

# 論文 即時脱型コンクリートの水分浸透速度係数, 凍結融解および乾湿繰返しの複合劣化に対する抵抗性に関する実験的研究

田岡 堯\*1・橋本 親典\*2・渡邊 健\*3・石丸 啓輔\*4

**要旨** : 即時脱型コンクリート (以下, 即脱コンクリート) は, ゼロスランプの超硬練りコンクリートに加圧・振動・締固めを行い作製される。即脱コンクリートは, 水際環境での使用頻度が高いため, 水分浸透に対する抵抗性が大きい方が望ましい。本研究では使用材料が異なる 5 つの製造工場で作製された AE 剤使用または未使用の即脱コンクリート 4 配合と普通コンクリートを 2 配合用意し, それらに対して水分浸透に対する抵抗性, 乾湿繰返し, 凍結融解に対する抵抗性について検討した。その結果, 凍結融解抵抗性は乾湿繰返し作用を受けることによって低下することを確認した。

**キーワード** : 即時脱型コンクリート, 水分浸透速度係数, 凍結融解抵抗性, 乾湿繰返し抵抗性

## 1. はじめに

近年, 施工現場では, 工期の短縮や施工の合理化, 生産性の向上を目的に, コンクリート二次製品が広く使用されている。コンクリート二次製品に求められる性能としては, 高強度であることや丈夫で長持ちであること, また低環境負荷であることが挙げられる。一般的にコンクリート二次製品に使用する材料は, 一般的な普通コンクリートを造る場合と同様にセメント・骨材・水である。そのため, 要求性能を満たす製品になるかはこれらの配合条件と製造方法で決まってくる。供用環境としては河川, 暗渠, 水路, 道路, 擁壁等様々な種類が存在し, 水際環境では主に即時脱型コンクリート (以下, 即脱コンクリート) が使用されている。

即脱コンクリートは, ゼロスランプの超硬練りコンクリートに加圧・振動・締固めを行い形成し, その直後に脱型したコンクリートのことを指す。少ない型枠で回転製造が可能であるため, 施工現場での工期の短縮が期待される。また, 一般的には使用するセメントは粗骨材を接着させるための最低限の量であるため, 普通コンクリートに比べ, 二酸化炭素排出量を抑制することができる。実際に工場で作製される製品の鉄筋コンクリート構造物はかぶりが 10~15mm 程と, 通常の現場打ちコンクリートを用いた鉄筋コンクリート構造物より小さいことがある<sup>2)</sup>。従って, 即脱コンクリートは水分浸透抵抗性が大きい方が望ましい。

既往の研究<sup>3)4)</sup>では, ある一つの工場で作製された使用材料の同じ即脱コンクリートと AE コンクリートを比較すると, 即脱コンクリートの方がより高い水分浸透抵抗性を示すことや, 即脱コンクリートは一定の耐凍害性

を有するものの, 乾湿繰返し試験後には耐凍害性が低下すること, 凍害環境として認識されていない中国地方や九州地方において, 暴露試験による凍害が確認されたこと, 長期暴露試験により, 凍害の耐久性指数が大幅に低下することが報告されている。

本研究では使用材料の異なる 5 つの製造工場で作製された AE 剤使用または未使用の即脱コンクリート 4 配合と普通コンクリート 2 配合を用意し, それらに対して水分浸透に対する抵抗性に与える配合要因を定量的に評価した。また, 急速凍結融解試験と乾湿繰返し試験を交互に実施する試験によって乾湿繰返しを受けた後の凍結融解に対する抵抗性を定量的に評価した。

## 2. 実験概要

### 2.1 使用材料

使用材料と物性値, またその材料を使用した配合を表-1に示す。本実験では共同研究先の 5 つの製造工場で使用されている材料を使用したため, 各配合で使用した材料の種類が異なっている。

### 2.2 配合と圧縮強度

配合と材齢 28 日での圧縮強度を表-2に示す。

本実験では, 共同研究先の製造工場 5 社で作製された配合 A~F の計 6 種類の供試体を使用した。配合 A と配合 B は普通コンクリート, 配合 C~F は即脱コンクリートである。また, 配合 C は AE 剤を使用した AE コンクリートである。

