

論文 既往の凍結融解試験データに基づくコンクリートの耐凍害性に及ぼす乾湿繰返し・暴露の影響

米田 恭子*1・千歩 修*2・長谷川 拓哉*3

要旨: わが国では、これまで JIS A 1148 A 法に基づく促進凍結融解試験により、凍害に関する様々な研究が行われてきた。特に近年では、実環境における乾湿繰返し作用が耐凍害性に影響を及ぼすことが報告されており、実環境におけるコンクリートの耐凍害性を明らかにするための研究が数多く行われている。本研究では、これまでの既往の試験データを整理し、乾湿繰返し・暴露および材料がコンクリートの耐久性指数に及ぼす影響を検討し、促進凍結融解試験における相対動弾性係数の変化の標準化式を水セメント比ごとに分類して検討し、乾湿繰返し・暴露過程を加えたコンクリートの標準的な相対動弾性係数低下の式を得た。

キーワード: 乾湿繰返し, 屋外暴露, 耐凍害性, 凍結融解

1. はじめに

凍害は、寒冷地のコンクリート構造物の耐久性に関わる重要な問題であり、我が国では長年にわたって様々な研究がなされてきた。中でも、JIS A 1148 (ASTM C 666)A 法に基づく促進凍結融解試験は、コンクリートの耐凍害性に関する研究において広く用いられており、数多くの試験データが公表されている。藤井ら¹⁾は、昭和 54 年にそれまでの既往の試験データをまとめており、特に促進凍結融解試験 100 サイクル及び 300 サイクルにおいて、空気量・水セメント比・スランプが耐久性指数に及ぼす影響について明らかにした。しかし現在では、コンクリートに使用される材料が多様化し、また、実環境下においては、乾湿繰返し等によりコンクリートの耐凍害性が低下することが報告されており²⁾、これらの影響を考慮して耐凍害性を評価する必要がある。

本研究の目的は、既往の試験データを整理し、分析することによって、乾湿繰返し・暴露がコンクリートの耐凍害性に及ぼす影響を明らかにするとともに、標準化式

を用いてコンクリートの標準的な相対動弾性係数の変化を示すことである。

2. 調査概要

表-1 に調査に用いた既往の試験データの概要を示す。検討の対象とした既往の試験データは、北海道大学建築材料学研究室における過去 19 年間の卒業論文および、日本建築学会大会梗概集・コンクリート工学年次論文集に掲載された凍結融解に関する文献のうち、JIS A 1148 A 法に基づく促進凍結融解試験を行っている論文から得た。これらの試験データのうち、使用材料が一般的な材料(普通)で、2 週水中養生後に促進凍結融解試験を行っているコンクリートを基準となるコンクリート(標準)とし、日本建築学会大会梗概集およびコンクリート工学年次論文集から得た試験データは、標準に限るものとした。これらのデータをもとに、水セメント比・空気量・気泡間隔係数と耐久性指数の関係、水セメント比と質量変化率の関係について検討した。また、今回検討したデータ

表-1 調査に用いた既往の試験データの概要

コンクリートに用いられている特徴的な使用材料	北海道大学						日本建築学会 ^{※※} 大会梗概集	コンクリート工学 ^{※※} 年次論文集
	試験開始条件							
	2週水中 [※] (標準)	4週水中	乾湿 [※]	短期暴露	長期 [※] 暴露	屋内放置	2週水中 [※] (標準)	2週水中 [※] (標準)
一般的な材料(普通) ^{※1}	62	16	33	12	42	12	28	18
フライアッシュ(FA) ^{※2}	21	0	2	0	0	0	-	-
石灰岩粗骨材(石灰岩) ^{※3}	46	0	2	0	0	0	-	-
高炉B種	2	4	2	0	8	0	-	-
その他	48	0	5	0	8	0	-	-
小計	179	20	44	12	58	12	28	18
合計	371							

□ 「標準」とした条件 ※今回検討に用いたデータ ※※参考文献7) - 15)

