

## 研究助成実施報告書

助成実施年度	2022 年度
研究課題（タイトル）	RC 造梁部材の変形・破壊メカニズムの詳細な解明
研究者名※	浅井 竜也
所属組織※	名古屋大学大学院 環境学研究科 助教 (東京大学生産技術研究所 准教授)
研究種別	研究助成
研究分野	建築技術
助成金額	150 万円
発表論文等	

※研究者名、所属組織は申請当時の名称となります。

( ) は、報告書提出時所属先。

# 大林財団 2022年度研究助成実施報告書

所属機関名 東京大学生産技術研究所  
申請者氏名 浅井竜也

研究課題	RC 造梁部材の変形・破壊メカニズムの詳細な解明
(概要)	
<p>曲げ破壊型の鉄筋コンクリート造構造部材の変形・破壊メカニズムに関しては、主筋が降伏に至る比較的小変形時点までにおいても、斜めひび割れの発生や主筋-コンクリート間の付着力劣化など、部材全体の挙動に与える影響について十分な定量的理解が得られていない局所現象が残されており、このことは効果的に建築耐震性能を向上する上で妨げとなる。一方、近年高度化している計測システムは同部材の変形性状や内部鉄筋ひずみを高空間分解能で捉えることを可能とし、それらにより上記メカニズムの理解を大いに促進し得ることが近年の申請者の研究などにより示され始めている。そのため本研究では、曲げ破壊型の梁部材の静的載荷実験において、同部材の変形・破壊過程時の変形・ひずみ分布を詳細に計測した。それにより、上記現象の発生性状と、それによる部材内ひずみの古典理論（平面保持仮定）との差異、さらに、それが部材耐力に及ぼす影響を定量的に把握した。今後は、同影響を評価するマクロモデルについて、終局状態まで含めて検討する。</p>	

## 1. 研究の目的

建物の耐震性能を適切に評価するには、変形・破壊メカニズムの高精度な把握が重要となる。近年急速に発達する従来よりも高い空間分解能を有する計測方法を用いることで、部材の詳細な挙動を定量的に把握でき、より精度良く変形・破壊メカニズムを再現可能なマクロモデルの構築の手掛かりとなると考えられる。本研究では、そのような計測を導入した静的載荷実験により、RC 造梁部材のマクロモデル構築に向けた基礎的なデータの蓄積することを目的とする。

## 2. 研究の経過

光ファイバーストレインゲージにより鉄筋の連続的なひずみ計測を可能とした RC 梁試験体の静的載荷実験を実施した。

### 2.1 試験体および計測の計画

本研究では、実架構における接合部と同様にモーメントが反転する領域（以下、「みなし接合部」と呼称する）を有する RC 梁部材を模擬する、約 1/3 スケールであり、図 1 に示すようにせん断スパン長さを変数とする計 2 体を計画した。載荷時の詳細な鉄筋ひずみ分布を得るため、図 2 に示すように梁主筋および腹筋に連続的なひずみを計測可能な光ファイバーストレインゲージを貼り付けた。用いた光ファイバーストレインゲージは、内部ファイバーストレインゲージとの良好な一体性が確保可能なポリイミドコーティングがなされたものであり、それを研磨した鉄筋リブ部にアクリル系接着材で貼付した。なお、光ファイバーストレインゲージはせん断補強筋にも設置したものの、多数の折り曲がり部が要因と考えられる光の減衰により計測ができなかったため、今後（本助成後）の実験ではこれを参考に貼付計画を検討する。

両試験体は、幅が 130mm、せいが 200mm であり、主筋を 4-D13[SD295]、あばら筋を D6[SD295]とした。なお、あばら筋は梁部分で 50mm、みなし接合部で 25mm の間隔で配置した。試験体は梁のスパン長さがそれぞれ 600mm と 400mm である SPN600 と SPN400 試験体の 2 体を製作した。表 1 に試験体諸元、表 2 と 3 に材料特性、表 4 に耐力評価<sup>1)</sup>結果をそれぞれ示す。