### 2.3 試験方法

全試験において配合 A~E は  $\phi 100\text{mm} \times 200\text{mm}$ , 配合 F は  $\phi 100\text{mm} \times 150\text{mm}$  の円柱供試体をそれぞれ 2 本ずつ

\*1 徳島大学 理工学部 理工学科 社会基盤デザインコース (学生会員)

\*2 徳島大学大学院 社会産業理工学研究部 社会基盤デザイン系 教授 工博 (正会員)

\*3 徳島大学大学院 社会産業理工学研究部 社会基盤デザイン系 准教授 博 (工) (正会員)

\*4 徳島大学 技術支援部 常三島技術部門 技術専門職員 (正会員)

表-1 使用材料の物性値

使用材料	種類	使用配合	記号	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	吸水率 (%)
セメント	普通ポルトランドセメント	C以外	C1	3.16	-
	早強ポルトランドセメント	C	C2	3.14	
細骨材	砕砂1(広島県府中産)	A	S1	2.70	1.80
	砕砂2(広島県三原産)		S2	2.57	1.48
	砕砂3(香川県財田産)	B	S3	2.59	2.00
	砕砂4(長野県上高井産)	C	S4	2.62	1.99
	砕砂4(長野県上高井産)		S5	2.62	1.62
	陸砂(北海道白老産)	D	S6	2.68	1.17
	砕砂5(北海道敷生川産)		S7	2.65	1.43
	砕砂9(兵庫県神埼産)	E	S8	2.55	1.92
	海砂1(佐賀県唐津産)			2.56	1.22
	砕砂7号(兵庫県神埼産)			2.62	0.80
	海砂2(福岡産)	F	S9	2.58	2.24
	高炉スラグ細骨材(広島県福山産)		BFS-5	2.71	1.32
	粗骨材	砕石1(広島県世羅産)(15~5mm)	A	G1	2.61
砕石2(広島県世羅産)(20~10mm)		G2		2.61	0.32
砕石3(香川県財田産)(20~10mm)		B	G3	2.6	1.81
砕石6(香川県財田産)(15~5mm)			G4	2.61	1.61
砕石7(長野県上高井産)(15~5mm)		C	G5	2.62	1.58
砕石8(北海道敷生川産)(15~5mm)		D	G6	2.64	1.45
砕石9(兵庫県神埼産)(15~5mm)		E	G7	2.65	0.76
砕石10(広島県蒲刈産)(15~5mm)		F	G8	2.68	1.26
砕石7号(兵庫県姫路産)			G9	2.60	1.35
混和材		フライアッシュ(Ⅱ種)	D	F1	1.95
	高炉スラグ微粉末	B	F2	2.89	
混和剤	AE減水剤	A	Ad1	1.11	-
	AE剤(Ⅰ種)	C	Ad2	1.006	
	減水剤(Ⅰ種)	D	Ad3	1.15	
	高性能減水剤(Ⅰ種)	E	Ad4	1.05	

用い、水中養生を行った。

(1) 水分浸透速度係数試験

水分浸透速度係数試験は、短期の水掛りをうけるコンクリート中の水分浸透速度係数試験方法(案)(JSCE-G582-2018)<sup>4)</sup>に準じ、材齢28日以降で実施した。

供試体の寸法は、JIS A 1132の4.1(供試体の寸法)に従う。今回の実験では、最大粗骨材寸法が25mm以下であるため直径100mmの円柱供試体を使用した。

供試体を脱型後は水中養生を実施する。養生完了後、安全側の評価とするため、また型枠の剥離剤の影響を取り除くため、打込み時の底面側端面から約25mm部分を切断除去する。切断した後、温度20±2℃かつ相対湿度

60±5%の環境で91日間かつ24時間の質量変化が0.1%以下であることが確認できるまで乾燥を行うが、本実験では乾燥の期間を短縮するため、温度40±2℃かつ相対湿度30±5%の環境で28日の乾燥を与え、かつ24時間の質量変化が0.1%以下であることを確認して乾燥を終了した。乾燥終了後、水に浸漬する面とその対面以外の面をシールする。今回はシールする材料としてエポキシ樹脂を使用した。また、40℃での乾燥を行ったので、供試体の温度を室温に戻すため、乾燥から浸漬までに1時間以上室温にて静置した。その際には、供試体が空気中の水分を吸収することを抑制するため、密閉容器中で静置する。供試体の質量測定には目量が0.1g以下のばかりを使用した。

