

耐凍害性の向上を目的とした混和剤を用いたコンクリートに関する基礎的研究

福岡大学大学院  
千葉工業大学  
(株)富士ピー・エス 正会員  
(株)富士ピー・エス 正会員

○市山 大輝  
博 (工) 橋本 紳一郎  
博 (工) 徳光 卓  
正会員 杉江 匡紀

Abstract : In this paper, we added an admixture for the purpose of improving the freeze and thawing resistance to several different blend conditions, and verified the effect by the compressive strength test and the freeze and thawing test. As a result, it was confirmed that even with No-AE concrete, the addition of a mixture for improving the durability improves the frost resistance. However, it was confirmed that the effect of improving the frost resistance of concrete by the addition of the additive for improving the durability depends on the compressive strength of the base concrete, and the improvement tends to decrease as the compressive strength decreases. In order to exert sufficient freeze-thaw resistance improvement effect by the durability improvement admixture, it is considered necessary to pay attention to the compounding strength of the concrete.

Key words: Remaining amount of air, Freezing and thawing resistance, Fly ash concrete

1. はじめに

現在、わが国では寒冷地を中心に、凍害によるコンクリート構造物の劣化がひとつの問題となっており、東北地方の凍害に関しては、いくつかのハザードマップも提案されている。ハザードマップの提案では、北海道の大雪山系付近や岩手県北上山地付近で凍害危険度5と定められており、氷点降下に伴う凍結融解が課題となっている。凍結融解抵抗性には空気量が大きく関係しているが、コンクリートの打設の際には、振動締固めを行うため振動による空気量の減少が生じる。しかし、振動締固めによる空気量の減少と凍結融解抵抗性との関係は明らかとなっていない。また、エントレインドエアを連行しないコンクリートの凍結融解抵抗性の確保は困難であり、凍結融解抵抗性の確保には、硬化体中における十分なエントレインドエアの連行が重要である。しかし、練混ぜ時に多くの空気量を安定的に確保するためにはそのコントロールが難しいという課題が挙げられる。とくにPCなどの高強度が要求されるコンクリートの場合、空気量の過剰は圧縮強度の低下につながるという問題がある。それらの対策技術として、凝固降下作用を有し、フレッシュコンクリートの凍結

表-1 使用材料

使用材料	記号	備考
水	W	地下水
早強ポルトランドセメント	C	密度:3.14g/cm <sup>3</sup> , 比表面積:4680cm <sup>2</sup> /g, 強熱減量:1.02%
フライアッシュ (JIS II種灰)	FA	密度:2.35g/cm <sup>3</sup> , 比表面積:3990cm <sup>2</sup> /g, 強熱減量:1.90%, 活性度指数:28日86%, 91日104%
海砂	S1	密度:2.60g/cm <sup>3</sup> , 吸水率:1.38%
砕砂	S2	密度:2.68g/cm <sup>3</sup> , 吸水率:1.54%
砕石	G	密度:2.81g/cm <sup>3</sup> , 吸水率:1.25%
高性能減水剤	Ad1	密度:1.03g/cm <sup>3</sup> (ポリカルボン酸エーテル系化合物)
AE剤	Ad2	密度:1.02g/cm <sup>3</sup> (変形性ロジン酸化合物陰イオン界面活性剤)
耐久性向上混和剤	Ad3	亜硝酸塩
	Ad4	パラフィンエマルジョン

表-2 配合条件

配合 シリーズ	番号	打込み時の 空気量 (%)	FA 置換率 (%)	W/B (%)	s/a (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )									
						W	C	FA	S1	S2	G	Ad1 (B×%)	Ad2 (B×%)	Ad3	Ad4
A	A-1	Air<2.0%	0	38	43	165	433	0	278	290	1085	B×1.07	-	-	-
	20		346				66	B×1.00							
B	B-1	Air<2.0%	0	38	43	165	433	0	278	290	1085	B×0.75	-	4.5	3.8
	20		346				66	B×0.75				3.4		2.9	
C	C-1	2.5≦Air<3.0	0	38	43	165	433	0	278	290	1085	B×1.00	B×0.00060	-	-
	20		346				87	B×0.90				B×0.00030			
D	D-1	Air=4.5±1.5%	20	38	43	165	346	87	278	290	1085	B×0.90	B×0.00020	-	-

