論文　高強度膨張コンクリートと異形鉄筋の局部付着特性

浜梶　方希[*1]・三村　陽一[*2]・石田　邦洋[*3]・吉武　勇[*4]

要旨：鉄筋の内的拘束により導入される膨張コンクリートの圧縮応力は，両者間の付着を介して行われる。この付着特性の基礎データを得るため，本研究では，両引き付着応力実験を通じて高強度膨張コンクリートと異形鉄筋の局部付着応力ーすべり関係を求めた。その結果，高強度膨張コンクリートと異形鉄筋の $\tau/f'c^{2/3}-S/D$ 関係は，定着端面からの位置によらず概ね同一の曲線状を呈すが，呼び強度 24(N/mm^2)のコンクリートと異形鉄筋の $\tau/f'c^{2/3}-S/D$ 関係と相関性がみられないことを示した。

キーワード：高強度コンクリート，膨張材，鉄筋ひずみ，局部付着応力，すべり

1. はじめに

近年，コンクリート構造物の大型化・高耐久化に伴い，コンクリートの高強度化が進んでいる。しかしながら，高強度コンクリートは水セメント比が小さくなることから，水和反応による自己収縮が大きくなる傾向にある。ここで，このような収縮補償用として，しばしば膨張材を添加したコンクリート(膨張コンクリート)が用いられる。さらに膨張コンクリートでは，体積膨張を鋼材等で適切に拘束することによって，コンクリートに圧縮応力(ケミカルプレストレス)を導入することができ，鉄筋コンクリート部材の品質・ひび割れ抵抗性の向上が見込まれる。

コンクリートの体積変化過程や，ケミカルプレストレスの導入過程では，コンクリートとそこに内在する鉄筋との付着を介して相互に応力の伝達がなされている。すなわち，膨張材を添加した鉄筋コンクリート部材におけるケミカルプレストレス作用は，若材齢期から体積変化する膨張コンクリートとそこに内在する鉄筋の付着に強く依存する。そのため，既往の研究[1)]において，両者間の付着特性に着目した検討もなされてきたが，高強度コンクリートに膨張材を用いた際の付着特性については，充分な検討はほとんど行われていない。この付着特性を把握することは，高強度膨張コンクリートの性能を充分に活用するための有効な資料になると考えられる。また，コンクリートと鉄筋の付着特性は，ひび割れ幅の予測や終局変形量など，鉄筋コンクリート構造の挙動を推定するうえで重要な要素でもある。

そこで本研究では，高強度膨張コンクリートを対象に，ケミカルプレストレス作用の程度や，その作用領域を定量化するため，材齢 12 時間(0.5 日)から，材齢 7 日までのコンクリートおよび鉄筋のひずみ計測を行った。その後，両引き付着応力実験を行い，局部付着応力ーすべり関係を求め，高強度膨張コンクリートとそこに内在する異形鉄筋の付着特性の検討を行った。また，既往の研究[2)]で報告した，呼び強度 24(N/mm^2)のコンクリート(以下，「普通コンクリート」)と異型鉄筋の若材齢期における局部付着応力ーすべり関係との比較検討を行った。

2. 実験・評価方法

2.1 配合条件および使用材料

本研究の配合条件および使用材料を**表－1**に示す。本研究では，膨張コンクリートを用いた既往の研究[3)]と対比するため，早強ポルトランドセメントを使用し，膨張材には標準添加量 20kg/m^3 の石灰系低添加型膨張材(密度 3.14g/cm^3)を用いた。本研究で作製したコンクリートは水粉体比 W/P=30%の比較的高強度なコンクリートである。**表－1**に示すように水粉体比 W/P=30%，粉体量 P(Ex+C)=520kg/m^3 の一定とし，膨張材を添加しないコンクリート(配合記号 Ex0)および膨張材添加量を 20kg/m^3(同 Ex20)，40kg/m^3(同 Ex40)とした 3 種類のコンクリートを作製した。

2.2 実験供試体

本研究で用いた実験供試体を**図－1**に示す。コンクリートの断面は 100×100mm の矩形状とし，実験供試体の断面中央には，横ふし型異形鉄筋 D13(SD295A)を，両端から 100mm ずつ張り出して埋設した。コンクリートの長さは 1560mm であり，実験供試体の中央から片側 650mm ずつ(計 1300mm)の定着長を設けた。この片側 650mm ずつの定着長は，鉄筋径 D の 50 倍(50D)に相当する。