浸漬は、切断除去した面を下にし、打込み面を上にして、常に供試体下部が10±1mm水に浸るようにして行う。浸漬には温度20±2℃の環境に24時間以上汲み置いた上水道水を使用する。水を張った容器の底面と供試体の間にはスペーサーを設置し、供試体と容器底面との距離が5mm以上となるようにする。わが国では雨が3日以上降り続くことはまれであることから、水への浸漬は48時間とする。ただし、浸漬期間の途中で測定に供し、測定を終了する供試体の浸漬期間については、浸漬開始から測定までの期間とする。

水分浸透深さの測定時期は、浸漬開始から5時間後、24時間後および48時間後を標準とし、測定時期の時間は分単位で記録する。供試体の数量は各測定時期において3体とし、各配合計9体ずつ使用した。

測定の際には、浸漬時の鉛直方向に供試体の中央で割裂する。割裂した後、水分により発色する現像剤を供試体の割裂面に噴霧して、発色している部分を目視にて判定し、その部分の浸漬面からの深さをJIS B 7507に規定するノギスを用いて0.5mm単位で測定し記録する。測定位置に粗骨材がある場合は、粗骨材または粗骨材の抜けたくぼみの両端の変色境界を結んだ直線状で測定する。

表-2 配合表

配合名	粗骨材の最大寸法 (mm)	スランブ (cm)	W/C (%)	空気量 (%)	細骨材率 <sub>s/a</sub> (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )							圧縮強度 材齢28日 (N/mm <sup>2</sup> )	
						水 W	セメント	混和材	細骨材		粗骨材			混和剤
A	20	8.0±2.5	48.0	4.5±1.5	38.0	172	C1	0	S1	S2	G1	G2	Ad1	39.0
							359							
B	20	21.0±2.0	40.1	2.0	43.9	165	C1	0	S3		G3	G4	Ad4	79.7
							411		783					
C	15	0	36.5	4.5±1.5	79.3	130	C2	0	S4	S5	G5		Ad2	60.3
							356		1204	254	381			
D	15	0	34.0	2.5±1.0	70.1	115	C1	F2	S6	S7	G6		Ad3	65.9
							338	80	958	380	570			
E	15	0	35.0	4.5	86.0	124	C1	F1	S8		G7		0	64.1
							310	45	1627		262			
F	15	0	35.0	3.5	60.6	142	C1	0	S9	BFS-5	G8	G9	0	65.7
							406		281	445	741	399		

一定時間水分浸透させた供試体に現像剤を塗布し割裂させたコンクリートを写真－1に示す。

割裂面の水分浸透方向に平行な端部（シール面）から測定位置までの距離は20mm以上とし、5～6箇所を測定を行い、最も大きな値を記録した。

水分浸透速度係数Aは、浸漬期間が5時間から48時間までに得られた水分浸透深さと浸漬時間の平方根を用いて以下の式(1)により求める。

$$A = \frac{\sum_{n=1}^n (\sqrt{L_i} - \sqrt{\bar{L}}) \cdot (L_i - \bar{L})}{\sum_{n=1}^n (\sqrt{L_i} - \sqrt{\bar{L}})^2} \quad (1)$$

ここに、

A：水分浸透速度係数 (mm/√hr)

n：データ数

√L<sub>i</sub>：i番目のデータの浸せき時間の平方根 (√hr)

√t̄：浸せき時間の平方根の平均値 (√hr)

L<sub>i</sub>：i番目のデータの浸透深さ (mm)

L̄：浸透深さの平均値 (mm)

浸せき深さL<sub>i</sub>は、平均値でない個々の測定値を用いる。Aは、縦軸を水分浸透深さ、横軸を浸漬時間の平方根として測定値をプロットした場合に、最小二乗法により求められる近似直線の傾きに相当する。近似直線の切片である定数Bは以下の式(2)で求められる。

$$B = \bar{L} - A \cdot \sqrt{\bar{t}} \quad (2)$$

ここに、B：定数

### (2) 急速凍結融解試験

急速凍結融解試験は、既往の研究<sup>9)</sup>に基づき実施した。この試験は本来多大な時間と労力を要するコンクリートの凍結融解試験方法（JISA 1148）に対し、液体窒素を用いることで時間の短縮と容易性を図ることを目的とし、提案された試験である。JIS規格による方法とは凍結融解のメカニズムは異なるものの、既往の研究<sup>9)</sup>から、急速凍結融解試験のサイクル数1回が、JIS規格試験のサイクル数30回に相当する。配合A～Eはφ100×200mm、配合Fはφ100×150mmの円柱供試体を各配合3体ずつ使用し、湿潤状態で試験を行った。試験材齢は28日以降とした。

