

論文 1 段配筋の一部をカットオフした RC 梁主筋の付着性状

鈴木 悠矢^{*1}・長谷川 桂亮^{*2}・高橋 之^{*3}・市之瀬 敏勝^{*4}

要旨: 1つの段に通し筋とカットオフ筋が存在する場合における RC 規準の妥当性について検証を行うために静的加力実験を行った。試験体数は4体であり、実験変数はカットオフ筋の長さとおよび本数とし、正負交番繰返し載荷を行った。すべての試験体でカットオフ筋、通し筋ともに付着割裂破壊した。次の結論が得られた。(1) カットオフ筋ではテンションシフトを考慮する必要がない可能性がある。(2) 通し筋の付着強度を算出する際の鉄筋のあきは当該鉄筋だけでなく、カットオフ筋を含めた同じ段にある全ての鉄筋を考慮する必要がある。

キーワード: RC 梁, カットオフ, 付着応力, 1 段配筋

1. はじめに

鉄筋コンクリートの主筋の付着割裂強度に関して数多くの研究が行われている。その中で1段目主筋にカットオフ筋を用いた既往の研究として、小倉ら¹⁾、山田ら²⁾の実験研究が行われている。小倉らは、主筋の位置による相違に着目をし、隅筋が通し筋で中央筋がカットオフ筋である試験体について実験を行った。あばら筋量を実験変数としており、あばら筋量を増やすことで隅筋では付着性能が高まったが、中央筋での影響はあまり見られないことが確認されている。

山田らは、「付着強度の定着長さの依存性」と「多段配筋の影響」を問題点として挙げ、同じ段にあるすべての主筋がカットオフ筋である試験体について実験を行った。その結果、定着長さを考慮した実験式の提案や鉄筋間隔が付着強度に与える影響の知見を得ている。

上記のように、カットオフ筋による付着の研究は行われているが、同じ段に通し筋とカットオフ筋が含まれる RC 梁において、カットオフ筋長さやカットオフ筋の本数を実験変数としている実験は行われていない。よって、本研究では、高強度鉄筋を用いた1段配筋の RC 梁で一部の主筋をカットオフし、逆対称曲げの正負交番載荷を行う。この結果に基づいて、1つの段に通し筋とカットオフ筋が存在する場合における RC 規準³⁾の付着規定の妥当性について検証を行う。

2. 実験方法

2.1 材料特性

表-1 に使用した鋼材の引張試験結果を示す。値は鉄筋5本ずつの材料試験結果の平均値とする。表-2 にコンクリートの材料試験結果を示す。値は加力前、加力後に2回行った材料試験結果の平均値とした。コンクリー

トは粗骨材に山砂利(15 mm 以下)、細骨材に山砂(5 mm 以下)を用い、セメントには普通ポルトランドセメントを使用した。コンクリート供試体は封緘養生とし、試験体は現場で型枠に収めたまま散水により21日間湿潤を保った。なお、標準養生で行った材料試験結果は材齢28日で23.7 N/mm²、材齢35日で24.1 N/mm²となった。

2.2 試験体概要

試験体は鉄筋コンクリート梁を対象とした1/3の縮尺模型とした。表-3 に試験体一覧を示す。実験変数はカットオフ筋の長さおよび本数とし、試験体数は計4体である。図-1 に観測面図、1HS の M 図、全試験体の側面図、

表-1 鋼材引張試験結果(5本平均)

種別		降伏点 [N/mm ²]	引張強度 [N/mm ²]	ヤング係数 [kN/mm ²]
D13	USD785	804	983	189
U7.1	U1275	1358	1440	189

表-2 コンクリート材料試験結果(3体平均)

材齢	圧縮強度 [N/mm ²]	ヤング係数 [kN/mm ²]	割裂強度 [N/mm ²]
32日(加力前)	20.8	19.3	1.43
45日(加力後)	24.3	18.9	1.57
平均値(6体)	22.5	19.1	1.50

表-3 試験体一覧

試験体名	スパン	カットオフ筋		$c_f + d$
		本数	長さ	
1HS	1800mm	1本	460mm	460mm
1HL		1本	640mm	640mm
2H		2本		
3H		2本	820mm	820mm
		1本	460mm	460mm

c_f : 材端からカットオフ筋不要断面までの距離
 d : 有効せい

*1 名古屋工業大学大学院 工学研究科社会工学専攻 (学生会員)
 *2 名古屋工業大学大学院 工学研究科社会工学専攻 (非会員)
 *3 名古屋工業大学 工学部建築・デザイン工学科助教 博(工) (正会員)
 *4 名古屋工業大学 工学部建築・デザイン工学科教授 工博 (正会員)

