論文　高強度コンクリートの耐凍害性に及ぼす乾燥・湿潤条件の影響

中野　佑樹[*1]・千歩　修[*2]・長谷川　拓哉[*3]

要旨：non-AE 高強度コンクリートが乾燥・乾湿繰返しを受けると耐凍害性が大きく低下するメカニズムを検討するため，乾湿繰返し時における「乾燥日数」「湿潤日数」「乾湿繰返し回数」「水中養生期間」や「試験体断面寸法」を変え，凍害劣化，試験体内部の含水状態に及ぼす影響を検討した。その結果，合計湿潤日数や合計乾燥日数，凍結融解直前の乾燥，水中浸漬が耐凍害性に影響することが明らかとなった。また，凍結融解時の質量変化率から劣化パターンの検討，水中養生後および乾湿繰返し後の内部の含水率分布と耐凍害性についての検討を行った。

キーワード：高強度コンクリート，乾湿繰返し，凍結融解，含水率分布

1. はじめに

non-AE 高強度コンクリートは，2 週水中養生直後に凍結融解試験を行うと高い耐凍害性を示すものでも，軽微な乾燥，または乾湿繰返しを受けると耐凍害性が大きく低下するものがあることが報告されている[1)]。この耐凍害性の低下の理由として，乾燥または乾湿繰返しによるコンクリート内部の水分移動・水分逸散の影響[2)]や微細ひび割れの発生[3)]，細孔構造の変化[4)]などが考えられる。また，断面寸法の異なる試験体を用い，屋外暴露・屋内放置後に凍結融解試験を行うと，断面寸法の大きな試験体は小さなものに比べて大きなひび割れが発生すること，さらに，屋外暴露では断面寸法の小さな試験体は，断面寸法の大きな試験体に比べて，耐凍害性が高く評価されることが報告されている[5)]。これは，乾燥収縮時の内部拘束の影響と考えられるが，断面内の含水状態・水分移動状況が大きく異なっており，これが耐凍害性に影響していることも考えられる。

本研究は，低水セメント比の non-AE 高強度コンクリートが，軽微な乾湿繰返しを受けると耐凍害性が大きく低下するメカニズムの検討を目的としたものである。ここでは，二種類の断面寸法の試験体を水中養生後の乾湿繰返しにおいて，「乾燥日数」「湿潤日数」「乾湿繰返し回数」「水中養生期間」などの条件を変えて行い，その後，凍結融解試験を行った。脱型直後から凍結融解試験までの相対動弾性係数，長さ変化率，質量変化率，および内部の含水状態を測定することにより，乾湿繰返し・凍結融解時の含水状態と劣化の進展について検討し，乾燥・湿潤条件の違いが高強度コンクリートの耐凍害性に及ぼす影響を検討する。

2. 実験概要

表-1 に実験計画を，**図-1** に実験フローをそれぞれ示す。本実験では，水セメント比 25%の non-AE コンクリートを対象とする。乾燥・湿潤条件の組合せの耐凍害性への影響について検討するために，試験体ごとに設定した各種乾湿繰返しを行い，その後，凍結融解試験を JIS A 1148 A 法(水中凍結水中融解法)に準じて行った。なお，乾湿繰返しは，乾燥 40℃・湿潤 20℃[6)]で行った。測定項目として，ダイヤルゲージでの長さ変化率，質量変化率，および一次共鳴振動数から求める相対動弾性係数とした。また，No.1,4,5,6,7,9,10 および 11 では，乾湿繰返し時の乾燥終了時と湿潤終了時において，電気抵抗式水分計[7)]を用い，表層からの深さ 10mm,30mm および 50mm の地点での含水率を測定した。

