

論文 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

米田 恭子*1・千歩 修*2・長谷川 拓哉*3・相川 葉月*4

要旨：本論文では高強度および一般的な強度のコンクリートを用い、さまざまな乾湿繰返し条件を行った後に凍結融解試験を行ったものと、1年屋外暴露した後に凍結融解試験を行ったものとを比較し、同様な劣化傾向を示す乾湿繰返し条件を決定する。そして、各種のコンクリートについて、その乾湿繰返し条件を行った後、凍結融解試験を行い、耐凍害性について検討したものである。この結果、コンクリートの種別によっては乾湿繰返しにより耐凍害性が向上するもの、低下するもの、およびほとんど変化しないものがあることが明らかとなった。

キーワード：乾湿繰返し, 耐凍害性, 凍結融解, 気泡間隔係数, 初期吸水速度

1. はじめに

低水セメント比の non-AE コンクリートは、標準的な凍結融解試験 (JIS A 1148 A 法) で耐凍害性が高いと評価されたものでも、3日間の屋内放置, 屋外暴露により耐凍害性が大幅に低下するものがあることが報告されている¹⁾。実環境下では乾湿繰返し等により微細なひび割れが発生し、耐凍害性が低下する²⁾等が考えられる。このため、実環境における耐凍害性を評価するには、乾湿繰返し等の影響を考慮して評価する必要がある。

ここでは、まず、実際の屋外暴露後、凍結融解試験を行った試験体と、各種乾湿繰返し後、凍結融解試験を行った試験体を比較し、同様の劣化を示す乾湿繰返し条件を検討・決定する。

次に、決定した乾湿繰返しを加えた凍結融解試験を用いて、実環境における耐凍害性が明確とはいえない各種のコンクリートの耐凍害性を検討することを目的とする。

2. 実験概要

表-1にシリーズ1および2の実験計画を、

表-1 実験計画

シリーズ1		コンクリート種別 (W/C(%))			シリーズ2				
凍結融解試験開始条件 [乾湿サイクル数][記号]		25	35	45	コンクリート種別 [記号]	W/C(%)	空気量(%)	凍結融解開始条件	
2週水中養生後	[] [c]	①③④	①③④	①③④	基本 [S]	50	4.5	・2週水中養生後[c]	
乾燥40°C6h水中42h	[7] [w-7]	① ④		① ④	再生骨材 [R]			30	・乾燥40°C42h水中6h 7サイクル [d]
乾燥20°C42h水中6h	[7] [m-7]	① ④		① ④	エコセメント [E]				
	[14] [m-14]	① ④		① ④	フライアッシュ [F]				
	[1] [d-1]	① ④		① ④	膨張材 [B]				
乾燥40°C42h水中6h	[7] [d-7]	①③④	①③④	①③④	収縮低減剤 [D]		・屋外暴露(1年)[x]		
	[14] [d-14]	① ④		① ④	基本 [3S]		・屋内放置(1年)[i]		
	[21] [d-21]	① ④		① ④	高流動 [3H]				
屋外暴露	[] [x]	①③④	①③④	①③④	シリーズ2 例)Rd				

注) 試験体記号を [] 書きで表す

①: 目標空気量1%, ③: 3%, ④: 4.5%

シリーズ1 例) 2-1-w-7

(W/C25-目標空気量1%-乾湿繰返し条件w-7サイクル)

シリーズ1及びシリーズ2

乾湿繰返しの乾燥過程では、シリカゲルをいれ乾燥状態を保ったチェンバーに試験体を静置し、各種乾燥条件で乾燥した屋外暴露試験体は、北海道大学工学部建築棟屋上に設置した水切りのよい台上で1年間暴露したもの(図-1)

*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)

*4 北海道大学 大学院工学研究科空間性能システム専攻 (非会員)

