

論文 振動締固めによるフレッシュコンクリートの空気の状態の変化が硬化特性に与える影響

田澤 佑介*1・川添 皓介*2・鈴木 将充*3・加藤 佳孝*4

要旨： 締固め完了の状態を，硬化体の空隙特性および物質移動特性の観点から定めることを目的に，振動締固めによるフレッシュコンクリートの空気の状態の変化が，硬化体の空隙特性および水分浸透特性に与える影響について実験により調べた。その結果，振動締固めによりフレッシュコンクリートの空気量が増加し，1000 μm 以上の気泡が増加する場合，乾燥の速度および水分浸透速度係数は増加した。一方で，振動締固めによってフレッシュコンクリートの空気量，硬化体の気泡量が減少しても，気泡間隔係数が増加するような気泡径の変化が生じなければ，水分浸透特性は減少せず，必ずしも硬化体の品質は向上しなかった。

キーワード： 振動締固め，空気量，空隙率，気泡量，気泡間隔係数，水分浸透速度係数

1. はじめに

密実なコンクリート構造物を構築するためには，打込んだコンクリートを十分に締め固めることが重要である。コンクリート標準示方書〔施工編〕¹⁾の記述を参照すると，「締め固めが十分である目安の一つは，コンクリートとせき板との接触面にセメントペーストの線が現れることである。(中略)締め固め時間の目安は，5～15秒程度である。」とあり，締め固め完了については，作業の内容を規定しているにすぎない状況にある。

これに対して，梁ら²⁾は，配合が異なる同一スランブのフレッシュコンクリートの締め固め特性について，締め固め完了エネルギーを用いて評価できる可能性を示している。この文献では，コンクリートの締め固めに関して，振動締固めによるコンクリートの体積変化がなくなることを締め固め完了と定義しているが，締め固め完了を判断するためには，形状以外にも材料分離していないことや，空気の状態が適切であること等を考慮する必要があると考えられる。ここで，空気の状態について着目すると，締め固め後のフレッシュコンクリートの空気の状態と硬化体の特性との関係に触れた文献は少ない。振動締固めによるフレッシュコンクリートの空気量の減少は耐凍害性に影響を与えることが知られている³⁾などが，空隙構造の形成および物質移動特性に及ぼす影響については検討されていない。

以上のことから，本研究では，締め固め完了の状態を，硬化体の空隙特性および物質移動特性の観点から定めることを最終目的とし，本論文では，振動締固めによるフレッシュコンクリートの空気の状態の変化が，硬化体の空隙特性および水分浸透特性に及ぼす影響を実験的に把握することを目的とした。実験要因として締め固め時間を

変化させているが，締め固め方法がフレッシュコンクリートの空気量に与える影響の解明は本論文の目的ではないことに留意されたい。なお，本論文で用いた実験手法では，振動締固めにより，フレッシュコンクリート中の構成材料が不均一な状態になることが想定される。このうち，粗骨材の偏り等のマクロな不均一性を解消するために，振動締固めを与えたコンクリートを練り返したのち，フレッシュコンクリートの空気量を測定し，硬化体を作製し，空隙特性および水分浸透特性を調べた。さらに，環境負荷低減を目的に，高炉スラグ微粉末を高置換したコンクリートの使用が検討されている^{4),5)}ことを鑑み，本論文では，同等の呼び強度となるコンクリートを対象に，高炉スラグ微粉末の置換率を0, 50, 70, 80% (以降，OPC, B50, B70, B80) として検討した。

2. 実験概要

2.1 使用材料およびコンクリート配合

コンクリート配合を表-1に，使用材料を表-2に示す。JIS A 5308に準拠し，細骨材の粒度分布の範囲となるよう，S1とS2の容積比を0.76と0.24とした。コンクリート配合は，一般的な土木工事に用いる条件を想定し，呼び強度27が得られるよう，水結合材比を決定した。この時，千葉県生コンクリート品質基準⁶⁾を参考に割り増し係数を1.3とした。また，単位粗骨材量を一定に，スランブ12 \pm 2.5cmが得られるように単位水量を，空気量が4.5 \pm 1.5%となるようにAE剤添加量を調整した。ここで，スランブおよび空気量の結果は，配合を決定した時のものであり，15秒の締め固め前と対応している。

