

論文 振動締固めによるかぶりコンクリートの充填挙動と品質変動に関する実験的研究

早川 健司*1・加藤 佳孝*2

要旨：コンクリート構造物の耐久性を確保するためには、かぶりコンクリートの品質が重要であり、施工に伴うコンクリートの品質変動を把握する必要がある。本研究では、品質評価試験として物質移動抵抗性を直接評価できる表面透気性試験を主に用い、かぶりコンクリートの品質変動に及ぼす振動締固めによる鉄筋間隙通過の影響等を実験的に検討した。その結果、振動締固めによるかぶりコンクリートの充填挙動を示すとともに、表面透気性はブリーディングの影響を受けること、鉄筋間隙通過に伴い粗骨材量は変化するが直接表面透気性に影響を及ぼさないことなどを示した。

キーワード：かぶりコンクリート、振動締固め、材料分離、表面透気性、反発度

1. はじめに

コンクリート構造物の耐久性は、主に劣化因子の物質移動抵抗性に依存するため、かぶりコンクリートの品質が特に重要となる。コンクリート自体の物質移動抵抗性は主に水セメント比に支配されるが、実構造物のかぶりコンクリートの品質は、同じ水セメント比のコンクリートを使用した場合であっても、打設や締固め、養生などの施工方法によって異なることが知られており、筆者らも施工方法がかぶりコンクリートの表面透気性に影響を及ぼすことを確認している¹⁾。

締固め方法については、コンクリート標準示方書で内部振動機の挿入間隔や締固め時間の目安が示されているが、適切な締固め方法は部材寸法、配筋条件、また使用する内部振動機の能力、またコンクリートの施工性能によって異なる。また、耐久性上重要となるかぶりコンクリートの打設、締固めでは、かぶり部に直接コンクリートを打設できず、内部振動機も挿入できないことが多いため、内部に打設されたコンクリートをかぶり部に流動させ、空気泡を除去して密実な状態にする必要がある。打ち込み方法等によるコンクリートの物性変化を検討した既往の研究²⁾では、無筋コンクリートを用いたものが多く、かぶりコンクリートに着目し、配筋の影響を検討した研究³⁾⁴⁾は比較的少なく、施工方法とかぶりコンクリートの品質、特に物質移動抵抗性の関係に関する知見は十分とはいえない。

施工によって生じるコンクリート品質変動としては、打設や鉄筋間隙の通過、過剰な締固めによって生じる粗骨材の分離、また打設完了後に生じるブリーディングに大別できると考えられる。本研究では、振動締固めによってかぶり部に流動、充填される場合のかぶりコンクリート品質変動に及ぼす締固めの影響を明らかにするこ

とを目的として、単位水量を変化させスランブの異なるコンクリートを用い、かぶりコンクリートの振動締固め挙動ならびにその品質変動に関して実験的に検討した。実験では、まず、鉄筋の間隙通過を伴うかぶり部の充填挙動、またこれに及ぼす配筋条件の影響を、コンクリート中の応答加速度等を測定して調べた。そして、最適な締固め時間で作製した供試体、また再振動締固めを実施した供試体を対象とし、表面透気性試験、超音波伝播試験、反発硬度の測定を実施し、かぶりコンクリートの品質変動について検討を加えた。

2. 実験概要

2.1 使用材料および配合

表-1に、使用材料およびコンクリートの配合を示す。実験に用いたコンクリートの配合は、水セメント比ならびに単位粗骨材量を一定、単位水量を155, 170, 185kg/m³とし、スランブを8~18cm程度に変化させた。また、ブリーディングの影響を比較検討するため、配合W170Vは増粘剤を混入してノンブリーディングとした。コンクリートは20℃の室内において容量100リットルの強制練りパン型ミキサを用い、練混ぜ時間を計2分30秒として製造した。製造したコンクリートは、スランブ、空気量を測定するとともに、JIS A 1123 準拠したブリーディング試験を実施した。

2.2 充填挙動の確認方法

図-1に、かぶりコンクリートの充填挙動を調べるための供試体について示す。供試体の寸法は280×350×600mmであり、端面に鉄筋をあき35mmと100mmの2条件で配置した。