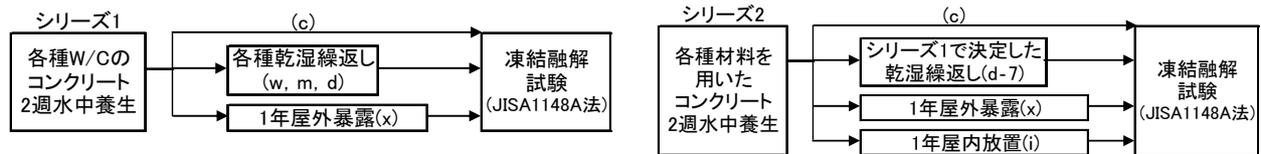


図-1 フロー図

表-2 コンクリートの調合表・基礎性状

試験体記号	W/C (%)	細骨材率(%)	単位量 (kg/m ³)				混和材料 (C×%)		フレッシュ性状		硬化性状			
			水	セメント	細骨材	粗骨材	C	F	空気量(%)	スランプ/フロー(cm)	空気量(%)	気泡間隔係数(mm)	圧縮強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)
									圧力法	圧力法	リニアトラバース法	リニアトラバース法		
2-1	25	41.0	175	700	634	-	1.25 ^{*2}	0.9	64.0×64.0	0.67	0.56	103.1	37.4	
2-3		38.9						2.5	72.0×67.0	1.00	0.75	94.6	34.4	
2-4		37.3						4.9	67.0×67.5	2.67	0.22	88.7	30.8	
3-1	35	45.9	180	514	775	-	0.9 ^{*2}	1.3	59.0×57.0	0.80	0.97	70.2	35.9	
3-3		44.2						3.3	59.0×58.5	1.78	0.53	65.3	32.0	
3-4		42.8						4.4	63.0×62.0	2.87	0.05	63.2	31.1	
4-1	45	49.8	185	411	846	-	0.7 ^{*2}	1.2	23/46.0×44.0	1.56	0.54	50.9	31.0	
4-3		47.3						3.4	24/47.0×49.0	2.04	0.39	47.6	26.2	
4-4		46.0						4.6	24/52.0×51.0	2.80	0.23	43.7	27.5	

試験体記号	W/C (%)	細骨材率(%)	単位量 (kg/m ³)				混和材料 (C×%)		フレッシュ性状		硬化性状			
			水	セメント	細骨材	粗骨材	C	F	空気量(%)	スランプ/フロー(cm)	空気量(%)	気泡間隔係数(mm)	圧縮強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)
									圧力法	圧力法	リニアトラバース法	リニアトラバース法		
S	50	44.7	185	370	760	960	0.0050 ^{*3}	4.3	21.0	3.44	0.20	35.1	26.7	
R		44.7	185	370	760	877	0.0035 ^{*3}	4.0	18.0	2.18	0.29	32.3	23.3	
E		44.7	185	370	760	960	0.0090 ^{*3}	4.7	17.5	3.06	0.31	35.4	24.5	
F		44.3	185	370	751	960	0.0012 ^{*5}	4.3	23.0	2.72	0.18	31.8	21.8	
B		44.6	185	333	759	960	0.005 ^{*3}	10.0 ^{*4}	4.3	19.5	2.89	0.20	38.6	22.6
D		44.7	185	370	762	960	0.002 ^{*3}	3.0 ^{*5}	5.0	19.5	3.51	0.27	31.9	23.7
3S		30	45.0	175	583	610	960	0.002 ^{*3}	1.1 ^{*2}	4.0	70.0×65.0	2.01	0.23	74.5
3H	35.8		185	617	525	960	0.018 ^{*3}	1.1 ^{*2}	4.0	76.0×70.0	2.60	0.19	60.8	28.3

*1: AE剤 *2: 高性能AE減水剤 *3: フライアッシュ用AE剤 *4: 膨張材 *5: 収縮低減剤
 シリーズ2のEではエコセメント、F, 3Hではフライアッシュセメント、それ以外ではポルトランドセメントを使用

