

鉄筋と高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの付着応力-すべり関係

Bond Stress-Slip between Steel Bar and Concrete Using Blast Furnace Slag

北海道大学工学部土木工学科 ○学生員 田村祐樹(Yuki Tamura)
北海道大学大学院工学研究科 正会員 出雲健司(Kenji Izumo)

表-1 コンクリートの配合条件

記号	W/C (%)	単位重量 (kg/m ³)					Sp(%)
		W	C	FAorBS	S	G	
C25	25	170	680	0	651	980	1.2
C25 - BS - 30			476	188			0.8
C25 - BS - 60			272	377			0.6

1. はじめに
これまで鉄筋とコンクリートの付着に関して様々な条件下で数多くの研究が行われその中から鉄筋とコンクリートの付着の予測式が提案されており、付着挙動の解明が試みられている。しかし鉄筋と高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの付着に関してのデータが少ない。以上の事柄を鉄筋とコンクリートの付着挙動を鉄筋コンクリート供試体を用いた片側引き抜き試験を行うことで実験的に把握することを目指す。

2. 実験概要
セメントには普通ポルトランドセメント(比重3.16)、高炉スラグ微粉末(密度 2.91g/cm³、比表面積 6010cm²/g)、細骨材には鶴川産の海砂(粗粒率 2.87、比重 2.70、吸水率 1.43%)、粗骨材には最大骨材寸法 20mm の玉砂利(比重 2.77、表面乾燥湿潤状態)、混和剤にはポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤を用いた。コンクリートの配合は水セメント比 25%を基準に容積置換率を30%、60%とした。この 3 種類を以下 C25、C25-BS-30 C25-BS-60 と呼ぶこととする。コンクリートの配合条件を表-1 に、物性値を表-2 に示す。
本研究で用いた鉄筋は D16(公称径 15.9mm)であり、鉄筋引張試験を行なった結果、降伏点引張応力 360.0(N/mm²)、最大引張応力 393.8(N/mm²)、ヤング係数 165(GPa)であった。

表-2 コンクリートの物性値

	材齢	1 日	3 日	7 日	28 日
圧縮強度	C25	36.2	60.70	73.6	83.5
	C25-BS6-30	27.8	50.4	69.1	83.0
	C25-BS6-60	14.7	35.7	51.4	72.0
ヤング係数	C25	27041	31500	39059	40900
	C25-BS6-30	23145	28486	36122	41914
	C25-BS6-60	18951	29319	34318	38264

2.2 試験供試体
本研究で用いる試験供試体の寸法は 100×100×400(mm)とし、鉄筋を垂直に配置した型枠内にコンクリートを打設することによって製作した。(図-1 参照)
載荷する荷重の反力によって試験供試体上部が圧縮応力場になることによる影響を避けるため、鉄筋に非定着区間を設けた。非定着区間では鉄筋にデフロンシートを 3 重に巻きつけることで鉄筋とコンクリートの付着を絶った。既往の研究²⁾を参考に非定着長および定着長はそれぞれ 10D、15D(D は鉄筋径)とした。
養生は打設後から試験直前までの間、20℃の恒温室内で封緘養生を行なった。
鉄筋のひずみゲージ貼付け位置は、図-1 のように定着区間3箇所(載荷端に近いほうからSG1、SG2、SG3)と、試験中に鉄筋が降伏したか否かの状態を確認するために非定着区間に1箇所(SG0)とした。
また、片引き試験用供試体を製作するときと同じバッチから圧縮試験用円柱供試体を製作した。

2.3 試験方法
本研究における片引き試験では、図-2 のように台座に試験供試体を設置し、その上に球座、センターホールジャッキ(20tf、ストローク 100mm)、ロードセル(20tf)の順に設置し、最後にチャックで鉄筋のリブを噛み合わせることで固定した。
センターホールジャッキを用いて鉄筋へ引張力を載荷した。鉄筋コンクリートに発生する温度応力によって鉄筋は降伏しないことから、鉄筋が降伏するまでを本研究の実験範囲とし、ひずみを測定した。また、変位計を用いて試験供試体最下部(自由端)における鉄筋の変位を測定した。本実験では変位が発生した場合を考察から除外した。