図一 2 に断面を示す。梁幅は 200 mm, 梁せいは 310 mm で、
 図中の矢印の方向からコンクリートを打設した。梁端部の
 終局曲げモーメント M_u は次式より算出した。

$$M_u = 0.9a_f\sigma_y d \quad (1)$$

ここで、 a_f は引張鉄筋断面積、 σ_y は鉄筋の降伏強度、 d は
 梁の有効せいである。カットオフ筋が計算上不要となる
 モーメント M_{safe} は、式 (1) によって算出した通し筋のみ
 の終局曲げモーメントである。カットオフ筋長さは、図一
 1(b) および表一 3 に示すように、1HL では $c_f + d$ の値を
 上回るように設定し、他の 3 体については $c_f + d$ の値と
 した。主筋はスタブ内でナットを用いてプレートに固定した。
 横補強筋は高強度鉄筋を用いて、梁の端から端ま
 で 90 mm 間隔で配筋した。なお、横補強筋は図一 2 に示
 す位置で圧接している。塑性理論式⁴⁾を用いて算出した
 トラス機構とアーチ機構による終局せん断強度は 147kN、
 付着割裂耐力による終局せん断強度は 129kN である。

3. 加力方法

図一 3 に加力装置を示す。上のスタブを水平に保つた
 ために 2 つのジャッキで載荷する。ジャッキは試験体部分
 の中央から上下 200 mm の位置にそれぞれ設置した。

変形角 R (上スタブの水平変位をスパンで除した値)
 が繰り返りサイクルの最大変形時において $R = 1/1000,$
 $1/400, 1/200, 1/100, 1/67, 1/50, 1/33, 1/25, 1/20$ となるよう
 に 1 回ずつの正負交番繰り返り載荷とした。

4. 荷重 - 変形関係

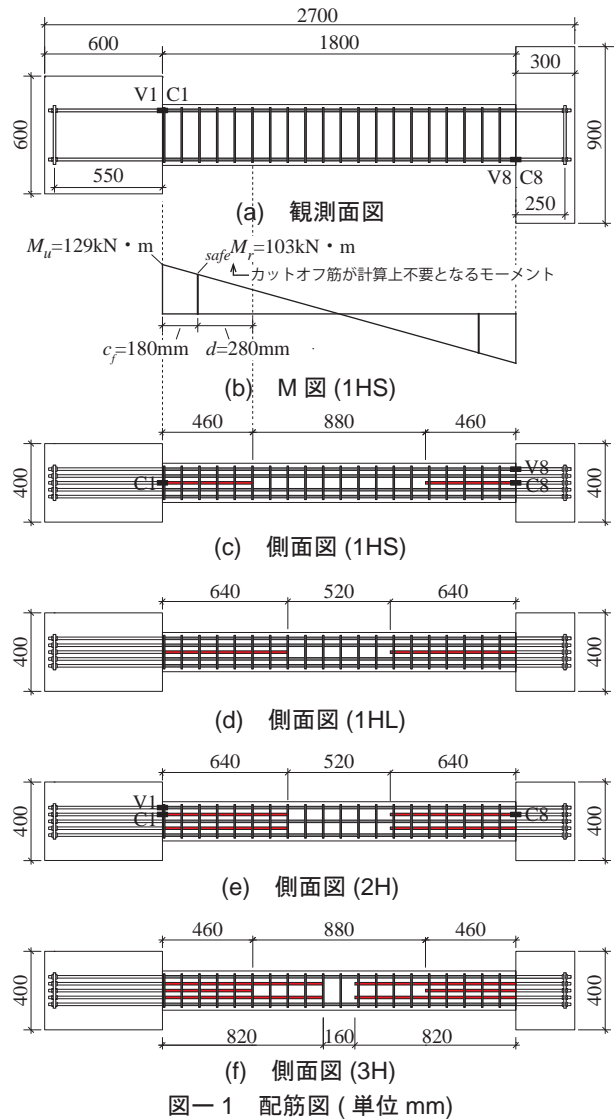
図一 4 に 1HS の荷重 - 変形関係を示す。同図中の点線は、
 式 (1) によって算出した曲げ耐力を示す。最大耐力は、正
 加力側では $R = +1/50$ で 120.2 kN, 負加力側では $R = -1/50$
 で -121.1 kN となり、計算上の曲げ耐力は超えなかった。
 最大耐力後は付着破壊により正負ともに耐力低下が見ら
 れた。全ての試験体において同様の経過となった。

