

鉄筋とコンクリートの付着力の低下に及ぼす位置とブリージングの影響

高知工科大学 工学部 社会システム工学科 1090459 高橋正典

鉄筋のコンクリートへの定着は、鉄筋コンクリートが成立するために重要な事柄である。鉄筋軸に対して垂直に打ち込んだものは、水平に打ち込んだものよりも付着力が低いことが既往の研究から明らかにされている。これは、鉄筋がブリージングの影響を受けているからである。しかし、ひび割れ面近傍における付着応力や付着応力に及ぼすブリージングを実験的に求めるのは困難であり、付着力低下は明らかにされていない。そこで本研究では、コンクリート打ち込み方向を変えた実験と配合を変えた実験を行い、ひび割れ面近傍における付着応力分布とブリージングが及ぼす影響を実験的に求めることを目的として行った。

Key Words : 異形鉄筋, 付着応力, すべり, 付着応力-すべり関係, ひび割れ近傍, 付着力低下, ブリージング, ブリージング率

1. はじめに

鉄筋に引張力が働く部材あるいは接合部の変形量は、鉄筋とコンクリート間のすべり特性に支配される。鉄筋が引張力を受けた場合に生じる鉄筋とコンクリートとの間のすべりの大きさは鉄筋の軸方向で変化する。この変化を表現するための基本的な指標として、鉄筋軸に沿った各位置での局所的なすべり量が用いられ、通常はその局所位置における鉄筋とコンクリート間のせん断伝達力である付着応力との関係として表わされる。

鋼材が引張力を受ける場合、ひび割れ面においてはコンクリートに引張応力が生じ得ないために、付着応力は0となる。ひび割れ面近傍では、この境界条件の影響によって付着応力が小さくなる。したがって、構造物の変形やひび割れ幅を検討する場合には、鋼材軸を横切るひび割れ面近傍における付着力の低下を考慮しなければならない。

そして、横方向に配置されている鉄筋は引張力を受け、縦方向に配置されている鉄筋よりも付着応力が小さくなる。この要因として考えられるのがブリージングの影響である。コンクリートが打ち込まれると、材料分離が起こる。それに伴い、コンクリート中の水分が上昇する。この影響によって鉄筋の下側に水が溜まり、乾燥して蒸発するとそこが空隙となる。したがって、構造物の変形などを検討する場合にはブリージングの影響による付着応力の低下を考慮しなければならない。

しかし、横方向に配置された鉄筋のひび割れ面近傍における付着応力の分布および付着力に及ぼすブリー

ジングの影響は明らかにされていない。そこで本実験は、鉄筋の引き抜き試験を行い、横方向に配置された鉄筋の付着応力分布とブリージングの影響を調査することを目的として行った。

2. 現状と問題点

山尾¹⁾らは載荷端に非定着部を設けない引き抜き試験を行い、載荷端から5倍の間隔でひずみを測定し、載荷端から鉄筋径の5倍の位置では付着応力が低下しないことを報告している。これは鉛直に配置された鉄筋で行われた実験であり、水平に配置された鉄筋に関しては明らかにされていない。

ひび割れ面近傍における付着応力分布を実験的に求めるのは困難であり、ひび割れ近傍において付着力が低下することは明らかであるが、その定量的なことは明らかにされていないのが現状である。

3. 実験

3.1 実験条件

実験は、シリーズ1とシリーズ2に分けて行った。シリーズ1は鉄筋コンクリート構造のひび割れ面近傍における異形鉄筋のコンクリートとの付着応力の低下を調べるものであり、シリーズ2ではブリージングが付着応力に及ぼす影響を調査するものである。両シリーズとも載荷端に非定着部を設けずに、引き抜き試験を行った。

