

論文 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

桜井 邦昭*1・伊佐治 優*2・十河 茂幸*3

要旨：密実なコンクリート構造物を得るには十分な締固めが必要である。一方、締固めに伴い空気量が減少すると耐凍害性の低下が懸念される。締固めによる空気量の減少が耐凍害性に及ぼす影響は十分には明らかにされていない。そこで、締固め前後のコンクリートの空気量や気泡分布の変化を調べ、これらと耐凍害性との関係を検討した。その結果、締固めにより特定の径の空気のみが低下するのではないこと、気泡径 200 μm 以下の微細な空気が 0.3~0.4%以上含有されていれば良好な耐凍害性を確保できること、締固め前後によらず、この径の空気量はコンクリート中の全空気量に対し概ね一定の割合で存在していること等を示した。

キーワード：締固め、空気量、耐凍害性、気泡分布、気泡間隔係数、エントレインドエア

1. はじめに

密実なコンクリート構造物を得るには、打ち込んだコンクリートを十分に締め固めることが肝要である。しかし、締固めによりコンクリート中の空気量が減少すると、耐凍害性の低下が懸念される。締固めに伴う空気量の減少が耐凍害性に及ぼす影響は、文献^{1)~3)}などで検討されているが、十分には明らかになっていない。

荷卸し時の品質試験として、JIS A 1128 の空気量試験が汎用的に用いられている。この試験で得られる空気量は、練混ぜ等により巻き込まれる比較的粗大な気泡(エントラップトエア)と AE 剤等により連行された微細な気泡(エントレインドエア)が混在した量である。このため、この試験から、耐凍害性の確保に重要となる後者の量のみを把握することはできない。近年、フレッシュコンクリート中の気泡分布を測定する装置も考案・市販されている⁴⁾⁵⁾が、荷卸し時の品質試験に適用するのは難しい。

施工に供するコンクリートが適切な耐凍害性を有しているかを荷卸し時の空気量試験の「空気量」から判定できれば、コンクリート構造物の品質確保・耐久性向上の観点から極めて有益である。このためには、①耐凍害性の確保に必要な微細な気泡の空気量を把握するとともに、②締固め後のコンクリートに残存する空気量のうち、耐凍害性の確保に寄与する微細な気泡が占める割合を把握する必要がある。

そこで、混和剤の種類や AE 剤の添加量を調整して空気量を種々に変化させたコンクリートを用い、締固め前後における空気量や気泡分布の変化を調べるとともに、これらの変化と耐凍害性の関係を実験的に検討した。なお、凍害には内部損傷と表面損傷(スケーリング)があるが、本研究では前者を検討対象とした。

2. 実験概要

2.1 検討ケース

検討ケースを表-1 に示す。検討要因は、締固め時間、空気量の水準および混和剤の種類とした。

締固め時間の検討では、フレッシュコンクリートの空気量が一般的な工事の目標範囲(4.5 \pm 1.5%)の中心付近のコンクリートを対象に、棒状パイプレータによる締固めを 5, 15, 30 および 60 秒間行った。

空気量の水準の検討では、AE 剤の添加量を調整して空気量を変化させたコンクリートを用いた。

混和剤の種類の検討では、後述する 3 種類の混和剤を用いるとともに、AE 剤を用いない場合も試験した。

空気量の水準および混和剤の種類の検討では、締固めに伴う空気量の減少の影響を安全側に評価する趣旨で、コンクリート標準示方書施工編に示される締固め時間の目安である 5~15 秒より長い 30 秒間締め固めた。

いずれの検討でも、締固め前後で供試体を採取して硬化後の空気量、気泡分布および耐凍害性を調べた。

2.2 使用材料およびコンクリート配合

使用材料を表-2 に、配合を表-1 中に示す。混和剤は、AE 剤のほか、AE 減水剤および高性能 AE 減水剤(以下、これらを総称して分散剤という)を用いた。

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、水セメント比 55%、スランプ 12cm とした。また、使用する混和剤の種類に応じて、空気量が 4.5%程度の際に目標スランプ 12cm が得られるように単位水量を変化させた。

