

論文 バイブレータによる締固めがコンクリートの強度および表層品質に及ぼす影響

平瀬 真幸*1・佐川 康貴*2

要旨：本研究では、土木用の無筋コンクリートブロックに用いるコンクリートの密実化のための締固め時間を検討するため、スランプ 8cm および 5cm のコンクリートで大型供試体を作製した。内部振動機の締固め時間を 15 秒、90 秒、最長で空気が出なくなるまで (255 秒) まで変化させた。供試体から採取したコアの圧縮強度試験において供試体中段の振動機位置の強度が最も高く、締固め時間が長いと供試体表面の透気係数 (kT 値) は小さくなった。過振動で生じる材料分離 (粗骨材の沈降によるモルタル部) が確認されたのはスランプ 8cm のみであり、スランプ 5cm においては 255 秒の締固めを実施した場合においても確認されなかった。

キーワード：締固め, スランプ, 材料分離, 圧縮強度, 透気係数

1. はじめに

近年コンクリート構造物の維持費にかかる費用は国の大きな負担となりつつあり、長期耐久性並びにストック効果の最大化¹⁾が望まれている。コンクリート構造物の長期供用は、建設時の初期性能が高いほどライフサイクルに有利と考えられることから、新設時のコンクリートにおいては丁寧な施工と高い品質が求められる。

本稿は、土木用の無筋コンクリートブロック (港湾ブロック) 製作工の施工計画段階において、コンクリートブロックを密実とするための締固め方法を決定するに当たり、設計段階で定められたスランプ (設計スランプ) 8cm の妥当性や最適なスランプ、締固め時間等について試験施工を行い、検討した結果を示すものである。

我が国においては、小樽港の防波堤に使用されたコンクリートブロックをはじめとする歴史的コンクリート構造物において、厳しい環境下においてもほぼ建設当時のまま現存されているものが少なくない。建設時の品質が確保されていればその寿命は半永久的である²⁾との見解もある。本研究の対象は無筋コンクリートではあるものの、表層品質が確保されたと判断されたものが、波浪による摩耗作用等に対する抵抗性が高く耐久性に富むと考え、透気試験も実施した。

現在、土木学会コンクリート標準示方書 [施工編: 施工標準]³⁾では、一箇所当たりの締固め時間の目安は 5~15 秒とされているものの、具体的な締固め時間や締固め間隔は施工者 (作業員) に判断を委ねられている。また、締め固めた後の再振動によってコンクリート品質が向上することが室内実験による研究で知られている⁴⁾ものの、現場では再振動のタイミングが管理されることは少なく、これも施工者 (作業員) に委ねられているのが現状である。レディーミクストコンクリートは呼び名が同じであ

っても使用する材料や製造・施工条件等によって締固め時の性状が異なると考えられる。よって、出荷されるコンクリートが締固めによってどのような性状を示すかについて、事前に、該当する構造物に対しての最適なスランプ、締固め時間、締固め間隔等を検討・確認した上で施工することが、長期耐久性に大きく寄与すると考えられる。

第一著者はこれまで、発注時の設計スランプで、締固め時間が 15 秒程度で、締固め間隔が振動機の振動体の直径の 10 倍程度では緻密なコンクリートと考えられる表層品質が得られなかったことを経験してきた。コンクリートは締固めが適正になされ、所定の強度が得られれば、単位水量ならびに単位セメント量が少ないほど、ひび割れのリスクが抑制され、構造物の耐久性を確保できると考えられる。この考えに基づき、これまで、締固めにおいて空気と水を可能な限り排出する施工を実施し、報告してきた⁵⁾⁶⁾。

締固めがコンクリートの品質に及ぼす影響について定量的に調べた事例としては、例えば、早川・加藤⁷⁾による研究では、打込みの上方で表層透気係数が大きくなること等が報告されている。そのほか、坂野ら⁸⁾、西村ら⁹⁾、片平ら¹⁰⁾の研究等があるものの、特に再振動の影響まで含めた研究や、本研究で対象とするようなスランプが小さい領域での研究の事例は少ないのが現状である。