図一 5 に正加力側の荷重 - 変形関係の包絡線を示す。
 包絡線は各サイクルのピーク点のみをプロットしてい
 る。最大耐力は、1HL が $R = +1/50$ で 117.3 kN となり、
 1HS と同程度であった。また、2H と 3H がそれぞれ $R =$
 $+1/50$ で 104.5 kN, $R = +1/67$ で 102.6 kN となり同程度で
 あった。1HS は最大耐力後、やや顕著に耐力低下した。

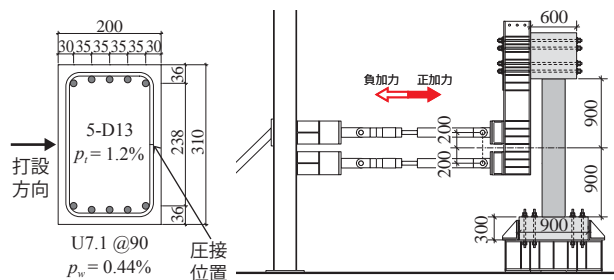
5. 破壊経過

図一 6 に 2H の上部のひび割れ状況を示す。また、図一
 7 に歪ゲージの取り付け方法を示す。リップの一部分を削っ
 て平滑にし、鉄筋を挟んで同じ位置に歪ゲージを 2 枚
 貼った。同図中の点線は養生のためにビニールテープで
 覆った範囲であり、その幅は約 30 mm とした。

図一 1(a), (c) に示す位置に取り付けた 2H の歪ゲージ

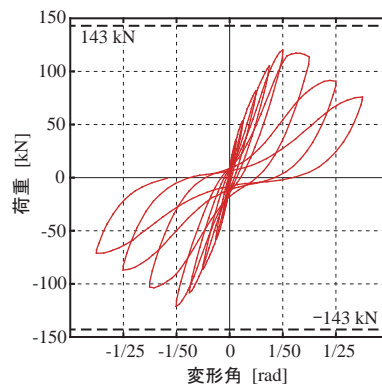


図一 1 配筋図 (単位 mm)



図一 2 断面 (単位 mm)

図一 3 加力装置



図一 4 1HS 荷重 - 変形関係

V1の値を図-8(a)に、C1とC8の平均値を図-8(b)に示す。また、図-8(b)の右側の縦軸は、次式より算出した平均付着応力度である。

$$\tau = \frac{d_b E \varepsilon}{4l_d} \quad (2)$$

ここで、 d_b は主筋の呼び名、 E は鉄筋のヤング係数、 ε はC1とC8の歪度の平均値、 l_d はカットオフ長さである。RC規準の式(16.5)を用いて算出した付着強度 τ_{bu} を実線で示しており、実験値が計算値を大きく上回っている。通し筋に関しては、 $R = +1/100$ で付着ひび割れ(A) (図-6参照)が発生し、その後 $R = +1/50$ で付着ひび割れ(A')が発生しひび割れが伸びていったが、通し筋の歪ゲージV1の値は最終サイクルに至るまで低下しなかった。カットオフ筋では、 $R = +1/100$ で付着ひび割れ(B)が発生し、 $R = +1/67$ で付着ひび割れ(B')が発生しひび割れが伸びていき、歪ゲージC1, C8の平均値は低下していった。

図-1(a), (c)に示す位置に取り付けた1HSの歪ゲージV8の値を図-9(a)に示し、C1とC8の平均値および2Hと同様に平均付着応力度を図-9(b)に示す。1HSに関しても実験値がRC規準の付着強度 τ_{bu} を大きく上回っている。カットオフ筋の付着強度 τ_{bu} と実験値の比較についての詳細は10章で述べる。通し筋の歪ゲージV8は $R = +1/33$ で、カットオフ筋の歪ゲージC1, C8の平均値は $R = +1/67$ でそれぞれ最大歪度となった。その後、通し筋とカットオフ筋共に歪度が低下したことが、図-5に示すように耐力が低下した原因と考える。一方で、2Hは通し筋の歪度が最終サイクルまで低下しなかったため、1HSより耐力低下が緩やかであった。

6. せい方向の歪度

図-10に1HLに取り付けた水平変位計(D11, D12, D13, D14)の測定位置を示す。横補強筋に沿ってアルミパイプを設置し、その中にピアノ線を通してせん断ひび割れによるせい方向の相対変位を測定した。変位計はアングル材を用いて試験体側面に取り付けている。なお、変位計D11, D14は梁端部、D12, D13はカットオフ筋端部において、せん断ひび割れが入ると想定される位置に取り付けた。