実験の要因は、水平に配置された鉄筋の付着力とブリージングの関係である。コンクリートの打ち込みは、

鉄筋軸に対して垂直で、コンクリートの配合は3種類とした。

3.2 材料

(1) 鉄筋

ひずみ分布を詳細に測るためには、ひずみゲージを密に貼る必要がある。しかし、細い鉄筋にひずみゲージを密に貼ると、コーティングやリード線などが付着に影響を及ぼす可能性がある。そこで、シリーズ1ではD38(公称直径 $\phi=38.1\text{mm}$)を用いた。シリーズ2では実験の作業性を考慮した上でゲージを密に貼ることのできるD25(公称直径 $\phi=25.4\text{mm}$)を用いた。

また、ひずみゲージを貼付するに当たって、断面を削らなくてもよいものとするために、JIS G 3112に適合する側面にふしのないネジふし鉄筋を用いた。使用した鉄筋にひずみゲージを貼付した後の様子を図-1に示す。鉄筋の材質はSD345である。



図-1 使用した鉄筋とひずみゲージ

表-1 鉄筋の特性

ヤング係数 (GPa)	降伏点 (MPa)	引張強度 (MPa)
194	405	610

(2) コンクリート

鉄筋とコンクリートとの付着にはコンクリートのブリージングが影響する。シリーズ1の実験では、ブリージングの影響がないようにするために固練りのコンクリートとした。コンクリートの示方配合、スランプ値およびブリージング試験の結果を表-2に示す。シリーズ2ではブリージングの影響がどのようなものかを調査するため、コンクリートの配合を変えて、3種類のブリージング率の配合を使用した。コンクリートの示方配合、スランプ値およびブリージング試験の結果を表-3に示す。なお、両ブリージング試験は、JIS A 1123に準じて行った。

3.3 試験体

(1) 形状寸法

試験体は、角形のコンクリートブロックに鉄筋を埋

め込むものとした。試験体の概略を図-2および図-3に示す。割裂ひび割れの発生や割裂破壊をさせないようにするために、コンクリートブロックの断面は十分に大きいものとした。

定着長に関して、土木学会コンクリート標準示方書²⁾による定着長の設計値は式(1)のように 22.5ϕ (ϕ は鉄筋直径)となるため、ブロックの高さは、両シリーズとも900mmとして、定着長を 23.6ϕ だけ取った。

$$l = \alpha \frac{f_y}{4f_{bo}} \phi = 0.6 \frac{405}{4 \times 0.28 \times 30^{2/3}} \phi = 22.5 \phi \quad (1)$$

ブロックの幅と奥行きは、シリーズ1の縦打ち試験体で850mmと500mm、横打ち試験体で1000mmと900mmとした。横打ち試験体におけるコンクリート打設時の鉄筋の位置は底から500mmである。

