課題番号	２３若０８

若手研究者助成金　実績報告書

令和 6 年 4 月 19 日

氏　　名：　堀　川　真　之

所属・資格：　工学部　・　専任講師

実施研究所：　工学部　・　工学研究所

1　研究課題

和文表記（40 字以内）

鉄筋破断時のエネルギー計測に基づく地震時に座屈破壊する RC 梁の構造性能評価

英文表記

Evaluation of Structural Performance of RC Beam Including Buckling Failure Induced by Seismic Action based on Energy Measurement at Rebar Rupture.

2　研究期間

令和 5 年度

※令和　年度　～　令和　年度（※特例措置により上記期間を変更している場合記入すること）

3　研究目的

本研究の目的は，鉄筋コンクリート（以下，RC）座屈破壊を梁の載荷実験により再現し，主筋の材料エネルギー値に着眼した座屈挙動の評価とデータの蓄積を行うことである。特に，鉄筋の 1 軸引張試験より得られる材料エネルギー値と RC 座屈破壊を紐づけて解釈する点に独自性があり，ポストピーク領域に着目して RC 部材と鉄筋の両応答を計測する点が新しい。この背景には，申請者が実施した 2021 年・2022 年の福島県沖地震災害調査ならびに復旧調査の存在がある[1)2)]。想定を超える地震動の影響により，県内のインフラ機能が停止するとともに，建物補修の長期化が顕在化し，これらは鉄筋の座屈に支配される RC 構造物の損傷に起因していた。今後このような被害を防止するためには，座屈挙動を評価する手法の発見とデータの蓄積が不可欠である。

【参考文献】

1)　浅里和茂、日比野巧、堀川真之：令和 4（2022）年 3 月 16 日の福島県沖の地震災害調査速報，日本建築学会東北支部，pp.15-20, 2022 年。

2)　浅里和茂、日比野巧、堀川真之：令和 3（2021）年 2 月 13 日の福島県沖の地震災害調査速報，日本建築学会東北支部，pp.16-20, 2021 年。

課題番号	２３若０８

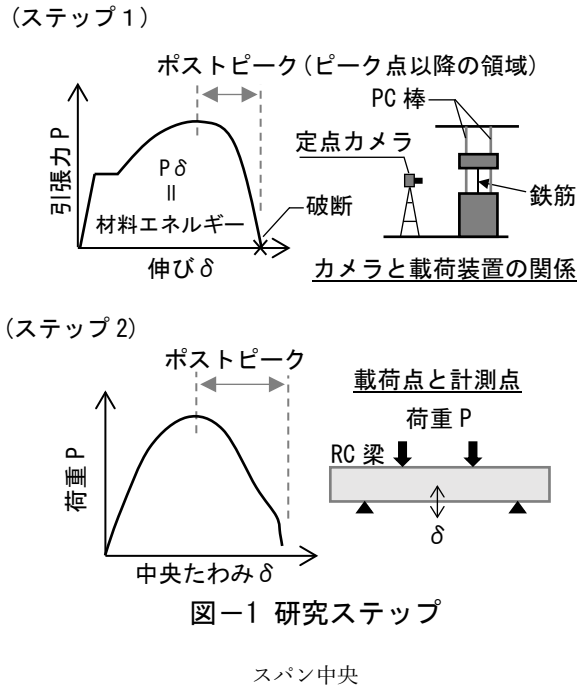
4　研究概要

終局時の応答を評価するには，古くから，破壊力学の概念に基づく材料のエネルギー的な評価が必要であることが指摘されている[3)]。ただし，その評価法はコンクリート材料に限定されており，過去に主筋材料に対する評価事例は極めて少ない。すなわち，本研究の独自性は，主筋の 1 軸引張試験を実施して材料エネルギー値を取得するとともに，並行して実施する RC 梁の構造実験とを紐づけて，RC 座屈挙動を評価する点である。特に，非接触型の測定方法を導入する点に本研究の創造性がある。

