論文 節形状と加力履歴が鉄筋の付着強度に及ぼす影響

金久保 利之*1·岡崎 仁美*2

要旨:棒鋼から削りだして作製した節間隔および節高さが異なる鉄筋を用いて,単調および繰返し加力によ る引抜き付着実験を行った。実験因子は,鉄筋種別,加力履歴およびコンクリート強度である。途中で加力 を終了し鉄筋周辺コンクリートを観察した結果,節高さ間隔比が小さい鉄筋では,すべり量に応じた節のず れと,それに伴うコンクリートの局所的な凹状の変形が確認できた。単調加力時の曲線に復帰できる復帰限 界すべり量を考慮した累積すべり量と付着応力の関係は,鉄筋種別に依らず単調加力試験体の結果と同様な 傾向を示し,単純引抜き加力の付着応力ーすべり量関係を用いて繰返し荷重下の付着強度を推定できる可能 性がある。

キーワード: 引抜き実験, 節間隔, 単調加力, 繰返し加力, 累積すべり量, 復帰限界すべり量

1. はじめに

異形鉄筋とコンクリートの付着性状に関する研究は現 在までに数多くなされている¹⁾が、繰返し荷重下におけ る付着性状の劣化に着目した研究はあまり多くない。例 えば、森田ら²⁾は、繰返し荷重下の付着応力ーすべり量 関係の履歴モデルを提案しているが、経験すべりの範囲 内での付着劣化は著しいものの、経験すべりを超えて新 しい領域に達すると単調載荷時の関係に復帰すると結ん でいる。鈴木ら³⁾は、多数回繰返しの両引き試験を行い、 森田らと同様に繰返し荷重下の付着応力ーすべり量関係 の履歴モデルを提案しているが、経験すべり以降の付着 性状に関する言及はない。

一方で,逆対象曲げモーメントが作用する梁,柱部材 の主筋や,柱・梁接合部内の通し鉄筋においては,非常 に大きなすべりの領域において正負交番の繰返し荷重が 作用する場合が考えられる。著者らはそのような大変形 領域における異形鉄筋の付着性状に着目し,正負交番繰 返しの引抜き試験を行っている⁴⁾。その結果,ある領域 までは経験すべりを超えても単調載荷時の関係に復帰す るが,その領域を超えると付着応力の低下が顕著に現れ, 節形状によっては鉄筋径の 1/20 程度のすべり領域でも 付着強度が大きく低下することが分かっている。繰返し 荷重下における付着強度の低下を考慮しない場合,設計 で想定する部材耐力や変形能が発揮されないことが危惧 される。

本研究では異形鉄筋の局所的な付着性状に着目し,付 着長が鉄筋径の4倍である引抜き試験体を用いて,正負 交番繰返しの付着試験を行う。対象とする鉄筋は棒鋼か ら削りだし,異形状に加工した鉄筋を用い,異形鉄筋の 節高さや節間隔が付着応カーすべり量関係の履歴性状に 及ぼす影響を検討する。また,コンクリートが十分拘束 された状態での付着性状を検討対象とし,鋼管内にコン クリートを打設した試験体を用いた。実験結果の検討で は、文献 4)で報告した結果もあわせて示し、繰返し加力 履歴と節形状が局所付着強度に及ぼす影響を検討する。

2. 実験概要

2.1 実験に用いた鉄筋

実験に使用した鉄筋の一覧および形状を,表-1 およ び図-1にそれぞれ示す。鉄筋は通常の異形鉄筋 D16を 基準として φ 18mm の棒鋼から削りだして作製し,節高 さおよび節間隔を変動因子とした。節高さ間隔比は,0.05, 0.075,0.25(それぞれ呼称 F050,F075,F250)の3水準 である。F075 試験体の節形状が,JIS G 3112 に規定され る異形棒鋼の寸法に比較的近い。鉄筋の断面積は等価な 単位質量を有する円柱の断面積として算出し,径および 周長は等価円断面の値とした。削りだす前の棒鋼の降伏 強度は 570MPa,弾性係数は 207GPa である。

2.2 試験体

試験体形状を図-2に示す。試験体は外径 216mm,厚 さ 5.8mm の鋼管を用いて作製した。幅は 112mm で,付

表-1 実験に用いた鉄筋

呼称	節高さ (mm)	節間隔 (mm)	節高さ 問隔せ	断面積*	周長* (mm)
F050	1.2	24.0	0.05	201	50.2
F075	1.2	16.0	0.075	201	50.6
F250	2.4	9.6	0.25	194	49.4