表-2 に使用したコンクリートの調合，基礎性状を示す。試験体断面寸法は 100×100×400 mm(10 角)を基本とし，No.4,10 および 11 では 75×75×400 mm(7.5 角)のものも合わせて作製した。セメントは普通ポルトランドセメント(密度 3.16g/cm^3)，細骨材は勇払産陸砂(表乾密度 2.56g/cm^3，吸水率 1.26%)，粗骨材は常盤産砕石(表乾密度 2.56g/cm^3，吸水率 2.69%)を使用した。高性能 AE 減水剤はフローが 65cm になるように試し練りによって添加量を決定した。試験体は，長さ変化率，質量変化率および相対動弾性係数を測定するものの他に，No.1，4，5，6，7，9，10 および 11 に関しては，水分計により含水率を測定するものを作製した。含水率測定用の試験体は，**図-2** に示すように 4 ヶ所に深さの異なる測定用の穴(深さ:10mm,30mm,50mm)をあけた。含水率は，30mm 離れた 2 つの穴の間の電気抵抗を測定し，この値を含水率に換算して求めた[7)]。

*1 株式会社　INAX　(正会員)
*2 北海道大学大学院　工学研究院　空間性能システム部門　教授・工博　(正会員)
*3 北海道大学大学院　工学研究院　空間性能システム部門　准教授・博(工)　(正会員)

表-1　実験計画

記号	水中養生	乾湿繰返し条件			乾湿後20℃水中浸漬	合計		試験体寸法※3	測定項目
		サイクル数(回)※1	乾燥40℃(日)	湿潤20℃(日)	(日)	乾燥(日)	湿潤※2(日)		
No.1	2週	1	8	0	−	8	0	○	・長さ変化率(ダイヤルゲージ) ・質量変化率(質量法) ・相対動弾性係数(一次共鳴振動数) ・含水率(電気抵抗式水分計)
No.2		1	8	0	2	8	2	○	
No.3		2	4	2	2	8	4	○	
No.4		2	4	6	−	8	6	○●	
No.5		2	4	12	−	8	12	○	
No.6		2	6	3	−	12	3	○	
No.7		2	8	3	−	16	3	○	
No.8		4	2	2	−	8	6	○	
No.9		4	2	4	−	8	12	○	
No.10		4	3	2	−	12	6	○●	
No.11		4	4	2	−	16	6	○●	
No.12	1週×2※4	1	4	0	−	8	0	○	
No.13		1	4	0	2	8	2	○	
No.14		2	2	6	−	8	12	○	

※1 乾湿繰返しの最終サイクルは湿潤(水中浸漬)を行わない　※2 乾湿繰返し後の水中浸漬を含む
※3 ○:10角(100×100×400mm)　●:7.5角(75×75×400mm)
※4 No.12～14は1週水中養生と乾湿繰返し試験を反復した　例) 1週水中養生−乾湿繰返し−1週水中養生−乾湿繰返し

表-2　使用したコンクリートの調合，基礎性状

W/C (%)	目標AIR (%)	目標スランプフロー(cm)	単位量(kg/m³)				混和材料(c×%)	実測スランプフロー (cm)	実測AIR (%)	圧縮強度 (Mpa)	ヤング係数 (Gpa)
			水	セメント	細骨材	粗骨材	高性能AE減水剤				
25	1.0	65.0×65.0	175	700	634	931	1.25	73.0×73.0	1.7	85.0	32.1

セメント:普通ポルトランドセメント(密度3.16g/cm³)　細骨材:勇払産陸砂(表乾密度2.58g/cm³)　粗骨材:常盤産砕石(表乾密度2.65g/cm³)

乾湿繰返しはサイクル数を 1～4 回に設定し，それぞれ 1 サイクルの乾燥日数と湿潤日数を個別に設定した。No.1～11 に関しては，2 週 20℃水中養生後に各種乾湿繰返しを行った。No.12～14 に関しては，1 週水中養生と乾湿繰返しを反復して行った。また，No.2,3,13 に関しては，凍結融解試験開始前に 2 日間の 20℃水中浸漬を行った。

