

論文 若材齢コンクリートと異形鉄筋の局部付着応力-すべり関係

森本 公典^{*1}・三村 陽一^{*2}・浜梶 方希^{*3}・吉武 勇^{*4}

要旨：鉄筋コンクリート構造物の長期耐久性の向上には、先ず若材齢期に生じる初期ひび割れの制御・防止が必要となる。本研究では、初期ひび割れ(幅)予測に用いる局部付着特性の評価に寄与するため、両引き付着応力実験を通じて若材齢コンクリート(モルタル)と異形鉄筋の局部付着応力-すべり関係を求めた。その結果、コンクリートの断面寸法(軸剛性)の相違により、すべりが大きくなることを示した。また、材齢2日以降における、高強度モルタルおよび普通コンクリートと異形鉄筋の $\tau/f_c^{2/3}-S/D$ 関係は、材齢および鉄筋軸に沿った位置によらず、概ね同一の曲線で表せることを示した。

キーワード：若材齢, 異形鉄筋, 軸剛性, 高強度モルタル

1. はじめに

若材齢期にあるコンクリートは、温度・自己収縮などの体積変化が著しく、これに起因したひび割れ(初期ひび割れ)がしばしば発生している。過度な(初期)ひび割れは、鉄筋コンクリート構造物の長期耐久性を損なう一因となる。

鉄筋コンクリート部材において、ひび割れ発生箇所における引張力は、同位置に配置された鉄筋が負担する。そして、コンクリートと鉄筋の付着を介して、ひび割れ周辺のコンクリートに応力伝達されることで、(初期)ひび割れ幅の過度な開口が抑制される。合理的に初期ひび割れを制御・防止するためには、できるだけ精度良くひび割れ幅を予測することが重要となる。そのためには、若材齢期におけるコンクリートと鉄筋の付着特性を適切に評価する必要がある。

コンクリートと鉄筋の付着特性は、鉄筋軸に沿った任意の位置における局部付着応力 τ と、その点におけるコンクリートと鉄筋のすべり S の関係(局部付着応力-すべり関係)で表されるのが一般的である。著者らは研究事例の少ない、若材齢コンクリートと異形鉄筋の局部付着応力

-すべり関係について報告している¹⁾。同報は、比較的定着長の短い実験供試体を用いた両引き付着応力実験を基に局部付着応力-すべり関係を求めている。鉄筋とコンクリートの定着長によって局部付着応力-すべり関係は異なることが知られており、十分な定着長を有する実構造物における局部付着応力-すべり関係の推定に、同報の結果を用いるには限界がある。そこで、本研究では定着長が十分に長い実験供試体を用いた両引き付着応力実験を行った。本研究では特に、コンクリートの軸剛性が局部付着応力-すべり関係におよぼす影響を求めめるため、一般的な強度のコンクリートで作製した断面寸法の異なる実験供試体を用いて両引き付着応力実験を行った。また、高強度モルタルと異形鉄筋の局部付着応力-すべり関係も併せて求め、一般的な強度のコンクリートと比較検討を行った。

2. 実験・評価方法

2.1 実験供試体

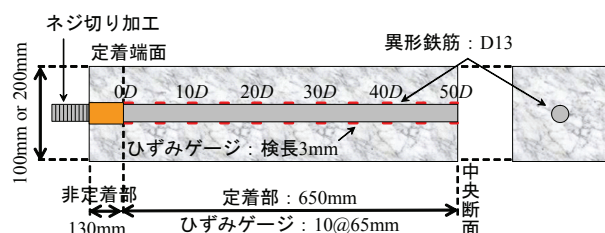
本研究で用いた実験供試体を図-1に示す。図-1に示すように、実験供試体の断面中央に

*1 新光産業(株) 修(工) (正会員)

*2 山口大学大学院 理工学研究科設計工学専攻 修(工) (正会員)

*3 山口大学大学院 理工学研究科社会建設工学専攻

*4 山口大学大学院 理工学研究科准教授 博(工) (正会員)



