

論文 鉄筋とコンクリート棒形振動機の接触における鉄筋径の違いが 付着強度に及ぼす影響

宮田 敦典^{*1}・中田 善久^{*2}・大塚 秀三^{*3}・新妻 尚祐^{*4}

要旨:本研究は、再振動を行うときに起こり得る鉄筋とコンクリート棒形振動機の接触が鉄筋径の異なる付着強度に及ぼす影響について検討したものである。その結果、鉄筋径を変えた付着強度は、鉄筋径が小さいほど大きくなる傾向を示し、接触開始時間が遅く、接触時間が長いほど付着強度が小さくなる傾向を示した。また、やむを得ず鉄筋とコンクリート棒形振動機が接触した場合は、JASS 5に解説されている打重ね時間間隔の限度内としてもできるだけ接触時間を短くする必要があることが示唆された。さらに、本実験から得られた付着強度は、RC構造計算規準から算出した短期許容付着応力度を上回る傾向を確認している。

キーワード:再振動, 締固め, 異形鉄筋, コンクリート棒形振動機, 接触, 付着強度

1. はじめに

構造体コンクリートの品質は、コンクリート工事における運搬、打込みおよび締固めの一連の作業の良否により大きく左右することは言うまでもない。この締固めにおける再振動は、日本建築学会「建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5 鉄筋コンクリート工事 2009」¹⁾(以下、JASS 5とする)および土木学会「2007年制定コンクリート標準示方書 [施工編:標準施工]²⁾(以下、示方書とする)にもコールドジョイント防止のために打重ね時間間隔の限度や振動機の先端を先に打ち込んだコンクリートの層に入れることが記述されている。特に、示方書²⁾において「再振動を行う場合には、コンクリートの締固めが可能な範囲でできるだけ遅い時期がよい。」と記述されている。これは、C.A.Vollick³⁾の研究において、打込み後1~2時間に再振動を行うと圧縮強度が13.8%程度増加する報告が背景にあると考えられる。また、棒形振動機による締固めの要領としてJASS 5¹⁾に「振動機の先端は、鉄骨・鉄筋・埋込み配管・金物・型枠などになるべく接触させない。」と解説されているが、比較的小さい部材のときに配筋が過密となり、再振動を行うときにやむを得ず鉄筋とコンクリート棒形振動機の接触する場合がある。しかし、再振動を行ったときの鉄筋の付着強度に不明確な点があるため、著者らはこれまでに、コンクリートの再振動における鉄筋とコンクリート棒形振動機の接触が異形鉄筋の付着性状⁴⁾に及ぼす影響について検討を行い、コンクリートの打込み後から鉄筋とコンクリート棒形振動機を接触させるまでの時間が遅いほど、さらに、鉄筋とコンクリート棒形振動機の接触させた時間が長いほど付着強度が低下することを明らかにしてきた。しかし、

この検討は、鉄筋にD19を用いた検討であったため、鉄筋とコンクリート棒形振動機の接触における鉄筋径の違いが付着強度に及ぼす影響について不明確である。

そこで、本研究は、鉄筋とコンクリート棒形振動機の接触における鉄筋径の違いが付着強度に及ぼす影響を明らかにするために、鉄筋径、打込み方向に対する鉄筋の方向、鉄筋とコンクリート棒形振動機の接触を開始した時間(以下、接触開始時間とする)および鉄筋とコンクリート棒形振動機を接触させた時間(以下、接触時間とする)を変化させて検討した。さらに、実験で得られた付着強度を用いて、日本建築学会「鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説 2010」⁵⁾(以下、RC構造計算規準とする)に記述されている許容付着応力度と比較し検討している。なお、本研究で取扱う「再振動」は、吉本ら⁶⁾のように「再振動というのは、もともと、打込み後に振動締固めを行なったコンクリートに対する2度目の振動という意味で用いられた言葉であるが、再振動の効果を考えるうえで問題になるのは、その振動が2度目であるという点ではなく、打込み後、一定時間経過したのちの振動という点である。」と同様に、打込み後、時間が一定時間経過したのちの振動を「再振動」として扱っている。

