

論文 振動締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

坂野 大世*1・山田 悠二*2・川崎 佑磨*3

要旨：本研究では、スランプ 12cm を基準としたコンクリートの振動締め時間が、充填率、力学的特性、細孔構造に与える影響について検討した。振動締め時間は、コンクリート標準示方書に規定されている 5～15 秒に基づき、0、5、15、25 秒の 4 ケースで実験を行った。その結果、振動締め時間の増加に伴い、充填率および圧縮強度がわずかに増加した。細孔構造に関しては、径のばらつきが小さくなり、小径化することが確認された。

キーワード：振動締め時間、充填率、力学的特性、細孔径分布、累積空隙量

1. はじめに

建設業就業者数は、少子高齢化の影響により、2008 年からの 10 年間で約 30 万人以上が減少しているなど、深刻な作業員不足に陥っている。その解決策として、国土交通省は、i-construction の一環である「コンクリート工の効率化」を推進し、鉄筋コンクリート構造物の現場打ちコンクリートにおける目標スランプを 8cm から 12cm に見直し、流動性を向上させた。その結果、時間当たりの打込み量は 22% 向上し、作業員数を 19% 削減できる効果が得られた。

一方で、コンクリート標準示方書施工編において、振動締め時間は、5～15 秒程度と規定²⁾されており、現場では技術者がその範囲内で振動締め時間を決定している。しかしながら、上述のようにコンクリートの流動性を向上させたにも関わらず、この振動締め時間の規定は変更されていない。スランプ 12cm のコンクリートに対して現行の振動締め時間が与える各種要因については明確になっていない。これまでに、セメント量の 50% を高炉スラグ微粉末によって置換した、スランプ 17cm のコンクリートなどに対して、コンクリートの性状ごとに最適な振動締め時間が存在する³⁾ことや、振動時間が長いほど表面空隙率や中性化が小さくなる傾向があること³⁾が報告されている。したがって、振動締め時間が、コンクリートの各種品質に影響を与える可能性が考えられる。また、振動締め時間がコンクリートの圧縮強度に与える影響について、振動締め時間の増加によって圧縮強度が増加する傾向がある⁴⁾ことや、圧縮強度は締め度⁵⁾に比例して増加する傾向があること⁵⁾が報告されている。

しかしながら、これらの既往研究は、バイブレータの使用方法に関する提案や、締め時の振動エネルギーの

伝搬状況の可視化、締め性の評価方法の提案など締め施工に着目したものであり、振動締めを行った後のコンクリートの品質等を主として行われた研究はあまり存在しない。また、振動締めによって生じるコンクリート内部の細孔構造に着目した研究報告も数少ない。

そこで本研究では、テストピースサイズの無筋コンクリートを対象として、異なる振動締め時間を適用したスランプ 12cm のコンクリートの硬化後の各種品質を各振動締め時間で評価した。特に、スランプの増大に伴って懸念される、過剰な振動締めによる影響を検討するための、基礎的なデータの取得に重点を置いた。具体的には、1 配合のコンクリートに対して、0 秒（振動締めを行わないもの）、5 秒、15 秒、25 秒（規定よりも長い時間）の 4 ケースの振動締め時間が、硬化後の充填率、圧縮強度、静弾性係数、ポアソン比、細孔径分布、累積空隙量へ与える影響について検討した。ただし、本研究は、最適な振動締め時間を示すことが目的ではない。また、本論文中にて示す結果は、今回設定した配合、振動締め時間等の条件下において得られたものであることに注意されたい。

2. 実験供試体の概要

配合は、生コンクリートプラントの配合を参考として、目標スランプが 12cm、目標空気量が 4.5%、水セメント比が 55% となるように行った。供試体の使用材料および配合を表-1、表-2 に示す。スランプ、空気量の実測値は、それぞれ 10.5cm、5.5% となり、両者とも許容範囲（スランプ：12±2.5cm、空気量：4.5±1.5%）に含まれることが確認された。作製したコンクリート供試体は、各ケースで $\phi 100 \times 200$ mm の円柱供試体を 3 体とした。各供試体は、JISA 1132 に基づいて作製した。コンクリートの打

*1 立命館大学 理工学部 都市システム工学科 (学生会員)

*2 福岡大学 工学部 社会デザイン工学科 助教 博 (工) (正会員)

*3 立命館大学 理工学部 環境都市工学科 准教授 博 (工) (正会員)