なお、AE 剤の使用量の調整により練上がり時の目標空気量を変化させたケースもあるが、配合計算上の空気量は 4.5%で一定とした。

*1 (株)大林組 技術本部 技術研究所 生産技術研究部 主任研究員 博士(工学) (正会員)

*2 (株)大林組 技術本部 技術研究所 生産技術研究部 修士(工学) (正会員)

*3 近未来コンクリート研究会 代表 工博 (名誉会員)

表-1 検討ケースおよびコンクリートの配合

配合 No.	検討要因	分散剤種類	目標空気量 (%) *締固め前	締固め時間(秒)					目標スランプ (cm)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				混和剤(C×%)			フレッシュ試験結果		
				なし	5	15	30	60				W	C	S	G	WR	SP	AE	スランプ (cm)	空気量 (%)	
1	締固め時間	AE減水剤	4.5程度	●	●	●	●	●	12	55.0	44.8	170	309	798	1034	1.0	-	0.005	12.5	4.6	
2	空気量の水準	なし (空気量調整にAE剤のみ使用)	-	●			●				42.5	186	339	731	1034	-	-		なし	12.0	1.5
3			3以下	●			●												0.004	15.0	2.7
4			4.5程度	●			●												0.012	15.5	4.9
5			6以上	●			●												0.026	17.0	6.4
6	混和剤の種類	AE減水剤	-	●			●				44.8	170	309	798	1034	1.0	-		なし	10.5	2.3
7		高性能AE減水剤	-	●			●				48.0	159	289	843	1034	-	0.90		なし	11.0	3.7
8		4.5程度	●			●												0.002	14.0	5.9	

2.3 練混ぜ方法

練混ぜには強制二軸練りミキサ(容量 60L)を用い、1 バッチの製造量は 40L とした。骨材およびセメントを投入して 10 秒間練り混ぜたのち、あらかじめ混和剤を溶解した練混ぜ水を投入して 60 秒間(混和剤に AE 剤, AE 減水剤を用いた場合)ないし 90 秒間(高性能 AE 減水剤の場合)練り混ぜた。3 分間ミキサ内で静置した後に試料を排出し、次節に示す試験を行った。

一連の試験は温度 20℃, 湿度 60%の屋内で実施した。

2.4 試験方法の概要

本研究における締固め前後の空気量の測定方法ならびに締固め方法の概要を以下に示す(写真-1)。試験の汎用性を考慮し JIS A 1128 の空気量試験で使用する器具を用いた。なお、本研究では、空気量試験は無注水法とした。

- JIS A 1128 に示される手順に従い、コンクリート試料を詰めて空気量(締固め前)を測定する。
- 試験容器の蓋を開けて、中央に棒状バイブレータ(φ 28mm, 振動数 200~234Hz)を容器底面の 3cm 上まで挿入して所定時間振動を加える。バイブレータは跡穴が残らないようにゆっくりと引き抜く。
- ならし定規で試料上面を平坦に均した後、再び蓋をして、空気量(締固め後)を測定する。なお、バイブレータの挿入や振動により試料が若干零れ落ちる場合もあったが、この場合には、締固めしていない別の試料にて補充した。
- 試験容器内の試料を取り出し、気泡分布の測定(円柱供試体 φ 100×200mm)および凍結融解試験(角柱供試体 □ 100×100×400mm)のための供試体をそれぞれ 1 本作製した。なお、振動を与えていない試料についても同様に供試体を作製した。

凍結融解試験は JIS A1148(A 法)に準じて行い、材齢 28 日まで標準養生した後、試験を開始した。気泡分布は、材齢 28 日まで標準養生した円柱供試体を切断し高精度研磨機にて研磨した後に測定した。測定方法はリニアトラバース法とした。

表-2 使用材料

種類	記号	物理的性質, 成分など
セメント	C	普通ポルトランドセメント, 密度3.16g/cm ³ , 比表面積 3280cm ² /g
細骨材	S	千葉県木更津産陸砂, 表乾密度2.60g/cm ³ , 吸水率 2.07%, 粗粒率2.39, 実積率64.4%
粗骨材	G	埼玉県秩父産砕石2005(硬質砂岩), 表乾密度 2.72g/cm ³ , 吸水率0.63%, 粗粒率6.64, 実積率59.4%
混和剤	WR	AE減水剤(標準形, 主成分:リグニンスルホン酸)
	SP	高性能AE減水剤(標準形, 主成分:ポリカルボン酸)
	AE	AE剤(樹脂酸塩系イオン界面活性剤) *100倍希釈液で使用:1A:0.001%
水	W	上水道水, 密度1.00g/cm ³



