

化学混和剤および振動締固めが硬化コンクリート内部組織の形成および耐凍害性に与える影響

Study on the Effect of the Chemical Admixtures and Vibration on the Formation of Internal Hardened Concrete Matrix and Resistance to Frost Damage

東北大学大学院工学研究科土木工学専攻 特任助教（研究） 高橋 駿人
（元 東京理科大学創域理工学部社会基盤工学科）

（研究計画ないし研究手法の概略）

近年、寒冷地で凍害が散見されているのをうけ、実構造物のコアを採取し、硬化コンクリート中の空気量を測定した調査¹⁾がある。それによると、基準範囲よりも低い空気量の値を示したコンクリートが多く見られ、そのコンクリート中から多く凍害の発生が見られたことが報告されている。この報告では、現場の施工作业を経て硬化するまでの間に空気量が減少し、耐凍害性が低下した可能性を指摘している。また申請者が行った既往の研究²⁾⁻⁴⁾は、打込みや振動締固めにより残存空気量が増減する傾向が得られた。以上のような知見から、施工が硬化後の残存空気に及ぼす影響を把握する必要性は高いといえる。

また空気量の連行は、化学混和剤を用いて気泡の量や質を制御することが一般的である。しかし最近では、骨材品質の低下に伴う化学混和剤機能の多様化や、増粘剤一液タイプの高性能 AE 減水剤の使用、AE 剤と消泡剤の併用など、化学混和剤の使用方法も多様化しており、化学混和剤の使用方法が気泡の連行状況に与える影響と、その連行状況に応じて施工が残存空気の変化に与える影響を正しく把握することは重要であると考えられる。そこで本研究では、化学混和剤を変化させた場合や、振動締固め時間を変えた場合のフレッシュコンクリートの空気量や硬化体の空隙構造を分析することで、残存空気が耐凍害性に与える影響を把握することを目的とした。

（実験 A）AE 剤によるフレッシュコンクリートの空気量変化が硬化特性に及ぼす影響について、実験に使用した配合を表 1 に示す。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 50%，スランプ 12cm とした。また、空気量が $4.5 \pm 1.5\%$ の時に目標スランプ 12cm が得られるように単位水量を調整した。空気量は、基準となる空気量が $4.5 \pm 1.5\%$ であることを考慮し、3%以下（UNDER 3）および 6%以上（OVER 6）になるように AE 剤の使用量を調整した。合わせて、AE 剤を使用していない配合（NON-AE）も準備した。

表 1 AE 剤の影響を検討する際のコンクリートの配合

記号	目標 空気量 (%)	目標 SL (cm)	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)					混和剤 AE (C×%)	実測値	
					W	C	S1	S2	G		SL (cm)	Air (%)
NON-AE	-	12.0	50	45	185	370	500	279	958	-	9.0	0.6
UNDER 3	≤ 3.0									0.006	10.5	1.8
4.5	4.5									0.012	11.5	4.3
OVER 6	≥ 6.0									0.020	11.5	6.6

硬化体の空隙率を把握するために、排出された試料から円柱試験体 $\Phi 100 \times 200 \text{mm}$ を 3 本作製し、材齢 28 日まで水中養生して、打込み面および打込み底面を含んだまま、高さ 50mm の 4 つに分割し、乾燥質量、水中質量、飽水質量を測定し、アルキメデス法による空隙率を算出した。なお、乾燥は 40°C 、湿度 30% で 48 日間静置した時の質量である。また、空隙の連続性を考慮するため、乾燥初期に着目し、飽水状態から 24 時間乾燥後の質量を測定し、24 時間空隙率を測定した。水分浸透性は、JSCE-G 582 に準拠して実施し、打込底面を除く 9 体から得られた平均を試験結果とした。また、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ため⁵⁾、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。なお、質量変化率は、水分浸透試験直前の質量を基準とし、各試験時間後に測定した質量差を百分率で表した。透気性は、円柱試験体の打込み底面を対象に、コンクリートの表層透気試験方法規格 NDIS 3436-2 に準じて行い、打込み底面側 3 体の相乗平均を試験結果とした。気泡径の分布（気泡径 10~6000 μm ）を、表層透気試験に用いた試験体の切断面を研磨機にて研磨したのちに、リニアトラバース法によりトラバース線上の気泡の全長を対象に測定した（以降、気泡量）。得られた 3 体の平均を結果として掲載した。