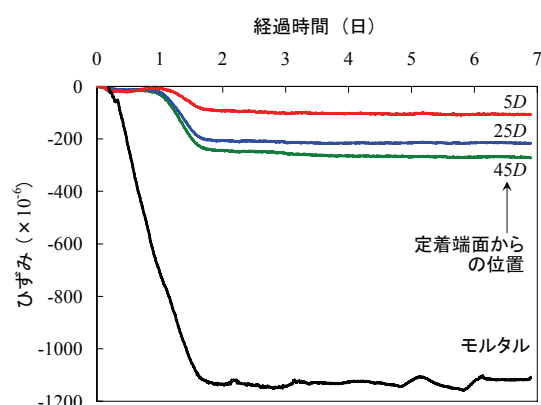
図－１ 実験供試体および鉄筋ひずみ計測位置

表－１ 配合条件および使用材料

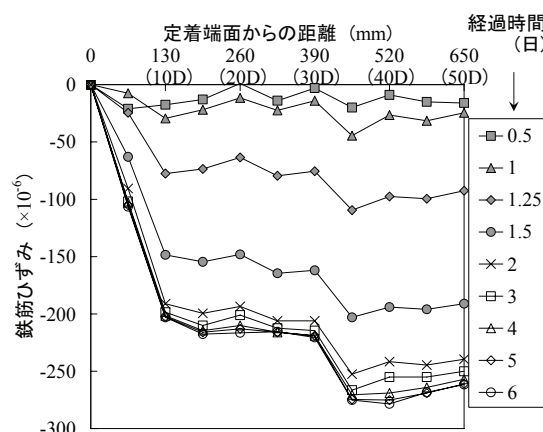
普通 コン クリ ート	水セメント比 W/C	57%	
	単位量 kg/m ³	水 W	165 水道水
		セメント C	290 高炉セメント B 種
		細骨材 S	812 海砂
		粗骨材 G	1030 砕石
		混和剤 Ad	2.9 AE 減水剤
高強度 モル タル	水セメント比 W/C	17%	
	単位量 kg/m ³	水 W	210 水道水
		セメント C	1235 シリカフュームセメント
		細骨材 S	997 海砂
		混和剤 Ad	37.05 高性能 AE 減水剤
鉄 筋	呼 び 名	D13	
	規 格	SD295A	
	ヤング係数 E_s	191200 N/mm ²	

は、横ふし型異形鉄筋 D13 を、両端から 100mm ずつ張り出して埋設した。本研究では、配合強度 24N/mm^2 程度の一般的なコンクリート(普通コンクリート)に加え、 $f'_c(28\text{d})=80\text{N/mm}^2$ 程度の高強度モルタルにより実験供試体を作製した。本研究の配合条件および使用材料を表－１に示す。普通コンクリートで作製した実験供試体の断面寸法は、 $100\times100\text{mm}$ (N100 供試体)および $200\times200\text{mm}$ (N200 供試体)であり、高強度モルタルで作製した実験供試体の断面寸法は、 $100\times100\text{mm}$ (H100 供試体)である。本研究における鉄筋定着長は、実験供試体の中央から片側に鉄筋径 D の 50 倍 ($50D$, 650mm) ずつの計 1300mm である。

コンクリート(モルタル)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。なお本研究では、ひずみゲージを各計測位置における鉄筋



図－２ 養生期間中におけるひずみの経時変化



図－３ 鉄筋ひずみの軸方向分布(養生期間中)

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。

2.2 養生期間中のひずみ(高強度モルタル)

本研究で用いた高強度モルタルは、水セメント比 W/C が 17%と非常に低いことから、普通コンクリートに比べ自己収縮が大きくなる。そこで、高強度モルタルで作製した H100 供試体を用いて、打設直後から材齢 7 日までの養生期間中における鉄筋のひずみを計測した。また、埋込ゲージを用いて、高強度モルタル($100\times100\times400\text{mm}$)のひずみ変化を計測した。H100 供試体の養生期間中におけるひずみの経時変化を図－２に示す。なお、図－２に示す鉄筋ひずみは定着端面 $0D$ を基準(ゼロ)として算定したものである。