込みは、2層とした。振動締め時間は、振動締めを行わない0秒、コンクリート標準示方書施工編に規定されている振動締め時間の上下限値である5秒、15秒、規定外となる25秒の4ケースとし、棒状バイブレータにより振動締めを行った。図-1に示すように、断面中央部1点にバイブレータを挿入した。また、各層におけるバイブレータの挿入深さがJIS A 1132の規定通りとなるように、写真-1のようにバイブレータの先端に挿入深さの目印となるテープを設け、1層目の振動締め時は白色のテープの下端を、2層目時の振動締め時は紺色のテープの下端を型枠の縁の高さに合わせて振動締めを行った。棒状バイブレータは、振動体の直径28mm、出力280W、振動数200-242Hzのものを用いた。また、表層への粗骨材の露出を防止し、各種試験実施が困難となる状況を避けるため、2層目の振動締め終了後に、型枠外から木槌で軽く再振動を行った。その位置と回数は、供試体高さ中央の円周方向の等間隔の4箇所を2回ずつとした。

3. 評価方法

3.1 コンクリートの充填率

コンクリート供試体の実測密度 ρ_{rtp} (kg/m³)を測定し、実測空気量に基づき修正した各材料の単位容積質量の合計値 M'_s (kg/m³)を算出した。硬化後のコンクリート供試体の気乾状態における充填率 ϕ_{rp} (%)は以下の式(1)より算出した。

$$\phi_{rtp} = \rho_{rtp} / \rho_{ttp} \times 100 \quad (1)$$

$$\rho_{rtp} = m_{rtp} / V_{rtp} \quad (2)$$

$$\rho_{ttp} = M'_s / (V_M + V_{Air}) \quad (3)$$

$$V_{Air} = (P_{Air} \times V_M) / (100 - P_{Air}) \quad (4)$$

ここで、 ρ_{rtp} は脱型時の供試体密度 (kg/m³)で式(2)より算出した。 m_{rtp} は脱型時の供試体質量 (kg)、 V_{rtp} は脱型時の供試体体積 (m³)を示している。 ρ_{ttp} は供試体の理論密度 (kg/m³)で式(3)より算出した。 V_M は各材料の体積の合計値 (m³)を示し、 V_{Air} は実測された空気量分の体積 (m³)を示しており式(4)で算出した。 P_{Air} は実測空気量 (%)を示している。

脱型時の供試体質量、体積の測定は、材齢2日後に行った。本研究では、振動締め時間の影響を確認することを主眼としており、収縮などの他要因による影響が入らないように、硬化後すぐに質量と体積の測定を行った。

3.2 力学的特性

圧縮強度、静弾性係数、ポアソン比について評価を行った。圧縮強度試験はJIS A 1108に、静弾性係数試験はJIS A 1149に準拠して行った。いずれの試験も1ケース当たり3体の供試体(両試験を同一供試体で実施)で、

表-1 使用材料

材料	記号	種類	密度 (g/cm ³)
セメント	C	普通ポルトランドセメント	3.16
水	W	水道水	1.00
細骨材	S	砕砂 甲賀土山産	2.62 (表乾)
粗骨材	G1	砕石 2010 甲賀土山産	2.68 (表乾)
	G2	砕石 1505 甲賀土山産	2.67 (表乾)
	-	2010:1505=6:4	2.66 (表乾)
混和剤	Ad1	高性能AE減水剤 C×0.67% (ポリカルボン酸エーテル系)	1.08
	Ad2	AE助剤 C×0.3% (変性ロジン酸化合物系 陰イオン界面活性剤)	1.04

表-2 コンクリートの配合

G _{max} (mm)	SL (cm)	W/C (%)	Air (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)						
					W	C	S	G		Ad1	Ad2
								G1	G2		
20	12	55	4.5	46.5	171	309	837	587	391	2.07	0.93

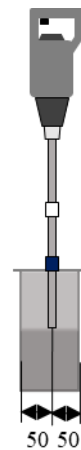


図-1 バイブレータの挿入位置



写真-1 挿入深さの指示マーク

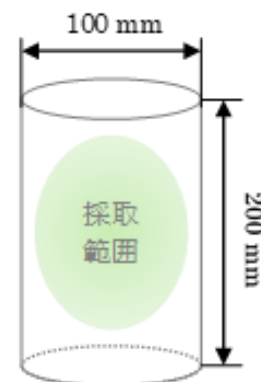


図-2 試料採取範囲

材齢28日まで養生室内(温度:20°C±2°C、湿度90%±5%)で気中養生にて保管し、試験直前に両端面を研磨した。ポアソン比の測定は、静弾性係数試験と同時にを行い、静弾性係数試験用の縦ひずみゲージと、その上に張り付けた横ひずみゲージから得られた測定結果から算出した。