本研究では、コンクリートポンプ車が普及するまでに構築された、長期耐久性が証明されていると考えられるコンクリート構造物の施工方法を手本として、最適スランプを選択するための試みとして、コンクリートプラントで出荷可能な範囲でのスランプ 5cm と 8cm を選択し、各スランプでの締固め時間を 3 通りに変化させた供試体を作製し、目視評価、材料分離抵抗性、圧縮強度試験な

*1 株式会社ファインテクノ (正会員)

*2 九州大学大学院 工学研究院社会基盤部門准教授 博士 (工学) (正会員)

表-1 使用骨材の種類および特性

分類	記号	種類	表乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	粗粒率	実積率 (%)	微粒分量 (%)
細骨材	S1	石灰砕砂	2.66	1.32	2.82	57.3*	4.3
	S2	砕砂	2.64	1.40	2.95	57.2*	2.3
粗骨材	G1	碎石 1505	2.68	0.46	-	59.3	0.5
	G2	碎石 2010	2.68	0.45	-		0.6
	G3	碎石 4020	2.68	0.45	-		0.5

* 粒形判定実積率

表-2 コンクリートの配合

配合名	粗骨材 の最大 寸法 (mm)	目標 スラン プ (cm)	水セメ ント比 (%)	目標 空気 量 (%)	細骨 材率 (%)	単位量 (kg/m ³)							
						水 W	セメ ント C	細骨材		粗骨材			混和 剤 A
								S1	S2	G1	G2	G3	
24-5-40 BB	40	5.0±1.5	58.0	4.5	50.6	150	259	726	240	228	343	383	2.72
24-8-40 BB	40	8.0±2.5	58.0	4.5	50.8	155	268	724	238	225	338	375	2.81

骨材混合比 (容積) S1 : S2 = 75 : 25, G1 : G2 : G3 = 24 : 36 : 40

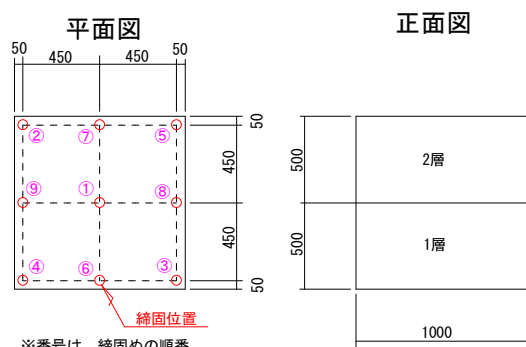


図-1 供試体形状寸法および締固め位置 (mm)

らびに物質移動抵抗性について検討した結果について報告する。

2. 供試体製作の概要

供試体は、図-1 に示すような 1m 角の立方体コンクリートである。広島県西部で 2021 年 3 月下旬に、型枠用塗装合板を組み立て、コンクリートを打ち込み、合計 6 個製作した。側面の型枠は、締付け金物 (セパレータ、プラスチック製コーン等) で固定した。使用骨材の種類および特性、および、配合をそれぞれ、表-1、表-2 に示す。セメントは高炉セメント B 種 (密度 3.04g/cm³)、練混ぜ水は地下水、混和剤は AE 減水剤 (高性能タイプ) である。配合は、呼び強度 24、粗骨材の最大寸法は 40mm であり、スランプ 5cm、スランプ 8cm とともに水セメント比は 58.0% で同じであるが、単位水量が異なる。荷卸し時の外気温、コンクリート温度、スランプおよび空気量はそれぞれ、5cm のコンクリートでは 16°C、18°C、4.0cm、4.2%、8cm のコンクリートでは 16°C、18°C、9.5cm、4.1%

表-3 締固め時間

配合名	供試体名	締固め時間** (秒)
24-5-40 BB	5-A	10 + 5
	5-B	60 + 30
	5-C	170 + 85
24-8-40 BB	8-A	10 + 5
	8-B	60 + 30
	8-C	150 + 75