を防ぐ耐寒剤としても広く利用されている亜硝酸塩とコンクリートが硬化して一旦乾燥したのちに毛細管空隙が再び水で飽和することを防止する機能を期待し、パラフィンエマルジョンを主成分とし、コンクリートの凍結融解抵抗性の確保を目的とした混和剤(以下、耐久性向上混和剤と称す)の開発が行われている<sup>1)</sup>。耐久性向上混和剤は、亜硝酸塩またはパラフィンエマルジョンを単体で用いた場合でも効果を発揮することが確認されているが、両者を混合させた場合により高い効果を示すことを明らかとしている。しかし、耐久性向上混和剤によるコンクリートの凍結融解抵抗性の改善効果やそのメカニズムの詳細については検討されていない。以上から本研究では、使用材料や配合条件、養生条件が異なるコンクリートに対する耐久性向上混和剤の効果について検討した。

2. 実験概要

本研究では、凍結融解抵抗性の向上を目的とした混和剤を用いたコンクリートの基礎的研究として2つのシリーズで検討した。シリーズ1では高強度コンクリートを対象とし、振動締固めによる空気量の減少および耐久性向上混和剤による耐凍害性改善効果について検討した。その結果を踏まえ、シリーズ2では各種コンクリート配合における耐久性向上混和剤による耐凍害性改善効果について検討した。

2.1 使用材料および配合条件

使用材料を表-1、配合条件を表-2に示す。配合シリーズA, Bでは、耐久性向上混和剤による耐凍害性改善効果を確認するため、目標空気量をAir ≤ 2.0% (No-AE) とし、耐久性向上混和剤無添加(配合シリーズA)、添加(配合シリーズB)の2水準を設けた。また、振動締固めによる空気量の減少と凍結融解抵抗性の関係を検討するため、AE剤を用い空気を連行させた配合シリーズD (Air=4.5±1.5%)、また、それらに対し、振動締固めにより空気量を減少させた配合シリーズC (2.5 ≤ Air < 3.0%) の2水準を設けた。また、混和材を混入した場合の影響も同時に検討するため、FAを0, 20% (以下、FA0, 20) の2水準を設け検討を行った。

表-3 フレッシュ性状試験および打込み時の設定空気量

配合シリーズ	配合No.	実測スランブ (cm)	練り上がり時の実測空気量 (%)	打ち込み時の実測空気量 (%)	打ち込み時の設定空気量 (%)
A	A-1	20.0	1.6	1.6	Air ≤ 2.0%
	A-2	20.0	1.7	1.7	
B	B-1	20.0	1.8	1.8	
	B-2	20.5	1.9	1.9	
C	C-1	18.0	5.3	2.8	2.5 ≤ Air < 3.0%
	C-2	20.5	5.8	2.9	
D	D-1	20.0	5.5	5.5	Air = 4.5 ± 1.5%

