強度 (N/mm^2)	18	
断面詳細	柱	梁	断面詳細	柱	梁
主筋 (SD345)	12-D10	上端 3-D10 下端 3-D10	主筋 (SD295)	12-D10	上端 3-D10 下端 3-D10
せん断補強筋 (SD295)	D6@50	D6@75	せん断補強筋 (SD295)	D6@100	D6@75
断面 $b \times D$ (mm)	200 × 200	100 × 230	断面 $b \times D$ (mm)	200 × 200	100 × 230
断面図			断面図

図 2 試験体全体図

図 3 BRBSM 詳細

表 3 载荷データ

層間変形角 (rad)	層間変位 (mm)	回数
1/1600	0.76	2
1/800	1.52	2
1/400	3.03	2
1/200	6.08	2
1/100	12.2	2
1/50	24.3	2
1/25	48.6	1

図 4 载荷サイクル

表 2 素材試験結果

試験体	コンクリート圧縮強度 (N/mm^2)	主筋 (D10)		せん断補強筋 (D6)		座屈拘束ブレース		鉄骨枠フランジ		鉄骨枠ウェブ	
		SD295A/SD345 (低/高)		SD295A		SN400B		SS400		SS400	
		降伏応力度 (N/mm^2)	引張強度 (N/mm^2)	降伏応力度 (N/mm^2)	引張強度 (N/mm^2)	降伏応力度 (N/mm^2)	引張強度 (N/mm^2)	降伏応力度 (N/mm^2)	引張強度 (N/mm^2)	降伏応力度 (N/mm^2)	引張強度 (N/mm^2)
低強度タイプ	22.0	375	524	363	502	389	468	345	456	312	442
高強度タイプ	42.0	388	554								

3.2 載荷方法

載荷方法は、1000kN 水平アクチュエータを用いた層間変位制御による正負交番漸増繰返し載荷とする。載荷サイクルは、既往の研究¹⁾²⁾と同様に、層間変形角 $R=\pm 1/1600\text{rad}$, $1/800\text{rad}$, $1/400\text{rad}$, $1/200\text{rad}$, $1/100\text{rad}$, $1/50\text{rad}$ を 2 サイクルずつ繰返し、2 回目引張および圧縮後にひび割れ観察を行う。その後、 $R=\pm 1/25\text{rad}$ を 1 サイクル行い、耐力低下が見られない場合、引張単調載荷とする。また、あらかじめ鉛直アクチュエータにより RC 柱に軸力比 10%の圧縮力（高強度タイプで 192kN、低強度タイプで 96kN）をかける。安全性を考慮し、 $R=1/50\text{rad}$ の載荷終了時、RC 柱の鉛直荷重を除荷し、RC 柱から鉛直アクチュエータを切り離し載荷する。表 3 に載荷データ、図 4 に載荷サイクルを示す。載荷点は上梁端部とし、BRBSM に対し引張を＋方向、圧縮を－方向とする。

測定計画として、柱、梁部材芯の交差する点、及び、柱、基礎梁部材芯の交差する点における水平方向の相対変位を測定する。両柱の層間変位を平均した値を試験体の層間変位とする。BRBSM の軸方向変位はレーザー変位計を用いて、第 1 ボルト間（図 3b）に示す ab 間）で測定を行う。また、BRBSM 至は芯材塑性化部の両端部に歪ゲージを貼付け測定する。

正負交番漸増繰返し載荷が安定して行えるよう、梁両端部に治具を設け 4 本の PC 鋼棒を取り付ける。PC 鋼棒には、歪ゲージを用いて、梁への影響がないよう僅かな張力を管理し与える。面外拘束のためのパンタグラフ、浮き上がり、横ずれ防止用の治具を設置する。図 5 にセットアップ図を示す。

4. 実験結果

荷重-層間変形関係を図 6、BRBSM における軸方向荷重-歪関係を図 7 に、各サイクル最大荷重を表 4 に示す。歪は BRBSM に貼付けた歪ゲージから得られた値を降伏歪で除した値である。

4.1 高強度タイプ

$R=1/50\text{rad}$ まで大きな耐力低下は見られず、安定した復元力特性を有している。 $R=1/50\text{rad}$ の載荷終了後、安全のため鉛直荷重を除荷し鉛直アクチュエータと柱を切り離し、載荷を続けた。 $R=1/25\text{rad}$ を 1 サイクル行っても耐力低下が見られなかったため引張単調載荷とし、 $R=1/20\text{rad}$ 程度で耐力が最大耐力の 80%以下に低下したため載荷を終了した。BRBSM は、 $R=1/100\text{rad}$ 程度で降伏した。最大耐力は引張側で 327.5kN、圧縮側で 346.6kN であった。