図－２に示すように、打設後数時間から高強度モルタルの収縮ひずみが生じている。このような高強度モルタルの収縮ひずみは、材齢 1.5 日程度まで急増しており、材齢 2 日程度におい

て、概ね -1100×10^{-6} に収束した。これに対して、鉄筋ひずみは、材齢 1 日程度までほとんど生じていないことから、高強度モルタルとそこに内在する鉄筋間には付着効果が極めて小さく、体積変化にともなう両者間のすべりが生じていることが窺える。

図-3 に、養生期間中における鉄筋ひずみの軸方向分布を示す。図-3 に示すように、定着端面から $10D$ の位置より実験供試体の内部における鉄筋ひずみは、一部急変箇所があるものの概ね同程度であった。一方、定着端面から $0D \sim 10D$ では、鉄筋ひずみが急変しており、同領域において、付着を介した応力伝達がなされていると考えられる。

2.3 実験項目

本研究における実験項目を表-2 に示す。表-2 に示すように、普通コンクリートで作製した N100 供試体および N200 供試体を用い、材齢 1, 2, 3, 7 日において両引き付着応力実験を行った。また、体積変化の著しい高強度モルタルで作製した H100 供試体では、養生期間中のひずみ挙動が安定した材齢 2, 7 日において両引き付着応力実験を行った。

2.4 荷重方法

コンクリートの体積変化に起因した初期ひび割れが発生する場合、鉄筋およびコンクリートは主に引張応力作用下にあると考えられる。そこで本研究では、鉄筋・コンクリートともに引張応力が作用するよう、図-4 に示す一軸引張荷重装置を用いて両引き付着応力実験を行った。コンクリート中に張り出して埋設した鉄筋(両端ネジ切り加工)と取付治具を用いて、実験供試体を一軸引張荷重装置に取り付けた。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-4 に示す箇所に設置した圧縮・引張兼用ロードセル(Max : 100kN)を用いて荷重を計測した。初期ひび割れを対象とする本研究では、鉄筋が降伏するまでの引張応力は必要としないことから、最大荷重は使用鉄筋の

表-2 実験項目

供試体 名 称	種 別	断面寸法 (mm)	材 齢 (日)
N100	普通コンクリート	100×100	1,2,3,7
N200	普通コンクリート	200×200	1,2,3,7
H100	高強度モルタル	100×100	2,7

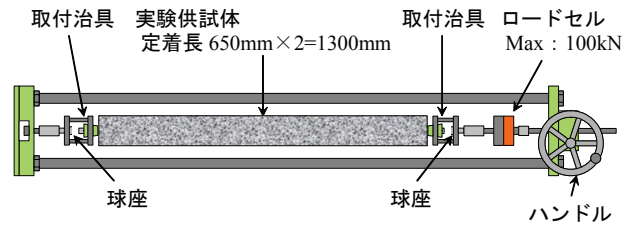


図-4 一軸引張荷重装置

降伏荷重(37.4kN)より小さい 35kN とした。また、ロードセルより測定される値をもとに 0.1kN/sec 程度で荷重を行った。

2.5 局部付着応力およびすべりの算定方法

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。

$$\tau = \frac{DE_s}{4} \frac{d\varepsilon_{s-b}}{dx} \quad (1)$$

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

$$\bar{\varepsilon}_c = \frac{P - \varepsilon_{s-b} E_s A_s}{E_c A_c} \quad (3)$$

ここで、 x : 供試体中央からの距離、 τ : 局部付着応力、 D : 鉄筋径、 E_s : 鉄筋のヤング係数、 ε_{s-b} : 鉄筋ひずみ、 S : すべり、 $\bar{\varepsilon}_c$: コンクリート(モルタル)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(モルタル)の断面積、 E_c : コンクリート(モルタル)のヤング係数を表す。

これまでの研究^{1), 2)}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、局部付着応力 τ は同放物線の微分値を用いて算定した。