本試験の急速凍結融解抵抗性は、液化窒素によって急激にコンクリート表面を凍結させて、表面から10mm程度の凍結および融解させてその抵抗性を評価するものである。JISA1148のコンクリート内部の凍結融解ではなく、表面のスケーリング等の凍結融解を再現していると考えられている。

相対動弾性係数は以下の式(3)により算出した。

$$\text{相対動弾性係数(\%)} = \left( \frac{VL_n^2}{VL_0^2} \right) \times 100 \quad (3)$$

ここに、

VL<sub>0</sub>：試験開始前における超音波伝播速度 (km/s)

VL<sub>n</sub>：nサイクル終了時の超音波伝播速度 (km/s)

### (3) 乾湿繰返し試験

乾湿繰返し試験は「ポーラスコンクリートの乾湿繰返し試験方法（案）」に準じ、(2)の急速凍結融解試験で凍結融解抵抗性が確認できた配合B～Fを対象に実施した。供試体は各配合3体ずつ使用し、材齢28日以降で実施した。

湿潤は20±2℃の水槽を、乾燥は40±2℃の乾燥炉を標準とする。超音波伝播速度を計測した超音波測定器は急速凍結融解試験で使用したものと同一のものである。

乾湿繰返しの方法は、乾燥期間3日、湿潤期間1日、乾燥期間2日、湿潤期間1日であり、これを2サイクルとすることを標準とする。相対動弾性係数が60%以下になった時点、またはサイクル数10回で試験を終了とした。なお、乾燥から湿潤に移行する場合には急激な温度変化を避ける目的から1時間程度の気中放置時間を設ける。

測定は2サイクル終了時の湿潤状態で行う。測定項目は超音波伝播速度と質量とする。供試体を水中から取り出した後、約1時間放置することで空隙内部の水を自然排水させ、その後、速やかに供試体の超音波伝播時間と質量を測定する。

相対動弾性係数は急速凍結融解試験で用いる式(3)により算出する。さらに、質量減少率を以下の式(4)により算出する。

$$W_n = \frac{w_0 - w_n}{w_0} \quad (4)$$

ここに、

W<sub>n</sub>：乾湿繰返しnサイクル終了時の質量減少率 (%)

w<sub>n</sub>：乾湿繰返しnサイクル終了時の供試体の質量 (g)

w<sub>0</sub>：試験開始前における供試体の質量 (g)

## 3. 実験結果および考察

### 3.1 水分浸透速度係数試験

水分浸透係数試験結果を図－1に示す。浸漬時間5時間から48時間までに得られた水分浸透深さの平均値L̄と浸漬時間の平方根の平均値√t̄を用いて最小二乗法より計算した結果、下記の式(5)において水分浸透速度係数(近似直線の傾きA)と定数(切片B)が得られる。

$$\bar{L} = A \cdot \sqrt{\bar{t}} + B \quad (5)$$

その計算結果と昨年度の研究で実施した即脱コンクリートの実験値を併せて表－3に示す。水分浸透速度係数は、普通コンクリートの配合A、配合Eが大きな値を示した。また、普通コンクリートである配合Aと配合Bがそれぞれ4.4、4.6mm/√hrと、類似した値を示し、即脱コンクリートである配合C～Fが1.5～1.8mm/√hrと、類似

する値かつ普通コンクリートの2配合よりも小さな値を示した。また、平成30年度の実験値も類似する値を示した。AE剤の有無による水分浸透速度係数の違いは見られなかった。

水分浸透速度係数を求める試験では、傾きのみ注目しており、浸漬時間0時間に対する浸透深さ(切片)は無視している。これは、3段階の浸漬時間で直線を求めるために切片の物理的意味、すなわち浸漬時間0時間でなぜ浸漬するのかという定義が難しいためと思われる。本来は、原点を通る回帰式であるべきではないかと思われる。

