

論文 再振動における振動方法の違いとコンクリートの力学的性質に関する一考察

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,コンクリートの締固めにおける再振動がコンクリートの力学的性質に及ぼす影響を明らかにするために,再振動がコンクリートの圧縮強度に及ぼす影響および鉄筋とコンクリートの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,振動テーブルおよび棒形振動機による再振動を行ったコンクリートの圧縮強度は,練上りからの時間が150分まで大きくなる傾向を示し,その増加量は10%程度であった。また,棒形振動機による再振動を行った鉄筋とコンクリートの付着強度は,大きくなる傾向を示したものの,加振時間が長くなると小さくなる傾向を示した。

キーワード:締固め,再振動,圧縮強度,付着強度,棒形振動機,振動テーブル

1. はじめに

コンクリート構造物の品質は,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。締固めにおける再振動は,一般的に先に打ち込まれた下層のコンクリートに,上層のコンクリートが打ち込まれたときの打重ね部分におけるコールドジョイントを防止する目的で行われる。そのため,日本建築学会「建築工事標準仕様書・同解説 鉄筋コンクリート工事 2009」¹⁾において「打重ね時間間隔の限度は,一律に定めることが難しいが,一般には,外気温が25℃未満の場合は150分,25℃以上の場合は120分を目安とし,先に打ち込んだコンクリートの再振動可能時間以内とする。」と解説されている。

この締固めにおける再振動は,Vollick C.A.²⁾の研究が代表的であり,この報告によると,再振動を行ったコンクリートの圧縮強度は大きくなる傾向を示すとしている。また,吉本ら³⁾は再振動が圧縮強度に及ぼす影響に加えて,再振動による強度増大の機構についても報告している。しかし,これらの締固めにおける再振動の研究は,再振動を行う時間が実施工において想定される打重ね時間間隔と大きく異なる範囲で検討している。また,これらの研究の大半が圧縮強度の検討に留まっており,鉄筋とコンクリートの付着強度について不明な点が多い。

一方,小林ら⁴⁾は,再振動がコンクリートと鉄筋の付着強度に及ぼす影響について丸鋼を用いた影響を検討している。しかし,現在の鉄筋コンクリート造において使用されている鉄筋は,異形鉄筋が主流であり,主筋に限っては異形鉄筋を使用することが規定されている¹⁾ものの,異形鉄

筋を用いた再振動の検討は見当たらず,再振動がコンクリートと異形鉄筋の付着強度に及ぼす影響は不明である。さらに,JASS 5¹⁾において,棒形振動機を用いて締固めを行う場合に「できるだけ鉛直に挿入して加振し,挿入間隔は60cm程度以下とする。」と解説されている。この挿入間隔は,公称棒径45mmの棒形振動機の有効範囲から定められているものの,コンクリート構造物の品質において,有効範囲内であっても棒形振動機からの距離は,コンクリートと鉄筋の付着強度に影響するものと考えられる。

そこで,本研究は,締固めにおける再振動がコンクリートの力学的性質に及ぼす影響を明らかにするために,圧縮強度および鉄筋とコンクリートの付着強度について検討したものである。ここでは,練上りから再振動までの時間,振動時間および振動距離を変化させて検討を行ったものである。

2. 再振動における振動方法の違いが圧縮強度に及ぼす影響

2.1 実験概要

(1)実験方法

再振動について吉本ら³⁾は,「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。」と記述しており,本研究における再振動は,吉本ら³⁾と同様に,打込み後,時間がある程度経過したのちの振動を再振動として扱っている。

*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 新妻興業 代表取締役社長

表 - 1 実験概要

W/C (%)	SL ¹ , SF ² (cm)	締固め方法	供試体寸法 (mm)	練上りからの時間(分)				
				直後	45	90	120	150
55	SL=18	突き棒	100×200	各々の時間で採取 2層詰め, 各層8回突き, 木づちでたたく				
35	SF=60							
55	SL=18	振動テーブル	100×200	練上り直後に採取 2層詰め, 各層8回突き, 木づちでたたく				
35	SF=60			15秒加振	15秒加振	15秒加振	15秒加振	15秒加振
55	SL=18	棒形振動機	150×300	練上り直後に採取 3層詰め, 各層18回突き, 木づちでたたく				
35	SF=60			15秒加振	15秒加振	15秒加振	15秒加振	15秒加振