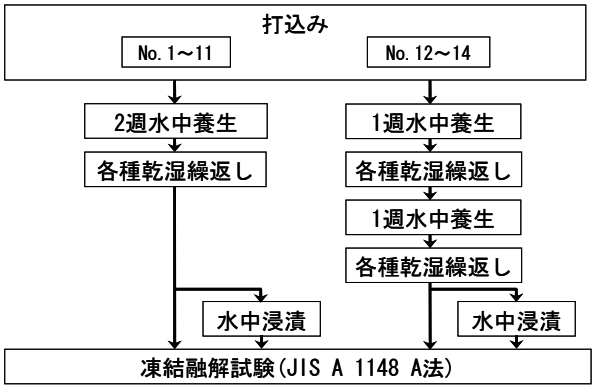


図-1　実験フロー

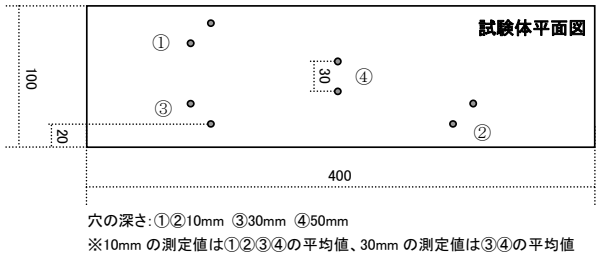


図-2　水分計の測定位置

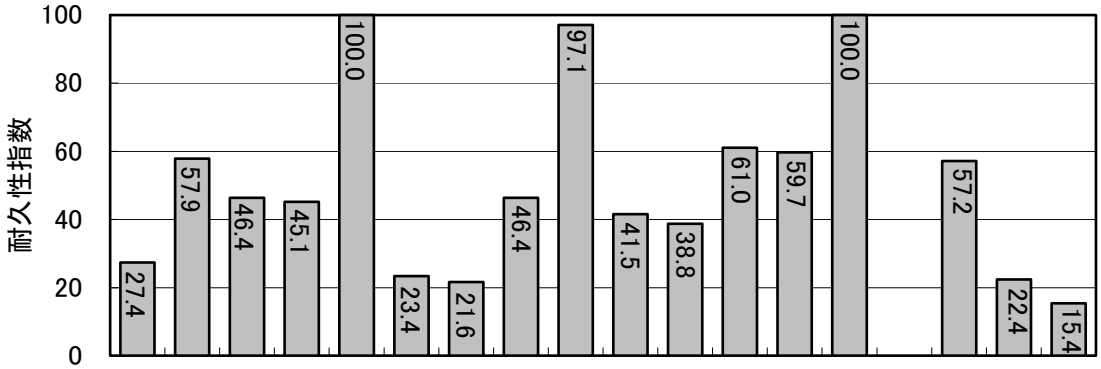
3. 実験結果及び考察

3.1　各種乾燥・湿潤条件と耐久性指数の関係

図-3 に凍結融解試験から求めた各試験体の耐久性指数を示す。凍結融解前の乾湿繰返し条件の違いにより，耐久性指数の値に違いがみられる。合計湿潤日数が 12 日の試験体 No.5,9 および 14 は特に高い耐久性指数を示した。7.5 角の試験体を見ると，No.10 および 11 は低い耐久性指数を示したが，合計乾燥日数の短い No.4 は比較的高い数値となっている。合計乾燥日数の長い No.6,7,10,11 は低い耐久性指数を示している。1 週養生を反復した No.12～14 は耐久性指数が高い値となった。以上のことから，乾湿繰返し条件によって，断面内の含水状態や養生の程度に差があらわれ，耐凍害性に影響を与えていると考えられる。

3.2　合計乾燥日数の影響

図-4 に合計乾燥日数と耐久性指数の関係を示す。合計湿潤日数が 6 日となる No.4,10 および 11,3 日となる No.6 および 7 を比べると，合計乾燥日数が長いほど耐凍害性が低下している。合計乾燥日数が 12 日の No.6 と 10，あるいは 16 日の No.7 と 11 は共に合計湿潤日数の差 3 日で耐久性指数が 20 程度大きくなっている。これらのことから，凍結融解前の乾燥は耐凍害性の低下に影響し，湿潤により耐凍害性は向上すると考えられる。