※1セメントに普通ポルトランドセメント、骨材に普通骨材を使用し、混和材は未使用

※2セメント、骨材は普通と同様の使用材料とし、混和材としてフライアッシュをセメントに置換して使用

※3セメントは普通と同様とし、混和材は未使用、骨材に石灰岩粗骨材を使用

*1 北海道大学 大学院工学研究科空間性能システム専攻 (正会員)

*2 北海道大学 大学院工学研究科空間性能システム専攻 教授・工博 (正会員)

*3 北海道大学 大学院工学研究科空間性能システム専攻 准教授・博(工) (正会員)

のうち、暴露は1年以上北海道大学建築棟屋上で屋外暴露した後に凍結融解試験を行ったデータ、乾湿は乾燥温度 20~40℃の軽微な乾湿繰返し後に凍結融解試験を行ったデータである。表-2 に乾湿繰返し・暴露の条件およびデータ数を示す。なおここでは、乾湿繰返しは、屋外暴露における夏季の乾湿繰返し作用による影響を実験室で与えることを意図したものである。相川らの検討では、乾燥温度 40℃の軽微な乾湿繰返し後に凍結融解試験を行ったものは、屋外暴露後に凍結融解試験を行ったものと同様の劣化を示していたことから、ここでは比較的軽微な乾湿繰返し後に凍結融解試験を行っているデータを対象とし、検討した。さらに、使用材料が特徴的なものとして、フライアッシュ(FA)、石灰岩粗骨材(石灰岩)を用いたコンクリートのデータについて、コンクリートの耐凍害性に及ぼす影響を検討した。

3. 結果及び考察

3.1 水セメント比と耐久性指数の関係

図-1 に水セメント比と耐久性指数の関係を示す。空気量が 1-2%の場合、標準では水セメント比 40%以下の試験体で高い耐久性指数を示すものが見られるが、乾湿・暴露では耐久性指数が低くなっている。このことから、低水セメント比 nonAE コンクリートは、乾湿繰返し・暴露による影響を受けて耐凍害性が低下することがわかる。一方、水セメント比 40%を超える試験体では、逆に乾湿繰返し・暴露による影響で、標準より耐凍害性が向上しているものが見られる。これは、乾湿繰返し・暴露期間中にコンクリート内部の含水率が低下したことなどが理由として考えられる。このことから水セメント比 40%付近で、乾湿繰返し・暴露の耐久性指数に及ぼす影響が大きく変化するといえる。空気量を 3%以上確保した場合、標準では、水セメント比 40%以下の試験体はすべて耐久性指数 80 以上を示している。また、乾湿・暴露では、水セメント比 40%以下で空気量 4%以上確保した場合、ある程度良好な耐久性を示すといえる。

3.2 空気量(圧力法)と耐久性指数の関係

図-2 に空気量と耐久性指数の関係を示す。点線で示すのは、Cordon and Merrill による耐久性指数の向上が見られる空気量の遷移する範囲(以下「遷移帯」)³⁾である。水セメント比 42-65%の試験体のうち、標準は空気量 2-4%の間で耐久性指数が大きく変化する遷移帯が見られる。乾湿でも同様の傾向にあるが、暴露では、空気量 3-5%の間で遷移帯が見られる。一方、水セメント比 25-37%の試験体のうち、標準は、空気量 1-2%の間に遷移帯があり、乾湿・暴露では空気量 1-3%に遷移帯があると考えられる。今回用いたデータに基づく遷移帯と、図中点線で示した Cordon and Merrill による遷移帯は異なる

表-2 乾湿繰返し・暴露条件およびデータ数

乾湿繰返し	1サイクルの条件			サイクル数(サイクル)	データ数
	乾燥温度(℃)	乾燥時間(h)	20℃水中浸漬時間(h)		
乾湿繰返し	40	6	42	7	2
		42	6	1,7,14,21	24
	20	42	6	7	4
	40	48	24	10	5
	35	40	8	7,8,9,10,11,12	9
屋外暴露	場所			期間(年)	データ数
	北海道大学建築棟屋上			1	9
				7	9
				8	19
				9	12
12				7	