2.2 試験方法の概要

練混ぜにはパン型ミキサ (容量50L) を用い，1バッチ

*1 東京理科大学 創域理工学研究科社会基盤工学専攻 (学生会員)

*2 東京理科大学 創域理工学部社会基盤工学科

*3 東急建設 (株) 技術研究所 土木材料G 修士 (工学) (正会員)

*4 東京理科大学 創域理工学部社会基盤工学科 教授 博士 (工学) (正会員)

表-1 コンクリート配合

記号	フレッシュ試験結果		W/B (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)						混和剤添加率 (結合材×%)	
	SL (cm)	Air (%)			W	C	B	S1	S2	G	AE	WR
OPC	13.0	4.4	55.0	45.0	168	305	0	630	190	1014	0.005	1.0
B50	12.5	4.4		44.9	166	151	151	611	205		0.007	
B70	12.0	3.5	50.0	44.1	165	99	231	608	183		0.008	
B80	11.5	3.8	45.0	43.0		73	293	566	190		0.007	

表-2 使用材料

種類	記号	物理的性質
結合材	C	普通ポルトランドセメント, 密度 3.15g/cm ³ , 比表面積 3362cm ² /g
	B	高炉スラグ微粉末, 密度 2.91g/cm ³ , 比表面積 4180cm ² /g, 石こう無添加
細骨材	S1	東京都多摩産砕砂, 表乾密度 2.67g/cm ³ , F.M. 3.01
	S2	千葉県君津産山砂, 表乾密度 2.55g/cm ³ , F.M. 1.48
粗骨材	G	東京都多摩産砕石, 表乾密度 2.67g/cm ³ , F.M. 6.57
混和剤	AE	AE 剤 (樹脂酸系界面活性剤) * 100 倍希釈で使用
	WR	AE 減水剤 (リグニンスルホン系)
水	W	上水道水, 密度 1.00g/cm ³

の製造量を 40L とした。細骨材および結合材を投入して 10 秒間空練りしたのち、あらかじめ混和剤を溶解した練混ぜ水を投入して 30 秒間練り混ぜ、最後に粗骨材を投入して 60 秒間練り混ぜ、試料を排出した。試験は温度 20℃の屋内で実施した。排出したコンクリートを練り舟で十分に練り返した後、スランブを JIS A 1101 に、空気量試験を JIS A 1128 (無注水法) に準拠して測定した。スランブと空気量が所定の範囲にあることを確認してから、次に示す手順で実験した。

JSCE-F 702 を参考に、直径 30cm、高さ 38cm の円筒容器にコンクリートを 20L 詰め、φ28mm、振動数 200Hz のパイプレータで所定の時間振動締固めを与えた。その後、フレッシュコンクリート中で生じている水と粗骨材の分離を解消するために、振動締固めを与えたコンクリートを練り舟に移し、練返しを行った。十分に練り返した後、空気量を JIS に準拠して測定した。なお、棒状パイプレータによる締固め時間を、コンクリート標準示方書 [施工編] ⁹⁾ に示される締固め時間の目安である 5、15 秒に加え、それよりも長い 30 秒とした。ミキサ容量および試験中のフレッシュ性状の経時変化の影響を考慮し、締固め

時間毎にフレッシュコンクリートを製造した。

また、硬化体の空隙率および水分浸透特性を把握するため、練上がり直後 (以降、締固め前) および振動締固め後 (以降、締固め後) の試料のそれぞれに対して、JIS A 1132 に準拠し、円柱試験体φ100×200mm を 1 本作製した。円柱試験体の養生は、28 日間の水中養生とし、水中養生後、打込み底面側の約 20mm は除去し、残りを上下の 2 つに分割した (高さ約 90mm)。ここで、バッチ間でフレッシュコンクリートの空気量が異なることから、各締固め時間で締固め前の試験体を作製した。