表-3 コンクリートの材料

骨材	使用材料		種類・特性	密度 (g/cm ³)
	粗骨材	普通骨材	常盤産砕石	2.66(表乾)
再生骨材	再生骨材Mクラス		2.21(表乾)	
細骨材	普通骨材	勇払産陸砂	2.61(表乾)	
セメント	ポルトランドセメント	普通ポルトランドセメント(JIS R 5210)	3.16	
	エコセメント	普通エコセメント(JIS R 5214)	3.17	
	フライアッシュセメント	フライアッシュセメントB種(JIS R 5213)	2.98	
混和材	膨張材	エトリンガイト系	2.93	
	収縮低減剤	有機界面活性剤系	-	
混和剤	高性能AE減水剤	ポリカルボン酸エーテル系	-	
	AE剤	アルキルエーテル系界面活性剤	-	
	フライアッシュ用AE剤	高アルキルカルボン酸系界面活性剤	-	

*: シリーズ1の使用材料

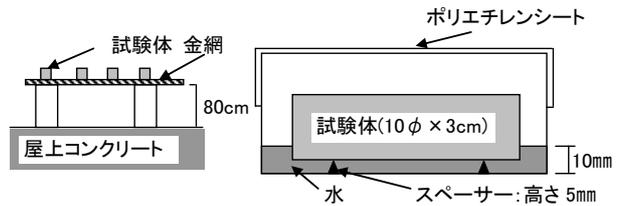


図-2 屋外暴露方法

図-3 下面吸水試験

図-1に実験フロー図を示す。シリーズ1では水セメント比および空気量を変えたコンクリートを作製し、2週水中養生後、実環境を想定した、乾燥温度、乾湿繰返しのサイクル数、1サイクル中における水中浸漬時間・乾燥時間を変えた数種類の条件で乾湿繰返しを行った後、凍結融解試験を行い、その結果と1年屋外暴露し、凍結融解試験を行ったものとを比較し、実環境における変化に近い乾湿繰返し条件を決定する。

シリーズ2では、各種コンクリートを作製し、2週水中養生後、シリーズ1で決定した乾湿繰返し条件(条件d-7: 乾燥40℃42時間、水中浸漬6時間を1サイクルとして7サイクル)を行った後、凍結融解試験を行い、それぞれのコンクリートの耐凍害性について検討する。

表-2にシリーズ1および2の各種コンクリートの調合と基礎性状を、表-3にコンクリートの使用材料を示す。

凍結融解試験はJIS A 1148 A法(水中凍結融解試験方法)に準じて行った。なお、乾湿繰返し、屋外暴露を行った試験体は2日間の水中浸漬後に凍結融解試験を開始した。

また、乾湿繰返しの効果は乾燥収縮性状と関連深いことから乾燥収縮試験(20℃60%R.H.の恒温恒湿室に放置し質量の測定及びJIS A 1129-3により長さの測定)を行った。さらに、ひび割れの発生は吸水性状に影響すると考えられることから、図-3に示す下面吸水試験(RILEM CDC 3)を行った。また、基礎性状として、気泡性状(ASTM C-457 リニアトラバース法)、圧縮強度および

ヤング係数の測定を行った。

3. 結果及び考察

3.1 実環境を考慮した乾湿繰返し条件の決定 シリーズ 1

(1) 凍結融解試験開始条件の影響

図-4 に空気量 1%試験体の乾湿繰返し条件 w, m, d (全て7サイクル) 及び c (標準), x (1年屋外暴露), 図-5 に空気量 3%試験体の乾湿繰返し条件 d (7サイクル) 及び c (標準), x (1年屋外暴露) の凍結融解試験でのサイクル数と相対動弾性係数の関係を示す。なお, 空気量 4.5%のものは乾湿繰返しによる変化が少ないため, 図の掲載を省略した。コンクリート種別によって乾湿繰返し等を行ったコンクリートの耐凍害性の順序は異なる結果となった。空気量が 1%の場合, 最も屋外暴露に近い条件は, 水セメント比 25%では d-7, 水セメント比 45%では c となり, 水セメント比 35%では x, d とともに c より耐凍害性が低下しているが, x の方が低下が大きくなっている。低水セメント比では乾湿繰返しが耐凍害性の低下効果が大きく, 水セメント比 45%では乾燥による耐凍害性の向上効果が大きくなるものと思われる。また, 空気量 3%の場合, 水セメント比 25%では d の耐凍害性の低下は見られな