### 2.2 加力計画

図 3 に正側加力時の載荷装置および載荷プログラムを示す。試験体を載荷装置に設置して、図 4(c) に示すよう

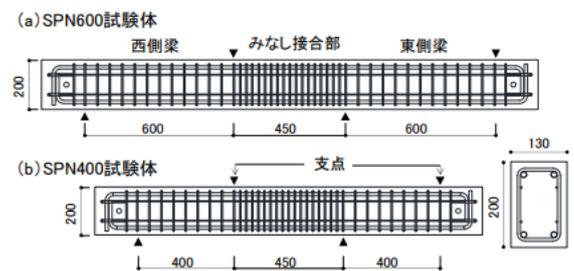


図 1 試験体詳細

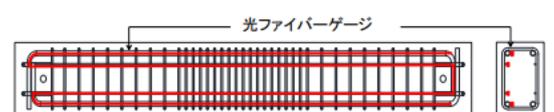


図 2 光ファイバーストレインゲージ貼り付け位置

な RC 梁に逆対称の曲げモーメント分布となることを想定し、オイルジャッキと接続した荷重治具を介して 2 点より外力を与えた。なお、負側加力時は、これらの支点を入れ替えた後に上記と同様な方法で荷重を行った。部材の作用荷重は、図 5 に示すようにそれぞれの支点の直下に設置した 2 台のロードセル(梁:  $Load_1$  と  $Load_2$ , 接合部:  $Load_3$  と  $Load_4$ )の計測値を合計したものとした。それらの計測結果より、応力配分が図 4 の想定値と概ね良好に対応することを確認している。荷重は変位制御で行い、まず梁の変位をそのスパン長さで除した梁の変形角 ( $(\delta_{1,3}-\delta_{2,4})/L_{w,e}$ ) と、接合部の変位をその長さで除した接合部の変形角 ( $(\delta_3-\delta_2)/L_j$ ) の合計値を東側と西側梁でそれぞれ算出 ( $R_{w,E}$ ) し、原則としてその平均を制御変形角  $R$  とした。図 3 に併記する加力プログラムのように、 $R=+0.06\%rad, +0.13\%rad, +0.25\%rad, +0.50\%rad, +0.75\%rad, +1.00\%rad, +1.50\%rad, +2.00\%rad$  を 1 サイクルずつ荷重し、その後各試験体の損傷状態に応じて荷重終了時点を決めた。

### 2.3. 実験結果概要

図 6 に各試験体におけるジャッキの作用荷重一部材変形関係を示す。ここで、部材変形は梁危険断面(梁とみなし接合部の境界面)の変位 ( $\delta_{2,3}$ ) と梁端部の変位 ( $\delta_{1,4}$ ) の差としている(図 5 を参照)。同図より、両試験体とも西側梁の損傷が先行したためその変形が東側梁より大きく、変形の進展に伴うその差異は顕著となっており、特に SPN600 試験体においては弾性領域からその傾向を示した。そこで、本研究では西側梁の挙動を主な考察対象とした。図 7 に試験体の梁せん断力-西側梁変形角関係を示す。同図には表 4 に示した曲げ終局耐力  $Q_{mu}$  の評価結果を併記する。

#### (1) SPN600 試験体 (スパン長さ 600mm)

変形角  $R_w=+0.25\%rad$  加力サイクルで西側梁の危険断面に曲げひび割れの発生を確認した。続いて  $R_w=+4.22\%rad$  時に最大耐力 33.5kN を記録した。その後、大変形時の耐力劣化推移を確認するため、 $R_w=7.00\%rad$  まで正側押切荷重を行った。

#### (2) SPN400 試験体 (スパン長さ 400mm)

変形角  $R_w=+0.25\%rad$  加力サイクルで西側梁の危険断面に曲げひび割れの発生を、 $R_w=+1.50\%rad$  加力サイクルで接合部にせん断ひび割れの発生を確認した。続いて  $R_w=+1.83\%rad$  時に最大耐力 49.3kN を記録した。その後、負側加力サイクル時の推移を確認するため負側押切荷重を行い、 $R_w=-1.83\%rad$  時に最大耐力-49.2kN を発揮した後、圧縮側かぶりコンクリートの剥落に伴い安定した荷重が継続困難となり荷重を終了した。

両試験体の最大耐力に着目すると、実験値は計算値を 2 割程度(SP600 試験体: 21%, SPN400 試験体: 18%)上回る結果が示された。

表 1 試験体諸元

	SPN600 試験体	SPN400 試験体
スパン	600mm	400mm
みなし接合部の長さ	450mm	
引張鉄筋比 (%)	1.20	
せん断補強筋比 (%)	0.97 (接合部: 1.2)	
主筋	4-D13 [SD295]	
腹筋	4-D4 [SD295]	
補強筋	D6@50 [SD295] (接合部: @25)	