（実験 B）振動締固めがフレッシュコンクリートの空気の状態変化および硬化特性に与える影響に関しての実験を行った。コンクリート配合を表 2 に示す。コンクリート配合は、一般的な土木工事に用いられる条件を想定し、呼び強度 $27\text{N}/\text{mm}^2$ が得られるように水結合材比を決定した。この時、千葉県生コンクリート工業組合の品質基準を参考に、割り増し係数を 1.3 とした。また、単位粗骨材量を一定に、スランプ $12.0 \pm 2.5 \text{cm}$ 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 剤の添加量を調整した。スランプおよび空気量の結果を表 2 に示す。配合を決定した時のバッチは、15 秒の締固め無である。硬化特性は、実験 A と同様である。

表 2 振動締固めの影響を検討する際のコンクリートの配合

記号	目標 SL (cm)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m^3)						混和剤		締固め時間 (s)
				W	C	BS	S1	S2	G	AE (B \times %)	(高性能) AE 減水剤 (B \times %)	
SL12-OPC	12.0	55	45.0	168	305	0	630	190	958	-	1.0	5 15 30
SL12-B50		50	44.9	166	151	151	611	205		0.006		
SL12-B70		50	44.1	165	99	231	608	183		0.012		
SL12-B80		45	43.0		73	293	566	190		0.020		

※B=C+BS

（実験調査によって得られた新しい知見）

（実験A）フレッシュコンクリートの空気量と空隙率の関係を図1に示す。フレッシュコンクリートの空気量によらず、空隙率は同程度の値となる結果が得られた。空隙率は水セメント比に大きく依存することが知られている。ここでは、AE剤の添加量以外のコンクリート配合が同じであることから、フレッシュコンクリートの空気量に関わらず、空隙率が同程度になったと考えられる。フレッシュコンクリートの空気量と24時間空隙率の関係を図2に示す。

フレッシュコンクリートの空気量の増加に伴い、24時間空隙率が大きくなる結果となった。これは、全体の空隙率は同程度であるが、フレッシュコンクリートの空気量が空隙の連続性に影響している可能性があるため、24時間空隙率が変化すると推察される。時間ごとの水分浸透深さの関係を図3に示す。水分浸透深さの結果から、48時間では試験体全体にわたって吸水が進んだ。ここで、時間ごとの質量変化率の関係を図4に示す。質量変化率については、24時間から48時間の間で増加が確認できることから、以降では、質量変化率を用いて整理をする。さらに、文献⁹⁾を参考に、以降では5時間および24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とする。フレッシュコンクリートの空気量と質量変化率による水分浸透速度係数の関係を図5に示す。また、参考のためフレッシュコンクリートの空気量と水分浸透速度係数の関係を図6に示す。いずれもフレッシュコンクリートの空気量の増加に伴い、質量変化率は増加する傾向にあるが、UNDER 3と4.5の配合では同程度となった。フレッシュコンクリートの空気量と表層透気係数の結果を図7に示す。フレッシュコンクリートの空気量の増加に伴い、表層透気係数は増加した。フレッシュコンクリートの空気量と硬化体の気泡量の関係を図8に示す。硬化体の気泡量でもアルキメデス法による空隙率と同様に、フレッシュコンクリートの空気量によらず同程度となった。気泡径の分布を評価可能な気泡間隔係数に着目し、フレッシュコンクリートの空気量と気泡間隔係数の関係を図9に示す。フレッシュコンクリートの空気量の増加に伴い、気泡間隔係数が減少する傾向が見られるが、4.5とOVER 6の配合では同程度となった。これは、気泡径1000 μm 以上の気泡量がOVER 6の配合で4.5の配合を上回っていることが影響している。実際に、気泡間隔係数を求める上で、気泡の平均弦長が関わることから、粗大な気泡の増加に伴