水分浸透速度係数と水セメント比 W/C の関係を図-2に示す。W/C が小さくなるに伴い、水分浸透速度係数が小さくなる傾向が見られた。これは、W/C が小さくなるとコンクリートが緻密になり、水分が浸透する隙間が少なくなったためであると考えられる。コンクリート標準示方書<sup>7)</sup>によると、水結合材比および結合材の種類から水分浸透速度係数の予測値 $q_p$  (mm/√hr) を以下の式(6)で推定することができる。

$$q_p = 31.25 \times (W/B)^2 \quad (6)$$

ここに、W/B : 水結合材比

この式は、水結合材比 0.4, 0.5, 0.6 のコンクリートに対する実験から得られたものであり、使用する結合材が、普通ポルトランドセメント、高炉セメントB種、フライアッシュセメントB種である場合に適用できる。W/B を W/C に置き換え、 $0.35 \leq (W/C) \leq 0.6$  の範囲でこの式の曲線を図-2に示す。即脱コンクリートの水分浸透速度係数は、予測式よりも相当に小さくなったため、安全側の式であると評価できる。なお、式(6)のW/Bの適用範囲は40~60%であり、今回のW/Cが35%は適用範囲外である。

水分浸透速度係数と圧縮強度の関係を図-3に示す。本試験では水分浸透速度係数と圧縮強度の相関性は認められなかった。また、配合Eの圧縮強度が最も大きかった。これは、試験体はすべて各工場で作製しているため、スランプ以外では、細骨材および粗骨材の影響がもっとも大きく受けると考えられる。スランプが強度に与える影響はほとんどないと考えられるため、使用する骨材の影響と考えられる。同一W/Cであれば、空気量が多いEコンクリートの方が強度が小さくなるが、今回は、逆の結果になった。これに関しては、再実験を含み今後の検討課題の1つとする予定である。

水分浸透速度係数と細骨材率の関係を図-4に示す。細骨材率は即脱コンクリートである配合C~Fが60~86%と高く、普通コンクリートである配合Aと配合Bが40%前後と低い値である。また、水分浸透速度係数も普通コンクリートが即脱コンクリートよりも高い値となっ

た。これは細骨材率が高くなると、粗骨材とモルタルとの間にできる隙間である潜在的欠陥が少なくなり、水分が浸透する隙間が少なくなるためであると考えられる。即脱コンクリートに着目した場合、本試験では水分浸透速度係数と細骨材率の相関性は認められなかった。

水分浸透速度係数と単位水量の関係を図-5に示す。単位水量は即脱コンクリートである配合C~Fが115~145kg/m<sup>3</sup>であり、普通コンクリートである配合Aと配合Bが160~175kg/m<sup>3</sup>と即脱コンクリートよりも高い値である。これは単位水量が小さくなるとコンクリートが密実になり、水分が浸透する隙間が少なくなるためであると考えられる。即脱コンクリートに着目した場合、本試験では水分浸透速度係数と単位水量の相関性は認められなかった。

水分浸透速度係数と単位セメント量の関係を図-6に示す。本試験では水分浸透速度係数と単位セメント量の相関性は認められなかった。

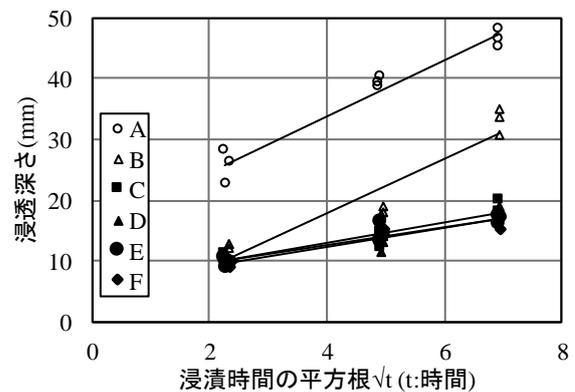


図-1 水分浸透速度係数試験結果

表-3 近似直線の傾きと切片

記号	水分浸透速度係数(A)	定数(B)
A	4.6	15.52
B	4.4	0.45
C	1.7	6.31
D	1.8	5.34
E	1.5	6.54
F	1.5	6.22