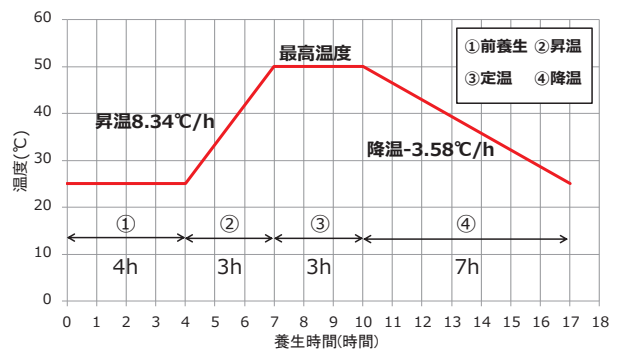


図-1 蒸気養生プログラム

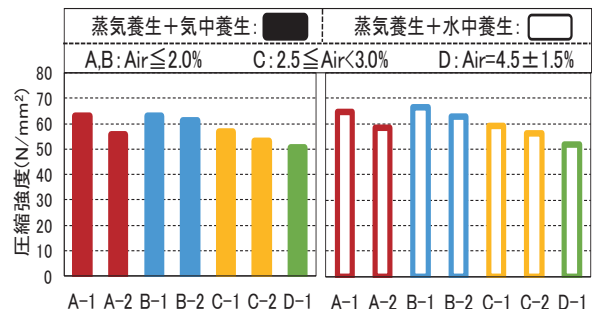


図-2 材齢 28 日における圧縮強度試験結果

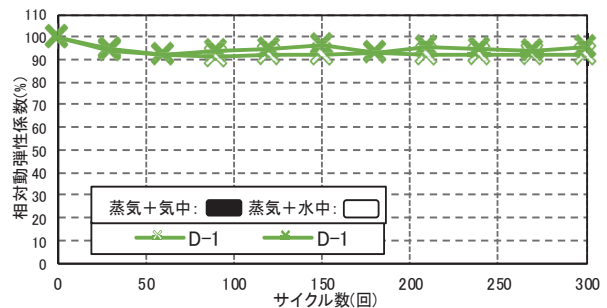


図-3 配合シリーズ D における相対動弾性係数とサイクル数の関係

2. 2試験方法

(1)フレッシュ性状試験

フレッシュ性状試験は、スランブ試験(JIS A 1101 :2005に準拠)と空気量試験(JIS A 1128 :2005に準拠)を行って確認した。

(2)圧縮強度試験

JIS A 1108:2006に準拠して行った。

(3)凍結融解試験

所定の養生条件を終えたのち、JIS A 1148:2010に準拠して行った。

(4)気泡間隔係数

コンクリートの気泡間隔係数の測定には、ASTMC457- 2006 に準拠し、リニアトラバース法により測定を行った。

2. 3振動締固めによる残存空気量の設定値および供試体の作製方法

配合シリーズC では、振動締固めによる残存空気量の影響を検討するため、配合シリーズD のコンクリートに対し1分間の振動締固めおよび実測空気量の測定を5回繰り返し、空気量を $2.5 \leq \text{Air} < 3.0\%$  となるまで減少させ、所定の目標空気量となった時点で供試体の作製を行った。また、フレッシュ性状試験結果および実測空気量を表-3に示す。打込み時の空気量の確認は、空気量試験(JISA1128:2005 に準拠)にて行った。振動締固めによる空気量の調整方法は、平らな容器に10L のコンクリートを入れ、テーブルバイブレーター(周波数:70Hz, 振幅:1mm)を用いて行った。

2. 4養生条件

養生方法については、蒸気養生終了後に脱型し、7 日間の水中養生後、気中養生を材齢28 日まで行った場合と、蒸気養生終了後に脱型後、水中養生を材齢28 日まで行った場合の2 水準とした。蒸気養生は、前養生を4 時間とし8.34°C/h で昇温、最高温度50°Cで3 時間保持したのち、3.58°C/h で20°Cまで降温した。(図-1)

3. 結果および考察(シリーズ1)

図-2に材齢28 日における圧縮強度試験結果を示す。FA を混入した配合は、早期強度発現の遅延が懸念されるが、蒸気養生を行うことでFA を混入していない場合の9 割程度の圧縮強度を確保できてい