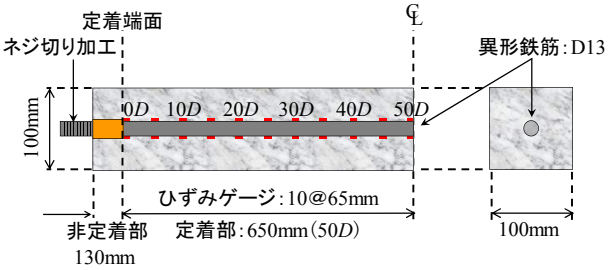
コンクリートにより付着拘束を受ける鉄筋のひずみ(以下，鉄筋ひずみ)を計測するため，**図－1**に示すように，実験供試体中央より片側部に，検長 3mm のひずみゲージを 65mm(5D)の等間隔で貼り付けた。なお本研究

*1 山口大学大学院　理工学研究科社会建設工学専攻　(正会員)
*2 山口大学大学院　理工学研究科 助教　博(工)　(正会員)
*3 (株) ピーエス三菱　西日本支社　博(工)　(正会員)
*4 山口大学大学院　理工学研究科 准教授　博(工)　(正会員)

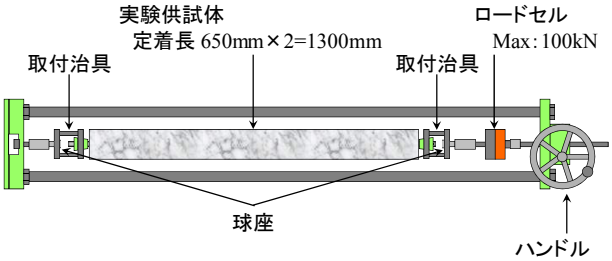
表－１　配合条件および使用材料

コンクリート	W/P (%)		30		
	W/C (%)		30	31	32
	圧縮強度 (N/mm^2) ※1		50.3	51.5	44.6
	割裂引張強度 (N/mm^2) ※1		4.97	3.39	2.64
	ヤング係数 (kN/mm^2) ※1		44.3	40.3	38.8
	単位量 (kg/m^3)	膨張材 Ex	石灰系膨張材	0	20	40
		セメント C	早強ポルトランドセメント	520	500	480
		水 W	水道水	156		
		細骨材 S	海　砂	737		
		粗骨材 G	砕　石	945		
鉄筋※2	呼　び　名			D13		
	規　　格			SD295A		
	ヤング係数 E_s			191 kN/mm^2 ※3		

※1 材齢 7 日　※2 一般市販品　※3 実測値



図－１　実験供試体および鉄筋ひずみ計測位置



図－２　一軸引張載荷装置

表－２　実験供試体および実験因子

供試体名　称	材齢		
	0～7 日(養生期間)		7 日(養生後)
Ex0	鉄筋ひずみ※	コンクリートひずみ※※	両引き付着応力実験※
Ex20			
Ex40			

※100×100×1560mm　※※100×100×400mm

では，ひずみゲージを各計測位置における鉄筋の縦リブ両面に貼り付け，荷重の偏心による曲げの作用が生じていないことを確認した。なお，一部の実験供試体においては，定着端面付近のひずみ挙動・付着特性を詳査するため，定着端面から 2.5D および 7.5D の位置にもひずみゲージを貼り付けた。

また，鉄筋による付着拘束がないコンクリートのひずみを計測するため，検長 60mm の埋込みゲージを埋設した 100×100×400mm の実験供試体を作製した。

本研究で用いた実験供試体および実験因子の一覧を**表－２**に示す。

2.3 実験方法

本研究では膨張材の添加によって生じる，コンクリートの膨張量およびケミカルプレストレスの導入領域を計測するため，養生期間中におけるひずみの計測を行った。ひずみの計測は打設後 12 時間(0.5 日)から開始し，両引き付着応力実験を行った材齢 7 日まで，4 時間間隔で行った。なお，養生期間中は湿布養生を行ったことから，実験供試体外部への水分逸散による乾燥収縮は，ほとんど生じていないと考えられる。

本研究では，鉄筋およびコンクリートともに引張応力が作用するよう，**図－２**に示す一軸引張載荷装置を用いて，両引き付着応力実験を行った。コンクリートから張り出した鉄筋両端をネジ切り加工し，**図－２**に示すように取付治具を用いて，実験供試体を一軸引張載荷装置に取り付けた。取付治具には球座を設けており，荷重の偏心にともなう曲げ応力の作用をできるだけ小さくした。

