

鉄筋コンクリート梁部材におけるカットオフ筋の 付着割裂性状に関する研究

学位請求論文の概要

田畑 卓*

A Study on Bond Splitting Properties of Cut-off Bars in Reinforced Concrete Beams

Summary of thesis for a degree

by Taku TABATA

Abstract

This paper discusses the bond splitting properties of reinforced concrete beams. The study investigated the effect of fundamental factors for beam members in a two-bundled-bars arrangement and in a double-layer arrangement, the change in bond splitting properties using the cut-off method. The bond resistance mechanism was examined based on experiment results, the bond splitting strength equation for cut-off bars, in consideration of change in stress conditions with the cut-off method and continuity with a single-layer arrangement member.

要 旨

本論文は、鉄筋コンクリート造建物における梁部材の付着割裂性状について研究したものである。本論文では、2本束ね配筋および2段配筋された梁部材について基礎的因子の及ぼす影響を定量的に検討するとともに、主筋のカットオフに係わる付着割裂性状の変化を実験的に調べ、その付着抵抗機構を考察した。考察の結果に基づき、カットオフによる応力状態の変化、並びに1段配筋部材との連続性を考慮した付着割裂強度式を提案した。

キーワード：付着割裂性状／カットオフ／束ね配筋／2段配筋／付着割裂強度

第一章 序論

鉄筋コンクリート構造は、鉄筋とコンクリートとが一体となって外力に抵抗する複合構造であり、従って、曲げモーメントやせん断力の外力に対して所要の性能を如何なく発揮するためには、コンクリートと鉄筋との間に十分な付着応力が確保されている必要がある。

鉄筋コンクリート部材の付着割裂性状に関する研究は、1968年の十勝沖地震に鑑みた実験研究を契機としてこれまで数多く行われている。なかでも付着割裂強度は部材の構造性能に大きく影響するためこれを精度良く評価できることが重要であり、現在

までにも多くの影響因子を考慮した実験結果を概ね良く推定できる付着割裂強度式が幾つか提案されるに至っている。

一方、地震力を受ける梁部材では、スパン中央部よりも材端部に大きい曲げモーメントが作用することが多い。これらに対しては配筋合理化の観点から、作用曲げモーメントに応じて材端部からの主筋量をスパン中央部で減じる、いわゆるカットオフが一般的に良く利用されている。この場合、特にカットオフされた主筋では鉄筋長さの減少に伴って作用付着応力が増大することになるため、付着割裂破壊に対する十分な配慮が必要である。しかしながら、カッ

* 技術研究所構造グループ

トオフ部材においては、カットオフされた鉄筋と通し配筋された鉄筋とで必ずしも作用付着応力が等しくならない性質があるが、既往の研究の多くは各主筋にほぼ等量の付着応力が作用する場合の付着割裂性状を対象としており、このような同一断面に作用付着応力の異なる鉄筋が混在する場合の付着割裂性状は不明な点が多い。

昨今、鉄筋コンクリート造建物の要求性能の高度化、多様化に伴い、梁部材では限られた断面に多くの主筋を必要とすることが少なくない。このことは、所要の主筋を1段配筋で収めるのが困難な場合、束ね配筋や2段配筋として主筋間のあきを確保する方法が考えられる。しかし、これまで1段配筋部材の付着割裂性状については数多くの研究成果が蓄積されているものの、束ね配筋部材や2段配筋部材については付着割裂性状を検討した既往の研究が極めて限られているのが現状である。

本論文は、鉄筋コンクリート造梁部材の付着割裂性状について、断面内の主筋配置を2本束ね配筋および2段配筋とした場合に注目するとともに、材軸方向の主筋配置としてカットオフの及ぼす影響を明らかにし、既往の1段配筋部材に関する研究成果との関連性を考慮しながら、これらを合理的に評価できる付着割裂強度式を提案することを目的としたものである。なお、本論文では主筋降伏以前の付着割裂破壊(サイドスプリット)を対象としている。