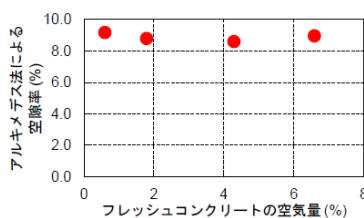


図 1 空気量と空隙率

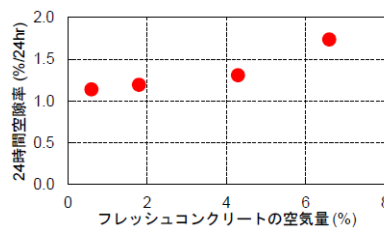


図 2 空気量と 24 時間空隙率

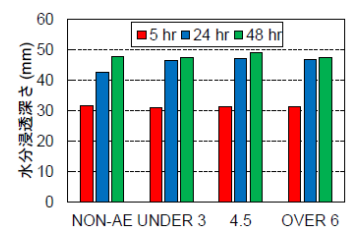


図 3 水分浸透深さ

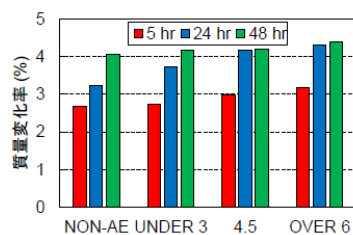


図 4 質量変化率

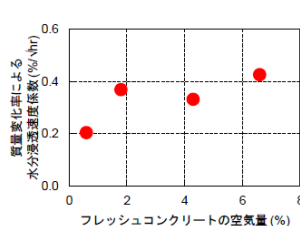


図 5 空気量と水分浸透速度係数 (質量変化率)

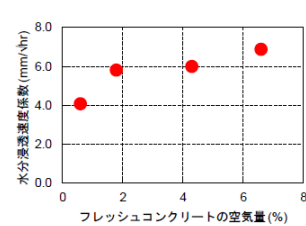


図 5 空気量と水分浸透速度係数 (水分浸透深さ)

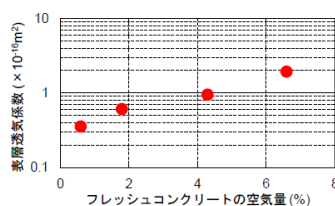


図 7 空気量と表層透気係数

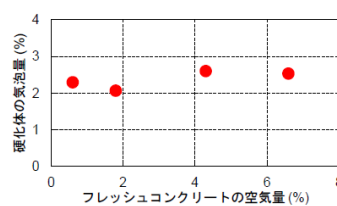


図 8 フレッシュの空気量と硬化体の気泡量

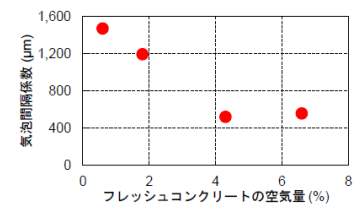


図 9 フレッシュの空気量と気泡間隔係数

い、気泡間隔係数も増加した結果と言える。

(実験B) 振動締固めの条件とフレッシュ性状の試験結果を表3に示す。スランプおよびフレッシュコンクリートの空気量は、ほとんどのケースで振動締固めに伴い減少する傾向となったが、空気量は、OPCの30秒およびB80の5秒では変化がなく、B70の振動締固め時間5秒では空気量が増加した。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4に示す。空隙率については，締固め無に対して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，締固め無と同程度であった。24時間空隙率については，締固め無に対して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，締固め無と同程度であった。なお，増加の程度は0.14%と大きくはないものの，こ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，締固め無に対して，ほとんどのケースで減少しているが，B70の振動締固め時間5秒では，締固め無と同程度であった。気泡間隔係数については，締固め無に対して100 μ m程度増加したものは，OPCの30秒，B80の15および30秒であった。また，締固め無に対して減少したものは，B70の15秒で79 μ m，B80の5秒で201 μ mであった。その他の配合では，締固め無と同程度であった。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3 フレッシュ性状の結果

