

令和 3 年 6 月 7 日現在

機関番号：35409

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K04451

研究課題名(和文) ヒンジ部損傷抑制コアの効果に関する実験的研究

研究課題名(英文) Experimental study on damage control in hinge region of RC members

研究代表者

都祭 弘幸 (Tomatsuri, Hiroyuki)

福山大学・工学部・教授

研究者番号：20736714

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：曲げ降伏型鉄筋コンクリート造梁のヒンジ領域に設置する損傷抑制コアの効果を確認するために従来構造の梁と提案構造の梁試験体を製作し構造実験を実施した。試験体は曲げ強度時のせん断応力度レベルが異なる2シリーズであり、せん断応力度レベル0.05が5体、同0.1が4体の計9体である。正負交番静的載荷実験を行った結果、ヒンジ部損傷抑制コアは曲げ降伏後のヒンジ領域のせん断変形量を抑制できること、また同コアは定常ループにおけるエネルギー吸収性能を改善できること、などの効果が確認できた。ただし、その効果はせん断応力度レベルが高くなると低下する傾向があった。考案した損傷抑制コアについては特許を出願した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

曲げ降伏型鉄筋コンクリート造梁のヒンジ領域コア部を補強することによって、従来構造の梁に比べて曲げ降伏後のせん断変形が抑制されるだけでなく、エネルギー吸収性能が改善されることが確認された。この成果を利用することによって、鉄筋コンクリート造建築物の地震時における層間変形角およびヒンジ部の損傷を抑制できるので建築物の寿命を延ばすことができるだろう。また、未だに明確となっていない鉄筋コンクリート造のヒンジ領域に必要な機能・構造性能を検討する研究と成り得る。

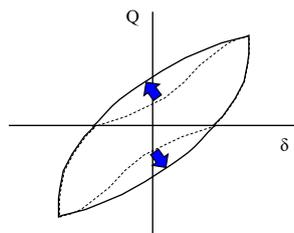
研究成果の概要(英文)：In order to verify the effect of the core reinforcements at the hinge region of reinforced concrete beams, this experimental study was carried out by using the specimens, which were compared with normal RC-beams and proposed RC-beams. There were two specimen's series in terms of shear stress levels after flexural yielding. Five specimens of the first series had the shear stress level 0.05, and four specimens of the second series had the shear stress level 0.1. The results of the statically cyclic loading tests confirmed the core reinforcing effects, which could reduce the share deformation of the hinge region and improve the absorbed energy performance of steady loops, and so on. However, the effects would become weakened at a high shear stress level. The proposed core reinforcing method for damage control in the hinge region was applied for a patent.

研究分野：建築構造

キーワード：鉄筋コンクリート造梁 ヒンジ領域 エネルギー吸収性能 曲げ降伏 せん断応力度レベル 定常ループ

1. 研究開始当初の背景

柱・梁・耐震壁などの鉄筋コンクリート（以下、RC という）部材は、大別して、靱性能を確保するために曲げ降伏型で設計するのが一般的である。RC 部材が曲げ降伏する前は曲げ変形が主であるが、曲げ降伏後はコンクリートの劣化に伴い、せん断変形や降伏域におけるスリップ変形成分が増加する。除荷後の残留変形から再載荷した際のせん断変形とスリップ変形が履歴ループにおける繰返し時の強度低下を招く要因となると考えられる。



繰返し加力を受ける部材の再載荷時低荷重域における剛性の低下を改善することにより、エネルギー吸収性能の向上が図れる。

図1. 履歴ループの改善

この再載荷域におけるせん断変形・スリップ変形の増加を抑制するためにヒンジ部損傷抑制コアを考案した。除荷後の再載荷領域における部材の剛性を高くできれば、図1に示すように履歴ループ面積が大きくなりエネルギー吸収性能を向上させることができる。

このような低荷重域の挙動は、引張鉄筋降伏後、ヒンジ領域におけるコンクリートの損傷（曲げひび割れや鉄筋引張応力に伴う付着劣化など）により、この領域のコンクリートせん断剛性が低下することに起因するものと考えられる。