*質量等価な円断面としたときの値



*1 筑波大学 システム情報系構造エネルギー工学域准教授 博士(工学)(正会員)

*2 筑波大学 大学院システム情報工学研究科構造エネルギー工学専攻



着区間は基準とした主筋(D16)の径の4倍の64mmとし、両端24mmに付着絶縁区間を設けた。

2.3 加力および計測方法

加力装置を図-3に示す。試験体両端面にテフロンシ ートおよび112mm 径の孔を設けた反力板を設置し,左 右両方にロードセルおよび300kNセンターホールジャッ キをセットした。2つのジャッキを個々に制御すること により,正負交番の引抜き加力を行った。また,あわせ て実施した単調加力の場合には,正側のみの加力を行っ た。

計測項目は、ロードセルによる引抜き荷重および変位 計による試験体側面と鉄筋端部間の相対変位である。加 力方向と反対側に設置した変位計による相対変位を自由 端すべり量とし、自由端すべり量に試験体付着区間の鉄 筋の伸びを加算した変形(付着応力分布は一様と仮定) を荷重端すべり量とした。

主たる実験因子である加力履歴は、単調加力および図 -4に示す C1, C2, C3 の3種類の繰返し加力である。 C1は正負交番漸増繰返し加力で,荷重端すべり量で 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 1.5, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0, 6.0, 7.0, 8.0mm の加力サイクルを各 1 回ずつ,計 13 サイクルの 加力とした。C2 は,正側は C1 と同一の目標すべり量サ イクルで,正側除荷後にすべり量で 0mm まで負側に加 力する履歴とした。C3 は付着応力の値で制御し,定めた 荷重端すべり量(0.1, 0.3, 0.5, 1.0, 2.0mm)に初めて 達したときの付着応力を目標値として,各5サイクルず つ加力を行う履歴とした。単調加力試験体ではコンクリ ート打込み面を反力とした方向に加力し,繰返し加力試 験体ではその方向を正加力とした。

表一2	コンク	リー	トのフ	刀字的]性質

呼称	圧縮強度 (MPa)	割裂強度 (MPa)	弹性係数 (GPa)
C13	13.3	1.48	20.7
C21	20.9	1.97	24.9
C36	37.3	2.58	27.8

C13-F050-C1-20



図-6 試験体名称

2.4 鉄筋周辺コンクリートの観察

単調加力および繰返し加力試験体の半数程度(後述す るコンクリート目標強度13MPaおよび36MPaの試験体) において,途中で加力を終了し試験体を加力装置から取 り外し,内部のコンクリートの状況を観察した。観察方 法は,外部鋼管を切断して取り外した後,図-5に示す ように割裂試験を行って試験体を分断し,鉄筋周辺コン クリートの観察および写真撮影を行った。

2.5 実験因子

本研究における実験因子は、先に述べた鉄筋種別、加 力履歴およびコンクリート強度である。コンクリートの 目標圧縮強度は13,21 および36MPaとした。使用した コンクリートの引抜き試験加力材令時の力学的性質を、 表-2に示す。

試験体名称の例を図-6 に,試験体の一覧を表-3 に 示す。C13 シリーズおよび C36 シリーズ試験体は加力途 中のコンクリート観察用試験体で,同一因子3体におい