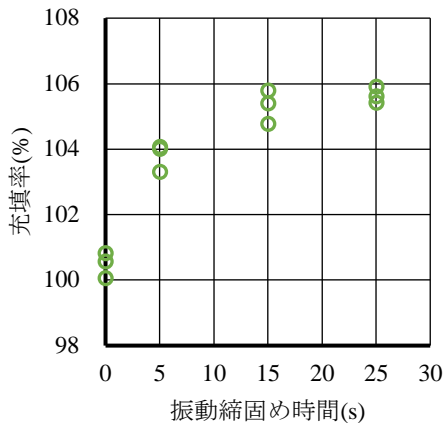


図-3 締固め時間と充填率の関係

表-3 供試体の充填率および単位容積質量

振動締固め時間 (s)	充填率 ϕ_{rp}			単位容積質量 平均値(kg/m ³)
	平均値(%)	標準偏差(%)	変動係数(%)	
0	100.5	0.3	0.3	2297.0
5	103.8	0.3	0.3	2372.7
15	105.3	0.4	0.4	2407.6
25	105.6	0.2	0.2	2415.0

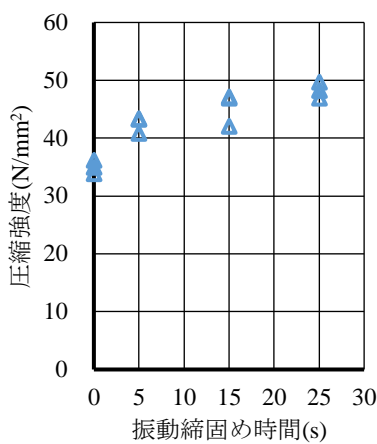


図-4 締固め時間圧縮強度の関係

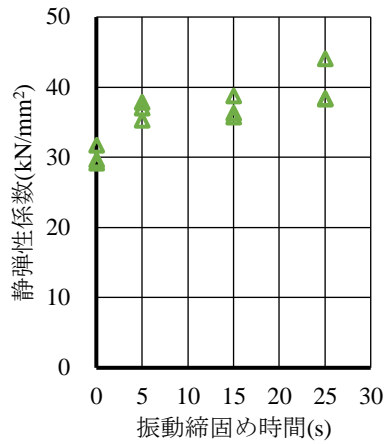


図-5 締固め時間静弾性係数の関係

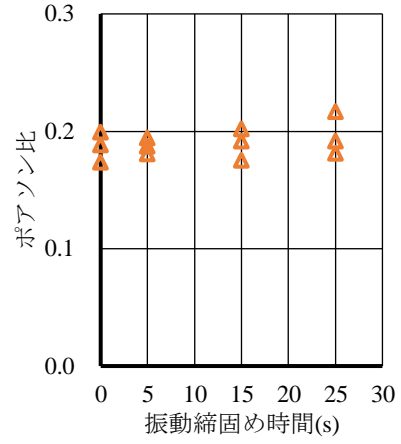


図-6 締固め時間ポアソン比の関係

3.3 細孔径分布・累積空隙量

細孔径分布・累積空隙量は、水銀圧入式細孔分布測定装置(測定範囲:0.005~360 μ m)を用いて算出した。試料は、材齢28日に行った圧縮強度試験後の供試体の図-2に示される範囲の破片で、各ケース1体ずつをへら越しにハンマーで打撃することによって粉碎し、5 \times 5 \times 5mm程度のかげらを25個以上採取した。それらを水和停止するために、アセトンに4時間浸漬した後、105 $^{\circ}$ Cの乾燥炉において24時間乾燥させ、試験開始まで真空環境下で保管した。

4. 実験結果および考察

4.1 充填率

硬化後のコンクリート供試体の気乾状態における充填率 ϕ_{rp} の振動締固め時間ごとの算出結果を図-3に、充填率 ϕ_{rp} および単位容積質量を表-3に示す。いずれの供試体においても、脱型時における充填率の平均値は100%を上回る結果となった。充填率が100%を越える供試体、すなわち実測密度が、理論密度よりも大きい供試体に対して、振動締固め時間の検討や充填性を検討する行為は、本来の目的ではないといえる。前述の通り、本研究では、過剰な振動締固めによる各種品質への影響の

