

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 9 日現在

機関番号：13901

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2016

課題番号：15K14020

研究課題名(和文)鉄筋座屈の起因となるコンクリート部材内部ひび割れの発見と変形性能向上策の検討

研究課題名(英文)Discovery of internal crack in concrete members which cause rebar buckling and investigation of measures to improve deformation performance

研究代表者

中村 光 (NAKAMURA, HIKARU)

名古屋大学・工学研究科・教授

研究者番号：60242616

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：鉄筋コンクリート部材の耐震性に密接な関係がある鉄筋座屈を対象に、新たな座屈発生メカニズムの提示と提示したメカニズムに基づく座屈防止法の検討を行った。

座屈発生メカニズムについては、繰返し荷重を受ける場合、損傷が外部に表面化していない段階においても、内部では軸方向鉄筋近傍から水平方向へ進展するひび割れが存在することを実験ならびに数値解析により明らかにした。また、この内部ひび割れが鉄筋座屈と密接に関係するという仮説を立て、内部ひび割れ進展を抑制する繰返し載荷実験を行い、内部ひび割れ進展の抑制により座屈発生を遅らせることができ、スターラップを用いなくても変形性能が向上することを示した。

研究成果の概要(英文)：It is well known that the rebar buckling is close relation to seismic performance of reinforced concrete member. In the study, a new mechanism of rebar buckling occurrence was proposed and the method to prevent buckling based on the proposed mechanism was investigated.

Regarding mechanism of rebar buckling occurrence, it was clarified by experiment and numerical analysis that there are internal cracks which propagate in the horizontal direction from the longitudinal rebars, even when the damage is not observed on specimen surface under cyclic loading.

Moreover, it was hypothesized that this internal crack closely relates to rebar buckling, and the cyclic loading test of RC members were conducted for controlling the progress of internal crack. It was shown that the rebar buckling is delayed due to suppression of internal crack propagation, and the deformation performance is improved even without stirrups.

研究分野：コンクリート構造学

キーワード：鉄筋座屈 内部ひび割れ 繰返し荷重 変形性能 スターラップ 耐震性能

1. 研究開始当初の背景

鉄筋コンクリートの耐震性能向上は、世界的な課題であり、より合理的な方法での耐震性能向上策の開発が望まれている。曲げ挙動が卓越する鉄筋コンクリート構造物の地震時の挙動は、かぶりの剥落、軸方向鉄筋座屈、コアコンクリートのブロック化と圧壊で終局に至る。このうち、かぶりの剥落および鉄筋座屈が変形性能と最も密接な関係にある。かぶり剥落から鉄筋座屈に至るメカニズムについては、①かぶりが損傷して拘束力が低下し鉄筋が座屈する、②コンクリート中の鉄筋が座屈してかぶりを押し出す、などの説明がされるが、メカニズムの解明には至っていない。しかしながら、鉄筋座屈のメカニズムを明確にすれば、メカニズムに則した従来以上の合理的な補強方法が可能になる可能性が高く、コンクリート部材の耐震性能に密接に関係する変形性能の向上に寄与すると考えられる。

2. 研究の目的

鉄筋が座屈に至るメカニズムとして、①繰返し中に何らかの要因で、図1に示すような水平ひび割れが鉄筋から発生する、②鉄筋周辺にひび割れが入ったためコンクリートの拘束力が低下し、鉄筋が座屈しやすくなる、③鉄筋座屈が水平ひび割れ部のかぶりを押し剥離させる、との仮説をたてた。