本研究では**図－２**に示す圧縮・引張兼用ロードセル(Max：100kN)を用いて荷重を計測した。ロードセルにより測定される値をもとに，0.1kN/sec 程度で載荷を行い，荷重 1kN 程度ごとにひずみの計測を行った。なお本研究では，載荷端の張り出した鉄筋が降伏するまで単調載荷を行った。本研究では早強ポルトランドセメントを用いたことから，いずれの両引き付着応力実験も，材齢 7 日において行った。

2.4 局部付着応力およびすべりの算定式

本研究では，式(1)を用いて局部付着応力 τ，式(2)および式(3)を用いてすべり S を算定した。

$$\tau = \frac{DE_s}{4}\frac{d\,\varepsilon_{s-b}}{dx} \tag{1}$$

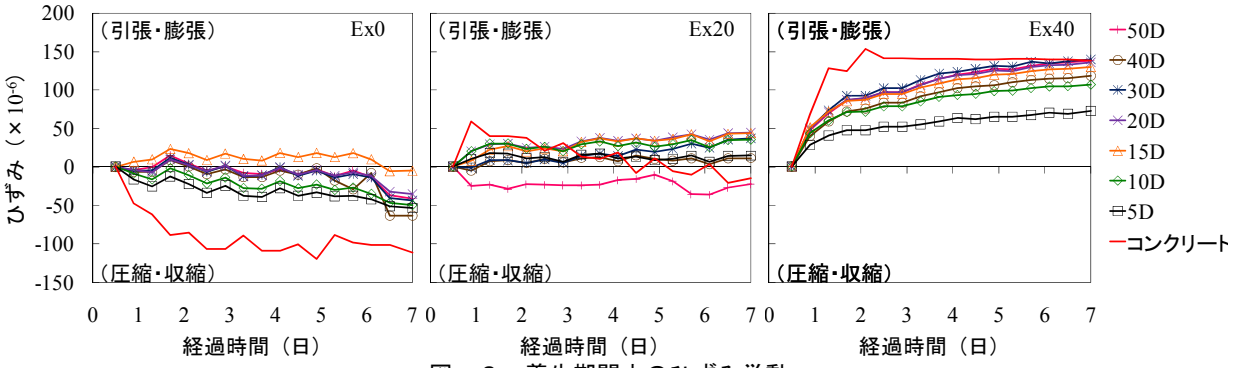
$$S(x) = \int_0^x \{\varepsilon_{s-b}(x) - \bar{\varepsilon}_c\}dx \tag{2}$$

$$\bar{\varepsilon}_c = \frac{P - \varepsilon_{s-b}(x)E_sA_s}{E_cA_c} \tag{3}$$

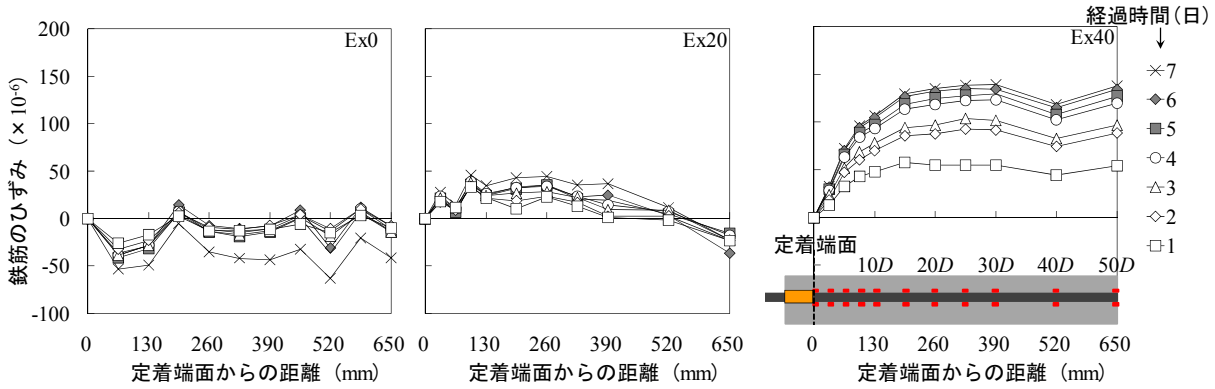
ここで τ：局部付着応力，x：実験供試体中央からの距離，D：鉄筋径，E_s：鉄筋のヤング係数，$\varepsilon_{s-b}(x)$：任意位置 x の鉄筋ひずみ，S：すべり，$\bar{\varepsilon}_c$：コンクリートの断面平均ひずみ，P：荷重，A_s：鉄筋の断面積，A_c：コンクリートの断面積，E_c：コンクリートのヤング係数を表す。