2. 実験概要

2.1 実験の要因と水準

実験概要を表-1に示す。鉄筋の方向は、W/C=55%のときコンクリートの打込み方向に対して平行方向および直交方向の2水準とし、W/C=35%のときコンクリートの打込み方向に対して平行方向の1水準とした。また、鉄筋と

*1 日本大学 理工学部建築学科 助手 修士(工学) (正会員)

*2 日本大学 理工学部建築学科 教授 博士(工学) (正会員)

*3 ものつくり大学 技能工芸学部建設学科 准教授 博士(工学) (正会員)

*4 新妻鋼業 代表取締役社長

表-1 実験概要

W/C (%)	鉄筋の方向	鉄筋の呼び名	鉄筋とコンクリート棒形振動機の接触開始時間(分)				
			直後	45	90	120	150
			接触時間(秒)				
55	平行	D13	5	5	5	5	5
		D25	15	15	15	15	15
			30	30	30	30	30
	直交	D13	5	5	5	5	5
		D25	15	15	15	15	15
			30	30	30	30	30
35	平行	D13	5	—	5	—	5
		D25	30	—	30	—	30

※試験体数:各3体

表-2 コンクリートの使用材料

材料	種類	品質・性状・主成分
セメント	普通ポルトランドセメント	密度: 3.16g/cm ³ 比表面積: 3,300cm ² /g
水	上水道水	埼玉県行田市
細骨材	栃木県産栃木市尻内町産陸砂	表乾密度: 2.61g/cm ³ 粗粒率: 2.75
粗骨材	栃木県産栃木市尻内町産石灰岩碎石	表乾密度: 2.61g/cm ³ 粗粒率: 6.64
化学混和剤	AE減水剤	リグニンスルホン酸塩 オキシカルボン酸塩
	高性能AE減水剤	ポリカルボン酸系化合物

表-3 コンクリートの調合

W/C (%)	SL ^{※1} , SF ^{※2} (cm)	Air (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)				
				W	C	S	G	Ad
55	SL=18	4.5	47.6	182	331	830	924	3.972 ^{※3}
35	SF=60	4.5	50.1	170	486	825	831	8.262 ^{※4}

※1 スランプ, ※2 スランプフロー, ※3 AE減水剤を使用
※4 高性能AE減水剤を使用

コンクリート棒形振動機の接触開始時間は、コンクリートを打込み直後、打込みから45, 90, 120および150分の5水準とし、いずれも接触時間を5, 15および30秒の3水準とした。さらに、コンクリートを打込み後、鉄筋とコンクリート棒形振動機を接触させていない試験体(以下、無接触試験体とする)についても検討した。

2.2 コンクリートの使用材料および調合

コンクリートの使用材料を表-2に示し、コンクリートの調合を表-3に示す。ここでは、水セメント比が異なるW/C=55%およびW/C=35%の2水準とした。また、練混ぜ直後におけるフレッシュコンクリートの目標値は、W/C=55%のときスランプを18±2.5cm、空気量を4.5±1.5%、W/C=35%のときスランプフローを60±10cm、空気量を4.5±1.5%とし、目標値を満足するように化学混和剤の添加量で調節した。

2.3 スランプ、スランプフロー、空気量および圧縮強度の試験方法

スランプ、スランプフローおよび空気量は、コンクリートを練上り直後に採取し、それぞれ当該JISに準拠して試験した。また、圧縮強度は、JIS A 1132に準拠して作製した