2.3 空隙特性

空隙特性として、φ100×約 90mm の 2 体を用いて、式 (1) からアルキメデス法による空隙率 P (%) (以降、空隙率) を算出するため、飽水質量 $W_b(g)$ と水中質量 $W_c(g)$ を測定した。その後、JSCE-G 582 に準拠し、2 体を温度 40℃、湿度 30% で 28 日間静置し、この時の質量を乾燥質量 $W_a(g)$ とした。

$$P = \frac{W_b - W_a}{W_b - W_c} \times 100 \quad (1)$$

ここで求まる空隙率が、硬化体中に存在した水分が逸散してできた空隙であり、コンクリートの水分の移動特性に影響を及ぼすと考えられる。また、硬化体に形成された空隙の連続性が異なると、乾燥に伴う質量減少の速度に変化がある ⁷⁾ ため、空隙率測定時の乾燥初期に着目し、飽水状態から 24 時間乾燥後の質量を式 (1) の $W_a(g)$ に代入して得られた結果を 24 時間空隙率と称する。

2.4 水分浸透特性

水分浸透特性は、空隙率の測定に用いた 2 体のφ100×約 90mm から、JSCE-G 582 を参考に試験した。ここで、高炉スラグ微粉末で置換したコンクリートでは、水分浸透深さを目視または現像材で確認できない場合があることが報告されている ^{例え 8)}。そのため、文献 ⁹⁾ で水分浸透試験後の質量変化率と水分浸透深さの関係が示されていることから、水分浸透試験前後で試験体の質量を 0.1g 単位で測定した。質量変化率は、水分浸透試験直前の質量を基準とし、各試験時間 (5, 24, 48) 後に測定した質量差を百分率で表した。また、各浸せき時間の平方根に対する質量変化率の近似直線の傾きを、質量変化率による水分浸透速度係数 (%/√hr) と定義し、2 体の平均を結果と

表-3 締固めの条件とフレッシュコンクリートの空気量および空隙特性

配合	締固め時間 (秒)	締固め前					締固め後				
		空気量 (%)	空隙率 (%)	24 時間空隙率 (%/24hr)	気泡量 (%)	気泡間隔係数 (μm)	空気量 (%)	空隙率 (%)	24 時間空隙率 (%/24hr)	気泡量 (%)	気泡間隔係数 (μm)
OPC	5	4.6	10.1	3.56	3.1	241	3.0	9.80	3.52	2.8	226
	15	4.4	8.95	3.12	3.1	353	3.3	7.89	2.79	1.3	303
	30	3.5	10.7	3.78	3.7	234	3.5	9.22	3.30	2.5	330
B50	5	測定データなし									
	15	4.4	7.21	2.30	3.9	278	3.5	7.30	2.31	3.1	301
	30	3.8	7.41	2.48	3.3	294	2.8	6.70	2.14	2.1	278
B70	5	3.0	7.14	2.15	2.6	351	3.5	7.00	2.29	2.5	314
	15	3.5	6.78	2.22	3.9	390	2.6	6.52	2.30	1.9	311
	30	3.5	7.11	2.31	2.1	330	2.3	6.61	2.12	1.7	359
B80	5	3.2	6.59	2.33	3.4	433	3.3	6.31	2.14	2.5	232
	15	3.8	6.36	2.29	2.2	354	2.6	6.06	2.01	1.3	397
	30	3.6	6.50	2.30	2.2	376	2.6	6.33	2.19	1.7	572

した。

2.5 気泡特性

気泡特性として、気泡径の分布（気泡径 30～6000μm）を ASTM C457-16 によるリニアトラバース法に準拠して測定した。試験位置を水分浸透試験に用いた打込み面側の試験体の切断面を対象に、表面を#200, #500, #1000 および#2000 の研磨材を用いて平滑に研磨仕上げを行い測定面とした。なお、コンクリート中のモルタル部分を測定することで、トラバース長は骨材最大寸法 5mm のときの最小値 1397mm 以上となるように設定した。式(2)から気泡量 A(%)を算出するため、トラバース線上の気泡の全長(A_{traverse}(μm))を対象に測定した。

$$A = \frac{A_{traverse}}{1420490} \times 100 \quad (2)$$

また、締固めに伴う気泡組織を把握するため、気泡径の分布と、気泡の平均間隔を表す気泡間隔係数 \bar{L} (μm)を求めた。気泡間隔係数はいずれの試験体も $p/A > 4.342$ であったことから式(3)により算出した。

$$\bar{L} = \frac{3}{\alpha} \left[1.4 \left(\frac{p}{A} + 1 \right)^{1/3} - 1 \right] \quad (3)$$