3. 実験結果と考察

3.1 ひび割れの発生状況

材齢1, 2, 3, 7日におけるN100供試体および材

齢2日のH100供試体を用いた両引き付着応力実験では、コンクリート(モルタル)の断面を貫通するひび割れが生じた。ひび割れ発生位置および最初の貫通ひび割れが発生した荷重を、**図－5**に示す。**図－5**に示すように、N100供試体に生じた貫通ひび割れは、材齢が若いほどひび割れ本数が多く、ひび割れの発生荷重は小さかった。また、H100供試体に生じた貫通ひび割れは、N100供試体に比べて、狭い間隔で多数生じていた。以上のように、貫通ひび割れの発生本数や発生位置は、実験によって様々であったことから、貫通ひび割れ発生以降の局部付着応力－すべり関係の単純な比較が困難である。したがって、本論文では以下、貫通ひび割れ発生までの局部付着応力－すべり関係について記述する。

3.2 実験結果

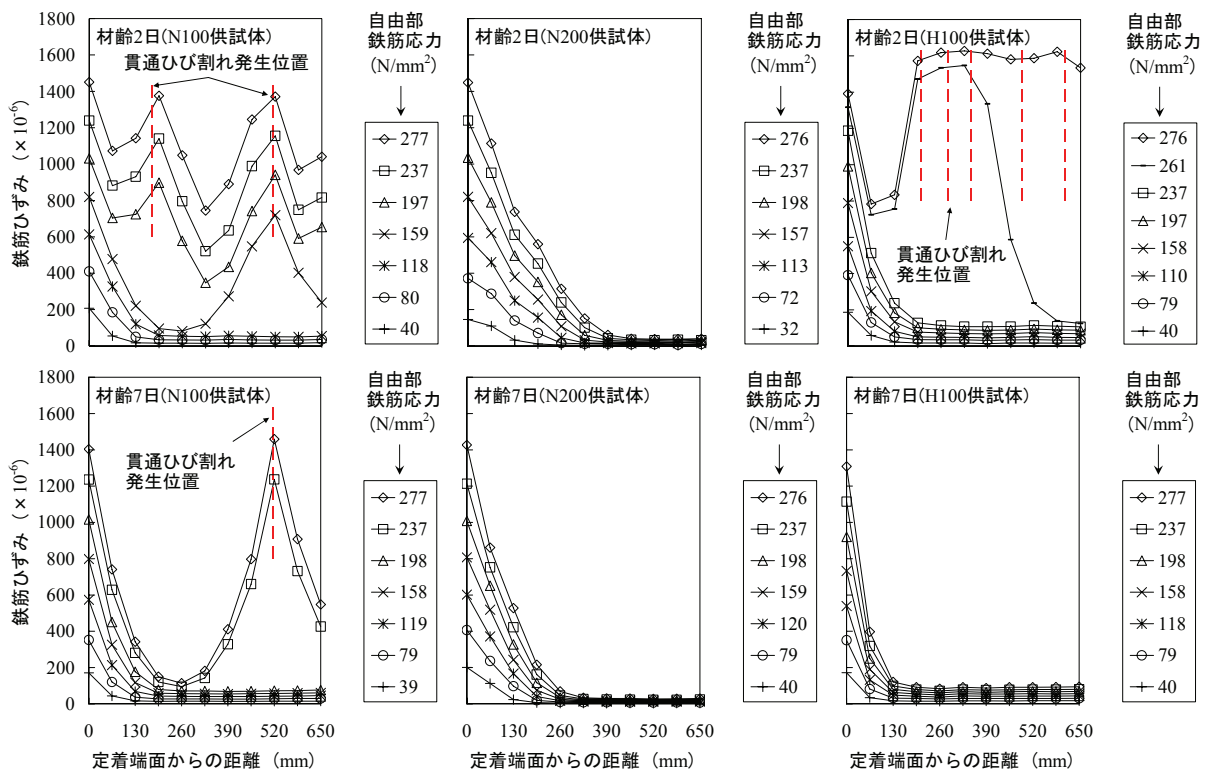
鉄筋ひずみの軸方向分布の例を**図－6**に示す。**図－6**に示すように、N100供試体および材齢2日のH100供試体では、自由部鉄筋応力(荷重／鉄筋断面積)が大きくなると貫通ひび割れが生じ、ひび割れ発生位置を中心に、鉄筋ひずみが急増した。N200供試体では、自由部鉄筋応

