

令和 6 年 5 月 29 日現在

機関番号：35409

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04364

研究課題名(和文)高せん断応力度比RC造梁の損傷制御法に関する実験研究

研究課題名(英文)Experimental study on damage control methods for RC-beams under high shear stresses

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) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：鉄筋コンクリート造梁部材は、地震時に粘り(靱性)を確保するために部材端部の鉄筋やコンクリートに損傷が生じてヒンジという回転領域が発生させる構造設計を行う。建築基準法では部材に作用する力と材料強度との比を制限しているが、その比が大きくなるとヒンジ部の損傷が激しくなり回転性能の低下に伴い靱性が低下する。本研究で提案した端部トラス筋を梁端部ヒンジに配筋することによって、従来構造よりも中小地震では危険と言われる斜めひび割れ発生を抑制することができる。また、大地震時においては、ヒンジ部のせん断変形(横ずれ変形)を抑制できるので強度と粘りを大幅に改善することができることが確認できた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で提案したヒンジ領域に配筋する端部トラス筋は、X形配筋(主筋を部材対角状に配し曲げ抵抗・せん断抵抗に有効な配筋方法)と異なり端部断面で定着されていないので端部での引張抵抗力はない。しかし、端部トラス筋はX形配筋のようにせん断力とコンクリート圧縮強度との比の増加に比例し、せん断ひび割れ発生を遅延し、同ひび割れ発生後はひび割れ幅の拡大を抑制することができる。この現象は、せん断補強筋とは異なる対する新しい抵抗機構である。設計に利用することによって、中小地震時のひび割れや大地震時の損傷が抑制できるので、地震後の継続使用や修復・メンテナンスなどの軽減が期待でき、建物の維持管理の効率化が図れる。

研究成果の概要(英文)：In reinforced concrete beam members, structural design is carried out to create a rotational region called a hinge at the ends of the members, allowing the reinforcement and concrete at the ends to sustain damage during earthquakes to ensure ductility. The Building Standards Act restricts the ratio of the forces acting on the members to the material strength, but if this ratio is high, the damage to the hinge area becomes severe, reducing rotational performance and thereby lowering ductility. By reinforcing the beam-end hinges with the proposed end truss bars in this study, it is possible to suppress the occurrence of diagonal cracks, which are considered dangerous in minor to moderate earthquakes, compared to conventional structures. Additionally, during major earthquakes, the shear deformation (lateral displacement) of the hinge area can be controlled, significantly improving both strength and ductility.

研究分野：建築構造

キーワード：端部トラス筋 高せん断応力度比 ヒンジ領域 せん断ひび割れ 曲げ降伏型 せん断変形成分 損傷抑制

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

鉄筋コンクリート造建築物の構造設計では、建設費削減のため保有水平耐力時に入力地震動を軽減できるように、梁曲げ降伏型の靱性能に富む設計が実施されている。梁曲げ降伏型の場合、設計用地震力に影響する要因は梁自体の靱性ランクで決定され、そのランクは梁に作用するせん断応力度比 (τ_u/Fc) だけで設定されている。現在の建築基準法では、最も靱性能に優れた部材種別 FA のせん断応力度比は 0.15 以下となっている。高せん断応力度比であっても、せん断補強筋を増やすことによって付着割裂破壊を防止すれば限界変形角 $R=25 \times 10^{-3} \text{rad}$ を確保する設計法が確立しているが、履歴性状の改善は考えられていない。高せん断応力度が作用する RC 部材は、曲げ降伏後にヒンジ領域のコンクリート損傷が激しくなり、せん断変形成分やスリップ変形の増加によりエネルギー吸収性能が低下することが考えられる。

RC 造梁部材に求められる曲げ強度に対するせん断強度の比や部材の限界変形については明確になっているが、変形性能を左右するであろうヒンジ領域に必要な機能・構造性能はまだ明確になっていないと考えられる。

2. 研究の目的

本研究の目的は、せん断応力度比 0.15 (部材種別 FA の上限値) に近い RC 造梁の曲げ降伏後の履歴性状を改善するため、構造実験や解析検討から提案する断面配筋の効果を従来配筋の破壊性状・履歴性状と比較して定性的に明らかにすることである。