図-11に変位計測定値を310mmで除して算出したせい方向歪度と変形角($R = 1/67$ まで)の関係を示す。変形角 $R = 1/50$ 以降は付着ひび割れが顕著となり始め、せん断ひび割れによる変位を示していないため、変形角 $R = 1/67$ 以前の測定データを用いることとした。変形角 $R = 1/67$ (図中の○印)と比較すると、カットオフ筋端部の歪度の値が梁端部の歪度の値よりも大きくなっている。既往の研究⁵⁾⁶⁾でも同様の指摘がなされている。したがって、ACI code⁷⁾や土木学会⁸⁾で設けている、カットオフした位

置でせん断強度を増やす規定は一理あるといえる。

7. RC規準の応力度分布仮定

図-12にRC規準に従った1HLの付着長さの採り方を示す。図-12(b)のように1段目通し筋の L' は、カットオフ筋が計算上不要となる断面から圧縮縁までの距離とする。カットオフ筋と残された通し筋の応力度分布は

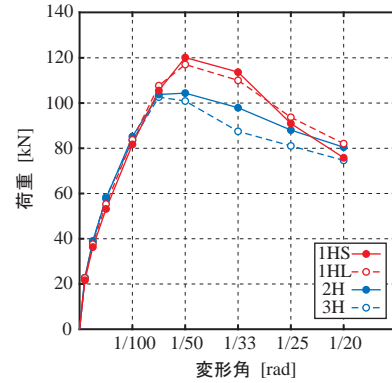


図-5 荷重 - 変形関係の包絡線

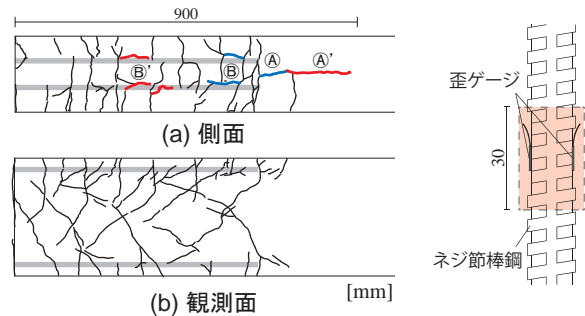


図-6 2H上部ひび割れ状況 (R = +1/50)

図-7 歪ゲージ取り付け方法

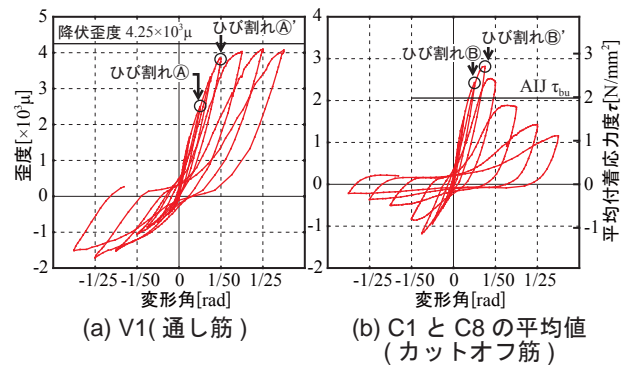


図-8 歪ゲージ (2H)

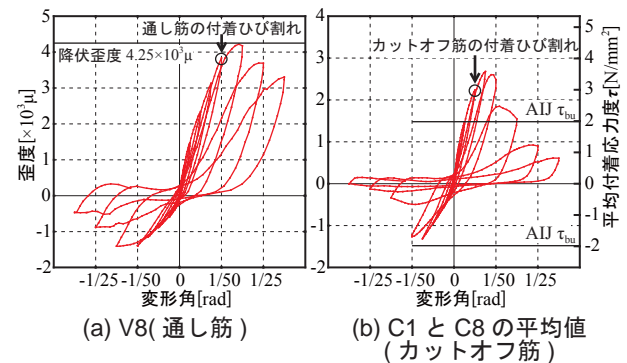


図-9 歪ゲージ (1HS)

図一 12(c) のように仮定している。通し筋を赤色、カットオフ筋を青色で表している。図中の [1][2] 間ではせん断ひび割れのために応力度 σ_y が一様に発生し、[2][3] 間ではカットオフ筋の応力度のみが減少し、通し筋の応力度は一定であると考える。図一 12(c) のように応力が変化する区間の長さを付着長さとしているため、通し筋は $L'-d$ 、カットオフ筋は l_d-d として付着長さを設定する。