これまでの研究[2),4)]と同様に，本研究では式(1)の鉄筋ひずみの軸方向分布を，着目点およびその両隣の計測点の計 3 点を 2 次放物線と仮定し，同放物線の微分値を用いて局部付着応力 τ を算定した。

また，本研究のように定着長が長い実験供試体を用いた両引き載荷では，実験供試体中央における鉄筋ひずみがコンクリートの断面平均ひずみと概ね一致し，このような区間ではすべりはほとんど生じていないことが報告されている[2)]。したがって，本研究においても，鉄筋



図－３　養生期間中のひずみ挙動



図－４　養生期間中の鉄筋ひずみの軸方向分布

ひずみと式(3)で算定されるコンクリートの断面平均ひずみの差をもってすべりを算定した。

3. 実験結果と考察

3.1 養生期間中のひずみ挙動

打設後 12 時間から材齢 7 日までの養生期間中のひずみの経時変化を**図－３**に示す。なお，**図－３**に示す鉄筋ひずみは，定着端面 0*D* を基準(ゼロ)として算定したものである。また，図中のコンクリートひずみは，前述のように別途作製した実験供試体から求めたものである。本実験では水和熱等に伴う温度ひずみの影響をキャンセルするために，鉄筋軸上の各箇所におけるひずみ計測値から，実験供試体中の非定着部の鉄筋ひずみを差し引くことで，コンクリートの体積変化に伴う鉄筋ひずみを便宜上求めている。

図－３に示すように，膨張材を添加していない Ex0 では，打設後からコンクリートは収縮し，両引き付着応力実験を行った材齢7日では110×10^{-6}程度の収縮ひずみが生じた。標準添加量の 20kg/m^3 添加した Ex20 では，計測開始以降膨張ひずみが生じているが，材齢 1 日程度から収縮に転じ，結果的に材齢 7 日では 10×10^{-6} 程度の収縮ひずみが生じた。材齢 7 日における収縮ひずみを比較すると，Ex20 の場合 Ex0 に比べ，100×10^{-6} 程度小さかった。これは膨張材の添加により生じる膨張ひずみが，収縮ひずみを補償したためと考えられる。膨張材を標準添加量の 2 倍添加した Ex40 においては，計測開始以降コンクリートには膨張ひずみがみられ，材齢 2 日程度で一定の値に収束し，材齢 7 日で約 140×10^{-6} となった。鉄筋ひずみを比較すると，本研究で使用した膨張材の標準添加量の 2 倍を添加した Ex40 の場合，打設後から鉄筋には膨張ひずみが生じ，材齢 7 日まで膨張ひずみの増加がみられた。また，膨張材を標準添加量の 20kg/m^3 を添加した Ex20 では，膨張ひずみが生じているものの，鉄筋ひずみは最大で 70×10^{-6} 程度であり，Ex40 の場合に比べ小さいものであった。一方，膨張材を添加していない Ex0 の場合では，打設後から鉄筋に圧縮(収縮)ひずみが生じ，材齢 2 日程度でそれぞれ一定の値に収束した。

図－４に養生期間中における鉄筋ひずみの軸方向分布を示す。Ex40 の場合では，**図－４**に示すように，定着端面から 195mm(15*D*)程度より実験供試体の中央になると，鉄筋に生じる引張ひずみは概ね同程度となった。一方，定着端面から距離が 130mm(10*D*)程度の領域では，鉄筋ひずみの軸方向分布に勾配が生じた。このような領域において，付着を介して膨張ひずみが拘束され，コンクリートに圧縮のケミカルプレストレスが導入されると考えられる。

3.2 両引き付着応力実験時のひずみ挙動

両引き付着応力実験により得られた鉄筋ひずみの軸方向分布を**図－５**に示す。ここに示す自由部鉄筋応力は，鉄筋単体の応力(荷重／鉄筋断面積)を表す。なお，**図－５**には普通コンクリート(W/C=57%，材齢 7 日，高炉セメント B 種)を用いた場合の実験結果[2)]も併記している。