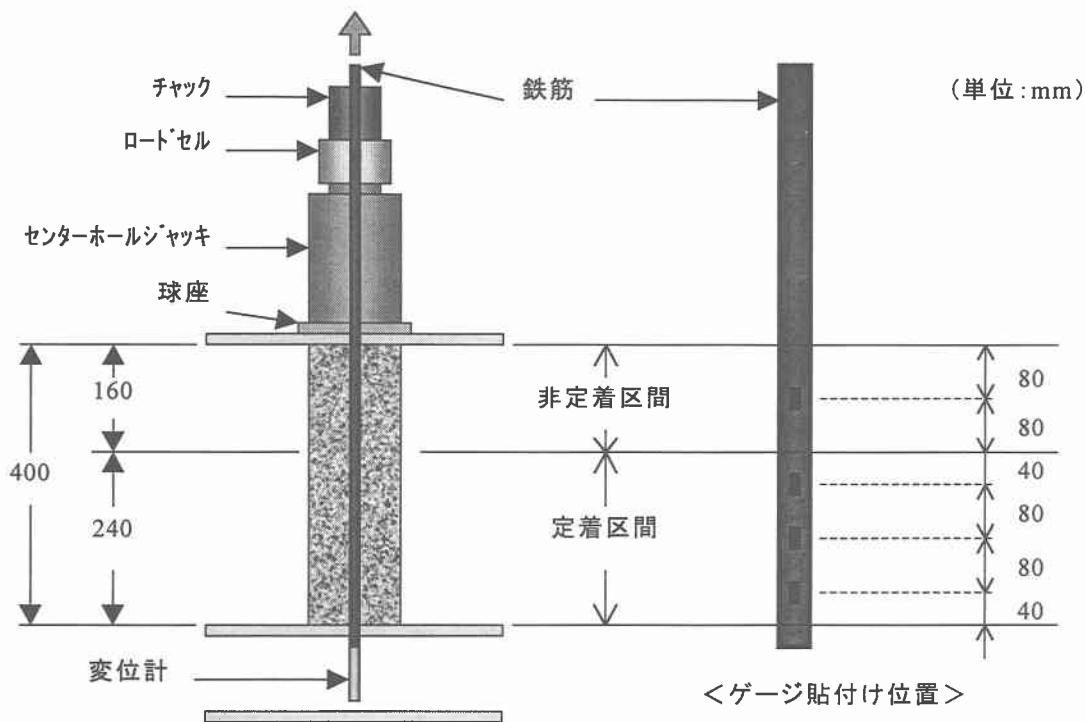


図1 試験装置、試験供試体

3. 付着応力-すべり関係の補正

3.1 ひずみ分布の考察

ひずみ分布は横軸に鉄筋に沿った位置 (mm)、縦軸にひずみの値 ($\times 10^{-6}$) をとったものであり、それぞれの荷重における鉄筋のひずみがどのように分布しているのかを示すものである。図2に示すものはC25材齢3日のある荷重ごとのひずみゲージの値を直線で結んだひずみ分布である。図3は図2の概略図である。

図3から鉄筋の引張荷重の増加に伴ってひずみが発生している区間が供試体下端に向かっており応力伝達区間が増加していることがわかる。

図3に示すように応力伝達区間は(1)から(2)まで増加する。(2)に達したときから供試体上部の付着は破壊され応力伝達区間はその区間を保ったまま最大の荷重を保持しながら(3)のようにシフトしていく。最大に達しシフトする応力伝達区間を有効付着区間とする。