型枠内には予め加速度センサを図に示す位置に配置し、型枠面には間隙水圧計を設置した。この型枠の鉄筋

*1 東急建設(株) 土木技術部 工修 (正会員)

*2 東京大学 生産技術研究所 准教授 博(工) (正会員)

表-1 使用材料およびコンクリートの配合

記号	Air (%)	W/C (%)	s/a (%)	単体量 (kg/m ³)					
				W	C	S	G	混和剤	増粘剤
W155	4.5	55	48.3	155	282	882	963	0.71	-
W170	4.5	55	46.5	170	309	821	963	0.77	-
W185	4.5	55	44.6	185	336	761	963	0.84	-
W170V	4.5	55	46.5	170	309	821	963	3.09	0.3

セメント：普通ポルトランドセメント（密度 3.16g/cm³）
 細骨材：静岡県掛川産陸砂（表乾密度 2.57g/cm³，吸水率 1.84%）
 粗骨材：東京都八王子産硬質砂岩砕石 2005（表乾密度 2.62g/cm³，）
 混和剤：リグニンスルホン酸系 AE 減水剤標準型（配合 W155，W170，W185）
 ポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤，セルロース系増粘剤（配合 W170V）

内部に型枠上面までコンクリートを投入した後，供試体中央部分にφ40mmの高周波バイブレータ（出力 250W，振動数 220Hz，加速度：無負荷時の振動機先端から 15cm で約 60G）を型枠底面から約 50mm の位置まで挿入した。締固め状況は目視観察するとともに，締固め開始からの加速度および間隙水圧を 6000Hz のサンプリング間隔で計測した。なお，充填挙動に関する実験は配合 W155，W170，W185 について実施した。

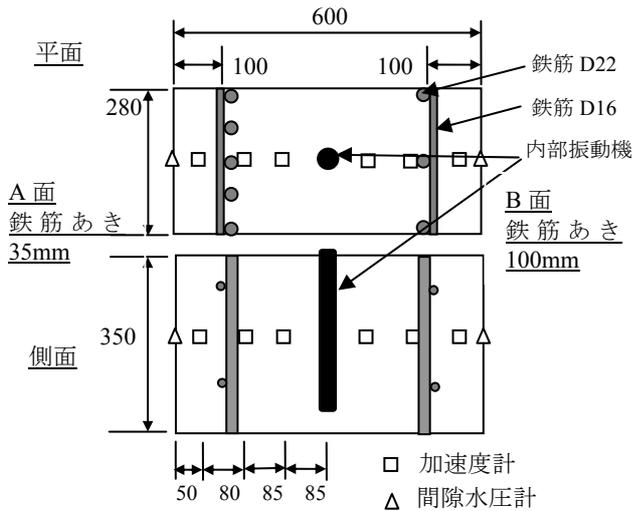


図-1 充填挙動に関する供試体の概要

表-2 供試体作製条件

記号	配合	締固め時間	配筋	再振動
No.1	W155	25 秒	あき 35mm /無筋	なし
No.2	W170	15 秒		1.0h
No.3	W185	10 秒		2.5h
No.4	W170V	25 秒		なし

2.3 かぶりコンクリートの品質評価試験

表-2 に供試体の作製条件を示す。供試体は充填挙動の検討に用いたものと同じ寸法であり，図-1 と同様に，A 面にはあき 35mm で鉄筋を配置した。充填挙動に関する試験の結果，あき 100mm で鉄筋を配置した場合には，

表-3 試験項目および方法

試験項目	試験方法
表面透気性	トレント法 ⁵⁾ により，表面透気係数 KT を測定
超音波伝播速度	φ50mm の端子を用い，透過法によりかぶりコンクリートの超音波伝播時間を測定
基準反発度	JIS A 1155 コンクリートの反発度の測定方法に準拠