力が大きくなっても貫通ひび割れが生じず、N100供試体およびH100供試体に比べ、鉄筋ひずみに分布勾配の生じる範囲が、実験供試体の内部にまで及んでいた。H100供試体では、高強度モルタルによる付着拘束が顕著であり、N100供試体およびN200供試体に比べて、定着端面付近における鉄筋ひずみの分布勾配が大きかった。

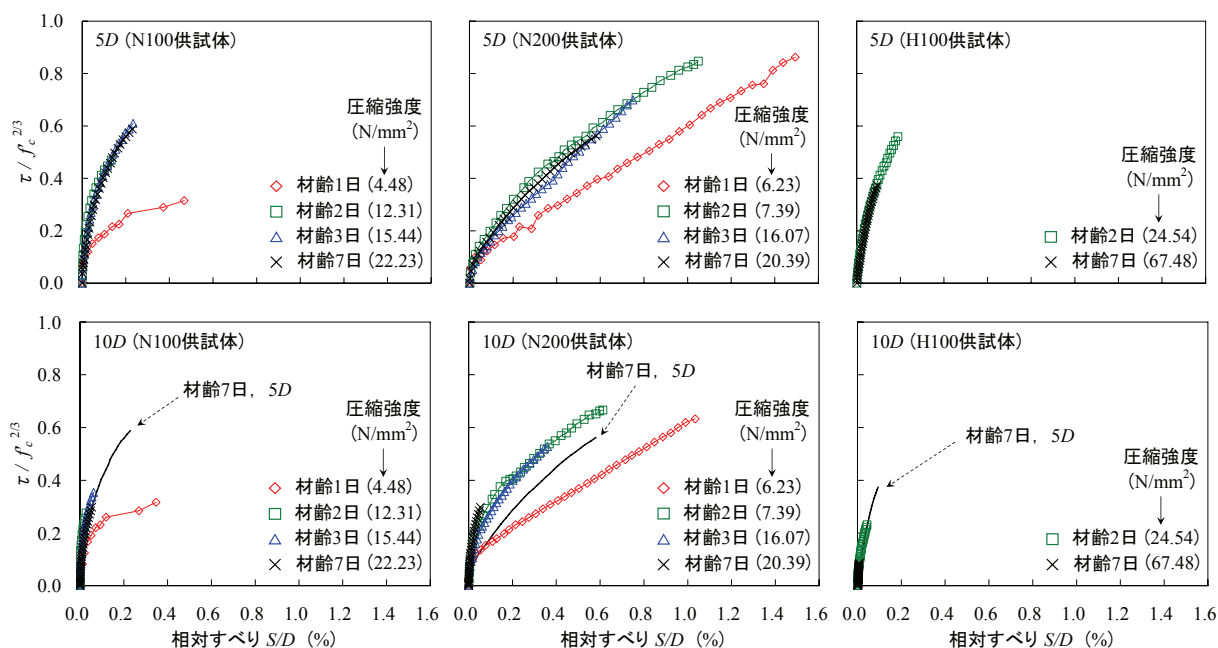
図－7に、定着端面から $5D$ および $10D$ の位置における、各材齢の $\tau/f_c^{2/3}-S/D$ 関係(f_c :圧縮強度)を示す。**図－7**に示すように、材齢1日における相対すべり S/D は、他の材齢に比べて大きいものであった。一方、2日以降の $\tau/f_c^{2/3}-S/D$ 関係は、各実験供試体のそれぞれの位置