図1(a)に従来梁および(b)・(c)に提案する配筋ディテールを示す。提案する配筋は、以下に示すように2つの効果を狙った補強である。

- ・端部トラス筋：トラス機構における圧縮力伝達補強
- ・腹部拘束筋：ヒンジ部コンクリートの拘束

(1) 端部トラス筋

端部トラス筋の配筋ディテールを図2に示す。従来梁のヒンジ領域 1D 区間 (D: 梁せい) に 45 度方向に配する鉄筋で梁端部のアングルに溶接し、梁内部は折り曲げ位置から 20d の定着をとる。アングルは梁端部フェイス位置に置かれたままなので引張力には抵抗せず、スリップ防止筋とはメタルタッチとしている。そのため、端部トラス筋の圧縮力はフェイス面をスリップすることなく柱に伝達される。端部トラス筋に引張力が生じててもフェイス位置で曲げ抵抗力は発生しない。

RC 造には主筋を X 形に配筋し、曲げ抵抗とともにせん断抵抗力を高めるという手法があるが、端部トラス筋は曲げモーメントに抵抗せず、せん断理論モデルにおけるコンクリートの圧縮トラスに対し、鉄筋による引張トラスを配置するアイデアである。

(2) 腹部拘束筋

腹部拘束筋は、2019年5月に特許出願した配筋方法 (発明名称: 配筋構造) を改良したものである。図2に示すように配筋構造では、ヒンジ部の断面中央に損傷抑制コアを配している。本研究のようにせん断応力度比が高い梁部材に対応させるため、コア拘束領域を梁断面全幅に改良する。

既往の研究では、この損傷抑制コアはせん断応力度が高くなる断面中央部を拘束するので、従来梁よりもひび割れ強度を高める効果があることが構造実験により確認されている。また、これを配した梁はヒンジ部のせん断変形が抑制され、エネルギー吸収性能が2割程度向上することを確認されている。本研究では拘束域を梁断面幅に拡張させた。さらに梁端部の主筋近傍コンクリート拘束筋を配し、曲げ変形時の圧縮側補強を図った。

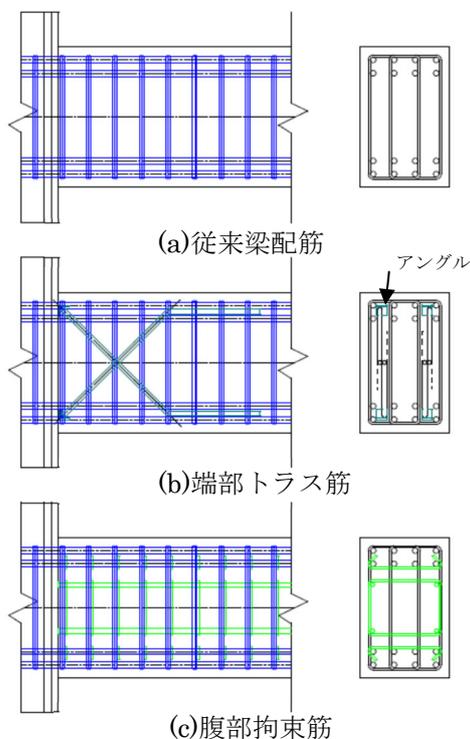


図 1. 梁配筋ディテール

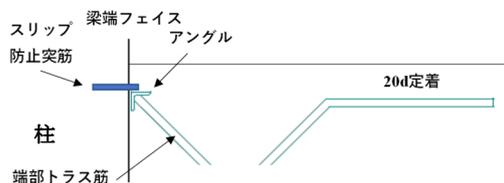


図 2. 端部トラス筋ディテール

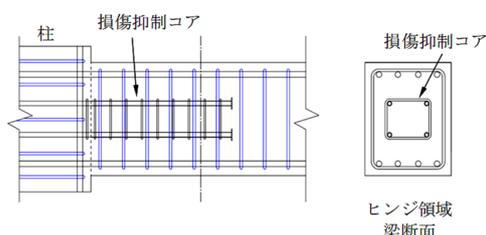


図 3. 特許出願した配筋構造

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、正負項番の繰り返し静加力実験を行った。せん断応力度比 τ_u/F_c が 0.15 程度の曲げ降伏型 RC 梁部材の構造実験を実施し、下記の項目について実験データの分析・検討を行った。

- ・ヒンジ領域に設置した端部トラス筋が履歴性状・破壊性状に及ぼす効果
- ・腹部拘束筋が履歴性状・破壊性状に及ぼす効果
- ・端部トラス筋に作用する内部応力の検討