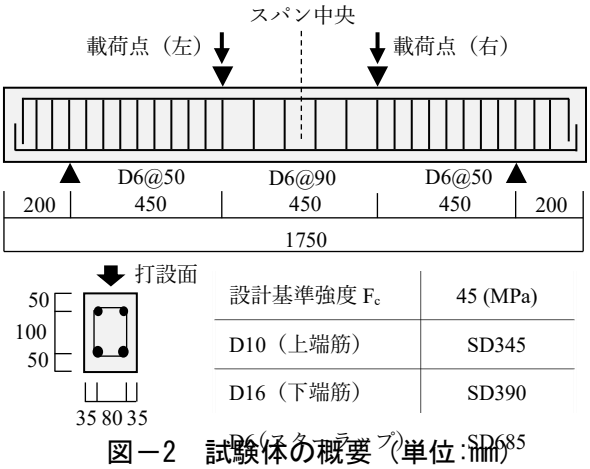
図－1 に研究ステップを示す。ステップ 1 では，主筋（鉄筋棒）の 1 軸引張試験を実施する。破断時までの引張伸び δ を計測するため，本研究では，非接触伸び測定（島津社製）を採用した。これには，一般的な計測として利用されるひずみゲージ計測にについて，以下の欠点を解決できることによる。

欠点①　ゲージの種類によっては破断までの応力度－ひずみ度関係を計測できない。

欠点②　ゲージ貼付けにより異形鉄筋表面の加工が伴う。つまり，断面欠損が生じる。



図－1 研究ステップ



設計基準強度 F_c	45 (MPa)
D10（上端筋）	SD345
D16（下端筋）	SD390
D6（スターラップ）	SD685

図－2　試験体の概要（単位：mm）

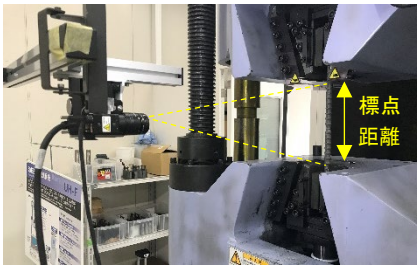
計測に際して，JIS に従い標点間距離を算出し，鉄筋棒にその区間をマーキングする。次に，図に示すように定点カメラを設置し，引張試験を実施する。試験中に試験体に付与したマーキングを追跡することで，鉄筋棒の標点間距離に生じる破断までの純粋な変位を測定でき，断面欠損も生じない。続いて，ステップ 2 にて，材料試験と同様の鉄筋棒を主筋として配置した RC はりの 4 点曲げ試験を実施する。スパン中央および載荷点のたわみを計測するとともに，主筋の各箇所に貼り付けたひずみゲージより鉄筋のひずみ挙動を計測する。これにより，1 軸引張試験から得られた材料挙動とそれとを対応づけて観察することができ，RC はりの座屈破壊メカニズムを解き明かすための基礎的データを取得できる。最後に，試験体の概要を**図－2** に示す。なお，本研究を今後発展させるため，研究期間内にコンクリートの圧縮破壊および座屈破壊を再現できる数値解析モデルの構築も併せて試みる。