RC 造においてヒンジ領域に必要な機能・構造性能は明確になっていないのが現状であり、本研究はそれらについて再確認する研究と位置付けられる。

2. 研究の目的

本研究の目的は、梁端ヒンジ部に配置するヒンジ部損傷抑制コアの効果を定性的に確認することである。考案したヒンジ部損傷抑制コアとは、図2に示すように曲げ降伏型部材における曲げ降伏後のヒンジ領域におけるコンクリートのせん断変形およびスリップ変形を抑制する働きを有するもので、部材断面せいのほぼ中央（せん断応力が大きい領域）に配置する。

ヒンジ部損傷抑制コアの詳細を図3に示す。ヒンジ部損傷抑制コアは、丸鋼管とダボ筋およびコア部補強筋から構成される。それぞれの機能を以下に示す。

- ・ダボ筋：ダボ作用により端部フェイスのせん断変形を抑制する。曲げ強度には寄与しない。
- ・丸鋼管：異形鉄筋とヒンジ部コンクリートの付着を切るとともにコア部補強筋のせん断伝達、ならびにダボ作用によるヒンジ部コンクリートの支圧破壊を抑制する。
- ・コア部補強筋：ヒンジ部損傷抑制コアのコンクリート拘束を高める。

曲げ降伏型連層耐震壁に関する既往の研究では、ヒンジ部の損傷を抑制することによって定常ループを改善することができ、結果としてエネルギー吸収性能を改善が図れた。梁部材でも同様にヒンジ部損傷を抑制できれば、履歴ループの改善が期待できる。

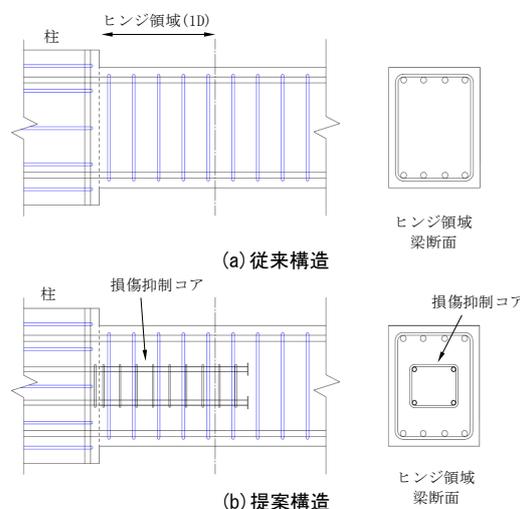


図2. ヒンジ部損傷抑制コアの配筋例

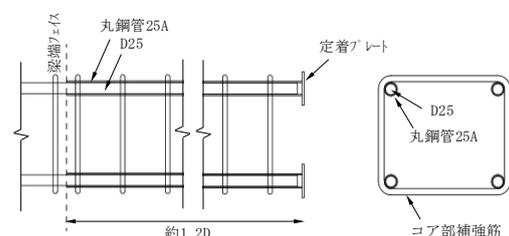


図3. ヒンジ部損傷抑制コアの詳細

3. 研究の方法

本研究の目的を達成するために、従来構造のRC 梁と提案構造のRC 梁試験体を作製し、正負項番の繰返し静加力実験を行った。ヒンジ部損傷抑制コアに要求される構造性能は次に示す a) から d) の4 項を設定し、構造実験結果の検討からその効果を確認した。

- せん断余裕度を下げる要因となる曲げ強度を上昇させない
 - 見かけ上のせん断応力を低下させる
 - せん断ひび割れの拡大を抑えせん断変形の増大を抑制する
 - 従来構造よりも履歴ループを改善し吸収エネルギー量が増大する
- これらの項目について実験データの分析を行い、その性能を考察した。

