

論文 高強度コンクリートにおける再振動締固め方法の違いがブリーディングおよび表層品質に及ぼす影響に関する基礎的研究

三浦 明^{*1}・榎原 弘貴^{*2}・添田 政司^{*3}・久保田 崇嗣^{*1}

要旨：PC 配合における最適な再振動のタイミングや加振時間等の知見は少なく、感覚と経験に基づいた再振動締固めが行われている。本研究は、PC 配合を対象とし、再振動までの時間、加振時間および配筋状況の違いがブリーディングの発生量と硬化後のコンクリートの表層品質に与える影響について検討を行った。その結果、無配筋においては、再振動による明確なコンクリートの品質の向上は認められなかったが、配筋が密になるに従って、再振動によるコンクリートの表層品質の向上が認められた。最適な再振動のタイミングや加振時間が存在し、N 式貫入深さ 10~15mm の範囲、加振時間を 5~10 秒にて良好な結果をえることができた。

キーワード：再振動締固め、ブリーディング、N 式貫入深さ、コンクリート抵抗、圧縮強度

1. はじめに

フレッシュコンクリートの締固め作業において、最初に振動を与えてから一定時間置いて再び振動を与える再振動締固めが用いられる場合がある。適切な時期に再振動を行うことで、空隙や余剰水が少なくなり、圧縮強度、鉄筋との付着強度、沈下ひび割れ等に効果があると言われている¹⁾。また、再振動締固めの時期や加振時間、コンクリートの品質の改善効果については、これまでも種々の検討がなされており、再振動を行うことで、圧縮強度や付着強度が増加することやバイブレーションの間隔や加振時間等の施工方法に関する知見が得られている。しかし、再振動を行う時期に関してできるだけ遅い時期に行うと良いとされているが¹⁾、明確な再振動の開始時期と加振時間は検討されていない。また、これまでの検討の多くは水セメント比 55%程度と高く、流動性も高いもので記載されていない^{2) 3)}。そのため、一般的な高強度コンクリートにおける再振動締固めの仕様条件やコンクリートの改善効果に関する情報は極めて少なく、感覚と経験に基づいた加振が行われているのが現状である。特に、高強度コンクリートにおいては、既往の検討での配合とは異なり、水セメント比が小さくなるため、粉体量が多くなることでフレッシュコンクリートの粘性が高くなり、またブリーディング量も極めて少ないのが特徴である。よって、再振動締固めの最適な方法や硬化後のコンクリートの表層品質の特性は、これまで報告されている知見と差異が生じてくるものと予想される。また、その最適な施工方法や特性は、配筋状況によっても左右されると予想されることから、本研究では、種々の配筋条件のもとで打設後から再振動締固めを行うまでの時間

表-1 使用材料および物性

	種類	産地及び品名	粗粒率	密度(g/cm ³)
細骨材	砂	沓岐・粗砂	2.70	表乾 2.55
		沓岐・細砂	2.20	2.55
粗骨材	碎石	波多津2005	59.0	2.81
セメント	早強	—	—	3.14
混和剤	AE減水剤標準形I種	チューポールEX20	—	—

表-2 コンクリートの配合

セメント比 (%)	細骨材率 (%)	空気量 (%)	スランプ (cm)	単位量(kg/m ³)				
				水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤
46	45.2	4.5	8	164	357	780	1043	3.57

および加振時間の違いによるブリーディング量、四点電極法を用いたコンクリート抵抗、表面反発度法による圧縮強度による測定を行い、高強度コンクリートにおける再振動締固め方法の違いがブリーディングおよび表層品質に及ぼす影響について検討を行った。

2. 実験概要

実験で用いたコンクリートは、水セメント比 46%の早強ポルトランドセメントを用いた 7 日での設計強度 28N/mm²のものである。表-1, 2 には、使用材料の物性およびコンクリート配合を示す。打設時のスランプと空気量は、加水後 40 分にて、それぞれ 8.0cm と 4.5%であった。図-1 には、型枠および配筋状況を示す。実験に用いた型枠は、1500×900×600mm のものであり、D10 異形鉄筋を用いて型枠内に密配筋域、粗配筋域、無筋域を