【平行方向】

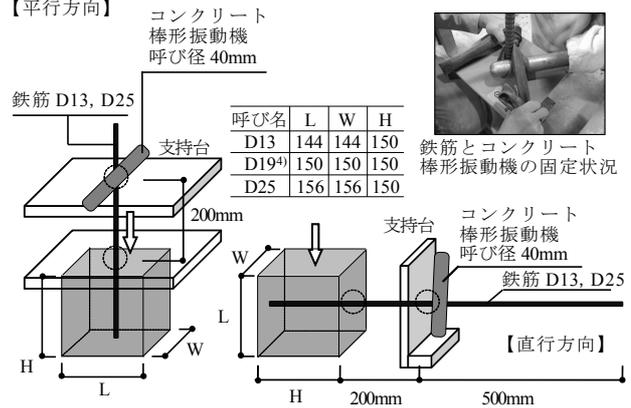


図-1 付着強度試験用試験体の概要

表-4 スランプ、スランプフロー、空気量および材齢28日における圧縮強度

W/C (%)	スランプ スランプフロー (cm)	空気量 (%)	材齢28日 における圧縮強度 (N/mm ²)
55	16.0	4.3	35.8
35	58.0	4.6	66.3

供試体を材齢28日まで標準養生(水中, 20°C±2°C)し、JIS A 1108に準拠して試験した。

2.4 付着強度試験用試験体の概要

付着強度試験用試験体の概要を図-1に示す。鉄筋は、近年の鉄筋コンクリート造における柱および梁の主筋を想定してD25(SD345)、帯筋およびあばら筋を想定してD13(SD295A)を使用した。試験体は、JCI規準集のJCI-SPC15⁷を参考にして、鉄筋の埋込み長さを150mmで型枠に設置し、試験体の寸法を鉄筋径が変化するために鉄筋の下端からコンクリート上面の端部が成す角度が一定なるように図-1に示す値とした。無接触試験体を含む全ての試験体へのコンクリートの打込みは、コンクリートの練上り直後に行い、鉄筋を設置した後に一層で打ち込んでから突き棒で20回突き、型枠の外側を木づちで10回叩いた。ここで、実際の構造物は、コンクリート棒形振動機を用いて締固めを行うものの、本研究に用いた試験体は構造体に比べて小さく、コンクリート棒形振動機により締固めを行うと、過度の振動により試験体内部のコンクリートが不均一になることが考えられるため、突き棒を用いて締固めを行ったものと比較した。また、鉄筋とコンクリート棒形振動機の接触は、呼び径40mm(直径43mm、振動数12,000rpm、振動数200Hz)の高周波バイブレータを図-1のように供試体上面から200mmの位置で鉄筋へ直角に行った。鉄筋とコンクリート棒形振動機の固定は、振動のみを鉄筋に伝播させるためゴムチューブを巻き付けた。また、正確な配筋を想定した鉄筋の揺れを抑えることやコンクリート棒形振動機の自重の影響を排除するために、図-1に示す位置に支持台を設置し、鉄筋は試験体側面の型枠