また，**図－５**に示す鉄筋ひずみは，実験開始時におけるひずみを 0(ゼロ)として算定したものであり，養生期間中に生じた鉄筋ひずみは含まれていない。

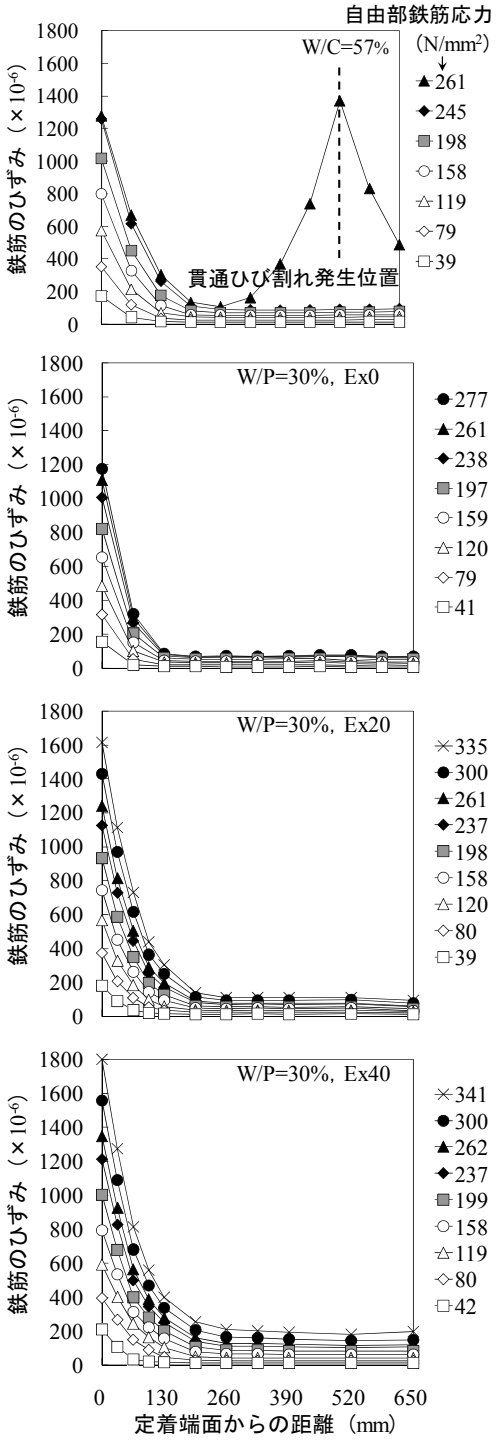
図－５に示すように，W/C=57%の普通コンクリートと同様に，本研究で行った W/P=30%の場合においても，自由部鉄筋応力(荷重／鉄筋断面積)の増加にともない，鉄筋ひずみの軸方向分布の勾配が大きくなるとともに，分布勾配の生じる範囲がより実験供試体内部に及んでいた。

また，普通コンクリートを用いた両引き付着応力実験では，自由部鉄筋応力 260N/mm^2 程度でコンクリートに，横断面を貫通するひび割れが生じたため，**図－５**に示すように貫通ひび割れ発生位置を中心に鉄筋ひずみが急増した。一方，本研究で行った W/P=30%のコンクリートを用いた両引き付着応力実験では，自由部鉄筋応力が 300N/mm^2 を超えても，コンクリートに貫通ひび割れは生じなかった。これは W/C(W/P)を小さくすることで，W/C=57%の場合に比べ引張強度が高くなったことに加え，膨張材によるコンクリートの体積膨張を鉄筋が拘束することによって生じるケミカルプレストレスが寄与したものと考えられる。

ここで，既往の研究で行われた W/C=57%のコンクリートを用いた両引き付着応力実験では，鉄筋ひずみの分布勾配がほとんど生じていない範囲(完全付着領域)における，貫通ひび割れ発生時の鉄筋ひずみが 100×10^{-6} 程度であった。本研究で行った W/P=30%のコンクリートを用いた場合では，自由部鉄筋応力が 300N/mm^2 を超えてもコンクリートに貫通ひび割れは生じなかったが，膨張材を添加していない Ex0 や標準添加量の Ex20 では，載荷端の鉄筋降伏により実験を終了したときの鉄筋ひずみが，それぞれ 80×10^{-6} 程度および 110×10^{-6} 程度であった。