(1) 2021 年度実験

試験体は 1/2 縮尺の RC 造曲げ降伏型梁部材であり、曲げ降伏時のせん断応力度比が $\tau_u/F_c \approx 0.15$ (部材種別 FA の上限値) となるように設計した。試験体一覧を表 1 に、試験体ヒンジ部配筋方法を図 4 に示す。G0 は従来梁配筋で標準試験体であり、GT1 はヒンジ部に端部トラス筋を配筋した試験体である。端部トラス筋は、下スタブには定着させず境界面でアングル(L-5×30)に溶接している。圧縮側のアングル外側にスリップ防止として下スタブから $\phi 13$ を設置している。GC1 は境界面から 0.5D(D:梁せい)区間の全主筋の付着を除去した試験体で、梁断面中央にはエネルギー吸収性能改善で効果が期待できる損傷抑制コアを設置した試験体である。付着除去をしているので、せん断力伝達用に添え筋を配筋している。また、2 段主筋には主筋拘束筋を配筋している。主筋・せん断補強筋ともに高強度鉄筋を使用している。せん断余裕度は計算値で 1.07 である。

実験は図 5 に示す加力点位置に 1MN 油圧ジャッキを取付け、引きを正加力とする正負交番の繰り返し加力を行った。加力制御は、加力点位置における部材角 R で図 6 に示す加力プログラムの通りである。計測は試験部の水平・鉛直変位のほか、曲率・ヒンジ領域のせん断変形角などを変位計により計測した。主筋・せん断補強筋など鉄筋にはひずみゲージを貼付した。

表 1. 2021 年度試験体一覧

試験体名	断面		配筋		ヒンジ部配筋
	b (mm)	D (mm)	主筋	あばら筋	
G0	250	400	上下とも 4-U7.1@75	4-U7.1@75 (SBPD1275)	従来梁
GT1			8-D16 (SD685)	(SBPD1275)	端部トラス筋
GC1			$p_s=1.87\%$	$p_w=0.85\%$	主筋付着除去等

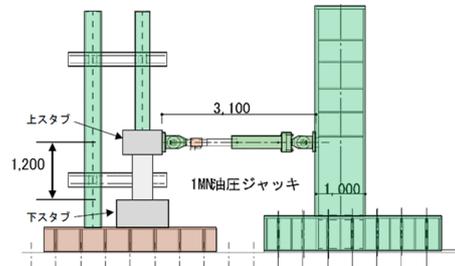


図 5 加力装置

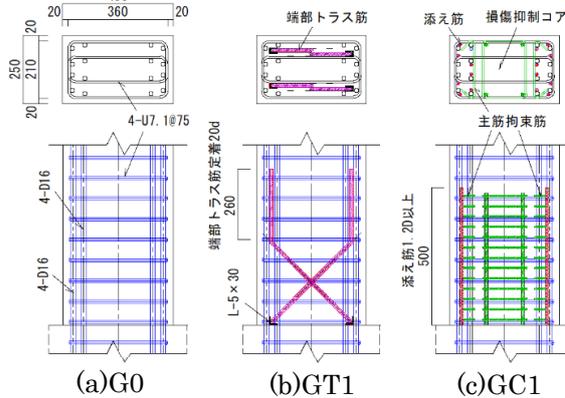


図 4 ヒンジ部配筋方法

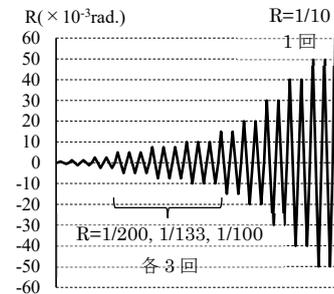


図 6 加力プログラム

(2) 2022 年度実験

試験体一覧を表 2 に、試験体配筋図および断面図を図 7 に示す。試験体断面は縮尺 1/2 で、シラスパン 1.5 となる形状とした。各試験体とも曲げ降伏時のせん断応力度比が $\tau_u/F_c \approx 0.15$ となるよう計画した。G2 は従来梁配筋の標準試験体で、主筋は 4-D16(SD390)を 2 段配筋し、あばら筋は 6-D6(SD295)@50 で配筋している。GT2 および GT3 は、境界面から 0.5D(D:梁せい)区間の全主筋の付着を除去し、ヒンジ部損傷制御筋を配筋した試験体である。GT2 の端部トラス筋には D13(SD295)を使用し、GT3 には K13(KW785)の高強度鉄筋を使用してヒンジ部補強に用いた鉄筋の強度差により、ヒンジ部の損傷、せん断変形角の増加などに違いが現れるかを検証した。