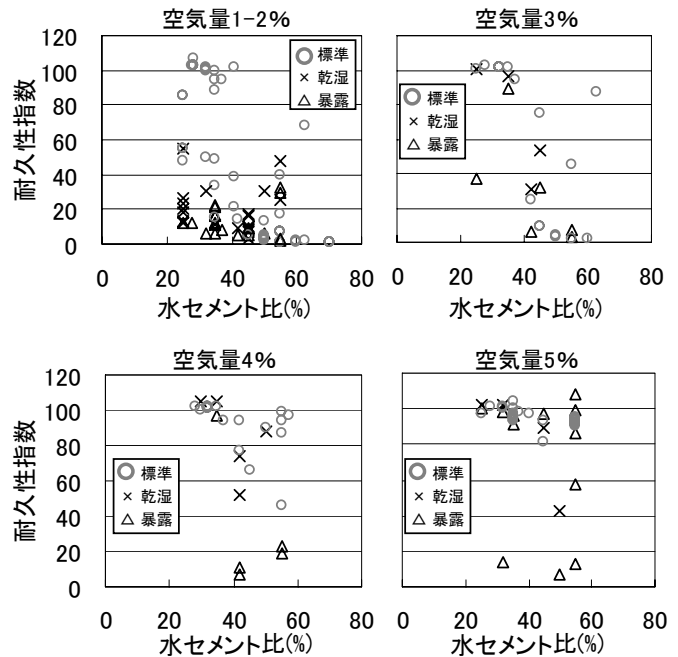


図-1 水セメント比と耐久性指数の関係

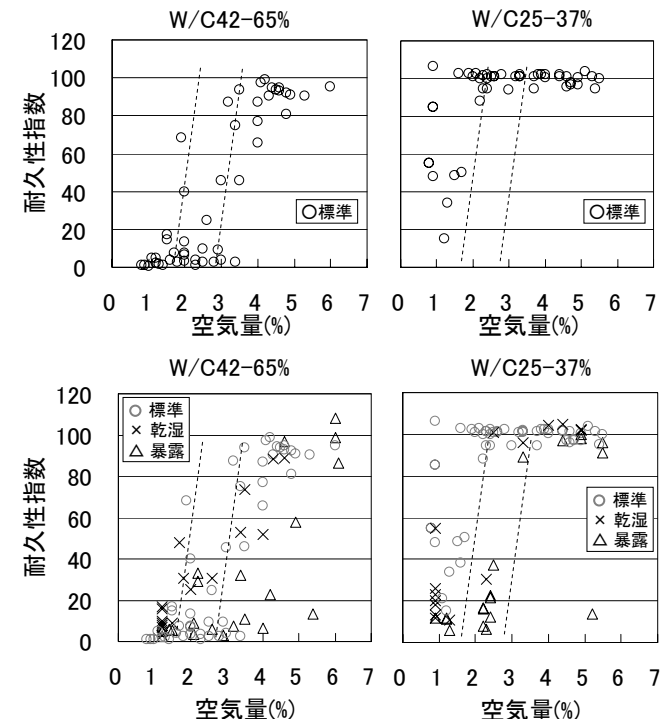


図-2 空気量(圧力法)と耐久性指数の関係

る結果となったが、この理由としては、セメント・混和剤・骨材等の使用材料が異なることなどが考えられる。また、暴露を行った場合、空気量大きい方に遷移帯がシフトする傾向が見られる。