シリーズ2では3体とも500mmの正方形とした。打ち込み方向は横打ちで鉄筋の位置は底から250mmである。

鉄筋定着端(自由端)のすべりを測定するために、鉄筋端部をコンクリートブロック表面に露出させた。

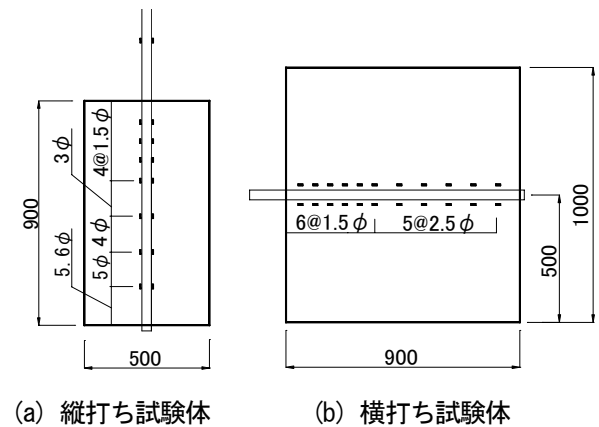


図-2 シリーズ1試験体寸法およびひずみゲージ貼付位置

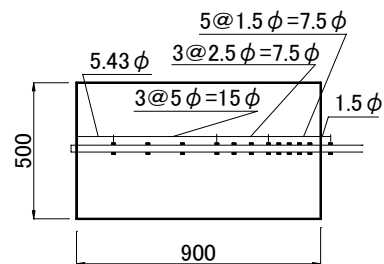


図-3 シリーズ2試験体寸法およびひずみゲージ貼付位置

(2) ひずみゲージの貼付

鉄筋軸に沿ったひずみ分布を測るために、鉄筋にひずみゲージを貼り付けた。ひずみゲージの貼付位置を図-2および図-3に示す。シリーズ1のひずみゲージは、荷重端から鉄筋直径の9倍(9φ)までは、1.5φ間隔(57.2mm)で6か所に貼付した。ただし、縦打ち試験体では7.5φの位置には貼付せず、荷重側の非定着部に貼付した。荷重端から9φ以降は、縦打ち試験体では2か所、横打ち試験体では5か所にひずみゲージを貼付した。

シリーズ2では荷重端から鉄筋の7.5倍(7.5φ)までは、1.5φ間隔(38.1mm)で5か所に貼付した。荷重端から7.5φ以降は2.5φ間隔で3か所、5φ間隔で3か所ずつひずみゲージを貼付した。ゲージを貼り付ける際、ふしのない部分を紙やすりを用いて研磨し、ゲージを瞬間接着剤で貼り付けた。ゲージを貼り付けた後、リード線を細い針金で鉄筋に固定し、上からブチルゴム系テープでコーティングした。

3.4 荷重

荷重側のコンクリート面を拘束しないようにするために、図-4に示すように、コンクリートブロック上面の両端部に荷重板として鉄板を置き、その上に直角方向に鉄筋を挟むように荷重梁としてH鋼を設置した。シリーズ1では、鉄筋から荷重板までの距離は、325mm(約8.5φ)である。シリーズ2では鉄筋から荷重板までの距離は、150mm(約5.9φ)である。試験体から出しておいた鉄筋に中空型ジャッキを通し、ロードセルを設置し、鉄板とロックナットを使って固定した。一方向(引張のみ)の荷重とし、荷重荷重、ひずみおよび自由端すべりを測定した。

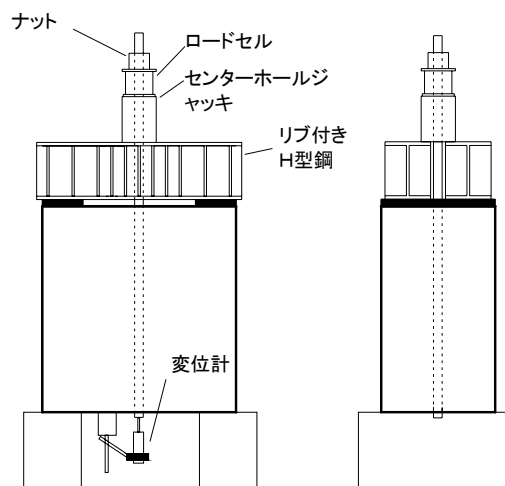


図-4 荷重方法

4. 考察

4.1 シリーズ1

(1) 各試験体の付着応力分布

各試験体の付着応力分布を図-5および図-6に示す。付着応力は、ひずみの測定位置において、近接3点のひずみを通る2次放物線を求め、その傾きから式(2)を用いて計算した³⁾。

$$\tau = \frac{ED d\varepsilon}{4 dx} \quad (2)$$

ここで、 τ : 付着応力 (N/mm²)

E : 鉄筋のヤング係数 (N/mm²)

D : 鉄筋の直径 (mm)

$d\varepsilon/dx$: ひずみ分布の傾き (1/mm)

表-2 コンクリートの配合とブリージング試験結果および圧縮強度

打ち込み方向	試験時の圧縮強度 (MPa)	スランプ (cm)	ブリージング率 (%)	水セメント比 (%)	単位量 (kg/m ³)				
					水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	減水剤 SP
縦打ち	32.4	6.5	0.6	55.0	156	306	820	1062	3.06
横打ち	30.0	6.5	0.6	55.0	156	306	820	1062	3.06