** 1 次締固め (秒) + 再振動時間 (秒)

であった。

締固めにはスパイラル型内部振動機 (径 52mm, 出力 400W, 振動数 240Hz) を用いた。締固め位置は、図-1 の平面図に示すように、型枠の 4 つの型枠側面から内側へ 50mm 離れた①~⑨の 9 箇所とした (450mm 間隔)。6 個の供試体に対し、表-3 に示すように 1 次締固め時間および再振動時間を A~C の 3 通りに変化させた。A < B < C の順に締固め時間が長いことを示す。1 次締固めは A が 10 秒、B が 60 秒とし、C は目視で空気が排出されなくなるまでとした。続いて、再振動については、1 次締固め時間の半分の時間として締固めを行った。

コンクリートは、1 層当たり 500mm の厚さで 2 層に分けて打ち込み、締め固めた。打ち込みにはバケットを用い、型枠天端から約 10cm 上方より落下させた。打ち込みは、スランプ 8cm (8-A→8-B→8-C)、スランプ 5cm (5-A→5-B→5-C) の順に行った。打重ね部分については、経験上弱点となりやすいことから、下層 (1 層目) に振動機を 200mm 挿入⁵⁾して締め固めた。再振動のタイミングにつ

いては、振動機をコンクリート天端面に置いても沈まない程度の時点とした。スランブ 8cm の供試体（供試体（8-A, 8-B, 8-C））では、1 次締固めから約 90 分後に再振動を実施した。90 分後の再振動とした理由については、経験上、試験当日の条件においては、1 次締固め終了から最低 90 分以上経過しなければ沈みひび割れを抑制できないと考えたためである。スランブ 5cm においては、外気温とスランブロスの影響から、供試体 5-A で 1 次締固めから 30 分後に再振動を実施し、5-B, 5-C においては再振動まで時間を空けることが望ましくない判断したため、1 次締固めから連続的に締固めを行った。なお、スランブ 5cm のコンクリートの練上がりから再振動開始までの経過時間は、5-A で 70 分、5-B で 89 分、5-C で 145 分であった。

3. 型枠取外し後の目視評価と養生条件

コンクリート打込みから 3 日経過後、圧縮強度が 5N/mm² 以上になっていることを確認した後、型枠を取り外し（写真-1）、表層目視評価手法¹¹⁾を参考に、表面の性状を評価した。結果を表-4 に示す。ここで、型枠のセパレータ端部に取り付けられたプラスチック製コーン（以下、P コン）は、供試体天端から 200mm と 800mm にそれぞれ 2 個ずつ設置されていることから、P コン拘束による沈みひび割れへの影響について調べた。1 供試体当たり P コンは 16 箇所（4 個×4 面）あり、表中には沈みひび割れが発生した箇所数を示している。今回は、全て天端から 200mm の P コン位置で発生した。締固め時間が長いほどに沈みひび割れが多い傾向となったことについては、締固めによって上昇した水分が再振動で十分に排除できなかったことが原因と考えられる。表層目視評価の結果、締固め時間が長いほど、表面気泡の点数（4 点満点）が高くなる傾向を示した。なお、ノロ漏れの点数が低い箇所は、締固めによる影響ではなく、型枠の製作精度によるものであり、型枠の継ぎ目においてノロ漏れが発生したものである。

目視評価の直後に、養生期間の長さによってコンクリート表面の物質移動抵抗性に与える影響を検証できるよう、供試体側面 3 面に保水養生テープを貼り付け、シール養生とし、表-5 に示すように貼付期間を変化させた。

4. 材料分離に伴うモルタル層のコア採取による確認

コンクリート打込みから 3 週間を経過した後に、各供試体で上面から下面までの直径 φ 118mm、長さ約 1000mm のコアを図-2 に示す位置（点 P、点 Q、点 R の 3 箇所）で採取した。点 P は、供試体の中心である。点 R は、振動機挿入位置から最も遠くなる位置であり、今回、締固め間隔を振動機の直径の約 9 倍の 450mm 間隔