写真-1 締固め状況

3. 実験結果および考察

3.1 締固め時間

締固め時間を 0~60 秒間の範囲で変化させた場合(配合 No.1)の試験結果を表-3 に、締固め時間とフレッシュコンクリートの空気量の関係を図-1 に示す。

締固めに伴い空気量は大きく低下した。締固め前の空気量が一般的な空気量の目標範囲(4.5±1.5%)の中心値付近であっても、示方書に示される締固め時間の目安の上限である 15 秒間締め固めた後には目標範囲の下限を下回っていた。過剰な締固めを行うと空気量はさらに低下し、30 秒ないし 60 秒間締め固めた後は約 1.5%となった。30 秒間と 60 秒間では大差のない結果であった。

硬化コンクリートの気泡径ごとの空気量の分布を図-2 に示す。締固め前では 200~400μm と 1000μm 以上の気泡が約 1%と最も多く、次に 200μm 以下と 400~600μm の気泡径が約 0.7%, 600~800μm が 0.4%, 800~

表-3 締固め時間の検討の試験結果

配合 No.	分散剤種類	AE剤添加量 (C×%)	締固め時間 (秒)	フレッシュ空気量 (%)	硬化コンの空気量 (%)	気泡間隔係数 (μm)	耐久性指数
1	AE減水剤	0.005	なし	4.6	4.1	262	100
			5	3.7	4.5	293	93
			15	2.4	2.3	325	91
			30	1.4	1.6	338	89
			60	1.3	1.5	427	88

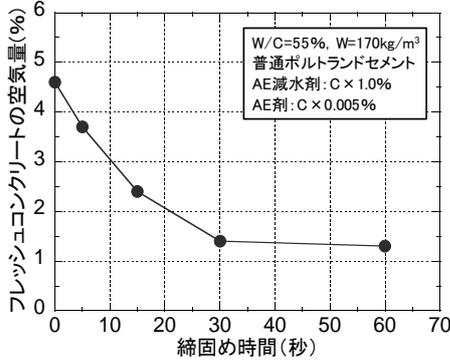


図-1 締固め時間とフレッシュコンクリートの空気量

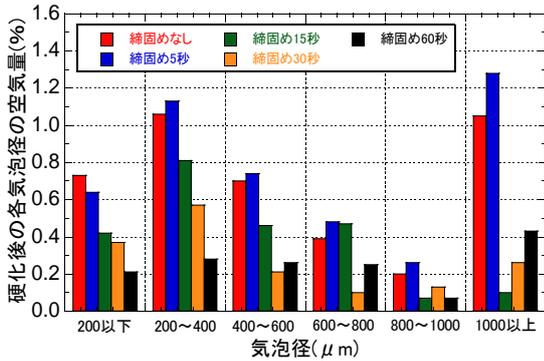


図-2 気泡径ごとの空気量 (締固め時間の検討)

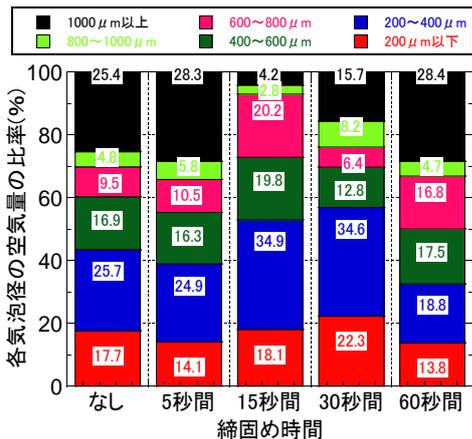


図-3 気泡径ごとの空気量の割合 (締固め時間の検討)