第一章では、序論として研究の背景と現状における問題点を指摘し、既往の研究を概観した上で本研究の位置づけを図るとともに、研究の目的と内容を示した。

本論文は以上の研究成果をまとめたもので、全六章より構成されている。

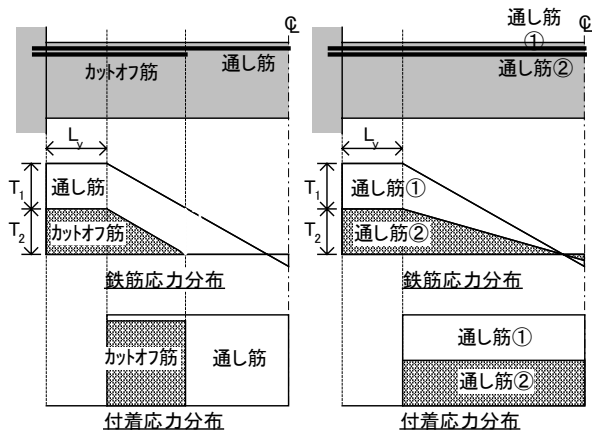


図1 カットオフ部材と通し配筋部材

第二章 2本束ね配筋部材の付着割裂性状

第二章では2本束ね配筋部材の基礎的な付着割裂性状を把握するため、全主筋がスパン内に通し配筋される場合を対象に曲げせん断実験を行っている。

束ね配筋は一組の鉄筋を相互に密着させることが原則であり、その付着特性はこれまで主に有効周長の取り扱いの観点から検討が行われてきた。束ね鉄筋を等価断面の太径鉄筋とみなして付着設計する手法はこれらの研究に基づいたものである。しかしながら、異形鉄筋の付着機構は鉄筋表面の節とコンクリートとの噛み合い作用に依存するため、本来、付着性能を検討する上では付着割裂破壊を前提とすべきであり、有効周長からこれを論じることは適切でない。束ね鉄筋の付着割裂強度の評価にあたっては特に束ね形状を含めた断面内の鉄筋配置を適切に評価することが重要といえる。付着割裂性状に影響を及ぼす因子はこのほか、コンクリート強度や横補強筋比、横補強筋の配筋形状などが指摘されている。

このようなことから、本実験では束ね形状として、図2に示すような相互の主筋を断面幅方向に束ねた”横束ね”，および断面せい方向に束ねた”縦束ね”を取り上げている。それぞれ対しては横補強筋比および中子筋の有無を実験因子としたものである。

図3に部材としての平均付着割裂強度と横補強筋比の関係を示す。同一横補強筋比の場合にあっては、断面外周にのみ横補強筋を配した場合に比べ中子筋を併用した場合の方が付着割裂強度は高く中子筋の効果が認められた。また、横束ねと縦束ねにおいて

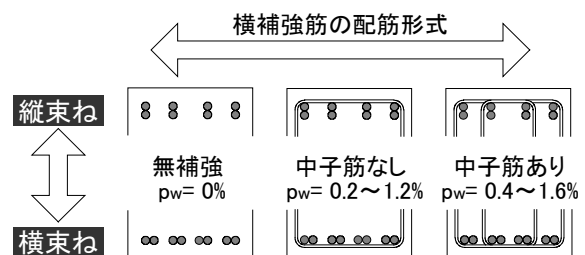


図2 実験要因(模式図)

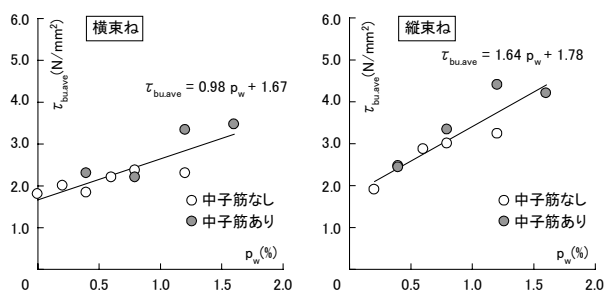


図3 平均付着割裂強度と横補強筋比の関係

は、他の条件が等しい場合、縦束ねが横束ねを上回る付着割裂強度を發揮した。このことは従来慣用的に用いられている1組の束ね鉄筋を等価断面積の太径鉄筋に置換する方法は、付着割裂強度を必ずしも適切に評価し得ないことを示唆している。

また破壊性状について検討した結果、横束ねでは全主筋がほぼ一様に付着割裂破壊を生じるのに対して、縦束ねでは断面せい方向外側の主筋よりも内側の主筋の付着割裂破壊が支配的であることが認められた。

図4は個別主筋の付着割裂強度と横補強筋比の関係である。中子筋の有無の影響に関して、横束ねでは束ねられた主筋相互の付着割裂強度はほぼ同じであり、これを横補強筋の隅角にある場合と横補強筋の辺上にある場合の2種類に分類できること、縦束