3.3 気泡間隔係数と耐久性指数の関係

図-3 に気泡間隔係数と耐久性指数の関係を示す。図中の点線は気泡間隔係数 0.25 mmを示しており、ACI では良好な耐凍害性を確保するために、気泡間隔係数 0.25 mm 以下を推奨している⁵⁾。すべての水セメント比において、標準・乾湿・暴露いずれの試験体も、気泡間隔係数 0.25 mm 以下ならば耐久性指数 80 以上を示す結果となった。このことから、乾湿繰返し・暴露の影響がある場合も良質な連行空気が耐凍害性向上に有効であるといえる。

3.4 材料が耐久性指数に及ぼす影響

図-4 に、普通・FA・石灰岩の空気量・気泡間隔係数と耐久性指数の関係を示す。FA・石灰岩は、空気量 4% 以上を確保しているものでも、耐久性指数が普通に比べて低い傾向にある。また、FA では気泡間隔係数が 0.25 mm 以下のコンクリートでも、低い耐久性指数を示すものも多く見られる。これは、FA では AE 剤を用いても良質な空気が連行されないことが一因と考えられる。

3.5 水セメント比と質量変化率の関係

図-5 に、水セメント比と質量変化率の関係を示す。この図の質量変化率は、促進凍結融解試験に 300 サイクル終了時点、あるいは相対動弾性係数が 60% を下回った時点における値である。標準では、水セメント比 25-35% では質量変化が見られない。この理由として、組織が緻密であることが考えられる。水セメント比 35% を超えると、水セメント比が大きいコンクリートほど、大きく質量が減少することがわかる。乾湿でも標準と同様の傾向がみられるが、質量減少率はかなり大きな値を示している。この理由として、乾湿繰返しの乾燥過程で表層に微細なひび割れが生じスケーリングが進行したことが考えられる。一方、暴露では、いずれの水セメント比においても質量の変化は、かなり小さな値となっている。これは、暴露により含水率が低下したことが一因と考えられる。

3.6 乾湿繰返し・暴露が耐久性指数に及ぼす影響

図-6 に乾湿繰返し・暴露が耐久性指数に及ぼす影響について示す。ここでは、それぞれ同一調合の試験体における標準の耐久性指数と乾湿・暴露の耐久性指数の比較をしている。乾湿は標準に比べ、水セメント比 55% では耐久性指数が大きくなり、水セメント比 25% では小さくなる傾向がある。暴露は、標準で耐久性指数が 80 以上を示すものでも、耐久性指数が大幅に低下するものも多く見られる。