1000μm が約 0.2%であった。締固め後は、いずれの気泡径の空気量とも、締固め時間が長いほど低下していた。

気泡径ごとの空気量の割合を図-3 に示す。多少のばらつきはあるが、締固めにより特定の径の気泡のみが減少する傾向は認められなかった。

表-3 に示すように、気泡間隔係数は締固め時間が長くなるに従い大きくなり、締固め前の 262μm から、60 秒

表-4 空気量の水準の検討の試験結果

配合 No.	分散剤種類	AE剤添加量 (C×%)	締固め時間 (秒)	フレッシュ空気量 (%)	硬化コンの空気量 (%)	気泡間隔係数 (μm)	耐久性指数
2	なし	なし	なし	1.5	1.4	433	10
			30	0.7	1.3	553	7
3	なし	0.004	なし	2.7	2.6	333	91
			30	1.2	1.8	455	87
4	なし	0.012	なし	4.9	4.0	254	96
			30	2.4	2.7	371	94
5	なし	0.026	なし	6.4	5.2	227	94
			30	3.8	2.3	306	94

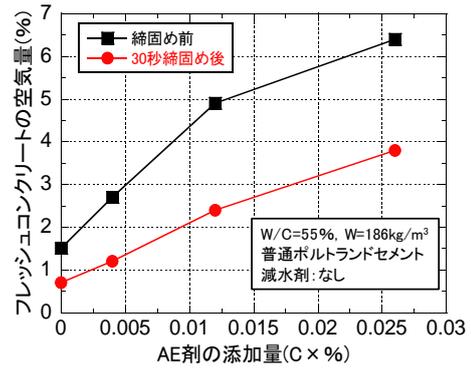


図-4 AE 剤の添加量と締固め前後におけるフレッシュコンクリートの空気量

間の締固め後は 427μm となった。耐久性指数(凍結融解 300 サイクル後の相対動弾性係数)は、締固め時間が長くなるほど低下した。締固めがコンクリートの耐凍害性を低下させる要因であることを示す結果と考えられる。

ただし、締固め 60 秒後の空気量は 1.5%と極めて少ないが、耐久性指数は 88 を確保できており、空気量の減少の程度と比べて耐凍害性の低下は顕著ではない。耐凍害性が確保できるか否かは、空気量の総量だけでは判断できない場合もあることを示唆するものと考えられる。なお、空気量の減少に伴い圧縮強度は増加していると推測され、耐久性指数の低下がそれほど顕著でなかった一因となる可能性も考えられる。

3.2 空気量の水準

AE 剤の添加量を調整してフレッシュコンクリートの空気量を変化させた場合(配合 No.2~5)の試験結果を表-4 に示す。また、AE 剤の添加量とフレッシュコンクリートの空気量の関係を図-4 に、硬化コンクリート中の気泡径ごとの空気量の分布を図-5 にそれぞれ示す。

AE 剤量を増やすに従い空気量は増加し、締固め 30 秒後の空気量も同様の結果であった。気泡径ごとの空気量も、AE 剤量の増加に伴い大きくなるが、特定の径の空気量のみが増加するわけではない結果が得られた。

耐久性指数は AE 剤を用いない場合のみ著しく小さく、AE 剤を用いることで急激に向上する結果が得られた。耐凍害性の確保には、AE 剤を用いた AE コンクリートと

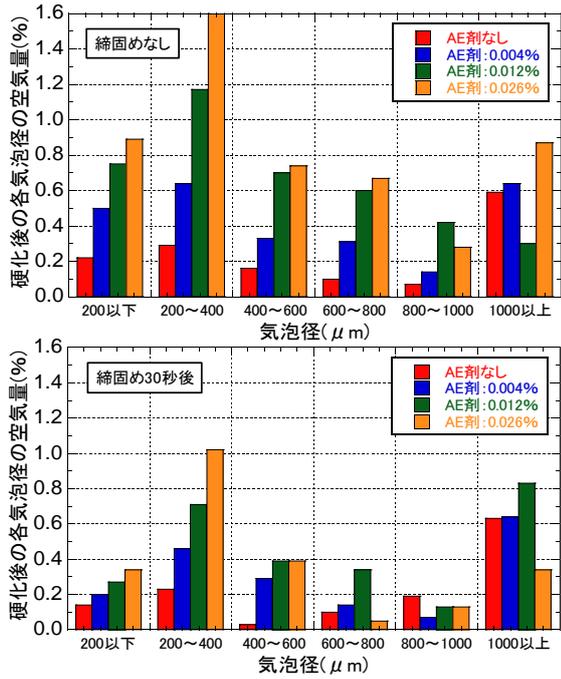


図-5 気泡径ごとの空気量 (空気量の大きさの検討)