表 2 コンクリートの材料特性

ヤング係数	圧縮強度	割裂強度
$2.66 \times 10^4$	37.9	3.35

単位: N/mm<sup>2</sup>

表 3 鉄筋の材料特性

	ヤング係数 (N/mm <sup>2</sup> )	降伏強度 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	降伏ひずみ ( $\mu$ )
D13 [SD295]	$2.02 \times 10^5$	353.4	493.3	1792
*D6 [SD295]	$2.02 \times 10^5$	331.2	515.7	3639
*D4 [SD295]	$1.70 \times 10^5$	365.2	523.2	4143

\*0.2% オフセット耐力

表 4 試験体の耐力計算値

	SPN600 試験体	SPN400 試験体	接合部
$M_u$ (kNm)	16.7	16.7	16.7
$Q_{mu}$ (kN)	27.8	41.7	74.1
$Q_{su}$ (kN)	53.0	58.7	83.1
$Q_{su}/Q_{mu}$	1.91	1.41	1.12

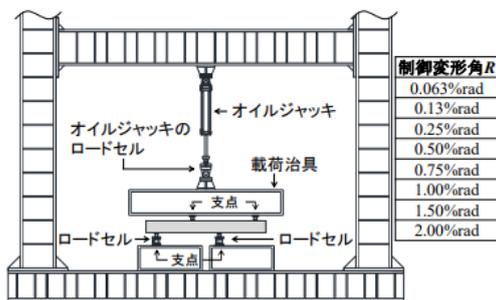


図 3 荷重装置図および加力プログラム

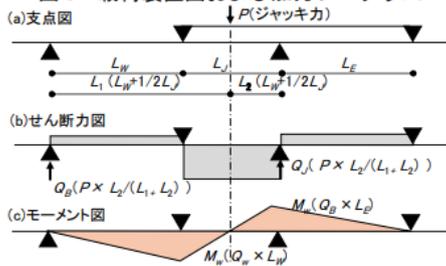


図 4 応力配分計画

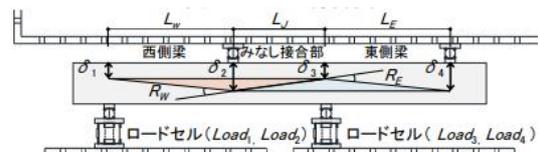


図 5 制御計画

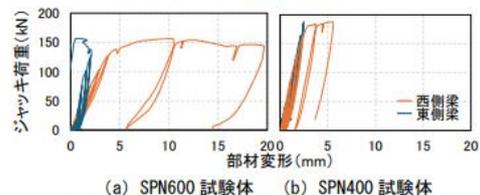


図 6 ジャッキの作用荷重一部材変形関係

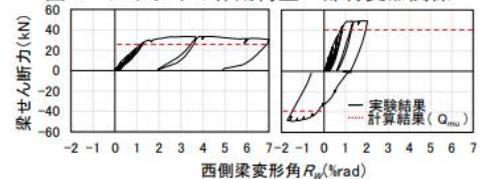


図 7 試験体のせん断力-変形角関係

### 3. 研究の成果

上記の RC 梁試験体の静的載荷実験について、主筋降伏までを対象に、鉄筋のひずみ分布に主に着目し、その古典理論との違いの発生要因を分析する。

#### 3.1 光ファイバーゲージによる鉄筋ひずみの計測結果

図 8 に両試験体の光ファイバーゲージにより計測した主筋および腹筋のひずみの分布を示す。同図では、目視でひび割れが確認される前の弾性領域を対象に、30mm 区間ごとの平均ひずみを示している。両試験体ともひずみが危険断面(梁とみなし接合部の境界面)位置まで概ね単調に変化する様子がみられる。引張側の鉄筋ひずみにおいて、SPN400 試験体では西側と東側の梁が同程度の推移を示したが、SPN600 試験体では西側梁の方が東側よりやや大きい傾向であり、これは 2 章で述べた通り SPN600 試験体で西側梁の損傷および変形が東側梁のそれより先行傾向が顕著であったことと合致している。