表1 通し配筋された個別主筋の付着割裂強度

<横補強筋の隅角にある主筋>

$$\tau_{bu} = \lambda(0.12b_{si} + 0.16 + 12.1q_{st})\sqrt{\sigma_B} \quad \dots(1)$$

<横補強筋の辺上にある主筋>

$$\tau_{bu} = \lambda(0.12b_{si} + 0.16 + 5.8q_{st})\sqrt{\sigma_B} \quad \dots(2)$$

<縦束ねの断面せい方向内側主筋>

$$\tau_{bu} = \lambda(0.12b_{si} + 0.16 + 9.1q_{st})\sqrt{\sigma_B} \quad \dots(3)$$

ここで

$$b_{si} = \frac{b - N' \cdot d_b}{N_p \cdot d_b} \quad q_{st} = k \cdot \frac{b \cdot p_w}{N_p \cdot d_b}$$

τ_{bu} : 付着割裂強度(N/mm²) b : 断面幅寸法(mm)

d_b : 主筋径(mm) σ_B : コンクリート強度(N/mm²)

p_w : 横補強筋比 N_p : 束ね鉄筋組数(組)

N' : 一列に並ぶ主筋本数(本)

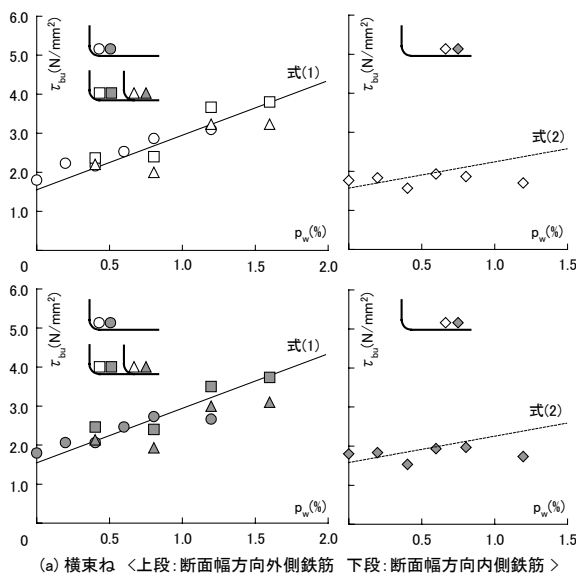
(横束ね: $N' = 2N_p$ 縦束ね: $N' = N_p$)

k : 横補強筋応力の差異を表す係数

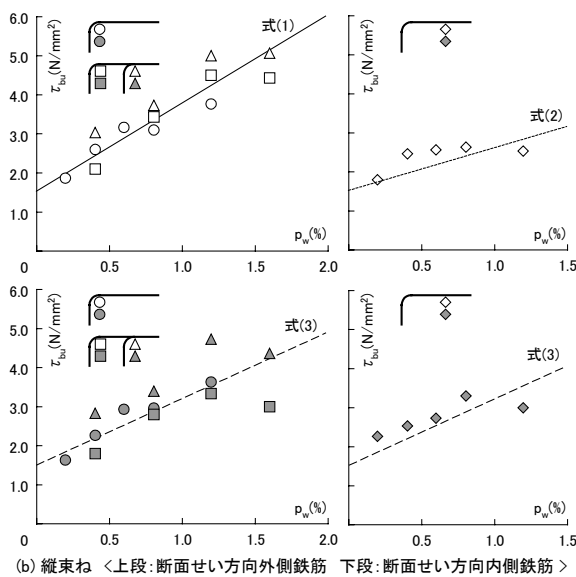
(横束ね: $k = 1$ 縦束ね: $k = 2$)

λ : 水平上端筋の強度低減係数

(水平上端筋: $\lambda = 0.75 + \sigma_B / 400$ (N/mm²))



(a) 横束ね <上段: 断面幅方向外側鉄筋 下段: 断面幅方向内側鉄筋>



(b) 縦束ね <上段: 断面せい方向外側鉄筋 下段: 断面せい方向内側鉄筋>

図4 個別主筋の付着割裂強度の定量化

ねでは断面せい方向外側の主筋と内側の主筋とで性状が異なり、外側の主筋では横束ねと同様の分類が可能であるが、内側の主筋では横補強筋の掛かり方による影響を受けないことを示した。

