

## 論文

[1176] 最低温度が凍結融解作用下のコンクリートの劣化に及ぼす影響  
について

正会員○野本高憲(東京電力技術研究所)

正会員 江川顕一郎(東京電力工務部)

正会員 野口博章(東電設計水力部)

正会員 山下英俊(間組技術研究所)

## 1. まえがき

凍結融解作用下のコンクリートの劣化メカニズムについては、1945年のPowersの水圧説[1]の発表以来多くの研究がなされている。鎌田は凍結温度の細孔径依存性が重要であることを指摘している[2]。凍結温度の細孔径依存性とは、コンクリートの細孔中の水は粗大径のものほど凍結温度が高いことから、温度低下時には粗大径の細孔中の水が凍結した状態で微小径の細孔中の水が凍結することを意味し、細孔水の氷点降下として知られている。さらに吉川らは、凍結温度の細孔径依存性に基づき、コンクリート中の凍結水量をある仮定に沿って算定すれば、この凍結水量からコンクリートの劣化度を推定することが可能であるとしている[3]。

凍結融解作用下のコンクリートの劣化に影響を及ぼす要因を外的要因と内的要因に分ける場合、外的要因は外からコンクリートに作用する劣化外力に相当する要因であり、内的要因は外力を受けてコンクリート内部に発生する劣化内力および外力に対する内部抵抗力に相当する要因である。外的要因には最低温度、冷却速度および凍結持続時間などがあるが、この中で凍害に最も強く影響するのは最低温度であることを、田畑らは実験結果から示している[4]。一方、内的要因には細孔径分布および気泡組織などがある。

筆者らは、主にダムコンクリートを対象として凍結融解作用下にあるコンクリートの寿命予測手法を確立することを目的として検討を進めている。今回は最も重要な外的要因である最低温度を変えた室内凍結融解試験を行った。その際内的要因に関する留意点としては、気泡組織の影響が無視できるようにA E剤無混入のコンクリートで実験を行うこととし、また水セメント比の変化により細孔径分布を変えた。

## 2. 実験概要

実験条件とフレッシュコンクリートおよび硬化コンクリートの品質をまとめたものを表-1に示す。コンクリートはA E剤使用の有無により大きく2つに大別され、今回の検討目的である最低温度の影響把握についてはnon A Eコンクリートを対象とした。

## 2. 1 使用材料

セメントは中庸熟ポルトランドセメントを、骨材には長野県梓川産の天然骨材および碎石を混合したものをを用いた。粗骨材は最大寸法150mm、粗粒率8.30、比重2.66のものを150~80,80~40,40~20,20~5mmに分級し用いた。細骨材は粗粒率2.78、比重2.60のものをを用いた。

## 2. 2 コンクリート配合

水セメント比は50,80,110%の3水準とした。フレッシュコンクリートの品質管理値はスランブ $3 \pm 1$  cmに設定した。またA Eコンクリートの空気量はフルミックス換算値で $3 \pm 1$  %に

なるように管理した。

表-1 実験概要

コンクリートの配合									フレッシュコンクリートの品質			硬化コンクリートの品質		凍結融解試験条件		
種類	粗骨材 最大寸法 Gmax (mm)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単 位 量 ( k g / m <sup>3</sup> )					スランプ (cm)	フルミックス 換算 空気量 (%)	練り 上がり 温度 (℃)	91日 圧縮強度 (kg/cm <sup>2</sup> )	気泡間隔 係数 (μ)	最低温度条件 (℃)		
				水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	A E 剤 (*C%)						-18	-10	-5
non A E	150	50	23	104	208	491	1676	0	3.7	0.6	17.5	455	1310	○	○	○
		80	25	106	133	548	1676	0	2.4	0.8	16.5	237	850	○	○	○
		110	26	107	97	576	1672	0	2.4	1.1	18.5	114	920	○	○	○
A E	150	50	22	96	192	466	1684	0.03	3.8	2.2	18.5	477	300	○		
		80	24	100	125	519	1684	0.045	2.8	2.9	17.5	227	390	○		
		110	25	105	95	543	1660	0.04	3.0	3.2	18.0	108	680	○		