*1 福岡大学大学院 工学部資源循環工学専攻 (学生会員)

*2 福岡大学 工学部社会デザイン工学科 助教 博士 (工学) (正会員)

*3 福岡大学大学院 資源循環工学 教授 博士 (工学) (正会員)

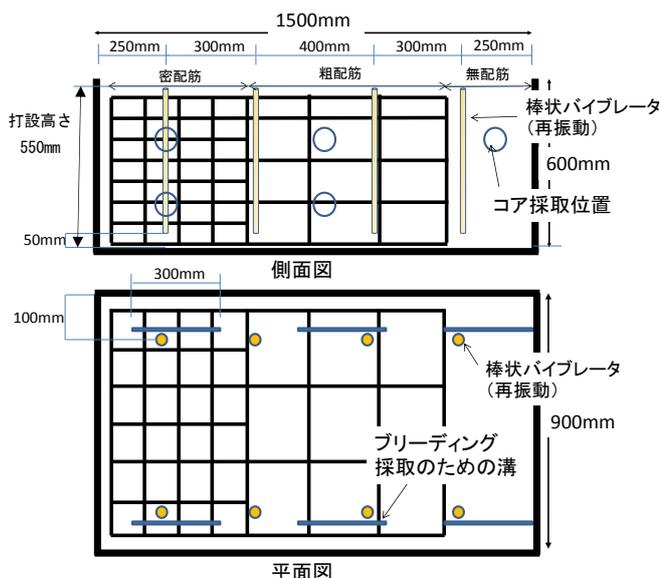


図-1 型枠形状および配筋状況



写真-1 コンクリートの打設状況



写真-2 ブリーディングの採取



写真-3 コンクリートコア採取状況

設け、それを3体作製した。写真-1は、打設状況を示しており、生コン車から直接コンクリートを投入しながら、孔径3.0cm、周波数50Hz~60Hzの棒状バイブレータを用いて、深さ500mm位置まで挿入し、全体的に均一に締め固めるため、1型枠辺り12箇所(15秒/1箇所)に振動を与えた。1層で高さ550mmのコンクリートを打設して金コテにて整形した。なお、本実験を実施した時の環境は、気温23.7℃、湿度66%であった。図-2には、型枠ごとの再振動までの時間および加振時間を示しており、1型枠ごとに、2つのエリアに分けて異なる再振動締め固め方法を行った。その内訳として、再振動なし域(略号A)、打設後から再振動を行うまでの最適な時間を検討するため、打設終了後からの再振動までの時間を10