また、付着割裂強度時の横補強筋応力は、横束ねに対して縦束ねで2倍程度となり、束ね形状による影響が大きいことを示した。

以上の結果から、全主筋が通し配筋される場合を対象に、表1の通り個別主筋の付着割裂強度を定量化した。これらの定量化にあたっては、横束ねについて鉄筋相互が接することによる影響を無視し、既往の1段配筋部材に関する研究成果を適用することで実験値と良好な適合性を示した。縦束ねでは式中、コンクリートの拘束効果を表す尺度 b_{si} 、および横補強筋の拘束効果を表す尺度 q_{st} について、横束ねとの相対的な差異を考慮したものである。

第三章 2段配筋部材の付着割裂性状

第三章では、2段配筋部材について基礎的な付着割裂性状を把握するために行った曲げせん断実験の結果を考察している。

第二章で取り扱った2本束ね配筋のうち、断面せい方向に主筋を束ねた縦束ねは、鉄筋配置に関して上下に主筋が接する2段配筋と見なすことができる。そこで、本章では縦束ねとの類似性に着目しながら、

2段配筋部材の付着割裂性状を検討している。

2段配筋梁の付着割裂破壊の検定は従来、1段目主筋と2段目主筋を独立に扱えるものと考えて、1段配筋部材の研究成果をそのまま準用する形で行われてきたが、近年の研究成果より、これらの評価方法は必ずしも十分といえず、特に2段目主筋に対しては付着割裂強度を過大評価してしまう危険性が指摘されている。しかしながら、現状では2段目主筋の付着割裂性状を定量的に検討した研究は極めて少ない。特に実際の2段配筋部材では通常、1段目の主筋本数が2段目と同数以上となるが、既往の研究では2段目主筋の付着割裂破壊を生じさせる意図から、2段目に対して1段目の主筋本数を低減して実験を行っている場合が多いことが挙げられる。また、中子筋の有無などの横補強筋の配筋形式の違いは、付着割裂強度を支配する1つの大きな要因と考えられるが、2段配筋部材に対するその影響については研究が少なく不明な点が多い。

このようなことから、本章では1段目に2段目と同本数以上の主筋を有する2段配筋梁を対象に、1段目主筋本数、横補強筋の配筋形式および横補強筋比を変動因子とする実験を行った。

図5に各主筋の付着応力度と荷重の関係を示す。図より、各試験部では1段目に2段目と同本数以上の主筋を配しているにも拘わらず、付着割裂破壊は全て2段目主筋で生じていることがわかる。断面せい方向内側の主筋で付着割裂破壊が先行する性状は第二章の縦束ねと同様の傾向であった。