### 2. 3 試験方法

コンクリートの練り混ぜには100リットルの可傾式ミキサーを用いた。練り混ぜ終了後、フルミックス状態で十分に切りかえしを行った後、40mmふるいと25mmふるいでウェットスクリーニングを行った。40mmでふるったものはフレッシュコンクリート試験と圧縮強度試験用供試体(φ15×30cm)の作製に供し、25mmでふるったものは内部組織試験用供試体(φ15×30cm)と凍結融解試験用供試体(10×10×40cm)の作製に供した。内部組織試験は、気泡間隔係数と細孔径分布の測定を行った。総ての供試体は打設後3日で脱型し、材令91日まで標準養生を行った後で試験を行った。

凍結融解試験の方法は水中凍結水中融解法である。温度条件は最高温度と最低温度の組合せを、1)+5℃~-18℃、2)+5℃~-10℃、3)+5℃~-5℃の3ケースに設定した。A Eコンクリートの場合には1)のみの温度条件で試験を行った。なお各最低温度条件下での温度変化速度に大きな差が生じないように努め、ほぼ9℃/時間に保った。

凍結融解試験用供試体の本数は各ケースごとに6本とした。そのうち3本には長さ変化測定用のチップをつけ、試験開始後nonA Eコンクリートでは5~10サイクル、A Eコンクリートでは30サイクルを標準間隔として、供試体長さ、供試体重量および一次共鳴振動数を測定した。残りの3本には供試体内部に内部ひずみ計を埋め込み、ひずみ変化を連続測定した。

### 3. 実験結果および考察

#### 3. 1 最低温度が相対動弾性係数に及ぼす影響について

図-1に凍結融解サイクルに伴う相対動弾性係数の変化を配合別に示す。また図中にはA Eコンクリートの結果(図中▲印)も併記する。今回の実験は、第1パラメータとして最低温度を変化させ、第2パラメータとして水セメント比を変化させている。図-1から2つのパラメータが相対動弾性係数に及ぼす影響を見ると次のことがわかる。最低温度を高くしたもののほど凍結融解サイクルの増加に伴う相対動弾性係数低下の程度が小さくなり、劣化が緩和されている。またその緩和程度は水セメント比によって異なり、水セメント比の小さいものほど顕著に緩和され

ている。

ここで劣化の進行を定量的に表すために、(1)式に示すように凍結融解サイクルの常用対数と相対動弾性係数の間で1次回帰を行った。回帰結果を表-2に示す。

$$P_c = A \cdot \log_{10} N + B \quad (1)$$

ここに  $P_c$ : 相対動弾性係数 (%)

$N$ : 凍結融解サイクル (cycle)

$A, B$ : 係数

$|A|$ : 相対動弾性係数低下勾配

ただし  $N = 1$  で  $P_c = 100\%$  とする。

相対動弾性係数の低下勾配を式(1)の係数Aの絶対値とすると、最低温度および水セメント比と $|A|$ の関係は、先に述べた図-1で示されている内容と一致している。このことから相関係数の低い回帰結果もあるが、今回は $|A|$ を劣化の進行を表す指標として採用した。