検討についても目的としているため、充填率を振動締固めごとに比較検討するための一指標とする。振動締固め時間の増加に伴って、充填率は106%に漸近するように増加することが確認された。振動締固め時間15秒と25秒の充填率に大きな差異がないことから、15秒以上の振動締固めによる充填効果は得られにくいことが考えられる。振動締固め時間の違いによる充填率の差を振動締固めの有無で比較した場合、振動締固め時間0秒の時の充填率の平均値が100.5%に対して、振動締固め時間5,15,25秒の時の充填率の平均値は103.8~105.6%となり、3.3~5.1%の差が生じていることが確認された。この差は、単位容積質量に直すと、75.7~118.0kg/m³となる。すなわち、振動締固めの有無は充填率に大きな影響を及ぼしていると考えられる。また、振動締固めをしない場合でも充填率は100.5%となった。このことから、充填不足はなく、コンクリート型枠に合わせて厳密に打込みを行ったことにより、コンクリート供試体の寸法には影響がほとんど生じなかったことが考えられる。したがって、この単位容積質量の差は、コンクリート内部の空隙量に大きな影響を与えていると推測される。一方で、振動締固めを行った3ケースのみの結果で比較した場合、振動締固め時間5秒と15秒における差は平均値で1.5%となり、

表-4 力学的特性

振動締め時間(s)	圧縮強度 平均値 (N/mm ²)	標準偏差 (N/mm ²)	変動係数 (%)	静弾性係数 平均値 (kN/mm ²)	標準偏差 (kN/mm ²)	変動係数 (%)	ポアソン比	標準偏差	変動係数 (%)
0	35.0	1.0	2.8	30.2	1.1	3.7	0.187	0.0105	5.6
5	42.5	1.2	2.8	36.7	1.1	2.9	0.187	0.0056	3.0
15	45.4	2.3	5.1	37.0	1.3	3.6	0.190	0.0109	5.7
25	48.3	1.2	2.4	40.3	2.7	6.7	0.197	0.0150	7.6

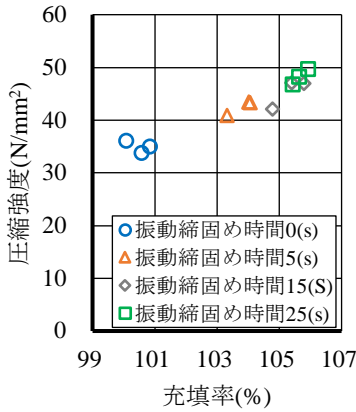


図-7 充填率と圧縮強度の関係

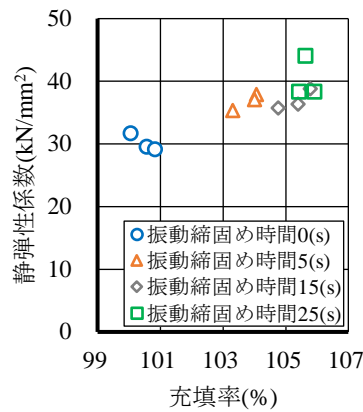


図-8 充填率と静弾性係数の関係

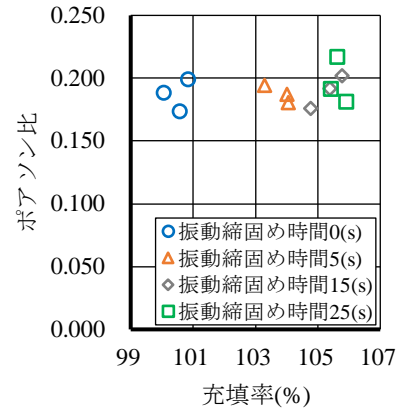


図-9 充填率とポアソン比の関係

単位容積質量では 34.8kg/m³ となる。振動締め時間 15 秒と 25 秒における差は平均値で 0.3%となり、単位容積質量では 7.5kg/m³ となる。したがって、振動締め時間 5 秒と 15 秒、振動締め時間 15 秒と 25 秒では、前者の方が充填率に、より影響を与えていることが確認された。