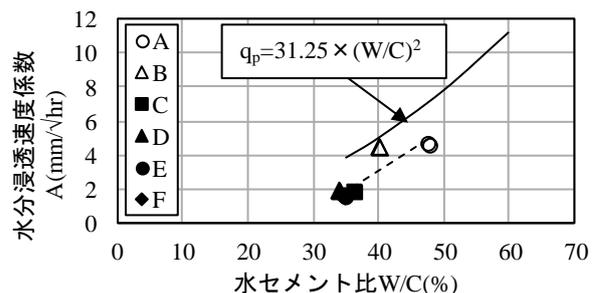


図-2 水分浸透速度係数と W/C の関係

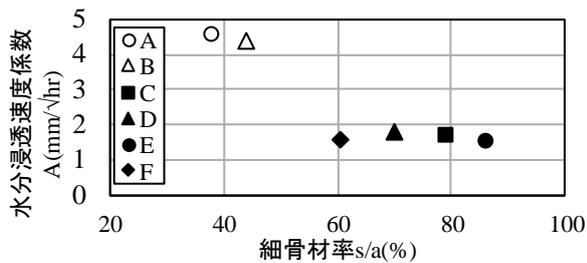


図-4 水分浸透速度係数と細骨材率の関係

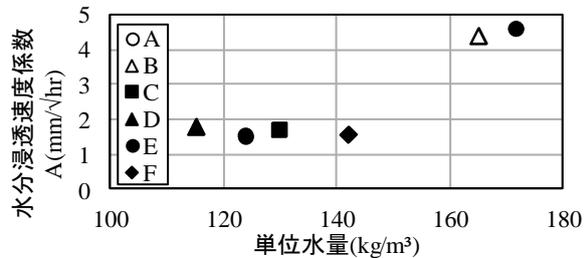


図-5 水分浸透速度係数と単位水量の関係

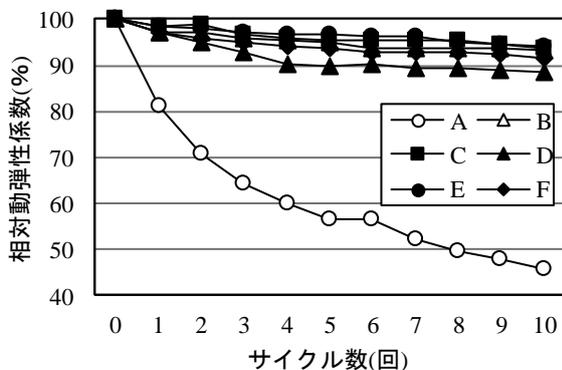


図-7 急速凍結融解試験結果

### 3.2 急速凍結融解試験

急速凍結融解試験結果を図-7に示す。相対動弾性係数は、普通コンクリートである配合Aは5サイクル目で60%を下回った後、全10サイクル終了時点まで低下し続け、配合B~Fは全10サイクル終了時点でほとんど低下しなかったため、配合A以外は十分な凍結融解抵抗性を有するとされる。しかし、普通コンクリートである配合Bは、ほとんど低下しなかったため、普通コンクリートと即脱コンクリートによる違いは見られなかった。

配合D, E, Fの即脱コンクリートは、Non AE コンクリートにも関わらず凍結融解抵抗性を有した。また、普通コンクリートの配合Bも、Non AE コンクリートにも関わらず凍結融解抵抗性を有した。一般に、Non AE コンクリートよりも AE コンクリートの方が耐凍害性が大きいとされており、同一 W/C であれば、AE コンクリートは空気量が多いため、圧縮強度は Non AE コンクリートよりも小さい。よって、耐凍害性は強度には依存しないと考えられている。しかしながら、即脱コンクリートの場合、Non AE コンクリートであっても強度が大きい場合は、耐凍害性が大きいという事例もある。本実験では、即脱コンクリートではなく Non AE コンクリートの配合