かったが, x では耐凍害性の低下が見られた。この理由については今後検討が必要であるが, 圧力法による空気量 2.5%であり, 気泡間隔係数が 0.75 mm と大きな値のため, 気泡組織が粗大で試験体による空気量のばらつきがあったことも考えられる。水セメント比 45%では, d, x は低下しているが, x の方が d よりも耐凍害性の低下が大きくなっている。

質量変化率と耐久性指数の関係を図-6 に示す。ここでの質量変化率は凍結融解試験 300 サイクルまたは相対動弾性係数 60%の値とした。この図で, 屋外暴露後の試験体で最も質量変化率が大きくなっているが, これは中性化等の影響によって水を吸収しにくい性状に変化³⁾して 2 日間の水浸漬で含水率が十分に高まらなかったことによるものと思われる。低水セメント比コンクリートの場合, 過度な乾燥を受けるとスケーリングを示す劣化となる⁴⁾。しかし, 屋外暴露後の凍結融解試験による劣化はスケーリングをほとんど示さずに質量が増加する劣化を示す。屋外暴露に近い乾湿繰返しを考える場合, 乾湿繰返し後の凍結融解試験による劣化はこれと同様の劣化形態を示すものでなければならない。ここで行った乾湿繰返し後の劣化形態は屋

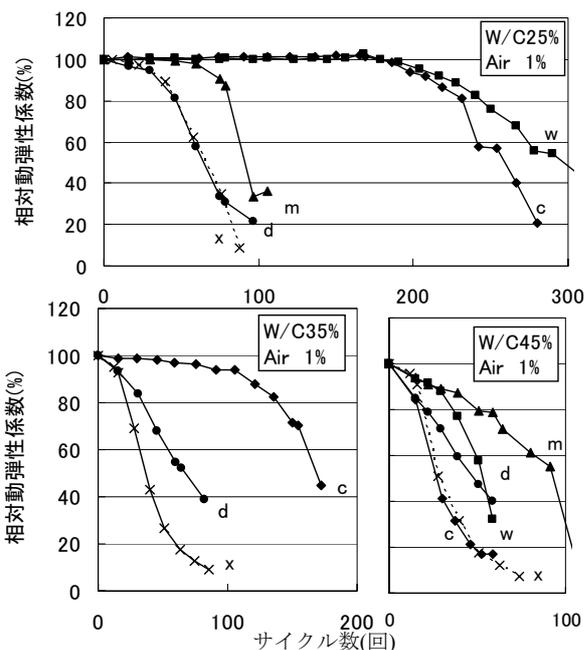


図-4 乾湿繰返し条件の相対動弾性係数の影響

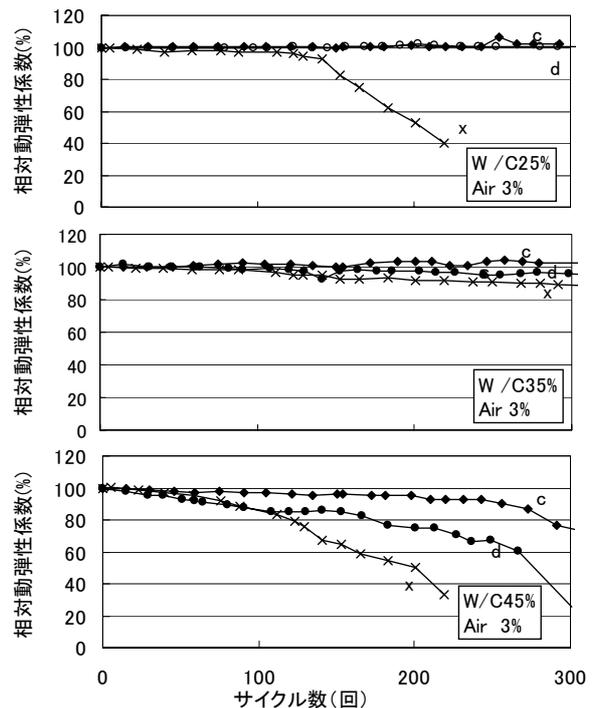


図-5 空気量 3%の相対動弾性係数

外暴露後のものと比較して大きな違いはなく、過度な乾燥等の影響はないものと考えられ、すべての乾湿繰返し条件で屋外暴露と同様な劣化を示しているといえる。なお、W/C45%の質量変化率はマイナスになっているが、これはスケールリングの影響である。