コンクリート中の細孔水の凍結水量に着目すると、最低温度および水セメント比が相対動弾性係数に及ぼす影響は以下のように説明することができる。

水セメント比一定のときの最低温度の影響については、最低温度が高いほどコンクリート中の凍結水量が少なくなるために劣化の程度が小さくなると説明できる。

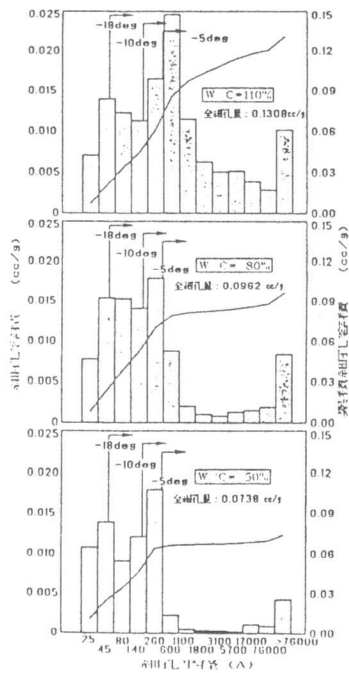


図-2 non AEコンクリートの細孔径分布

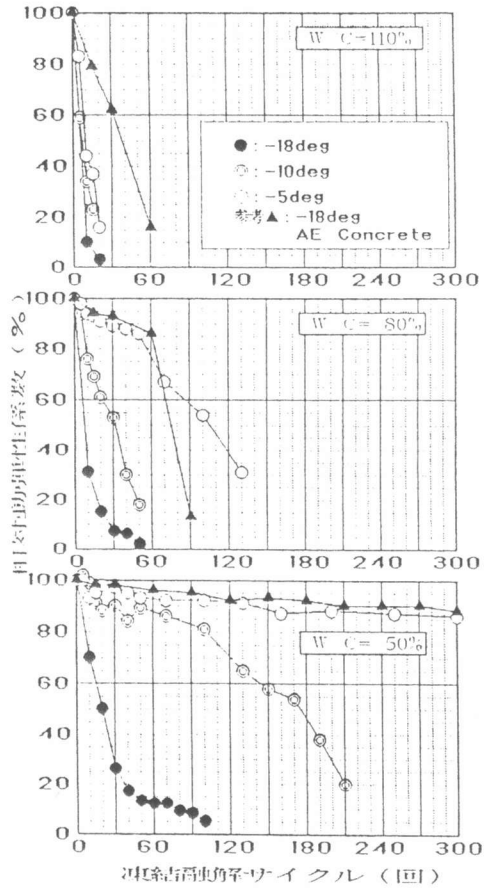


図-1 凍結融解サイクルと相対動弾性係数の関係

表-2 相対動弾性係数の変化に対する回帰結果

AE剤の有無	最低温度 (°C)	水セメント比 (%)	係数A	係数B	相関係数
nonAE	-18	50	-51.7	107.0	0.97
		80	-58.9	96.3	0.99
		110	-78.7	97.8	0.99
	-10	50	-28.6	121.9	0.78
		80	-47.0	115.1	0.91
		110	-65.7	101.3	1.00
	-5	50	-5.9	102.4	0.90
		80	-26.4	116.8	0.77
		110	-62.9	108.4	0.94
AE	-18	50	-50.6	98.6	0.98
		80	-53.8	90.2	0.93
		110	-73.4	98.7	1.00

最低温度一定のときの水セメント比の影響については次のように説明できる。図-2に、non A Eコンクリートの細孔径分布の実測結果を示すが、同図からわかるように水セメント比が小さいコンクリートほど内部組織は細孔量が少なくかつ平均細孔径が小さくなっている。このことと小さい細孔径中の水ほど低い温度で凍結するという定説から、水セメント比の小さいコンクリートほど凍結温度の低い微小な細孔の割合が多くなり、凍結水量が少なくなるので劣化の程度が小さくなると説明できる。

### 3. 2 凍結水量と相対動弾性係数の関係について

ここでは凍結水量を定量的に求め3.1の内容を検証する。コンクリート中の細孔はすべて水で満たされていると仮定し、図-3に模式的に示す方法でコンクリート中の凍結細孔量を求める。図の上段は水セメント比による細孔径分布の相違を示すものであり、下段は細孔径と凍結温度の関係を表している特性曲線である。

例えば最低温度が $T_F$ のとき、凍結する細孔半径は特性曲線から $r_F$ と求められる。このときコンクリートの全細孔中で凍結する部分は図中の斜線部の領域 $V_F$ になる[3]。