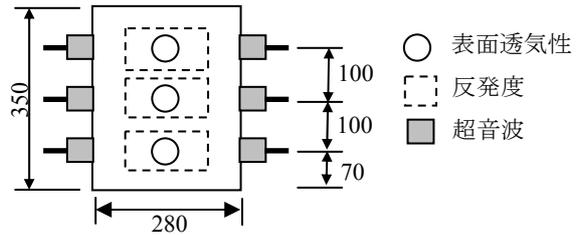


図-2 試験位置

充填に及ぼす鉄筋の影響が小さいことが確認されたため，B 側面は無筋とした。各配合に対する締固め時間は，前述の充填挙動に関する実験より，配合 W155，W170，W185，W170V に対してそれぞれ 25 秒，15 秒，10 秒，25 秒とし，試験体中央に内部振動機を挿入して所定時間の振動締固めを行った。締固め完了後，再振動を加える供試体には 1.0 時間および 2.5 時間後に初期の締固めと同条件で再振動を加えた。ここで，再振動締固めを実施する時間としては，ブリーディング終了間際に実施することが強度増加に対して効果的であることが指摘⁶⁾されているが，ここでは実施工を考慮し，打ち重ねの許容時間の目安等を参考にして定めた。締固め完了後，打設面は養生仕上げした後にシート養生し，材齢 5 日まで 20℃ の室内で養生した。供試体はすべて材齢 5 日で脱枠し，その後 20℃，60%RH の室内に静置した。

表-3 に試験項目および方法について示す。かぶり部に相当する鉄筋面 (A 面) および無筋面 (B 面) を試験対象面とし，図-2 に示す位置で，二重チャンバー方式のトレント法⁵⁾による表面透気係数，超音波伝播速度お

よび反発度の測定を実施した。また、これらの試験は、施工方法や部材寸法の影響が小さい小型供試体（表面透気性試験・反発度：15×15×15cm，超音波伝播速度：φ10×20cm）を通常の突き棒を用いた方法で作製し、養生条件を同一として実施した。また、一連の試験は材齢20日で実施した。

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質

表-4に、フレッシュコンクリートの試験結果、図-3に経過時間とブリーディング量の関係を示す。配合W155, W170のブリーディング量は0.11~0.12cm³/cm²程度と概ね同等であり、単位水量の大きいW185は0.15cm³/cm²と大きくなった。本実験におけるコンクリートの配合条件は水セメント比，単位粗骨材量が一定であるため，配合間のブリーディング量の違いは，主にブリーディングを引き起こす駆動力，すなわち粗骨材がセメントペーストもしくはモルタルに及ぼす影響がスランブで異なることに起因しており，この影響程度がスランブの大きいW185で顕著に現れたものと思われる。

表-4 フレッシュコンクリートの試験結果

配合	Sl. (cm)	Air (%)	C.T (°C)	ブリーディング量 (cm ³ /cm ²)	率 (%)
W155	7.5	5.4	18.0	0.11	2.74
W170	12.5	5.0	18.0	0.12	2.65
W185	19.0	5.1	19.0	0.15	3.17
W170V	19.0	3.1	18.0	0.00	0.00

3.2 かぶり部の充填挙動

図-4に、コンクリート中の応答加速度，ならびに間隙水圧の測定結果の一例（配合W170：鉄筋あき35mm）を示す。鉄筋あき35mmの場合，配合W185（スランブ19.0cm）を除いて，コンクリートの自重のみではかぶり部にコンクリートがほとんど充填されていない状況であった。内部振動機を挿入して振動締固めを開始した後，鉄筋位置の応答加速度は20~40Gを示した。締固め開始から約4秒後にかぶり部に設置した加速度計（底面から15cm）が応答していることから分かるように，コンクリートがかぶり部に充填されると鉄筋位置の応答加速度は減少して概ね一定値を示す傾向にあった。型枠に配置した間隙水圧計はかぶり部の加速度応答とほぼ同時に上昇しはじめ，その後2秒程度に液状化して5kPa程度まで上昇し，センサ位置より上部の充填により穏やかに上昇する傾向を示しているものと思われる。このように，かぶり部のコンクリートは型枠底面側から徐々に