8. 主筋の歪度

図一 13 に試験体 1HS に取り付けた歪ゲージの位置と $R = \pm 1/50$ 時の通し筋の歪度分布を示す。歪度分布は正載荷を赤色の実線、負載荷を破線で示す。また、最大荷重となったサイクルでの歪ゲージの値を図一 14 に示す。赤色○は通し筋、青色○と緑色○はカットオフ筋を表している。試験体には逆対称モーメントをかけているため、図中の下に示す Aa⁺, Bb⁻ 位置の歪度は次式より算出した。

$$\varepsilon_{Aa}^+ = \frac{\varepsilon_A^+ + \varepsilon_a^+}{2} \quad (3)$$

$$\varepsilon_{Bb}^- = \frac{\varepsilon_B^- + \varepsilon_b^-}{2} \quad (4)$$

ここで、+ は正載荷時の値、- は負載荷時の値である。他の位置も同様である。なお、カットオフ筋の端部 (C 点または D 点) の歪度は 0 とする。また、図中の [1] ~ [5] の数字は図一 12 で仮定されている箇所であり、数字の色は対応する鉄筋の色である。図中の数値は主筋の各位置での付着応力度を表している。付着応力度 τ は次式より算出した。

$$\tau = \frac{d_b E \Delta \varepsilon}{4L} \quad (5)$$

ここで、 d_b は主筋の呼び名、 E は鉄筋のヤング係数、 $\Delta \varepsilon$ は区間両端の歪度差、 L は区間長さである。黒線は RC 規準により算出した付着強度 τ_{bu} に基づく計算値である。通し筋は [1][3] 間で降伏ひずみ度に達し、[3][5] 間で AIJ τ_{bu} の勾配があるものと仮定した。なお、計算に使用する鉄筋間のあきは次式で算出した。

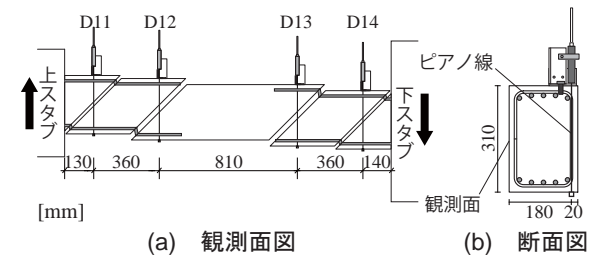
$$C = \frac{b_w - Nd_b}{N} \quad (6)$$

ここで、 b_w は梁幅、 N は主筋本数である。[3][5] 間で AIJ τ_{bu} の黒線が折れ曲がるのは、区間によって N の値が変わるためである。カットオフ筋は [4] で歪度 0 を起点として AIJ τ_{bu} の勾配があり、[1][2] 間は一定と仮定した。

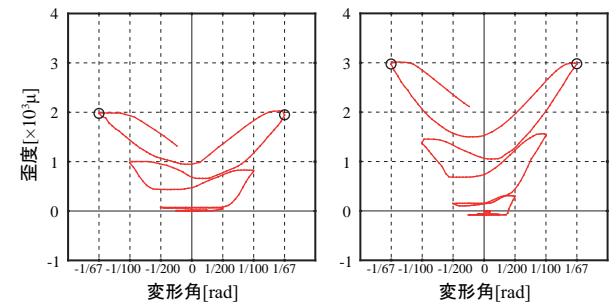
全ての試験体において、通し筋の [1][3] 間で歪度は一定にならなかった。また、ほとんどのカットオフ筋の [1][2] 間で AIJ τ_{bu} 以上の付着応力が発生していた (3H 試験体の長いカットオフ筋を除く)。これらは RC 規準の応力度分布とは異なる。カットオフ筋の [1][2] 間で付着応力が発生したことは昨年の実験⁵⁾でも確認されている。

9. カットオフ筋の付着応力度

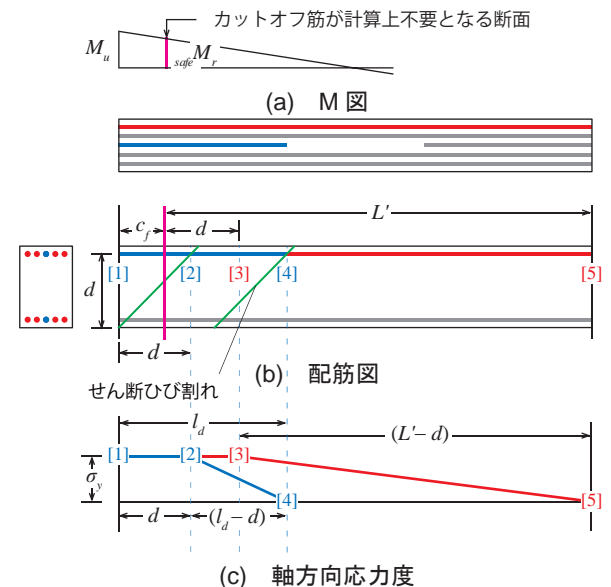
1HS の各区間の付着応力度と変形角の関係、 $R=1/50$ 時の試験体上部のひび割れ状況を図一 15 に示す。付着応力度は各サイクルの引張側のピーク時をプロットしたものである。なお、ACI τ_{bu} 、 τ_y は ACI code に従って算出した。変形角 $R = 1/100$ (図中の□) で、カットオフ筋端部 (青色) がピークとなり、梁端部 (赤色) の付着応力度はそれの 1/3 程度である。その後、カットオフ筋端部の付着応力度が低下し、梁端部が大きくなる。変形角 $R = 1/50$ (図中の○) で、梁端部がピークとなり、カットオフ筋端部の付着応力度を超える。さらに変形が進むと、全ての箇所での付着応力度は低下する。試験体上部のひび割れ状況を見ると、カットオフ筋端部から梁端部に向かって付着ひび割れが発生しており、各区間の付着ひび割れと付着応力度のピークが対応していることがわかる。