曲げ降伏型 RC 梁のヒンジ部に作用するせん断応力は主筋引張強度 $T_m(a_r \cdot \sigma_y)$ によって決定される。2018 年度の試験体 GT1・GC1 と本試験体の補強筋との強度・断面積比較を表 4 に示す。既往の実験研究では、GT1 の端部トラス筋は、主筋に対する引張強度に対して強度比 T_t/T_m で 8.0% である。GC1 の添え筋は、主筋に対する引張強度に対し強度比 T_t/T_m で 19.7% である。本研究では、ヒンジ部損傷制御筋の主筋に対する引張強度比 T_t/T_m は、GT2 の D13(SD295)が 10.2% で GT1 とほぼ同等、GT3 の K13(KW785)が 26.5% で 2 倍以上の強度を有する。断面積比は、GC1 を除き全て同じ配筋量である。

加力装置を図 8 に示す。加力方法は、建研式逆対称加力装置を用い正負交番の漸増繰り返し加力を行った。鉛直の油圧ジャッキで試験体に作用する軸力がゼロになるよう制御した。加力プログラムは、2021 年度実験と同じである (図 6 参照)。変位計測は、水平変位および鉛直変位のほ

か、曲率変形、ヒンジ部のせん断変形および境界面でのスリップ変形を測定した。また鉄筋のひずみ度を測定するため、主筋、せん断補強筋およびヒンジ部損傷制御筋にそれぞれひずみゲージを貼付した。端部トラス筋のひずみ測定位置を図9に示す。

表2 2022年度試験体一覧

試験体名	b (mm)	D (mm)	配筋		ヒンジ部配筋
			主筋	あばら筋	
G2	280	400	上下とも 8-D16 (SD390) $p_v=1.67\%$	6-D6@50 (SD295) $p_w=1.37\%$	従来梁配筋
GT2					ヒンジ部損傷制御筋 D13(SD295)
GT3					ヒンジ部損傷制御筋 K13(KW785)

表3 ヒンジ部補強筋と主筋の引張強度比較

試験体	ヒンジ部補強筋				主筋				強度比 %	断面積比 %
	補強筋 径(材種)	本数	σ_y N/mm ²	Tt kN	径 (材種)	本数	σ_y N/mm ²	Tm kN		
GT1	端部トラス筋 D13(SD295)	2	349	88.5	D16 (SD685)	8	693	1104	8.0	16.0
GC1	添え筋 D10(SD295)	8	383	217					19.7	35.7
GT2	ヒンジ部 損傷制御筋 D13(SD295)	2	320	81.3					10.2	16.0
GT3	ヒンジ部 損傷制御筋 K13(KW785)	2	832	211	D16 (SD390)	8	501	798	26.5	16.0