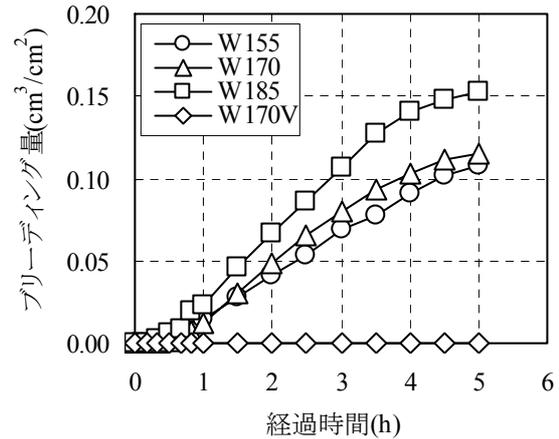


図-3 経過時間とブリーディング量の関係

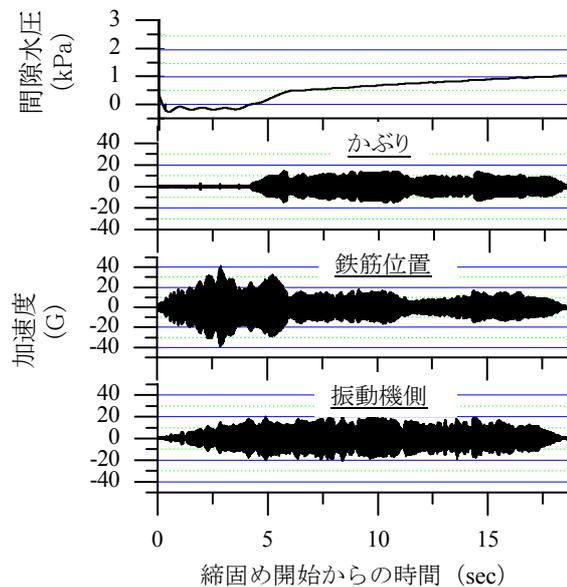


図-4 加速度，間隙水圧の測定例 (W170：鉄筋あき35mm)