図一 10 変位計取り付け図 (1HL)



図一 11 せい方向歪度 - 変形角関係 (1HL)



図一 12 カットオフ筋を有する梁の付着長さ (1HL)

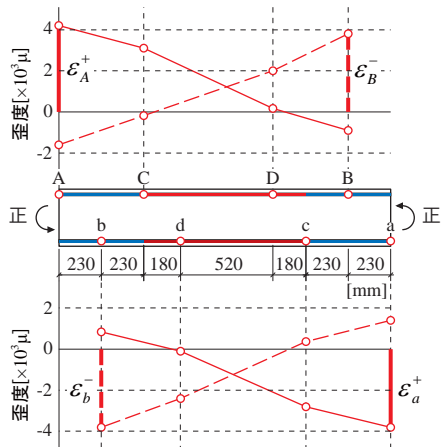
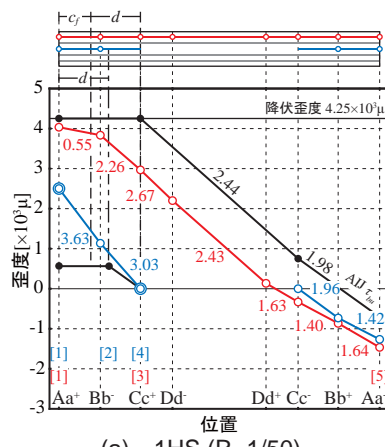
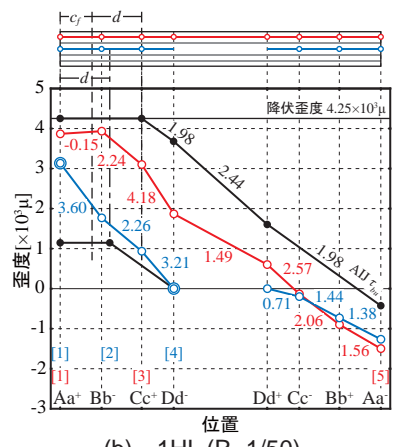


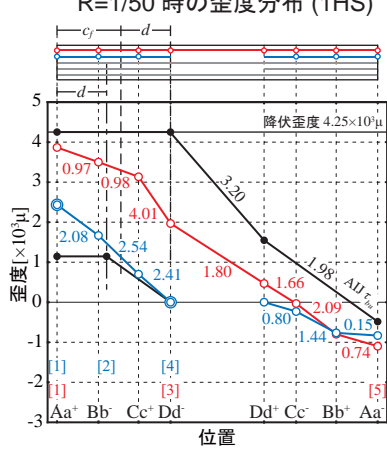
図-13 歪ゲージ位置と R=1/50 時の歪度分布 (1HS)



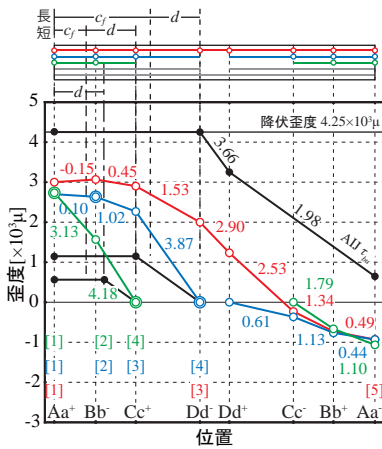
(a) 1HS (R=1/50)



(b) 1HL (R=1/50)



(c) 2H (R=1/50)



(d) 3H (R=1/67)