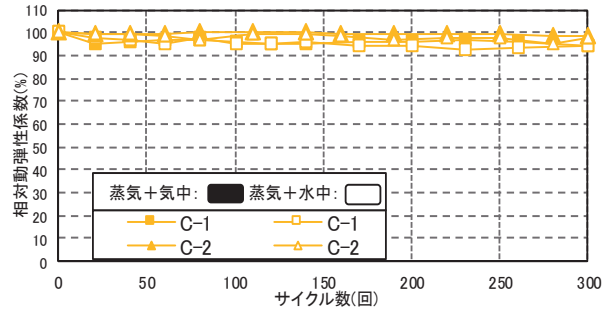


図-4 配合シリーズCにおける相対動弾性係数とサイクル数の関係

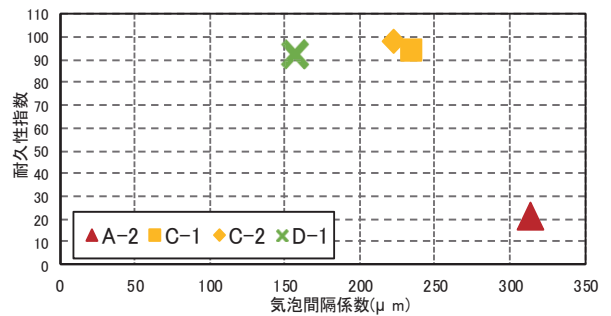


図-5 各配合における耐久性指数と気泡間隔係数の関係

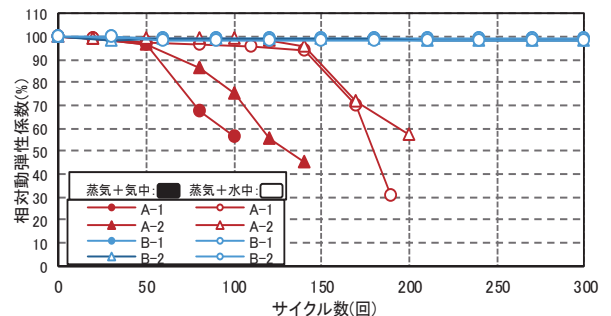


図-6 配合シリーズA,Bにおける相対動弾性係数とサイクル数の関係

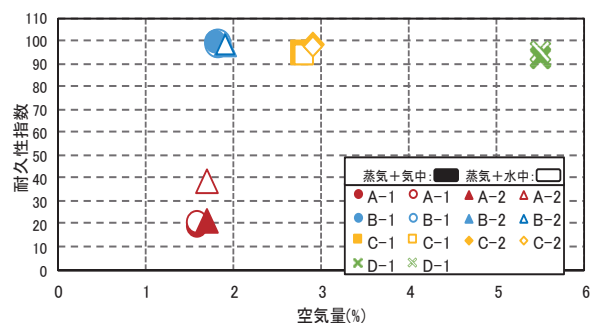


図-7 各配合における空気量と耐久性指数の関係

た。また、耐久性向上混和剤の添加による圧縮強度の低下はみられなかった。以上より、耐久性向上混和剤の添加はコンクリートの圧縮強度に影響を与えないことを明らかとした。図-3に配合シリーズD, 図-4に配合シリーズCにおける相対動弾性係数とサイクル数の関係を示す。図-3に示す結果より、打込み時の空気量をJIS生コンの管理幅内であるAir=4.5±1.5%確保すれば高い凍結融解抵抗性を確保できることが確認された。また、振動締めにより空気量が2.5%程度低減した場合でも、十分な凍結融解抵抗性を確保できることが確認された。また、図-5に各配合における耐久性指数と気泡間隔係数の関係を示す。耐久性指数が低い傾向にあることが確認された配合シリーズAの場合、気泡間隔係数が、300µm以上と高く、耐久性指数も低い。Air=4.5±1.5%から2.5%程度空気量を低減させた配合シリーズCでは気泡間隔係数が250µm以下となり、耐久性指数は高い傾向にあることを示した。これは、既往の研究より、AE剤を用いて練られたコンクリートは振動締めされた場合でもAE剤によって連行された微細な気泡は抜けにくくエントラップトエアは抜けやすいことが報告されている<sup>2)</sup>。そのため、振動締めによって空気量がJIS生コンの管理値の範囲内であるAir=4.5±1.5%から低減した場合でも、高い耐久性指数を確保できたと考えられる。また、コンクリートの凍結融解抵抗性は、硬化体中の気泡間隔係数に影響することが明らかとなっている<sup>3)</sup>。今回使用した材料では気泡間隔係数が250µm以下となった場合、高い凍結融解抵抗性を示すことが確認された。図-6に配合シリーズA,Bにおける相対動弾性係数とサイクル数の関係を示す。配合シリーズAでは、いずれも相対動弾性係数が60%以下となった。FAの有無で比較した場合、A-2では相対動弾性係数が60%以下に低下した際のサイクル数に伸びがみられる。これは、FAのポズラン反応によるコンクリートの水密性の向上が影響したのではないかと考えられる。養生条件で比較した場合、蒸気+気中養生は蒸気+水中養生と比較して短いサイクル数で相対動弾性係数が60%以下となった。これは、蒸気養生後に急激な乾燥を受けると表面に微細なひび割れが発生し、