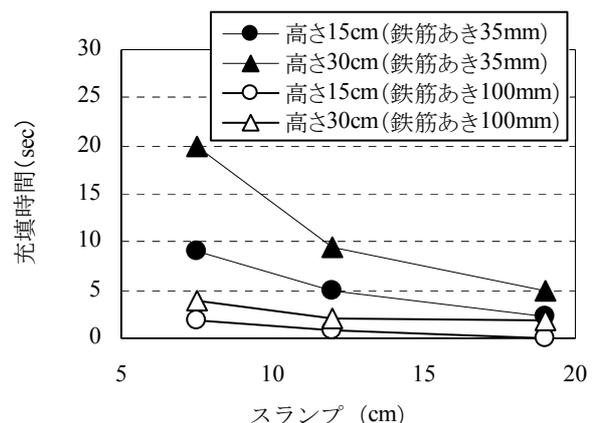


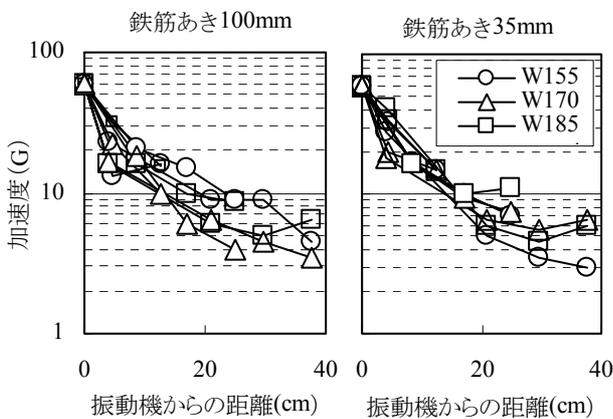
図-5 スランブと充填時間の関係

充填され，その後コンクリートが液状化し密実化していく様子が伺える。

図-5に，高さ15cmに配置したかぶり部の加速度計が反応するまでの時間（凡例：高さ15cm），また目視により鉄筋前後のコンクリート高さが概ね一定となりか

かぶり部の充填が完了と判断されたまでの時間（凡例：高さ30cm）とスランプの関係を示す。鉄筋のあきが35mmの場合は、かぶり部分にコンクリートが充填されるまでにある程度時間を有し、スランプが小さいほどその時間は長くなることが分かる。鉄筋のあきが100mmの場合、コンクリートの自重のみによってコンクリートがかぶり部にある程度充填されること、また鉄筋による流動障害の影響が小さいため、締固め開始後比較的早い時期にかぶり部の加速度計が反応し、充填が完了している。このように、かぶり部が充填されるまでの振動時間はコンクリートのスランプおよび鉄筋あきによって異なり、スランプが8cm程度となることこの影響が顕著であった。なお、これらの実験結果を考慮し、硬化体品質評価のための供試体作製時の締固め時間は、目視で概ね充填が完了したと判断した時間に5秒程度加えた時間に設定した。

図-6は、充填が完了した後の定常状態における応答加速度を振動機からの距離で示したものである。図中には、締固め完了後、内部振動機の位置を変化させて測定した加速度を合わせて示している。応答加速度は鉄筋の前後で2G程度減衰しているケースがある反面、逆に振動機から遠いかぶり部で大きくなる場合も認められた。また、振動締固めにおける既往の研究⁷⁾では、スランプの大きさによる振動減衰の差が報告されているが、本実験の範囲では明確な傾向が確認できない。これらは、振動機から鉄筋および型枠までの距離が比較的近いため、鉄筋の振動や型枠からの反射波が影響したことによると考えられる。このように、かぶり部が概ね充填され、空気泡を減少させる段階での振動応答挙動に対する鉄筋量の影響は小さく、ばらつきが大きいものの、応答加速度は鉄筋の有無、コンクリートの配合によらず振動機からの距離に概ね対応した分布になっている。以上より、振動締固めによるかぶり部の充填に及ぼす鉄筋の影響は、コンクリートの間隙通過に及ぼす影響が大きいが、



※内部振動機の位置：型枠から17.5、30、42.5cm

図-6 振動機からの距離と応答加速度の関係

かぶり部に概ねコンクリートが充填した後の振動減衰への影響は小さいものと考えられる。

3.3 かぶりコンクリートの品質変動

図-7は、供試体の高さと同表面透気係数 KT の関係、図-8は、材料分離の影響が小さいテストピースで測定した表面透気係数に対する比を示したものである。表面透気係数は $0.17 \sim 1.75 \times 10^{-16} \text{m}^2$ の範囲にあり、供試体上層の表面透気係数は、中、下層と比較すると大きくなる傾向にあった。コンクリートの配合で比較すると、増粘剤を添加してノンブリーディングとした W170V の上下方向の差が最も小さく、また鉄筋面では単位水量が大きいコンクリートほど、表面透気係数が若干大きくなる傾向が認められる。一方、無筋面ではノンブリーディングの W170V を除いて配合による明確な傾向は認められないが、鉄筋面より高さ方向の差が大きくなっている。

図-9に、リバウンドハンマーによる反発度の測定結果を、テストピースで測定した反発度に対する比で示す。反発度比は $0.96 \sim 1.11$ （反発度 $28 \sim 37$ ）の範囲であり、テストピースの測定結果と比較して、反発度は全体的に大きくなる傾向を示した。供試体の高さ方向で比較すると、無筋の場合には上層ほど反発度が小さく、また W185