4.2 低強度タイプ

引張側 $R=1/50\text{rad}$ の 2 回目から耐力低下が見られ、 $R=1/25\text{rad}$ の圧縮側で耐力が最大耐力の 80%以下に低下した。引張単調載荷は行わず、 $R=1/25\text{rad}$ で載荷を終了した。高強度タイプ同様 $R=1/50\text{rad}$ の載荷終了後、鉛直荷重を除荷し鉛直アクチュエータと柱を切り離し、載荷を続けた。BRBSM は、 $R=1/125\text{rad}$ 程度で降伏した。最大耐力は引張側で 275.8kN、圧縮側で 268.4kN であった。

表 4 各サイクル最大荷重

層間変形角 (rad)	高強度タイプ				低強度タイプ			
	引張(kN)		圧縮(kN)		引張(kN)		圧縮(kN)	
	1回目	2回目	1回目	2回目	1回目	2回目	1回目	2回目
1/1600	76.7	78.3	-50.1	-49.6	35.9	37.8	-33.7	-33.1
1/800	111	112	-87.1	-84.4	60.1	59.6	-49.5	-50.8
1/400	162	158	-158	-154	150	147	-138	-101
1/200	233	240	-251	-242	198	193	-166	-167
1/100	288	285	-300	-300	244	236	-236	-218
1/50	317	322	-347	-321	271	229	-263	-230
1/25	284		-302		212		-189	
最大	328		-347		276		-268	

5. 考察

5.1 RC フレーム

高強度タイプにおける $R=1/50\text{rad}$ 時の RC 骨組のひび割れは、4 隅に多く生じ、梁両端部にひび割れが集中した。柱のひび割れは BRBSM 接合部の加力側柱頭、非加力側柱脚に比較的多く見られた。低強度タイプにおける $R=1/50\text{rad}$ 時の RC 骨組のひび割れは、4 隅に多く生じ、両側の柱脚に集中した。また、高強度タイプに比べ梁中央にひび割れが見られ、梁両端部の損傷も大きい。高強度タイプ同様、柱のひび割れは BRBSM 接合部の加力側柱頭、非加力側柱脚に多く生じた。

BRBSM は BP で反力を取り、力を発揮するため、RC 骨組の 4 隅にひび割れが多く生じた。低強度タイプにおいては RC 骨組の損傷が大きく、RC 骨組と BP の間にも隙間が生じているのが確認された。

5.2 鉄骨枠

載荷後、両タイプともに、亀裂や局部変形のような鉄骨枠の損傷はなかった。文献 2) のグラウト材タイプでは鉄骨枠の亀裂や局部変形が生じたため、本試験体では鉄骨枠の寸法を小さくし、座屈長さ及び剛性の調整を行った。このため鉄骨枠の損傷は改善された。BP と鉄骨枠の離間については、引張側の載荷時は BRBSM 配置部の左上および右下に、圧縮側の載荷時は左下および右上に集中していた。RC 骨組の変形が進むにつれ、鉄骨枠の離間が大きくなった。

図 5 セットアップ図

図 6 荷重変位関係

図 7 BRBSM における荷重歪関係

両タイプともに $R=1/50\text{rad}$ では 5mm 以上の離間が確認された。写真 1 に $R=1/50\text{rad}$ 引張時の離間状態を示す。鉄骨枠は 4 箇所溶接接合されているため剛であり、RC 骨組の変形に追随することができず、BRBSM への力の伝達がスムーズになされなかったと考える。

5.3 BRBSM

両タイプともに、想定した層間変形で降伏せず、 $R=1/100\text{rad}$ 程度で降伏した。そのため、エネルギー吸収が遅れ RC 骨組の損傷が大きくなった。弾性範囲においては引張側と圧縮側で同程度の復元力特性を示したが、塑性化後については BRBSM 歪が高強度タイプは圧縮側に、低強度タイプは引張側に偏っていた。塑性化後に生じた残留変形や鉄骨枠の剛性の影響によると考える。

写真 2 に示すように、高強度タイプでは BRBSM の芯材に座屈モードが生じたが、低強度タイプでは座屈モードが生じなかった。低強度タイプは、写真 3 に示すように高強度タイプに比べ、RC 骨組の損傷が大きい。すなわち、RC 骨組がエネルギー吸収をしており、BRBSM の座屈モードが形成されなかったと考える。