することが重要であることを示す結果と考えられる。

表-4 に示す空気量、気泡間隔係数と耐久性指数との関係に着目すると、AE 剤を用いない配合 No.2 の締固め前と AE 剤を 0.004% 用いた配合 No.3 の 30 秒締固め後は、空気量が約 1.5%、気泡間隔係数が約 450 μ m と概ね等しいが、耐久性指数は前者が 10、後者が 87 と大きく異なっている。耐凍害性が確保できるか否かは、空気量の総量や平均的な気泡の間隔だけでは評価できない場合もあることを示唆するものと考えられる。

3.3 混和剤の種類

分散剤を用いないコンクリートおよび AE 減水剤もしくは高性能 AE 減水剤を用いたコンクリートにおいて、AE 剤を添加しない場合と空気量が一般的な工事の目標範囲(4.5 \pm 1.5%)の中心付近となるように AE 剤を添加した場合の試験結果を表-5 に示す。また、硬化コンクリート中の気泡径ごとの空気量の分布を図-6 に示す。

AE 剤を用いない場合、締固め前のフレッシュコンクリートの空気量は、分散剤を用いないコンクリートが 1.5%、AE 減水剤もしくは高性能 AE 減水剤を用いたコンクリートが、それぞれ 2.3%、3.4%となり、分散剤によっても空気が連行される結果が得られた。

気泡径ごとの空気量に着目すると、高性能 AE 減水剤のコンクリートは、200 μ m 以下の気泡の空気量は他のコンクリートと大差ないが、200 μ m 以上の気泡が多かった。AE 減水剤のコンクリートは、高性能 AE 減水剤ほど顕著ではないが、分散剤を用いないコンクリートに比べ、400 \sim 600 μ m や 800 \sim 1000 μ m の気泡径の空気が混入されやすい傾向が認められた。

AE 剤を用いた場合、4.5%程度の空気量の確保に必要

表-5 混和剤の種類の検討の試験結果

配合 No.	分散剤の種類	AE 剤量 (C \times %)	締固め時間 (秒)	フレッシュ空気量 (%)	硬化コンの空気量 (%)	気泡間隔係数 (μ m)	耐久性指数
2	なし	なし	なし	1.5	1.4	433	10
			30	0.7	1.3	553	7
4	なし	0.012	なし	4.9	4.0	254	96
			30	2.4	2.7	371	94
1	AE 減水剤	なし	なし	2.3	1.8	428	79
			30	1.4	2.1	536	24
6	AE 減水剤	0.005	なし	4.6	4.1	262	100
			30	1.4	1.6	338	89
7	高性能 AE 減水剤	なし	なし	3.4	2.7	289	35
8	高性能 AE 減水剤	0.002	なし	5.9	5.5	223	86
			30	2.5	3.0	379	78

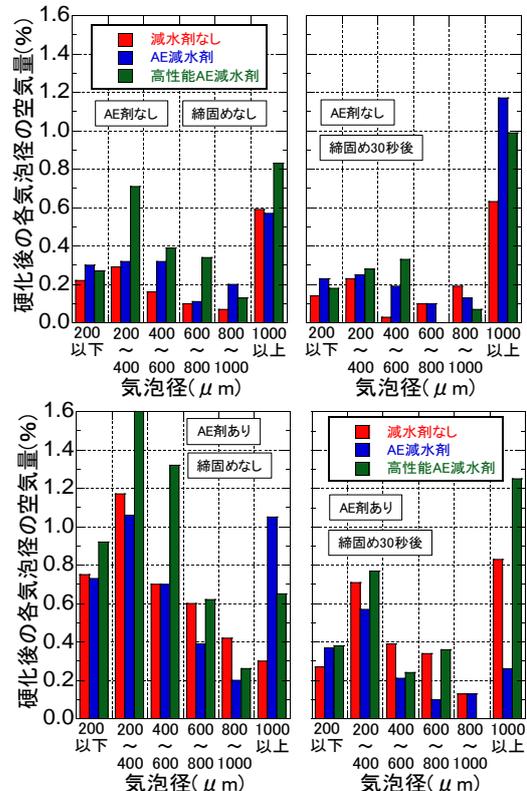


図-6 気泡径ごとの空気量の割合 (混和剤種類の検討)