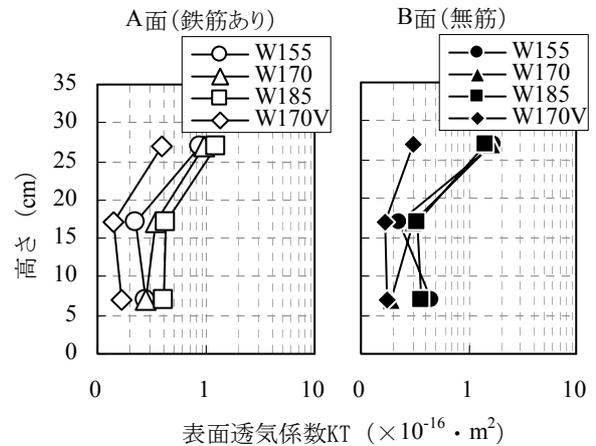


図-7 供試体高さと同表面透気係数の関係

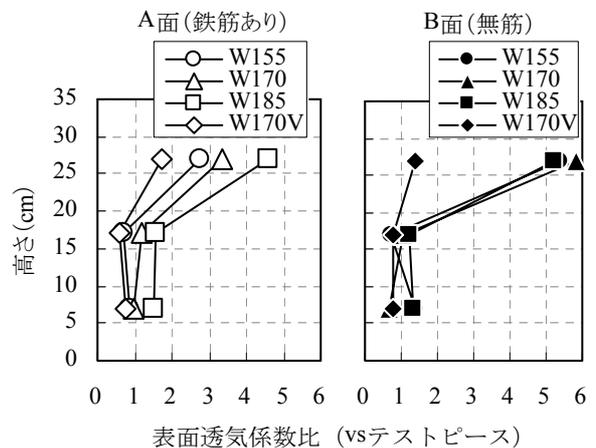


図-8 供試体高さと同表面透気係数比の関係

は、W155, 170 に比べて小さな値を示しているのに対し、鉄筋配置面では、高さ方向の差が明確に現れていない。

図-10に、超音波伝播速度の測定結果を、テストピースでの測定結果に対する比で示す。超音波伝播速度は4010~4310m/secの範囲にあって、供試体の高さ方向で比較すると、総じて上層ほど小さくなる傾向を示した。また、表面透気係数の測定結果と同様に、ノンブリーディングのW170Vは、上下方向の差が小さい結果となり、表面透気係数や反発度と概ね同様の傾向を示している。

このような供試体の試験位置での各測定値の差は、打設、締固めによる主に粗骨材とモルタルの材料分離、その後のブリーディングによって生じているものと考えられ、以下ではこれらの影響について考察する。

粗骨材量の変化については、無筋面では振動締固めに伴う粗骨材の沈降、鉄筋面ではこれに加え、間隙通過の影響が考えられる。図-11は、無筋面に対する鉄筋面の超音波伝播速度の比を示したものであって、鉄筋面の超音波伝播速度は、無筋面より全体的に小さくなる傾向を示している。鉄筋間隙を通過したかぶりコンクリートの品質について検討した既往の研究⁸⁾によると、鉄筋を通過する前後で、コンクリートの超音波伝播速度は変化し、この変化量は間隙通過に伴う粗骨材の材料分離程度と相関があり、また配筋条件が厳しいほど材料分離程度が大きいことが示されている。このため、鉄筋面と無筋面で超音波伝播速度が異なる一要因としては、間隙通過に伴う粗骨材量の変化が測定値として現れていると考えられ、鉄筋面のかぶりコンクリートの粗骨材量は無筋面より小さくなっていると推察される。また、施工性能にもとづくコンクリートの配合設計・施工指針(案)⁹⁾に基づいて、本実験に用いた配合の材料分離抵抗性、振動締固め性に関する単位セメント量を照査すると、配合W155, W185のスランブに対する単位セメント量は下限値以下であるのに対し、W170の単位セメント量は適切なバランスの範囲にある。超音波伝播速度の鉄筋面と無筋面の差はW170で小さく、配合照査の結果と一致しており、施工条件に対して適切なコンクリートであるW170の粗骨材の分離が小さくなったものと考えられる。

図-12に、ブリーディング率と表面透気係数KTの関係を示す。図中には再振動締固めを実施したケース、小型テストピースの結果を合わせて示している。再振動を行っていない場合、コンクリートのブリーディング率が大きくなると、表面透気係数KTは大きくなる傾向を示した。この傾向は、ノンブリーディングのW170VとブリーディングのあるNo.1~3の差が顕著であった。ブリーディングがある配合の中で比較すると、本実験の範囲ではブリーディング率と表面透気係数の関係はそれほど明確でないが、表面透気係数や反発度の表面品質の