いま、特性曲線式として融点降下を表す『樋口の式』[5]を用いた場合、最低温度 $T_F$ を $-18, -10, -5^{\circ}\text{C}$ としたときの凍結細孔半径はそれぞれ $68, 124$ および $250 \mu\text{m}$ になる。これと図-2の結果から、細孔中の凍結量 $V_F$ ならびに全細孔量 $V_0$ に対する凍結細孔量の比を表す凍結細孔量比( $V_F/V_0$ )を求めた結果は表-3に示すとおりである。

表-3によれば、凍結細孔量比は最低温度が高くなるほど減少しており、その減少量は水セメント比が小さい場合ほど大きくなっている。この傾向は3.1で述べた相対動弾性係数低下の傾向と一致している。

表-3 凍結細孔量と凍結細孔量比の算定結果

水セメント比 W/C (%)	A E 剤の有無	全細孔量 $V_0$ (cc/g)	凍結細孔量 $V_F$ (cc/g)			凍結細孔量比 $V_F/V_0$ (%)		
			最低温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )			最低温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )		
			-5	-10	-18	-5	-10	-18
50	non A E	0.0738	0.0108	0.0319	0.0423	15	43	57
80	non A E	0.0962	0.0268	0.0476	0.0620	28	49	64
110	non A E	0.1308	0.0710	0.0888	0.1007	54	68	77
50	A E	0.0795	-	-	0.0423	-	-	55
80	A E	0.1090	-	-	0.0830	-	-	76
110	A E	0.1245	-	-	0.1002	-	-	80

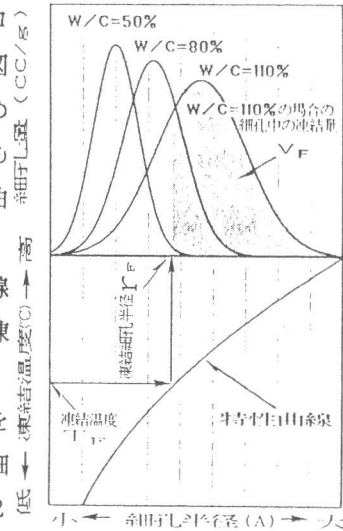


図-3 凍結細孔量の求め方

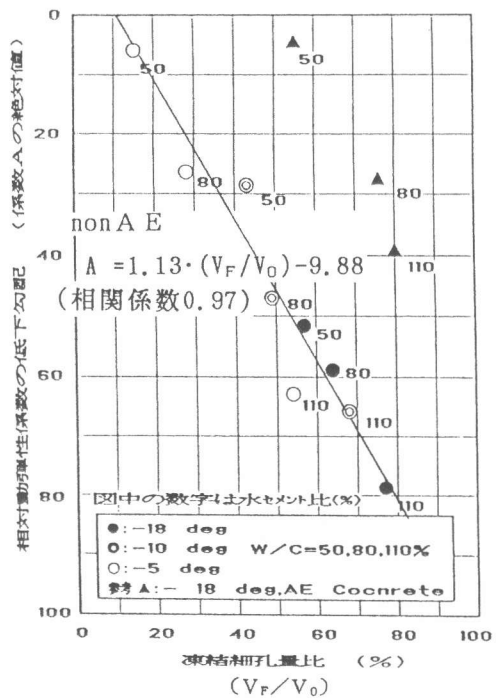


図-4 凍結細孔量比と相対動弾性係数低下勾配の関係

図-4に、凍結細孔量比と相対動弾性係数低下勾配の関係を示す。図から、nonAEコンクリートの場合第1パラメータの最低温度および第2パラメータの水セメント比の相違にかかわらず、凍結細孔量比と相対動弾性係数低下勾配の間に強い相関があることがわかる。本実験範囲に限ればnonAEコンクリートの場合、(2)式に示すように凍結細孔量比から相対動弾性係数の低下を推定することが可能であると考えられる。

$$\Delta Pc = 1.13 \cdot (V_F / V_0) - 9.88 \quad (2)$$

$\Delta Pc$ : 凍結融解サイクルNをN=10<sup>m</sup>とすると

mが1増えるときの相対動弾性係数低下量(%)