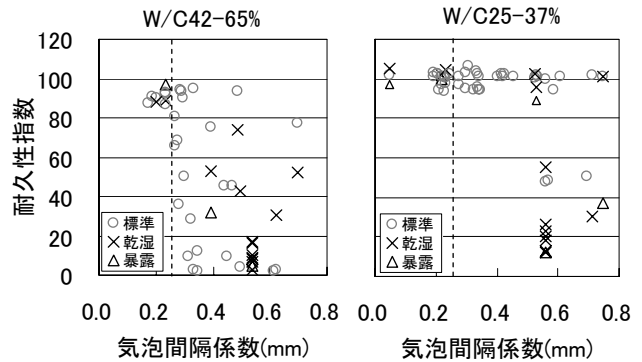


図-3 気泡間隔係数と耐久性指数の関係

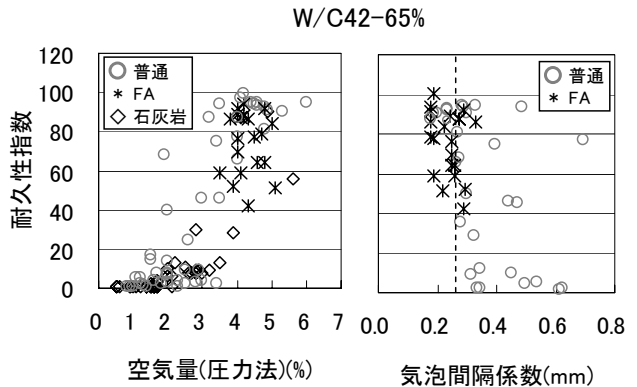


図-4 材料が耐久性指数に及ぼす影響

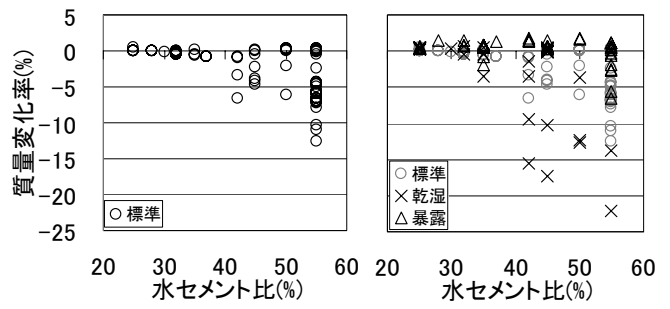


図-5 水セメント比と質量変化率の関係

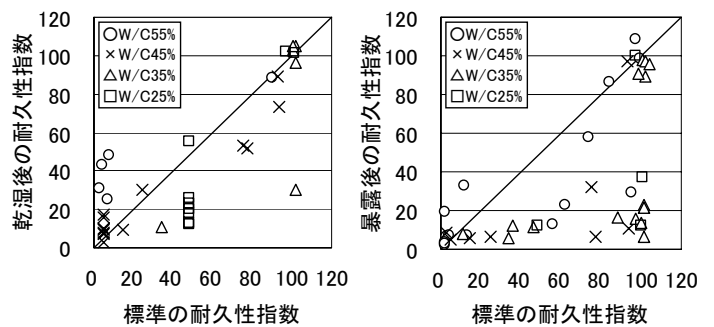


図-6 乾湿繰返し・暴露が耐久性指数に及ぼす影響

表-3 相対動弾性係数低下の検討に用いたデータ

測定終了時の 相対動弾性係数(DM)	凍結融解試験開始前条件		
	標準	乾湿	暴露
相対動弾性係数 ≤ 60%	19	24	31
60% < 相対動弾性係数 ≤ 90%	5	3	2
90% < 相対動弾性係数	36	6	8
測定不可	1	0	0
小計	61	33	41
合計	135		

□ 標準化式の検討に用いたデータ

4. 相対動弾性係数低下の標準化式

4.1 標準化式の検討

表-3 に相対動弾性係数低下の標準化式に用いるデータ概要を、図-7 に 300 サイクルで相対動弾性係数 60% とした標準化式の検討結果を示す。

今回検討した標準化式は、促進凍結融解試験(JIS A 1148 A 法)において、相対動弾性係数低下が開始してから 60%以下に至るまでの低下の傾向は、調合等に関わらず同様であると考え、標準化凍結融解サイクル数⁶⁾を用いて、相対動弾性係数の低下を表した式である。将来的には、標準化式をコンクリートの凍害劣化予測に用いることができる可能性もあると考えられる。ここではその基礎的検討として、データを水セメント比で分類し、水セメント比 55%の相対動弾性係数の低下のデータを基準とし、それぞれの水セメント比における標準・乾湿・暴露の標準化式を求め、その調合の凍害劣化の特徴を把握した。検討に用いたデータは、表-1 の既往の試験データのうち凍結融解試験開始前条件の標準・乾湿・暴露を選び、促進凍結融解試験において相対動弾性係数が 60%以下に達したものとしている。これは、促進凍結融解試験において相対動弾性係数 60%を下回るコンクリートを慣例的に耐凍害性に問題があると判断しているためである。桂らは、100 サイクルで相対動弾性係数 60%になるよう基準化したものを標準化凍結融解サイクル数として提案しているが⁶⁾、今回は(1)式に示す通り、300 サイクルで相対動弾性係数 60%になるように基準化し、簡便に劣化の特徴を把握するため、2本の直線により近似した。

$$\text{標準化サイクル数} = \frac{\text{DM60\%時点のサイクル数} \times 300}{\text{測定時のサイクル数}} \quad (1)$$