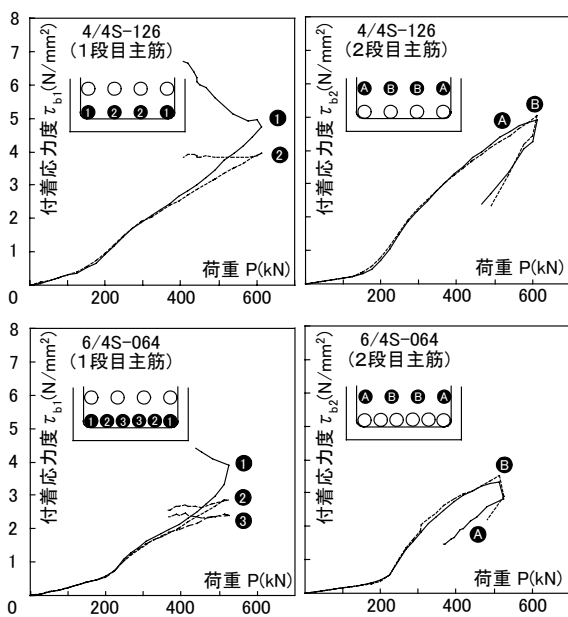


図5 1段目主筋と2段目主筋の付着応力度の推移

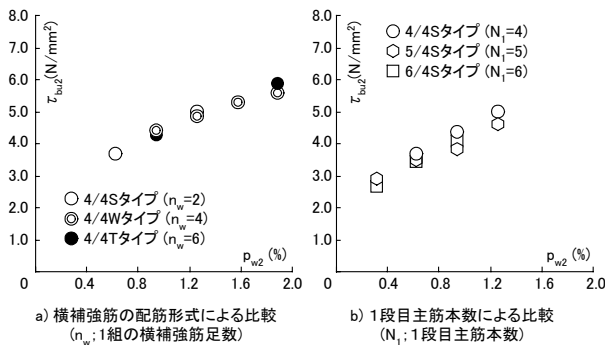


図6 2段目主筋の付着割裂強度と横補強筋比の関係

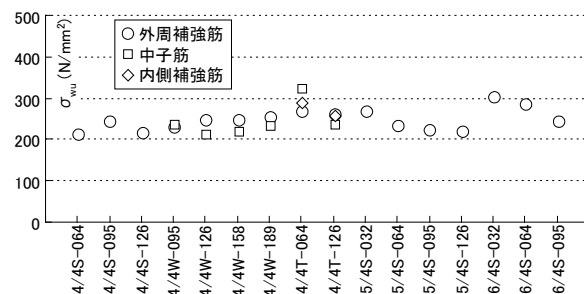


図7 付着割裂強度時の横補強筋応力度

図6は2段目主筋の付着割裂強度と横補強筋比の関係である。横補強筋比に対しては、付着割裂強度は $p_w=1.89\%$ の高補強域までほぼ直線的に増大している。一方、横補強筋を外周補強筋のみとした4/4Sタイプと中子筋を併用した4/4Wタイプでは付着割裂強度は同程度であり、第二章における縦束ねの断面せい方向内側主筋と同様の性状が認められた。さらに4/4Tタイプは4/4Wタイプに対して2段目に直接掛かる横補強筋を配したものであるが、この場合、2段目主筋の付着割裂強度は2段目主筋高さの横補強筋比(p_w2)に依存することが明らかとなった。

図7に付着割裂強度時の横補強筋応力度を示す。横補強筋応力度は各試験部で概ね等しく、横補強筋の配筋形式や1段目主筋の影響がみられなかった。

以上の実験結果によれば、2段配筋と縦束ねとは定性的な付着割裂性状に共通する点が認められる。そこで次に、第二章で定量化した縦束ね(断面せい方向内側主筋)の付着割裂強度より、第三章の実験で得た2段目主筋の付着割裂強度の評価を試みた。図8に実験値と計算値の対応を示す。実験値と計算値は良好に対応しており、2段目主筋は縦束ねの内側主筋と見なして付着割裂強度を評価できる可能性が示唆された。

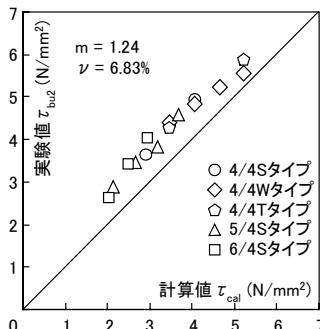


図8 第二章の定量化に基づく2段目主筋の付着割裂強度の評価

第四章 カットオフを用いた梁部材の付着割裂性状

第四章では2本束ね配筋部材および2段配筋部材について、一部の主筋をカットオフした場合の付着割裂性状を実験的に調べるとともに、通し筋の作用付着応力の影響を考慮したカットオフ筋の付着割裂強度式の提案を行っている。

第二章および第三章は、クリアスパン内に全主筋が通し配筋された場合を対象として、断面内の主筋配置や横補強筋比、中子筋の有無などの横補強筋の配筋形式が付着割裂性状に及ぼす影響を検討したものである。カットオフ部材の付着割裂性状を定量的に把握するためには、これらの要因に加えて更にカットオフにより生じる材軸方向の主筋応力分布の変化、すなわち、カットオフ筋と通し筋とに作用する付着応力の違いが及ぼす影響を明らかにする必要がある。

本章では通し筋のカットオフ筋に対する作用付着応力の比率を”付着応力比 γ ”と定義し、2本束ね配筋と2段配筋とについてそれぞれ、付着応力比を3水準($\gamma=1.0, 0.5, 0$)に変化させた実験を行った。ここで、本論においては2本束ね配筋部材について一組のうち断面内側(横束ねでは断面幅方向、縦束ねでは断面せい方向)に位置する主筋を、2段配筋部材では断面せい方向内側の2段目主筋をカットオフした場合を対象としている。図9に試験体断面を示す。