$V_F / V_0$ : 凍結細孔量比(%)

### 3.3 最低温度がコンクリートのひずみ変化に及ぼす影響について

凍結融解作用を受けたコンクリートは水圧の発生により内部組織がゆるみ、次第に劣化が進行していく。ひずみはこの組織の緩み量を表していることから、コンクリートの劣化を直接的に表す重要な指標である。図-5に、今回の試験から得られた同一測定サイクルにおける残留ひずみと相対動弾性係数の関係を示す。ここでの残留ひずみは、所定の凍結融解サイクル終了時にチップを用いて計測した供試体長さの膨張量を元の供試体長さで除して求めた値である。なお横軸の残留ひずみは対数スケールで整理している。図から、残留ひずみが $100 \times 10^{-6}$ を超えるあたりから相対動弾性係数が小さくなり、それ以降は残留ひずみの対数と相対動弾性係数の間に相関関係があることがわかる。

チップを用いてひずみを測定する場合劣化が急激に進む配合ではデータ数が少なくなることと、これまで凍結融解作用下のコンクリートのひずみを連続測定したのは表面ひずみに関するものが多いことから、内部ひずみ計を用いてひずみを連続

測定した。図-6の上段に各配合ごとに整理した1~5サイクルまでの時間と内部ひずみの関係を示す。また同図下段に、各配合ごとに整理した1~5サイクルまでのコンクリート温度と内部ひずみの関係を示す。凍結融解サイクルの増加に伴う残留ひずみの増加勾配に着目して図を見ると次のことがわかる。最低温度を高くしたもののほど勾配が小さくなっており、またその勾配が小さくなる程度は水セメント比によって異なり、水セメント比の小さいものほど顕著に勾配が小さくなっている。ここで、最低温度と水セメント比の影響という観点から見ると、残留ひずみの増加勾配と3.1で述べた相対動弾性係数の低下勾配が同じであることがわかる。

以上のことから、既往の研究成果[6]にもあるように残留ひずみと相対動弾性係数の間に相関があることは明らかである。既に3.2で述べたように凍結融解サイクル数を対数で表した場

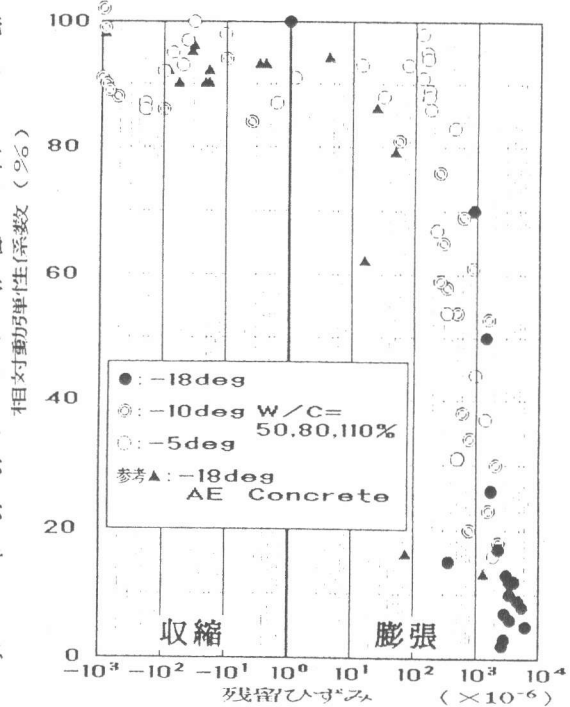


図-5 残留ひずみと相対動弾性係数の関係

合の相対動弾性係数の低下勾配は凍結細孔量比との間に強い相関があることから、残留ひずみの増加傾向についても凍結細孔量比から推定することが可能であると考えられる。今回得られたひずみデータに対する定量的な考察は今後の検討課題である。