表-3 コンクリートの配合とブリージング試験結果および圧縮強度

試験体名	試験時の圧縮強度 (MPa)	スランプ (cm)	ブリージング率 (%)	水セメント比 (%)	単位量 (kg/m ³)					
					水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	減水剤 SP	増粘剤 VA
No.1	31.6	56×60	0	51.0	247	450	568	810	2.09	2.47
No.2	35.4	14	5.51	55.0	171	311	639	1054	0	0.51
No.3	34.1	22	11.48	55.0	171	311	639	1054	3.11	0

付着応力は、各荷重において、載荷端から最も離れている場所から載荷端に向けて大きくなっている。しかし、載荷側のコンクリート端部では、すべりが大きくなるにも関わらず、付着応力が小さくなっている。付着応力が低下し始める位置は、荷重が大きくなるほど深くなり、降伏直前の荷重では、載荷端から約 4.5ϕ の位置である。

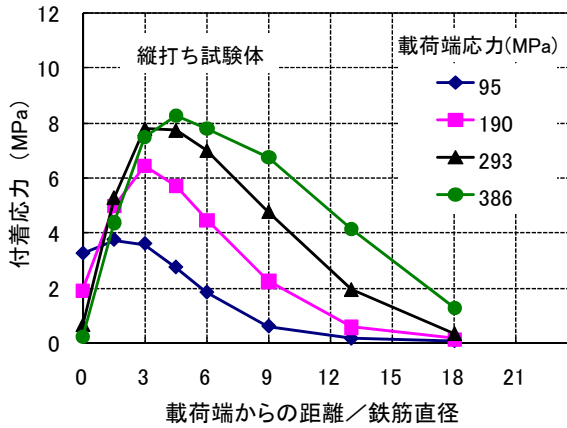


図-5 縦打ち試験体の付着応力分布

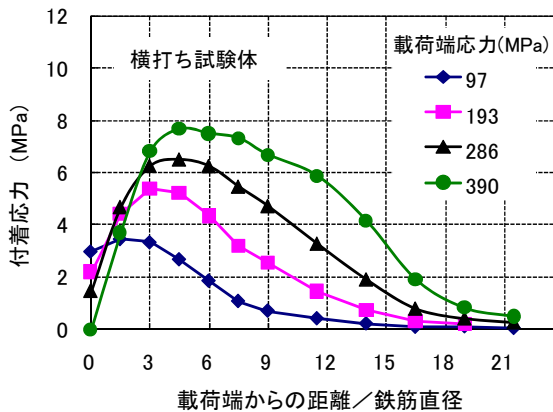


図-6 横打ち試験体の付着応力分布

(2) 付着応力-すべり関係

試験体のひずみゲージ貼付位置における局所付着応力-局所すべり関係を図-7および図-8に示す。載荷端および載荷端から 1.5ϕ の位置では、両試験体ともに、付着応力が深い位置のものよりも小さくなっている。縦打ち試験体では、載荷端から 3ϕ 以上の位置の付着応力はほぼ同じ値となっており、横打ち試験体では、載荷端から 4.5ϕ 以上の位置の付着応力がほぼ同じ値となっている。このことから、付着応力が低下する範囲は、載荷端から 3.0ϕ あるいは 4.5ϕ であることが分かる。