(1) 2018 年度実験

試験体は 1/2 縮尺の RC 造曲げ降伏型梁部材とし、基準となる従来構造の基本性能は「鉄筋コンクリート構造保有水平耐力計算規準（案）・同解説」（2016 年日本建築学会発行）の設計例を参考とした。試験体は従来構造 1 体とヒンジ部損傷抑制コアを有する試験体 4 体の計 5 体であり、梁の主筋量・せん断補強筋量は全て共通である。ヒンジ部損傷抑制コア有り試験体のパラメータは、目標性能の b) と c) に影響があると考えられる、コア断面せい、ダボ筋本数およびコア拘束筋量である。表 1 に試験体一覧を、図 4 に試験体形状および梁断面図を示す。

鉄筋およびコンクリート材料試験結果を反映した試験体のせん断余裕度(Q_{su}/Q_{mu})は修正荒川式 mean 式に対して約 1.3、せん断応力度レベル(τ_u/σ_B)は約 0.05 であった。

(2) 2019 年度実験

今日までの RC 造梁の実験的研究で、RC 梁部材の構造性能がせん断余裕度が 1 に近く、せん断応力度レベルが高い場合、曲げ降伏後に全変形量に占めるせん断変形成分が増加し定常ループが逆 S 字状となりエネルギー吸収性能が低下する傾向が認識されている。そこで、2019 年度の試験体は、2018 年度の実験結果で得られた成果を踏まえ、せん断余裕度(Q_{su}/Q_{mu})が 1.0、かつ、せん断応力度レベル(τ_u/σ_B)が 2018 年度の倍となる約 0.1 という条件でもヒンジ部損傷抑制コアが同じような効果を発揮できるかを確認するための梁断面を計画した。また、せん断応力度レベルが高い RC 梁では、せん断補強として梁断面中央を横断する中子筋を配筋する。この中子筋を配筋した場合、ヒンジ部損傷抑制コア設置に対する施工性を考慮し、提案梁の断面では中子筋を配置せず外周せん断補強筋を倍にする対応を行った。中子筋は、せん断破壊防止や付着割裂破壊防止に効果があるので、RC 部材の靱性確保にとっては高い効果を有する。2019 年度試験体は、前述のような曲げ降伏後にせん断変形成分が増加する可能性が高く、さらに靱性確保に有益な中子筋を配筋しない条件下におけるヒンジ部損傷抑制コアの効果を検討することを目的に試験体を計画した。

表 1. 2018 年度試験体一覧

試験体名	断面形状		F_c N/mm ²	主筋	stirrup	P_w (%)	コア形状		ダボ筋	コア拘束筋		
	b mm	D mm					b'	d'		配筋	P_{wc} (%)	P_{wc}/P_w
BN-1	250	400	24	上下とも 4-D16 (SD490)	D6@75 (SD295A)	0.34	—	—	—	—	—	—
BC-1							150	200	4-D13 (SD490)	D4@50	0.34	1.0
BC-2							150	160	6-D13 (SD490)			
BC-3										D4@25		
BC-4												

表 2. 2019 年度試験体一覧

試験体名	断面形状		F_c N/mm ²	主筋	stirrup	P_w (%)	コア形状		ダボ筋	コア拘束筋			パラメータ
	b mm	D mm					b'	d'		配筋	P_{wc} (%)	P_{wc}/P_w	
BN-2	250	400	24	上下とも 6-D16 (SD490)	4-D6@75 (SD295A)	0.68	—	—	—	—	—	—	従来梁 履歴B
BC-5							150	200	6-D13 (SD390)	D4@25	0.67	1.0	履歴A
BC-6													
BC-7													

