

論文 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

坂本 久史*1・松岡 克明*2・井上 進作*3・横井 克則*4

要旨: フレッシュコンクリートの空気量をエアメータにより測定し、同試料を内部振動機により締固め、振動時間と空気量減少量の関係を求めた。次に条件の異なるコンクリートを模擬構造体に打込み、内部振動機により振動締固めを行い残存空気量の異なる供試体を作製し、凍結融解試験を実施した。その結果、振動時間と空気量減少量の関係はコンクリートの製造工場により異なること、初期空気量の違いにより空気量減少後の耐凍害性に差が現れることが解った。

キーワード: 内部振動機, 耐凍害性, 残存空気量, エントレインドエア, モルタル粘性

1. はじめに

コンクリートの耐凍害性を確保するためには AE コンクリートとすることが重要である。AE 剤あるいは AE 減水剤等の表面活性作用により連行されるエントレインドエアは直径が約 10~300 μ m 程度の球状であり、フレッシュコンクリートのワーカビリティの改善や耐凍害性の向上に対して効果があり、その空気量と耐凍害性の関係¹⁾は明らかにされている。

一方で、コンクリート中の空気量は振動締固めにより減少する^{2) 3)}こと、また、空気量を減少させた場合のエントレインドエアの混入状況が耐凍害性に影響を及ぼすこと⁴⁾が報告されている。

したがって、内部振動機による締固めにより空気量が減少した場合、残存する空気量の性質に因っては耐凍害性に影響が現れることが考えられる。しかし、初期空気量および配合の違いが振動締固め後のコンクリートの耐凍害性に及ぼす影響、さらには、構造体部位での影響の差については明らかにされていない。

そこで、本研究では、内部振動機により空気量を減少させて作製した供試体による凍結融解試験を実施し、振動締固めが、条件の異なるコンクリートの耐凍害性に及ぼす影響を調査することを目的とした。

2. 実験概要

2.1 振動時間と空気量の関係

練上がり直後のコンクリートの空気量をエアメータにより測定後、エアメータ容器内の同試料を内部振動機により締固め、再度空気量を測定し振動時間と空気量減少量の関係を求めた。

振動時間と空気量減少量の関係は、使用材料および粗

骨材最大寸法さらにはスランブ値など、配合の違いによる影響を調査することを目的とし、D 社および K 社において実施した。各社の使用材料は表-1 および表-2 のとおりである。

表-1 D 社の使用材料

材 料 名	種 類	
セメント	高炉セメント B 種・普通ポルトランドセメント	
細骨材	S1	石灰砕砂
	S2	除塩海砂
粗骨材	G1	石灰砕石
	G2	
	G3	
混和剤	AE 減水剤	
混和材	フライッシュ II 種	

表-2 K 社の使用材料

材 料 名	種 類	
セメント	高炉セメント B 種・普通ポルトランドセメント	
細骨材	S1	除塩海砂
	S2	砂岩砕砂
粗骨材	G1	砂岩砕石
	G2	
	G3	
混和剤	AE 減水剤	
混和材	-	

*1 (有) 共同生コン (正会員)

*2 (有) 幡多コンクリートサービス幡東工場

*3 (有) 幡多コンクリートサービス古津賀工場

*4 高知工業高等専門学校 環境都市デザイン工学科准教授 博士 (工学) (正会員)

振動時間は、挿入に2秒、容器底面から3cmの地点で3秒、拔出しに2秒の合計7秒を1サイクルとしたが、挿入および拔出し時は振動が試料全体に伝搬しないことを考慮し、本実験では、この1サイクルを5秒と定義して、1試料に対し6サイクル、累積30秒となるまで試験を実施した。

なお、内部振動機はφ28mmとし、両社同一のものを使用した。また、振動締め固めにより減少する試料はその都度補充し、エアメータ容器の上端に偏在した微細な空気泡は取り除いた。