記号	締固め時間 (秒)	締固め無		締固め有	
		SL (cm)	Air (%)	SL (cm)	Air (%)
SL12-OPC	5	16.0	4.6	11.0	3.0
	15	13.0	4.4	10.5	3.3
	30	12.5	3.5	10.5	3.5
SL12-B50	5	測定データなし			
	15	12.5	4.4	10.0	3.5
	30	11.5	3.8	7.5	2.8
SL12-B70	5	11.0	3.0	11.0	3.5
	15	12.0	3.5	8.0	2.6
	30	11.5	3.5	8.5	2.3
SL12-B80	5	11.5	3.2	9.5	3.3
	15	11.5	3.8	9.0	2.6
	30	12.0	3.6	9.5	2.6

表4 空隙および気泡特性の結果

記号	締固め 時間 (秒)	締固め無				締固め有			
		空隙率 (%)	24時間 空隙率 (%/24hr)	気泡量 (%)	気泡間 隔係数 (μ m)	空隙率 (%)	24時間 空隙率 (%/24hr)	気泡量 (%)	気泡間 隔係数 (μ m)
SL12- OPC	5	10.1	3.56	3.1	241	9.80	3.52	2.8	226
	15	8.95	3.12	3.1	353	7.89	2.79	1.3	303
	30	10.7	3.78	3.7	234	9.22	3.30	2.5	330
SL12-	5	測定データなし							
	15	7.21	2.30	3.9	278	7.30	2.31	3.1	301
	30	7.41	2.48	3.3	294	6.70	2.14	2.1	278
SL12- B70	5	7.14	2.15	2.6	351	7.00	2.29	2.5	314
	15	6.78	2.22	3.9	390	6.52	2.30	1.9	311
	30	7.11	2.31	2.1	330	6.61	2.12	1.7	359
SL12- B80	5	6.59	2.33	3.4	433	6.31	2.14	2.5	232
	15	6.36	2.29	2.2	354	6.06	2.01	1.3	397
	30	6.50	2.30	2.2	376	6.33	2.19	1.7	572

表面積が増加したためと考えられる。また、振動締固めの条件と各気泡径の気泡量の関係を表5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、OPC、B50およびB80の締固め時間5秒のいくつかの気泡径の範囲では、やや増加する傾向であった。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6に示す。質量変化率に伴う水分浸透速度係数では、締固め無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、締固め無に対して増加したものは70の5秒であり、その他のものでは、締固め無と同程度であった。

