

デボンド異形鉄筋を用いた RC 造 ブレース型制振ダンパーの研究

EXPERIMENTAL STUDY ON REINFORCED CONCRETE BRACE DAMPERS USING DE-BONDED DEFORMED BARS

島崎和司 ——— *1

二宮誠司 ——— *2

五十嵐泉 ——— *3

キーワード :

鉄筋コンクリート構造、デボンド、ブレース、損傷制御設計

Keywords:

Reinforced concrete structure, De-bond, Brace, Damage control design

Kazushi SHIMAZAKI

Seiji NINOMIYA

Izumi IGARASHI

The demands of building owners have changed in recent years: they now wish to be able to continue using buildings with small repair cost even after a severe earthquake. A building system with dampers is one structural type which meets these performance requirements, for which the dampers need good performance and applicability. The RC brace damper using the de-bonded axial rebars is one of the solutions. The tested results for the RC brace dampers showed good performances as damping members. A Frame test showed excellent performance for the building system.

1. はじめに

損傷制御型設計の一つとして、制振構法の研究が進められ、種々の制振デバイスが開発されている。また、制振部材を既存構造物に適用した制振補強に関する研究も進められている。制振設計を多様な構造物に適用するためには、低コストでエネルギー吸収能力に優れ、修復性が良好な制振ダンパーが求められる。制振ダンパーとしては、履歴型ダンパーや粘弾性ダンパー、摩擦ダンパーなどが挙げられる¹⁾。履歴型ダンパーの一つとして、鋼材などの弾塑性材を用いた軸降伏型履歴ダンパーが存在する。軸降伏型履歴ダンパーはエネルギー吸収材となる芯材としてダンパー用の鋼材が使用されることが多いが、圧縮時の塑性座屈等への対処が求められる²⁾。

著者等はアンボンド X 型配筋 RC 梁³⁾の成果を基に、RC 間柱にデボンドした X 型異形鉄筋を組み込むことによって、全体座屈や軸回りの振れを抑制し、安定したエネルギー吸収能力を保持できる補修

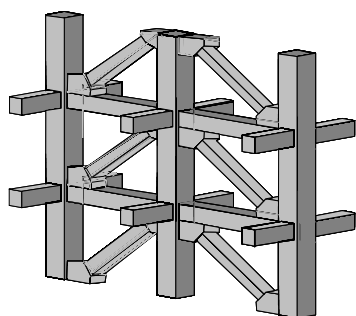


図1 ブレースダンパー構造システム

性の良い RC 間柱型ダンパーの開発を報告した⁴⁾。本論は、これらと同様に、デボンドした異形鉄筋を用いたブレース型ダンパーの開発を目的とした実験的研究である。ブレース型ダンパーは、いろいろな構造システムや耐震補強に用いることが可能であるが、本論では図 1 に示したようなフレーム内に組み込むシステムを想定している。最初に、RC 造ブレース型制振ダンパーとして有効なデボンド処理方法や、異形鉄筋と周りの拘束用 RC のコンクリートとの間のクリアランスの検討を行うためのブレース単体実験を行い、その後、実際の RC フレームに組み込んだ場合の性能評価実験を行った。

2. ブレース単体実験

2.1 試験概要

ブレース単体試験体の形状寸法と詳細を図 2 に、試験体一覧を表 1 に示す。試験体の主なパラメータは、RC 造ブレース型制振ダンパーとして有効なデボンド処理方法や、異形鉄筋と周りの拘束用 RC のコンクリートとの間のクリアランスとし、各種デボンド方法を検討した。

試験体の RC 部分は断面 $240 \times 210\text{mm}$ で長さ 1500mm とした。軸降伏部材としての芯材は一般的な JIS G3112 規格品の 4-D16 (一部 4-16 ϕ) とした。端部は中央部鉄筋より太径のねじ鉄筋とし、コンクリートへの埋め込み長さを十分にとり、露出部分の長さを最小限に抑えて座屈を避ける構造とした。両者は摩擦溶接により接合し、断面が縮小する部分は、写真 1 に示すように溶接バリを研磨した後、緩衝材を設置してコンクリートに圧縮力が伝わらないようにし、中

*1 神奈川大学工学部建築学科 教授・博士(工学)
(〒221-8686 横浜市神奈川区六角橋3-27-1)