相対動弾性係数(DM)と標準化サイクル数(以下 n)を用いた、水セメント比 55%の標準のデータの結果から、以下の(2)、(3)式を得た。

$$\text{DM} = -0.105n + 100 \quad (87.5 \leq \text{DM} < 95) \quad (2)$$

$$\text{DM} = -0.152n + 105.6 \quad (60 \leq \text{DM} < 87.5) \quad (3)$$

相対動弾性係数が 95%を下回る標準化サイクル数(以下 n_1)までを DM=100 で表し、(2)、(3)式で、n を $\{300/(300 - n_1)\} \times (n - n_1)$ に置換して、他の標準化式を得た。

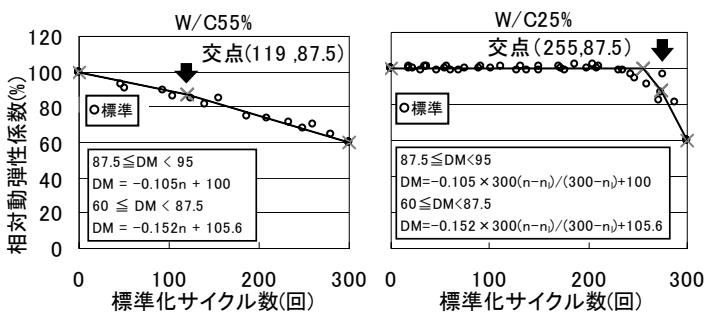


図-7 相対動弾性係数低下の標準化式の検討結果

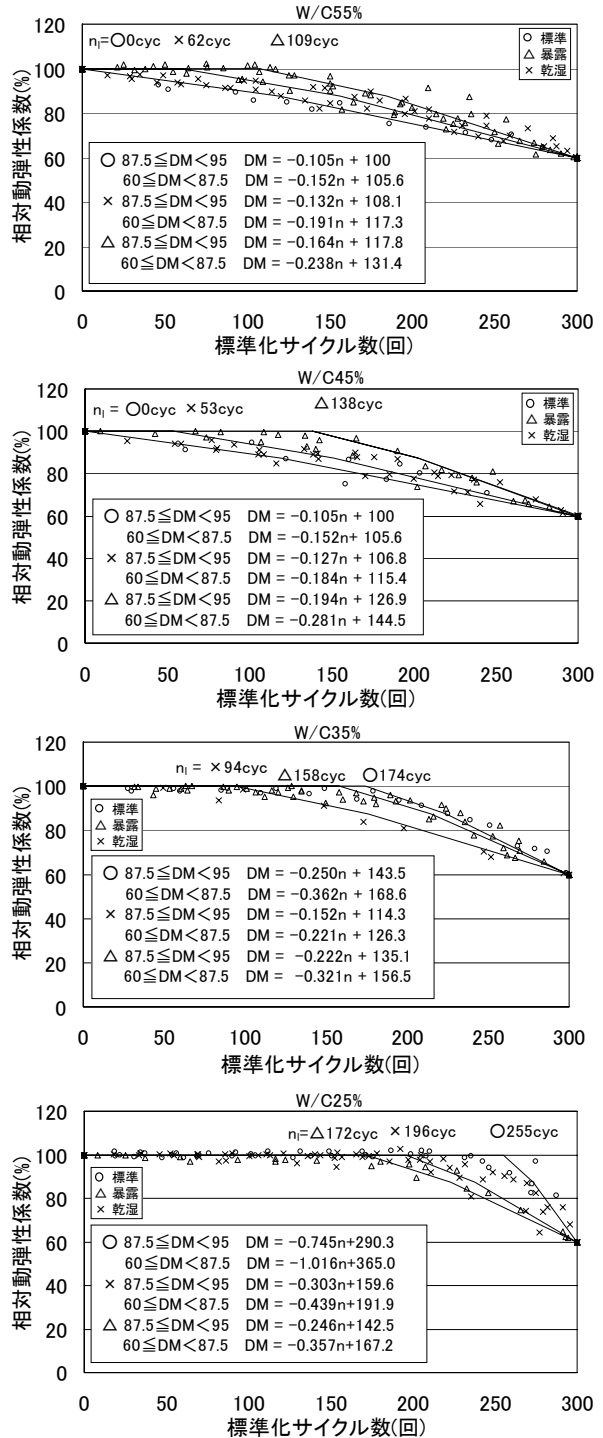


図-8 標準・乾湿・暴露における各種水セメント比の相対動弾性係数低下の標準化式の検討結果

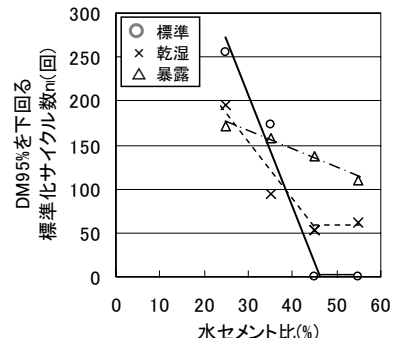


図-9 n_1 と水セメント比の関係

4.2 乾湿繰返し・暴露の影響を考慮した標準化式の検討

図-8 に、各種水セメント比の標準・乾湿・暴露における、相対動弾性係数の低下の標準化式の検討結果を示す。水セメント比 55%のコンクリートでは、 n_1 の値が標準、乾湿、暴露の順に大きくなっており、標準に比べて乾湿・暴露の耐凍害性が高い結果となった。これは、乾湿繰返し・暴露によりコンクリート内部の乾燥が進み、凍結融解に対しプラスの影響を受けたためであると考えられる。水セメント比45%のコンクリートでも同様に、 n_1 の値が標準、乾湿、暴露の順に大きくなっている。また、水セメント比 55%、45%いずれの標準も n_1 の値は 0 となり、凍結融解試験において早期に破壊が始まることかわかる。水セメント比 35%のコンクリートでは、乾湿、暴露、標準の順に、水セメント比 25%のコンクリートでは、暴露、乾湿、標準の順に n_1 の値が大きくなっており、ここでは乾湿・暴露により耐久性が低下したことがわかる。