

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 8 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26289185

研究課題名(和文) 鉄筋のカットオフ・付着・定着とひずみ速度を考慮したRC部材のせん断抵抗能力評価

研究課題名(英文) Shear Capacity Evaluation of R/C Members Considering Longitudinal Bars Cut Off, Bond, Anchorage, and Strain Rate

研究代表者

西村 康志郎(NISHIMURA, Koshiro)

北海道大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：00343161

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,300,000円

研究成果の概要(和文)：鉄筋コンクリートの柱や多段配筋梁の部材実験、多段配置の鉄筋の引抜実験を行い、付着や軸力が部材の破壊性状に及ぼす影響を検討した。特に多段配筋や鉄筋のカットオフによる影響を考察した。実験結果を基に、せん断破壊や付着割裂破壊する部材を対象としたせん断耐力評価式を、多段配筋や鉄筋のカットオフに対応できるように修正した。さらに、軸力やひずみ速度の考え方、カットオフ筋の付着確保の方法、曲げ降伏後の変形性能の評価方法を示し、要求される部材の曲げ性能を確保するための包括的な方法を示した。

研究成果の概要(英文)：Loading tests of reinforced concrete columns and multi-layered beams, and pull out tests of tension reinforcing bars, were carried out. An influence of bond and axial force on the capacity of the member was investigated. Especially, the influence of multi-layered longitudinal bars and cut-off bars was discussed. The shear capacity formula for members failed in shear and bond splitting was improved to be applied to members with multi-layered longitudinal bars including cut-off bars. In addition, inclusive evaluation method to design the flexural members of sufficient performance was proposed; which were consideration of axial force and strain rate, checking method for bond around cut-off bars, and evaluation method of deformation capacity after flexural yielding.

研究分野：建築構造、コンクリート構造

キーワード：鉄筋コンクリート せん断強度 付着 多段配筋 カットオフ 軸力

### 1. 研究開始当初の背景

鉄筋コンクリート柱や梁の脆性的な破壊として代表的なものは、せん断破壊と付着割裂破壊がある。せん断破壊は斜めひび割れ(せん断ひび割れ)の拡幅により、付着割裂破壊は主筋とコンクリート間の付着劣化(付着割裂ひび割れなど)により地震力などに対する抵抗力を失う。ところが、付着割裂ひび割れからせん断破壊へ、あるいはせん断ひび割れから付着割裂破壊へ伸展する複合的な破壊もまま見られる。せん断破壊と付着割裂破壊は独立した現象でなく、いずれもせん断抵抗機構の破壊であるにもかかわらず、設計ではそれぞれの破壊防止を別々に検討しているのが現状である。その要因の一つは、せん断抵抗機構に与える付着や軸力の影響について、実験ではその影響が確認されているが、メカニズムとして説明しきれていないことである。他にも、部材の実験では実際の建物とは異なり、頑強なスタブで固定されており、実際の建物では主筋の定着部の影響は無視できないことにも注意を要する。また、実際には、全ての主筋がスパンを通して配置されているのではなく、応力の小さい箇所はカットオフされて主筋が少ない部分もあり、そこではひび割れが生じやすくなる。さらに、地震は動的な現象なので、ひずみ速度についても配慮する必要がある。アメリカのACI、日本の土木学会や日本建築学会の基準類を見ると、鉄筋のカットオフ位置で要求されるせん断強度と曲げ強度の割増しや、要求される鉄筋の付着応力度の仮定などに相違点があり、強度の評価式も含め、実験結果や地震被害調査結果などの経験則に基づいている部分が多く、メカニズムの解明が必要である。

### 2. 研究の目的

せん断破壊と付着割裂破壊をせん断抵抗機構の破壊として包括的にせん断抵抗能力を評価することに主眼をおき、以下を目的とする。

- (1) 軸力と付着の相互作用や定着の影響を考慮できるように、せん断抵抗機構の基本モデルを提案する。
- (2) 鉄筋の多段配筋やカットオフ、ひずみ速度、主筋の仕口への定着が付着性状に与える影響を実験により明らかにする。
- (3) 軸力がせん断抵抗機構や破壊性状に与える影響を実験により明らかにする。
- (4) 以上の実験成果を反映させ、せん断抵抗能力評価方法を提案する。既存建物の診断に適用できるように、付着劣化の影響を考慮できる方法を考案する。