一方，標準添加量の 2 倍の量の膨張材を添加した Ex40 では，実験終了時の鉄筋ひずみが約 200×10^{-6} であり，コンクリートの伸び能力の向上がみられた。なお，本研究で行った W/P=30%の両引き付着応力実験では，載荷端の張り出した鉄筋が降伏した時点で実験を終了した。したがって，コンクリートの横断面を貫通するひび割れが生じるまでには至っておらず，コンクリートの伸び能力を計測することができなかった。膨張材の添加によるコンクリートの伸び能力向上については，今後実験方法などを改良して更なる検討を行う必要があると考えられる。

ここで，完全付着領域における鉄筋ひずみの平均値と，式(3)に示す鉄筋およびコンクリートの軸剛性(E_sA_s，E_cA_c)と荷重から求まるコンクリートの断面平均ひずみの関係を**図－６**に示す。**図－６**に示すように，膨張材を添加していない Ex0 では，完全付着領域における鉄筋ひずみはコンクリートの断面平均ひずみとほぼ一致した。標準添加量の膨張材を添加した Ex20 の場合も同様に，完全付着領域の鉄筋ひずみとコンクリートの断面平均ひずみが同程度であった。このことから，Ex0 および Ex20 の完全付着領域における両者の界面には，すべりはほとんど生じていないと考えられる。一方，Ex40 では鉄筋ひずみが大きくなるほど，コンクリートの断面平均ひずみとの差が大きくなった。既往の研究では，標準添加量の 2 倍の量の膨張材を添加した場合，ひずみの非線形性が



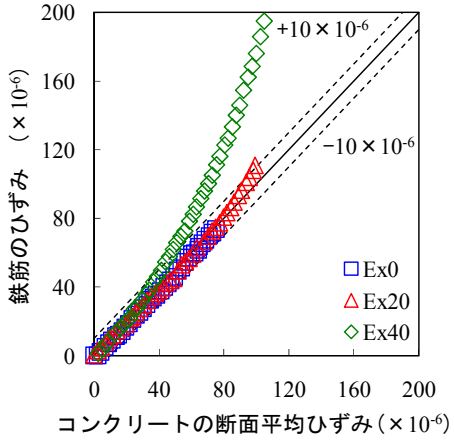
図－５　鉄筋ひずみの軸方向分布

大きくなることが報告されている[5]。しかしながら，本研究では式(3)によりコンクリートの断面平均ひずみを算定する際，簡易的に求めるためコンクリートのヤング係数 E_c を，コンクリートのヤング係数試験より得られた一定値とし，ひずみの非線形性については考慮を行っていない。このようなひずみの非線形性により，Ex40 の場合，鉄筋ひずみとコンクリートの断面平均ひずみの間に差異が生じたと考えられる。

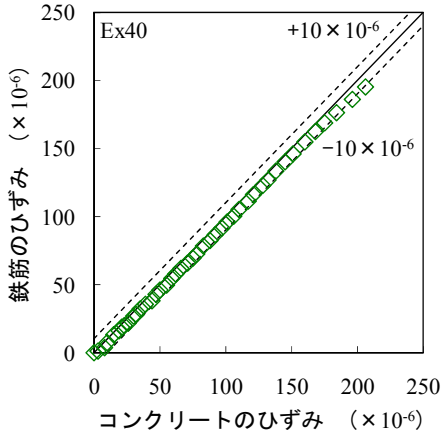
ここで，**図－６**に示す完全付着領域における鉄筋ひずみと定着端面から 260mm（20*D*）の位置におけるコンクリートの表面ひずみの関係を**図－７**に示す。**図－７**に示すように，完全付着領域における鉄筋ひずみとコンクリートの表面ひずみはほぼ一致した。このことから，Ex40 においても完全付着領域ではコンクリートと鉄筋の間にすべりは生じていないと考えられる。したがって，Ex40 においては式(2)によりすべりを算定する際に，コンクリートの断面平均ひずみを用いるのではなく，鉄筋ひずみの分布勾配がほとんど生じていない範囲（20*D*～50*D*）の完全付着領域[2]における鉄筋ひずみの平均値を用いて，すべり *S* の算定を行った。