図10にカットオフ筋の付着割裂強度と横補強筋

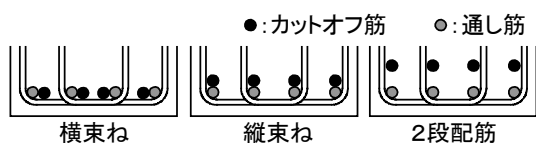


図9 試験体断面(模式)

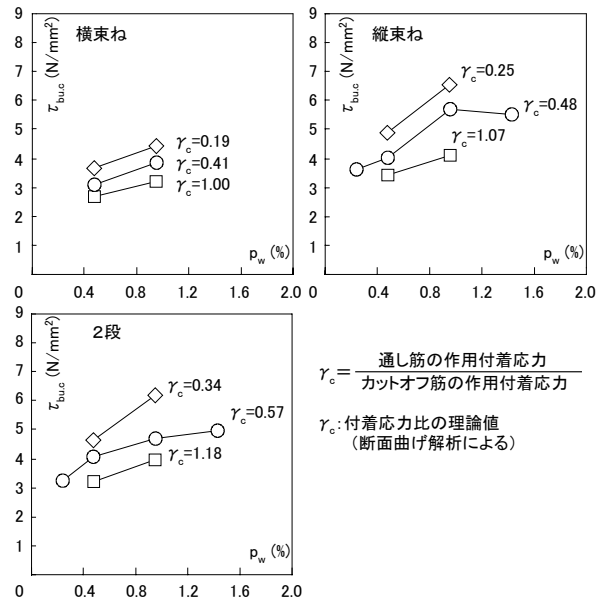


図10 カットオフ筋の付着割裂強度と横補強筋比の関係

比の関係を示す。これより、カットオフ筋の付着割裂強度は横補強筋比と共に増大するが、同一横補強筋比では付着応力比 γ の大きい場合ほど低下することが明らかとなった。このことはカットオフ筋の付着割裂強度は通し配筋部材のそれに比べて増大することを示している。

そこで、次にカットオフ筋の付着割裂強度に及ぼす付着応力比の影響を検討するため、歪み測定値より横補強筋による主筋拘束応力度を算出し、付着機構に係わる主筋周りの応力状態を考察した。

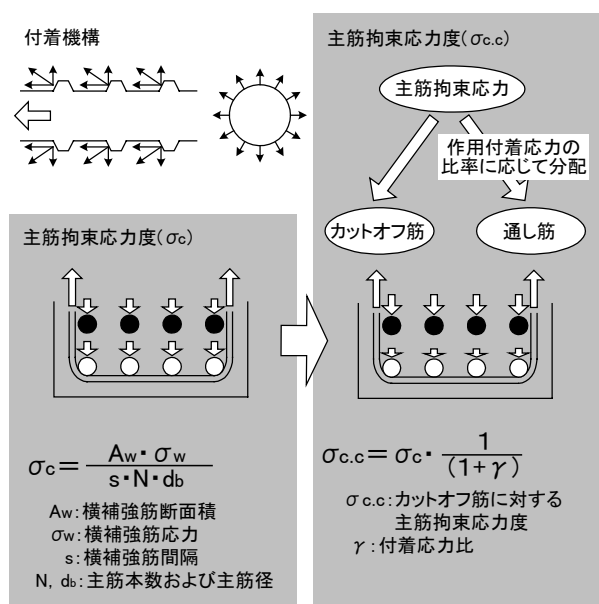


図11 付着応力比による主筋拘束応力の分配

付着応力度と主筋拘束応力度の関係を調べた結果、横補強筋による主筋拘束応力は図 11 に示すごとく、各主筋に平均的に作用するのではなく、作用付着応力の比率に応じて通し筋とカットオフ筋とに分配されると考えることにより、カットオフ筋の付着応力度と主筋拘束応力度とは良好な相関関係を示すことが明らかとなった。図 12 は付着応力比による分配を考慮して求めた主筋拘束応力度とカットオフ筋の付着割裂強度の関係である。両者の関係は付着応力比によらずほぼ一つの直線上に分布していることがわかる。また図中に示した回帰直線の傾きは主筋とコンクリートの摩擦係数に相当するが、各主筋配置でほぼ一致しており、付着割裂強度に及ぼす付着応力比の影響は、主筋配置によらず同一に扱えることが認められた。