図-14 最大荷重時の歪度分布

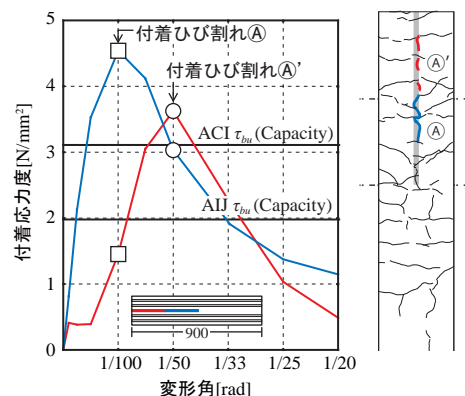


図-15 1HS の付着応力度と R=1/50 時の上部ひび割れ状況

変形角 $R = 1/100, 1/50$ 時におけるカットオフ領域での 1HS の歪度分布を図-16(a), (b) 示す。通し筋を赤色, カットオフ筋を青色の実線で示す。また, 森田らの実験結果⁹⁾より, スタブ内での付着応力度を 10 N/mm^2 と仮定したときのスタブ内での歪度分布を破線で表す。このとき, カットオフ筋と通し筋のスタブからの抜き出し量は, それぞれ S_0 および S_1+S_0 の面積で表される。次に, カットオフ領域では通し筋に沿う付着ひび割れは観測されていなかったため, 梁部分の通し筋にはすべりが発生していないものと仮定すると, 部材端でのカットオフ筋のすべり量 (= 梁からの抜き出し量) は S_1 となる。また, 図中の [2], [4] でのすべり量は, 図中の $S_1+S_2, S_1+S_2+S_4$ で表される。このようにして得られるカットオフ筋のすべり量の分布を図-16(c) に示す。 $R = 1/50$ 時に比べて $R = 1/100$ 時の [1][2] 間のすべり量は極めて小さい。図-15 において変形角 $R = 1/100$ の段階で [1][2] 間の付着応力度が小さい理由は, [1][2] 間のすべり量が小さかったためであり, [1][2] 間の付着能力が存在しなかったためではない。よって, 塑性変形が生じない場合において, カットオフ筋の平均付着応力度を算出する際に, 有効せい d を差し引く必要がないという可能性が示唆される。

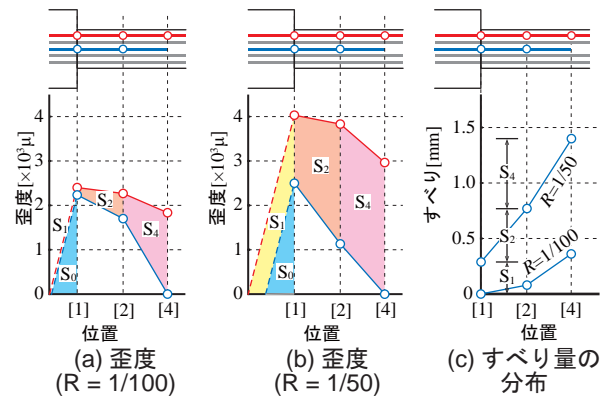


図-16 1HS の歪度とすべり

10. 付着強度の計算値と実験値の比較

図-17 に RC 規準により算出した通し筋の付着強度 τ_{bu} と実験値との比較を示す。実験値 τ を算出する際の区間長さ L は, 図-17(a) では図-14 の Dd'Dd' 間すなわち通し筋のみが存在する区間, 図-17(b) においては図-14 の赤文字 [3][5] 間すなわち RC 規準で通し筋の付着を考慮する区間としており, 実験値 τ はその区間における最大付着応力度をプロットしている。なお, 計算値を算出する際, 鉄筋間をあきは式 (6) を使用し, N の値は図-17(a) において通し筋のみ, 図-17(b) において全ての鉄筋 (5 本分) とした。図-17(a) では, 1HS のみ実験値と計算値がほぼ一致し, 他の試験体は全て危険側となった。

図一 17(b) では、2Hのみ危険側となったが、他の試験体は実験値と計算値が概ね一致した。通し筋の付着強度を算出する際の N は、通し筋のみの本数ではなく、カットオフ筋も含めた本数を使用する必要がある。

図一 18 に RC 規準, ACI code, 土木学会により算定されたカットオフ筋の付着強度 τ_{bu} と実験値との比較を示す。横軸は式 (6) を d_b で除したもので、鉄筋間隔を変数とし、かぶりは固定した。鉄筋間のあきにおいて、RC 規準では、式 (6) に $N = 5$ を代入して τ_{bu} を計算した。ACI と土木学会では、実際の鉄筋のあきを用いて τ_{bu} を計算した。また、図中に RC 規準より算出した短期許容付着応力度 $0.8f_a$ の値も示す。カットオフ筋の実験値は、図一 14 に示す 2 点の○の歪度差を用いて計算を行った。