主筋の降伏ひずみ(2 章表 2 を参照)近傍の  $R=1.0\%$  rad までの各加力サイクルピーク時の引張側主筋ひずみについて、西側梁とみなし接合部反曲点までのものを抜粋し、ひび割れ図と併せて図 9 に示す。両試験体とも危険断面のみにひび割れが発生した  $R=0.25\%$  rad 加力サイクル時には主筋ひずみの勾配に大きな差異は見られなかったが、複数ひび割れが発生した  $R=0.50\%$  rad 加力サイクル以降は、ひび割れ発生個所において主筋ひずみが著しく増加しており、ひび割れ間の主筋ひずみはそれに比べて小さい傾向(いわゆるテンションスティフニング)を示した。また、危険断面位置において主筋ひずみは概ね最大値となるものの、その近傍における梁およびみなし接合部のひび割れ間(図 9 の破線間)のひずみ勾配は比較的緩やかである。これは、既往の研究<sup>2)</sup>で指摘されているように、図 10(a)に示すひび割れに囲まれたコンクリート片持ち梁(櫛歯)が曲げせん断ひび割れの発生により剥離し(図 10(b)), 櫛歯の鉄筋引張力の差( $T_1 > T_2 \rightarrow T_1 \approx T_2$ )が低下したことに起因すると考えられる。このことから、危険断面近傍において引張側主筋ひずみが緩和され、降伏に至るまでのひずみの余裕が生じ、2 章で報告したように従来の曲げ耐力評価結果よりも高い実験結果が得られたと考えられる。

#### 3.2 実験と曲げ解析の比較

##### (1) 曲げ解析の概要

平面保持仮定に基づく曲げ断面解析において、図 11 に示すようにコンクリートは圧縮側の軟化勾配を考慮した放物線モデル<sup>3)</sup>を、鉄筋はバイリニアモデルをそれぞれ与えた。なお、各モデルにおける材料特性は 2 章表 2 と 3 に示した材料試験結果に基づき定めた。

##### (2) 材軸方向における鉄筋ひずみ分布

図 12 に両試験体の西側梁とみなし接合部の鉄筋ひずみ分布を曲げ解析結果と併せて示す。同図では、曲げ解析結果は危険断面における主筋が降伏する直前の結果を、実験結果はそれと同じモーメント分布時の計測値を、それぞれ示している。