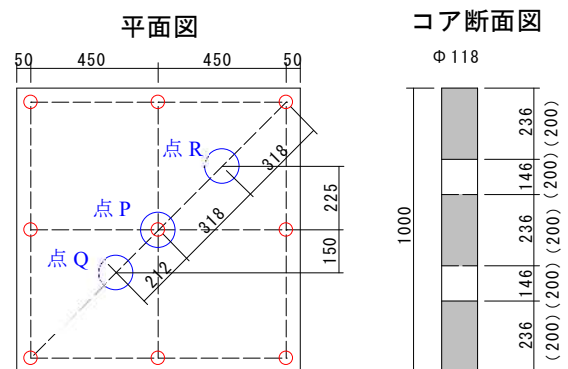
写真-1 供試体外観 写真-2 シール養生状況

表-4 目視評価結果

	供試体 5-A	供試体 5-B	供試体 5-C	供試体 8-A	供試体 8-B	供試体 8-C
沈みひび割れ(箇所)	1	6	4	4	5	8
表面気泡	1.0	3.0	3.0	1.5	3.0	3.0
打重ね	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0
ノロ漏れ	3.0	2.0	1.5	3.5	3.5	3.5
砂すじ	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0

表-5 各供試体養生条件

No.	シール養生期間
面 No.1	シール養生 なし
面 No.2	シール養生 7 日
面 No.3	シール養生 28 日
面 No.4	シール養生 91 日



○ バイブレーター挿入位置

○ コア採取位置

図-2 コア採取位置図 (mm)

表-6 材料分離に伴うモルタル層の厚さ

供試体 (締固め時間)	振動機中心からコアの中心までの距離 (mm)	モルタル層厚 (mm)
8-A (10+5 秒)	0	0
	212	0
	318	0
8-B (60+30 秒)	0	145
	212	100
	318	80
8-C (150+75 秒)	0	255
	212	150
	318	230