平面図

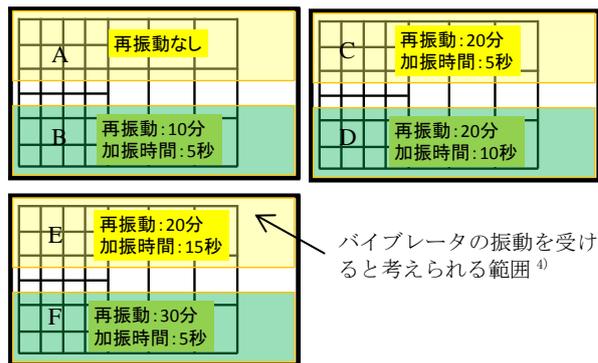


図-2 各エリアの再振動までの時間および加振時間

分(略号B)、20(略号C)、30分(略号F)とし、それぞれ図-1に示したバイブレータ挿入箇所において5秒の加振を行ったものと、加振時間の影響を検討するため、打設後から再振動までの時間を20分と一定とし、加振時間を5秒(略号C)、10秒(略号D)、15秒(略号E)に変化させたケースを設けた。なお、既往の研究により、今回用いたバイブレータの径および周波数において、挿入位置からの影響範囲は、最大で半径300mm程度と報告されており⁴⁾、今回の実験においては、さらに安全側に他エリアとのバイブレータ挿入間隔を700mm設けている。そのため、再振動を行う位置は、図-1および図-2に示すように、エリア間のバイブレータの影響を受けない位置として、エリアごとに4箇所まで深さ500mmまでバイブレータを挿入した。高強度コンクリートの配合では、整形面からブリーディング水は、非常に少ない。そのため、いずれも再振動終了後は、速やかに成形し、図-1、写真-2に示した箇所にてブリーディング水を採取するために所定のエリアごとに幅1cm、深さ1cm、長さ30cmの溝を掘り、そこに溜まったブリーディング水を成形後10分、20分、30分の時点でスポイトを用いて採取を行なった。併せてJIS A 1123の準拠したブリーディング試験も別途に実施している。なお、この試験では、ブリーディングは確認されなかった。打設後から再振動を行うまでのコンクリートのフレッシュ性状は、既往の研究を参考にして、N式貫入深さを指標として用いた⁴⁾。今回の打設後から再振動を行った10分、20分、30分でのN式貫入深さは、それぞれ200mm、150mm、100mmであった。打ち込みから5時間後には、コンクリートのある程度の硬化を確認した上で、型枠内に水を張り養生を行った。脱型は、いずれも7日後に行い、その後は材齢14日まで屋外静置させて、試験体の側面の外観観察および非破壊試験としてトレント法、四点電極法、表面反発度計を用いて、コンクリート面に形成された径ごとの気泡数、透気係数、コンクリート抵抗、圧縮強度、による表層品質の検討を行った。トレント法は、各配筋

域で図-1 に示すコア採取位置で測定を行なった。また、四点電極は、測定面に対し高さ方向に 11 箇所および横方向に 6 箇所の計 66 箇所で測定を行った。一方の、表面反発度計の測定は、測定面に対し、均等に 10cm×10cm の範囲を設け、その範囲ごとに 5 箇所の測定を行い平均値とした。さらに、材齢 28 日後には、材齢によるコンクリート表層品質の経時変化を確認するため、同位置にて四点電極法により再度コンクリート抵抗の測定を行うと共に、写真-3 および図-1 に示す位置にてφ7.5cm×90cm の断面を貫通させたコンクリートコアを採取した。

3. 結果および考察

図-3 は、成形後から再振動による加振までの時間がブリーディング発生量に与える影響を配筋状況ごとに示したものである。なお、別途 JIS A 1123 に準拠して実施した試験においては、ブリーディングの発生は確認されていない。また、ブリーディング採取のための溝以外の整形面においてもブリーディング量は極めて少なく、スポイドによる採取は困難であった。ただし、採取溝においては、ブリーディングの発生が認められた。まず、再振動無しの配筋状況によるブリーディング発生量の違いは、配筋が密になるに従って減少する傾向を示し、鉄筋

がブリーディング水の上昇を阻害していることが分かった。また、今回の検討範囲では、無筋域においては、再振動までの時間による明確な差は見られなかったのに対し、鉄筋がある場合には、再振動無しよりも明らかにブリーディング発生量が多くなるケースが確認された。粗配筋域において、再振動までの時間 10 分 (N 式貫入 200mm) では、再振動なしと同程度であったのに対し、20 分 (N 式貫入深さ 150mm), 30 分 (N 式貫入深さ 100mm) と時間間隔が長くなると、加振直後から急激にブリーディングの発生量が増加しており、その量も再振動なしに比べて明らかに多くなる結果を示した。また、加振から 30 分程度で両者とも収束を示し、最終量も両者の間に明確な違いは確認されなかった。さらに密配筋になると、加振間隔 10 分、20 分でのブリーディング量は、再振動無と同程度であったのに対し、30 分になるとブリーディング量の増加が認められた。これは、フレッシュ性状が低下したため、振動がコンクリートを介して鉄筋に伝搬しやすくなったことで、再振動の影響が明確に現れたものと推察される。以上のことから、配筋状況および再振動を行う時間によって、ブリーディング発生に与える影響が異なってくることを示され、配筋状況に関らず N 式貫入深さ 10mm~15mm 程度のフレッシュ性状が一つの