従って、カットオフ筋の付着割裂強度が付着応力比によって変化する性状は、図 13 に示すように、コンクリートおよび横補強筋による主筋拘束応力が付着応力比に依存する形でカットオフ筋と通し筋とに分配されることに起因したものと判断できる。一方、第二章で定量化した付着割裂強度は各主筋に平均的に付着応力度が作用する場合を対象としたものであり、同図中では付着応力比 $\gamma=1.0$ の場合に相当すると考えることができる。

以上の考えに基づき、表 2 に示すカットオフ筋の付着割裂強度式を提案した。本提案式は、第二章で定量化した付着割裂強度に付着応力比の影響を取り入れたものであり、その構成はコンクリート負担

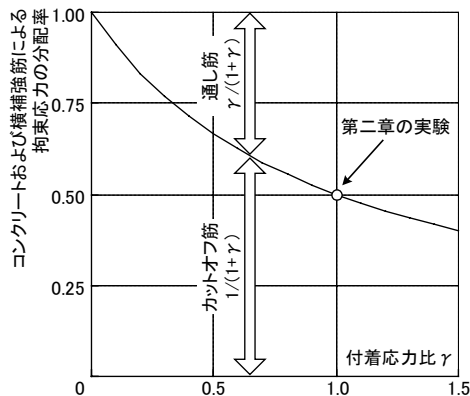


図 13 付着応力比と主筋拘束応力の関係

表 2 カットオフ筋の付着割裂強度式

< 横束ね >

$$\tau_{bu,c} = \lambda \left\{ 0.12b_{si} + 0.16 + \frac{12.1N_w + 5.8(N_c - N_w)}{N_c} \cdot q_{st} \right\} \sqrt{\sigma_B}$$

$$= \lambda \left\{ 0.12b_{si} + 0.16 + \left(5.8 + 6.3 \frac{N_w}{N_c} \right) \cdot q_{st} \right\} \sqrt{\sigma_B}$$

< 縦束ね・2段配筋 >

$$\tau_{bu,c} = \lambda(0.12b_{si} + 0.16 + 9.1q_{st})\sqrt{\sigma_B}$$

ここで

$$b_{si} = \frac{b - N' \cdot d_b}{(1 + \gamma)N_c \cdot d_b} \quad q_{st} = k \cdot \frac{b \cdot p_w}{(1 + \gamma)N_c \cdot d_b}$$

$\tau_{bu,c}$: カットオフ筋の付着割裂強度(N/mm²)

N' : 当該付着割裂面に並ぶ主筋本数(本)

(横束ね: $N' = N_c + N_t$ 縦束ね: $N' = N_c$)

N_c, N_t : カットオフ筋および通し筋本数(本)

N_w : 横補強筋の隅角にあるカットオフ筋本数(本)

γ : 付着応力比

特記のない記号は表 1 に準ずる

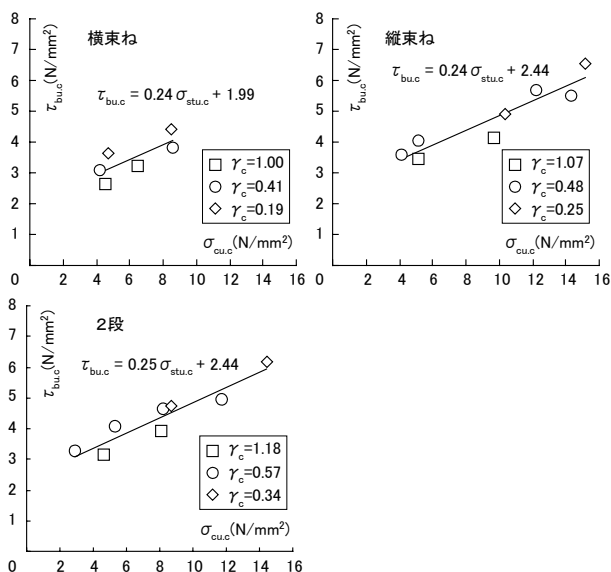


図 12 カットオフ筋の付着割裂強度と主筋拘束応力度の関係

分に関する尺度 b_{si} と、横補強筋負担分に関する尺度 q_{st} の中にそれぞれ主筋拘束応力の分配を表す係数 $(1+\gamma)$ を考慮したものである。図 13 から推察できるように、本提案式では全ての主筋が通し配筋された場合についても連続的に付着割裂強度を評価できる点が特徴となっている。