な AE 剤量は、分散剤を用いないコンクリートがセメント量の 0.012%、AE 減水剤が 0.005%であり、高性能 AE 減水剤は 0.002%添加しただけで 5.9%まで増大した。締固め後の空気量は、分散剤なしが 2.4%であるのに対し、締固め前の空気量がほぼ同じであった AE 減水剤は 1.4%、締固め前の空気量が 5.9%と大きい高性能 AE 減水剤は 2.5%まで低下し、締固めに伴う空気量の減少が大きい結果が得られた。

耐久性指数は、AE 剤を用いない場合、締固め前においても、分散剤なしが 10、AE 減水剤が 79、高性能 AE 減水剤が 35 と小さい。締固め後は、それぞれ 7、24、14 と著しく小さい値であった。AE 減水剤のコンクリートは締固め前後で耐久性指数が急激に低下し、高性能 AE 減

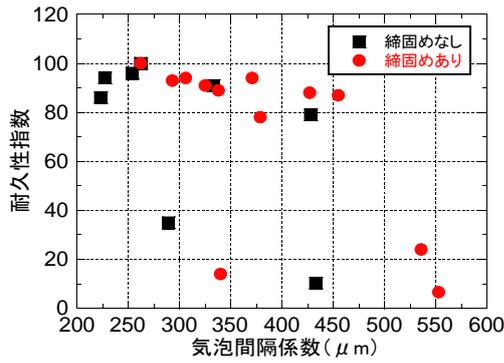


図-7 気泡間隔係数と耐久性指数

水剤は締固め前に 3%以上の空気量を確保していても耐凍害性が低い結果であった。

一方、AE 剤を用いることでいずれのコンクリートも耐凍害性を大幅に改善できていた。ただし、分散剤を用いたコンクリートは、分散剤なしに比べて、締固め後の耐凍害性が小さくなっていった。先述のように、分散剤を用いたコンクリートは締固めに伴う空気量の低下が大きいことも一因と考えられる。

今回の配合条件では、減水率の高い分散剤を用いるほど単位水量を小さくしている。このため、コンクリートの粘性が高くなり、比較的大きな径の気泡が導入されやすい状態であった可能性も考えられる。一方で、文献⁶⁾では、リグニンスルホン酸塩やポリカルボン酸を主成分とする減水剤は、比較的空气連行性が高い上に、AE 剤によって生成される気泡よりも気泡径が粗大化する可能性があることを指摘している。分散剤の使用が連行する気泡の大きさや耐凍害性にどのように影響するかについては、今後、詳細な検討が必要である。

現在、施工に供される大半のコンクリートは、AE 減水剤や高性能 AE 減水剤を用いている。このため、単に空気量が目標範囲に入っているか否かではなく、AE 剤を適切に用いて微細な空気を連行するように配慮する必要があると考えられる。

3.4 締固め後のコンクリートの耐凍害性の影響因子

ここでは、本研究で行った全てのコンクリートの凍結融解試験結果と気泡間隔係数や空気量との関係から、締固め後のコンクリートが耐凍害性を確保するための要因について考察する。

気泡間隔係数と耐久性指数の関係を図-7 に示す。気泡間隔係数が小さい方が耐凍害性に優れる傾向にはあるものの、気泡間隔係数が大きくても耐凍害性を確保できている場合もある。また、文献⁷⁾では、良好な耐凍害性を確保するには気泡間隔係数を 300 μm 程度以下にする必要がある旨が示されているが、本実験結果では、締固め後の供試体において、それをはるかに超える気泡間隔係数でも耐凍害性が確保できる結果が多数得られた。このため、気泡間隔係数から、締固め後のコンクリートの