また、載荷端から 1.5ϕ の位置における付着応力はすべりが大きくなった時にもほぼ一定の値を示して

いるが、載荷端における付着応力はすべりが大きくなるとともに小さくなっている。

なお、図中に実線で示す曲線は、式(3)で表わされる付着応力-すべり関係式⁴⁾であり、載荷端から 4.5ϕ 以上深い位置の実験結果とほぼ一致している。

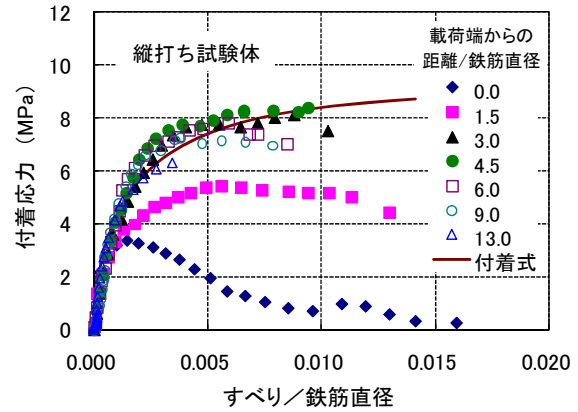


図-7 縦打ち試験体の付着応力-すべり関係

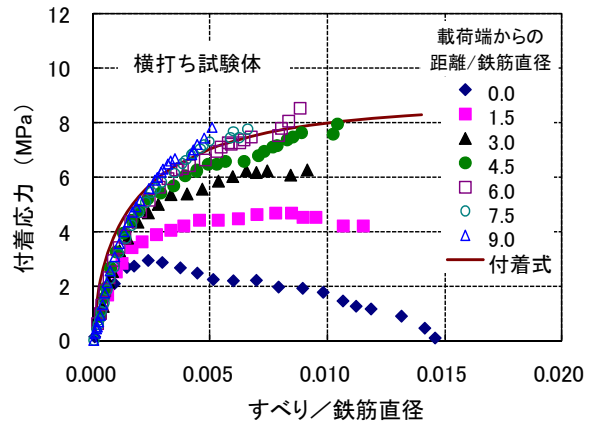


図-8 横打ち試験体の付着応力-すべり関係

$$\tau = 0.9f_c'^{2/3} \left(1 - e^{-40(S/\phi)^{0.6}} \right) \quad (3)$$

ここで、 τ : 各点における局所付着応力 (MPa)

f_c' : コンクリートの圧縮強度 (MPa)

S : 鉄筋とコンクリートの相対変位 (mm)

ϕ : 鉄筋の直径 (mm)

である。

(3) モデル化

今回の実験では、ひび割れ近傍での付着応力をモデル化することを提案する。載荷端近傍の付着応力分布を詳細に見たものを図-9、図-10に示す。縦軸は、コンクリート強度の違いを正規化するために、付着応力をコンクリート圧縮強度の $2/3$ 乗で除したものと

している⁵⁾。図中の実斜線は、荷端から 1.5ϕ の位置の付着応力と原点を結ぶ直線を延長したものである。実験値としては荷端から 1.5ϕ までの範囲で付着応力が大きくなっているが、モデル化は「付着応力はこの斜線よりも大きくなならない」とするものである。この斜線は、式(4)で表わされる。

$$\tau = 0.3 \frac{x}{\phi} f_c^{2/3} \quad (4)$$

ここで、 τ : 付着応力 (MPa)
 x : ひび割れ面からの距離 (mm)
 ϕ : 鉄筋の直径 (mm)
 f_c : コンクリートの圧縮強度 (MPa)
 である。