記号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	4	10	11
合計乾燥	8	8	8	8	8	12	16	8	8	12	16	8	8	8	8	12	16
合計湿潤	0	2	4	6	12	3	3	6	12	6	6	0	2	12	6	6	6
	10角														7.5角		

図-3　各試験体の耐久性指数

また，7.5 角の試験体は合計乾燥日数が 12 日以上のものは耐凍害性が大きく低下し，8 日のものは同じ合計乾燥日数の中でも高い耐凍害性を示していることがわかる。既往の研究[5]では断面が小さいほど耐凍害性が高くなる傾向が示されていたが，本実験では乾湿繰返し条件により異なる結果となった。このことから，断面寸法が異なることにより，各種乾湿繰返しにより断面内の含水状態に違いが生じ，耐凍害性に影響を及ぼすものと考えられる。

3.3　合計湿潤日数の影響

図-5 に合計湿潤日数と耐久性指数の関係を示す。合計湿潤日数が長いほど耐凍害性が向上し，合計湿潤日数が 12 日のものは，高い耐凍害性を示した。この理由として，養生の進行や，表層から内部にかけての含水率分布の均一化[8]が考えられる。

また，乾湿繰返し後 2 日水中浸漬を行った試験体の耐久性指数が水中浸漬を行わないものに比べて高いことから，凍結融解直前の水中浸漬が耐凍害性の向上に影響するものと考えられる。

3.4　凍結融解直前乾燥日数の影響

図-6 に凍結融解前乾燥日数と耐久性指数の関係を示す。凍結融解開始前の乾燥日数が長くなるほど耐凍害性が低下する傾向がみられ，乾湿繰返しの最終サイクルが特に耐凍害性に影響するものと考えられる。この原因として，表層部の乾燥によるひび割れ，組織の変質，試験体内部の含水率勾配の発生などが考えられる。

3.5　水中養生期間と耐久性指数の関係

図-7 に同じ乾湿繰返し条件の試験体における水中養生方法の影響を示す。乾湿繰返し条件が同じ場合試験体 No.1 と 12 を比較すると，1 週養生を反復したものは 2 週養生を行った試験体に比べ耐凍害性に優れていることから，1 週養生を反復した試験体は，2 回目の水中養