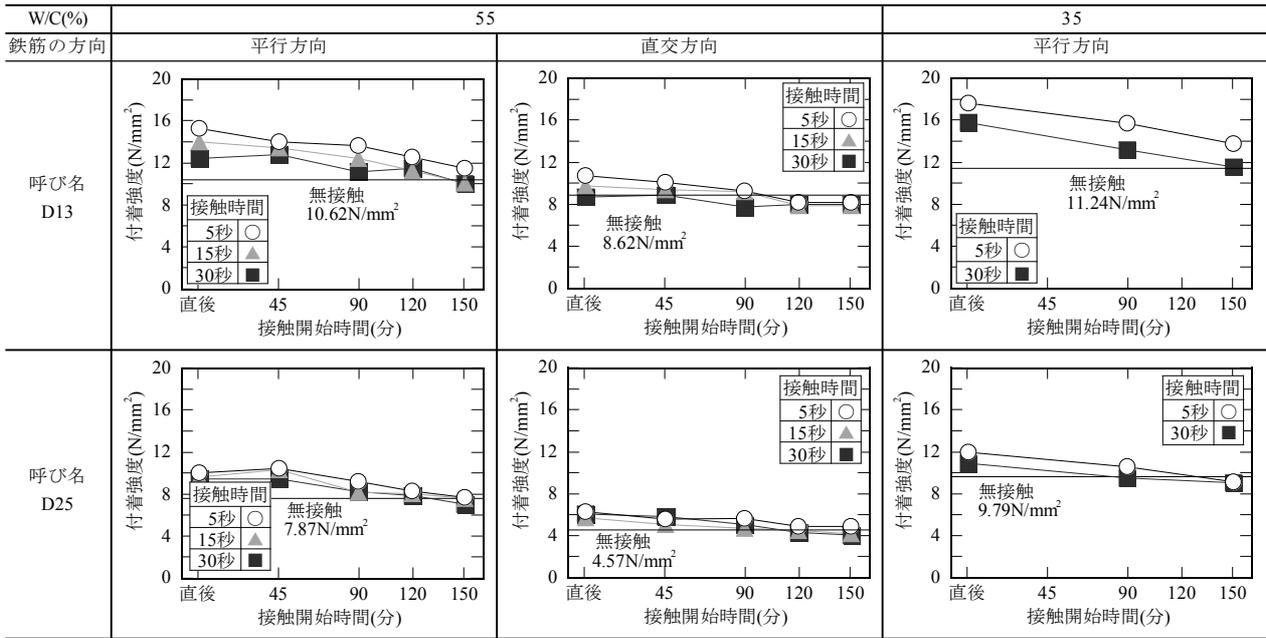


図-2 接触開始時間と付着強度の関係

と支持台の2点で固定した。

2.5 付着強度の算出

付着強度試験は、材齢28日においてJCI-SPC15⁷⁾に準じて行い、載荷速度を372N/secとした。付着強度は、(1)式により算出した。

$$\tau = \frac{P_{\max}}{\phi \cdot L} \quad (1)$$

ここに、 τ : 付着強度 (N/mm²)

P_{\max} : 最大引張荷重 (N)

L : 鉄筋の埋込み長さ (mm)

ϕ : 鉄筋周長 (mm)

なお、無接触試験体に対する付着強度比(以下、付着強度比とする)は、各々の付着強度を同一の鉄筋径の無接触試験体における付着強度で除して求めた。

3. 実験結果および考察

3.1 フレッシュコンクリートの性状および圧縮強度

スランプ、スランプフロー、空気量および材齢28日における圧縮強度を表-4に示す。スランプ、スランプフローおよび空気量は、目標値をいずれも満足する結果となった。

3.2 付着強度

接触開始時間と付着強度の関係を図-2に示す。付着強度は、鉄筋径の違いにかかわらず、鉄筋とコンクリート棒形振動機の接触開始時間が遅くなると、いずれの水準においても小さくなる傾向を示し、接触時間が長くなると付着強度が小さくなる傾向を示した。これは、既報の結果⁴⁾と同様の傾向であり、鉄筋とコンクリート棒形振動機の接触により鉄筋が振動して鉄筋の周囲において空隙が発生し、