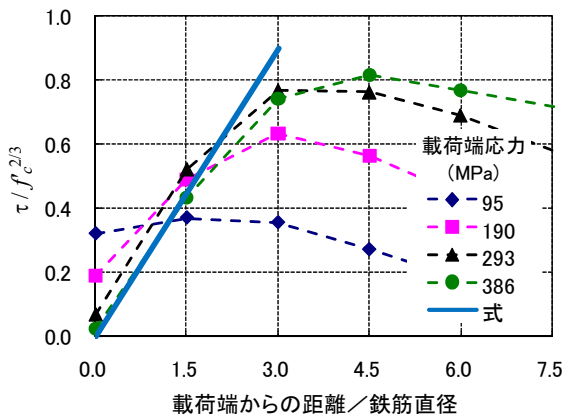


図-9 縦打ち試験体の荷端近傍の付着応力分布

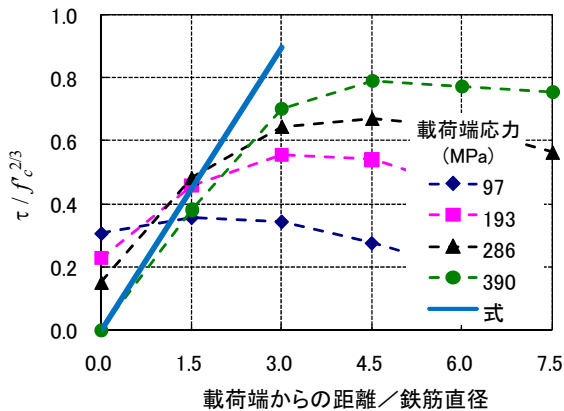


図-10 横打ち試験体の荷端近傍の付着応力分布

4.2 シリーズ2

(1) 付着応力-すべり関係

各試験体のひずみゲージ貼付位置における局所付着応力-局所すべり関係を図-11、図-12、図-13に示す。試験体 No. 1 に比べて No. 2 および No. 3 の試験体は全体的に付着応力が小さいにもかかわらず、すべ

ていることが分かる。荷端の付着応力-すべり関係は各試験体とも深い位置よりも小さくなっている。 1.5ϕ 以降の位置では全体的に付着応力が小さくなっているにも関わらず、すべりが大きくなっている。このことから、ブリージングが影響すると荷重が作用したときに鉄筋がすべりやすくなるということが分かる。

なお、図-11 の図中に実線で示す曲線は、式(3)の 0.9 という係数をこの実験値に合わせて修正したものである。このときの係数は 1.1 である。

図-12 及び図-13 中の破線で示す曲線は No. 2 および No. 3 の実験値に合うように係数を変更したものである。このときの係数は 0.55 である。試験体 No. 1 では付着応力が式よりも強くなっているが No. 2 および No. 3 においてはこの式よりも小さい、試験体 No. 1 の値の約半分となっている。このことから、ブリージングが影響すると付着応力は大幅に低下する。