*2 株式会社フジタ 建設本部 修士(工学)

*3 神奈川大学 工学部建築学科 主任技術員

Prof., Department of Architecture, Kanagawa University, Dr. Engineering

Fujita Corporation
Chief Technician, Kanagawa University

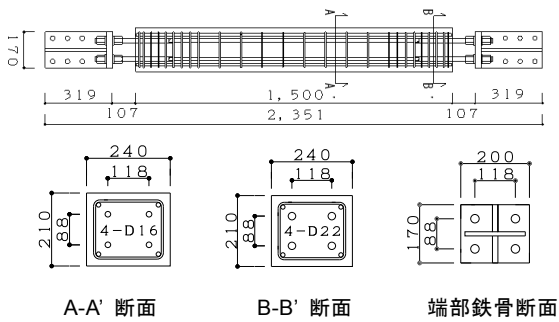


図2 ブレース単体試験体詳細

中央部鉄筋が圧縮降伏できるようにした。試験体両端部には荷重用鉄骨をナット締めで接続し、この両端部に計測治具を取り付け軸変位を計測した。表1中のクリアランスの定義は、No.1,3,4,8,9,10試験体は鉄筋とデボンド材の間に生じる隙間、それ以外の試験体は、デボンド材の厚みとした。No.5以降の試験体は、端部芯鉄筋の露出部分での座屈防止を目的として径をD22からD25とした。使用材料の機械的性質を表2に示す。

加力装置を図3に示す。荷重は、荷重用鉄骨柱の下部をピン支持、上部を鋼製パンタグラフで面外方向の移動を拘束し、アクチュエータにより水平力を正負繰り返し載荷した。加力サイクルは、試験体中央部鉄筋4本の合計降伏荷重の1/3,2/3,3/3を荷重制御で各1回、その後は荷重柱の水平移動角で1/200,1/133,1/100,1/67,1/40radを目標として各3回変形制御で繰り返し載荷した。圧縮側で耐力低下や試験体に座屈が生じた場合は加力を中止し、1/33と1/20の引張側のみの載荷を行い終了とした。

2.2 実験結果

図4に代表的な試験体の軸荷重一軸変位関係を示す。No.4は1/40rad圧縮側の途中で端部鉄筋が面外方向に座屈したのでその後引張側のみ1/33radまで加力した。No.6は1/40rad圧縮側を終えても座屈せず、その後引張側1/20radまで加力を行った。No.1-4までと比べ、端部鉄筋を太くしたことで圧縮側での端部芯鉄筋の座屈を防ぐことができた。No.9は1/40rad圧縮側到達直前に耐力低下を起こしたために、その後引張側1/20radまで加力した。芯鉄筋に異形鉄筋を用いたものは、圧縮時の降伏変形は節間に集中し、ポアソン効果による体積膨張により耐力が上昇しているが、概ね安定したループを描いている。芯鉄筋に丸鋼(SNR490B)を用いたNo.10は1/40rad圧縮側を終えても全体座屈はしなかったが、その後の引張側で鉄筋が一本破断したので試験を終了した。丸鋼のデボンド処理をしていないために、圧縮側での体積膨張を吸収することができず、拘束材のクラックが増加した。また、圧縮側の最大軸耐力が大きくなっており、摩擦力や緩衝帯での局部座屈により圧縮力が拘束RC部に伝わり、拘束材のコンクリートが荷重を負担したと考えられる。鉄筋の歪分布も、デボンドされた試験体では全長に渡り均等に引張・圧縮されていたが、No.10では圧縮時の鉄筋降伏時の歪にばらつきが見られた。写真2は、実験終了後に拘束コンクリートと緩衝材を取り除いた溶接部近傍の状況である。異形鉄筋は、弱軸方向に緩やかに座屈しているのに対し、丸鋼では緩衝材の部分で局部的に座屈し、塑性変形が集中して破断に至ったと考えられる。