(2) 屋外暴露に近い乾湿繰返し条件の選定

乾湿繰返し等を行ったコンクリートの耐久性指数の順序を表-4に示す。条件により異なる場合があるが、一般にdの条件が屋外暴露xに近い条件と考えられる。そこで本研究では、条件dを屋外暴露に近い条件とした。なお、全ての場合で屋外暴露xが、最も早期に劣化が進行しており、ここで考慮した以外の要因も考えられることから、屋外暴露に近い条件についてはさらに検討が必要と考えられる。

(3) 乾湿繰返し回数の影響

図-7に乾湿繰返し条件dの各サイクル数(1,

7, 14, 21)及びc(標準), x(1年屋外暴露)の凍結融解試験でのサイクル数と相対動弾性係数の関係を示す。水セメント比25%では、7および14サイクルそれぞれにおいて相対動弾性係数の変化に違いはみられないため、乾湿繰返しは初期の数サイクルの影響が大きいものと考えられる。なお、21サイクルでは耐凍害性が向上しているが、これは乾湿繰返しにより含水率が低下したことなどが考えられる。

水セメント比45%では条件dの乾湿繰返しをかけたものをみると、1サイクルの耐凍害性が最も大きく、サイクル数の増加に伴い、耐凍害性が低下している。これは、乾燥の耐凍害性の向上効果に乾湿繰返しの耐凍害性低下効果が作用しているものと考えられる。1年暴露の耐凍害性に最も近いものは14サイクルと21サイクルの間にあることとなるが、7サイクル以降の変化は小さいと考えられ、ここでは乾湿繰返し条件dを7

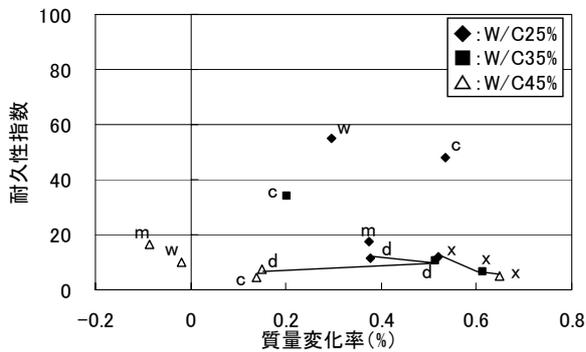


図-6 乾湿繰返し条件の質量変化率への影響 (空気量1%)