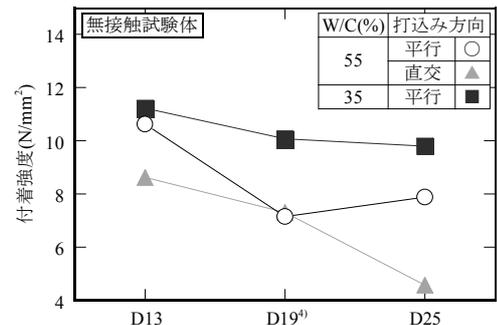


図-3 鉄筋径と無接触試験体の付着強度の関係

付着が脆弱になったためと考えられる。また、接触開始時間が早い場合の付着強度は、無接触試験体の付着強度よりも大きくなる傾向を示した。これは、コンクリート棒形振動機の振動が鉄筋を伝播して鉄筋の周囲のコンクリートが緻密になったためと考えられる。鉄筋径の異なる付着強度を比較すると、D25の付着強度は、D13の付着強度に比べて小さくなる傾向を示した。これは、鉄筋径が大きいほど鉄筋の表面積が大きくなるため、前述した鉄筋の周囲に発生する脆弱部の総面積が鉄筋径に比例して大きくなったためと考えられる。さらに、接触開始時間が早い場合の付着強度が無接触試験体の付着強度よりも大きくなる傾向は、D13の方がD25に比べて顕著であった。これは、鉄筋径が小さい方が、コンクリート棒形振動機の振動が鉄筋を伝播しやすく、鉄筋の周囲のコンクリートが締め固められ、コンクリートが緻密になったためと考えられる。

付着強度は、接触開始時間が90分以降になると無接触試験体よりも小さくなるものもあった。また、接触時間の違いが付着強度に及ぼす影響は、D25の方が小さくなる傾向を示した。これは、鉄筋径が大きいほどコンクリート棒

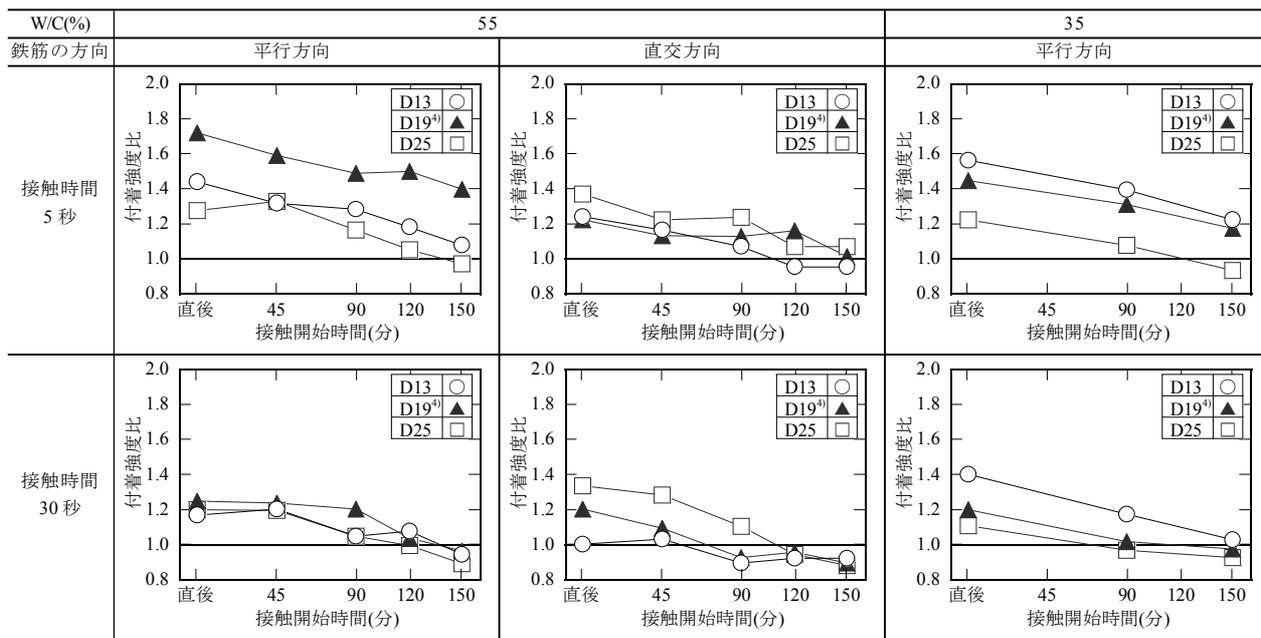


図-4 接触開始時間と無振動供試体に対する付着強度比の関係

形振動機の振動が鉄筋に伝播しにくくなったためと考えられる。

直交方向の付着強度は、接触開始時間および接触時間が同一のとき平行方向に比べて小さくなる傾向を示した。この傾向は、既報の結果⁹⁾と同様の傾向であり、打込み方向に対して直交方向に設置された鉄筋の下面に、コンクリートの沈下および気泡などによる空隙、ブリーディング水および水みちによる脆弱部の総面積が、水平方向の鉄筋に比べて大きくなったためと考えられる。