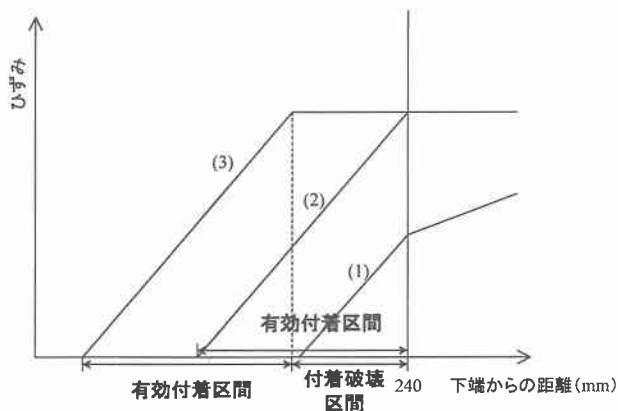


図3 ひずみ分布の略図

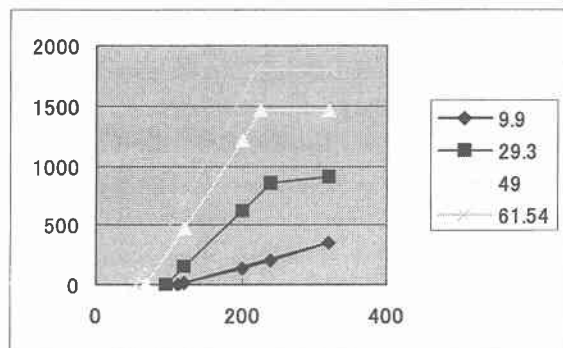


図2 ひずみ分布

3.2 すべり量 s について

すべり量は既往の研究と同様にひずみ分布を積分した値に鉄筋の変位量を加えて計算される。しかし定着区間全体を積分すると有効付着区間より下の部分および付着破壊区間におけるすべり量を過大に評価してしまうことになるので本実験においては定着区間全体ではなく応力伝達区間のみを範囲として計算する。

ただし付着応力-すべり関係に用いたのはすべり量を鉄筋径で無次元化した無次元化すべり s_{ef} である。無次元化すべりの式を以下に示す。

$$S_{ef} = S_0 + \int_a^b \epsilon dx \quad s_{ef} = S_{ef}/D$$

a, b : 応力伝達区間の下端、上端

ϵ : 鉄筋ひずみ S_0 : 鉄筋下端の変位

3.3 付着応力 τ について

既往の研究においては定着区間の隣り合う3点を二次放物線で結ぶことによってひずみ分布曲線を描き、そのひずみ分布曲線を延長し、定着区間最上部での値を定着区間最上部のひずみとし、この地点での曲線の傾きを付着応力 τ としている。この τ を式で表すと以下のようになる。

$$\tau = \frac{E_s D}{4} \cdot \frac{d\varepsilon}{dx} \quad (1)$$

E_s : 鉄筋のヤング係数 D : 鉄筋径 ε : 鉄筋ひずみ

鉄筋とコンクリートの界面のひずみは鉄筋のひずみと異なるため上で求めた付着応力の式は実際には付着応力を示してはいない。

鉄筋の引張応力を引張荷重 P 、応力伝達区間を L として力のつりあいを考え、荷重を応力伝達区間の側面積（応力伝達区間×鉄筋の周りの長さ）で割ったものを平均付着応力 τ_{ave} とする。以下にその式を示した

$$\tau_{ave} = \frac{P}{CL} \quad (2)$$

P : 引張荷重 C : 周の長さ

本研究ではここで定義した平均付着応力 τ_{ave} を付着応力 τ にかわって付着応力-すべり関係に用いることにする。

4. 平均付着応力-すべり (τ_{ave} - s_{ef}) 関係の考察

4.1 材齢による平均付着応力-すべり関係の変化

材齢の進行による付着応力-すべり関係の挙動の変化について検討した。材齢による平均付着応力-すべり関係の変化をC25、C25-B S6-30、C25-B S6-60をごとにまとめたものを図4、図5、図6に示す。

C25 においては図4に示されるようにすべての配合の τ_{ave} - s_{ef} 関係にほとんど変化が見られない。

C25-B S6-30 においては図5に示されるように、材齢3日以降の τ_{ave} - s_{ef} 関係にほとんど変化が見られない。しかし材齢1日の τ_{ave} - s_{ef} 関係は材齢3日以降の τ_{ave} - s_{ef} 関係に比べて同一平均付着応力に対してすべり量は大きいものとなった。

C25-B S6-60 においては図6に示されるようにそれぞれの材齢において異なった挙動を示した。材齢が進むごとに同一平均付着応力に対してのすべり量が小さくなった。