圧縮側および引張側ともに、曲げ解析による主筋ひずみは実験値と概ね良好に整合したが、危険断面近傍にお

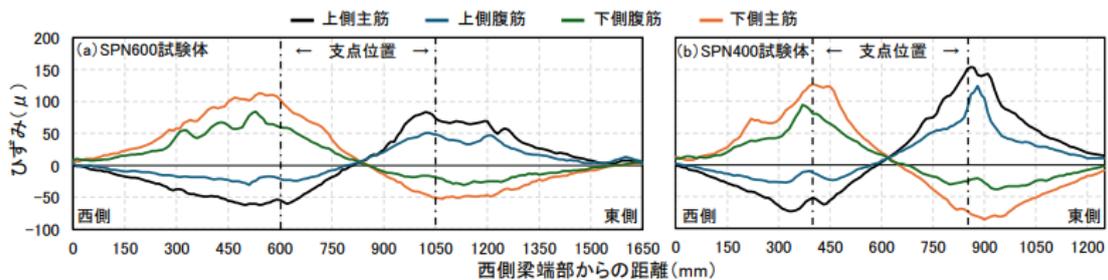


図 8 光ファイバーゲージによる鉄筋ひずみの計測結果

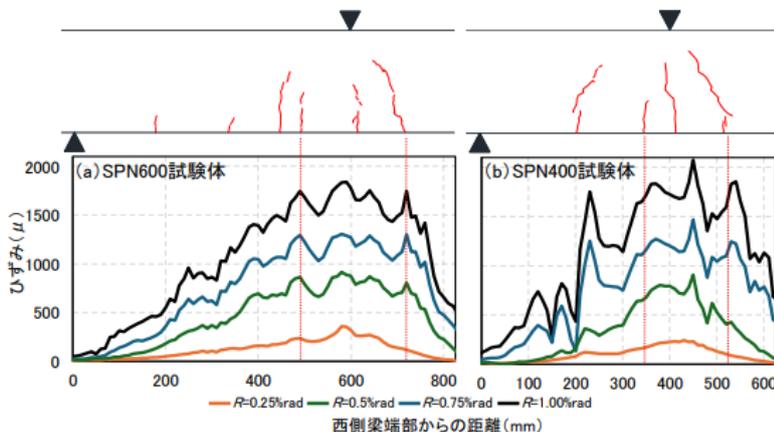


図 9 西側梁の引張側主筋ひずみの推移

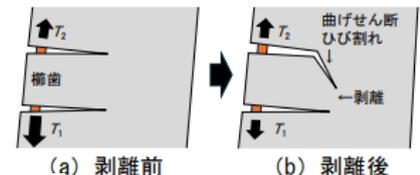


図 10 曲げ・曲げせん断ひび割れによる鉄筋ひずみ緩和のメカニズム

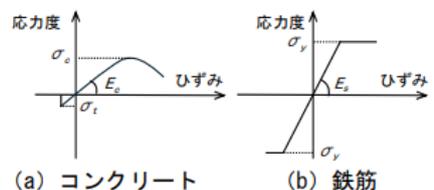


図 11 曲げ解析に用いた材料構成則

いては前述した曲げせん断ひび割れによるひずみ勾配の低下により、主筋および腹筋における解析結果が実験値を過大に評価する傾向を示した。なお、圧縮側主筋の危険断面近傍では幅 50mm の局所的なひずみの低下がみられるが、これは載荷支点のプレート(幅 50mm)による支圧力により、それと直交する材軸方向に引張力が局所的に生じたためと考えられる。

### (3) 断面における鉄筋ひずみ分布

図 13 に両試験体の西側梁危険断面の鉄筋ひずみ分布を曲げ断面解析結果と併せて示す。同図では断面内の圧縮および引張それぞれの合力と、その合力重心位置を併記する。ここで、圧縮側コンクリートのひずみ分布は上側の主筋および腹筋の値を用いて外挿した。なお、SPN600 試験体においては、前述した支点の支圧の影響により圧縮合力が引張合力よりも 4 割以上低い値が算定されたため、その影響を補正すべく、引張合力と釣り合うように圧縮側主筋ひずみを補正し図 13 に併記した。

同図より、両試験体とも平面保持仮定が崩れ、特に引張側では実験結果のひずみ勾配(曲率)は曲げ解析結果と比べて小さくなったが、圧縮側では逆に実験結果の方が大きい傾向を示した。これは、前述した斜めひび割れ発生に伴う危険断面近傍の引張側鉄筋ひずみの緩和により、本来は引張側鉄筋が負担する応力の一部を圧縮側のコンクリートと鉄筋が負担するよう、応力が再配分されたことが主要因であると考えられる。また、実験結果の中立軸位置が解析結果と比べて圧縮側に移動し、圧縮と引張それぞれの合力の大きさおよび重心位置にも差異がみられた。

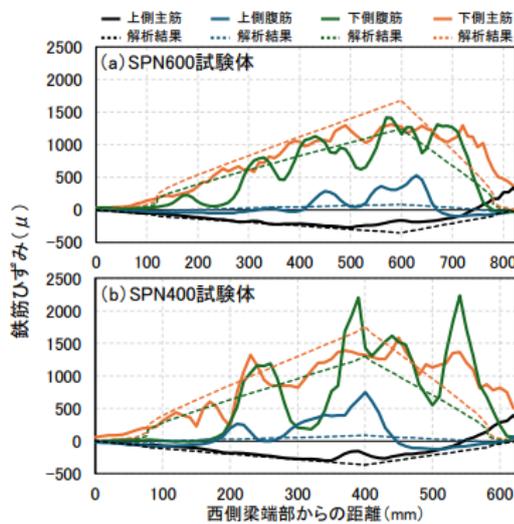


図12 材軸方向における鉄筋ひずみ分布

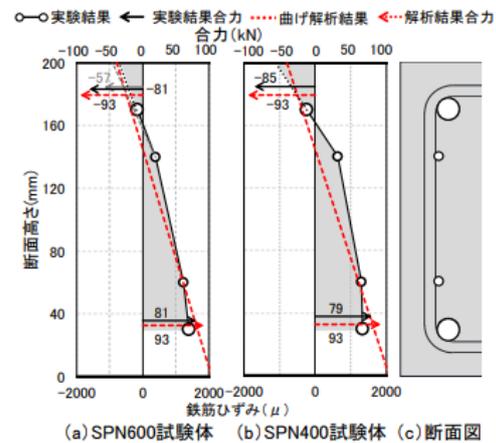


図13 曲げ解析結果との比較

### 【参考文献】

- 1) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造保有水平耐力計算基準・同解説，2021
- 2) 浅井竜也，勅使川原正臣，諏訪田晴彦：RC造曲げ破壊型柱部材の主筋降伏までにおける詳細な変形機構，日本建築学会構造系論文集，第 804 号，pp.276-287，2023.2
- 3) 鈴木基行，堀内信，前田直己，尾坂芳夫：純曲げを受ける超高強度コンクリートはり部材の力学的特性，コンクリート工学論文集，第 4 巻第 1 号，pp.39-51，1993.1

## 4. 今後の課題

今後は、本稿で明らかにした局所現象を再現するマクロモデルを検討するとともに、降伏後の大変形についても耐力・変形性状を詳細に分析し、そのメカニズムを検討する。