表-4 検討配合

配合 No.	打込み時の空気量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	単体量 (kg/m <sup>3</sup> )							
				W	C	S1	S2	G	Ad1 (C×%)	Ad3	Ad4
				No.1	59	49	280	463	477	1040	c×0.95
No.2	Air≤2.0%	50	47	165	330	432	435	1062	c×1.00	4.5	3.8
No.3		38	43		433	378	390	1085	c×1.20		

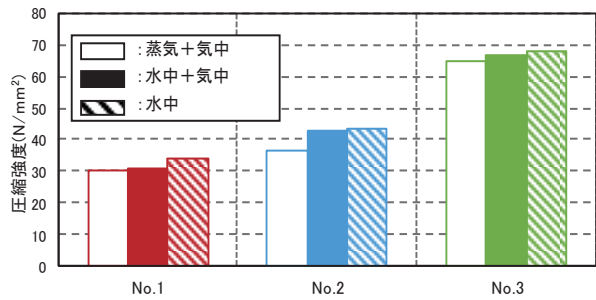


図-8 材齢 28 日における 圧縮強度試験結果

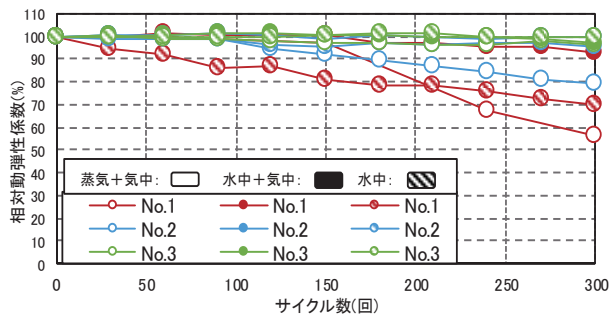


図-9 各配合における 相対動弾性係数とサイクル数の関係

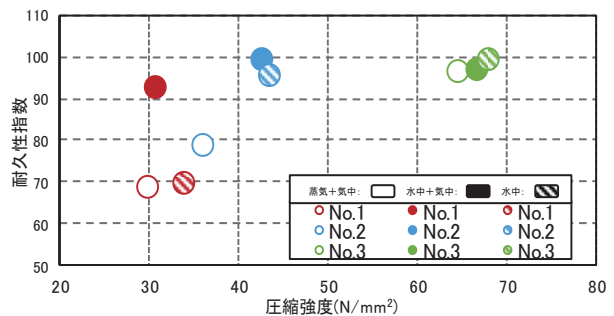


図-10 各配合における 圧縮強度と耐久性指数の関係



水密性を低下させる。よって、凍結融解作用における凍結水の増大をもたらし、劣化が生じたものとする。また、配合シリーズBの場合、配合シリーズAと比較して高い相対動弾性係数を示すことが確認された。これは、耐久性向上混和剤中に含まれる亜硝酸塩の凝固点降下およびパラフィンの撥水作用が効果を発揮したものと考えられ、No-AE(Air $\leq$ 2.0%)の配合においても高い凍結融解抵抗性を示すことが確認された。図-7に各配合における耐久性指数と空気量の関係を示す。コンクリートの打込み時にJIS生コンにおける空気量の管理値であるAir=4.5 $\pm$ 1.5%を確保することで高い耐久性指数を示すことが確認された。また、配合シリーズAの耐久性指数は低い値を示し、同一配合に対して耐久性向上混和剤を添加した配合シリーズBでは90%以上の高い耐久性指数を示すことが確認された。よって、耐久性向上混和剤の添加によりNo-AE(Air $\leq$ 2.0%)の場合においても高い凍結融解抵抗性を確保できると考えられる。