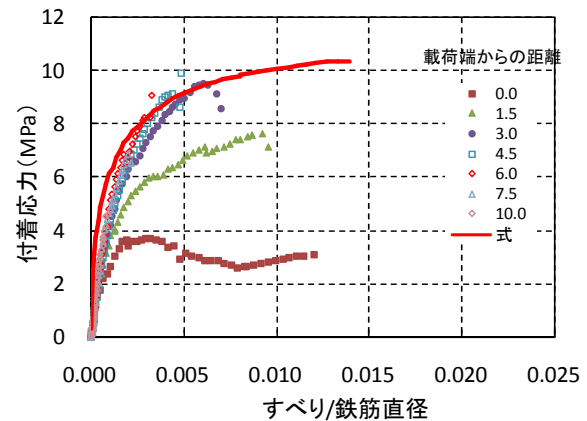


図-11 試験体 No. 1 の付着応力-すべり関係

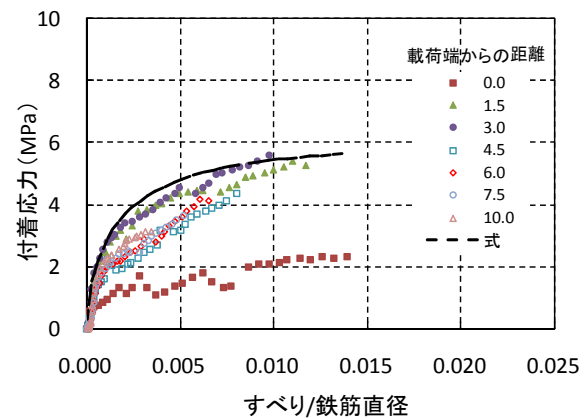


図-12 試験体 No. 2 の付着応力-すべり関係

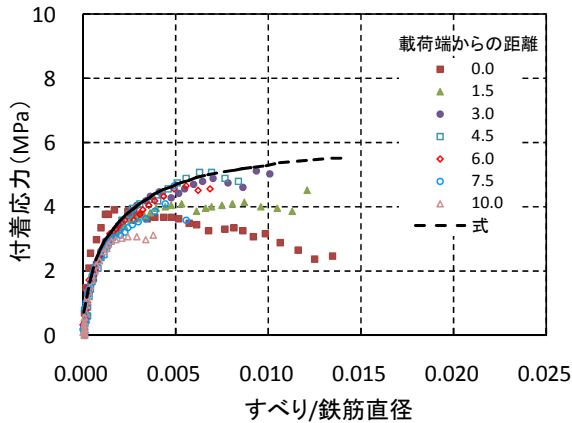


図-13 試験体 No. 3 の付着応力-すべり関係

4.3 式の適応化

各試験体における付着式の係数 α の変化を図-14 に示す。係数 α を縦軸、ブリージング率が横軸である。試験体 No. 1 ではブリージング率が 0% で係数が 1.1, 試験体 No. 2 は 5.51%, No. 3 は 11.48% で両試験体とも係数は 0.55 である。式(5)の係数 α を変化させることによりブリージングの影響を受けたものに対応できる。

$$\tau = \alpha f_c^{2/3} \left(1 - e^{-40(S/\phi)^{0.6}} \right) \quad (5)$$

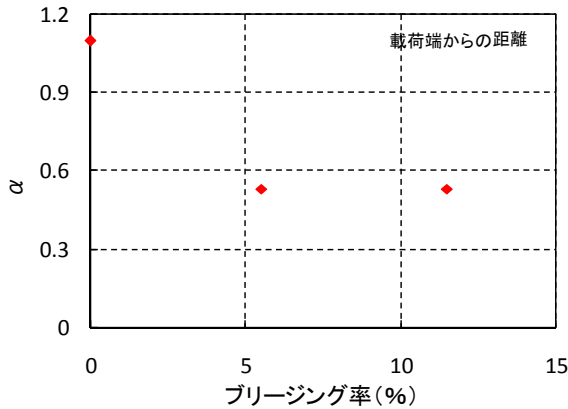


図-14 ブリージング率による付着応力低下

5. 結論

本研究の結果から以下の結論を得た。

5.1 シリーズ1の結論

- (1) 荷端近傍では、すべりが大きくなるにもかかわらず、付着応力が小さくなる。
- (2) 付着応力が低下する範囲は、荷端から鉄筋径の3倍程度までである。
- (3) ひび割れ近傍における付着応力は、式(4)を超えないとするモデルを提案し、その妥当性を検証した。

5.2 シリーズ2の結論

- (1) 鉄筋がブリージングの影響を受けると、付着応力は半分以下まで低下する。
- (2) 付着応力-すべり関係は、式(5)の α 値を変化させることで表わせることができる。

謝辞

供試体の作製や実験の実施にあたっては、高知工科大学 COE 職員の宮地日出夫氏をはじめ、コンクリート研究室の皆さんに協力して頂きました。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 山尾 芳秀, 周 礼良, 二羽淳一郎: 付着応力-すべり関係に関する実験的研究, 土木学会論文報告集, No. 343, pp. 219-228, 1984. 3
- 2) 2002 年制定コンクリート標準示方書[構造性能照査編], 土木学会, 2002. 3
- 3) 島 弘, 周 礼良, 岡村 甫: マッシブなコンクリートに埋め込まれた異形鉄筋の付着応力-すべり-ひずみ関係, 土木学会論文集, No. 378/V-6, pp. 165-174, 1987. 2
- 4) Shima H., Chou L. L. and Okamura H.: Micro and Macro Models for Bond in Reinforced Concrete, Journal of the Faculty of Engineering, The University of Tokyo (B), Vol. 39, No. 2, pp. 133-194, 1987