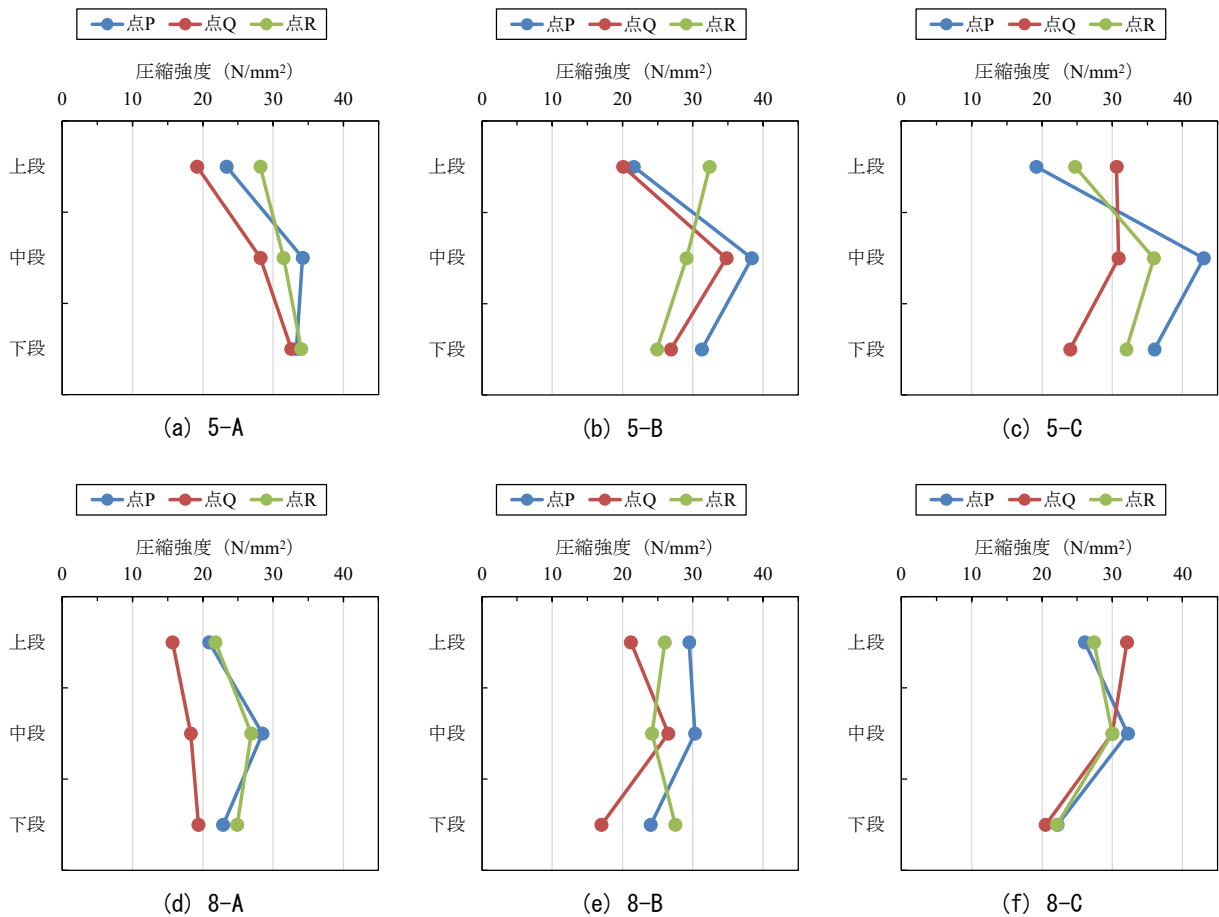


図-3 コア圧縮強度試験結果

で実施したことから、振動機から $318\text{mm} (=450/\sqrt{2})$ 離れた位置となる。加えて、締固めを 300mm 間隔で実施したと仮定した時、振動機から最も遠い距離となるのは 212mm 位置であることから、点 Q についてもコアを採取した。採取したコアは、図に示すように、上段、中段、下段に 3 分割 (高さ 236mm) し、圧縮強度試験を行った。

採取したコアの表面を観察した結果、スランプ 5cm においては締固め時間が最長の供試体 5-C においても材料分離は認められなかったが、スランプ 8cm では締固め時間が長い供試体 8-B と 8-C においては材料分離 (粗骨材の沈降) によるモルタル層が認められた。そこで、スランプ 8cm の上段のコアを用い、モルタル層の厚さを求めた。ここでは、モルタル層の厚さはコア上面から、粗骨材が目視で確認できるまでの距離 (高さ) とした。表-6 に示すように、締固め時間が長いほど、粗骨材が沈降しモルタル層厚が大きいことが分かる。8-B では振動機中心から離れるほど材料分離厚が小さくなっているのに対し、8-C では 318mm 位置においてもモルタル層厚が大きくなっている。1 層目の打込み時に生じたブリーディングは取り除いておらず、2 層目の打込みによりブリーディングが偏在した可能性が考えられる。

5. 圧縮強度

現場でのコンクリート受入時に採取したテストピースの圧縮強度結果は、スランプ 5cm で 34.4N/mm^2 、スランプ 8cm で 33.4N/mm^2 であった。3 分割 (上段、中段、下段) したコアの圧縮強度試験結果を、図-3 に示す。