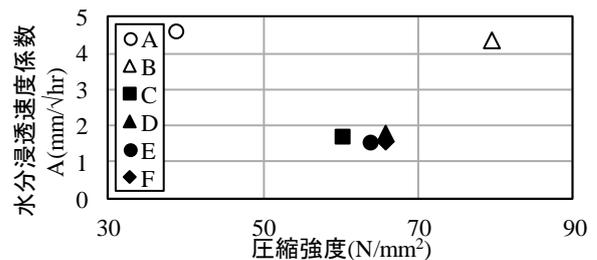


図-3 水分浸透速度係数と圧縮強度の関係

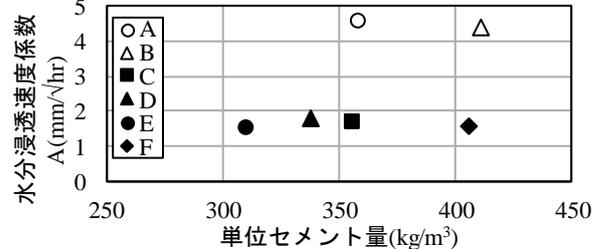


図-6 水分浸透速度係数と単位セメント量の関係

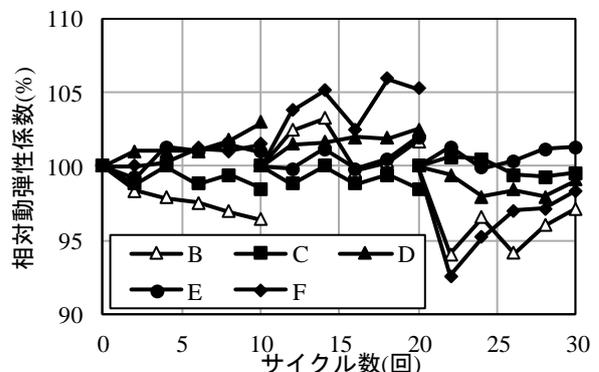


図-8 乾湿繰返し試験結果

Bの耐凍害性が大きくなった。Non AE コンクリートであるため、配合Aと同様に耐凍害性は小さくなると予想していた。予想と反した理由としては、強度が高く、表面のスケーリングに関する凍害性を評価したため、耐凍害性が大きくなったと思われる。配合Aは、強度が配合Bよりは小さいため、耐凍害性が小さくなったと考えられる。

### 3.3 乾湿繰返し試験

乾湿繰返し試験結果を図-8に示す。相対動弾性係数は全配合が30サイクルで100%前後であり、本実験を実施した5配合のコンクリートは乾湿繰返しに対する抵抗性を有していることが確認できた。また、配合B, Fが他の配合に比べるとやや低下する違いが見られたが、微小なものであるため配合との関係の有無は判定できない。

### 3.4 乾湿繰返し試験の履歴を受けた供試体での急速凍結融解試験結果

乾湿繰返しと凍結融解の複合劣化を想定し、急速凍結融解試験10サイクルと乾湿繰返し試験10サイクルを交互に実施した。図-9に40サイクルの急速凍結融解試験結果を示す。この際、乾湿繰返し試験実施前の急速凍結融解試験における0サイクル時の動弾性係数を100%

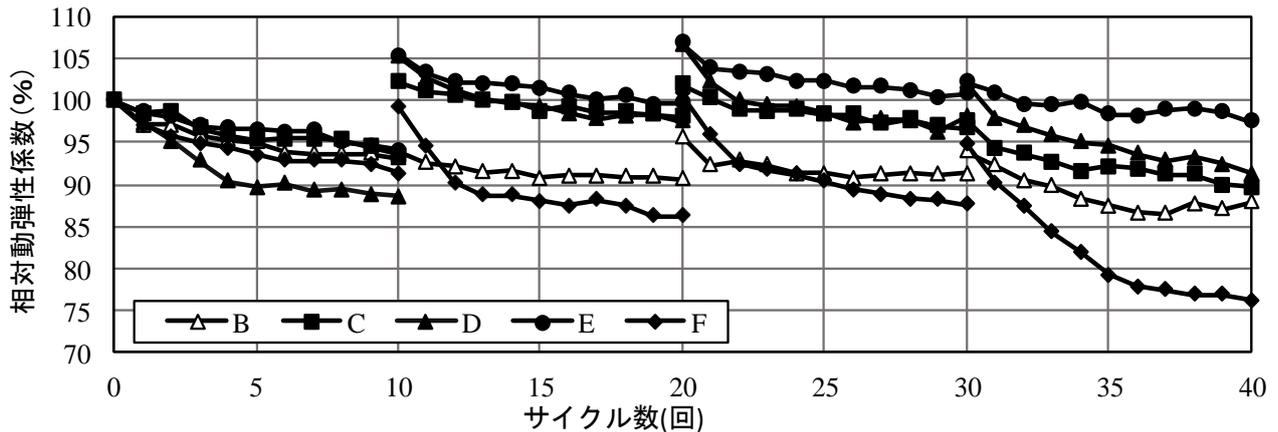


図-9 乾湿繰返しと急速凍結融解を交互に実施した急速凍結融解における相対動弾性係数の劣化曲線  
(乾湿繰返しを受けていないとき0サイクルの動弾性係数を100%としたときの相対動弾性係数)