### 3. 研究の方法

(1) 先ず、基本となるモデルを提示する。これは、付着劣化を考慮できるせん断抵抗機構とする。これを基に、多段配筋や鉄筋のカットオフの影響などを考慮できるように拡張する。

(2) 多段配筋の付着性状を把握するために、鉄筋群の引抜実験を行う。この実験では、多段配筋、鉄筋のカットオフ、ひずみ速度、などの影響を明らかにする。

(3) 軸力と付着の相互作用を把握するために、鉄筋コンクリート柱の実験を行う。パラメータを軸力とせん断補強筋比とし、付着破壊するように高強度せん断補強筋を用いる。

(4) 多段配筋の付着性状を把握するために、鉄筋コンクリート梁の実験を行う。3段配筋での鉄筋のカットオフの影響を把握するために1スパンの梁試験体、主筋定着の影響を把握するために半スパンの梁と接合部からなる試験体を作製して実験を行う。また、既発表論文の実験結果を基に、FEM解析を行って付着性状を把握する。

(5) 曲げ降伏後のせん断破壊や付着割裂破壊を防ぐために、過去の実験資料を基に、曲げ降伏後にせん断破壊・付着割裂破壊する部材の終局変形評価方法について検討する。

(6) 研究成果を総括し、RC部材のせん断抵抗能力の評価方法を提案する。

### 4. 研究成果

(1) 本研究で基本となるRC部材のせん断抵抗機構として、先ず、既往のアーチ・トラスモデルを修正した。このモデルは、アーチ機構とトラス機構を重ね合わせたもので、ここでは1段配筋で全て通し筋の梁を対象としている。つまり、カットオフ筋は無く、軸力も作用してない。このモデルは、アーチ機構は部材の対角方向の圧縮力伝達を表しており、トラス機構はせん断補強筋の引張力と付着力とコンクリートの斜め圧縮力によるせん断力伝達を表している。修正点としては、トラス機構において、付着割裂とせん断補強筋の降伏が同時に起こるモードを追加してことである。部材の耐力向上のためにせん断補強するが、付着割裂破壊する場合はせん断補強筋の強度を高くしても効果がないモデルとなっていた。当該モードを追加することで、付着割裂破壊する場合でも高強度のせん断補強筋の効果が評価できる範囲が広がった。既発表論文の実験資料を用い、実験結果に合うモデルとなったことを確認した。また、実際の設計でよく用いられる荒川式と当該モデルが類似していることを示した。荒川式には、せん断補強筋強度が変数として含まれているため、高強度せん断補強筋を用いる場合に、強度の上限値が必要なことをメカニズムとして説明した。

(2) 先述のモデルを多段配筋や鉄筋のカットオフにも拡張するためには、そのような配筋の付着性状を明らかにする必要がある。そのため、図1に示すように、付着長さの異なる鉄筋群の引抜実験を行った。この実験では、直接鉄筋を引張るのではなく、鉛直荷重で図1の+印を中心に回転させることで、実際の鉄筋コンクリート梁の応力に近い状態を再

現させた。付着長さの異なる鉄筋を混在させることで、梁内の通し筋とカットオフ筋を模擬した。例えば、図1の2段配筋では、1段目の長い鉄筋は通し筋、2段目の短い鉄筋はカットオフ筋を想定している。付着強度は、これまで鉄筋毎に評価することが主流であったが、引張鉄筋全体で評価するほうが合理的との指摘もある。本研究では、部材のせん断耐力確保の観点から、図1の試験区間における、全鉄筋の総付着耐力の評価を試みた。静的加力を28体、動的加力を4体、合計で32体の試験体を加力し、実験で得られた知見は以下の通りである。

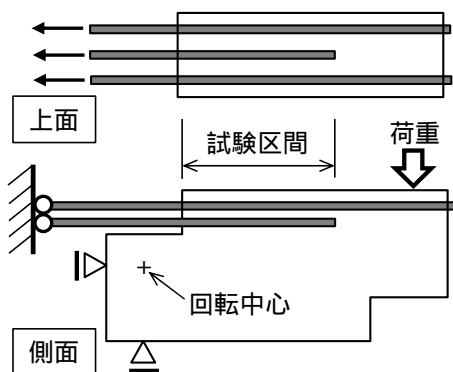


図1 鉄筋群の引抜実験

全鉄筋の総付着力は、ひび割れの伸展により低下し始める。付着長さの短い鉄筋が混在している場合、その鉄筋の付着応力度が最大となる前に、他の鉄筋も含めた総付着力が最大となる。したがって、部材のせん断耐力確保の観点では、鉄筋の総付着耐力を評価すべきである。