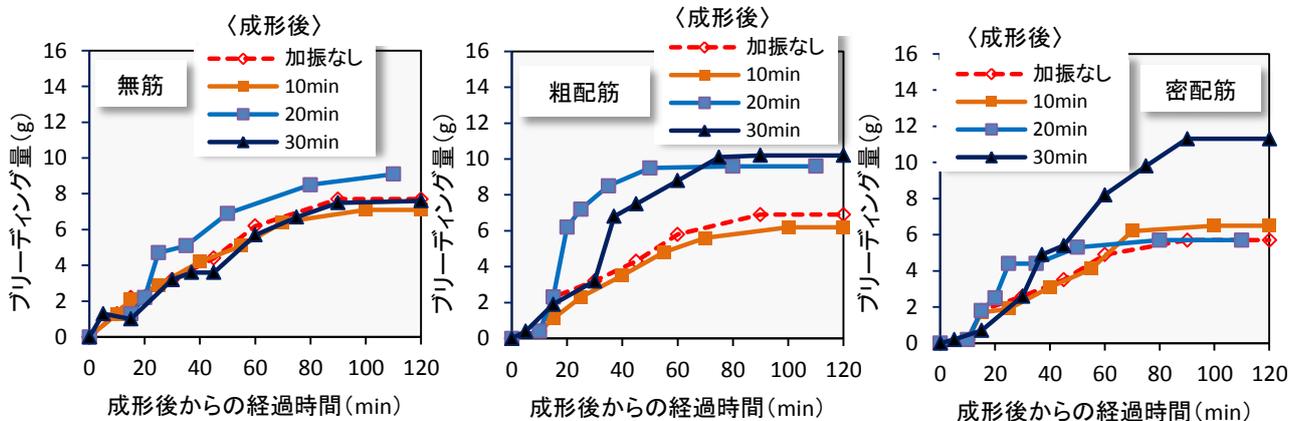


図-3 再振動までの時間がブリーディング発生に及ぼす影響 (加振時間 5 秒)

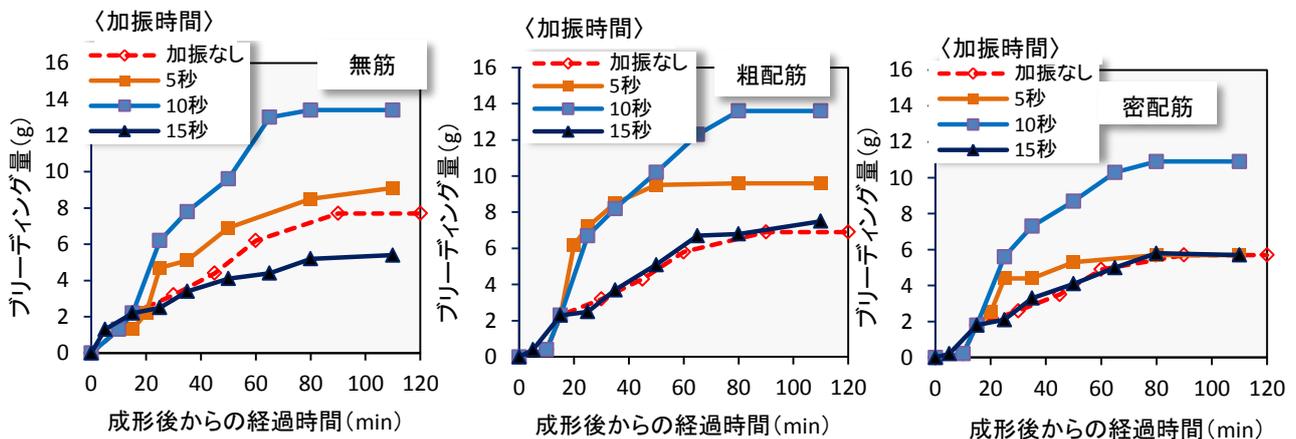


図-4 加振時間がブリーディング発生に及ぼす影響 (成形後 20 分)