3.3 局部付着応力－すべり関係

図－５に示す鉄筋ひずみの軸方向分布から，式(1)～式(3)を用いて，局部付着応力 τ およびすべり S を算定した。なお，Ex40 におけるすべりの算定方法については前節に示したとおりである。高強度膨張コンクリートにおける各配合の τ －*S*/*D* 関係を**図－８**に示す。なお，**図－８**の Ex0 には，普通コンクリート（W/C=57%，高炉セメント B 種）の結果[2]を実線で，Ex20 および Ex40 には Ex0 の結果を実線で併記している。また**図－８**には，すべり *S* を鉄筋径 *D* で無次元化した相対すべり *S*/*D* で表記している。**図－５**に示すように，実験供試体の中央に近い位置における鉄筋ひずみの分布にはほとんど勾配がなく，局部付着応力 τ の算定値がほぼゼロであったことから，定着端面から 5*D*～25*D* あるいは 2.5*D*～15*D* の位置における τ －*S*/*D* 関係を示している。



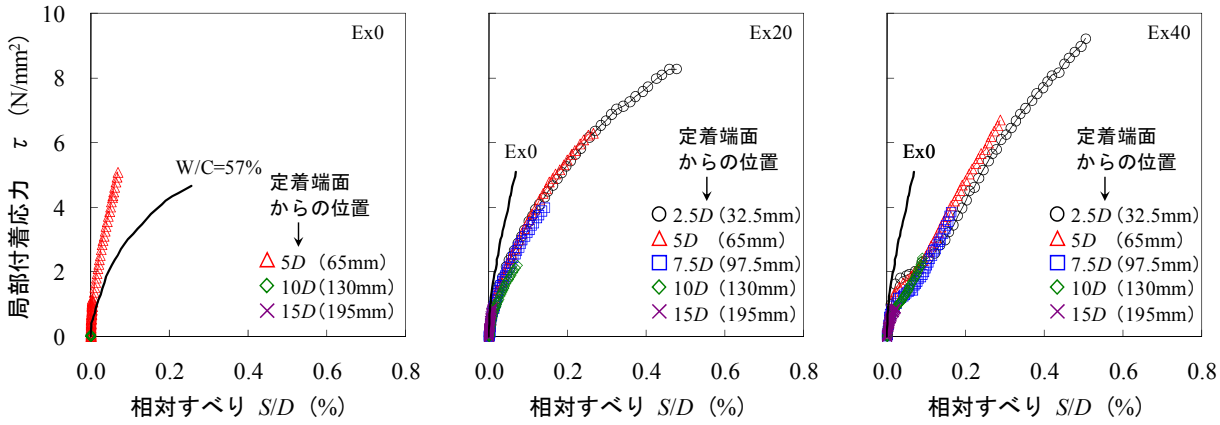
図－６　完全付着領域における鉄筋ひずみとコンクリートの断面平均ひずみ



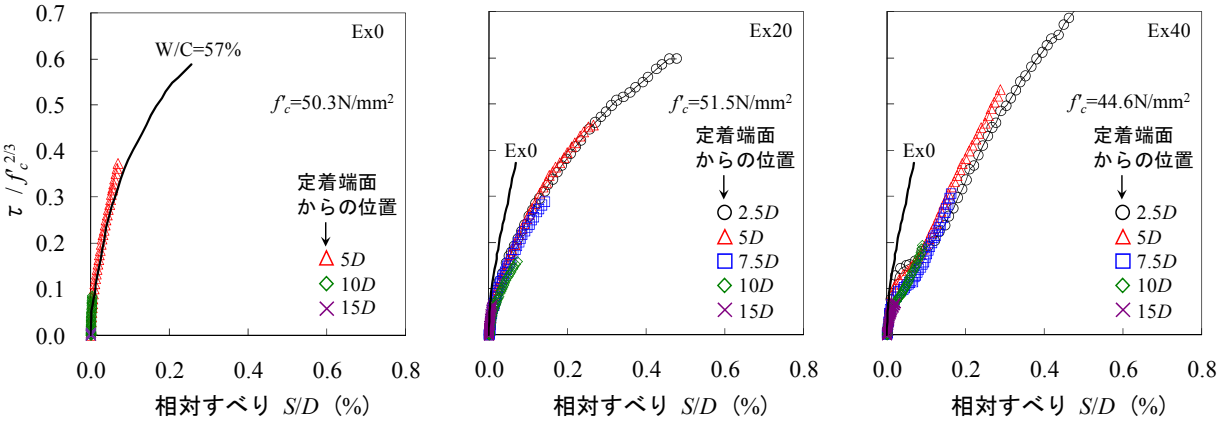
図－７　完全付着領域における鉄筋ひずみとコンクリートひずみ

図－８に示すように，Ex0，Ex20，Ex40 いずれの場合においても，定着端面からの位置によらず，それぞれが概ね同じ曲線状を呈した。

膨張材を添加していない高強度コンクリート（Ex0）では，普通コンクリートに比べ，同一相対すべり *S*/*D* における局部付着応力 τ が大きくなった。また，膨張材をセ