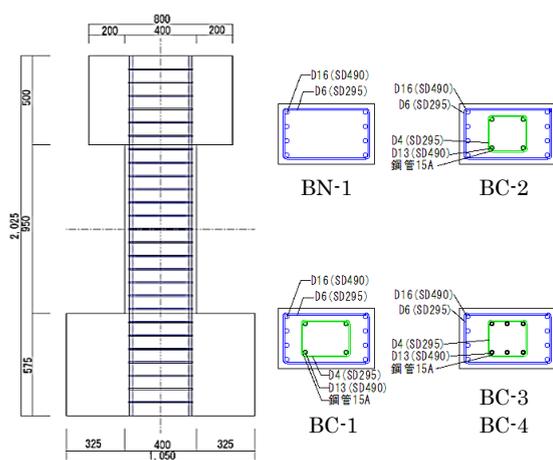


図 4. 2018 年度試験体形状・断面

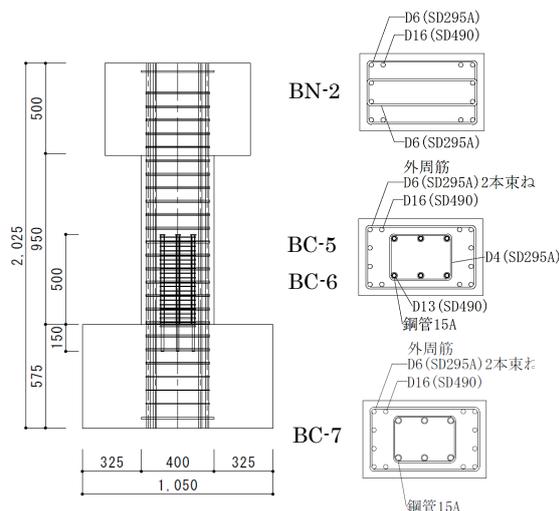


図 5. 2019 年度試験体形状・断面

2019年度の試験体も2018年度と同様に1/2縮尺のRC造曲げ降伏型梁部材とするが、梁断面の構造性能に関しては、せん断余裕度(Q_{su}/Q_{mu})をほぼ1.0、せん断応力度レベル(τ_u/σ_B)を0.1程度となるよう設計した。また、ヒンジ部損傷抑制コアの効果が繰り返し回数によって変化するかの確認するために、加力履歴をパラメータの1つに追加した。さらに、2018年度の実験結果ではダボ筋の効果が不明であったので、梁端フェイスにダボ筋が無い試験体を追加した。表2に2019年度の試験体一覧を、図5に試験体形状および梁断面図を示す。

(3) 加力計画・測定方法

図6に加力装置を、図7に加力履歴を示す。加力は片持ち梁形式であり、上スタブに取り付けた1000kN油圧ジャッキにより正負交番繰返し加力を行った。2018年度の試験体すべてと2019年度のBC-6は履歴Aで実験を行った。それ以外の2019年度試験体は履歴Bである。基本となる履歴Aは、部材角 $R=\pm 1/1600\text{rad}$ を1回、 $\pm 1/800$, $\pm 1/400\text{rad}$ を各2回載荷し、 $\pm 1/200$, $\pm 1/133$, $\pm 1/100\text{rad}$ を各3回、 $\pm 1/67$, $\pm 1/50$, $\pm 1/25$, $\pm 1/20\text{rad}$ を各2回ずつ載荷した。履歴Bは履歴Aで3回繰返す $\pm 1/200$, $\pm 1/133$, $\pm 1/100\text{rad}$ を各10回繰返すこととした。測定項目は、試験区間の水平変位および軸方向変位、曲率分布、せん断変形などである。試験体の主筋、せん断補強筋、ダボ筋、コア拘束筋、および鋼管にひずみゲージを貼付した。