接触開始時間が90分以降の付着強度は、無接触試験体よりも小さくなるものもあった。これは、接触開始時間までの間にコンクリートの流動性が小さくなっているため、前述した鉄筋とコンクリート棒形振動機の接触により鉄筋が振動して鉄筋の周囲において空隙が発生し、付着が脆弱になる影響が顕著に表れたものと考えられる。このような結果から、鉄筋とコンクリート棒形振動機の接触開始時間が90分を超える場合、無接触試験体に比べて付着強度が低下する可能性を示唆している。

鉄筋径と無接触試験体の付着強度の関係を図-3に示す。ここでは、既報のD19の結果も合わせて図示している。無接触試験体の付着強度は、W/C=55%の平行方向を除いて、鉄筋径が大きくなると小さくなる傾向を示した。これは、神野ら⁹⁾の結果と同様の傾向であった。

3.3 付着強度比

接触開始時間と付着強度比の関係を図-4に示す。付着強度比は、鉄筋径の違いにかかわらず、鉄筋とコンクリート棒形振動機の接触開始時間が遅くなるといずれの水準においても小さくなる傾向を示した。これは、前述したように、鉄筋とコンクリート棒形振動機の接触により鉄筋が振

動して鉄筋の周囲において空隙が発生し、付着が脆弱になったためと考えられる。接触開始時間が早い場合の付着強度比は、1.0~1.7倍の範囲で大きくなる傾向を示した。また、平行方向の付着強度比は、W/C=35%のとき鉄筋径が大きいほど小さくなる傾向を示した。これは、鉄筋径が大きいほどコンクリート棒形振動機の振動が鉄筋に伝播しにくくなったためと考えられる。しかし、W/C=55%のとき、同様の傾向は見られなかった。直交方向の付着強度比は、鉄筋径が大きいほど大きくなる傾向を示し、これは、平行方向と異なる傾向であった。打込み方向に対して直交方向に設置された鉄筋の下面に生じるコンクリートの沈下および気泡などによる空隙、ブリーディング水および水みちによる脆弱部の総面積は、直交方向に比べて大きくなり、鉄筋径が大きいほどこの面積は大きくなるため、コンクリート棒形振動機の振動締め固めた影響が顕著に表れたものと考えられる。

接触開始時間が90分以降の付着強度比は、無接触試験体よりも小さくなるものもあり、無接触試験体の約0.9倍であった。これは、前述したように、接触開始時間までの間にコンクリートの流動性が小さくなっているため、前述した鉄筋とコンクリート棒形振動機の接触により鉄筋が振動して鉄筋の周囲において空隙が発生し、付着が脆弱になる影響が顕著に表れたものと考えられる。このような結果から、本実験の検討範囲である接触開始時間が150分までおよび接触時間が30秒までのとき、付着強度比は概ね0.9~1.7で変化する結果となった。

4. RC構造計算規準から算出した許容付着応力度の検討

4.1 検討概要

表-5 鉄筋のコンクリートに対する許容付着応力度⁵⁾

	長期		短期
	上端筋	その他の鉄筋	
異形鉄筋	$\frac{1}{15} F_c$ かつ $(0.9 + \frac{2}{75} F_c)$ 以下	$\frac{1}{10} F_c$ かつ $(1.35 + \frac{1}{25} F_c)$ 以下	長期に対する値の1.5倍
丸鋼	$\frac{4}{100} F_c$ かつ0.9以下	$\frac{6}{100} F_c$ かつ1.35以下	

1) 上端筋とは曲げ材にあってその鉄筋の下に300mm以上のコンクリートが打ち込まれる場合の水平鉄筋をいう。
2) F_c は、コンクリートの設計基準強度(N/mm²)を表す。