	最大荷重時			最大荷重時				
名称	付着応力	すべり量	名称	11 / 7 1	付着応力 (MPa)		すべり量 (mm)	
	(MPa)	(mm)		ツイクル	正	負	正	負
C21-F050-M	24.6*	6.32*	C21-F050-C1	8	23.1	17.2	3.0	3.0
C21-F075-M	25.1*	2.05*	C21-F050-C2	9	22.5	-	4.0	-
C21-F250-M	18.7*	0.58*	C21-F050-C3	20	16.9	15.6	2.0	2.0
C13-F050-M-20	(6.27)	(2.0)	C21-F075-C1	4	16.7	13.6	0.8	0.8
C13-F050-M-40	(8.16)	(4.0)	C21-F075-C2	6	26.2	-	1.5	-
C13-F050-M-80	8.91	5.09	C21-F075-C3	16	19.1	20.4	1.0	1.0
C13-F075-M-08	(7.44)	(0.8)	C21-F250-C1	1	20.0	14.2	0.2	0.2
C13-F075-M-20	8.44	1.42	C21-F250-C2	2	21.4	-	0.4	-
C13-F075-M-40	8.44	1.74	C21-F250-C3	7	13.8	9.8	0.5	0.5
C13-F250-M-04	(6.16)	(0.4)	C13-F050-C1-20	7	(6.73)	(5.58)	(2.0)	(2.0)
C13-F250-M-08	(6.31)	(0.8)	C13-F050-C1-40	8	7.02	5.50	3.0	3.0
C13-F250-M-20	6.05	0.54	C13-F050-C1-80	8	7.81	6.71	3.0	3.0
C36-F050-M-20	(19.62)	(2.0)	C13-F075-C1-08	4	(8.16)	(4.63)	(0.8)	(0.8)
C36-F050-M-40	(24.21)	(4.0)	C13-F075-C1-20	6	7.60	4.88	1.5	1.5
C36-F050-M-80	24.71	5.50	C13-F075-C1-40	6	7.48	5.66	1.5	1.5
C36-F075-M-08	(22.49)	(0.8)	C13-F250-C1-04	2	(7.49)	(5.08)	(0.4)	(0.4)
C36-F075-M-20	24.41	1.62	C13-F250-C1-08	2	7.30	4.77	0.4	0.4
C36-F075-M-40	28.57	1.82	C13-F250-C1-20	2	7.00	5.30	0.4	0.4
C36-F250-M-04	20.30	0.21						
C36-F250-M-08	21.24	0.31						
C36-F250-M-20	20.78	0.27						

表-3 試験体一覧および実験結果

注:()はコンクリート観察用試験体で最大荷重に至る前に加力を終了した試験体 *試験体3体の平均

て、荷重増大域、最大荷重前後および最大荷重後のすべり量で加力を終了し、周辺コンクリートの観察を行った。 また、C13シリーズ試験体の加力履歴は単調 M および繰返し C1 のみ、C36シリーズ試験体の加力履歴は単調 M のみである。C21シリーズ試験体の単調加力は同一因子 で3体ずつ行っている。試験体数は、総計45体である。

3. 実験結果

3.1 鉄筋周辺コンクリートの観察

C13シリーズおよびC36シリーズ試験体の加力途中で



図-7 周辺コンクリートの状況(C13 シリーズ試験体)



図-8 周辺コンクリートの状況(C36 シリーズ試験体)

の周辺コンクリートの状況を,それぞれ図-7 および図 -8 に示す。鉄筋種別 F050 および F075 では,加力目標 すべり量に応じた節のずれと,それに伴うコンクリート の局所的な凹状の変形が確認できる。おおむね,最大荷 重時すべり量までは節頂部のコンクリートの明確な損傷 は見られない。単調加力試験体では,最大荷重以降のす べり量においても同様な状況であるが,Cl3 シリーズ試 験体では節頂部に位置するコンクリートに,軸直交方向 のひび割れの発生が見られる。削り取られたペーストが 節前面で支圧され,再度形状を保持している可能性はあ るが,いわゆる粉体化は明瞭ではなかった。一方,繰返 し加力試験体では,最大荷重以降はコンクリートの節の 形状がかなり崩れていた。

鉄筋種別 F250 では、最大荷重時まで周辺コンクリートの損傷はほぼ確認できず、整った形状を保持している。 最大荷重後は節間コンクリートが削り取られ、コンクリ ート側に残っていない状況であった。

3.2 付着応カーすべり量関係

単調加力試験体の付着応力-すべり量関係を図-9 に 示す。付着応力は、引抜き荷重を、表-1 に示した周長





と付着長(64mm)の積で除した平均付着応力とした。 C13 および C36 シリーズ試験体のコンクリート観察用試 験体の結果もあわせて示している。図中には参考のため, 鉄筋引張応力で 300MPa に対応する付着応力を破線で示 している。コンクリート強度の違いによる付着応力の差 異は明確であるが,最大付着応力時のすべり量に明確な 傾向は見られない。節間隔による付着応力ーすべり量関 係の形状の違いおよび最大付着応力時のすべり量への影 響が顕著である。