ここに、 α : 気泡比表面積(μm²/μm³)、 p : ペースト容積比(%)である。

3. 実験結果

3.1 締固めに伴うフレッシュコンクリートの空気量

振動締固めの条件とフレッシュコンクリートの空気量の結果を表-3 に示す。ほとんどのケースで締固めに伴い空気量は低下する傾向となったが、OPC の 30 秒お

よび B80 の 5 秒では変化がなく、B70 の締固め時間 5 秒では空気量が増加した。

3.2 締固めに伴う空隙および気泡特性

振動締固めの条件と空隙率、24 時間空隙率、気泡量および気泡間隔係数の結果を表-3 に示す。

空隙率については、締固め前に対して 1%以上減少したものは、OPC の 15 秒および 30 秒であり、0.5%以上減少したものは、B50 の 30 秒および B70 の 30 秒であった。その他のものでは、締固め前と同程度であった。

24 時間空隙率については、締固め前に対して 0.3%以上減少したものは、OPC の 15 秒および 30 秒、B50 の 30 秒であり、その他のものでは、締固め前と同程度であった。なお、増加の程度は 0.14%と大きくはないものの、今回のケースで最も増加したのは B70 の 5 秒であった。

気泡量については、締固め前に対して、ほとんどのケースで減少しているが、B70 の 5 秒では、締固め前と同程度であった。

気泡間隔係数については、締固め前に対して 100μm 程度増加したものは、OPC の 30 秒、B80 の 30 秒であった。また、締固め前に対して減少したものは、B70 の 15 秒で 79μm、B80 の 5 秒で 201μm であった。その他の配合では、締固め前と同程度であった。締固めに伴い、気泡間隔係数が減少したのは、粗大な気泡が除去されること、微細気泡が生じたことなどで、気泡比表面積が増加したためと考えられる。