曲げ材における引張鉄筋の付着応力度の検討する上で鉄筋のコンクリートに対する許容付着応力度が重要となる。本検討は、実験に用いたコンクリートの調合より呼び強度および構造体強度補正値を設定し、これらから想定される設計基準強度を用いてRC構造計算規準に基づいて鉄筋のコンクリートに対する短期許容付着応力度(以下、短期許容付着応力度とする)を算出し、実験結果の付着強度と比較し検討した。

4.2 コンクリートの設計基準強度および短期許容付着応力度の算出

コンクリートの設計基準強度をコンクリートの調合および材齢28日における圧縮強度からW/C=55%のとき24N/mm²とし、W/C=35%のとき48N/mm²とした。また、短期許容付着応力度は、設定したコンクリートの設計基準強度から表-5の異形鉄筋「その他の鉄筋」の式を用いて算出した。その結果、短期許容付着応力度はW/C=55%のとき3.47N/mm²となり、W/C=35%のとき4.17N/mm²となった。

4.3 短期許容付着応力と付着強度

平行方向における短期許容付着応力と付着強度を図-5に示し、直交方向における短期許容付着応力と付着強度を図-6に示す。なお、図中には実測の圧縮強度を表-5の設計基準強度に代入し求めた短期許容付着応力度(圧縮強度から求めた短期許容付着応力度とする)を比較として示している。平行方向の付着強度は、本実験の接触開始時間が150分までおよび接触時間が30秒までの範囲において短期許容付着応力度を上回る傾向を示した。また、接触開始時間が遅く、接触時間が長い場合においても付着強度は短期許容付着応力度に比べて3N/mm²以上の大きい値を示しているため付着強度の性能を損なわないことを示した。

これに対して、直交方向の付着強度はいずれの場合においても設計基準強度から求めた短期許容付着応力度を上回っているものの、鉄筋にD25を用いた一部の水準において圧縮強度から求めた短期許容付着応力度を下回る傾向を示した。このことから、直交方向の付着強度は、接触開始時間が遅く、接触時間が長い場合に設計基準強度から求めた短期許容付着応力度に近い値を示し、曲げ材の引張鉄筋の付着応力度の検討するために圧縮強度から求めた短期許

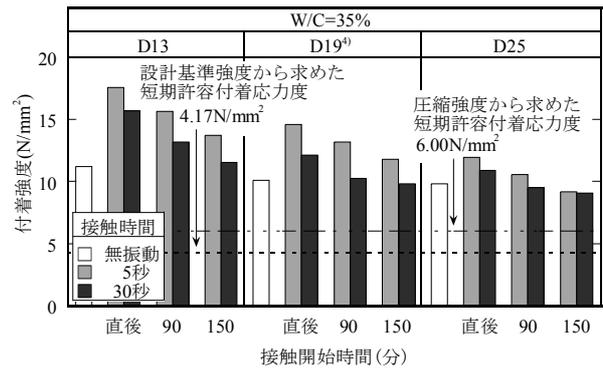
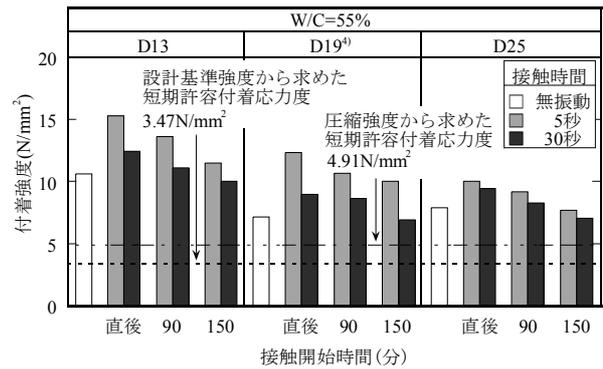