図5、6から示されるように材齢1日と28日を比較した場合、高炉スラグ微粉末の置換率が大きいほど同一平均付着応力に対してのすべり量が大きい。また、材齢3日と28日を比較した場合、高炉スラグ微粉末で置換した供試体においても同一平均付着応力に対してのすべり量の差が少なくなる。このことから高炉スラグ微粉末を鉄筋コンクリート構造物に用いる際に十分な付着強度を得ようとするならば3日は養生期間を要すると考えられる。

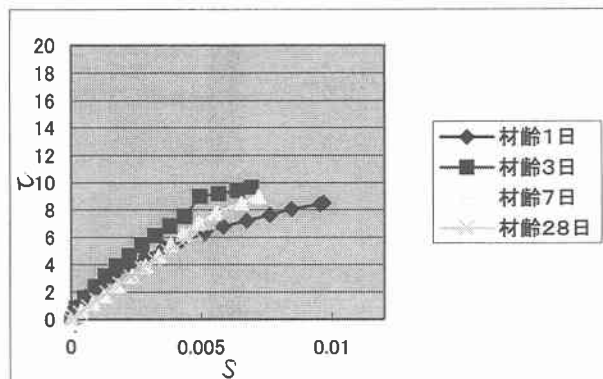


図4 C25 における平均付着応力-すべり関係

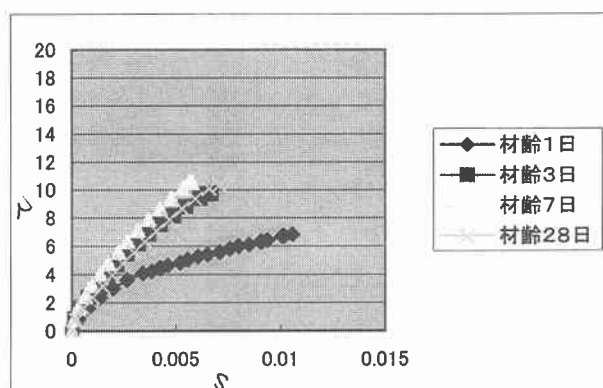


図5 C25-B S6-30 における平均付着応力-すべり関係

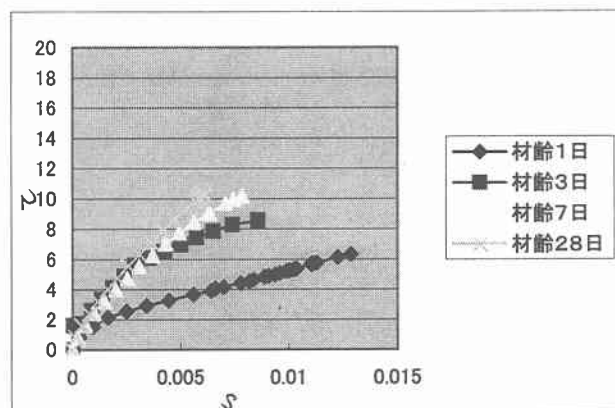


図6 C25-B S6-60 における平均付着応力-すべり関係

4.2 同一材齢による付着応力-すべり関係の比較

混和材の置換率による付着応力-すべり関係の変化をそれぞれの材齢ごとにまとめたものを図7、図8、図9、図10に示す。

材齢1日においては一貫して高炉スラグ微粉末の置換率が大きいほうが同一平均付着応力に対してのすべり量が大きいことがわかる。C25 と C25-B S6-60 のその差は大きく常に2倍以上で推移している。

材齢3日においてC25とC25-B S6-30はほぼ同様の挙動を示すがC25-B S6-60は異なった挙動を示し、最終的には

C25 と C25-BS6-30 に比べて同一平均付着応力に対してのすべり量が大きいたことがわかる。

材齡 7 日においては C25、C25-BS6-60 の $\tau_{ave}-s_{ef}$ 関係はほとんど同じになり、C25-BS6-30 の $\tau_{ave}-s_{ef}$ 関係が C25、C25-BS6-60 に比べて同一平均付着応力に対してのすべり量が小さいことがわかる。