1 スランブ, 2 スランブフロー

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: 3.16kg/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 尻内町産石灰岩砕石	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 スランブ, 2 スランブフロー, 3 AE減水剤を使用
4 高性能AE減水剤を使用

実験概要を表 - 1に示す。コンクリートは、練混ぜ直後に採取し、JIS A 1132:2006⁵⁾に準拠し、突き棒を用いて締固めを行った。再振動を行う時間は、練上り直後、45、90、120および150分の5水準とし、振動機に振動テーブルおよび棒形振動機の2種類を用いた。振動テーブルを用いた再振動は、100×200mmの鋳物製型枠を用いて、振動数6,000vpm、周波数200Hzの振動テーブルを用いて再振動を行った。棒形振動機を用いた再振動は、150×300mmの鋳物製型枠に、呼び径40mm(直径43mm)、振動数12,000vpm、振動数200Hzの高周波バイブレータを打込み面から約280mmの深さまで挿入し再振動を行った。なお、いずれの振動機も、加振時間を15秒の一定とした。

また、コンクリートを採取する時間がコンクリートの圧縮強度に及ぼす影響を明らかにするために、締固め方法を突き棒によるものと一定としてコンクリートを採取する時間を、練上り直後、45、90、120および150分の5水準で変化させた。

(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、凝結時間が異なるW/C=55%およびW/C=35%の2水準とした。また、練上り

直後におけるフレッシュコンクリートの目標値は、スランブを18cm±2.5cm、スランブフローを60cm±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。

2.2 実験結果および考察

(1)フレッシュコンクリートの性状

練上りからの時間とスランブおよびスランブフローの関係を図 - 1に示し、練上りからの時間と空気量の関係を図 - 2に示す。ここでは、コンクリートを練上り直後に採取して静置した試料および傾胴式ミキサによりかくはんした試料の2種類について測定した。練上り直後におけるスランブ、スランブ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。

(2)ブリーディング試験および凝結試験

練上りからの時間とブリーディング量の関係を図 - 3に示す。本実験に用いたコンクリートのブリーディング量は、収縮ひび割れの抑制のための目標値⁶⁾である0.3cm³/cm²以下をいずれも満足する結果となった。ブリーディング量は、W/C=55%が練上り300分、W/C=35%が練上り330分に認められなくなった。また、JASS 5¹⁾に解説されている打重ね時間間隔の限度の120分および150分におけるブリーディング量は、W/C=55%が最終的なブリーディング量のそれぞれ67%および80%であり、W/C=35%が最終的なブリーディング量のそれぞれ33%および66%であった。

練上りからの時間と貫入抵抗の関係を図 - 4に示す。始発時間は、いずれも練上り150分以降であり、本実験における再振動を行う時間は、始発前の範囲となった。

(3)圧縮強度

練上りからの時間と圧縮強度の関係を図 - 5に示す。振動テーブルおよび棒形振動機による再振動を行ったコンクリートの圧縮強度は、練上りからの時間が長くなるほど大きくなる傾向を示した。これは、再振動の作業中にブリーディングは目視により認められなかったものの、コンクリート中の水分の蒸発およびブリーディングによる見掛けの水セメント比が小さくなったこと、さらに、再振動により再振動を行う時間までに生じた骨材下面の空隙、ブリーディング水および水みちが取り除かれたこと⁷⁾が影響した

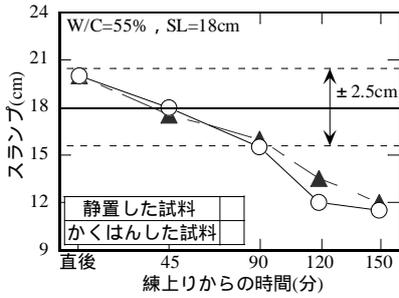


図 - 1 練上りからの時間とスランプおよびスランプフローの関係

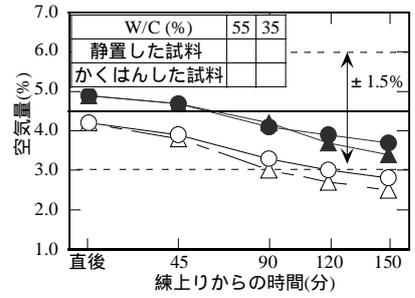
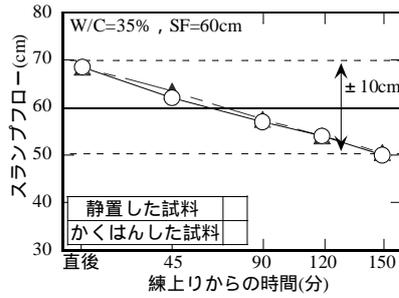