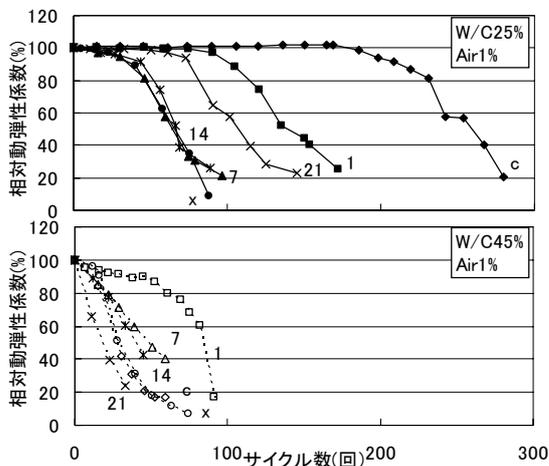


図-7 乾湿繰返し数の相対動弾性係数の影響

表4 各乾湿繰返し条件の耐久性指数の比較

空気量(%)	W/C(%)	耐久性指数の順序 良>劣
1	25	w>c>m>d≒x
	35	c>d>x
	45	m>d>w>c≒x
3	25	c≒d>x
	35	c=d=x
	45	c>d>x

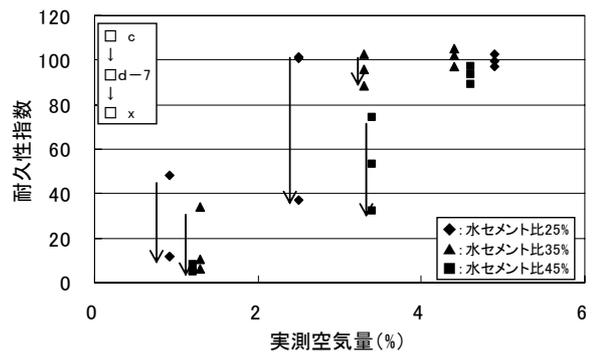


図-8 実測空気量と耐久性指数

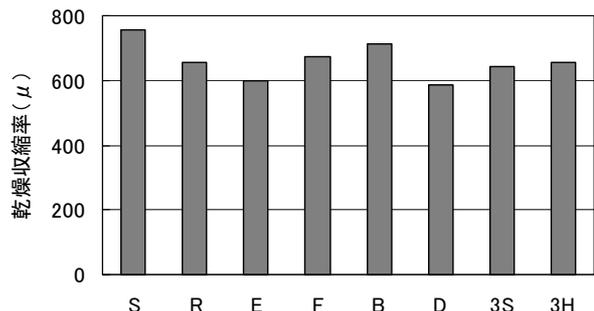


図-9 乾燥収縮率結果

サイクルかける条件を実環境に対応した条件として差し支えないものと思われる。

(4) 圧力法による空気量と耐久性指数

図-8 に水中養生 (c) 後、乾湿繰返し(d)後、屋外暴露 (x) 後の耐久性指数とコンクリート作製時の圧力法による空気量の関係を示す。空気量の大きいところでは乾湿繰返し・屋外暴露が耐久性指数に及ぼす影響は、ほとんどないと言える。空気量を確保した場合、乾湿繰返しによる耐凍害性の変化は小さいといえる。

また、空気量が少ないところでは、乾湿繰返し(d)と屋外暴露の影響が同程度のものと異なっているものがある。屋外暴露の条件に対応する乾湿繰返し条件はコンクリート種別の影響を受けるものと考えられる。

3.2 各種コンクリートの乾湿繰返し後の耐凍害性 シリーズ 2

(1) 乾燥収縮率

乾燥収縮試験 111 日目の乾燥収縮率を図-9 に示す。収縮低減剤(D)を使用した試験体は収縮率

が比較的低い値となっており、収縮低減剤の効果を確認できる。また、今回の実験では R, E の乾燥収縮率も小さな値となった。水セメント比 50%の S 及び F と水セメント比 30%の 3S および 3H は同じ材料を用いているが、水セメント比が大きいものが、乾燥収縮率が大きくなっている。

(2) 凍結融解試験結果

図-10 に水中養生後すぐに凍結融解試験を行ったもの、図-11 に乾湿繰返しを行った後に凍結融解試験を行った試験体の相対動弾性係数を示す。また、図-12 に c 試験体、d 試験体の耐久性指数の関係を示す。