#### 4. 耐久性向上混和剤の耐凍害性改善効果がコンクリートの凍結融解抵抗性に与える影響

##### 4.1 使用材料および配合条件

配合条件を表-4 に示す。設計基準強度の異なる3水準を設け、目標空気量を Air $\leq$ 2.0%に設定した。また今回は、既往の研究<sup>1)</sup>を参考に、耐久性向上混和剤の添加量を定めた。なお、試験項目および方法は、シリーズ1と同様の試験を行った。

##### 4.2 養生条件

養生条件は、蒸気養生後、気中養生を27日間行った場合、水中養生(3日間)+気中養生(25日間)、水中養生(28日間)行った場合の3水準に設定し、養生条件が異なる場合での耐久性向上混和剤がコンクリートの凍結融解抵抗性に与える影響について検討を行った。

##### 4.3 結果および考察(シリーズ2)

図-8に材齢28日における圧縮強度試験結果を示す。設計基準強度の違いが耐久性向上混和剤に与える影響を検討するために、設計基準強度の異なる3水準で検討を行った。図-9に各配合における相対動弾性係数とサイクル数の関係を示す。設計基準強度で比較した場合、配合No.3では相対動弾性係数の低下が見受けられなかった。その一方で、配合No.1,2では相対動弾性係数が低下傾向にあることが確認された。また、養生条件で比較した場合、水中+気中養生を行った場合、どの配合においても相対動弾性係数は高い傾向を示し、耐久性向上混和剤の効果が確認された。しかし、配合No.1,2の蒸

表-5 使用材料

使用材料	記号	備考
水	W	地下水
普通ポルトランドセメント	C	密度:3.16g/cm <sup>3</sup>
山砂	S	密度:2.66g/cm <sup>3</sup> , 吸水率:2.25%
石灰石	G	密度:2.70g/cm <sup>3</sup> , 吸水率:0.84%
高性能減水剤	Ad1	密度:1.03g/cm <sup>3</sup> (ポリカルボン酸エーテル系化合物)
消泡剤	Ad2	アルキルエーテル系
耐久性向上混和剤	Ad3	亜硝酸系防錆剤
	Ad4	パラフィンエマルジョン

表-6 配合条件

配合No.	打込み時の空気量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位数							
				W	C	S	G	Ad1 (C $\times$ %)	Ad2 (C $\times$ %)	Ad3	Ad4
				(Kg/m <sup>3</sup> )							
No.4	Air $\leq$ 2.0%	78	44	172	222	853	1110	C $\times$ 0.80	C $\times$ 0.0010	-	-
No.5								C $\times$ 0.80	C $\times$ 0.0015	4.5	3.8