目安になるものと思われる。

図-4は、再振動までの時間を20分とし、加振を0, 5, 10および15秒間行った場合の配筋ごとのブリーディング発生量を示す。無筋における加振時間5秒, 10秒でのブリーディング量は、加振直後から増加し、再振動無しに比べて多くなっている。特に、10秒間の加振を行った場合には、再振動無しの1.7倍程度となっていた。一方の、15秒と比較的に長く加振を行った場合には、むしろ再振動無しよりも減少する結果を示した。一方の、粗配筋域においては、加振時間5秒, 10秒にてブリーディングが増加しているが、15秒になると再振動無しと同程度となっている。さらに、密配筋域になると、加振時間5秒では、加振直後からブリーディング量の増加が認められたが、収束量には振動無しと違いがなかった。また、加振時間10秒では、明らかなブリーディングの増加が認められたが、15秒になると再振動無しと同等であった。以上のことから、いずれの配筋状況においても加振時間10秒において、明らかなブリーディング増加が認められたが、加振時間15秒と長くなった場合には、いずれも再振動の影響を確認できなかった。これは、コンクリートがパイプレータを中心に周りに広がろうとするため、加振時間が長くなった場合には、引き抜き後のパイプレータ痕をコンクリートで十分に充填できない状況となり、その挿入跡にブリーディングが集積したものと思われる。この点については、加振位置を貫通するコンクリートコアを用いて、詳細分析により実質の水セメント比や空隙率を測定することで明らかにする予定である。

図-5は、再振動までの時間（A：再振動無し、B：10分、C：20分、F：30分）がコンクリート表面気泡に与える影響を径ごとにその数を示したものである。加振時間は、いずれも5秒である。再振動無しにおける気泡数の発生状況を見ると、いずれも気泡径が大きくなるに従って、数は減少する結果を示した。また、10mm以下の気泡数は、配筋状況による明確な違いは確認されていないが、10mm以上になると配筋が密になるに従って、数は減少していた。鉄筋が余剰水の移動を阻害しているものと予想され、それに伴い型枠面に移動する余剰水も少なくなり、結果として10mm以上の気泡溜まりが減少したものと考えられる。次に、再振動までの時間の影響について見ると、1~3mm程度の微小径の気泡数は、10分後の加振条件にて減少する傾向を示しているが、その他の時間間隔においては、その傾向を確認することはできなかった。3~5mm, 5~10mm程度の気泡数では、再振動までの時間間隔による明確な違いはなく、配筋条件の違いによる傾向も確認できなかった。ただし、外観への影響が強い10mm以上の空隙径では、再振動を行うことで、いずれの場合にも気泡数が減少する結果が得られ

