

論文

[1177] 凍結融解を受けるコンクリートの劣化予測に関する研究

正会員○山下英俊 (間組技術研究所)
 正会員 村上祐治 (間組技術研究所)
 正会員 鈴木 篤 (間組技術研究所)
 正会員 吉川弘道 (武蔵工業大学土木工学科)

1. まえがき

凍結融解を受けるコンクリートの劣化は、最低温度、凍結速度、飽水度、凍結融解回数などの構造物の受ける環境(外的要因)ならびに、圧縮強度、空気量、細孔径分布、気泡間隔係数などのコンクリートの材料特性(内的要因)に大きく影響される。それらの要因を総合的かつ定量的に表すために、著者らは、既報にてコンクリートの凍害劣化の主要因である細孔中の凍結水量を算出し、圧縮強度、気泡間隔係数、全細孔量を組み合わせることにより、耐凍害指標値を提案した。[1]

今回の研究では、耐凍害指標値の再検討ならびに耐凍害指標値と凍結融解回数と相対動弾性係数の関係を示す劣化特性曲面を同定し、総合的にコンクリートの凍害劣化を表現することを試みた。また、コンクリートの凍害による劣化を疲労問題として捉え、一例として、相対動弾性係数60%に至るまでのコンクリートの劣化予測を行い、環境条件および材料特性別のコンクリートの耐凍害性について検討した。

2. 耐凍害指標値の再検討

凍結融解作用を受けるコンクリートの劣化に及ぼす影響要因は、外的要因と内的要因に分けることができる。外的要因とは、コンクリートの外部から作用する環境要因であり、内的要因とは、外力に対抗する抵抗要因である。そこで、後者の耐凍害性に対する相関を判断すると、正の要因としてはコンクリートの圧縮強度 f_c 、全細孔量 V_o が挙げられ、負の要因として気泡間隔係数 \bar{L} 、凍結水量 V_f が考えられる。これらの凍害に関する要因を組み合わせることにより、著者ら[1]は既報にて、コンクリートの耐凍害性指標値 β を式(1)のように提案した。

$$\beta = \left(\frac{f_c}{300} \right)^a \times \left(\frac{\bar{L}}{0.5} \right)^b \times \left(\frac{V_f}{V_o} \right)^c \quad \begin{array}{l} f_c : \text{kgf/cm}^2 \\ \bar{L} : \text{mm} \\ V_f, V_o : \text{cc/g} \end{array} \quad (1)$$

すなわち、 f_c 、 \bar{L} 、 V_o 、 V_f の4要因により、総合的に耐凍害性を評価しようとするものである。第1項は、一般的なコンクリートの圧縮強度 300kgf/cm^2 を基準値とし、この値で除すことにより無次元化している。また、Powersら[2]により示された凍結時におけるセメント硬化体の長さ変化と気泡間隔係数との関係図で、気泡間隔係数が 0.5mm を境に収縮から膨張に転じていることから、第2項ではこの値で除した。第3項は凍結水量 V_f を全細孔量 V_o で除すことにより、凍結水量に対する全細孔量の割合(凍結水量比)として表した。そして各項の影響度を a 、 b 、 c で表し、それぞれの凍害発生要因の重みとした。(ここで a は正の要因であるからプラスに、 b 、 c は負の要因であるからマイナスになる。)