水セメント比 30%空気量 4.5% (3S, 3H) のコンクリートは乾湿繰返しを行ったもの、行っていないもの共に高い耐凍害性を示している。収縮低減剤(D)を使用したコンクリートは乾湿繰返しの有無に関らず低い耐凍害性を示している。また、エコセメントコンクリート(E)は乾湿繰返しにより耐凍害性が低下している。一方、再生骨材コンクリート(R)は乾湿繰返しを受けるこ

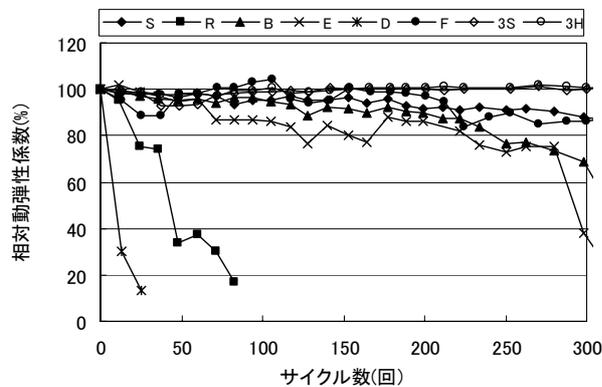


図-10 c 試験体凍結融解試験結果

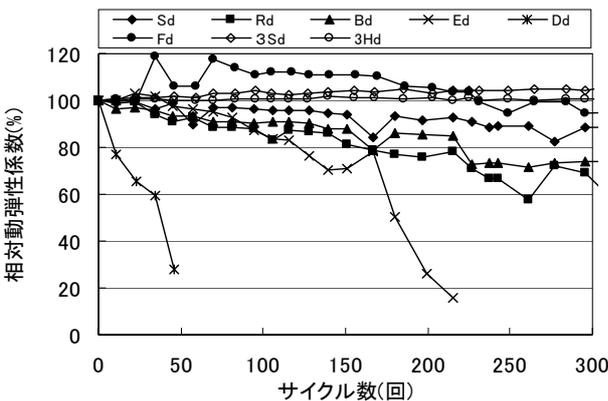


図-11 乾湿繰返し d 凍結融解試験結果

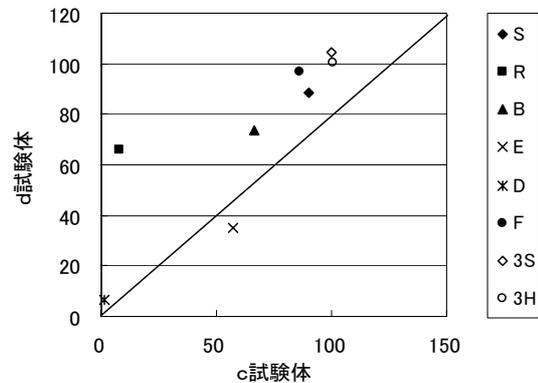


図-12 c 試験体と d 試験体の耐久性指数

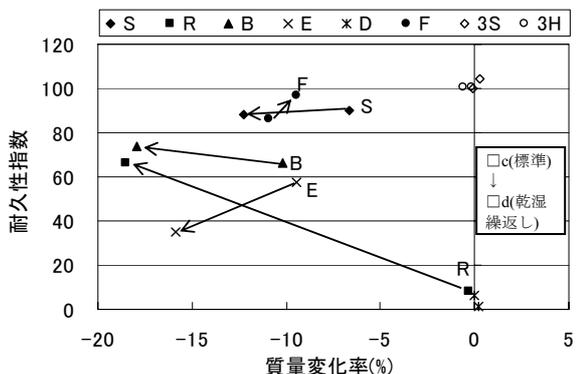


図-13 凍結融解試験時の質量変化率と耐久性指数

とで耐凍害性が向上している。乾湿繰返しにより乾燥が進みコンクリート内の含水率が低下したことが考えられる。

図-13 に質量変化率と耐久性指数の関係を示す。ここでの質量変化率とは凍結融解試験 300 サイクル、または相対動弾性係数が 60%の時の値とした。なお、c 試験体(水中養生後)から d 試験体(乾湿繰返し後)へ矢印を付してある。この図を見ると、水セメント比 30%(3S), (3H)では質量変化はみられないが、これ以外では質量減少の劣化傾向を示している。再生骨材コンクリート(R)は乾湿繰返しを行った後に凍結融解試験を行うと耐凍害性は高くなるが、質量減少率が大きくなっており、スケーリングが激しくなることがわかる。同様に、エコセメント(E)、膨張材(B)、基本調合(S)は乾湿繰返しを受けることで、さらに質量減少の劣化傾向になることがわかる。乾湿繰返しにより内部は養生が進んだため、耐凍害性は高くなったが、表層は乾湿繰返しによる劣化の影響を受けたためスケーリングが激しくなったと思われる。

また、フライアッシュセメント(F)については、質量変化率が乾湿繰返しを行ったものの方が小さくなり、耐久性指数も、やや向上している。フライアッシュセメントでは、乾湿繰返し中にポズラン反応により水和反応が進み組織が緻密化したものと思われる。