振動締固めの条件と各気泡径の気泡量の関係を図-1 に示す。締固めに伴い、ほとんどの気泡径で気泡量が減少したが、増加する気泡径もあった。具体的に、OPC の

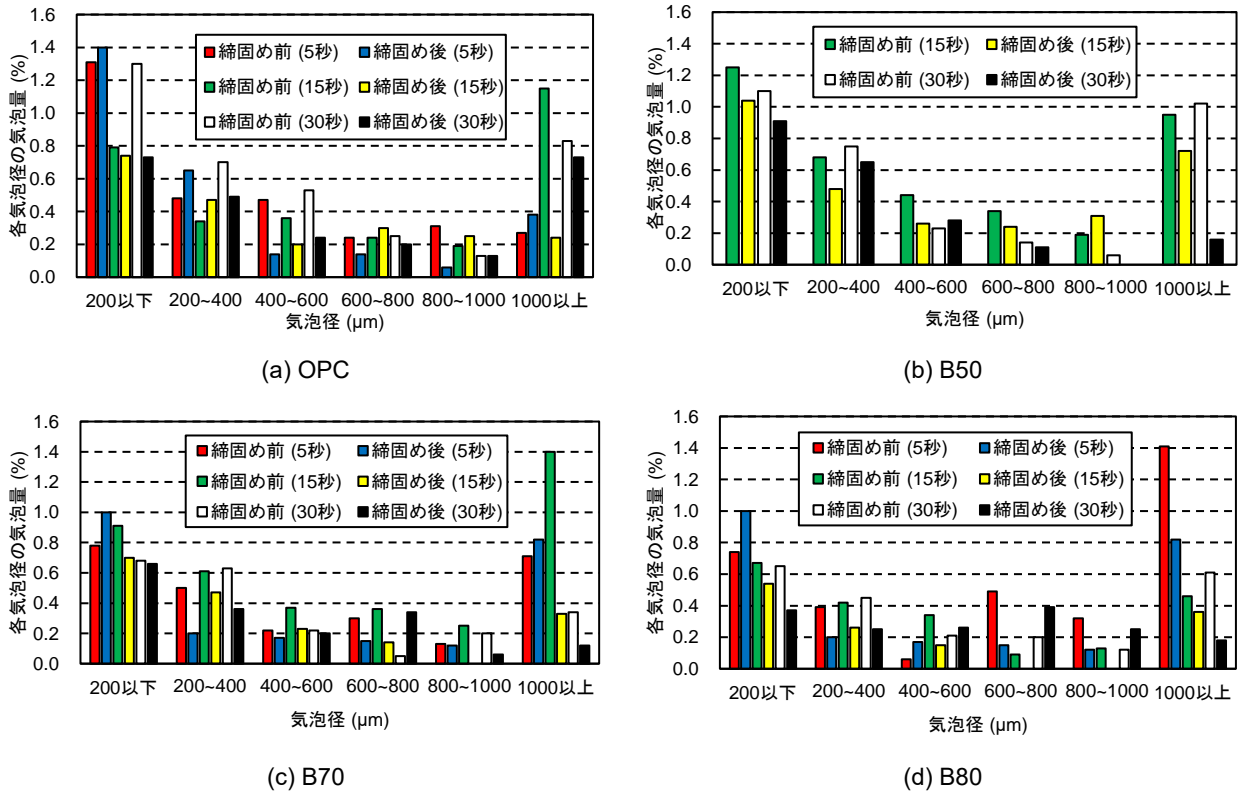


図-1 締固めの条件と各気泡径の気泡量の関係

表-4 締固めの条件と質量変化率による水分浸透速度係数の関係

配合	締固め時間 (秒)	水分浸透速度係数 ($\%/\sqrt{\text{hr}}$)	
		締固め前	締固め後
OPC	5	0.36	0.33
	15	0.30	0.28
	30	0.35	0.29
B50	5	測定データなし	
	15	0.16	0.17
	30	0.17	0.16
B70	5	0.15	0.19
	15	0.17	0.15
	30	0.17	0.17
B80	5	0.19	0.067
	15	0.13	0.10
	30	0.10	0.078

5秒では、気泡径 200~400 μm 、B50 の 15秒では、気泡径 800~1000 μm 、B80 の 5秒では、気泡径 200 μm 以下で、増加する傾向がみられた。気泡特性と空隙特性には、一定の関係性が見られなかったことから、空隙特性に気泡が及ぼす影響は小さいと考えられる。

3.3 締固めに伴う水分浸透特性

振動締固めの条件と質量変化率による水分浸透速度係数の関係を表-4 に示す。質量変化率に伴う水分浸透速度係数では、締固め前に対して減少したものは、OPC の 30秒、B80 の 5、15 および 30秒であり、締固め前に対して増加したものは B70 の 5秒であり、その他のものでは、締固め前と同程度であった。

3.4.3 章のまとめ

本章では、振動締固めによるフレッシュコンクリートの空気の状態の変化が、硬化体の空隙特性、気泡特性および水分浸透特性に及ぼす影響を実験により求めた。その結果、配合や振動締固めの条件に対して一定の関係性は確認できなかったため、表-5 に示すように分類した。分類の方法は、次の通りである。

締固め後のフレッシュコンクリートの空気量が増加したものは B70 の 5秒 (シリーズ 4) であり、それ以外の場合は減少あるいは変化なしであった。

空気量が減少する場合で、締固めの前後で最も変化が確認できた気泡間隔係数に着目すると、B80 の 15秒が 43 μm 、B80 の 30秒が 196 μm の増加で、B50 の 15秒が 23 μm 、B70 の 30秒が 29 μm の増加であったことから、50 μm 程度以上の変化を 1つの判断基準とした。空気量が減少し、気泡間隔係数が 50 μm 程度以上増加した場合をシリーズ 1 とし、気泡間隔係数が 50 μm 程度以上減少した場合をシリーズ 2 とし、気泡間隔係数が 50 μm 以上の変化なしのものをシリーズ 3 とした。

表-5 シリーズの分類

分類	空気量	気泡量	気泡間隔係数	質量変化率による水分浸透速度係数	分類されるデータ
シリーズ 1	減少	減少	50 μ m 程度増加	減少	B80 (15, 30 秒)
シリーズ 2			50 μ m 程度減少	変化なし	OPC (15 秒), B70 (15 秒)
シリーズ 3			50 μ m 以上の変化なし		OPC (5 秒) B50 (15, 30 秒), B70 (30 秒),
シリーズ 4	増加	変化なし		増加	B70 (5 秒)