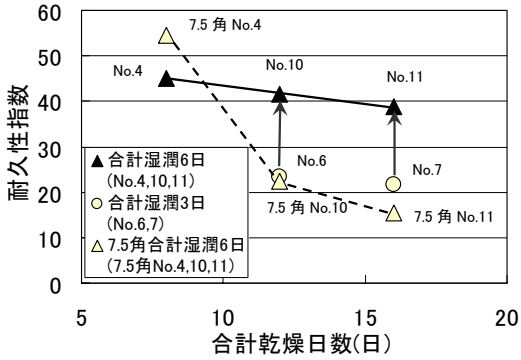


図-4 合計乾燥日数の影響
（合計湿潤日数3日及び6日の試験体で比較）

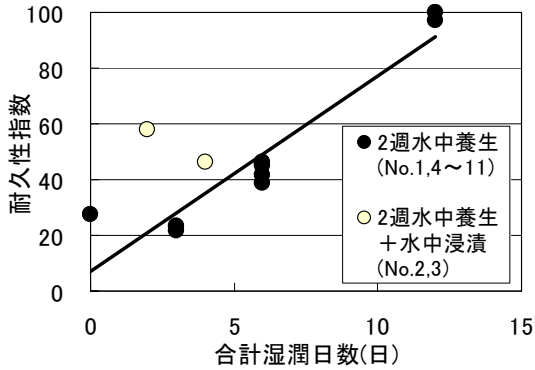


図-5 合計湿潤日数の影響
（10 角 2 週水中養生の試験体で比較）

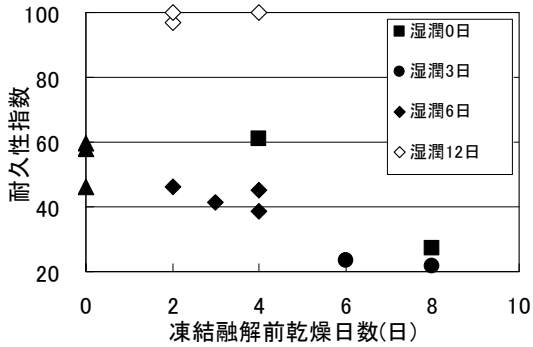


図-6　凍結融解直前乾燥日数の影響
（10 角の試験体で比較）

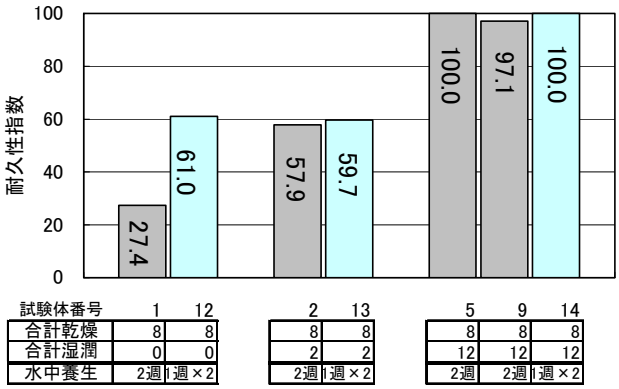


図-7　同じ乾湿繰返し条件の試験体における水中養生方法の影響

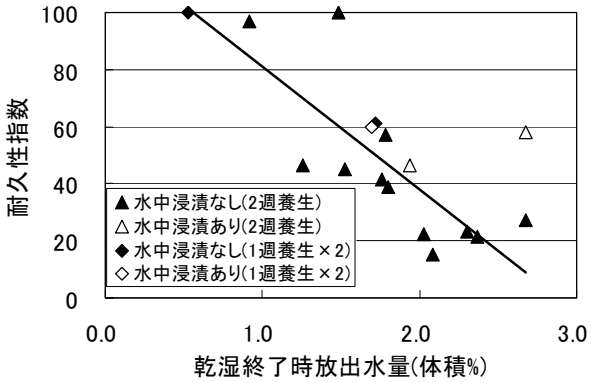


図-8　乾湿終了時の放出水量と耐久性指数の関係

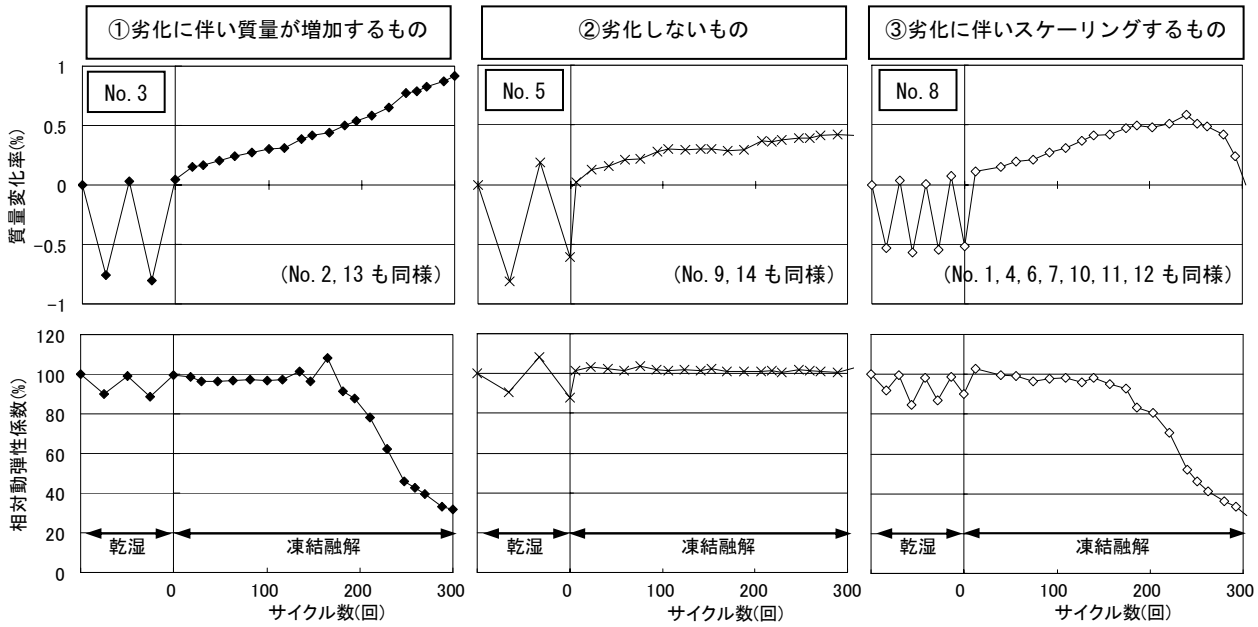


図-9　凍害劣化の進行に伴う質量変化の代表例

生により乾燥の影響が小さくなったと考えられる。なお，No.2 と 13，あるいは，5，9 および 14 では，水中養生方法の影響が小さくなっているが，これは乾湿繰返し時の湿潤期間によって乾燥の影響が小さくなったものと考えられる。

3.6　乾湿終了時の放出水量の影響