スランプ 5cm の供試体のうち、供試体 5-A および 5-B においては、締固めを問題なく実施できたが、供試体 5-C においてはスランプロスがあり締固めが比較的難しい条件となった。測定場所によって圧縮強度にばらつきはあるものの、供試体ごとに平均値を算出すると、スランプ 5cm においては、5-A で 29.4N/mm^2 、5-B で 28.8N/mm^2 、5-C で 30.7N/mm^2 、スランプ 8cm においては、8-A で 22.1N/mm^2 、8-B で 25.1N/mm^2 、8-C で 27.0N/mm^2 となり、全体的な傾向としては、スランプ 8cm よりスランプ 5cm の方が強度は高くなった。テストピースではスランプ 5cm と 8cm の強度差は小さかったが、コアではそれよりも大きくなった。また、各供試体において、振動位置 (点 P) の中段コアの強度が最も高くなった。これは、2 層目コンクリートの打込みの際、経験上、打重ね部が弱点となりやすいことから 1 層目に振動機を 200mm 挿入したことや、再振動も同じ位置で実施したことが要因として考えられる。なお、上段の強度が相対的に低くなった理

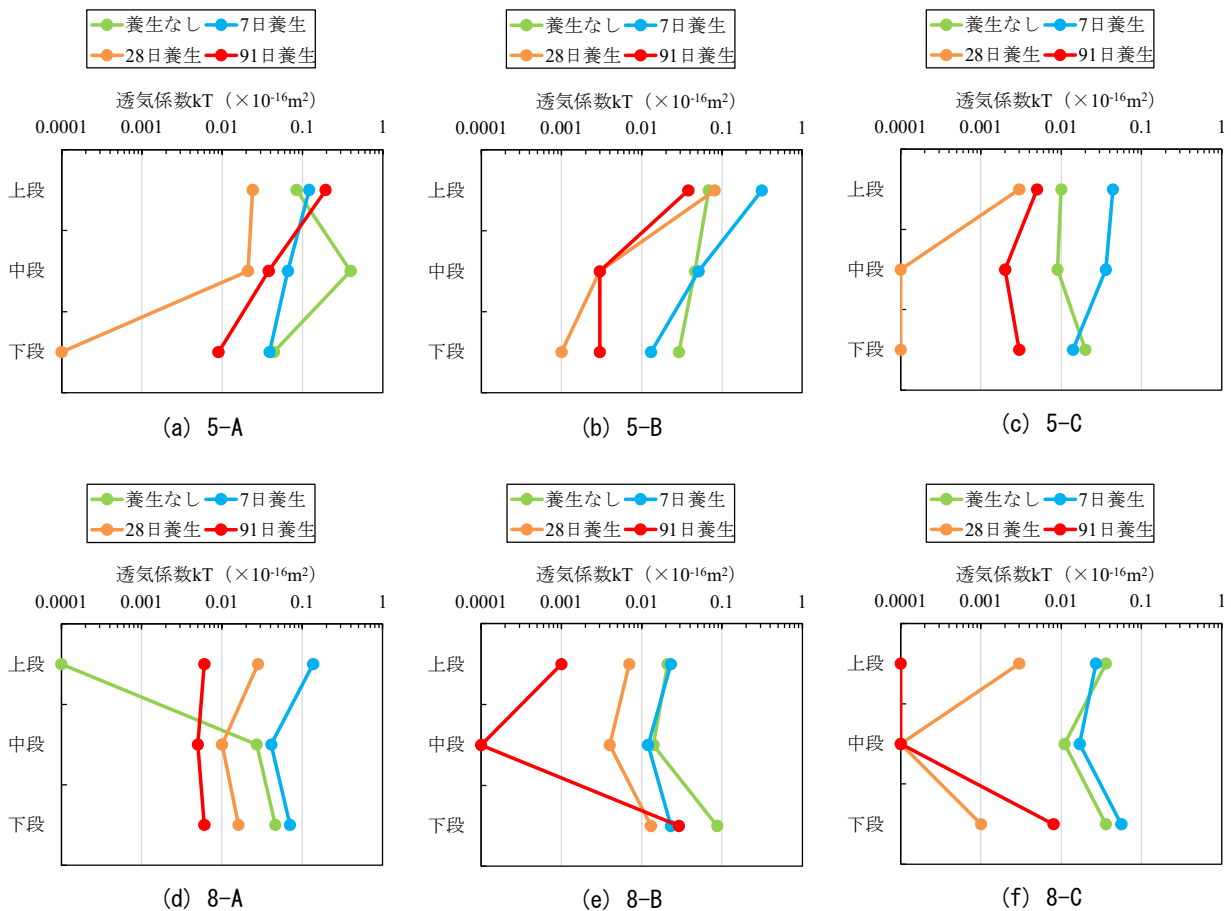


図-4 透気係数測定結果

由は、4. で述べた材料分離の影響、振動機の引抜きの際に生じた空隙ができやすいことと、また、自重の締固め効果が得られ難いことが原因として考えられる。一方、下段の強度が低かったのは再振動を中段付近までしか行っていないことが影響したと考えられる。

6. 表層透気試験

供試体側面の物質移動抵抗性を評価するため、材齢 243 日で表層透気試験を行った。測定は各供試体につき、養生方法（保水養生テープの貼付期間）の異なる 4 面それぞれに対して、横方向中心の上段、中段、下段の 3 箇所を実施した。なお、微細ひび割れを避けて測定した。測定は、トレント法（ダブルチャンバー法）¹²⁾にて実施した。透気試験の実施に当たっては、コンクリートの含水率が透気係数に影響を与える¹³⁾とされることから、その影響を排除するために供試体が十分に乾燥したであろうことを透気試験の 46 日前と試験当日に含水率を確認し、ほとんど変化しない状態であることを確認した。コンクリート水分計にて計測し、含水率 5.5% 以下であることを確認した後に透気試験を実施した。