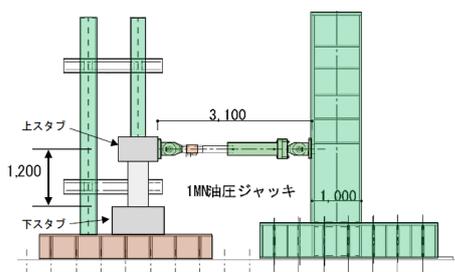


図6. 加力装置

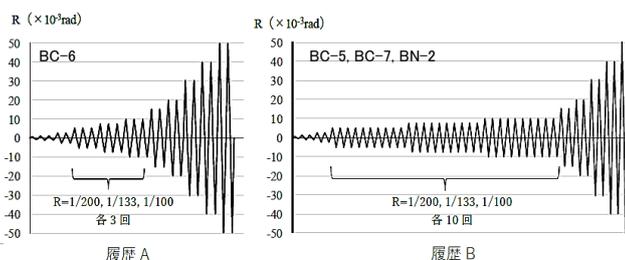


図7. 加力履歴

(4) 解析的検討

ヒンジ部損傷抑制コアは、新しい技術であることから実験研究以外に研究蓄積はなく、その評価方法が課題となる。そこで、2018年度の試験体2体(BN-1, BC-1)および2019年度の試験体2体(BN-2, BC-5)について有限要素法解析より検討した。解析ツールは、有限要素解析ソフトFINALを用い、2次元モデルで一方向載荷を行った。解析に使用したコンクリートや鉄筋の材料強度やヤング係数は、実験の材料試験結果と同じ値を使用した。解析でもヒンジ部損傷抑制コアの効果が実験と同様に得られるか、さらに解析の有効性および課題を明らかにすることを目的に行った。

4. 研究成果

ヒンジ部損傷抑制コアに設定した4項目の要求性能[研究目的に掲げたa)からd)]は、いずれについても効果があることが確認できた。以下、項目ごとに概要を述べる。

(1) 要求性能 a) せん断余裕度を下げる要因となる曲げ強度を上昇させない

表3に2018年度試験体の諸強度の実験値と計算値の比較を、表4に2019年度試験体の諸強度の実験値と計算値の比較を示す。これら表で曲げ終局強度の比較から従来梁とヒンジ部損傷抑制コアを有する試験体の曲げ終局強度に著しい差はなく、計算値に対して約1.2倍であった。

(2) 要求性能 b) 見かけ上のせん断応力を低下させる

表3, 表4に示したせん断ひび割れ強度の比較から、ヒンジ部損傷抑制コアを有する試験体は計算値に対して実験値が高くなる傾向が見られた。今回の実験では、せん断応力度レベルが高い方がその傾向が強かった。

表3. 諸強度の実験値と計算値の比較 (2018年度試験体)

試験体名	初期剛性			曲げひび割れ強度			せん断ひび割れ強度			曲げ終局強度		
	$E K_0$	K_0	$\frac{E K_0}{K_0}$	$E Q_{mc}$	$c Q_{mc}$	$\frac{E Q_{mc}}{c Q_{mc}}$	$E Q_{sc}$	$c Q_{sc}$	$\frac{E Q_{sc}}{c Q_{sc}}$	$E Q_{mu}$	$c Q_{mc}$	$\frac{E Q_{mu}}{c Q_{mc}}$
	kN/mm	kN/mm		kN	kN		kN	kN		kN	kN	
BN-1	44.1	35.3	1.25	32.5	20.7	1.57	86.8	81.3	1.07	136.6		1.18
BC-1	46.1	35.6	1.29	35.0	21.0	1.67	96.2	82.4	1.17	136.9		1.18
BC-2	46.7	35.6	1.31	35.0	21.0	1.67	102.3	82.4	1.24	137.7	116.1	1.19
BC-3	45.4	36.0	1.26	32.0	21.5	1.49	101.5	84.2	1.21	139.5		1.20
BC-4	44.7	40.1	1.12	34.0	21.2	1.60	101.8	84.5	1.20	139.0		1.20

表4. 諸強度の実験値と計算値の比較 (2019年度試験体)

試験体名	初期剛性			曲げひび割れ強度			せん断ひび割れ強度			曲げ終局強度		
	$E K_0$	K_0	$\frac{E K_0}{K_0}$	$E Q_{mc}$	$c Q_{mc}$	$\frac{E Q_{mc}}{c Q_{mc}}$	$E Q_{sc}$	$c Q_{sc}$	$\frac{E Q_{sc}}{c Q_{sc}}$	$E Q_{mu}$	$c Q_{mc}$	$\frac{E Q_{mu}}{c Q_{mc}}$
	kN/mm	kN/mm		kN	kN		kN	kN		kN	kN	
BN-2	45.4	39.0	1.16	45.0	18.1	2.49	75.0	81.3	0.92	190.5		1.17
BC-5	45.5	37.6	1.21	45.8	18.2	2.52	121.5	82.4	1.47	193.8	162.4	1.19
BC-6	47.4	39.2	1.21	50.0	17.9	2.79	118.5	82.4	1.44	193.2		1.19
BC-7	45.4	39.0	1.16	43.5	18.2	2.40	100.9	84.2	1.20	192.5		1.19