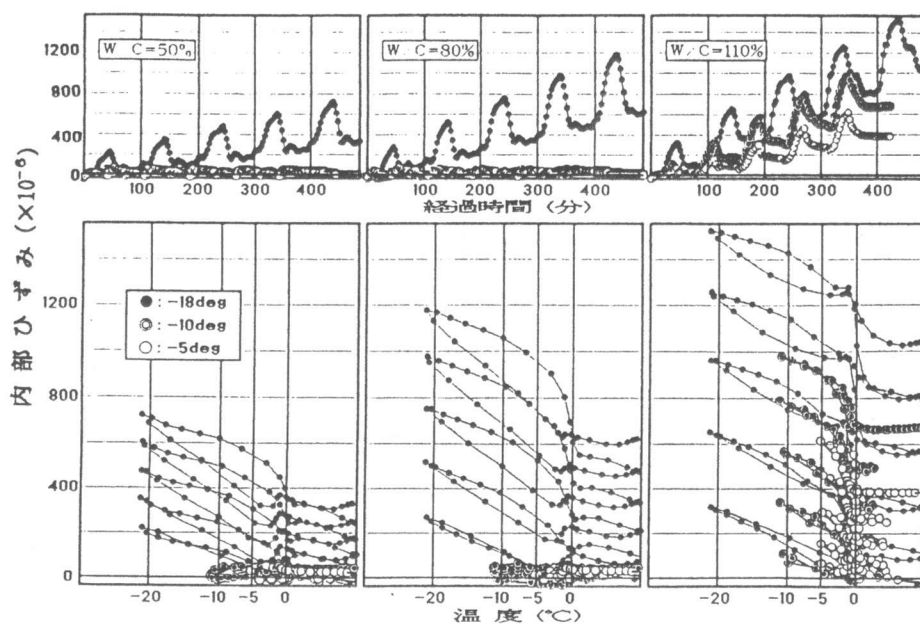


図-6 1～5サイクルでのコンクリートの内部ひずみの挙動

#### 4. あとがき

本研究のように、最低温度を変えた促進試験の結果に対し、凍結水量を算定し劣化度の推定を試みたものは過去に報告されていない。今回の検討結果から最低温度および水セメント比が異なっても凍結水量が求まればコンクリートの劣化度を推定できることがわかった。この成果は、まえがきで述べた従来からの知見のうち、最低温度が凍害に最も強く影響する外的要因であることと、凍結水量に基づきコンクリートの劣化度を推定することが可能であることを結びつけるものであり、基礎理論の再確認であると考えられる。また同時に、寿命予測に関する一つの提案式として、3.2の(2)式に示したように、本実験の範囲内でのnon A Eコンクリートの相対動弾性係数低下勾配の推定式を求めることができた。

#### [参考文献]

- [1] Powers, T.C. and Helmuth, R.A.: Theory of Volume Changes in Hardened Cement Paste During Freezing, Proceedings: Highway Research Board, Vol. 32 pp285-297 1953
- [2] 鎌田英治: コンクリートの凍害と細孔構造, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 10, No. 1, PP51-60, 1988
- [3] 山下英俊・村上祐治・吉川弘道・田中典明: 凍害を受けるコンクリートの凍害水量の算定方法と耐凍害指標値の提案, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 13, No. 1, PP729-734, 1991
- [4] 田畑雅幸・洪悦郎・鎌田英治: コンクリートの耐凍害性におよぼす環境要因の影響—養生と凍結融解の条件—, セメント技術年報, Vol. 37, PP349-352, 1983
- [5] 鎌田英治・洪悦郎: 人工軽量骨材コンクリートの凍害機構に関する考察, セメント技術年報, Vol. 25, PP285-290, 1971
- [6] 洪悦郎・鎌田英治: コンクリートの凍害と初期凍害, コンクリート工学, Vol. 16, No. 5, PP1-18, 1978.5