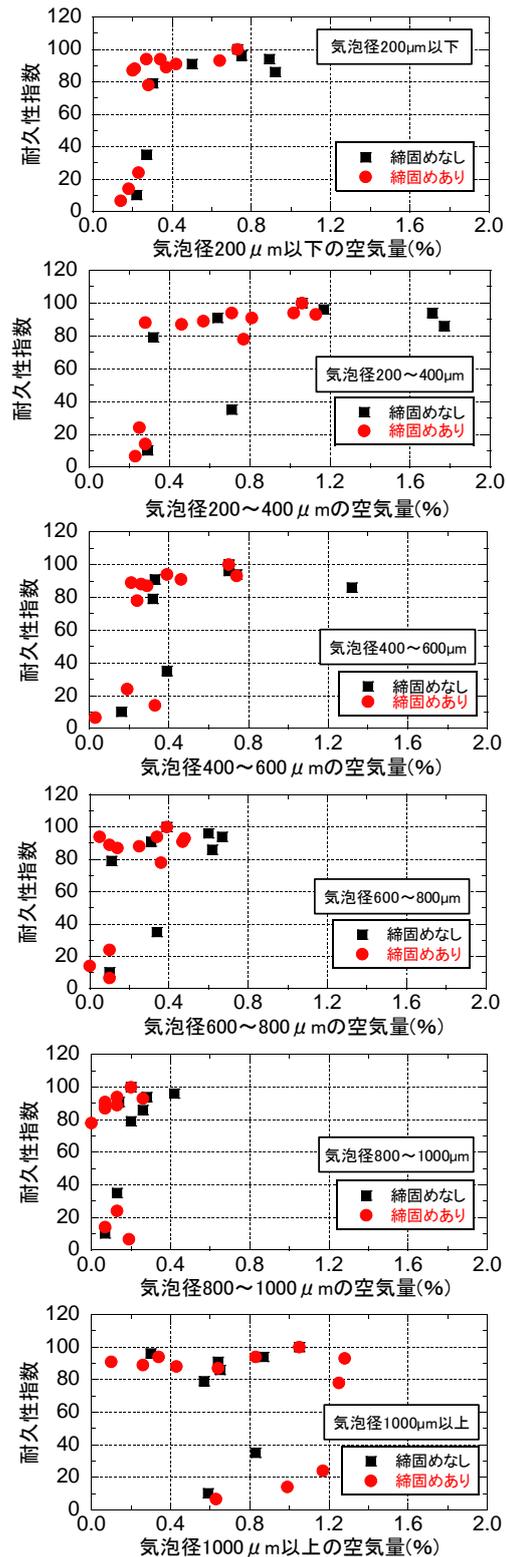


図-8 気泡径ごとの空気量と耐久性指数

耐凍害性の良否を判定するのは難しいと考えられる。

気泡径ごとの空気量と耐久性指数の関係を図-8 に示す。まず、200 μm 以下の気泡の空気量と耐久性指数の関係に着目する。締固め前後によらず、200 μm 以下の気泡の空気量が 0.3~0.4%より多いと耐凍害性は高く、少ないと低くなっている。耐凍害性の確保には、微細な空気の連行が極めて重要であることを示す結果である。

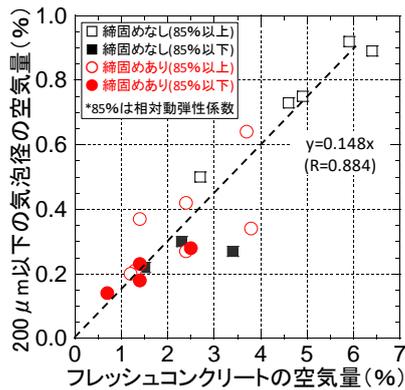


図-9 フレッシュコンクリートの空気量と
200 μ m以下の気泡径の空気量

気泡径 200~400 μ m においても、この径の空気量が多いほど耐久性指数は高くなっているが、0.7%程度混入していても耐凍害性が低い結果も存在している。気泡径 400~600 μ m においても、この径の空気量が多いほど耐久性指数は高くなる傾向にあるが、200 μ m 以下の空気量の関係に比べてややばらつきが大きい。