表-1 実験結果一覧

配合 no	圧縮強度 fc (kgf/cm ²)	気泡間隔 係数 \bar{L} (mm)	全細孔量 V0 (cc/g)	凍結水量 Vf (cc/g)	最低温度 T (°C)	耐凍害 指標値β	相対動弾性 係数 150サイクル
1	403	0.235	0.1290	0.084	-18	2.082	92
2	438	1.510	0.1033	0.060		0.393	10
3	293	0.234	0.1460	0.077		2.125	96
4	410	0.215	0.1374	0.063		2.343	100
5	400	0.996	0.1087	0.060		0.575	45
6	381	0.992	0.1135	0.051		0.589	42
7	451	1.214	0.1097	0.055		0.487	29
8	301	0.611	0.1339	0.072		0.892	7
9	326	0.567	0.1483	0.070		0.969	84
10	365	0.502	0.1407	0.075		1.069	49
11	410	0.530	0.1466	0.060		1.050	96
12	740	0.582	0.0463	0.022		0.959	93
13	629	0.890	0.0763	0.013		0.728	28
14	540	0.918	0.0662	0.023		0.655	22
15	693	1.100	0.0553	0.039		0.518	0
16	471	1.334	0.0674	0.032		0.450	24
17	450	0.182	0.1154	0.066		2.670	98
18	310	0.269	0.1292	0.074		1.859	88
19	395	1.503	0.0911	0.066		0.385	0
20	294	0.223	0.1063	0.066		2.181	96
21	356	1.085	0.1081	0.075		0.518	16
22	223	0.324	0.1031	0.079		1.513	83
23	450	0.182	0.1154	0.086		2.595	96
24	310	0.269	0.1292	0.098	1.804	80	
25	395	1.503	0.0911	0.085	0.375	0	

次に、促進凍結融解試験結果に耐凍害指標値βを適用し、両者の相関性について検討する。表-1は、25種配合について、βに含まれる4要因および150サイクルの凍結融解試験結果を示したものである。相対動弾性係数(E_{d'}/E_d)とlogβとの関係は、常用対数を取ることによって直線関係にあると仮定し、150サイクルにおける実験値を代表値として重回帰分析により各a、b、cを同定した。表-2に示すように耐凍害指標値βの3要因の中で、最も重みのあるのは気泡間隔係数であることが分かる。以上の結果で得られた各要因の重みを表すa、b、cによりβ値を算出し、

表-2 重回帰分析の結果

説明変数	標準回帰係数	重相関係数	寄与率
log(fc/300)	a : 0.019	0.889	0.790
log($\bar{L}/0.5$)	b : -0.903		
log(Vf/V0)	c : -0.107		

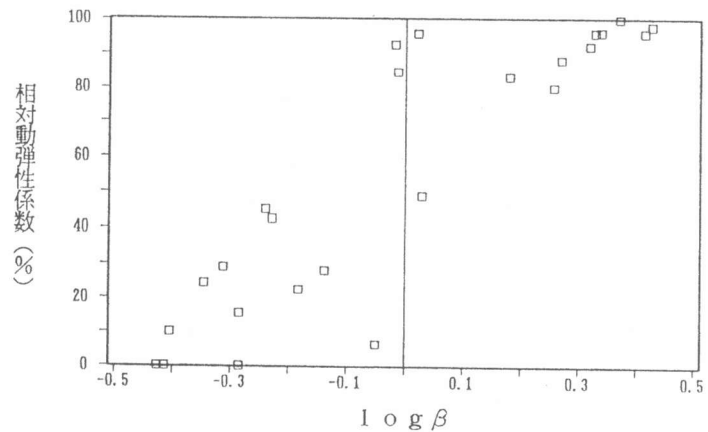


図-1 耐凍害指標値βと相対動弾性係数の関係 (150サイクルにおける)

表-1に加えた。このように、式(1)から求まる β 値は対象とするコンクリート材料の物理的、力学的な性質と周囲の環境条件の関数として表され、図-4(b)に示すように降下温度が大きくなるに従い β 値は小さくなり、最低温度にも依存して決定されていることが分かる。そして、表-1、図-1に示すように耐凍害抵抗性の高いコンクリートほど耐凍害指標値 β が大きくなるのが特徴である。

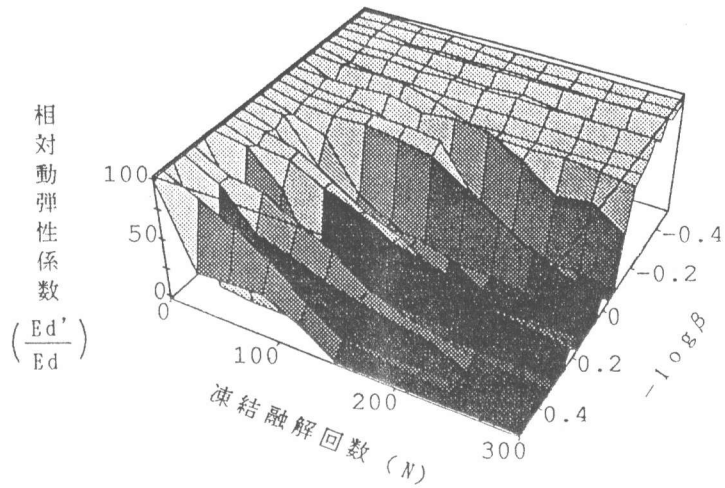


図-2 耐凍害指標値と凍結融解回数と相対動弾性係数の関係 (実験値)