図 - 2 練上りからの時間と空気量の関係

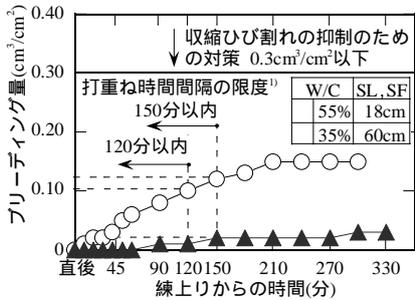


図 - 3 練上りからの時間とブリーディング量の関係

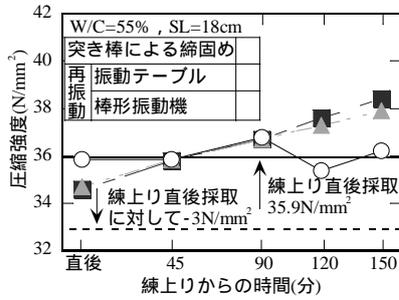


図 - 5 練上りからの時間と圧縮強度の関係

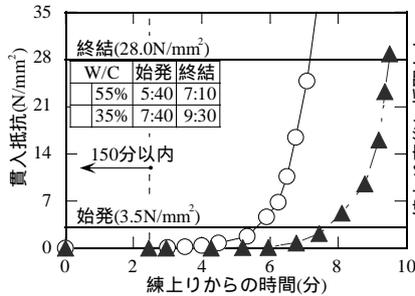
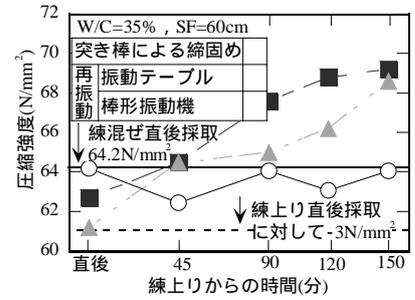


図 - 4 練上りからの時間と貫入抵抗の関係

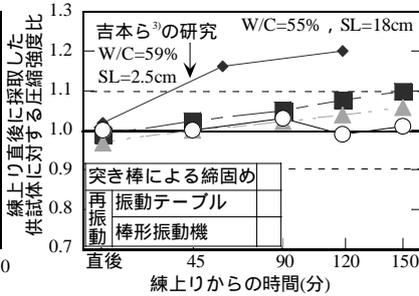
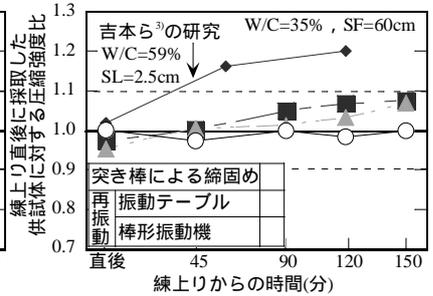


図 - 6 練上りからの時間と練上り直後に採取した供試体に対する圧縮強度比の関係



ためと考えられる。また、練上り直後において、振動テーブルおよび棒形振動機による再振動を行ったコンクリートの圧縮強度は、突き棒による締固めを行ったコンクリートに比べて小さくなる傾向を示し、これは、松本ら⁸⁾の結果と同様の傾向であった。しかし、いずれの低下量も、1997年のJASS⁵⁾に解説されている締固めなどの影響を考慮した構造体コンクリートの強度と供試体の強度の差の $F=3\text{N/mm}^2$ 以下であった。

突き棒による締固めを行ったコンクリートの圧縮強度は、練上りからの時間を変化させて採取しており、ばらつきがあるものの、練上り直後に採取した供試体といずれもほぼ同等の値を示した。