図-8 に乾湿終了時の放出水量(乾湿繰返しにより減少した体積あたりの水量)と耐久性指数の関係を示す。凍結融解前の時点で放出水量が多い試験体ほど耐凍害性が低い傾向にある。このことから，凍結融解直前の乾燥の度合いが耐凍害性に影響を与えることが確認できる。その一方，同じ放出水量でも耐久性指数に差が見られることから，内部の水和や含水率分布の状態によって耐凍害性に違いが生じると考えられる。

また，2 週養生の場合，水中浸漬を行った試験体は行っていないものに比べ耐凍害性が高くなっているが，1 週養生を反復したものでは水中浸漬の有無で耐凍害性に大きな差が見られない。このことから，乾湿繰返しや水中養生により生じる水分及び組織状態の違いによって，凍結融解前水中浸漬の影響が異なると考えられる。

3.7　凍害劣化と質量変化の関係

今回の実験では，凍害劣化と質量変化の関係について①劣化に伴い質量が増加していくもの，②劣化しない（相対動弾性係数が低下しない）もの，③劣化に伴いスケーリングするものの 3 種類に分けられた。**図-9** に凍害劣化の進行に伴う質量変化の代表例を示す。①では質量変化率が 0.5%前後になると相対動弾性係数が大きく低下し始め，60%を下回っても質量が増加し続けている。凍害劣化しない②では，質量の増加を示してはいるが，300 サイクルに達しても質量変化率が 0.5%に達していない。このことから，質量変化率が 0.5%前後に達すると，凍害劣化が大きく進行するものと考えられる。

また，①と③を比べると，質量が増加し続けるものは，乾湿繰返し終了時の質量の減少が小さく，スケーリングするものは質量の減少が大きいことがわかる。乾湿繰返し終了時に質量の減少が小さいのは，乾湿繰返し後の水