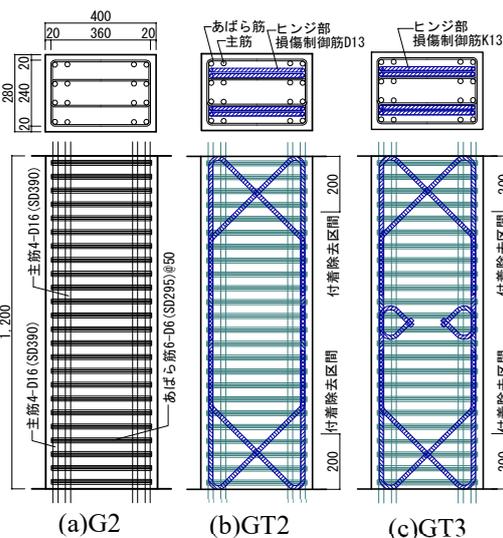


図7 2022年度試験体配筋図および断面図

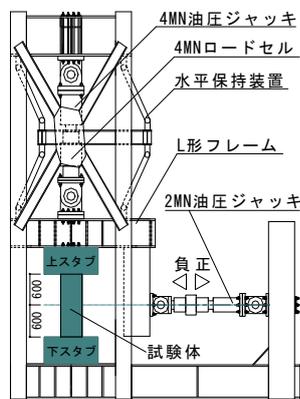


図8 加力装置

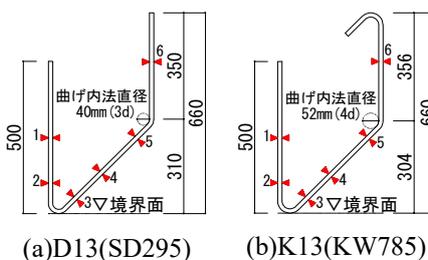


図9 ヒンジ部損傷制御筋
ひずみ測定位置

(3) 2023年度実験

2023年度の構造実験目的は、端部トラス筋の断面積の影響を検討することとした。試験体は、2022年度試験体GT2と主筋・せん断補強筋は同じ配筋とし、施工性を考慮して主筋付着除去を取り止め、端部トラス筋断面積を2倍にした1体である。

加力方法および計測方法は、2022年度と同様である。

4. 研究成果

高せん断応力度比RC梁部材の履歴性状改善を目的として設定した3項目について様々な観点から検討を行い提案工法の効果を確認した。以下に概要を述べる。

(1) エネルギー吸収性能の改善

2021年度の試験体は、せん断スパン比が3.0であるため弾性域においてもせん断変形成分が少なくなる傾向がある。図10は、2021年度試験体3体のヒンジ領域におけるせん断変形角の推移である。腹部拘束筋を配筋したGC1は、弾性域から従来梁G0よりもせん断変形成分の増加が抑制され、曲げ降伏以降、大変形域までせん断変形成分が抑えられている。この効果によって、履歴ループが改善され、エネルギー吸収性能を改善することができた(図11参照)。端部トラス

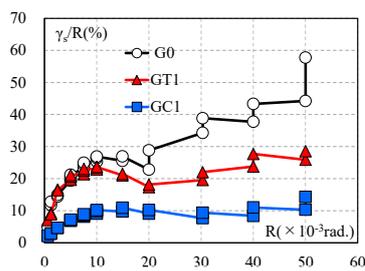


図10 せん断変形角の推移

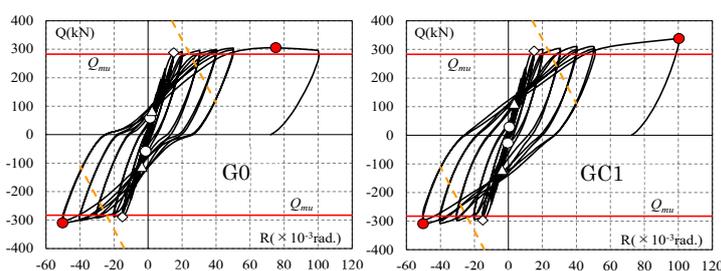


図11 荷重-部材角関係

筋についてもエネルギー吸収性能は向上したが、腹部拘束筋ほどではなかった。

(2)強度・剛性への効果

表4に2021年度,表5に2022・2023年度実験の諸強度に関する実験値と計算値の比較を示す。腹部拘束筋および端部トラス筋は、弾性剛性・曲げひび割れ強度および曲げ終局強度に影響を及ぼすことはないが、弾性域ではせん断ひび割れ強度を上昇させる効果が確認できた。従来梁が2割程度の余裕度を持っているのに対して、提案工法は4割以上の余裕度（実験値/計算値の平均1.51）が確保できる。また、曲げ降伏後ではせん断ひび割れ発生本数を抑制できる効果が期待できることが確認できた。端部トラス筋の利用は中小地震に対する損傷軽減が可能となる。

表4 諸強度に関する実験値と計算値の比較（2021年度実験）

試験体名	弾性剛性			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	$\frac{K_0}{K_0}$	kN	kN		kN	kN		kN	kN	
G0	52.3	41.1	1.27	58.3	22.9	2.54	97.9	77.2	1.27	307.6		1.09
GT1	51.2	41.7	1.23	51.7	22.8	2.26	129.1	77.3	1.67	325.9	282.9	1.15
GC1	43.8	42.3	1.04	28.3	22.8	1.24	116.1	77.5	1.50	323.5		1.14

表5 諸強度に関する実験値と計算値の比較（2022・2023年度実験）

試験体名	弾性剛性			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	
G2	195.8		0.70	108.7		2.08	152.3		1.16	443.0		1.08
GT2	139.3	278.8	0.50	80.8	52.2	1.55	186.5	131.7	1.42	437.1	408.6	1.07
GT3	157.5		0.56	75.9		1.45	194.8		1.48	435.2		1.07
GT4	200.7	245.5	0.82	91.5	53.8	1.70	195.8	132.7	1.48	436.2	407.9	1.07