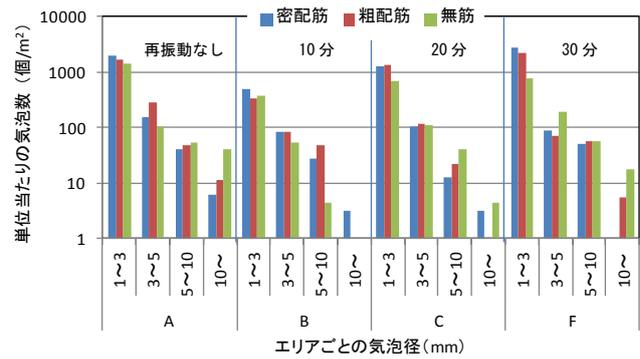


図-5 加振までの時間ごとの表面気泡数

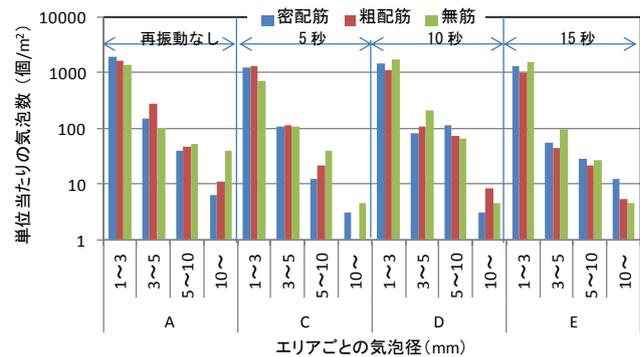


図-6 加振時間ごとの表面気泡数

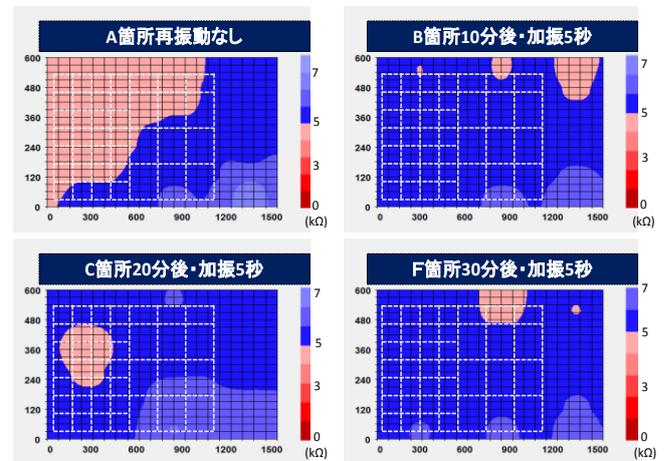


図-7 再振動まで時間が表層抵抗に及ぼす影響

ている。

次に、図-6には、再振動までの時間間隔を5秒と一定下での加振時間（A：再振動無し、C：5秒、D：10秒、E：15秒）の違いが気泡数に及ぼす影響について示したものである。加振時間に関らず、気泡径が大きくなるに従って、その数は減少する傾向を示した。10mm以下の気泡径では加振時間の影響は確認できなかったが、それ以上になると、いずれの加振時間においても気泡数の減少が確認された。以上のことから、再振動には、型枠面に溜まった気泡を上へへと移動させる気泡抜き効果があるものと考えられ、いずれの仕様条件でも、コンクリ

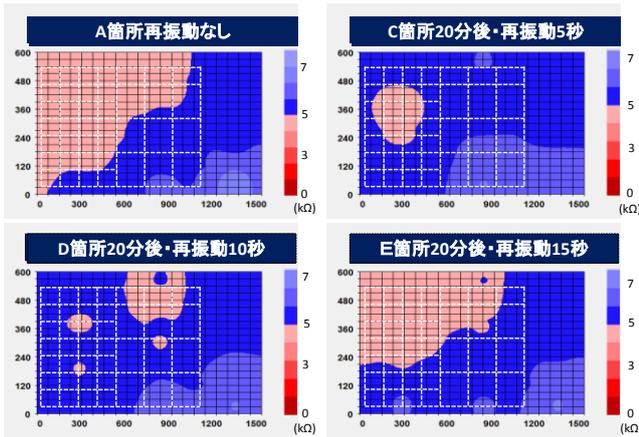


図-8 加振時間が表層抵抗に及ぼす影響

ートの外観を改善できることが分かった。

図-7は、加振時間5秒と一定とし、再振動までの時間がコンクリート表層抵抗に及ぼす影響について、配筋エリアの境界付近についても評価するためにコンター図によって示したものである。この結果、再振動無しのコンクリート表層抵抗は、配筋無しにおいて高さ方向の明確な差は確認されなかったが、配筋有りのエリアでは、打設上面および配筋が多くなるに従ってコンクリート抵抗が減少する傾向を示した。一方の、加振を行った場合には、タイミングによって、コンクリート抵抗分布の傾向が若干異なっているが、配筋エリアにおいて顕著な抵抗の増加が認められている。

図-8は、再振動までの時間を20分とし、加振時間の違いがコンクリート表層抵抗に及ぼす影響について示す。加振時間5秒、10秒において、配筋域におけるコンクリートの表層抵抗は、増加傾向を示しているが、15秒になると、むしろ逆に低下している。これは、図-4に示したブリーディングの発生量と類似しており、その結果では、加振が長くなると再振動無しのものと同程度になっている。次に、配筋状況の違いについて見ると、配筋無し域においては、いずれも再振動の有無による違いは見られなかったのに対し、粗鉄筋域では、加振時間5秒にて最も抵抗値の増加を確認した。一方の、密配筋域では、加振時間10秒にて最も抵抗値の増加がする結果を示した。コンクリート表層抵抗に与える加振時間の影響は、配筋状況によって異なることが分かった。表-3は、配筋状況に分けてコンクリート抵抗値の平均値および標準偏差を示したものである。この結果、抵抗値は、いずれの再振動条件においても再振動無よりも増加しており、特に、再振動までの時間20分(N式貫入深さ150mm)、加振時間5秒において抵抗値が最も高くなっている。また、密配筋域においては、いずれも顕著な抵抗値の増加傾向を示している。ばらつきを示す標準偏差においては、