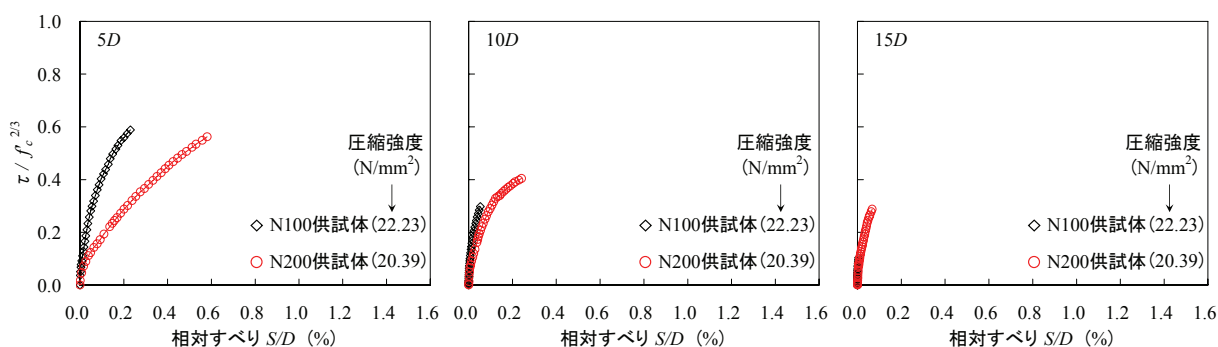
図－5 貫通ひび割れ発生位置・荷重



図－6 鉄筋ひずみの軸方向分布の例(材齢2, 7日の場合)



図－７ 各材齢における $\tau/f_c^{2/3}-S/D$ 関係



図－８ コンクリート断面寸法(軸剛性)の相違による $\tau/f_c^{2/3}-S/D$ 関係(材齢 7 日)

において、概ね同一の曲線となった。

また、材齢 2 日以降における、各実験供試体の定着端面から 5D および 10D の位置における $\tau/f_c^{2/3}-S/D$ 関係を比較すると、N100 供試体における両位置の $\tau/f_c^{2/3}-S/D$ 関係は、概ね一致した。このことは、H100 供試体でも同様であった。また、N200 供試体では、同一の $\tau/f_c^{2/3}$ において生じた相対すべり S/D は、10D の位置に比べ 5D の位置の方が大きいものであった。

3.3 コンクリート断面寸法の影響

定着端面から 5D、10D および 15D の位置における、N100 供試体と N200 供試体の $\tau/f_c^{2/3}-S/D$ 関係(材齢 7 日)を図－8 に示す。図－8 に示すように、定着端面から 5D の位置では、同一の $\tau/f_c^{2/3}$ において生じた相対すべり S/D が、N100 供試体に比べて N200 供試体の方が大きく、

例えば、 $\tau/f_c^{2/3}$ が 0.6 程度では 2 倍以上の差異がみられる。このような相対すべり S/D の差は、コンクリートの断面寸法の相違による、コンクリートの軸剛性 $E_c A_c$ の差異に起因するものと考えられる。異形鉄筋に引張応力が作用して鉄筋ひずみが生じると、異形鉄筋とコンクリートのひずみ差にともない、すべりが生じる。このすべりに対して、鉄筋ふし前面のコンクリートが支圧抵抗することで、付着応力が生じ、異形鉄筋からコンクリートへ応力が伝達される。ここで、コンクリートの軸剛性 $E_c A_c$ が大きくなると、図－9 に示すように、伝達された応力によるコンクリートの変形(ひずみ)が小さくなる。したがって、鉄筋に対するコンクリートの変位の追従性が低下するため、両者の応力伝達を担う、鉄筋ふし前面のコンクリートに応力が集中

したと考えられる。このような応力集中により、鉄筋ふし前面のコンクリートに生じる付着損傷が進展したことで、**図-8**に示すような相対すべり S/D の差異が生じたと考えられる。

また、このような相対すべり S/D の差異は、定着端面からの位置が $10D$, $15D$ と実験供試体の内部になるほど小さくなった。これは、**図-6**に示すように、実験供試体の内部ほど、鉄筋ひずみが小さくなったためと考えられる。