気泡径 600~800 μ m, 800~1000 μ m および 1000 μ m 以上の空気量は耐久性指数との関係性は認められない。

これらの結果を踏まえると、気泡径 600 μ m 前後を境として、それより小さい気泡の空気量がコンクリートの耐凍害性に影響を与えており、より小さい径の空気量ほど影響の度合いが高いものと推測される。

3.5 空気量試験による耐凍害性の良否判定の可能性

荷卸し時の空気量試験で得られる「空気量」から耐凍害性の良否判定が行えるのかについて考察する。

フレッシュコンクリートの空気量と 200 μ m 以下の気泡の空気量の関係を図-9 に示す。図では、2017 年版コンクリート標準示方書設計編 3.2.1 凍害の照査にて水セメント比 55%のコンクリートの相対動弾性係数の特性値として示される 85%を閾値に用い区分して表示した。

締固めの有無によらず両者は良好な直線関係にある。締固め前後によらずフレッシュコンクリート中の空気には、耐凍害性に強く影響を及ぼすと推測される 200 μ m 以下の気泡がある一定の割合で含有していることを示していると考えられる。ちなみに、本研究の範囲では図中の近似直線の傾きから、この割合は 15%程度と推測される。

本研究の結果から、①200 μ m 以下の気泡が 0.3~0.4% 以上含有されていれば良好な耐凍害性が得られる、②この気泡径の空気は、フレッシュコンクリートの空気量中に一定の割合で含有していると考えられる。このため、空気量試験で得られる「空気量」から、耐凍害性の良否を判定できる可能性もあると考えられる。

ただし、本研究は、限定的な材料・配合条件での結果であり、分散剤が耐凍害性に及ぼす影響も含め、今後多くのデータを収集し検討する必要がある。

4. まとめ

締固めによる空気量の減少が耐凍害性に及ぼす影響を把握するため、締固め前後における空気量や気泡分布の変化を調べ、これらの変化と耐凍害性の関係について実験的に検討した。得られた知見を以下に示す。

- (1) 締固めに伴い、いずれの気泡径の空気も減少する。締固め時間が長いほど、空気量の低下が大きい。
- (2) AE 剤量の増加により、いずれの径の空気も増加する。
- (3) AE 減水剤や高性能 AE 減水剤のみを用いた場合、AE 剤を用いた場合に比べ、大きな気泡径の空気が連行されやすい。このため、これらの分散剤のみを使用して空気量を確保するのではなく、AE 剤を併用して微細な径の空気を連行する必要がある。
- (4) 締固め後のコンクリートの気泡間隔係数と耐久性指数には明瞭な関係は認められない。
- (5) 締固めの前後によらず、200 μ m 以下の気泡の空気量が 0.3~0.4%以上連行されている場合、良好な耐凍害性が確保できる。
- (6) 締固めの前後によらず、フレッシュコンクリート中の空気には 200 μ m 以下の気泡径の空気が概ね一定の割合で含有されている。

参考文献

- 1) 片平博, 古賀裕久: 振動締固めが凍結融解・スケール抵抗性に与える影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.1, pp.999-1004, 2016
- 2) 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, pp.1054-1059, 2014
- 3) 坂之上宏, 牛島栄, 笠井英志, 清水正弘: コンクリート製品の空気量および凍結融解抵抗性に及ぼす影響—その 2 硬化後の空気量測定および凍結融解試験—, 土木学会第 58 回年次学術講演会概要集, V-205, pp.409-410, 2003
- 4) 濱幸雄, 太田宏平: フレッシュコンクリートによる気泡組織の測定方法に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.1, pp.669-674, 2004
- 5) 例えば, 株式会社マルイ HP (https://www.marui-group.co.jp/products/items1_4/item1_4_33/) (閲覧日: 2020 年 12 月 12 日)
- 6) 日本コンクリート工学会: コンクリート中の気泡の役割・制御に関する研究委員会報告書, pp.10~11, 2016.6
- 7) 日本コンクリート工学会: コンクリート中の気泡の役割・制御に関する研究委員会報告書, pp.87~93, 2016.6