練上りからの時間と練上り直後に採取した供試体に対する圧縮強度比(以下、圧縮強度比とする。)の関係を図-6に示す。なお、図中には、吉本ら³⁾の結果を比較して示している。練上り直後において、振動テーブルおよび棒形振動機による再振動を行ったコンクリートの圧縮強度は、練上り直後に採取したコンクリートに比べて5%程度以内

で小さくなる傾向を示し、これは、吉本ら³⁾の結果と異なる傾向であった。しかし、振動テーブルおよび棒形振動機による再振動を行ったコンクリートの圧縮強度の練上りからの時間が長いほど大きくなる傾向は、吉本ら³⁾の結果と同様であり、本実験において10%程度の範囲で大きくなる傾向を示した。

3. 再振動における振動距離と振動時間が異形鉄筋の付着強度に及ぼす影響

3.1 実験概要

(1) 実験方法

実験概要を表-4に示す。鉄筋方向は、コンクリートの打込み方向に対して水平方向および垂直方向の2水準とした。加振距離は、水平方向において鉄筋から100mmおよび300mmの2水準とし、垂直方向において鉄筋から100mmの1水準とした。また、練上りから再振動までの時間は、練上り直後、45、90、120および150分とし、いずれも加振時間を5、15および60秒の3水準で変化させた。

(2) コンクリートの使用材料および割合

コンクリートの使用材料および割合は、前章2.と同様のものを使用した。

(3) 試験体の概要

試験体の概要を図-7に示す。試験体は、鉄筋(D19, SD295A)が埋込み深さが150mmとなるように型枠に設置した。また、コンクリートは練上り直後に打ち込み、棒形振動機を用いて不充填部が生じない程度に締め固めた。その後、任意の時間において、所定の位置に棒形振動機を挿入し再振動を行った。試験体は、打込みから48時間後に脱型し、試験体の寸法が150×150×150mmとなるようにコンクリート切断機を用いて切断し成形した。

(4) 付着強度の算出方法

付着強度試験は、JCI-SPC15¹⁰⁾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。

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

ここに、 σ : 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)

表-4 実験概要

鉄筋方向	加振距離 (mm)	W/C (%)	SL ¹ , SF ² (cm)	練上りから再振動までの時間(分)				
				直後	45	90	120	150
水平	100	55	SL=18					
		35	SF=60	5	5	5	5	5
	300	55	SL=18	15	15	15	15	15
		35	SF=60	60	60	60	60	60
垂直	100	55	SL=18	5	5	5	5	5
		35	SF=60	15	15	15	15	15
	300	55	SL=18	60	60	60	60	60
		35	SF=60	60	60	60	60	60

1 スランプ, 2 スランプフロー

: 鉄筋周長 (mm)

3.2 試験結果および考察

練上りから再振動までの時間と付着強度の関係を図-8に示す。練上りから再振動までの時間は、いずれの水準においても、長くなるほど付着強度が大きくなる傾向を示した。これは、前章2. 圧縮強度と同様な理由と考えられ、コンクリート中の水分の蒸発およびブリーディングによる見掛けの水セメント比が小さくなったこと、再振動までに発生した鉄筋周囲の空隙、ブリーディング水および水みちが再振動によって取り除かれたこと⁷⁾が影響したためと考えられる。また、鉄筋方向は、垂直方向の付着強度が水平方向に比べて小さくなる傾向を示した。これは、打込み方向に対して垂直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るためと考えられる。さらに、練上りから再