以上の結果から、標準的な相対動弾性係数の変化では、初期に相対動弾性係数が低下しない部分があり、水セメント比により、促進凍結融解試験におけるコンクリートの相対動弾性係数の低下開始までの凍結融解サイクル数は異なることがわかる。一般的な水セメント比のコンクリートでは、早期に相対動弾性係数の低下が見られるが、乾湿・暴露により相対動弾性係数低下開始までの凍結融解サイクル数が長くなる。一方、低水セメント比のコンクリートほど相対動弾性係数低下開始までの凍結融解サイクル数が長くなるが、乾湿・暴露によりこのサイクル数が小さくなることかわかる。

4.3 n_1 と水セメント比の関係

図-9 に、図-8 より得られた n_1 (DM95%を下回る標準化サイクル数)と水セメント比の関係を示す。水セメント比による n_1 の低下は標準で最も大きく、続いて乾湿・暴露となる。また、標準・乾湿では水セメント比 45%を超えると n_1 の値がほぼ一定になる。水セメント比と n_1 の関係として標準・乾湿・暴露においてそれぞれ以下の式を得た。

・標準

$$n_1 = -7.15(W/C) + 364.58 \quad (25\% \leq W/C \leq 45\%) \quad (4)$$

$$n_1 = 0 \quad (45\% < W/C) \quad (5)$$

・乾湿

$$n_1 = -7.15(W/C) + 364.58 \quad (25\% \leq W/C \leq 45\%) \quad (6)$$

$$n_1 = 57.5 \quad (45\% < W/C) \quad (7)$$

・暴露

$$n_1 = -2.09(W/C) + 227.85 \quad (8)$$

6. まとめ

(1) 凍結融解試験開始条件が乾湿繰返し後・屋外暴露後のコンクリートでは、水セメント比 40%以下で耐凍

害性が低下するが、水セメント比 40%以上で向上する傾向がある。

- (2) 凍結融解試験における質量変化が、きわめて小さくなるのは、水セメント比 35%付近以下である。
- (3) 各種水セメント比のコンクリートについて、凍結融解試験開始条件を 2 週水中養生後、乾湿繰返し後、暴露後としたコンクリートの標準的な相対動弾性係数低下の式を求めた。