4.2 力学的特性

圧縮強度試験の結果を図-4 に、静弾性係数試験の結果を図-5 に、ポアソン比測定の結果を図-6 に、各種力学的特性の結果の平均値を表-4 に示す。また、充填率と圧縮強度、静弾性係数、ポアソン比それぞれとの関係を、図-7、図-8、図-9 に示す。

図-4 の圧縮強度の結果から、既往研究⁴⁾と同様に振動締め時間が長くなるほど、圧縮強度が増加する傾向が確認された。振動締め時間の有無で比較すると 7.5~13.3N/mm²、振動締め時間 5 秒と 15 秒では 2.9N/mm²、振動締め時間 15 秒と 25 秒でも 2.9N/mm²の差である。圧縮強度でも、振動締め時間の有無による影響が大きく得られた。図-5 の静弾性係数の結果では、振動締め時間が 0 秒から 5 秒に増加することによって、静弾性係数の平均値は 6.5kN/mm² 増加したものの、土木学会コンクリート標準示方書の振動締め時間の規定である 5~15 秒においては、0.3kN/mm² の差でほとんど変化しないことが確認された。図-6 のポアソン比の結果では、振動締め時間の増加に伴う明確な変化は確認されず、ほぼ一定値をとることが確認された。

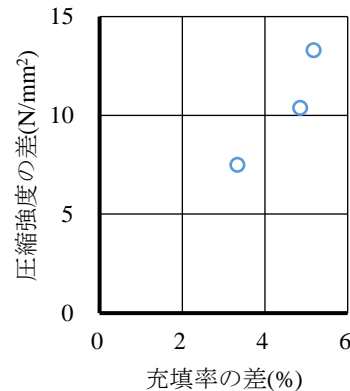


図-10 充填率の差と圧縮強度の差の関係

図-7 の充填率と圧縮強度の関係を見てみると、充填率と圧縮強度との間に正の相関関係があることが確認された。これらの結果から、振動締めによって粒子径の大きな空隙の要因となるエントラップトエアが取り除かれて、そのスペースにコンクリートが充填されることによってコンクリート供試体が密実になり、圧縮強度が増加したことが考えられる。これは、前述した図-3 の充填率の結果でも同様の結果が得られている。図-8 の充填率と静弾性係数の関係を見てみると、圧縮強度と同様に充填率と正の相関関係があることが確認される。これは、圧縮強度と静弾性係数に正の相関があるためである。図-9 の充填率とポアソン比の関係を見てみると、充填率に関わらずポアソン比はほぼ一定の値であることがわかる。図-10 に充填率の差と圧縮強度の差の関係を示す。これは、振動締め時間 0 秒と各振動締め時間で得ら

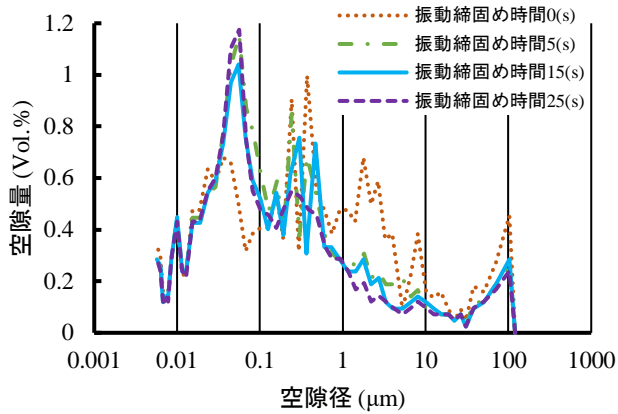


図-11 細孔径分布

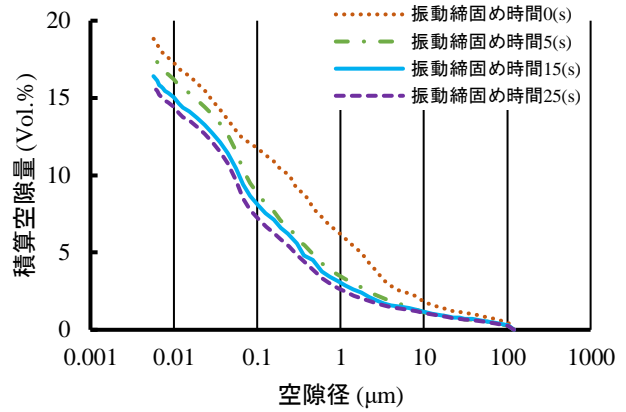


図-12 積算空隙量

れた充填率の平均と圧縮強度の平均の差をプロットしたものである。本研究では、充填率をφ100×200mmの円柱から算出しており、その体積は1m³の1/500しかないため非常に小さな体積から算出されている。そのため、充填率の差は最大で5.1%しかないが、圧縮強度は13.3N/mm²の差があり、コンクリートの力学的特性に対しては大きな影響を及ぼしていることが確認された。