図5に図4に示した軸荷重一軸変位関係における各試験体の累積

表1 ブレース単体試験体一覧

試験体	中央部芯鉄筋	中央部芯鉄筋の表面処理	端部芯鉄筋	端部芯鉄筋の表面処理	クリアランス (mm)
No.1	D16 (SD345)	処理なし	D22 (SD345)	ワックス+デボンドテープ	0
No.2		ワックス+デボンドテープ			1.0
No.3		硬質塩化ビニル管			2.0
No.4	D16 (SD345)	ビニールチューブホース	D25 (SD345)	ワックス+デボンドテープ	1.0
No.5		粘土+熱収縮チューブ			0.7
No.6	D16 (SD345)	熱収縮チューブ	D25 (SD345)	ワックス+デボンドテープ	0.7
No.7		ワックス+デボンドテープ			1.0
No.8	D16 (SD345)	ワックス+デボンドテープ	D25 (SD345)	ワックス+デボンドテープ	0.6
No.9		溶融亜鉛めっき鋼板			0
No.10	φ16	処理なし	D25 (SD345)	ワックス+デボンドテープ	0
No.11	(SNR490B)	熱収縮チューブ			0.7
No.12	φ16 (SNR400B)	熱収縮チューブ			0.7

表2 材料の機械的性質

試験体	コンクリート		鉄筋			
	圧縮強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (N/mm ²)	種類	呼び名	降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)
No.1~4	38.3	2.75 × 10 ⁴	補強筋	D6(SD345)	391	571
			主筋	D13(SD345)	381	608
			芯鉄筋	D16(SD345)	391	626
			端部芯鉄筋	D22(SD345)	409	590
No.5~12	45.2	2.95 × 10 ⁴	補強筋	D6(SD345)	366	656
			主筋	D13(SD345)	380	575
			芯鉄筋	D16(SD345)	390	578
			芯鉄筋	φ16(SNR490B)	391	563
			芯鉄筋	φ16(SNR400B)	323	463
			端部芯鉄筋	D25(SD345)	386	546

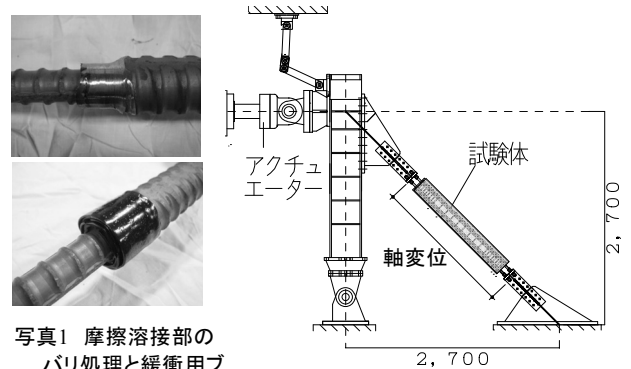


図3 ブレース単体試験体加力装置

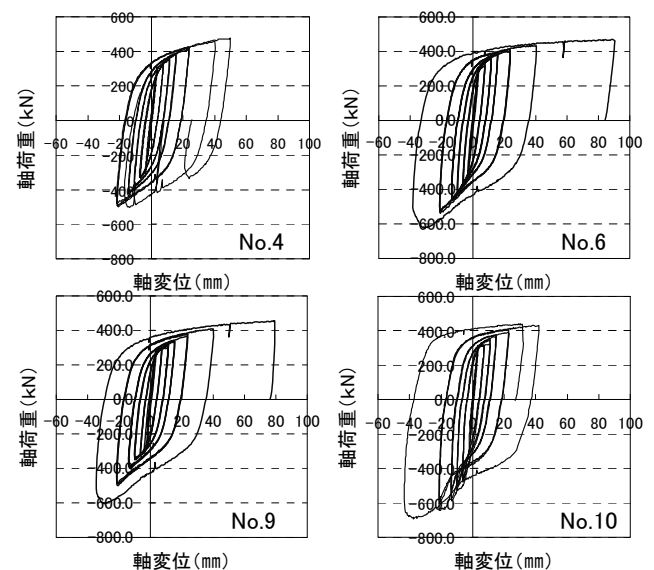


図4 軸荷重一軸変位関係

エネルギー吸収量を示す。端部鉄筋を太くした No.5 以降の試験体では、想定した加力サイクルで終了しているため、それほどの違いは見られない。鉄筋の破断した No.10 試験体は、圧縮側の荷重が増大しているため、累積エネルギー量ではやや大きな値となっている。