謝辞

本研究の一部は、文部科学省科学研究費基盤研究(B)「高性能コンクリートの実環境における性状変化と耐凍害性」(課題番号：19360243, 研究代表者：千歩修)によったものであり、ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 藤井弘司ほか：コンクリートの耐凍害性に及ぼす水セメント比、スランプ、空気量の影響、日本コンクリート工学年次論文集 Vol.1, pp33-36, 1979
- 2) 田畑雅幸ほか：コンクリートの耐凍害性におけるひび割れ役割の考察、日本建築学会構造系論文集、第 366 号, pp11-16, 1986, 8
- 3) Cordon,W.A. et al. : Requirements for Freezing and Thawing Durability for Concrete,Proceedings,ASTM, V.63,pp1026-1036,1963,
- 4) 相川葉月ほか：乾湿繰返しを加えた凍結融解試験による各種コンクリートの耐凍害性、日本コンクリート工学年次論文集 Vol.29, No1, pp1131-1136, 2007
- 5) ACI Committee,212 : Admixtures for Concrete,Jour.ACI, Vol.60,No,11,1963,pp1481
- 6) 桂修ほか：コンクリートの凍害劣化評価と予測法に関する研究、日本建築学会、コンクリートの試験方法に関するシンポジウム, pp2-11-2-16, 2003, 11
- 7) 韓千求ほか：自然環境下での乾燥の影響を考慮したコンクリートの耐凍害性実験、日本建築学会学術講演梗概集(北海道), pp1113-1114, 1995, 8
- 8) 権寧世ほか：銅スラグのコンクリート用骨材への利用研究(その 2 養生方法をかえたコンクリートの乾燥収縮特性・凍結融解抵抗性)、日本建築学会学術講演梗概集(近畿), pp443-444, 1996, 9
- 9) 山崎順二ほか：再生骨材の性能評価システムに関する研究(その 8 再生骨材コンクリートの凍結融解抵抗性)、日本建築学会学術講演梗概集(北陸), pp999-1000, 2002
- 10) 三高信吾ほか：高強度コンクリートの耐凍害性に及ぼす気泡間隔係数・気泡径分布の影響、日本建築学会学術講演梗概集(近畿), pp1141-1142, 2005

- 11) 田畑雅幸ほか：札幌市に 24・25 年屋外暴露したコンクリートの耐凍害性に関する研究，日本建築学会 学術梗概集(関東)，pp1260-1261，2006
- 12) 高橋正行ほか：凍結防止剤がコンクリートの凍結融解抵抗性に及ぼす影響，日本コンクリート工学年次論文集 Vol.13, No1, pp701-704, 1991
- 13) 戸川一夫ほか：貧配合ノースランブコンクリートに対する高炉スラグ微粉末の利用に関する研究，日本コンクリート工学年次論文集 Vol.12, No1, pp71-74, 1990
- 14) 三浦律彦ほか：空気量、気泡分布、細孔分布が高強度コンクリートの対凍結融解抵抗性に及ぼす影響，日本コンクリート工学年次論文集 Vol.12, No1, pp679-684, 1990
- 15) 福留和人ほか：高炉スラグ微粉末を混入した水中分離性コンクリートの凍結融解抵抗性，日本コンクリート工学年次論文集 Vol.12, No1, pp685-690, 1990
- 16) 藤原浩巳ほか：収縮低減剤を用いたコンクリートの耐久性に関する検討，日本コンクリート工学年次論文集 Vol.12, No1, pp37-42, 1988