(3) 要求性能 c) せん断ひび割れの拡大を抑えせん断変形の増大を抑制する

図 8 はヒンジ領域におけるヒンジ領域におけるせん断変形成分の推移を示したものである。せん断応力度レベル(τ_u/σ_B)が 0.05 試験体 (図 8(a)) と同 0.1 試験体 (図 8(b)) を比較するとせん断変形成分は、せん断応力度レベルが高い試験体の方が初期からせん断変形成分量が多い。ヒンジ領域のせん断変形成分量は、せん断応力度レベルと比例関係にあることが確認できた。

せん断応力度レベルの高低に関係なく、ヒンジ部損傷抑制コアを有する試験体は、従来構造試験体よりもせん断変形成分量の増加が抑制されていることが確認できた。せん断応力度レベルが高い場合、ヒンジ部損傷抑制コアは部材変形角の小さい段階からせん断変形成分の増加を抑制する効果がある。

(4) 要求性能 d) 従来構造よりも履歴ループを改善し吸収エネルギー量が増大する

従来構造梁と提案構造梁のエネルギー吸収量を比較するために、部材角 $R=1/400$ から $1/33$ における定常ループの履歴面積を比較した。図 9 は 2018 年度試験体を比較したものであり、図 10 は 2019 年度試験体を比較したものである。

せん断応力度レベル 0.05 では、曲げ降伏以前からエネルギー吸収量が増加する傾向が見られ、曲げ降伏した $R=1/100$ 以降は安定した増加が見られる。せん断応力度レベル 0.1 では、曲げ降伏以前の傾向は見られなくなった。曲げ降伏する $R=1/100$ での増加割合が高いが、変形を増大させてもエネルギー吸収量の増加割合は高くならなかった。

せん断応力度レベルが高い試験体の従来構造梁は中子筋があるためヒンジ部損傷抑制コアの効果十分に発揮できなかったと推察する。せん断補強筋の条件を同一にすることが正しいヒンジ部損傷抑制コアの評価に繋がる。

中子筋が必要な場合でヒンジ部損傷抑制コアを設置する場合には、中子筋をコ字形に加工し上下主筋方向から割配筋する方法が考えられる。せん断補強筋の配筋条件を同じにした場合のヒンジ部損傷抑制コアの実験研究を今後実施する予定である。本提案構造によって RC 梁のエネルギー吸収性能が改善されれば、地震時における建物の変形を抑えることができる。

(5) 解析的検討

解析的検討により、耐力やひび割れ性状におけるヒンジ部損傷抑制コアによる定性的な効果が確認できた。ヒンジ部損傷抑制コア部分の応力や損傷については 2 次元モデルでは検討できないので、内部の応力やひずみ状態が追跡できる 3 次元モデルによる検討が今後の課題である。