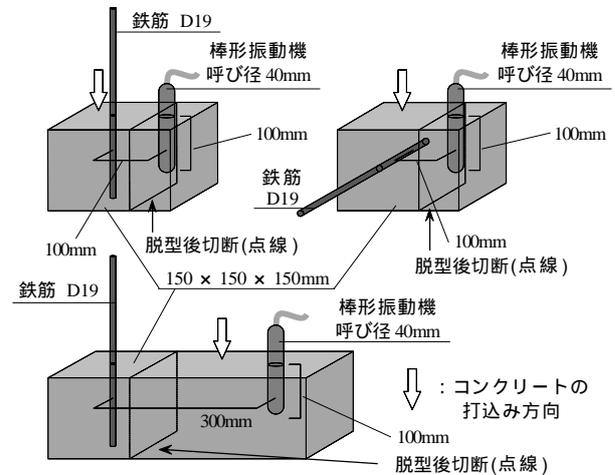


図-7 試験体の概要

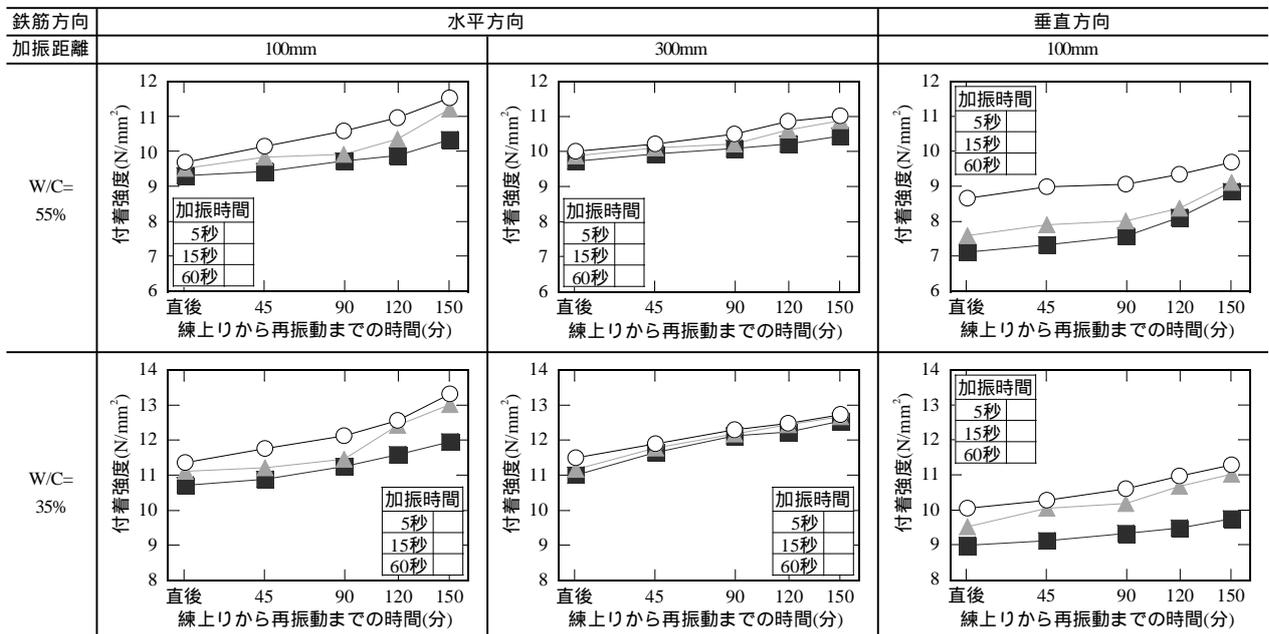


図-8 練上りから再振動までの時間と付着強度の関係

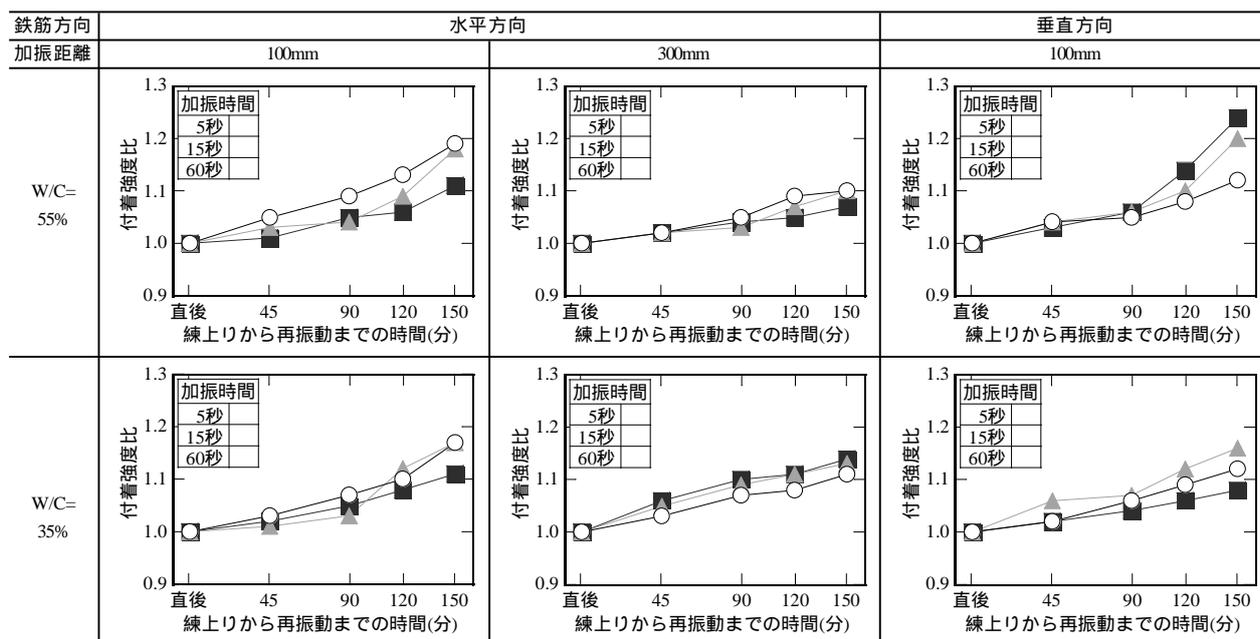


図 - 9 練上りから再振動までの時間と練上り直後に再振動を行った供試体に対する付着強度比の関係

振動までの時間が同一のときの加振時間は、長くなるほど付着強度が小さくなる傾向を示した。これは、過度な振動により、試験体内部のコンクリートが不均一になったこと¹⁾が付着強度に起因しているものと考えられる。

棒形振動機の加振距離は、加振距離 100mm の付着強度の変化量が加振距離 300mm に比べて大きくなる傾向を示した。これは、棒形振動機による振動の伝搬距離が影響したためと考えられる。

練上りから再振動までの時間と練上り直後に再振動を行った供試体に対する付着強度比(以下、付着強度比とする。)の関係を図 - 9 に示す。練上りから再振動までの時間は、いずれの水準においても、長くなるほど付着強度比が大きくなる傾向を示した。また、鉄筋方向は、垂直方向の付着強度比が水平方向に比べて小さくなる傾向を示した。これは、前述したように、垂直方向の鉄筋の下面に脆弱部が生じやすいため、再振動による鉄筋とコンクリートの界面性能の改善が顕著に表れたためと考えられる。

棒形振動機の加振距離は、加振距離 100mm の付着強度比の変化量が加振距離 300mm に比べて大きくなる傾向を示した。これは、前述したように、棒形振動機による振動の伝搬距離が影響したためと考えられる。