総付着耐力は、1段配筋よりも2段配筋のほうが高いが、せん断補強筋の効果については、1段配筋と2段配筋で同等である。

付着長さの短い鉄筋が混在すると、総付着耐力は低下する。特に、1段目に短い鉄筋があると、総付着耐力の低下が顕著で、全鉄筋で付着長さの同一な試験体に比べて79%まで低下した試験体もあった。

1段配筋の総付着耐力は、日本建築学会の指針で提示されている付着強度式を簡略化したもので概ね評価できる。簡略化された評価式は、コンクリート強度、せん断補強筋荷、中子筋の本数、を変数とした簡単なものである。2段配筋の総付着耐力は、コンクリート負担項を2段目鉄筋量に応じて増大させたもの(最大で1.5倍)で概ね評価できる。また、付着長さの短い鉄筋が混在する場合は、0.8倍に低減すればよい。

地震時に相当する速度で単調加力を行った結果、静的加力に比べて、付着強度は上昇すること、付着剛性はほとんど変わらないことが分かった。

(3) 軸力とせん断補強筋比をパラメータとした鉄筋コンクリート柱の逆対称曲げ繰返

し加力実験を行った。軸力比は0.1と0.4の2種、せん断補強筋比は0.3%と1.0%の2種で、4体の試験体を作製した。付着割裂破壊を想定し、高強度せん断補強筋を用いた。コンクリートは $21\text{N/mm}^2$ 程度である。図2は4体(No.1:低軸力・低せん断補強、No.2:低軸力・高せん断補強、No.3:高軸力・低せん断補強、No.4:高軸力・高せん断補強)の荷重-変形関係の包絡線を示している。No.3(高軸力、低せん断補強筋比)のみせん断破壊し、他の3体は付着割裂破壊した。4体とも曲げ降伏しなかった。

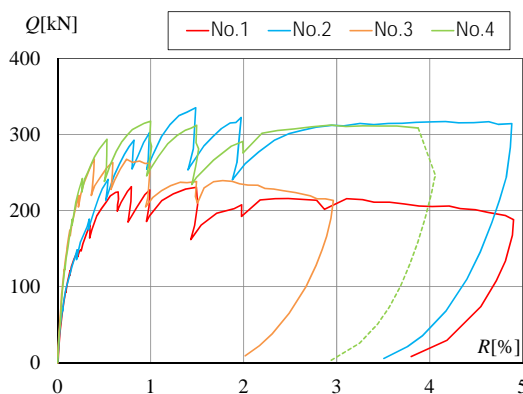


図2 柱試験体の荷重 変形の包絡線

実験結果より以下の知見を得た。

せん断補強筋比が高いと、軸力増大によるせん断耐力上昇が見られない場合がある。ただし、主筋とせん断補強筋が降伏せず、付着割裂破壊する場合は、高い変形性能を示す可能性が高い。

せん断補強筋比が低い試験体で軸力を増大させると、せん断耐力上昇が見られたが、破壊モードが付着割裂破壊からせん断破壊となり、変形性能は低下した。

以上を総括すると、付着割裂破壊する柱は、軸力の効果は比較的小さい。せん断破壊する場合も、変形性能が低くなるため、軸力の効果は余力とし、設計では見込まないほうが望ましい。

(4) 柱や梁などせん断耐力を評価する意義は、せん断破壊させずに曲げ降伏させることである。部材の曲げ強度を發揮させるには、付着が確保されている必要があり、その要求値は部材端の鉄筋応力で与えられる。しかし、多段配筋の付着性状については不明な点が多い。近年、2段配筋の実験研究が盛んなので、2段配筋については既発表の実験をFE解析で分析し、加力実験は主に3段配筋の梁試験体で行った。従来のような1スパンの部材試験体は2体作製し、それだけでなく、定着部の影響を把握するために、半スパンと接合部から成る試験体を4体作製した。実験、解析より得られた知見は以下の通りである。