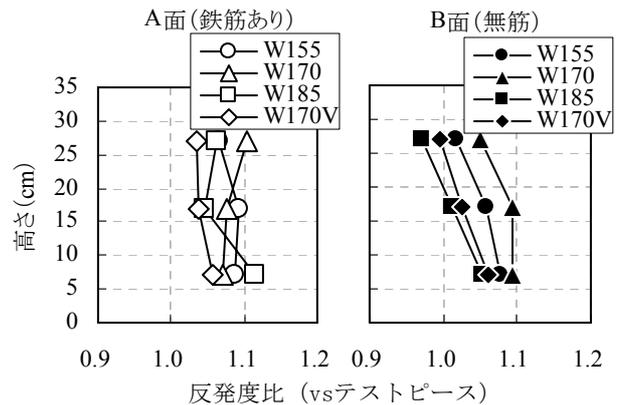


図-9 供試体高さ と 反発度比 の関係

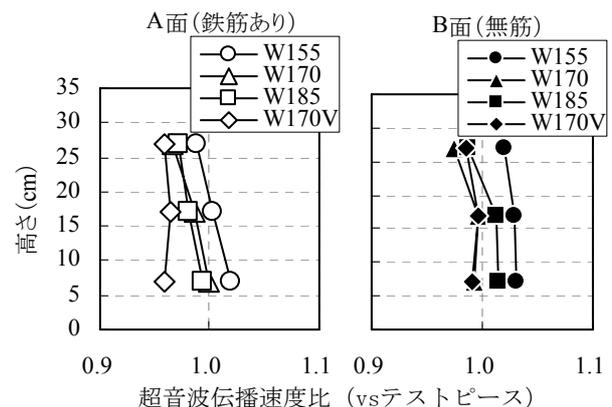


図-10 供試体高さ と 超音波伝播速度比 の関係

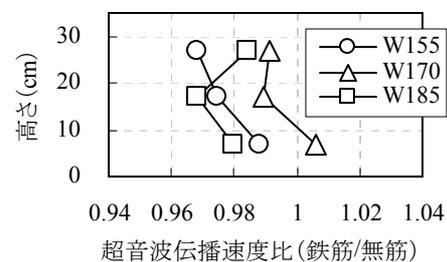


図-11 超音波伝播速度比 (鉄筋/無筋)

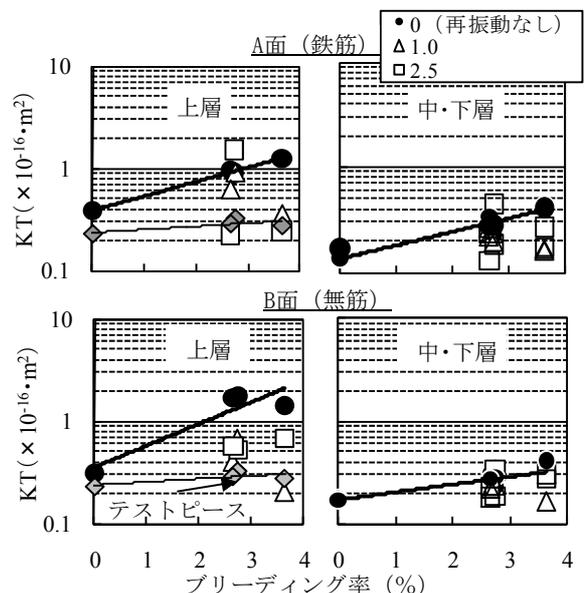


図-12 ブリーディング率 と 表面透気係数の関係

変動に対してはブリーディングの影響が大きいものと考えられる。ここで、ブリーディング率はJIS A 1123に準拠して測定した値であるが、供試体に打ち込んだコンクリート、特に鉄筋と型枠に挟まれたかぶりコンクリートでは、鉄筋の影響により、ブリーディングの駆動力となるコンクリートの自重作用がブリーディング試験の条件と異なっており、かぶり部の自重作用が小さくなっている可能性がある。このことは、図-7～図-9に示したように、鉄筋面の表面透気係数や反発度の高さ方向の差が無筋面より小さい傾向を示した一要因と考えられる。