フレッシュコンクリートの空気量が変化なしとなった OPC の 30 秒と B80 の 5 秒は、気泡間隔係数が大きくなるものと小さくなるものであり、どちらも気泡量および水分浸透速度係数は小さくなっている。この原因は、本論文では分からなかったため、今後の検討課題とする。

4. 考察

4.1 シリーズ 1

シリーズ 1 は、振動締固めを与えたフレッシュコンクリートの空気量は減少する傾向にあり、硬化体の気泡量は減少し、気泡間隔係数は増加するものである。この時、水分浸透速度係数は減少する傾向となった。これに分類されたデータは、B80 の 15, 30 秒である。このシリーズでは、締固めに伴い気泡の量が減少することで、フレッシュコンクリートの空気量は減少し、硬化体の気泡量も減少したと考えられる。気泡の減少に伴い、気泡間隔係数が増加し、水分浸透速度係数も減少したと考えられる。

4.2 シリーズ 2

シリーズ 2 は、振動締固めを与えたフレッシュコンクリートの空気量は減少する傾向にあり、硬化体の気泡量は減少し、気泡間隔係数は減少するものである。この時、水分浸透速度係数は変化しない結果となった。これに分類されたデータは、OPC の 15 秒と B70 の 15 秒である。このシリーズでは、締固めに伴い気泡の量が減少することで、フレッシュコンクリートの空気量は減少し、硬化体の気泡量も減少したと考えられる。気泡間隔係数が減少していることから、図-1 の気泡径の分布の変化をみると、どちらも締固めに伴い全ての気泡径で減少しているが、特に、気泡径 1000 μ m 以上の気泡量が大きく減少している。各気泡径で気泡量が減少しているにもかかわらず気泡間隔係数が減少したのは、気泡径 1000 μ m 以上の気泡量が大きく減少したため、硬化体中の気泡の平均弦長が減少し、気泡比表面積が増加したためと考えられる。一般に、気泡間隔係数が減少すると、水分浸透速度係数は増加すると考えられるが、一方で筆者らは粗大な

気泡の増加に伴い、水分浸透速度係数が増加することを報告している⁷⁾。このことから、締固め前では粗大な気泡が水分浸透速度係数に影響し、締固め後では粗大な気泡の影響は小さくなる一方で気泡間隔係数の減少が影響し、結果として、両者の水分浸透速度係数に大きな違いがなかったと考えられる。

4.3 シリーズ 3

シリーズ 3 は、振動締固めを与えたフレッシュコンクリートの空気量は減少する傾向にあり、硬化体の気泡量は減少し、気泡間隔係数は変化しないものである。この時、水分浸透速度係数は変化しない結果となった。このシリーズに分類されたデータは、OPC の 5 秒、B50 の 15, 30 秒、B70 の 30 秒である。このシリーズでは、締固めに伴い気泡の量が減少することで、フレッシュコンクリートの空気量は減少し、硬化体の気泡量も減少したと考えられる。しかし、気泡間隔係数はあまり変化していないことから、図-1 の気泡径の分布の変化をみると、締固めに伴い気泡径ごとに気泡量の増減がある場合となっている。振動締固めに伴い増加した気泡径の範囲をみると、OPC の 5 秒では 400 μ m 以下と 1000 μ m 以上、B50 の 15 秒は 800~1000 μ m、B50 の 30 秒は 400~600 μ m、B70 の 30 秒は 600~800 μ m で、その他の気泡径の範囲については減少する結果となっている。このように、特定の気泡径の変化が影響しているわけではないことから、締固めに伴う気泡量の減少と気泡比表面積がバランスし、気泡間隔係数が変化しなかったと考えられる。そして、水分浸透速度係数をみると、気泡間隔係数が変化していないことから、締固めに伴い変化しなかったと考えられる。

4.4 シリーズ 4

シリーズ 4 は、振動締固めを与えたフレッシュコンクリートの空気量は増加したが、硬化体の気泡量および気泡間隔係数はほとんど変化しないものである。この時、水分浸透速度係数は増加する結果となった。まず、振動締固めに伴う気泡径の分布の変化に着目する。図-1(c)をみると、気泡径 200 μ m 以下、1000 μ m 以上の気泡量が