練上りから再振動までの時間と圧縮強度に対する付着強度(以下、付着強度 / 圧縮強度とする。)の関係を図 - 10 に示す。W/C=55% の付着強度 / 圧縮強度は、水平方向で 25 ~ 30% 程度であり、垂直方向で 20 ~ 25% 程度であった。これに対して、W/C=35% の付着強度 / 圧縮強度は、水平方向で 15 ~ 20% 程度であり、垂直方向で 15% 程度であった。これより、付着強度 / 圧縮強度は、圧縮強度が大きいほど小さくなる傾向を示した。この付着強度 / 圧縮強度の割合

が W/C によって異なるので更に検討する必要がある。

4. まとめ

本研究は、練上り 150 分までの範囲を対象とし、コンクリートの締固めにおける再振動がコンクリートの力学的性質に及ぼす影響を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) 振動テーブルおよび棒形振動機による再振動を行ったコンクリートの圧縮強度は、練上り 150 分までの範囲において、10% 程度の範囲で大きくなる傾向を示した。
- (2) コンクリートと鉄筋の付着強度は、練上り 150 分までの範囲において、再振動により大きくなる傾向を示した。
- (3) コンクリートと鉄筋の付着強度は、加振時間が長いほど小さくなる傾向を示し、加振距離が長くなるほど小さくなる傾向を示した。

本研究において、付着強度 / 圧縮強度は、圧縮強度が大きくなるほど小さくなる傾向を示した。これに関しては、今後、更なる検討が必要である。今後の展望として、スランプ、圧縮強度および凝結時間等が異なるコンクリートで検討を行っていく予定である。