FE解析によって、曲げ降伏する梁について比較的精度良く実験結果を再現できた。実

験での計測点以外の鉄筋応力の値が得られ、カットオフ筋の先端付近で大きな付着応力が生じることが分かった。鉄筋のカットオフ位置からの破壊を防ぐために、カットオフ位置でのせん断補強筋の増量や曲げ補強筋の増量が必要である。

外柱に定着される多段配筋梁では、繰返し変位を受けると、2 段目や 3 段目の梁端での引張鉄筋応力は平面保持仮定で得られる値よりやや高くなる。

2 段配筋梁で 2 段目のカットオフ筋と 3 段配筋梁で 3 段目のカットオフ筋を比較すると、付着性状は類似しており、3 段配筋の付着検討方法は 2 段配筋の方法を準用できることが分かった。

(5) 鉄筋コンクリート部材の曲げ降伏後の耐力低下は、部材端コンクリートの圧壊、付着割裂、せん断ひび割れ、主筋の座屈などによって進行する。そこで、曲げ降伏後に付着割裂破壊、せん断破壊、主筋の座屈、などで耐力低下した柱試験体を既発表論文から 30 体選定し、曲げ降伏後の変形性能について検討した。ここでは、最大耐力の 80% まで耐力低下したときの終局変形角の定量的な評価を試みた。その結果、図 3 に示すように、軸力比 0.1 以上では塑性率と付着余裕度の相関が強いことが分かった。これまでは、終局変形角から降伏変形角を差し引いた塑性変形角を評価する手法が主流であったが、塑性率を評価するほうがよい。塑性率は降伏変形角に対する終局変形角の比率である。付着余裕度は、付着強度に対する付着応力度の要求値の比率である。

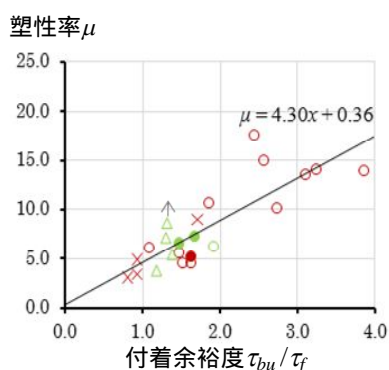


図 3 塑性率と付着余裕度の関係 (軸力比 1.0)

図 3 に示すように、軸力比が 0.1 より大きい試験体は、右肩上がりの傾向が見られ、軸力比が 0.1 以下の試験体は塑性率が高いほう (変形性能が良いほう) にばらつく傾向があった。これは、軸力が低い場合、主筋の付着の有無にかかわらず同等な曲げ耐力を発揮し得るが、軸力が高くなると曲げ耐力は付着に影響を受けるため、付着余裕度と変形性能の相関が強くなると考えられる。また、軸力が低い試験体は、付着劣化が進行した場合で

も応力の再分配がなされ、曲げ耐力を維持したまま変形して塑性率が高くなった可能性もある。

(6) RC 部材のせん断抵抗能力の評価方法を以下の通り提案する。

せん断強度評価の基本式は、アーチ・トラスモデルに基づくものとする。ただし、付着強度の評価が従来と異なり、引張鉄筋全体の付着耐力式を用いる。これは、既往の付着強度式を簡略化したもので、コンクリート強度、せん断補強筋比、中子筋の効果、で決定されるものである。なお、軸力については、変形性能の小さいせん断破壊型では強度は上昇し、変形性能が高くなる傾向のある付着割裂破壊型では強度上昇が見られなかったため、軸力の効果は余力とする。

多段配筋の場合のせん断強度は、総付着耐力式でコンクリート負担項を 2 段目鉄筋量に応じて割増す (最大で 1.5 倍)。ただし、鉄筋がカットオフされる場合は総付着耐力を 0.8 倍に低減する。また、スパン内で、鉄筋が減じられて 1 段配筋となる断面がある場合などは、スパン内での総付着耐力の最小値を採用する。

カットオフ筋については、せん断耐力の確認とは別に、鉄筋毎の付着応力を確認する。付着応力の要求値を鉄筋の存在応力から定める場合、繰返し変形を考慮して、2 段目や 3 段目であっても、1 段目位置にあるものとして算定する。

曲げ降伏前のせん断破壊や付着破壊の防止は、前述のせん断耐力式の計算値が曲げ耐力計算値以上であることを確認し、カットオフ筋の付着を確認すれば良い。曲げ降伏後のせん断破壊や付着割裂破壊を防ぐために、軸力比 0.1 以上の部材に対しては、塑性率の要求値に応じた付着余裕度を確保する。