2.2 模擬構造体による実験

実験は、D社にて実施し、配合は表-3のとおりとした。

配合条件および初期空気量の違いが耐凍害性に及ぼす影響を調査するため、シリーズ1, 2はフライアッシュ混和および無混和配合、シリーズ3はモルタル粘性の違うスランブ18cmとし、シリーズ4~6は、AE剤添加量を調整し初期空気量を減少させた。

シリーズ1~3については練上がり空気量の目標を5%とし、残存空気量が4%, 3%, 2%となるように振動締め固めを行った。シリーズ4~6については、練上がり空気量を4%, 3%および2%程度(プレーンコンクリート)とし、シリーズ1~3と同様に目標空気量となるまで振動を加えた。

練上がりコンクリートの空気量を確認後、写真-1に示す模擬構造体(□100×100×400mm 曲げ型枠2層積)にJIS A 1132に従って、突き棒によりほぼ等しい4層に分けて打込んだものを練上がり直後の供試体とした。

次に同手順により模擬構造体にコンクリートを打込んだ後、目標の空気量となるまで内部振動機による締め固めを行い、残存空気量の異なる供試体を順次作製した。なお、供試体は、各条件につき1体とした。

供試体は24時間静置後脱型、材齢28日まで20±2℃で標準養生後、石材用カッターにて□100×100×400mmになるよう水平方向に2分割し上側、下側の試験体として、凍結融解試験を開始した。



写真-1 型枠製作

3. 実験結果および考察

3.1 振動時間と空気量の関係

目標スランブ8cm、粗骨材最大寸法20mmの結果を図-1に、粗骨材最大寸法40mmの結果を図-2に示す。振動時間と残存空気率の関係は、同一工場においては相違ないが、工場間では違いが見られた。

目標スランブ18cmの結果を、図-3に示す。これはD社のみデータであるが、同社スランブ8cmに比べ、振動初期段階から空気量の減少が著しい。

以上、振動時間と減少空気量の関係は、コンクリート製造工場およびスランブの値によって異なり、使用材料の相違を含めたモルタル粘性の差による影響が大きいものと考えられる。

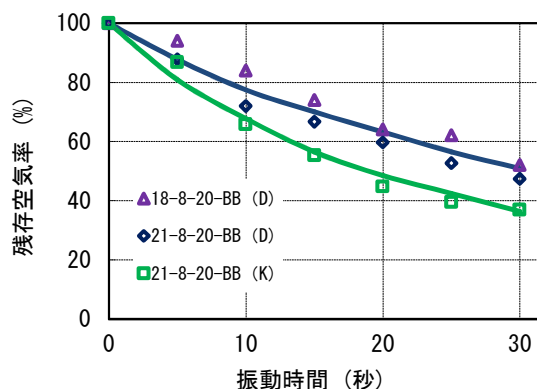


図-1 スランブ8cmの残存空気量

表-3 模擬構造体の試験配合

シリーズ	W/C W/B (%)	SL (cm)	s/a (%)	単 位 量 (kg/m ³)								
				W	C	FA	S1	S2	G1	G2	AD	AE
							砕砂	海砂	1505	2015		
1	60.0	8	46.8	152	253	-	622	266	465	568	2.53	1.52
2				150	225	25	622	266	465	568	2.25	2.50
3		18	49.7	172	287	-	638	274	422	514	3.16	1.44
4		8	46.8	152	253	-	622	266	465	568	2.78	1.52
5											2.78	0.51
6											2.53	-