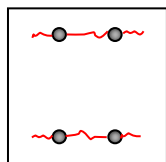


図1 内部水平ひび割れ

その仮説の妥当性の検証と、コンクリート構造物の変形性能向上のために、以下の3項目を本研究の目的とした。

- (1) 繰返し荷重下で鉄筋から水平方向に進展する内部ひび割れの存在を実験により証明する。
- (2) 鉄筋を3次元でモデル化したメゾスケー

ル解析で、内部ひび割れの進展要因を明らかにする。

- (3) 内部ひび割れ進展を抑制することで、鉄筋座屈の発生を遅らせることができ、変形性能を向上させることができることを実験により示す。

3. 研究の方法

本研究の方法は、上記の目的に関係し3つに分類される。以下に、項目毎の研究方法を記述する。

- (1) 繰返し荷重下で鉄筋から水平方向に進展する内部ひび割れの存在の発見

等曲げ区間を有するRC単純ばり供試体を対象にして、繰返し載荷実験を行う。試験は、同一の供試体を複数作成し、それぞれの供試体の目的とする変位レベルで載荷をやめ、断面の切断を行うことで各変位段階での内部ひび割れの観察を行い、鉄筋から水平方向に進展する内部ひび割れの存在の実証と、内部ひび割れがどの程度の損傷レベルで入るかを検討する。

- (2) 数値解析による内部ひび割れの進展要因の明確化

内部ひび割れの存在を実証した実験供試体を3次元有限要素でモデル化して解析を行う。解析モデルは、内部ひび割れの発生には鉄筋の3次元的な変形が大きく影響を与えていると考え、鉄筋を線要素ではなく3次元ソリッド要素でモデル化した。また、比較対象として鉄筋を曲げ剛性を有さないトラス要素でモデル化した解析も行い、ソリッドモデルの結果との比較から、内部進展要因を検討する。

- (3) 内部ひび割れ進展抑制による変形性能向上策の提示

図2に示すように、従来はスターラップにより離散的に鉄筋の座屈挙動を抑制していた（鉄筋に対する座屈抵抗補強）。これに対し、鉄筋座屈は、鉄筋周辺にひび割れが入ったためコンクリートの拘束力が低下するこ

とで発生しやすくなるという仮説を実証するために、水平ひび割れの進展を抑制することが可能な補強材の配置を行った部材実験を行う。本方法で、鉄筋座屈が抑制され変形性能が向上すれば、周囲のコンクリートの拘束力を高めることで座屈発生を抑制する「コンクリートに対する座屈抵抗補強」という従来の概念と全く異なる座屈抑制策を提示することになる。

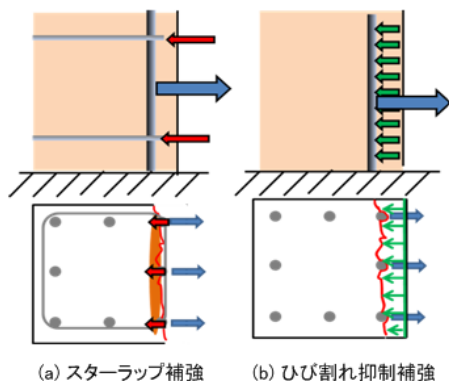


図2 鉄筋の座屈メカニズム

4. 研究成果

(1) 繰返し荷重下で鉄筋から水平方向に進展する内部ひび割れの存在の発見

図3に示す等曲げ区間を有するRC単純はり供試体を対象にして、繰返し載荷実験を行った。また、内部ひび割れは曲げひび割れ発生断面内において顕著に進展するのではないかという予想から、曲げひび割れ発生断面内での観察が容易となるよう切欠きを導入した。試験は、同一の供試体を複数作成し、それぞれの供試体の目的とする変位レベルで荷重をやめ、断面の切断を行うことで各変位段階での内部ひび割れの観察を行った。荷重は、目的とする変位レベルまで降伏変位(4mm)の整数倍毎に3cycleの正負交番載荷を行った。

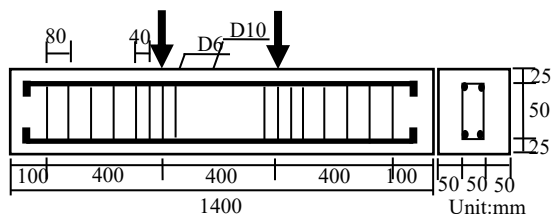


図3 供試体概要

図4に $\pm 3\delta_y$ まで荷重を行った供試体の切欠き断面と切欠きを導入していない断面の内部ひび割れ性状の写真を示す。切欠きなし断面では内部ひび割れが観察されなかったが、切欠き断面では鉄筋近傍から側面へ向かって水平方向へ進展するひび割れや、鉄筋間をつなぐようなひび割れが観察された。このことから、曲げひび割れ発生断面内において、鉄筋近傍から水平方向へ進展する内部ひび割れの存在が実証された。