とした。試験を行った全配合が10サイクルで60%以上の相対動弾性係数を有した。また、10、20、30サイクル時において相対動弾性係数が0サイクル時と比較して増加傾向が見られることから、乾湿繰返し試験時の湿潤状態において未反応なセメントの水和反応によりセメント硬化体の強度増進や凍結融解によって発生した微細なひび割れの修復が行われた可能性がある。しかし、乾湿繰返し作用を受けることにより徐々に劣化の進行が見られた。すなわち、乾湿繰返しと凍結融解による複合劣化を再現する可能性を示すことができたと思われる。なお、即脱コンクリートと普通コンクリートによって複合劣化の程度が異なる可能性があるが、考察するには実験データが少ないと判断した。今後の検討課題の1つとしたい。

#### 4. まとめ

通常の有スランプコンクリートよりも単位水量が少ないゼロスランプコンクリートで製造する即脱コンクリートの耐久性を評価するために、水分浸透速度係数と凍結融解と乾湿繰返しの複合劣化に着目した。使用材料や配合が異なる5種類の即脱コンクリートを実験に供した。本研究で得られた知見を以下に記す。

- (1) 即脱コンクリートの水分浸透速度係数は、 $1.5 \sim 1.8 \text{mm}/\sqrt{\text{hr}}$ であり、即時脱型コンクリートは普通コンクリートよりも水分浸透速度係数が小さかった。
- (2) 即脱コンクリートの水分浸透速度係数と圧縮強度、細骨材率、単位水量、単位セメント量の相関性は認められなかった。
- (3) 液化窒素を用いた急速凍結融解試験と乾湿繰返し試験を交互に行う試験では、乾湿繰返し試験時の湿潤状態における未反応なセメントの水和反応によりセメント硬化体の強度増進や凍結融解によって発生した微細なひび割れの修復が行われた可能性がある。また、乾湿繰返し作用を受けて、凍結融解抵抗性は徐々に低下した。よって、凍結融解と乾湿

繰返しの複合劣化を実験室規模で再現できる可能性を見出した。

**謝辞** 本研究を遂行するにあたり、全国バイコン協会各社からコンクリート供試体を提供して頂きました。ここに付記し謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 河野清, 林岑夫, 竹村和夫: 即時脱型用コンクリートの配合と強度, セメント・コンクリート, No.282, pp.31-38, 1970
- 2) 土木学会: 2017年制定コンクリート標準示方書[設計編: 標準]9編プレキャストコンクリート 9.3 かぶり 表9.3.1 最小かぶり, pp.465, 2018.3
- 3) 楸洋平: W/Cを変化させた即時脱型コンクリートの凍結融解抵抗性, 透気性, 水分浸透性に関する検討, 2018年度徳島大学工学部建設工学科卒業論文
- 4) 湯浅昇: 自然環境下のコンクリート劣化 - JCI 研究委員会 TC-164 の活動から凍害を主題に -, 建設工業調査会土木編, No.180, pp.34-39, 2019
- 5) 土木学会: 2018年制定コンクリート標準示方書改定資料 - 維持管理編・規準編 -, コンクリートライブラリー153, pp.182-187, 2018.10
- 6) 橋本紳一郎, 橋本親典, 渡邊健, 上田隆雄: 液体窒素を用いたコンクリートの簡易的凍結融解試験の提案, コンクリート工学年次論文集, Vol.27, No.1, pp.757-762, 2005
- 7) 弓場上有沙, 橋本親典, 渡邊健, 石丸啓輔: 再生骨材コンクリートによる JIS の凍結融解試験方法(A法)と液化窒素を用いた簡易急速凍結融解試験方法の比較, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, 941-946, 2011
- 8) 土木学会: 2017年制定コンクリート標準示方書[設計編], pp.152-153, 2018.