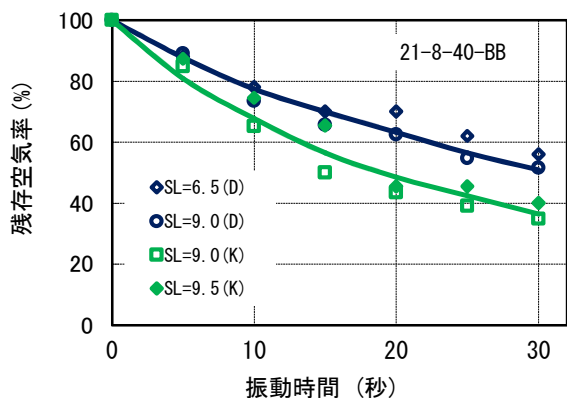


図-2 21-8-40の残存空気量

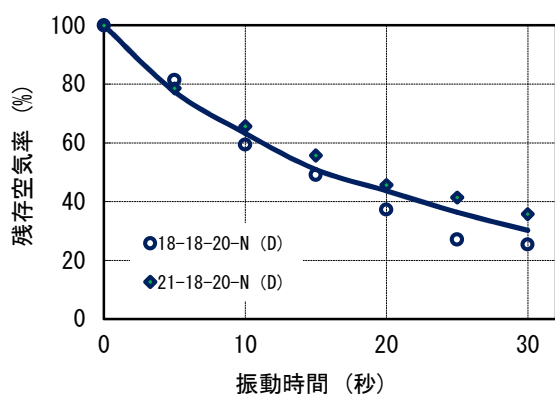


図-3 スラブ 18cmの残存空気量

3.2 模擬構造体による振動時間と空気量

目標の残存空気量を得るための振動時間は、図-1 および図-3 の実験結果をもとに求めた。模擬構造体とエアメータ容器では、形状および容積が相違するが、丸屋らの報告⁵⁾により、締め固めエネルギーは角形の模擬構造体でも振動機からの距離 20cm 程度までは十分伝搬すると仮定し、形状による差は考慮せず、容積の違いによる割増のみで算出した。

残存空気量は、エアメータによる振動後の圧力法と重量法、および模擬構造体のコンクリートの重量法により、その都度確認した。模擬構造体の振動時間と空気量の各測定結果は表-4 のとおりである。

図-4 に、エアメータ圧力法による測定値と重量法による計算値を示す。相関係数は 0.971 となり、重量法の精度は十分である。また、重量法によるエアメータと模擬構造体の関係を図-5 に示すが、相関係数は 0.922 と多少の誤差はあるものの精度としては十分であると判断し、今回の実験では模擬構造体の空気量として、模擬構造体の重量法で測定した値を採用することとした。

表-4 振動時間および空気量測定結果

試験体 記号	振動時間 (秒)		空気量 (%)		
			エアメータ		構造体 重量法
	エアメータ	構造体	圧力法	重量法	
1-5%	-	-	5.2	-	-
1-4%	12	13.7	4.2	4.3	3.6
1-3%	20	22.9	3.2	3.2	2.8
1-2%	35	40.0	2.0	2.0	2.2
2-5%	-	-	5.5	-	-
2-4%	12	13.7	4.2	4.2	4.5
2-3%	18	20.6	3.4	3.2	2.7
2-2%	35	40.0	2.1	2.1	2.1
3-5%	-	-	5.2	-	-
3-4%	5	5.7	4.2	3.8	4.1
3-3%	15	17.1	3.6	3.3	2.6
3-2%	30	34.3	2.4	1.7	1.4
4-4%	-	-	4.0	-	-
4-3%	10	11.4	3.2	3.3	3.0
4-2%	25	28.6	2.4	2.3	2.4
5-3%	-	-	3.2	-	-
5-2%	20	22.9	1.9	1.5	1.7
6-2%			2.0	-	-
6-1%	3	3.4	1.8	1.8	1.5