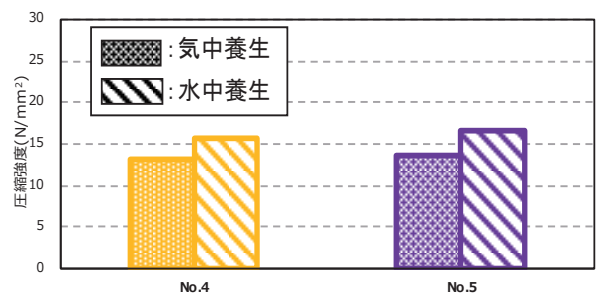


図-11 材齢28日における圧縮強度試験結果

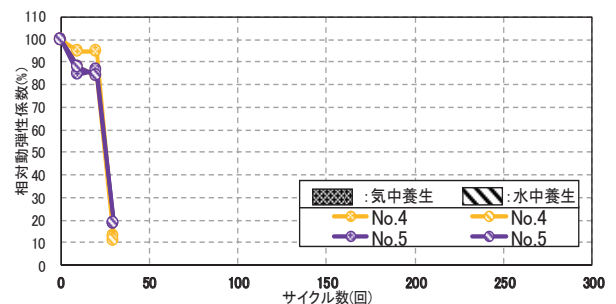


図-12 各配合における相対動弾性係数とサイクル数の関係

気養生+気中養生および水中養生, No.2 の蒸気+気中養生を行った場合, 相対動弾性係数が低下傾向にあることが確認された。図-10 に各配合における圧縮強度と耐久性指数の関係を示す。圧縮強度の低下に伴い相対動弾性係数は低下傾向にあることが確認され, 配合 No.3 の場合では, どの養生条件においても高い耐久性指数を示した。また, 配合 No.1,2 の場合では, 水中+気中養生を行った場合に高い耐久性指数を示すことが確認された。しかし, 蒸気+気中養生, 水中養生を行った場合, 耐久性指数が低下傾向にあることが確認された。以上のことから, 蒸気養生を行った場合は, 凍結融解作用における凍結水の増大による影響が考えられる。また, パラフィンの撥水作用は気中養生の期間を設け, 水が浸透する余地を与えた方がその効果をより発揮できるのではないかと考えられる。設計基準強度の低い場合での耐久性向上混和剤の効果については, 適切な養生条件を設けることで高い効果を発揮することが確認された。しかし, 設計基準強度の低下に伴い, 耐久性向上混和剤の効果も低下傾向にある。そこで, 配合強度の低い場合での検討も行った。配合条件を表-6 に示す。目標空気量を  $Air \leq 2.0\%$  に設定し, 耐久性向上混和剤の添加の有無で検討を行った。養生条件は気中養生(28 日間), 水中養生(28 日間)の 2 水準で検討を行った。図-11 に材齢 28 日における圧縮強度試験結果を示す。耐久性向上混和剤の添加による圧縮強度の低下はみられず, 耐久性向上混和剤はコンクリートの圧縮強度に影響を与えないことが確認された。図-12 に各配合における相対動弾性係数とサイクル数の関係を示す。耐久性向上混和剤無添加の場合, 養生条件によらず, 30 サイクル時点で相対動弾性係数が 60%以下となることが確認された。また, 耐久性向上混和剤を添加した場合においても同様の傾向を示し, 耐久性向上混和剤によるコンクリートの耐凍害性効果は得られなかった。よって, 耐久性向上混和剤により十分な凍結融解抵抗性の向上効果を発揮させるためには, コンクリートの配合強度に留意する必要があると考えられる。しかし, これらの要因については不明瞭であり, 今後, 耐久性向上混和剤の効果のメカニズムについて明らかとする必要がある。

## 5. まとめ

本研究で得られた結果を以下に示す。

- 1) 目標空気量が JIS 生コンにおける空気量の管理値の範囲内であれば, 振動締固めによって打込み時の空気量が下した場合でも十分な凍結融解抵抗性を確保できる。
- 2) 今回検討した使用材料および検討配合では, 気泡間隔係数が  $250\mu\text{m}$  以下となった場合に 80%以上の高い耐久性指数を確保できることが確認された。
- 3) 設計基準強度の高い配合(配合 No.3)に対し, 耐久性向上混和剤を添加することで, 養生条件を問わず  $Air \leq 2.0\%$  の場合においても高い凍結融解抵抗性を確保できることが確認された。
- 4) 設計基準強度が低い場合(配合 No.1)の場合には, 適切な養生条件を設けることで耐久性向上混和剤の効果が発揮される。
- 5) 耐久性向上混和剤により十分な凍結融解抵抗性の向上効果を発揮させるためには, コンクリートの配合強度に留意する必要があると考えられる。

### 【参考文献】

- 1) 徳光ら：コンクリートの耐凍害性および塩害性を向上させる混和剤の開発, プレストレストコンクリート工学会, pp291-296, 2015, 10
- 2) 坂本ら：内部振動機による締固めがコンクリート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, Vol36, No.1, pp.1054-1059, 2010
- 3) 近松ら：気泡間隔係数によるコンクリートの凍結融解抵抗性の評価に関する一考察, 土木学会第 62 回年次学術講演会, pp.1146-1147, 2007