結果を図-4 にまとめて示す。なお、図の横軸は対数表示としているため、透気係数 kT の計測値の表示が $0.000 \times 10^{-16} \text{m}^2$ であった箇所は、図中では便宜上、0.0001

$\times 10^{-16} \text{m}^2$ としてプロットしてある。

透気試験結果から、透気係数 kT 値が全て $0.1 \times 10^{-16} \text{m}^2$ を下回ったのは 5-C と 8-B, 8-C であり、締固め時間が長いほど透気係数が小さくなる傾向が確認できた。スランブ 5cm, スランブ 8cm とともに空気を排出するまで締固めた供試体で物質移動抵抗性が優位となり、締固め時間が長い場合で養生期間が長いと、透気係数は抑制されやすい傾向となった。ただし、締固め時間が標準的とされる 10 秒+再振動 5 秒の供試体 (5-A, 8-A) においては、養生期間が長い場合においても透気係数との相関関係が明確とならなかった。よって、ある一定以上の締固めが行われた上で、コンクリートが密実とならなければ、養生効果は期待できないことが推察された。さらに、締固め時間が長い場合で、養生期間が 28 日を超える場合においては、極めて物質移動抵抗性が高くなる結果となった。

7. まとめ

本研究では、土木用の無筋コンクリートブロックに用いるコンクリートの締固めに関して、密実化のための締固め時間について検討するため、振動機の直径の約 9 倍の締固め間隔で締固めを行い、大型供試体を作製した。材料分離抵抗性が高いスランブ 5cm のコンクリートと、設計時に選定されたスランブ 8cm のコンクリートを対象

に、標準的に実施されている時間と、通常の6倍程度の時間、および、空気が生じなくなるまでの時間の3通りに締め固めを行った。供試体の表層目視評価、コアの圧縮強度、ならびに、養生期間を4通りに変化させたコンクリート表面の物質移動抵抗性について調べた。得られた主な知見を以下に示す。なお、以下では、1次締め固め10秒、再振動5秒を10+5秒のように表す。