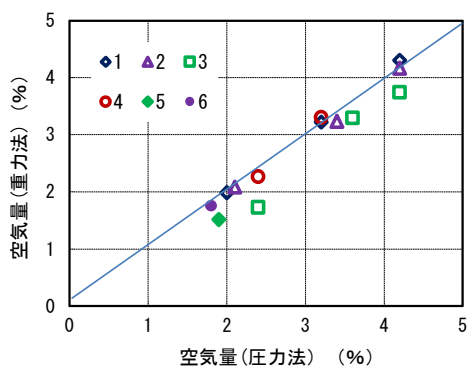


図-4 重量法の精度検証

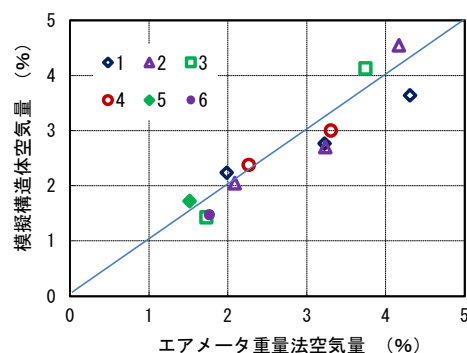


図-5 模擬構造体の空気量

3.3 凍結融解試験

(1) シリーズ 1, 2

シリーズ 1 および 2 の凍結融解試験結果を図-6~図-9 に示す。

300 サイクル終了時の相対動弾性係数は、模擬構造体下側(図-7, 図-9)で空気量の減少とともに低下し、残存空気量 2%程度では 60%程度となった。一方、上側(図-6, 図-8)については残存空気量の違いによる差は見られなかった。

これは、振動締め固めによりエントラップトエアから抜け始め、最終的には耐凍害性に有効なエントレインドエアも上側に移動したためと考える。しかしながら、残存空気量 3%以下とするための振動時間は 20 秒以上を要し、一般的な締め固め時間 5~15 秒程度⁹⁾に対し過剰な締め固めであることを考慮すると、通常の締め固めの範囲では、全体の空気量は減少するがエントレインドエアはそれほど減少せず、耐凍害性への影響は少ないのではないかと考える。

また、300 サイクル終了時の相対動弾性係数は、フライアッシュを混和したシリーズ 2 が、無混和のシリーズ 1 より全体的に高く、千歩らによる報告⁷⁾と相違する結果となった。

フライアッシュ混和コンクリートは無混和コンクリートに比べ、同程度の空気量とするために必要な AE 剤使用量が多いこと、ポズラン反応によりコンクリート組織が緻密になり透水性が改善されたことによるものと考えられる。

(2) シリーズ 3

シリーズ 3 (図-10, 図-11) の 300 サイクル終了時の相対動弾性係数は、供試体の上側、下側ともに 90%以上あり差はない。

これは、スランプ 8cm に比べ短時間で空気量は減少し、エントラップトエアの減少は大きいですが、耐凍害性に有効と考えられる微細な粒径のエントレインドエアの減少は少なかったものと推察される。