せん断耐力評価式は付着性能を陽な形で表現しているので、既存建物の診断の場合、鉄筋の腐食に応じて付着耐力を低減する。例えば、引張鉄筋群の一部に、腐食による劣化でひび割れなどが生じている場合は、鉄筋のカットオフのように付着応力が不均一になるため、総付着耐力を 0.8 倍に低減する。腐食が広範囲であれば、さらに低減する必要がある。

以上が本研究に基づいた提案であり、現行の基準にも反映されることが望ましい。また、地震多発国の日本では、地震力に抵抗するために鉄筋量が多くなる傾向にあり、多段配筋などに対する知見は日本独自のものが多く、今後、国外に向けても情報発信していきたい。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1 件)

西村康志郎、大西直毅：付着割裂とせん断補強筋の降伏を伴う RC 梁のせん断強度に関する考察、日本建築学会構造系論文集、

査読有、81 巻、727 号、2016 年、  
pp.1521-1529  
<http://www.aij.or.jp/paper/search.html>

〔学会発表〕(計 8 件)

寺井貫、他：RC 梁の付着強度を考慮したせん断抵抗機構に関する考察、日本建築学会大会学術講演会、2015 年 9 月 4 日～9 月 6 日、東海大学湘南キャンパス(神奈川県・平塚市)

笹井和也、他：カットオフ筋を有する 2 段配筋 RC 梁の付着応力に関する有限要素解析、日本建築学会大会学術講演会、2015 年 9 月 4 日～9 月 6 日、東海大学湘南キャンパス(神奈川県・平塚市)

長澤貴暁、他：RC 梁のカットオフされた二段目主筋の割裂破壊に関する実験研究、日本建築学会大会学術講演会、2015 年 9 月 4 日～9 月 6 日、東海大学湘南キャンパス(神奈川県・平塚市)

近藤晴紀、他：折曲げ定着された多段配筋 RC 梁の付着応力に関する実験研究、日本建築学会大会学術講演会、2015 年 9 月 4 日～9 月 6 日、東海大学湘南キャンパス(神奈川県・平塚市)

宮治典生、他：折り曲げ定着された多段配筋 RC 梁の付着応力に関する実験研究、日本コンクリート工学会年次大会、2016 年 7 月 6 日～7 月 8 日、福岡国際会議場(福岡県・福岡市)

前川優太、他：RC 梁のカットオフ鉄筋の付着性状に及ぼす載荷速度の影響に関する実験研究、日本建築学会大会学術講演会、2016 年 8 月 24 日～8 月 26 日、福岡大学(福岡県・福岡市)

新保貴志、他：1 段目の中央主筋をカットオフした RC 梁の付着性状に関する実験研究、日本建築学会大会学術講演会、2016 年 8 月 24 日～8 月 26 日、福岡大学(福岡県・福岡市)

宮治典生、他：RC 梁のカットオフされた二段目主筋の割裂破壊に関する実験研究(その 3)、日本建築学会大会学術講演会、2016 年 8 月 24 日～8 月 26 日、福岡大学(福岡県・福岡市)

近藤 晴紀 (KONDO, Haruki)  
笹井 和也 (SASAI, Kazuya)  
坂本 友里絵 (SAKAMOTO, Yurie)  
佐藤 圭太 (SATO, Keita)  
新保 貴志 (SHINBO, Takashi)  
寺井 貫 (TERAI, Toru)  
長澤 貴暁 (NAGASAWA, Takaaki)  
堀田 淳司 (HORITA, Atsushi)  
前川 優太 (MAEKAWA, Yuta)  
宮治 典生 (MIYAJI, Norio)  
森 麻由 (MORI, Mayu)  
柳浦 嵩史 (YAGIURA, Takafumi)  
山口 悠太 (YAMAGUCHI, Yuta)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

西村 康志郎 (NISHIMURA, Koshiro)  
北海道大学・大学院工学研究院・准教授  
研究者番号：00343161

### (2) 研究分担者

大西 直毅 (ONISHI, Naoki)  
北海道大学・大学院工学研究院・助教  
研究者番号：20579784

### (3) 連携研究者

### (4) 研究協力者