図-5 平行方向における短期許容付着応力と付着強度

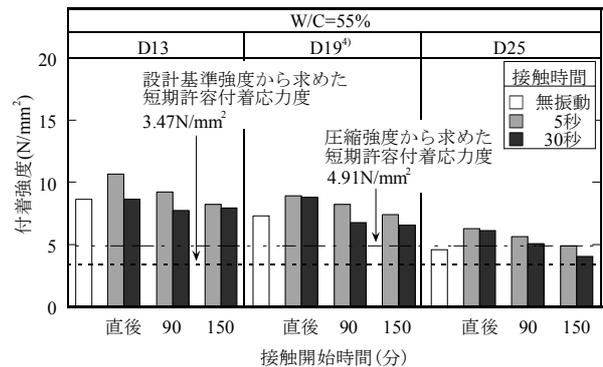


図-6 直交方向における短期許容付着応力と付着強度

容付着応力度を使用すると危険側となる可能性が示唆された。

5. まとめ

本研究は、鉄筋とコンクリート棒形振動機の接触における鉄筋径の違いが付着強度に及ぼす影響を明らかにするために、実施工において起こり得る要因を変化させて検討し、実験で得られた付着強度を用いて、RC構造計算規準の許容付着応力度と比較し検討したものである。その結果、得られた知見を以下に示す。

- (1) 鉄筋径を変えた付着強度は、鉄筋径が小さいほど小さくなる傾向を示し、接触開始時間が遅く、接触時間が長いほど付着強度が小さくなる傾向を示した。
- (2) 接触開始時間が早く、接触時間が短い場合の付着強度

は、無接触試験体よりも大きくなる傾向を示し、鉄筋径が小さいほどこの傾向が顕著であった。

- (3)鉄筋径を変えた直交方向の付着強度は、平行方向に比べて小さくなる傾向を示し、接触による影響は鉄筋径が大きいほど大きくなる傾向を示した。
- (4)付着強度は、RC構造計算規準から算出した短期許容付着応力度を上回る傾向を示したものの、鉄筋径が大きいほど短期許容付着応力度に近くなる傾向を示した。

以上の結果から、JASS 5¹⁾に解説されている打重ね時間間隔の限度内であっても鉄筋とコンクリート棒形振動機の接触した場合、付着強度を低下させる可能性があるため、鉄筋とコンクリート棒形振動機がやむを得ず接触した場合は、できるだけ接触時間を短くすることが重要である。なお、本論文は、本実験の結果から考察したものであり、締固め方法や凝結時間などの各種条件を変化させて検討する必要がある。

謝辞

本実験を行うにあたり日本大学およびものづくり大学の学生に多大なご協力を頂きました。ここに記し、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 日本建築学会:建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5 鉄筋コンクリート工事, 2009.2
- 2) 土木学会:2007年制定コンクリート標準示方書〔施工編:施工標準〕2007年制定, 2012.12
- 3) C.A.VOLLICK: Effects of Revibrating Concrete, Journal of the American Concrete Institute, pp.721-732, 1958.3
- 4) 中田善久, 大塚秀三, 宮田敦典, 新妻尚祐:鉄筋とコンクリート棒形振動機の接触を考慮したコンクリートの締固めにおける再振動に関する一考察, 日本建築学会構造系論文集, 第79巻, 第703号, pp.1227-1236, 2014.9
- 5) 日本建築学会:鉄筋コンクリート構造計算規準書・同解説 2010, 2010.2
- 6) 吉本彰, 白上博明:再振動コンクリートにおける強度増大の機構, セメント・コンクリート, No.365, pp.8-14, 1977.7
- 7) (社)日本コンクリート工学協会: JCI規準集2004(1997~2002年度), (15)ポリマーセメントモルタルの鉄筋に対する付着強さ試験方法(案), pp.254-255, 2004
- 8) 神野靖夫, 藤井栄, 森田司郎:割裂を伴う付着特性の寸法効果に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.747-748, 1986.8