AIJ τ_{bu} と実験値を比較すると、全てのカットオフ筋について安全側となっており、概ね ACI τ_{bu} の規準値に近い値となった。

11. まとめ

1 段目主筋の一部をカットオフした RC 梁の静的加力実験を行い、以下の知見が得られた。

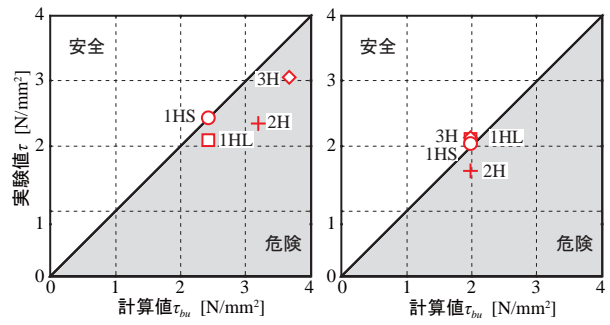
- (1) 全ての試験体において、計算上の曲げ耐力は発揮されなかった。
- (2) 全ての試験体において、カットオフ筋に沿う付着ひび割れ発生後に歪度が低下し、耐力低下の原因となった。
- (3) せん断ひび割れはカットオフ位置で拡大しやすい。
- (4) RC 規準の応力度分布仮定において、カットオフ筋が不要となる断面までの距離に有効せいを加えた距離 (c_j+d) まで通し筋の歪度が一定であると仮定しているが、歪度が一定とならず付着応力が発生していた。
- (5) 塑性変形が生じない場合、カットオフ筋の平均付着応力度を算出する際に、有効せい d を差し引く必要はない可能性がある。
- (6) 式 (6) を用いて通し筋の付着強度を算出する際に、当該鉄筋だけでなく、同じ段にある全ての鉄筋を含めた N を設定する必要がある。

謝辞

本実験の試験体製作において、東京鐵鋼株式会社には高張力ねじふし棒鋼、高周波熱錬株式会社には高強度せん断補強筋を提供して頂きました。また、本実験を行うにあたり名古屋工業大学学部生の宇野芳奈美氏にご協力いただきました。北海道大学の西村康志郎先生には貴重なご助言をいただきました。厚く御礼申し上げます。

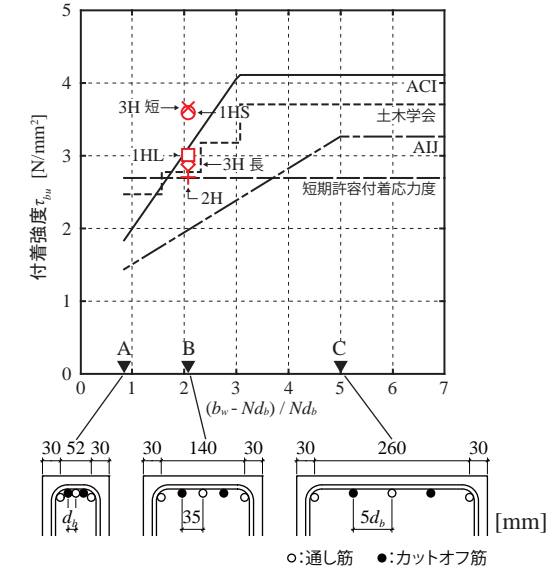
参考文献

- 1) 小倉弘一郎ら：異形鉄筋の付着割裂強度に関する研究、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造系 51、



(a) DdDd+ 間の付着応力度 (b) [3][5] 間の付着応力度

図一 17 通し筋の計算値と実験値の比較



図一 18 カットオフ筋の付着強度と鉄筋間のあきの関係

- pp.1271~1272, 1976.8
- 2) 山田紘ら：せん断スパン内でカットオフされた RC 梁主筋の付着割裂強度、日本建築学会構造系論文集、第 459 号、pp.101~110, 1994.5
- 3) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説、2010
- 4) 高周波熱錬株式会社：鉄筋コンクリート造はり、柱のせん断補強筋として PC 鋼棒ウルボンを使用する工法、設計指針・同解説、2009.11
- 5) 伊藤彩夏ら：2 段目主筋をカットオフした RC 梁の付着割裂強度、日本建築学会構造系論文集、第 690 号、pp.1477-1484, 2013.8
- 6) 川島一彦ら：鉄筋コンクリート橋脚・主鉄筋段落し部の耐震判定法とその適用、土木学会論文集、No.25, I -33, pp.83~95, 1995.10
- 7) American Concrete Institute：Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary, ACI Committee 318, 2011
- 8) 土木学会：コンクリート標準示方書、2008
- 9) 森田司郎ら：鉄筋コンクリート柱はり接合部域におけるはり主筋の付着性状、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.1777~1778, 1977