2.3 実験結果の評価

これまでの研究では、異形鉄筋のくぼみ部分をワックスで充填し、アンボンド材（ブチルゴム）でコーティングするという手数のかかる手法をとってきたが、ビニールハウスや熱収縮チューブを用いた簡易的なデボンド処理方法でも、エネルギー吸収性能には大きな差はなく、制振部材としての性能を満足しているといえる。鉄筋と拘束材とのクリアランスを小さくすることはエネルギー吸収能力を高めるのに有効であるが、あまり小さいと拘束材へかかる負担が大きくなり、耐力低下や損傷の原因となりかねないので、適切な値とする必要がある。No.5 以降の試験体では 0.7mm としたが、良好な結果が得られた。

3. フレーム実験

3.1 試験概要

対象とする建物を構造設計・部材断面集⁵⁾の 10 階建て純ラーメン RC 構造の事務所ビルとして、その 1 構面にブレースダンパーを組み込むこととして部材断面を設定した。試験体は、図 6 に示すように、柱-梁-ブレース接合部の応力状態を再現させるために、最下層部 1.5 層、1.5 スパンを取り出し、実建物の 1/3 程度のサイズで計画した。0.5 層分の柱端部は加力治具とピン支持、0.5 スパン分の梁端部はクレビス支柱によるローラー支持とした。断面と配筋を表 3 に示す。ブレース部は、芯鉄筋の中央部付近で降伏させる為に、4-D19 を両端に 4-D13 を中央に配置し、両者を摩擦溶接により接合した。中央部 D13 鉄筋の長さは 1250mm で、これは $R=1/250$ で降伏することを目標に定めた。ブレースとフレームの隙間は、 $R=40$ まで接触しないように 30 mm（片側 15 mm）とした。ブレース端部の鉄筋は、定着プレートにより、柱-梁接合部内で定着させている。2 階のブレース端部は、加力用鉄骨治具にボルトで取り付けた。異形鉄筋のデボンドは、D19 はワックスで異形鉄筋のくぼみを充填した後、D13 はそのままアンボンド材でコーティングした。表 4 に、使用材料の機械的性質を示す。

加力は上部に取り付けた加力治具に水平アクチュエータを取り付け、変形制御により繰り返し加力を行った。加力サイクルは $R=1/700$ を 1 回、 $R=1/400$ を 3 回、 $R=1/200$ を 3 回、 $R=1/100$ を 6 回、 $R=1/67$ を 3 回、 $R=1/40$ を 1 回正負交互に繰り返し作用させ、 $R=1/33$ まで一方向加力した。柱の軸力は、接合部にとって厳しい条件となるよう 0 とした。

3.2 実験結果

$R=1/200$ でブレース芯鉄筋は降伏し、梁端部、柱脚部に曲げクラックが生じた。 $R=1/100$ では梁、柱脚部に曲げせん断クラックが生じた。 $R=1/33$ でブレース端部のクリアランスがほぼゼロになったが、ブレース自体にはクラックは見られなかった。写真 3 に $R=1/100$ と終了後の試験体状況を示す。柱-梁-ブレース接合部の損傷は軽微で、損傷は 2F 梁に集中していた。