表-3 コンクリート抵抗値の平均値、標準偏差

再振動	配筋	最大 (k Ω)	最小 (k Ω)	平均 (k Ω)	全体平均 (k Ω)	標準偏差 (k Ω)
A なし	無	9.15	5.05	5.99	5.30	1.19
	粗	7.15	4.40	5.19		0.73
	密	6.20	4.20	4.72		0.55
B 10分/5s	無	7.60	4.60	5.59	5.43	0.89
	粗	7.40	4.90	5.43		0.69
	密	6.15	4.90	5.29		0.35
C 20分/5s	無	7.20	5.15	5.85	5.70	0.69
	粗	7.30	5.25	6.11		0.74
	密	6.40	4.35	5.13		0.67
D 20分/10s	無	7.65	4.75	5.93	5.50	0.77
	粗	7.45	4.10	5.37		0.94
	密	5.75	4.40	5.20		0.41
E 20分/15s	無	7.60	5.00	5.97	5.37	0.72
	粗	6.60	4.40	5.25		0.61
	密	6.80	3.80	4.88		0.85
F 30分/5s	無	7.10	4.80	5.56	5.42	0.73
	粗	6.80	4.50	5.31		0.61
	密	6.90	4.80	5.40		0.56

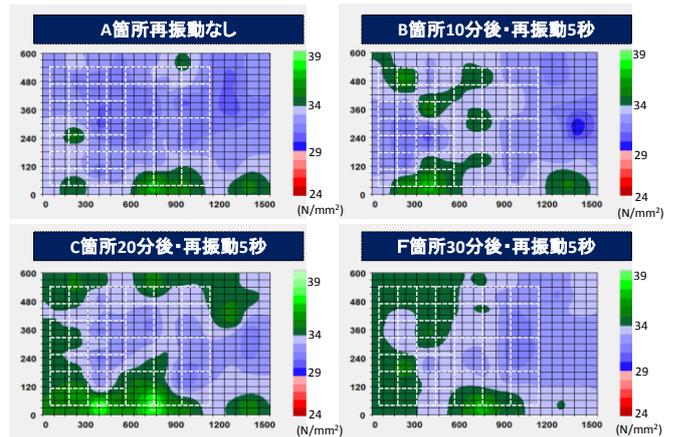


図-9 再振動までの時間が表面強度に及ぼす影響

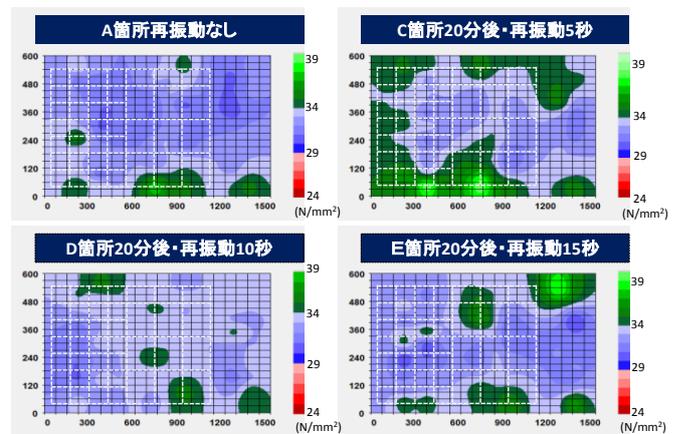


図-10 加振時間が表面強度に及ぼす影響

いずれも再振動を行うことで小さくなる傾向を示し、コンクリート全体を均一にする効果があることが分かった。

図-9は、加振時間を5秒と一定とし、再振動までの

時間が表面強度に及ぼす影響について示したものである。コンクリートの反発度の測定方法は JIS A 1155 に準拠し測定を行い、圧縮強度は日本材料学会式の推定式である式(1)を用いて算出した。

$$F_c = -18.0 + 1.27R \quad (1)$$

F_c : コンクリート圧縮強度(N/mm²)

R : 反発度

再振動無における表層強度は、いずれにおいても底面側で高くなる傾向を示した。一方の、再振動を行った場合には、再振動無と比べて大小はあるものの、全体的に表面強度が増進する傾向を示した。特に、密配筋域における再振動までの時間 20 分、30 分にて、その傾向は顕著に表れている。