表 5 締固めの条件と気泡径分布の関係

記号	締固め時間 (秒)		各気泡径の気泡量 (%)					合計	
			200μm以下	200~400μm	400~600μm	600~800μm	800~1000μm		1000μm以上
SL12-OPC	5	無	1.31	0.48	0.47	0.24	0.31	0.27	3.08
		有	1.40	0.65	0.14	0.14	0.06	0.38	2.77
	15	無	0.79	0.34	0.36	0.24	0.19	1.15	3.07
		有	0.74	0.47	0.20	0.30	0.25	0.24	2.20
	30	無	1.30	0.70	0.53	0.25	0.13	0.83	3.74
		有	0.73	0.49	0.24	0.20	0.13	0.73	2.52
SL12-B50	5	無	測定データなし						
		有	測定データなし						
	15	無	1.25	0.68	0.44	0.34	0.19	0.95	3.85
		有	1.04	0.48	0.26	0.24	0.31	0.72	3.05
	30	無	1.10	0.75	0.23	0.24	0.06	1.02	3.30
		有	0.91	0.65	0.28	0.11	0.00	0.16	2.11
SL12-B70	5	無	0.78	0.50	0.22	0.30	0.13	0.71	2.64
		有	1.00	0.20	0.17	0.15	0.12	0.82	2.46
	15	無	0.91	0.61	0.37	0.36	0.25	1.40	3.90
		有	0.70	0.47	0.23	0.14	0.00	0.33	1.87
	30	無	0.68	0.63	0.22	0.05	0.20	0.34	2.12
		有	0.66	0.36	0.20	0.34	0.06	0.12	1.74
SL12-B80	5	無	0.74	0.39	0.06	0.49	0.32	1.41	3.41
		有	1.00	0.20	0.17	0.15	0.12	0.82	2.46
	15	無	0.67	0.42	0.34	0.09	0.13	0.46	2.11
		有	0.54	0.26	0.15	0.00	0.00	0.36	1.31
	30	無	0.65	0.45	0.21	0.20	0.12	0.61	2.24
		有	0.37	0.25	0.26	0.39	0.25	0.18	1.70

表 6 質量変化率による水分浸透速度係数の結果

記号	締固め時間 (秒)	質量変化率による水分浸透速度係数 (%/√hr)	
		締固め無	締固め有
SL12-OPC	5	0.36	0.33
	15	0.30	0.28
	30	0.35	0.29
SL12-B50	5	測定データなし	
	15	0.16	0.17
	30	0.17	0.16
SL12-B70	5	0.15	0.19
	15	0.17	0.15
	30	0.17	0.17
SL12-B80	5	0.19	0.067
	15	0.13	0.10
	30	0.10	0.078

以上をまとめると、以下のような結論が得られた。

- (1) フレッシュコンクリートの空気量を変化させた配合では、フレッシュコンクリートの空気量によらず空隙率はほぼ一定値を示すが、乾燥のしやすさ、水分浸透速度係数および表層透気係数には影響を及ぼす。
- (2) フレッシュコンクリートの空気量の増加に伴い、気泡径600 μm 以下の気泡量は増加する傾向にあるが、それよりも大きい気泡径との対応関係は認められない。
- (3) フレッシュコンクリートの空気量によらず、硬化体の空隙率および気泡量は変化しないが、気泡径の分布および気泡間隔係数が変化する。
- (4) 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。

ただし、本研究期間内では、耐凍害性との関係性に関する検討は十分にできなかったため、引き続き検討を続けていきたい。

(参 考 文 献)

- 1)三浦秀一朗，高山充直：コンクリート鉄道構造物の凍害とその影響因子，セメント・コンクリート，No.850，pp.40-46，2017.
- 2)田澤佑介，高橋駿人，鈴木将充，加藤佳孝：振動締固めと鉄筋間隙通過が締固めを必要とする高流動コンクリートの硬化品質に与える影響，第76回セメント技術大会，講演番号3205，2022.
- 3)高橋駿人，鈴木将充，加藤佳孝：打込みや締固めを受けたフレッシュコンクリートの空気量および粗骨材の変動の把握，コンクリート工学年次論文集，Vol.43，No.1，pp.754-759，2021.
- 4)古川翔太，加藤佳孝，鈴木将充，高橋駿人：振動時間が締固めを必要とする高流動コンクリートの残留空隙に与える影響，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレードシンポジウム論文報告集第20巻，pp.11-16，2020.
- 5)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，アップグレードシンポジウム論文報告集第22巻，pp.103-106，2022.

(発 表 論 文)

田澤佑介，加藤佳孝，加藤絵万，鈴木将充，高橋駿人：振動締固めが硬化体の空隙および物質移動特性に及ぼす影響，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第23巻，pp.127-130，2023.