また、図5に $\pm \delta_y$ 、 $\pm 2\delta_y$ まで正負交番載荷を行った供試体の切欠き断面内における内部ひび割れ性状の写真を示す。 $\pm \delta_y$ ではほとんど内部ひび割れが観察されないが、 $\pm 2\delta_y$ あたりから、内部ひび割れが発生していることが明らかになり、内部ひび割れの発生には曲げひび割れ発生部において鉄筋が降伏し、鉄筋の変形が局所化することが大きな要因となっていることも示された。

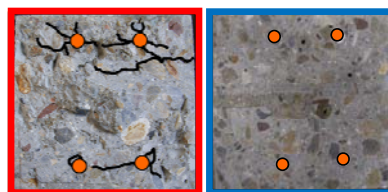


図4 $\pm 3\delta_y$ 時内部ひび割れ性状



図5 内部ひび割れ性状

(2) 数値解析による内部ひび割れの進展要因の明確化

図3に示した供試体を3次元有限要素でモデル化して単調載荷解析を行った。本研究では、鉄筋を3次元ソリッド要素と曲げ剛性を有しないトラス要素でモデル化した解析を行い、鉄筋の曲げ変形の影響も検討した。

図6に鉄筋をソリッド要素ならびにトラス要素でモデル化した場合と、単調載荷実験か

ら得られた荷重－変位関係を示す。図7に鉄筋をソリッド要素でモデル化した場合の各変位段階における切欠き断面内鉛直方向ひずみ分布および鉄筋をトラス要素でモデル化した場合の鉛直方向ひずみ分布を示す。鉄筋をソリッド要素でモデル化した場合では、ひずみが集中している箇所が鉄筋近傍から水平方向に分布しているのに対し、トラス要素でモデル化した場合ではひずみの集中があまり見られない。なお、ひずみの集中は表面部には見られず、表面に損傷がない段階で内部に損傷が発生すること確認された。また、ひずみは $2\delta_y$ 程度から急激に増大していることが示された。

以上の結果から、曲げひび割れ発生断面内において鉄筋が降伏し、鉄筋の3次元的な変形が局所化することが、内部ひび割れの発生および進展の要因となっていることを数値解析により明らかにした。

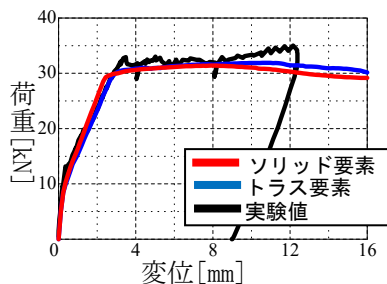


図6 荷重－変位関係

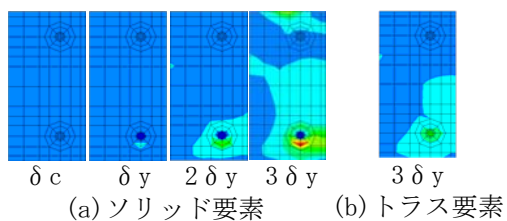


図7 断面内の鉛直方向ひずみ分布

(3) 内部ひび割れ進展抑制による変形性能向上策の提示

図3と同一の断面と等曲げ区間長さを有し、せん断スパン長さが違う供試体の繰返し載荷試験を行った。供試体は、①図3に示すように等曲げ区間にスターラップが配置されていないもの(供試体1)、②図3の等曲げ

区間に100mm間隔でD6鉄筋をスターラップとして配置したもの(供試体2)、③等曲げ区間にスターラップが配置されていない供試体1に対し、図8のように軸方向鉄筋の両側面に金網を配置したもの(供試体3)、の3通りとした。なお、供試体3は金網がせん断補強とならないように腹部はできるだけ金網を配置しないようにした。載荷は、降伏変位(δ_y)約6mmに対し、 $2\delta_y$ 毎に漸増繰返し載荷することにより行った。