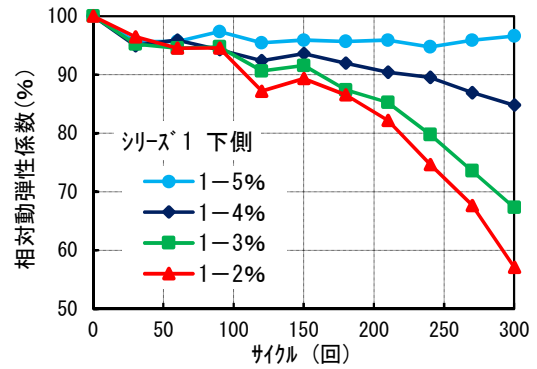


図-7 シリーズ 1 (下) 凍結融解試験

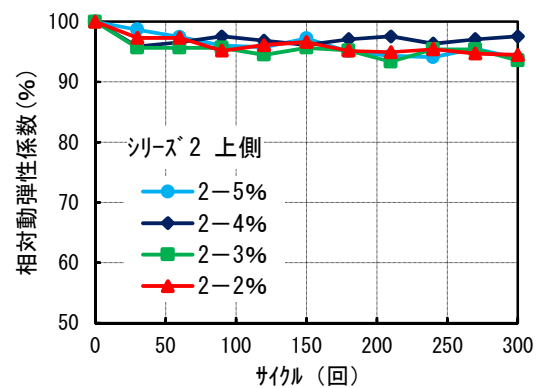


図-8 シリーズ 2 (上) 凍結融解試験

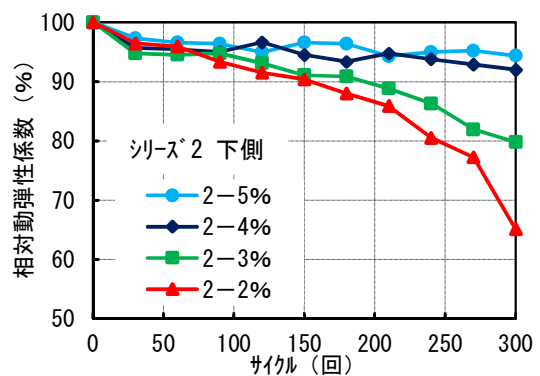


図-9 シリーズ 2 (下) 凍結融解試験

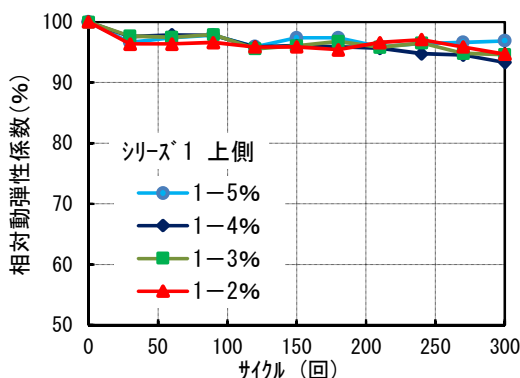


図-6 シリーズ 1 (上) 凍結融解試験

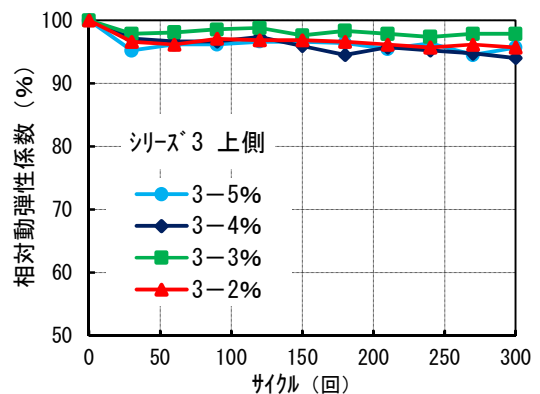


図-10 シリーズ 3 (上) 凍結融解試験

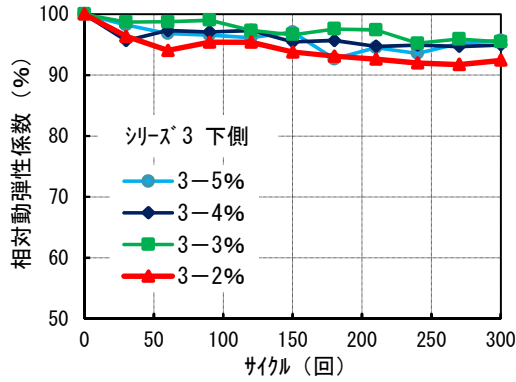


図-11 シリーズ 3 (下) 凍結融解試験

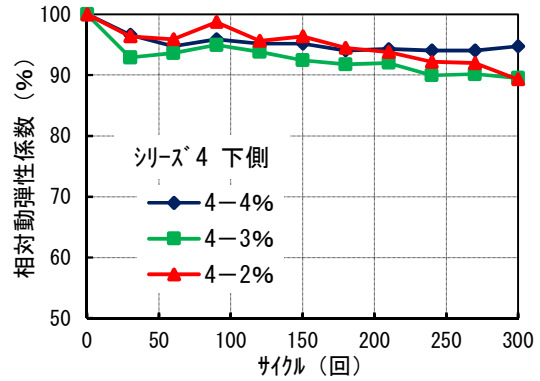


図-13 シリーズ 4 (下) 凍結融解試験

(3) シリーズ 4~6

シリーズ 4~6 の凍結融解試験結果を図-12~図-17 に示す。

シリーズ 4 (図-12, 図-13) の 300 サイクル終了時における相対動弾性係数は、何れも 90%程度以上となり、残存空気量の違いによる耐凍害性への影響は殆ど見られなかった。

シリーズ 5 では、300 サイクル終了時の相対動弾性係数が下側 (図-15) で 60%以下に、上側 (図-14) においても 80%程度まで低下し、他シリーズにない傾向を示した。これは、練上がり空気量 3.2%中に占めるエントレインドエアの量が相対的に少ない事を意味すると考える。