4.3 細孔径分布・累積空隙量

コンクリート供試体の細孔径分布の算出結果を図-11に、累積空隙量の算出結果を図-12に示す。また、水銀圧入式細孔分布測定に使用した試料を採取したコンクリート供試体の圧縮強度を表-5に示す。細孔径分布に関して、振動締め時間0秒のコンクリートは、細孔径分布のばらつきが比較的大きく、0.1~10μmの範囲の複数の径において大きなピークが存在することが確認された。それに対して、振動締めを行った場合、5、15、25秒いずれの供試体においても0.05μm程度の空隙径が最大のピークとなり、0.1~10μmの範囲におけるピーク値は振動締め時間0秒よりも小さいことが確認された。また、振動締め時間5秒と15秒では、0.1~1μmの範囲で振動締め時間0秒と同じようなピークが検出されている。すなわち、振動締めの有無では1~10μmの範囲のピークに大きな差が確認された。これらのことから、振動締めをすることによって1μm以上の空隙径の量を減少する効果が示された。また、振動締め時間25秒の結果では、空隙径0.1~10μmの範囲において、各空隙径のピーク値が小さいなど、他のケースよりもバラつきが小さいことが確認できる。図-3の充填率、図-7の圧縮強度においても、振動締めの有無の違いは明確に確認されており、0.05~0.1μmの微細な空隙径が増加して、コンクリートの緻密性が向上していると考えられる。しかしながら、振動締め時間の増加に伴って振動に伴う材料分離が起因してブリーディングが多く生じ、このブリーディングによって打込み方向上部にかけて毛細管空

表-5 水銀圧入試料の圧縮強度

振動締め時間(s)	圧縮強度(N/mm ²)
0	33.8
5	43.2
15	42.1
25	48.3

隙が増加することが既往研究⁶⁾により報告されている。毛細管空隙の径は0.003~30μm⁷⁾程度とされていることから、振動締めによって増加する0.05μm程度の径は、毛細管空隙として存在している可能性も考えられる。すなわち、微小径の空隙量が多く緻密化しているコンクリートであれば物質移動抵抗性も向上すると考えられるが、振動締めによって生じるブリーディングにより毛細管空隙が増加する場合、物質移動抵抗性は低減することが考えられる。本研究では、ブリーディング量の測定など材料分離に関連する試験を実施していないため、今後は材料分離抵抗性や耐久性に関する検討を進めていく予定である。

図-12の結果から、振動締め時間の増加に伴い各空隙径の積算空隙量が減少している。これは、振動締め時間5秒と15秒の場合は1~10μmの範囲、振動締め時間25秒の場合は0.1~10μmの範囲の粒子径の空隙量が大きな影響を与えていると考えられる。すなわち、振動締めにより0.1μm以下の微小な空隙径を増加させたわけではなく、振動締め時間5秒と15秒では1μm以上、振動締め時間25秒では0.1μm以上の空隙径を低減させたと考えられる。表-6の水銀圧入式細孔分布測定に使用したコンクリート供試体の圧縮強度試験結果より、振動締め時間が長いほど圧縮強度が増加していること、0.1~10μm径の空隙量の分布のバラつきが最も小さい振動締め時間25秒の圧縮強度が4ケースの中で最も高いことから、0.1~10μmの空隙径が圧縮強度に影響を与えていると考えられる。これは、空隙径が比較的大きく、さらに各空隙径の空隙量のバラつきが大きい場合、

そこに応力集中が生じてひび割れが発生，進展して，荷重に抵抗できなくなることが推察される。また同時に，他の空隙への負荷が大きくなることによって，漸次的にひび割れが進展し，耐力が低下して強度低下に繋がったことが考えられる。