- (1) コア側面の観察の結果、配合24-5-40では170+85秒の締め固めを行っても、材料分離（粗骨材の沈降）は生じなかった。一方、配合24-8-40においては、締め固め時間10+5秒では、材料分離は生じなかったが、60+30秒以上では材料分離が顕著となった。表層目視評価の結果も踏まえ、スランプ8cmでの最適締め固め時間は10+5秒から60+30秒の間にあると考えられる。
- (2) コアの圧縮強度試験の結果、振動機位置の中段の強度が最も高くなった。上段の強度が相対的に低くなったことから、振動機の引抜き箇所は弱点となりやすく、振動機の引抜きは慎重に行う必要があると考えられる。
- (3) 表層透気試験の結果、締め固め時間が長いほど、透気係数は小さくなった。また、締め固め時間が長い場合において、養生期間を長くするほど透気係数は優位となりやすいものの、締め固め時間が10+5秒の場合においては、養生期間を長くしても透気係数との関係は明確には現れなかった。
- (4) 以上の結果より、本研究で使用した材料、配合条件の場合、港湾ブロック用の無筋コンクリートの製造・施工に当たっては、スランプ8cmでは締め固め時間が長い場合には材料分離の程度が大きくなることから、密実性を高める必要があると判断される場合にはスランプ5cmを選択し、長時間締め固める方が良いと考えられた。

【謝辞】本研究における試験施工は、広島県西部建設事務所廿日市支所の協力を得て行った。関係各位に謝意を表す。

参考文献

- 1) 国土交通省社会資本整備審議会・交通政策審議会交通体系分科会計画部会専門小委員会：「ストック効果の最大化に向けて～その具体的戦略の提言～」、2016.11
- 2) 土木学会コンクリート委員会：コンクリート構造物の品質確保小委員会（第二期）（350委員会）委員会報告書、コンクリート技術シリーズ、No.124、pp.1-2、2020
- 3) 土木学会：2023年制定コンクリート標準示方書〔施工編〕、pp.122-124、2023.9
- 4) 佐藤悠士朗、樋原弘貴、添田政司、深見桜：コンクリートの最適な再振動の実施に向けた実験的検討、コンクリート工学論文集、31巻、p.11-22、2020
- 5) 平瀬真幸、田村隆弘、徳永幸弘：コンクリートの締め固めと表層品質に関する橋台と橋脚での試験施工、コンクリート工学年次論文集、Vol.42、No.1、pp.1210-1215、2020
- 6) 平瀬真幸、田村隆弘、徳永幸弘：実構造物におけるコンクリートの締め固め時間と表層品質の関係に関する一考察、「コンクリート構造物」に関するシンポジウム論文集（コンクリート構造物の品質確保小委員会（第二期）（350委員会）委員会報告書）、コンクリート技術シリーズ、No.124、pp.177-180、2020
- 7) 早川健司、加藤佳孝：かぶりコンクリートの品質に及ぼす配合および施工方法の影響、土木学会論文集 E2（材料・コンクリート構造）、Vol.68、No.4、pp.399-409、2012
- 8) 板野大世、山田悠二、川崎佑磨：振動締め固め時間がコンクリートの力学的特性および細孔構造に与える影響、コンクリート工学年次論文集、Vol.42、No.1、pp.1198-1208、2020
- 9) 西村和朗、古川翔太、加藤佳孝、江口康平：振動締め固め時間および粗骨材の単位体積量・実積率が材料分離に与える影響、コンクリート工学年次論文集、Vol.41、No.1、pp.1031-1036、2019
- 10) 片平博、古賀裕久：空気量、振動締め固め時間および細骨材の品質がスケーリング抵抗性に与える影響、コンクリート工学年次論文集、Vol.40、No.1、pp.771-776、2018
- 11) 坂田昇、渡邊賢三、細田暁：目視調査に基づくコンクリート構造物の表層品質評価手法の実績と調査結果を反映した表層品質向上技術、コンクリート工学、Vol.52、No.11、pp.999-1006、2014.11
- 12) Torrent, R. : A two-chamber vacuum cell for measuring the coefficient of permeability to air of the concrete cover on site, Mater. & Struct., Vol.25, No.150, pp.358-365, July 1992
- 13) Kenichiro Nakarai et al. : Long-term permeability measurements on site-cast concrete box culverts. Construction and Building Materials, Vol.198, pp.777-785, 2019