材齡 28 日においては C25 より C25-BS6-30、C25-BS6-60 の同一平均付着応力に対してのすべり量が小さく以上のことから特に、C25-BS6-60 が最も小さくなっていることから高炉スラグ微粉末を用いた鉄筋コンクリートの同一平均付着応力に対するすべり量は若材齡時えは C25 より大きいが材齡が進むほど小さくなるといえ。

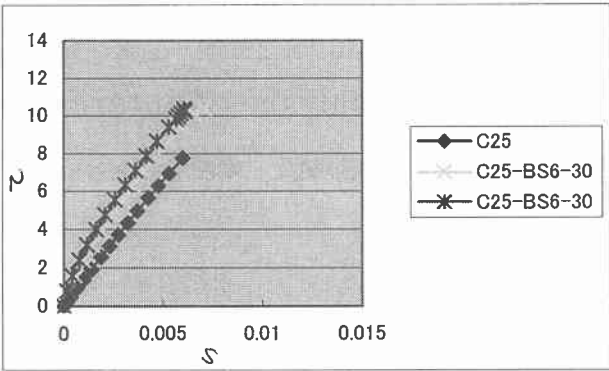


図 10 材齡 28 日における平均付着応力ーすべり関係

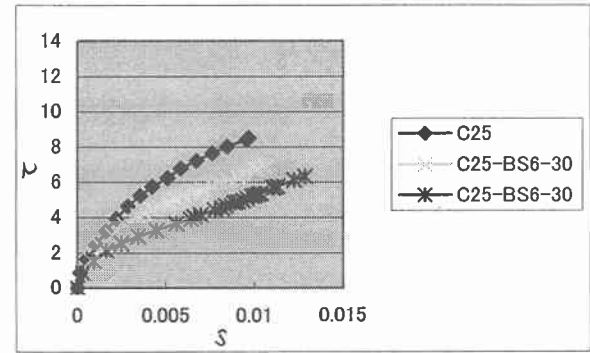


図 7 材齡 1 日における平均付着応力ーすべり関係

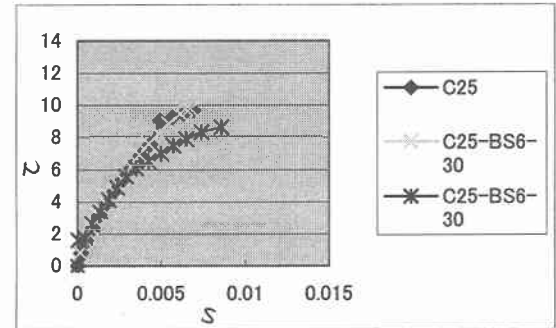


図 8 材齡 3 日における平均付着応力ーすべり関係

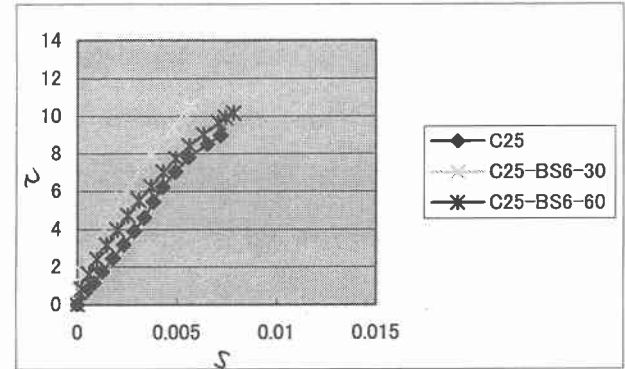


図 9 材齡 7 日における平均付着応力ーすべり関係

5. まとめ

- (1) 荷重が最大に達したときに応力伝達区間は最大になり、最大の荷重を保持しながら応力伝達区間は同じ区間でシフトすることが確認された。
- (2) 高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの付着性能を十分得るために 3 日以上の養生期間が必要である。
- (3) 材齡 28 日では高炉スラグ微粉末の置換率が大きいほど同一平均付着応力に対するすべり量は小さくなる。

参考文献

- 1) 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ーすべりーひずみ関係、土木学会論文集、No.378/V-6、pp.165-174、1987
- 2) 鶴谷建太：若材齡時における鉄筋とコンクリートの付着応力ーすべり挙動、北海道大学卒業論文、2001