AE 剤などでコンクリート中に連行されるエントレインドエアは，25～250 μm 程度の空気泡を指し，耐凍害性の向上に寄与することが報告されている⁸⁾。各ケースの25～250 μm 径のうち，同一サイズの径で比較すると，約100 μm 径の空隙量は，振動締固め時間 0，5，15，25 秒の順に，0.45Vol.%，0.26Vol.%，0.28Vol.%，0.24Vol.％存在することが確認された。振動締固めを行った供試体のみで比較した場合，振動締固め時間と 100 μm 径の空隙量との間に顕著な差は確認されなかった。これは，既往研究⁹⁾の結果より，振動締固めを行っても一定量のエントレインドエアが残存し続けているためであると考えられる。このことから，振動締固めによって減少した約 0.2Vol.％分は，エントラップトエアである可能性が考えられる。

一方で，モルタル中の 0.04～2 μm の細孔量が増加するにつれ耐凍害性が大きく低下¹⁰⁾することについても既往研究により報告されている。しかしながら，各ケースの 0.04～2 μm 径の累積量は，振動締固め時間 0，5，15，25 秒の順に，9.9Vol.％，10.9Vol.％，10.0Vol.％，9.7Vol.％となっており，振動締固めの有無，振動締固め時間で顕著な差が確認されなかった。しかし，気泡間隔係数が小さいほど耐凍害性は向上する¹¹⁾といった傾向もあることから，気泡間隔係数による評価についても併せて検討する必要があると考えられる。

5. まとめ

本実験では，振動締固め時間が，充填率や力学的特性，細孔構造に与える影響について 1 配合，4 ケースの振動締固め時間ごとに検討を行い，以下の結論が得られた。

- 1) $\phi 100 \times 200 \text{mm}$ の円柱供試体において，振動締固め時間の増加により，充填率は 106%に漸近するようにして増加する傾向が確認された。振動締固めの有無で比較すると，3.3～5.1%の差が生じていることが確認され，単位容積質量に直すと 75.7～118.0 kg/m^3 の差となる結果が得られた。
- 2) 振動締固め時間の増加に伴い，圧縮強度は増加する傾向が確認されたが，振動締固めを 5 秒以上行った場合における静弾性係数への影響や，振動締固め時間の差異によるポアソン比への影響は，明確には確認されなかった。また，振動締固め時間の規定を上回る 25 秒の振動締固めを行った結果，力学的特性の低下は確認されなかった。
- 3) 振動締固め時間が長いほど積算空隙量の減少が確

認された。これは，0.1～10 μm の範囲における空隙量が影響しており，締固め時間が長いほどこの範囲の空隙量が減少し，0.05 μm の空隙径が相対的に多いといった結果が得られた。振動締固め時間が長いほど圧縮強度の増加した要因として，0.1～10 μm の空隙量が影響したことが考えられる。

謝辞

水銀圧入式細孔分布測定には，北見工業大学の井上真澄准教授，崔希燮准教授，米山暁氏，小原総基氏のご協力を頂いた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 国土交通省：2018 年 10 月 12 日 i-Construction 推進コンソーシアム 第 4 回企画委員会 資料-1，p.39，2018.10
- 2) 土木学会：2017 年制定コンクリート標準示方書 [施工編]，p.122
- 3) 太田真帆，伊代田岳史：性状が異なるコンクリートにおける適切バイブレータの締固めの方法の提案，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，Vol.16，p.183-188，2016.10
- 4) 神代泰道，金子智弥：コンクリートの締固め状況の可視化に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.37，No.1，2015.7
- 5) 梁俊，國府勝郎，宇治公隆，上野敦：フレッシュコンクリートの締固め性試験法に関する研究，土木学会論文集 E，Vol.62，No.2，p.416-427，2006.6
- 6) 石垣邦彦，胡桃澤清文，名和豊春：ブリーディングがセメントペースト硬化体の微細構造に及ぼす影響評価，セメント・コンクリート論文集，66 巻，1 号，p.111-118，2012.2
- 7) 羽原俊祐，沢木大介：硬化コンクリートの空隙構造とその物性，石膏と石灰，1992 巻，240 号，p.314-323，1992.9
- 8) 公益社団法人 日本コンクリート工学会：コンクリート技術の要点'15，p.59
- 9) 坂本久史，松岡克明，井上進作，横井克則：内部振動機による締固めがコンクリート中の空気量および耐凍害性に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.36，No.1，2014.7
- 10) 新大軌，濱幸雄，澁谷将，青野義道：環境変化養生によるモルタルの細孔構造と耐凍害性の変化，セメント・コンクリート論文集，63 巻，1 号，p.155-160，2010.2
- 11) 公益社団法人 日本コンクリート工学会：コンクリート技術の要点'15，p.85