図－８　局部付着応力－相対すべり



図－９　圧縮強度 2/3 乗で無次元化した局部付着応力と相対すべりの関係

メントの内割りで 20kg/m^3 添加した Ex20 では，Ex0 の場合に比べ，同一相対すべり S/D における局部付着応力 τ が小さくなった。標準添加量の 2 倍の量の膨張材を添加した Ex40 では，**図－８**に示す他の $\tau-S/D$ 関係がいずれも上に凸な曲線状であったのに対し，一部が下に凸になるなど異なる曲線状を呈した。

ここで**図－８**に示す局部付着応力 τ を，一般的なコンクリートと鉄筋の局部付着特性評価にしばしば用いられる手法である，圧縮強度の 2/3 乗で無次元化（$\tau/f'_c{}^{2/3}$）した。高強度膨張コンクリートの $\tau/f'_c{}^{2/3}-S/D$ 関係を**図－９**に示す。膨張材を添加していない Ex0 における $\tau/f'_c{}^{2/3}-S/D$ 関係は，普通コンクリートのそれと概ね同じ曲線であった。一方，膨張材を添加した Ex20 および Ex40 では普通コンクリートの $\tau/f'_c{}^{2/3}-S/D$ 関係に比べ，同一 $\tau/f'_c{}^{2/3}$ におけるすべり S が大きくなった。

これらのことより，膨張材を添加しなかった Ex0 では $\tau/f'_c{}^{2/3}-S/D$ 関係により普通コンクリートと同様の手法で付着の評価が可能であると考えられる。一方，膨張材を添加した Ex20 あるいは Ex40 においては，普通コンクリートの $\tau/f'_c{}^{2/3}-S/D$ 関係と相関性がみられず，膨張材を添加した場合は付着の評価手法を検討する必要があると考えられる。

4. まとめ

本研究は，高強度膨張コンクリートとそこに内在する異形鉄筋との付着特性を把握するため，膨張材添加量の異なる実験供試体を用いた両引き付着応力実験を行い，それらの局部付着応力－すべり関係を求めたものである。本研究で得られた知見を以下に要約する。

(1) 標準添加量の 2 倍（40kg/m^3）の膨張材を添加した場合，鉄筋ひずみの軸方向分布が生じる範囲は，養生期間中では，定着端面から 15D 程度で鉄筋に生じるひずみはほぼ一定となり，両引き付着応力実験においては，定着端面からの距離が 20D 程度であった。このことより，定着端面から 15D～20D より長い定着域において，一定のケミカルプレストレスが作用していると考えられる。

(2) 高強度膨張コンクリートと異形鉄筋の $\tau/f'_c{}^{2/3}-S/D$ 関係は，定着端面からの位置によらず概ね同一の曲線状を呈す。

(3) 膨張材を標準添加量（20kg/m^3）あるいは，2 倍（40kg/m^3）添加した場合，呼び強度 24（N/mm^2）のコンクリートの $\tau/f'_c{}^{2/3}-S/D$ 関係と相関性がみられず，膨張材を添加した場合は付着特性の評価手法を検討する必要がある。

参考文献

1) 田中泰司，吉田　聖，岸　利治：膨張材を添加したコンクリートに埋め込まれた異形鉄筋の付着特性，膨張コンクリートによる構造物の高機能化／高耐久化に関するシンポジウム，pp.41-46，2003.9.

2) 三村陽一，吉武　勇，森本公典，浜田純夫：若材齢コンクリートと異形鉄筋の局部付着特性に関する実験的研究，土木学会論文集 E，Vol.63，No.3，pp.410-423，2007.7.

3) 石田邦洋，吉武　勇，濱岡洋亘，浜田純夫：湿潤養生期間の異なる膨張コンクリートはりの曲げひび割れ発生応力，土木学会論文集 E，Vol.63，No.3，pp.459-467，2007.8.

4) 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.

5) 石田邦洋，濱岡洋亘，坂本裕樹，吉武　勇：はりの曲げ実験による膨張コンクリートの初期応力・ひずみの推定，コンクリート工学年次論文集，Vol.29，No.1，pp.507-512，2007.7.