(3)変形性能改善の効果

図12にせん断スパン比1.5のヒンジ部におけるせん断変形角-部材各関係を、図13にせん断スパン比1.5の正側包絡線を示す。図12より、端部トラス筋は曲げ降伏以前からヒンジ部のせん断変形成分の増加を抑制し、大変形までヒンジ部コンクリートの損傷抑制効果を維持した。図12より、端部トラス筋を配した試験体は、せん断変形成分抑制により大変形領域まで曲げ終局強度を維持し、塑性率6以上の変形性能を保有できる。

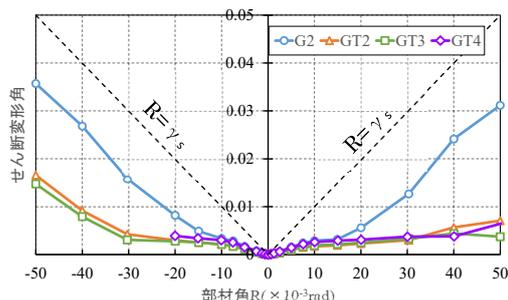


図12 せん断変形角-部材角関係の比較

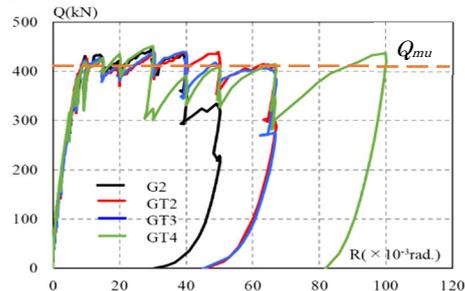


図13 荷重-部材角関係の比較

(4)端部トラス筋の内部応力

ヒンジ領域に配筋した端部トラス筋のひずみ測定結果と断面に作用するせん断応力との関係を分析し、梁部材の弾性域および塑性域における端部トラス筋の挙動・効果を明らかにした。また、弾性域における端部トラス筋のひずみおよび内部応力を推定する一般式を提案した。

以上、本研究で提案した端部トラス筋は、①せん断ひび割れ強度増大、②せん断補強筋降伏の遅延、③ヒンジ部せん断力負担、④ヒンジ部コンクリート損傷抑制、⑤塑性率6以上の変形性能発揮、の効果が期待できることが確認された。地震国日本においてRC梁部材の端部コンクリート損傷を抑制できることは、a)せん断ひび割れの発生・拡大を抑制できるため長期にわたり良好な状態が維持できる、b)地震に対する強靱性が保たれ、地震後でも継続使用ができる、c)将来の修復やメンテナンスなどが軽減され、建物の維持管理の効率化が図れる、などのメリットが期待できる。

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 0件）

1. 著者名 都祭弘幸	4. 巻 第46巻
2. 論文標題 曲げ降伏型RC梁に配した端部トラス筋の効果に関する実験的研究	5. 発行年 2024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 -
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 オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	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 藤井稔己, 都祭弘幸, 五王椋太
2. 発表標題 高せん断応力度比RC造梁の曲げ性能保持に関する実験的研究 その2. せん断スパン比1.5の実験概要
3. 学会等名 日本建築学会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 都祭弘幸, 藤井稔己, 五王椋太
2. 発表標題 高せん断応力度比RC造梁の曲げ性能保持に関する実験的研究 その3. せん断スパン比1.5の実験結果および考察
3. 学会等名 日本建築学会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 都祭弘幸
2. 発表標題 高せん断応力度比RC造梁の曲げ性能保持に関する実験的研究 その1. ヒンジ部補強法基礎実験
3. 学会等名 日本建築学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 都祭弘幸
2. 発表標題 RC造梁に配した端部トラス筋の効果とその力学的特性に関する実験的研究
3. 学会等名 日本建築学会中国支部
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 藤井稔己, 都祭弘幸
2. 発表標題 高せん断応力度比RC造梁の曲げ性能保持に関する実験的研究 その4. 端部トラス筋断面積の影響
3. 学会等名 日本建築学会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 都祭弘幸, 藤井稔己
2. 発表標題 高せん断応力度比RC造梁の曲げ性能保持に関する実験的研究 その5. 端部トラス筋の効果
3. 学会等名 日本建築学会
4. 発表年 2024年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔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
---------	---------