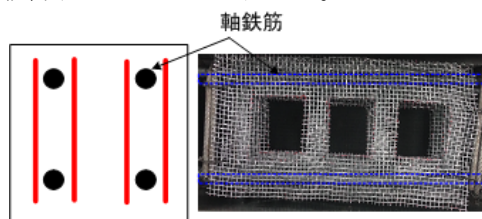
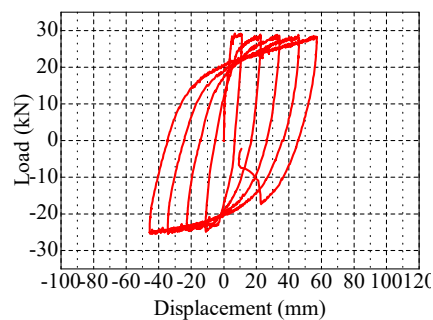
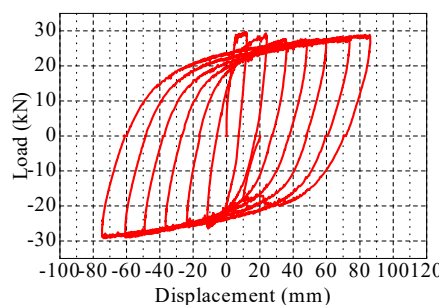


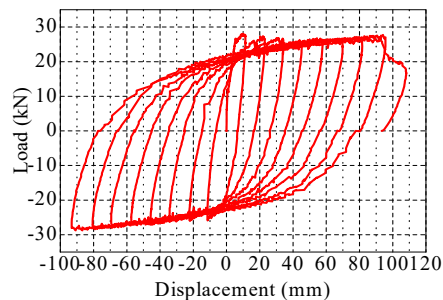
図8 水平ひび割れ進展抑制用金網配置



(a) 供試体1



(b) 供試体2



(c) 供試体3

図9 荷重－変位関係

図9に供試体1～供試体3の実験より得ら

れた荷重変位関係を示す。荷重変位関係はいずれも紡錘形を示し、典型的な曲げ挙動である。スターラップを配置していない供試体 1 は、 $-10\delta_y$ から正方向に荷重する際に鉄筋が座屈し荷重が低下した。スターラップを配置した供試体 2 は、 $+14\delta_y$ から負方向に荷重する際に鉄筋が座屈し荷重が低下したが、スターラップを配置することで座屈を抑制し、変形性能が明確に増加する結果となった。一方、スターラップを配置せず軸方向鉄筋の両側面に金網を配置した供試体 3 は、 $16\delta_y$ 荷重時までは安定的な挙動を示し、 $+18\delta_y$ に向かう途中で $+16\delta_y$ 時に荷重低下が生じた。また、最終破壊状況は座屈は断面上部ではなく側面に生じた。すなわち、曲げやせん断に対する補強鋼材ではない金網の方が、スターラップよりも変形性能向上に有効な結果となった。金網は軸方向鉄筋側面に設置しただけなので、その補強効果は鉄筋から水平方向にひび割れが入った場合のみ有効になると考えられる。したがって今回の結果は、水平方向のひび割れ進展が抑制されたことで、鉄筋座屈の発生が遅れて変形性能の向上が図られたと考えられ、仮説が妥当であることが示された。また、スターラップを配置しなくても、何らかの方法で内部の水平ひび割れ進展を制御できれば、変形性能向上を図ることができる可能性も示された。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 0 件)

〔学会発表〕(計 1 件)

- ① 中村光、付李、コンクリート部材内部ひび割れ進展制御による鉄筋座屈の抑制と変形性能向上に関する研究、平成 28 年度土木学会中部支部研究発表会、2017 年 3 月 3 日、金沢大学(石川県・金沢市)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況(計 0 件)

○取得状況(計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://concrete-lab.civil.nagoya-u.ac.jp/homepage/j/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中村 光 (NAKAMURA HIKARU)

名古屋大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：60242616

(2) 研究分担者 なし

(3) 連携研究者 なし

(4) 研究協力者 なし