シリーズ 6 (図-16, 図-17) の相対動弾性係数は、いずれの場合も 30 サイクルで 60%を下回り、120 サイクルで試験終了となった。この結果は当然の事ながら、エントレインドエアの存在が耐凍害性向上に大きく寄与することを示している。

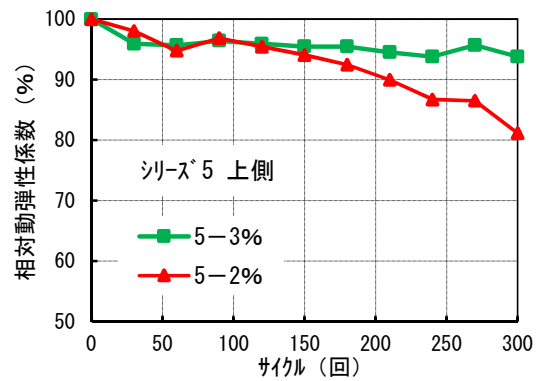


図-14 シリーズ 5 (上) 凍結融解試験

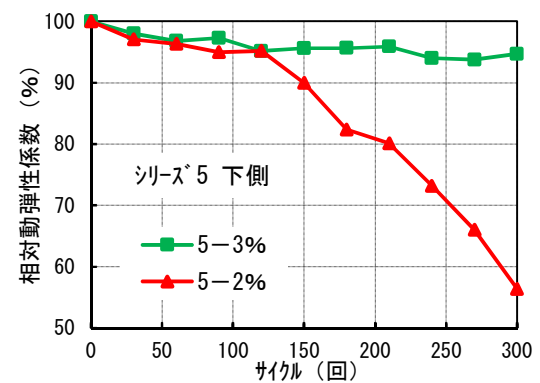


図-15 シリーズ 5 (下) 凍結融解試験

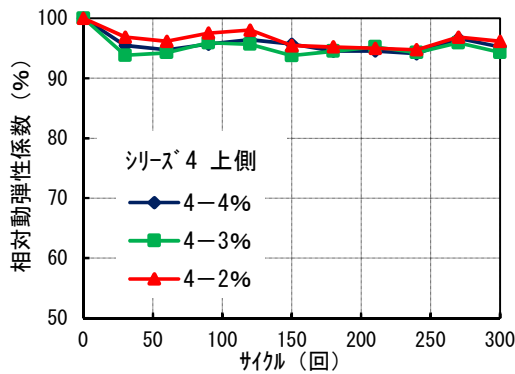


図-12 シリーズ 4 (上) 凍結融解試験

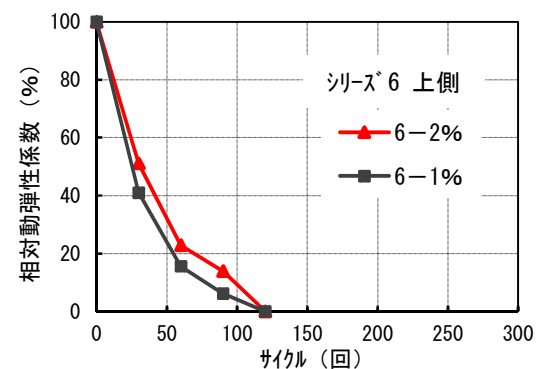


図-16 シリーズ 6 (上) 凍結融解試験

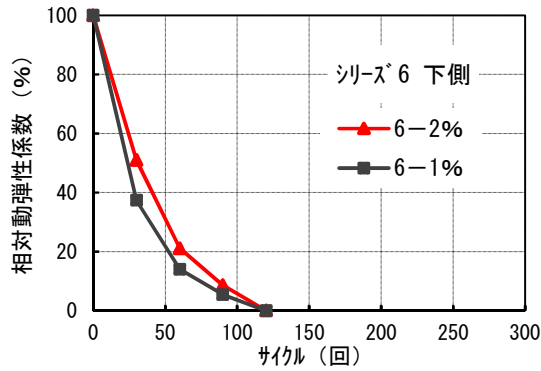


図-17 シリーズ 6 (下) 凍結融解試験

(4) 空気量と耐久性指数との関係

今回の試験における 300 サイクル終了時の空気量と耐久性指数の関係を図-18 に示す。ただし、シリーズ 6 については、90 サイクル終了時の値である。

この図に示す太破線は参考文献¹⁾による空気量と耐久性指数との関係であるが、今回の実験結果はこれとは一致しなかった。この傾向は初期空気量が多い場合に顕著であり、エントレインドエアが振動締固め状況下でも減少し難いことを裏付ける。