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) C.A. VOLLICK: Effects of Revibrating Concrete, Journal of

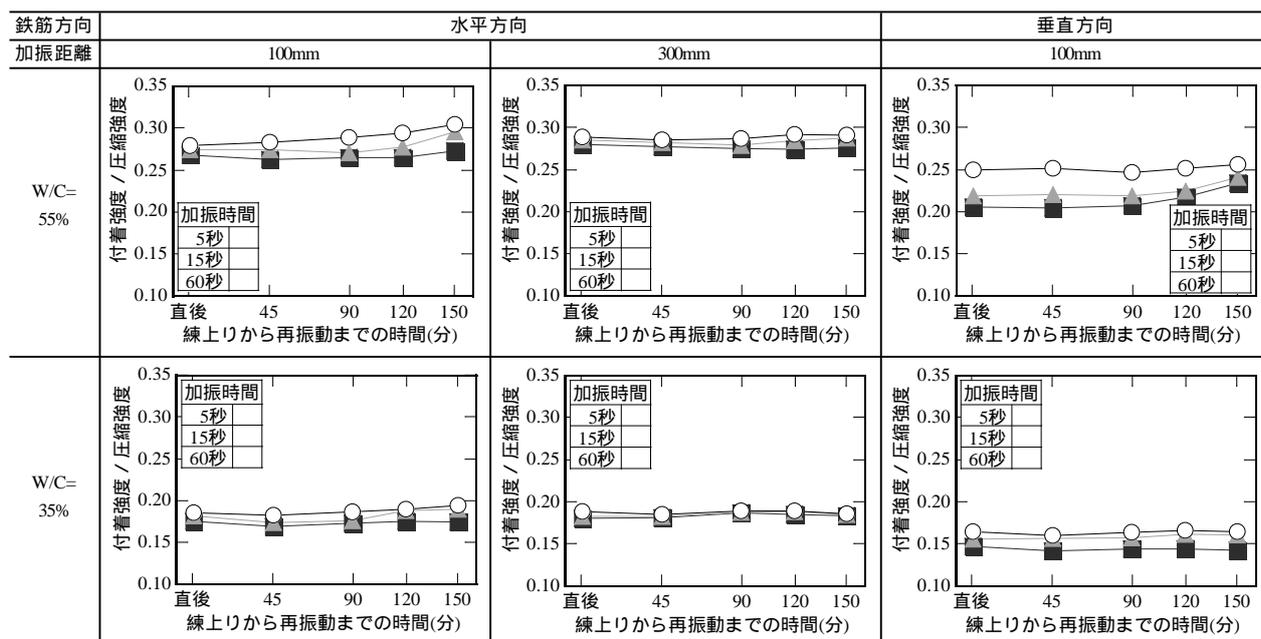


図 - 10 練上りから再振動までの時間と圧縮強度に対する付着強度の関係

- the American Concrete Institute , pp.721-732 , 1958.3
- 3) 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
 - 4) 小林制, 金子操: 鉄筋を利用した再振動工法に関する研究(コンクリート付着強度に関する実験), 日本建築学会論文報告集, 第 63 号, pp.233-236, 1959.10
 - 5) JIS A 1132:2006 コンクリートの強度試験用供試体の作り方, 2006
 - 6) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート構造物の収縮ひび割れ制御設計・施工指針(案)・同解説, 2006.2
 - 7) 技報堂出版: ネビルのコンクリートバイブル, pp.295-296, 2006.2
 - 8) 松本雅之, 榊田佳寛, 阿部道彦, 高塩美佐子, 新屋栄一: 高強度コンクリートの圧縮強度試験方法の標準化に関する研究 その6 型枠の種類, 締固め方法の影響, 日本建築学会学術講演梗概集, pp.1252-1253, 1990.10
 - 9) 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, 1997.1
 - 10) (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
 - 11) 張文博, 李柱国, 李潔勇, 吉村貢: 硬化コンクリートの力学性能に及ぼす振動締固めの影響に関する実験的考察, 日本建築学会中国支部研究報告書, 第33巻, pp.1-4, 2010.3