【参考文献】3) 三橋博三，六郷恵哲，国枝稔（編著）：コンクリートのひび割れと破壊の力学－現象のモデル化と制御－，技報堂出版，2010 年。

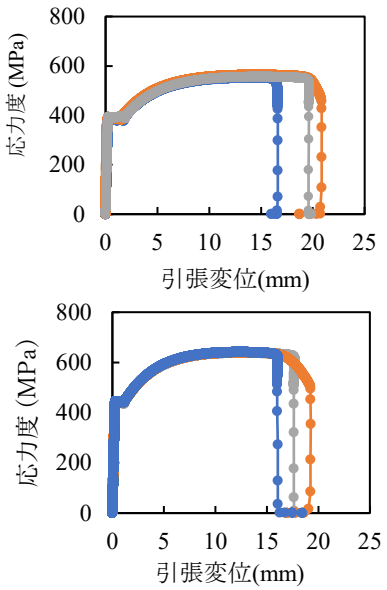
課題番号	２３若０８

5　研究結果

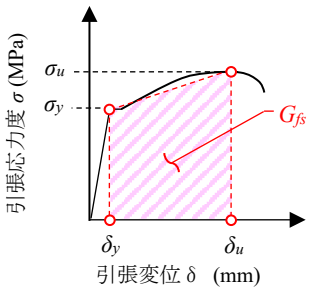
図－3 に引張試験（D10）のセットアップ状況を示す。試験片は，D10（上端筋）および D16（下端筋）ともに 3 体であり，2024 年 3 月 14 日に島津製作所本社（京都）にて実施した。載荷速度は，JIS に従い 10(MPa/sec)とした。**図－4** に試験結果の応力度－変位関係を示す。いずれも，弾性域，降伏域ならびにその後の塑性域における挙動は同様であった。しかし，破断時の応力度と変位にはばらつきが確認された。破断後の試験片を観察したところ，破断箇所が試験体でばらついてた。標点区間の中央で破断した試験片（**図－4** の灰色）に比べ，標点区間の上際で破断した試験片は比較的引張変位を大きく評価していた（**図－4** のオレンジ色）。**図－5** に鉄筋材料のエネルギーの定義を示す。同定義については，先に触れたように先行研究が極めて少ないこともあり，一般合意に至ったものは存在しない。そのような背景を踏まえ，本研究では，Deng et al.[4]の研究と同様の定義を用いることにした。文献 4 では，鉄筋コンクリート造耐力壁に対する数値解析的評価において**図－5** の妥当性が示されており，本研究で対象とする鉄筋コンクリート造はりの評価についても適用できるものと考えた（はりに対する適用性は本研究が世界に先駆けて実施したものである）。鉄筋材料のエネルギーは，図のハッチ部分に代表される台形面積として評価される。実験的に降伏応力度 σ_y，降伏時変位 δ_y，引張強度 σ_u および引張強度時変位 δ_u を求めることができれば，エネルギー的評価が可能となり，これを降伏後エネルギーG_{fs}と呼ぶことにする。**表－1** に各特性点とそれに基づき評価した G_{fs} を示す。なお，特性点は 3 つの試験片から得られたデータの平均値として評価した。なお，今後の発展として，本実験結果に対する再現シミュレーションを考えており，その際コンクリートの圧縮強度 f_c’が必要となる。よって，別途，コンクリートの 1 軸圧縮試験を実施したところ，f_c’＝46.9(MPa)（試験片 3 体の平均値）であった。



図－3　引張試験(D10)のセットアップ状況



図－4　主筋の引張応力度－変位関係
（上：D10 上端筋，下：D16 下端筋）



図－5　主筋の降伏後エネルギーG_{fs}の定義

表－1　鉄筋の材料特性(各 3 体の平均値)

	σ_y (MPa)	δ_y (mm)	σ_u (MPa)	δ_u (mm)	G_{fs} (N/mm)
D10	385.7	0.2	557.8	11.0	5076.8
D16	443.2	0.8	639.6	15.7	8073.0

課題番号	２３若０８

〔５　研究結果（つづき）〕

図－6 に 4 点曲げ試験のセットアップ状況を示す。試験体は 1 体であり，2024 年 3 月 1 日に日本大学工学部 16 号館 1 階の構造実験室にて実施した。本研究では，得られる実験データの信頼性を担保するために，2020 年～2022 年にかけて日本コンクリート工学会内に設置された専門委員会にて実施された共通試験[5]と概ね同一の試験体および載荷条件とした。



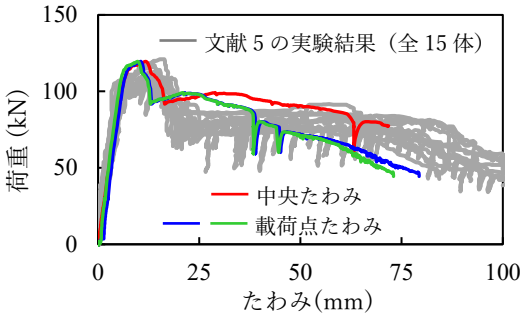
図－6　4 点曲げ試験のセットアップ状況

図－7 に最終破壊状況（上端筋 D10 の座屈状況），**図－8** に荷重－たわみ関係を示す。設計通り，鉄筋の座屈が確認された。また，文献 5 と同様の弾塑性挙動を取得できたことが分かる。