第五章 カットオフ筋の付着割裂強度式による評価

第五章では本論に示した実験結果および既往の実験結果より、提案したカットオフ筋の付着割裂強度式の適合性を検証している。

図 14 は本論に示した実験結果と提案式による計算値の対応である。提案式は縦束ねを幾分安全側に評価する傾向を示しているが、各配筋形式では横補強筋比や中子筋の有無、付着応力比などの実験因子

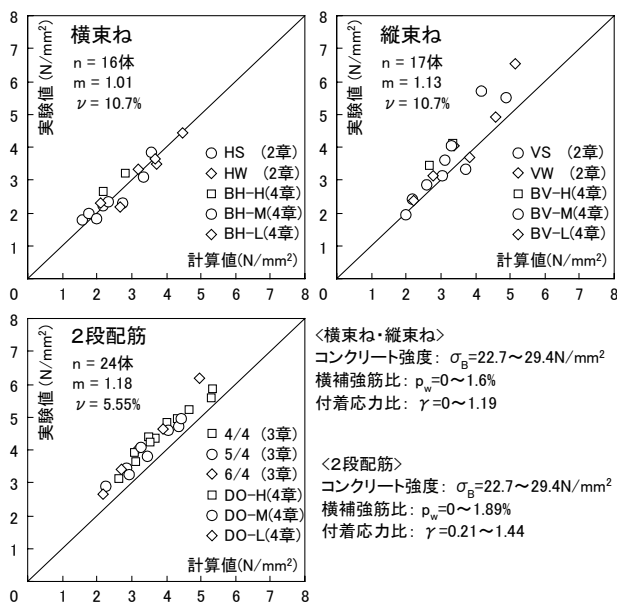


図 14 提案式と本実験結果の対応

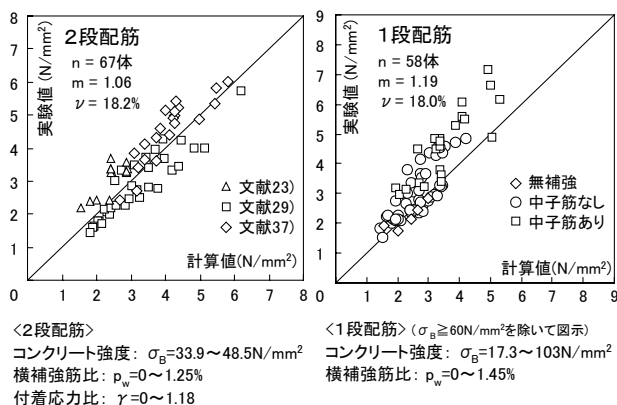


図 15 提案式と既往の実験結果の対応

による適合性のばらつきや偏りは生じていない。

図 15 に既往の実験結果と提案式による計算値の対応を示す。本論においては1段配筋部材を直接的に取り扱っていないものの、第二章で述べたとおり、提案式は既往の1段配筋部材を対象とした研究成果に基づく。このようなことから提案式の適合性の検証は2段配筋部材と併せて1段配筋部材に対しても行った。なお、2段配筋部材に関する既往の実験結果は付着応力比が0~1.2程度の範囲であり、実用的な範囲はほぼ網羅している。また、1段配筋部材に関する実験結果はいずれも通し配筋部材を想定したものである。検討結果によれば、提案式はコンクリート強度が60N/mm²程度以上の実験結果に対しては適合性に課題があるが、多くの実験結果と良好な適合性を示すことが認められた。

第六章 結論

第六章では、本研究の結論として、各章の結果と考察に基づいて得られた研究成果を総括し、さらに今後の研究課題について言及している。

本研究では2本束ね配筋部材および2段配筋部材の付着割裂性状、さらにこれらの部材において一部の主筋をカットオフした場合の付着割裂性状を明らかとし、その付着割裂強度式を提案した。提案した付着割裂強度式は通し筋とカットオフ筋の作用付着応力の違いによる影響を考慮したものであり、カットオフを用いた場合のみならず全ての主筋がスパン内に通し配筋された場合についても適用可能である。よって、これらの成果は鉄筋コンクリート梁の付着設計に対して有益な知見になるものと考えられる。

謝辞

本報は平成15年3月に日本大学に受理された学位請求論文の概要を技術研究所報のために再編したものであります。本論文は、著者が安藤建設(株)技術研究所で実施したテーマ、および社会人大学院生として日本大学生産工学研究科建築工学専攻博士後期課程に在籍中に行った研究成果を纏めたものであります。ここに関係諸氏に感謝の意を表します。