図-14 に気泡間隔係数と耐久性指数の関係を示す。気泡間隔係数が 0.2 mm程度以下では乾湿繰返しにより耐久性指数の変化がほとんどない。気泡間隔係数が 0.2 mm以上になると、耐久性指数

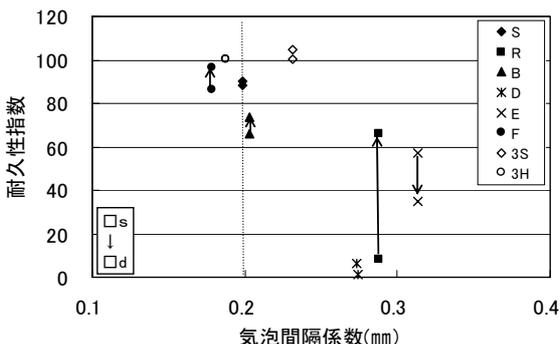


図-14 気泡間隔係数と耐久性指数

は低くなり、乾湿繰返しにより耐久性指数が低下する傾向がある。しかし、再生骨材コンクリート(R)に関しては、気泡間隔係数は 0.3 mm程度であるものの乾湿繰返しを受けることにより耐凍害性が大幅に向上しており、この機構については今後の検討が必要である。

4. まとめ

- (1) 凍結融解試験に及ぼす影響が屋外暴露に近い条件として、乾燥 40°C42 時間水中浸漬 6 時間 7 サイクル条件を提案した。
- (2) 各種コンクリートについて(1)の条件で乾湿繰返し後に凍結融解試験を行うと、乾湿繰返しを行わないものと比較して向上するものとして再生骨材コンクリートがある。低下するものとしてエコセメントコンクリートがある。
- (3) 空気量を確保した、あるいは低い気泡間隔係数のコンクリートは乾湿繰返しの作用を受けても耐凍害性の変化は小さい。

参考文献

- 1) 相川葉月他：暴露条件・粗骨材種別が高強度コンクリートの耐凍害性に及ぼす影響，日本建築学会学術講演論文集（近畿），pp.1145－1146，2005
- 2) 田畑雅幸他：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，pp.11－16，8，1986
- 3) 満淵えり他：乾湿繰返しが限界飽水度試験結果に及ぼす影響，日本建築学会大会学術講演梗概集（東海），pp.527－528，2003
- 4) 千歩修他：乾湿繰返しがコンクリートの吸水性状と耐凍害性に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，vol.25,No1,pp.731－736，2003

謝辞

本研究の一部は財団法人トステム建材産業振興財団の助成による