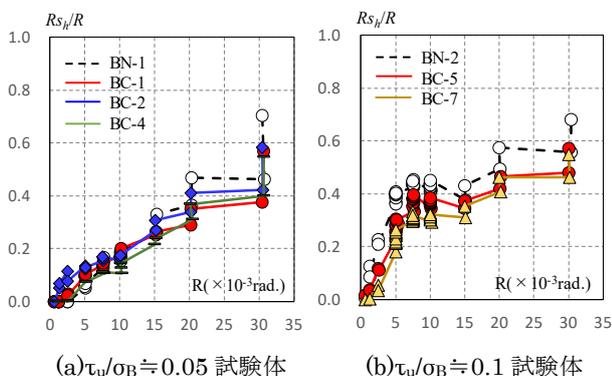


図 8. ヒンジ領域のせん断変形成分の推移

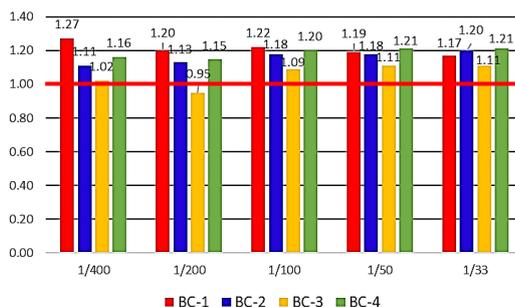


図 9. 定常ループのエネルギー吸収量の比較 (2018 年度)

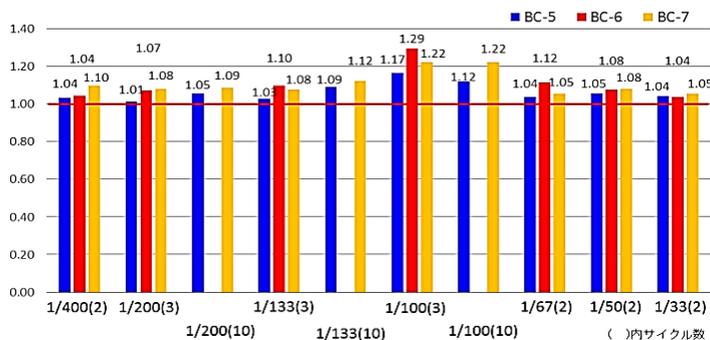


図 10. 定常ループのエネルギー吸収量の比較 (2019 年度)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 都祭弘幸	4. 巻 Vol.41, No.2
2. 論文標題 ヒンジ部損傷抑制コアの効果に関する実験的研究	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 コンクリート工学年次論文集	6. 最初と最後の頁 181, 186
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 都祭弘幸, 坂本啓太, 平田延明, 吉田敏之, 野畑茂雄, 野田亜久里
2. 発表標題 エネルギー吸収性能改善型RC梁部材に関する実験的研究 その1. ヒンジ部損傷抑制コア詳細および試験体
3. 学会等名 日本建築学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 野田亜久里, 都祭弘幸, 平田延明, 石渡康弘, 阿部隆英, 吉田敏之
2. 発表標題 エネルギー吸収性能改善型RC梁部材に関する実験的研究 その2. 実験計画および実験結果概要
3. 学会等名 日本建築学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 長山浩二, 都祭弘幸, 野畑茂雄, 前川利雄, 久保田雅春, 平田延明
2. 発表標題 エネルギー吸収性能改善型RC梁部材に関する実験的研究 その3. 実験結果の分析
3. 学会等名 日本建築学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 平田延明, 都祭弘幸, 坂本啓太, 長山浩二, 前川利雄, 石渡康弘
2. 発表標題 エネルギー吸収性能改善型RC梁部材に関する実験的研究 その4 せん断応力度レベルが高い梁部材への適用実験
3. 学会等名 日本建築学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 長山浩二, 都祭弘幸, 阿部隆英, 野田垂久里, 野畑茂雄, 平田延明
2. 発表標題 エネルギー吸収性能改善型RC梁部材に関する実験的研究 その5 実験結果概要
3. 学会等名 日本建築学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 都祭弘幸, 石渡康弘, 野田垂久里, 平田延明, 久保田雅春, 長山浩二
2. 発表標題 エネルギー吸収性能改善型RC梁部材に関する実験的研究 その6 結果分析および考察
3. 学会等名 日本建築学会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 配筋構造	発明者 都祭弘幸, 野田垂久里, 石渡康弘, 坂本啓太, 平田延明, 長	権利者 福山大学, 熊谷組, 鉄建設, 飛鳥建設, 長谷
産業財産権の種類、番号 特許、特願2019-087687	出願年 2019年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

-

6. 研究組織	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------