増加傾向にあり、それ以外の気泡径では減少する傾向にある。そのため、気泡量および気泡間隔係数は、締固め前と同程度となったと考えられる。さらに、3.2 から、24 時間空隙率は、B70 の 5 秒がもっとも増加する結果となっている。また、水分浸透速度係数も増加していることから、同程度の気泡量および気泡間隔係数のとき、気泡径 1000 μm 以上の比較的粗大な気泡が乾燥や水分浸透速度係数に影響を及ぼしていると考えられる。

4.5 4 章のまとめ

本研究の検討の範囲では、振動締固めによりフレッシュコンクリートの空気量が増加したシリーズ 4 のみで、水分浸透速度係数および 24 時間空隙率が増加した。これは、振動締固めにより 1000 μm 以上の気泡が増加したことが主な原因であると考えられる。一方で、振動締固めによってフレッシュコンクリートの空気量が減少し、硬化体の気泡量が減少しても、気泡間隔係数が増加するような気泡径の変化が生じなければ、水分浸透速度係数が変化しない場合（シリーズ 2 およびシリーズ 3）もあった。つまり、振動締固めによって変化しない硬化特性もあり、必ずしも全ての硬化特性、すなわち、硬化体の品質が向上するわけではないことがわかる。

5. まとめ

振動締固めによるフレッシュコンクリートの空気の状態の変化が、硬化体の空隙特性および水分浸透特性に与える影響について実験により調べた。得られた知見を次に示す。

- (1) 振動締固めによって、フレッシュコンクリートの空気量および硬化体の気泡量が減少し、気泡間隔係数が増加するような気泡径の変化を生じると、水分浸透速度係数は減少する。
- (2) 振動締固めによって、フレッシュコンクリートの空気量および硬化体の気泡量が減少し、粗大な気泡量の減少に伴い気泡間隔係数が減少する場合は、水分浸透速度係数は変化しない。
- (3) 振動締固めによって、フレッシュコンクリートの空気量および硬化体の気泡量が減少し、気泡径ごとに気泡量が増減することで気泡間隔係数が変化しない場合は、水分浸透速度係数は変化しない。

- (4) 振動締固めによって、フレッシュコンクリートの空気量が増加し、気泡径 1000 μm 以上の気泡量が増加する場合、気泡間隔係数は変化せず、乾燥の速度および水分浸透速度係数は増加する。

謝辞

本研究を行うにあたり、東京理科大学非常勤講師である飛島建設(株) 平間昭信氏に指導、助言を賜りました。ここに深甚の謝意を表します。

参考文献

- 1) 土木学会：2023 年制定コンクリート標準示方書 [施工編]，2023
- 2) 梁俊，丸屋剛，坂本淳，宇治公隆：締固め完了エネルギーによる同一スランプコンクリートの施工性評価，コンクリート工学年次論文集，Vol.23，No.1，pp.1393-1398，2009
- 3) 桜井邦昭，伊佐治優，十河茂幸：締固めによる空気量の減少が耐凍害性に及ぼす影響に関する実験的検討，Vol.43，No.1，pp.604-609，2021
- 4) 土木学会：混和材を大量に使用したコンクリート構造物の設計・施工指針（案），2018
- 5) 土木学会：コンクリート技術を活用したカーボンニュートラルの実現に向けて，2023
- 6) 千葉県生コンクリート品質管理監査会議：令和 3 年度版 品質管理監査のまとめ，p.10，2022
- 7) 田澤佑介，鈴木将充，加藤絵万，加藤佳孝：フレッシュコンクリートの空気量が硬化体の空隙および物質移動抵抗性に及ぼす影響に関する実験的検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.45，No.1，pp.316-321，2023
- 8) 鎌田知久，岸利治：乾燥に伴う水分の逸散と空隙構造の変化がセメント硬化体への液状水浸透性状に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.41，No.1，pp.641-646，2019
- 9) 高橋駿人，加藤佳孝：中性化したコンクリートの水分浸透速度係数に関する検討，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集，No.22，pp.103-106，2022