C1 繰返し加力試験体の付着応力ーすべり量関係を図 -10 に示す。破線で示した単調加力試験体と比較すると、 あるすべり量(復帰限界すべり量と呼ぶことにする)ま では経験すべり以降に単調加力時の曲線に復帰するが、 そのすべり量を超えると復帰しなくなり、付着応力の低 下が著しくなる。復帰限界すべり量はコンクリート強度 にはあまり関係なく、単調加力試験体と同様に節間隔に 影響されると考えられる。

C21 シリーズ試験体の付着応力ーすべり量関係の包絡

線を図-11 に示す。復帰限界すべり量は加力履歴により 異なり、また、それ以降の付着応力の低下具合も異なっ ている。復帰限界すべり量は、おおむね正負交番の繰返 し回数が多いほど小さくなっている。

4. 累積すべり量による評価

材料の破壊や応答値の損傷程度を評価する指標として 累積値がよく用いられ,累積エネルギーや累積ひずみが 代表的である。3.1節の周辺コンクリートの損傷の観察よ り,繰返し加力試験体においてもすべり量に応じた節の ずれと,それに伴うコンクリートの局所的な凹状の変形 が確認できた。繰返し変形に伴って周辺コンクリートの 損傷が累積され,繰返し付着応力が低下するものと考え られる。

繰返し試験体の各サイクルピーク時のすべり量(絶対 値)の累積値(累積すべり量)とピーク時付着応力の関 係を図-12に示す。鉄筋種別によって曲線の形状は大き く異なるが,同一鉄筋であれば加力履歴にかかわらず同

様な傾向を示し、繰返し加力における付着応力の低下を 累積すべり量で評価できる可能性が示唆される。3.2節の 結果より、復帰限界すべり量以下では単調加力時の曲線 に復帰するため、その影響を考慮する必要がある。累積 すべり量が復帰限界すべり量未満の場合にはそれまでの すべり量を累積せず,また,復帰限界すべり量以上の場 合には復帰限界すべり量を差し引いたすべり量を累積し て、累積すべり量を求めた。復帰限界すべり量は節間隔 と関係があると考えられるので、試行錯誤的に節間隔の 2/3 倍とした。このようにして求めた累積すべり量とピ ーク時付着応力の関係を図-13に示す。同図中には単調 加力試験体の結果もあわせて示してある。復帰限界すべ り量を考慮した累積すべり量と付着応力の関係は、鉄筋 種別に依らず単調加力試験体の結果と同様な傾向を示し ており、単純引抜き加力の付着応力-すべり量関係を用 いて繰返し荷重下の付着強度を推定できる可能性がある。

4. まとめ

- (1) 節高さ間隔比が 0.05, 0.075 の鉄筋では、すべり量 に応じた節のずれと、それに伴うコンクリートの局 所的な凹状の変形が確認できた。節高さ間隔比が 0.25 の鉄筋では節間コンクリートが削り取られて荷 重が低下した。
- (2) 付着応力-すべり量関係の形状および最大付着応 力時のすべり量に対する節間隔の影響が顕著であ

った。

- (3) 繰返し加力において、復帰限界すべり量までは単調 加力時の付着応力ーすべり量関係に復帰するが、そ のすべり量を超えると復帰しなくなり、付着応力の 低下が著しくなる。
- (4) 復帰限界すべり量を考慮した累積すべり量と付着 応力の関係は、鉄筋種別に依らず単調加力試験体の 結果と同様な傾向を示しており、単純引抜き加力の 付着応カーすべり量関係を用いて繰返し荷重下の 付着強度を推定できる可能性がある。

参考文献

- 日本コンクリート工学会:コンクリートと補強材の 付着挙動と付着構成則に関するシンポジウム委員 会報告書・論文集,2011
- 2) 森田司郎,角徹三:繰返し荷重下における鉄筋とコンクリート間の付着特性に関する研究,日本建築学 会論文報告集,第229号,pp.15-24,1975
- 3) 鈴木計夫,大野義照ほか:繰返し荷重下における鉄筋とコンクリートの付着特性,日本建築学会大会学術講演梗概集,pp.527-528,1985
- 岡崎仁美,金久保利之:鉄筋の節形状が繰返し荷重 下の付着性状に及ぼす影響,日本建築学会大会学術 講演梗概集,構造 IV, pp.15-16, 2014