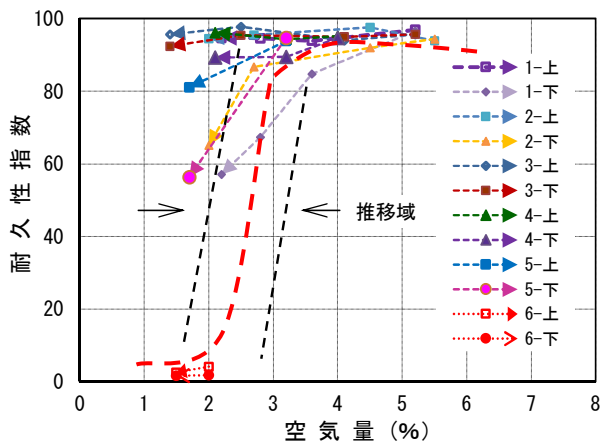


図-18 空気量と耐久性指数の関係

4. まとめ

本実験では、内部振動機による締固めが、配合など諸要因の異なるコンクリート中の残存空気量と、耐凍害性へ及ぼす影響について検討を行い、以下の結論を得た。

1) 振動締固めによる振動時間と空気量減少量の関係は、コンクリート製造工場によって異なるが、同一工場内では、呼び強度および粗骨材最大寸法による差は

殆どなかった。また、スランプの大きい配合ほど粘性が小さいため、振動締固め初期の空気量減少が著しい。

- 2) フライアッシュを混和したコンクリートは無混和コンクリートに比べ、耐凍害性が向上する結果となった。
- 3) 初期空気量が 4% から 5% の領域では振動締固めにより 2% 程度まで残存空気量が減少しても耐凍害性の低下は小さい。
- 4) 初期空気量が 3.2% では、振動締固めにより 2% 程度まで残存空気量が減少した場合、構造体上側では耐凍害性を有しているものの、下側では耐凍害性が劣る結果となった。

謝辞：本研究は JCI 四国支部、四国の生コン技術力活性化委員会で活動したものであり、大和生コンクリート工業（株）原田隆敏氏との共同研究である。

実験の実施にあたっては、高知工科大学 島 弘教授のご指導および高知県生コンクリート工業組合、高知工業高等専門学校学生の皆様にご協力を頂きました。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学会：コンクリート技士研修テキスト，pp.16-18，2012
- 2) 松井嘉考，笠井芳夫：表面活性剤を用いたコンクリートの振動による空気量の損失について，日本建築学会論文報告集，第 63 号，pp.193-196，1959.10
- 3) 高橋和雄：コンクリート製品の振動による空気量の減少について，農業土木学会論文集，第 143 号，pp. 69-77，1989.10
- 4) 池津和弘，高橋敏樹，近松竜一：エントレインドエアの混入状況がコンクリートの凍結融解抵抗性に及ぼす影響，土木学会第 58 回年次学術講演会資料，pp. 415-416，2003.9
- 5) 丸屋 剛，梁 俊，坂本 淳，宇治公隆：締固めエネルギーの観点から見たフレッシュコンクリートの品質および施工性能の評価，コンクリート工学，Vol.51，No.4，pp.319-326，2013.4
- 6) 土木学会：コンクリート標準示方書 [施工編]，pp.117-119，2012
- 7) 千歩 修，須藤由美子，鎌田英治：フライアッシュコンクリートの空気量・気泡組織の経時変化と耐凍害性，日本建築学会大会学術講演梗概集，No.1024，pp.47-48，1997.9