また、前述のように、粗骨材量は鉄筋面のほうが小さくなっていると考えられるが、鉄筋面の特に上層の表面透気係数は無筋面より小さい傾向を示している。表面透気性が粗骨材粒子下面の空隙の影響を受けると考えると、この原因としては自重作用の影響に加え、粗骨材量が少なくなったことによる粗骨材粒子下面空隙の影響低下が考えられる。

再振動の影響についてみると、再振動を行った場合は、再振動を実施していない場合と比較して、表面透気係数は概ね小さくなり、改善効果が認められないケースもあるものの、中・下層ではテストピースの表面透気係数と同等、上層ではテストピースの値に近づく傾向にある。ここで、再振動は打設後1.0, 2.5時間で実施しているが、ブリーディング試験結果によると、2.5時間後もブリーディングは5時間程度まで継続している。よって、再振動を行うことにより、再振動実施時のブリーディングによる粗骨材粒子下面や鉛直方向の水みちを除去できるが、再振動後のブリーディングや再振動によるその後のブリーディング量の変化等が表面透気性に影響していると考えられ、再振動の実施時期また加える振動力などの影響やその効果については詳細に検討する必要がある。

4. まとめ

本研究の範囲で得られた知見を以下に示す。

(1) 鉄筋あきが35mmと小さい場合、スランプが小さいほど間隙通過に要する時間が長くなり、この傾向はスランプ8cmの場合に顕著である。一方、間隙通過後の振動応答加速度に及ぼす鉄筋の影響は小さく、このときの応答加速度は鉄筋の有無によらず、概ね振動機からの距離で整理できる。

(2) コンクリートの表面透気係数は、中・下層に比べて上層で大きくなる傾向にあった。そして、この高さ方

向の変化に対してはブリーディングの影響が大きいこと、鉄筋がある場合にはこの影響が小さくなっている可能性があることが示された。

(3) 鉄筋間隙通過に伴う粗骨材量の変化の影響を受けたことに起因すると思われる超音波伝播速度の相違が、鉄筋面と無筋面で確認された。一方、表面透気係数や反発度については、この粗骨材量の変化の影響が直接確認されなかった。

(4) 再振動締固めを行って、ブリーディングによる水みちや粗骨材粒子下面の水隙を除去することにより表面透気係数の改善効果が確認された。ただし、再振動を加えるタイミングや最適な振動力、時間等については詳細な検討が必要である。

参考文献

- 1) 早川健司, 加藤佳孝: 配筋および締固め方法がかぶりコンクリートの品質に及ぼす影響, コンクリート委員会歴代構造物品質評価/品質検査制度研究小委員会シンポジウム講演概要集, 2009,11, 土木学会
- 2) 島弘, 水口裕之, 和田寿夫, 河野清: 材料分離が流動化コンクリートの硬化後の諸性質に及ぼす影響, 第6回コンクリート工学年次講演論文集, 1984
- 3) 加藤佳孝, 藤野学: ニューラルネットワークによるかぶり品質変動の定量的評価, コンクリート工学論文集, 第18巻第1号, 2007.8
- 4) 品質試験方法と実施工時諸特性との相関性評価委員会: 施工の確実性を判定するためのコンクリートの試験方法とその適用性に関する研究報告書, pp107-219, 日本コンクリート工学協会, 2009.7
- 5) R.J. Torrent: A two-chamber vacuum cell for measuring the coefficient of permeability to air the concrete cover on site. *Materials and Structures*, vol.25
- 6) 竹村和夫, 安部康俱: 再振動締固めによる強度の増進効果について, セメント技術年報, Vol39, pp249-252, 1985
- 7) 日本コンクリート協会: コンクリートの振動締固めに関する実験報告書, 1990.3
- 8) 小沼寛享, 大野誠彦, 城門義嗣, 加賀谷誠: 普通コンクリートの締固め性能とかぶり部の凍結融解抵抗性の関係, コンクリート工学年次論文集, pp891-896, 2007
- 9) 土木学会: 施工性能にもとづくコンクリートの配合設計・施工指針(案), コンクリートライブラリー126, pp33, 2007.3