図 7 に 1 層せん断力-1 層層間変位関係を示す。非常に安定したループを描いている。左から右への正方向加力より負方向のせん断



写真2 終了後の鉄筋状況

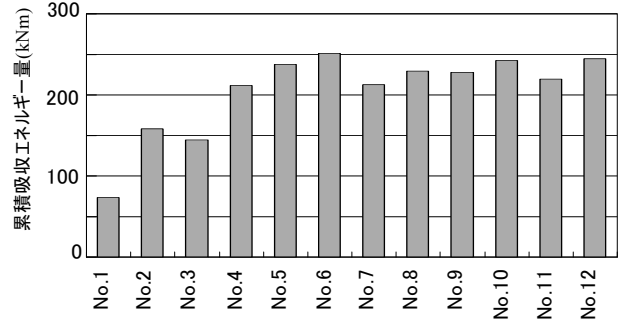


図5 累積吸収エネルギー量

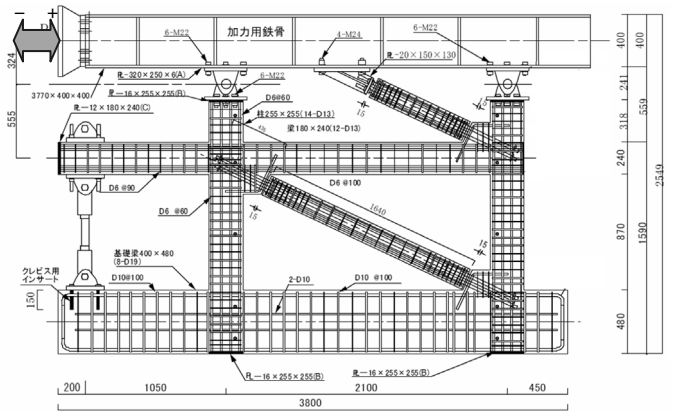


図6 ブレースダンパーフレーム試験体

表 3 試験体断面リスト

	柱	梁	ブレース
配筋	14-D13	12-D13	4-D13(中央) 4-D19(端部)
断面(mm)	255×255	180×240	180×160
断面図			

表 4 材料の機械的性質

部材	呼び名	鉄筋		コンクリート		
		降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	圧縮強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (N/mm ²)	
ブレース	中央部芯鉄筋	D13 (SD345)	393	578	56.6	29.4
	端部鉄筋	D19 (SD345)	395	563		
フレーム	主筋(柱・梁)	D13 (SD345)	392	553	68.9	32.7
	せん断補強筋(柱・梁)	D6 (SD345)	366	556		

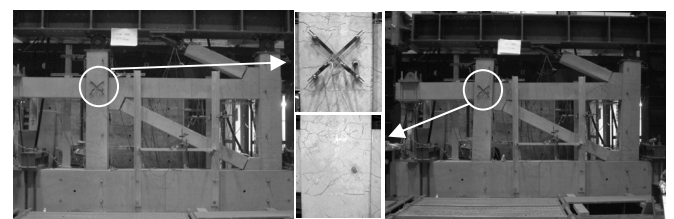


写真3 損傷状況

力の方がやや大きい。正方向加力の場合、第2層のブレース荷重の力が、柱せん断力より大きく、梁が引張力を受けるため、ブレースに作用する変形量が異なったためと考えられる。

3.3 実験結果の検討

荷重-変形関係の包絡線の計算値として、フレーム解析にブレースの復元力を加えたものを図7中に記載した。図中でFrameと記載されている値は、一般的な弾塑性解析プログラムで算定した柱梁フレームの荷重-変形関係を示す。Braceと記したものは、ブレースの中央部鉄筋の応力-ひずみ関係を降伏時の荷重と変形点で折れ曲がるバイリニア-の弾塑性モデルとして評価したものである。図8にブレースの端部鉄筋の定着部ひずみから推定したブレース軸力とブレース軸変位の関係を示す。圧縮側はコンクリートの負担があるので鉄筋のひずみが小さく、軸力が小さく算定されているが、引張側は、推定できていると考えられる。ここに、想定したバイリニア-の復元力を破線で重ね合わせると良い対応が見られる。ここでは、降伏後の第2勾配を弾性剛性の7%と仮定している。このブレースの復元力を水平方向変位と層せん断力に変換したのが図7に示した値である。Frame+Braceは、両者を加えたものである。フレーム解析において、柱梁部材の降伏後の剛性を弾性剛性の1/1000としているため、解析値はやや低い値となっているが、良い対応を示している。

図9に加力サイクル毎の等価粘性減衰定数の推移を示す。図中には、限界耐力計算で用いられるRC構造物の等価粘性減衰を、降伏点変形を1/200と1/100と仮定して示した。ブレースを取り付ける構面数によってこの値は異なるが、一般的なRC構造に比べ、高い減衰性能を示し、良好なエネルギー吸収能力があると言える。

接合部の損傷が少ない点に関しては、ブレースを取り付けるためにハンチを設けたため、接合部の断面が大きくなったこと、ブレースに引張力が作用するときには、接合部内の圧縮ストラット内に定着され、圧縮力が作用するときは接合部内の引張力を打ち消す方向に力が作用することによるものと考えられる。図10に接合部内に定着されたブレース端部鉄筋のひずみ履歴を示す。(b)の接合部外ではブレースの軸力に応じて圧縮引張ひずみとなっているが、接合部内の定着プレート近傍の(a)では、接合部内の応力状態の影響を受け、途中で逆転している。