図-10 には、再振動までの時間を 20 分とし、加振時間が表面強度に与える影響について示している。この結果、いずれの加振時間においても、全体的に強度増進を示す傾向が確認された。特に、5 秒間の加振にて顕著であった。PC 配合においても再振動を行うことで表面強度が高くなるのが分かった。ただし、いずれの場合にも今回の試験においては、既往の研究において報告されているような顕著な強度増進は確認できなかった²⁾。

表-4 には、配筋状況に分けて表面強度の平均値および標準偏差を示したものである。この結果、再振動条件 B から F のいずれにおいても、再振動なしに比べても 0.5 ~ 1.2N/mm² 程度の表層強度が増加する結果を示し、再振動までの時間 20 分 (N 式貫入深さ 15mm) で、最大値を示した。バラツキを示す標準偏差は、いずれの場合も大差がなかった。以上のことから、これまでの結果を総合的に考えて、再振動を行うタイミングの指標として N 式貫入深さ 10mm~15mm の範囲で加振時間 5 秒程度がコンクリート品質を向上させるのに最適であると考えられたが、コンクリートの耐久性を飛躍的に向上させるまでには至らなかった。

なお、今回の試験においては、別途トレント法による透気係数の測定も試みたが、今回の試験に用いたコンクリートが富配合であったため、いずれの測定位置においても測定限界値となり、再振動締固めによる違いを確認することができなかった。

4. まとめ

種々の配筋条件のもとで再振動締固めの施工方法を変えて、ブリーディング発生量や非破壊試験にて硬化後のコンクリート表層品質について検討を行った結果、以下の知見を得られた。

(1) 配筋が密になるに従って、再振動がブリーディング、

表-4 表面強度の平均値、標準偏差

再振動	配筋	最大 (N/mm ²)	最小 (N/mm ²)	平均 (N/mm ²)	全体平均 (N/mm ²)	標準偏差 (N/mm ²)
A なし	無	37.0	30.0	32.3	32.6	1.7
	粗	41.0	27.5	33.0		2.9
	密	38.0	29.5	32.6		2.0
B 10分/5s	無	36.0	27.0	32.4	33.1	2.5
	粗	37.0	31.0	33.4		1.7
	密	40.0	29.0	33.5		3.2
C 20分/5s	無	39.0	30.0	33.6	33.8	2.3
	粗	42.6	28.0	33.8		3.3
	密	43.0	30.2	34.1		2.8
D 20分/10s	無	37.0	30.0	33.2	33.2	1.7
	粗	38.0	31.0	33.7		1.7
	密	37.0	30.0	32.8		1.8
E 20分/15s	無	42.0	26.0	33.3	33.1	3.9
	粗	39.5	30.0	33.4		2.6
	密	38.0	29.0	32.7		2.4
F 30分/5s	無	35.0	31.0	32.8	33.4	1.1
	粗	41.0	31.0	33.3		2.3
	密	38.0	31.0	34.2		1.4

コンクリート抵抗、表面強度に与える影響が大きくなる。

- (2) 今回の検討範囲では、いずれの再振動の施工条件においてもコンクリート表面の 10mm 以上の気泡を低減できる。
- (3) 最適な再振動の施工条件が確認され、N 式貫入深さ 10mm~15mm の範囲で加振を 5 秒の場合に、ブリーディング発生量およびコンクリート表層抵抗、表面強度が増加した。
- (4) 加振時間が 15 秒と長くなると、ブリーディング、表層抵抗、表面強度が再振動無と同等もしくは、それ以下になる可能性がある。

参考文献

- 1) 土木学会：2012 年制定コンクリート標準示方書【施工編】，pp.119，2012
- 2) 田畑壮典，成島誠一，二村憲太郎，伊代田岳史：再振動締固めがコンクリートの強度・耐久性に与える影響，第 38 回土木学会関東支部技術研究発表会，V-20
- 3) 三坂岳広，宇野洋志城，守山亨，森下全人：再振動締固めによるコンクリートの均一性の確保に関する考察，土木学会第 66 回年次学術講演会，VI-114，pp.227-228，2011
- 4) 水田実，加藤淳司，寺澤正人：再振動締固めの強度増進効果および実施方法に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.33，No.1，pp.1373-1378，2011