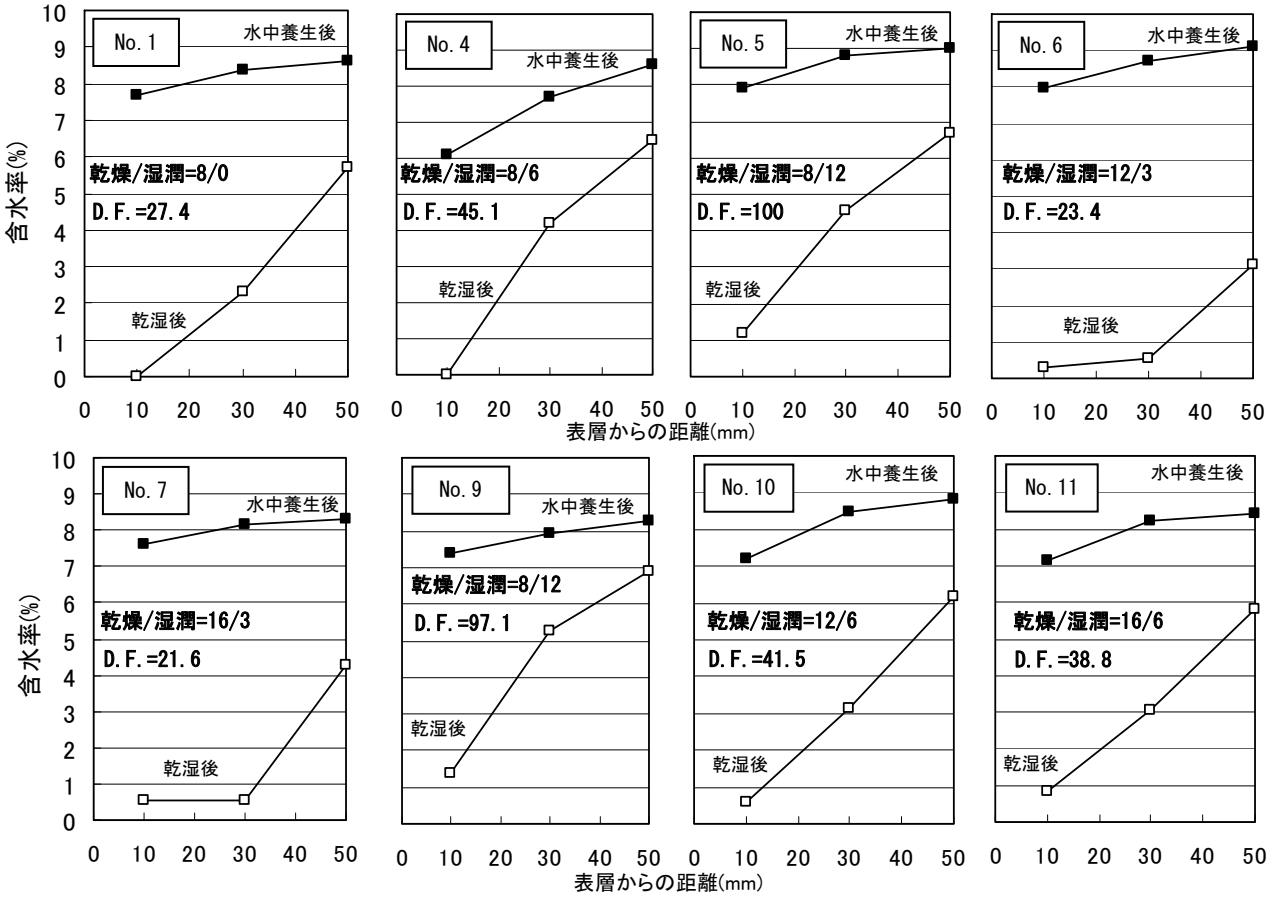


図-10　水中養生後および乾湿終了時の含水率分布

中浸漬による吸水が原因であり，水中浸漬の吸水により表層部の組織が緻密になったことが考えられる。

3.8　乾燥深さが耐凍害性に及ぼす影響

図-10 に水中養生後および乾湿繰返し終了時の試験体内部の含水率分布を示す。乾湿繰返し条件の違いにより，試験体内部の含水状態が異なっている。特に，表層からの距離 30mm の含水率が大きく異なっていることがわかる。耐久性指数が著しく小さい No.6 および 7 は表層からの距離 30mm まで含水率の低下が著しいことがわかる。一方，耐久性指数が高い No.5 および 9 では，表層からの距離 30mm は比較的高含水率となっている。このことから，乾燥の影響が内部まで進み，ある深さまで含水率が低下すると耐凍害性が著しく低下するものと考えられる。

また，表層からの距離が 50mm の含水率をみると，どの試験体も高含水率であることがわかる。もっとも乾燥したと思われる No.6 でも含水率は 3.0%を上回っている。このことから，低水セメント比のコンクリートの場合は，組織が緻密であるため，乾燥を受けた試験体でも内部まで完全に乾燥することはなく，試験体内部に水分を保持した状態で凍結融解作用を受けていることが考えられる。