4. 結論

ブレース型制振ダンパーの開発を目指した実験として、デボンド処理方法やクリアランスに着目した要素実験と、検証試験としてのフレーム実験により以下の結論を得た。

1. ビニールホースや熱収縮チューブを用いた簡易的なデボンド処理方法でも、性能的には大きな差はなく、制振部材として優れたエネルギー吸収性能を発揮する。
2. 鉄筋と拘束材とのクリアランスを小さくすることはエネルギー吸収能力を高めるのに有効である。圧縮時に拘束材へかかる負担を考慮して適切な値とする必要がある。No.5以降の試験体では0.7mmとしたが、良好な結果が得られた。
3. RC造ブレース型制振部材は、フレーム構造に組み込んだ場合、 $R=1/33$ までは良好なエネルギー吸収能力を発揮し、ブレース自体の損傷は見られず、接合部も大きく損傷することがなかった。

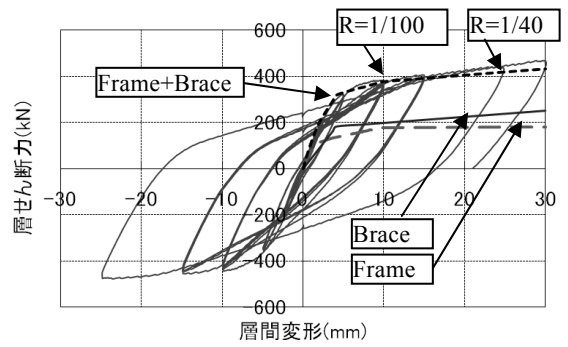


図7 水平力-1層水平変位関係

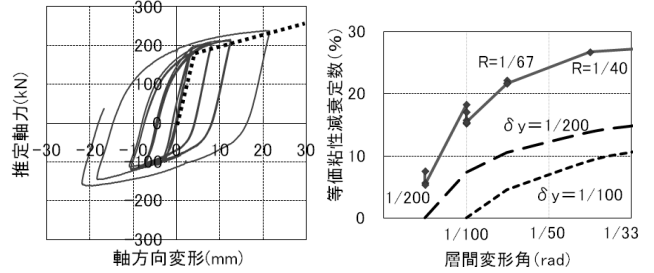
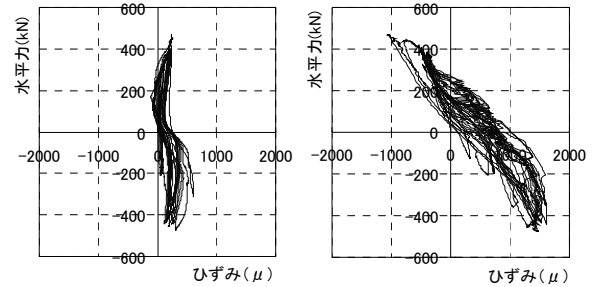


図8 推定軸力-軸変位関係

図9 等価粘性減衰係数の推移



(a) 接合部内定着板近傍

(b) 接合部外ブレース側

図10 ブレース端部鉄筋の接合部近傍のひずみ履歴

これらのことから、本構法はRC構造の新しい制振部材として実用可能であると考えられる。また、今回の検証実験は片ブレースのみであったが、図1に示したような両ブレースの場合の接合部については、接合部のディティールなどについての検討が必要である。

謝辞

実験の計画・実施において、2007~09年度神奈川大学卒研生の協力を得た。なお、本論の一部は建築学会大会において発表した⁶⁾。

参考文献

- 1) 応答制御構造設計法 付：免震・制振(震)建築の設計例/装置・部材データ集、日本建築構造技術者協会 編 2000
- 2) 岩田衛、村瀬亮、和泉田洋次、村井正敏：鋼モルタル板を用いた屈曲拘束ブレースの実験的研究 その3 芯材の屈曲挙動、日本建築学会構造系論文集、No.611、pp.133~139、2007.1、他
- 3) 島崎和司：低損傷アンボンドX型配筋RC梁の開発、日本建築学会構造系論文集、No.610、pp.139~144、2006.12
- 4) 二宮誠司、島崎和司：デボンド異形鉄筋を用いた間柱型RC造制振ダンパーの研究、日本建築学会技術報告集、No.30、pp.433~436、2009年6月
- 5) 構造設計・部材断面集、(財)日本防災協会、2007.6
- 6) 五十嵐ほか：デボンド異形鉄筋を用いたブレース型制振部材に関する研究、その1~4、日本建築学会大会学術講演梗概集、C-2、2008.9.10年