5.4 既往のグラウト材タイプ²⁾との比較

グラウト材タイプにおける荷重変位関係、BRBSM 荷重歪関係の比較を図 8 に、弾性範囲における荷重変位関係を図 9 に示す。グラウト材タイプの $R=1/800\text{rad}$ まで生じていた引張側と圧縮側の耐力差は本試験体において、両タイプで緩和されている。また、スリップ型の履歴は、両タイプとも $R=1/200\text{rad}$ までは生じなかった。スリップ型の履歴が生じる原因は RC フレームと鉄骨枠の密着が不十分

であるため BRBSM が効果を発揮していないことによる。本試験体においては、楔を打ち込みあらかじめ鉄骨枠に初期圧縮力を与えることで、弾性範囲内では RC フレームから離間することなく密着させることができた。このことから弾性範囲においては楔を打ち込み、あらかじめ鉄骨枠に初期圧縮力を与えることは有効であると言える。

a) 高強度タイプ

b) 低強度タイプ

写真 1 鉄骨枠と RC 骨組の離間 ($1/50\text{rad}$ 引張時)

a) 高強度タイプ

b) 低強度タイプ

写真 2 BRB 溶断後の芯材

a) 荷重変位関係

b) BRBSM における荷重歪関係

図 8 グラウト材タイプ²⁾

b) $R=1/1600\text{rad} \sim R=1/800\text{rad}$

b) $R=1/400\text{rad} \sim R=1/200\text{rad}$

図 9 弾性範囲における荷重変位関係

a) 高強度タイプ

b) 低強度タイプ

写真 3 加力側柱のひび割れ ($1/50\text{rad}$ 圧縮時)

6. 本構法の改良

本構法では BRBSM が塑性化した後、変形が大きくなるにつれ、BP と鉄骨枠が離間する現象が見られた。これは RC 骨組の変形に鉄骨枠がうまく追従出来ていないため生じた。本構法においては鉄骨枠を 4 分割し、柱、梁の中央位置で楔を打ち込み初期圧縮力を与え、一体化し溶接接合を行った。そのため、鉄骨枠の剛性が高くなり RC 骨組の変形に対して、追従することができなかった。

図 10 に本構法の改良案を示す。鉄骨枠を L 字の 2 分割とし、BRBSM の配置していない側の対角に楔を打ち込み接合する。さらに楔は下面のみ現場溶接を行うことで、ピン接合となり、RC 骨組の変形に追従すると考える。鉄骨枠をピンフレームとすることで、引張荷重を作用させた際、鉄骨枠はひし形状に変形しようとし、BRBSM に引張力が生じる。

7. 結

本報告では、ベッドプレートおよび楔を用いたアンカーレス構法に鉄骨枠付き座屈拘束ブレースを設ける構法の提案と実験を行い、以下の知見を得た。

- 1) 楔の適用により鉄骨枠に初期圧縮力を与え、RC 骨組と密着させることでアンカーレス構法が成り立つ。
- 2) RC 骨組と鉄骨枠の接触には、グラウト材を用いるよりベッドプレートおよび楔を用いたほうが、弾性範囲においてスリップ型の履歴は生じない。
- 3) 本構法の適用により、低強度タイプおよび高強度タイプに適用した場合の妥当性を確認した。

本報告はベッドプレートおよび楔を用いたアンカーレス構法の有効性を示した。しかし、アンカーレス構法を確立するには RC 骨組に追従する鉄骨枠の改良が必要である。

謝辞

本報告は平成 26 年度住宅・建築関連先導技術開発助成事業費補助金を受けて実施しました。

図 10 改良構法

参考文献

- 1) 小寺直幸、大家貴徳、毎田悠承、坂田弘安、岩田衛：座屈拘束ブレースおよびスタッド付きガセットプレートを用いた損傷制御 RC 構造の設計法、日本建築学会構造系論文集、第 79 巻、第 698 号、pp533-540、2014. 4.
- 2) 大竹誠寛、大家貴徳、毎田悠承、小谷野一尚、坂田弘安、岩田衛：座屈拘束ブレースを制振部材として用いる損傷制御 RC 構造の実験的研究、日本建築学会構造系論文集、第 78 巻、第 688 号、pp1123-1129、2013. 6.
- 3) 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、pp1015-1023、2014. 7
- 4) 小谷野一尚、小出秀一、中込忠男、緑川光正、岩田衛：座屈拘束ブレースの小塑性歪振幅における疲労性能の研究、日本建築学会技術報告集、第 22 巻、第 50 号、pp115-119、2016. 2
- 5) 中村慎、山下哲郎、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-芯材の降伏耐力および軸剛性の調節-、日本建築学会構造系論文集第 73 巻、第 629 号、pp1143-1150、2008. 7.

[2016 年 10 月 5 日原稿受理 2016 年 12 月 15 日採用決定]