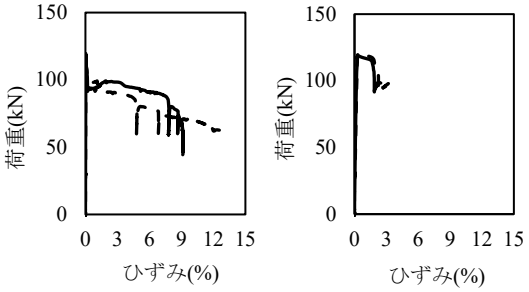


図－7　上端筋 D10 の座屈状況

図－9 に上端筋 D10 と下端筋 D16 の荷重－ひずみ関係を示す。横軸は，はり試験体の主筋に直接貼りつけたひずみゲージから得られた値である。**図－5** との対応のため，横軸のひずみ値を 100 で除し，次に，ひずみゲージ長さ 60mm を乗じて変位へ変換する。D16 について，ひずみ値 3%は変位 1.8mm に相当する。**図－9** 右は，試験時に引張力を受ける D16 の挙動を示すものであるが，エネルギー的観点からわずか 12%の消費に過ぎないことが分かった。ひずみ 3%手前で軟化しているが，エネルギー的に解釈するとこれは破断ではなく除荷が生じたものと断定できる。一方, D10 は座屈したため**図－5** に基づく比較考察ができない。一般に，引張鉄筋 D16 および座屈鉄筋 D10 と圧縮コンクリートにより抵抗する偶力によって断面内の釣合いを形成する。しかし，**図－7** より，終局時には，圧縮コンクリートが剥がれ落ち，コンクリートの負担力が消失してしまう。そのため, 座屈鉄筋 D10 の負担は相対的に大きくなる必要があり，その結果，最大 12%のひずみ値を示したものと考えられる。本研究において，以上の貴重なデータを得ることができた。今後，別途令和 5 度に構築してきた数値解析技術を本実験へ適用・検証するとともに，さらなる RC はりの座屈挙動の解明に努める予定である。



図－8　荷重－たわみ関係



図－9　荷重－主筋ひずみ関係
左：D10，右：D16

【参考文献】4) Deng. T and Henry S. R.: Regularization methods for modelling flexural dominant lightly reinforced concrete walls, Engineering Structures, vol.267:114668, 2022. 5)日本コンクリート工学会：コンクリート工学におけるシミュレーションの検証と妥当性閾員および不確かさ評価に関するシンポジウム報告書，2022 年 8 月.

課題番号	２３若０８

６　将来獲得を目指す学内外の競争的資金の種類　（※研究計画書に記載したものを記入すること）

日本学術振興会科学研究費（基盤研究 C），挑戦的研究（萌芽），福島県学術教育振興財団助成ならびに民間ファインドなど

７　本研究をもとに申請した外部研究資金及びその獲得状況

氏　　名	申請年度	研 究 種 目	研　究　課　題	採・否
堀川真之	R5	守谷育英会 研究助成	鉄筋コンクリートの圧縮破壊エネルギー推定式の開発へ向けた理論的基礎研究	採
堀川真之	R5	福島県学術教育振興財団研究助成	DIC と FEM による RC 内部の可視化と定量化に基づく座屈メカニズムの解明	否

８　学会発表等

要旨集の抜き刷り，発表原稿のコピー等及び発表したことがわかるものを添付してください。

発表者名	学会，発表会名等	発表テーマ	発表年月
新田太一 堀川真之	2024 年度日本建築学会大会学術講演会（関東）	鉄筋破断時のエネルギー計測に基づく座屈破壊する RC はりの構造性能評価（その 1）実験概要および結果ならびに破壊メカニズムと塑性ヒンジ長さに関する考察　（掲載前）	2024 年 8 月
Masayuki Horikawa	Proceedings of 18th World Conference on Earthquake Engineering (Milan, Italy)	Validation of Displacement-Based Frame Elements with One Additional Axial DOF	2024 年 7 月

９　著書・雑誌論文

著書，雑誌，抜き刷り等を添付してください。コピーの場合は掲載されたことが客観的にわかるものを添付してください。

著者・執筆者	著書名・雑誌名／論文名	巻・号	年月	出版社・発行所
堀川真之	コンクリート工学年次論文集（採用決定，掲載前）	46(2)	2024 年 6 月	日本コンクリート工学会
堀川真之	構造工学論文集	70(B)	2024 年 4 月	日本建築学会

１０　本研究課題に関するその他の発表（新聞，一般雑誌掲載等）

特になし

課題番号	２３若０８

１１　他の研究への発展

・座屈破壊する RC はりに対するシミュレーション技術の開発

・本研究で獲得した評価手法の柱部材への適用

１２　その他の成果

・2024 年度日本コンクリート工学会賞（奨励賞）を受賞

１３　本研究課題による発明届の提出及び知的財産権の出願・取得状況

名　　称	知的財産の種類	発　明　者 （考案者・創作者）	権　利　者	出願・登録番号	出願年月日	取得年月日

※ホームページ等での公開（☑可・□否）いずれかをチェックしてください。
否の場合は，理由書を別途添付のこと。