3.4 コンクリート(モルタル)強度の影響

定着端面から $5D$ の位置における、N100 供試体と H100 供試体の $\tau/f_c^{2/3}-S/D$ 関係(材齢 7 日)を**図-10**に示す。先述したように、鉄筋軸に沿った位置にかかわらず、材齢 2 日以降における N100 供試体と H100 供試体の $\tau/f_c^{2/3}-S/D$ 関係は、それぞれが概ね同一の曲線であった。これに加えて、**図-10**に示すように、N100 供試体と H100 供試体の $\tau/f_c^{2/3}-S/D$ 関係も概ね同一の曲線となった。

ここで、**図-10**に示す局部付着応力 τ と相対すべり S/D の関係に着目すると、N100 供試体に比べ、H100 供試体に生じる局部付着応力 τ の最大値は大きいものの、そのときに生じた相対すべり S/D は小さかった。このことから、高強度のコンクリート(モルタル)と異形鉄筋は、一般的な強度のコンクリートの場合に比べ、高い付着(定着)性能を有していることが窺える。したがって、高強度のコンクリート(モルタル)の場合、一般的な強度のコンクリートに比べて、必要鉄筋定着長を短くできる可能性があると考えられる。

4. まとめ

本研究は、若材齢コンクリートと異形鉄筋の局部付着応力-すべり関係の評価に寄与するため、断面寸法および強度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。本研究で得られた結論を以下に要約する。

(1) 断面寸法 $100 \times 100 \text{mm}$ の場合に比べ、断面

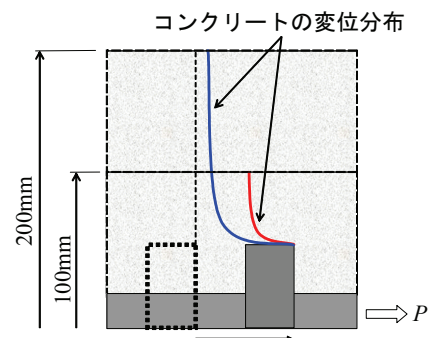


図-9 軸剛性の差異によるコンクリートの変位分布

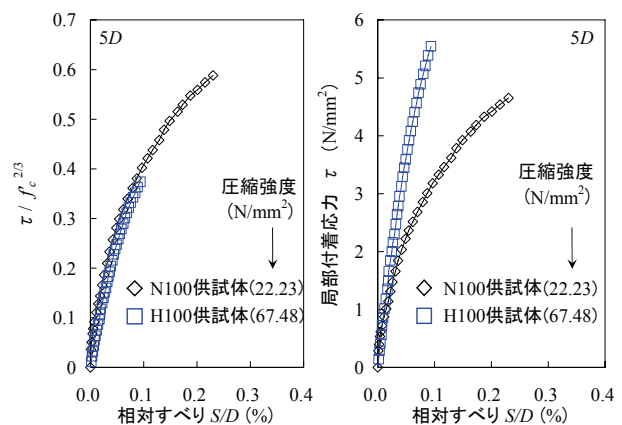


図-10 $\tau/f_c^{2/3}$ および τ と S/D との関係 (N100 供試体, H100 供試体 : 材齢 7 日)

寸法 $200 \times 200 \text{mm}$ のコンクリートと異形鉄筋の間に生じるすべりは大きい。また、コンクリートの内部ほど、両者の $\tau/f_c^{2/3}-S/D$ 関係は同一の曲線状となる。

(2) 材齢 2 日以降における、高強度モルタルおよび普通コンクリートと異形鉄筋の $\tau/f_c^{2/3}-S/D$ 関係は、材齢および鉄筋軸に沿った位置によらず、概ね同一の曲線状を示す。

参考文献

- 1) 三村陽一, 吉武 勇, 辻 和秀, 田中 浩, 浜田純夫 : 両引き試験による若材齢コンクリートと異形鉄筋の付着特性の評価, 土木学会論文集, No.732/V-59, pp.211-223, 2003.5.
- 2) 島 弘, 周 礼良, 岡村 甫 : マッシュ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.