図-11 に含水率 3.0%となる表層からの距離と耐久性指数の関係を示す。ここで，含水率 3.0%は全ての試験体内部で取りえる含水率であり，かつ各試験体の差が明確に現れていることから，含水率 3.0%となる表層からの距離について検討を行った。なお，表層からの距離は直線近似で算定した。両者には大きな相関があり，乾燥が内部に進むにつれ，耐凍害性が低下することがわかる。また，表層からの距離が 30mm 程度まで含水率が 3.0%を下回ると，耐久性指数が大きく低下することがわかる。このことから，表層からの距離 30mm 付近の含水率が耐凍害性

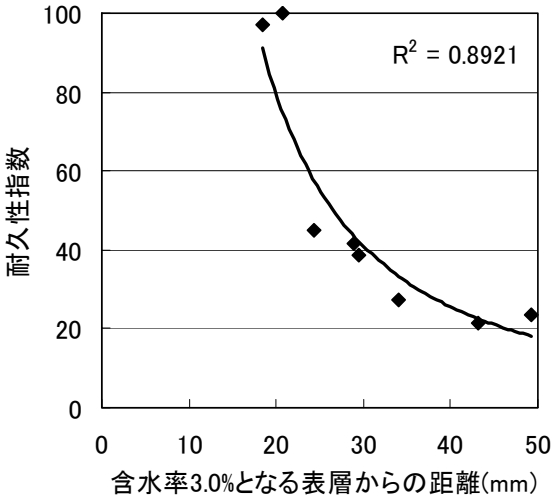


図-11　含水率 3.0%となる表層からの距離と耐久性指数

と関係するものと考えられる。

4. まとめ

non-AE 高強度コンクリートの初期養生後に様々な乾燥・湿潤条件の乾湿繰返しを行い，これらの条件が凍結融解試験結果に及ぼす影響を検討した。その結果，以下の知見が得られた。

(1) 乾湿繰返し条件について，合計湿潤日数が長いほど，耐凍害性が向上する。また，合計湿潤日数が同一の場合，合計乾燥日数が長いほど耐凍害性が低下する。

(2) 乾湿繰返しがコンクリートの耐凍害性に及ぼす影響は，試験体の断面寸法によって異なる。

(3) 凍結融解直前の乾燥や水中浸漬が耐凍害性に大きく影響を及ぼす。

(4) 乾湿繰返しを受けた高強度コンクリートの凍害劣化パターンには，質量が増加するものとスケーリングするものの 2 つがある。なお，凍害劣化しないものは質量の増加が小さい。

(5) 乾湿繰返しによる含水率の低下が試験体内部まで進むと，耐凍害性が著しく低下する。

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)の中で行ったものであり，ここに記して謝意を表します。

参考文献

1) 相川葉月ほか：実環境を考慮した乾湿繰返しが高強度コンクリートの耐凍害性に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，vol.28，No.1，pp.899-905，2006

2) 酒井正樹ほか：乾燥を考慮したコンクリートの凍害劣化挙動，コンクリート工学年次論文集，vol.30，No.1，pp.945-950，2008

3) 酒井正樹ほか：乾湿繰返し・凍結融解を受けるコンクリートの含水状態および長さ変化，コンクリート工学年次論文集，vol.29，No.1，pp.1167-1172，2007

4) 青野義道ほか：乾燥および乾湿繰返しによる硬化セメントペーストの微細構造変化と耐凍害性への影響，コンクリート工学年次論文集，vol.30，No.1，pp.921-926，2008

5) 酒井正樹ほか：部材の乾燥を考慮した高強度コンクリートの凍結融解抵抗性，コンクリート工学年次論文集，vol.28，No.1，pp.905-910，2006

6) 米田恭子ほか：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，コンクリート工学年次論文集，vol.29，No.1，pp.1131-1136，2007

7) 沓掛文夫ほか：注入補修界面の含水率測定方法の一提案，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.313-314，1989

8) 中野佑樹ほか：含水状態・水分移動が高強度コンクリートの凍害劣化に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.30，No.1，pp.939-944，2008