3. 劣化特性曲面の同定

次に、150サイクルにおいて同定した a, b, c を用い、他のすべての測定サイクルにおける β 値を計算し、耐凍害指標値と凍結融解回数と相対動弾性係数の関係を求めたのが図-2である。図におけるX軸は $-\log \beta$ を示し、Y軸は凍結融解回数(N)を、Z軸は累積劣化変化量として動弾性係数の低減率 ED'/ED (相対動弾性係数)を用いた。そして、これが凍結融解回数 N ならびに耐凍害指標値の関数として、式(2)のような劣化特性曲面 $Z = ED'/ED$ を仮定する。

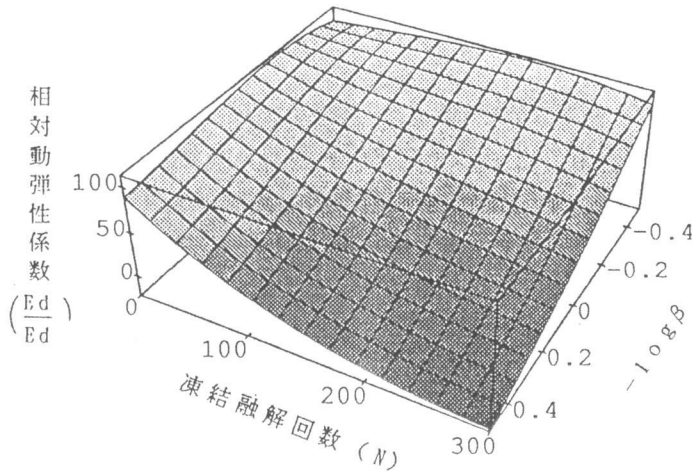


図-3 耐凍害指標値と凍結融解回数と相対動弾性係数の関係 (計算値)

$$z = a x^3 + b x^2 y + c x y^2 + d y^3 + e x^2 + f x y + g y^2 + h x + i y + j \quad (2)$$

- $z = ED'/ED$: 相対動弾性係数
- $y = N$: 凍結融解回数
- $x = -\log \beta$: 耐凍害指標値
- $a, b, c \dots j$: 定数

表-3 定数の数値

定数	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j
数値	135.423	0.906	0.002	0	-128.118	-0.953	0.0002	-26.564	-0.410	109.503

$$\frac{\partial z}{\partial y} \leq 0 \text{ : for all } x, \quad \frac{\partial z}{\partial x} \leq 0 \text{ : for all } y \quad (3)$$

次に、促進凍結融解試験結果より係数を同定すると、表-3のような結果が得られ、図-3のような曲面を形成する。この曲面は、式(3)のように、単調変化を示すものであり、これはX、Yの物理的な意味合いとも合致する。すなわち、相対動弾性係数は凍結融解回数Nとともに劣化が促進され、また耐凍害指標値βが大きいほど耐凍害性に優れることを示すものである。

4. 耐久性設計への応用

以上の方法で求めた関係図を用いて耐久性設計への応用を試みた。一般に耐凍害性に用いる劣化指標として3章で述べた相対動弾性係数が挙げられ、洪、長谷川[3]らは相対動弾性係数60%を0とする耐久性指数を提案している。そこで今回は一例として相対動弾性係数が60%の凍結融解回数と $-\log\beta$ の関係を劣化特性曲線として式(2)より計算して求め、図-4(a)に示す。図から、凍結融解回数Nと $-\log\beta$ の関係は、右下がりの曲線を描き、凍害に対する寿命は $-\log\beta$ 値が小さいコンクリートほど長いことを示している。また、前述のように、耐凍害指標値は材料特性と外的要因(特に最低温度)に依存して求まる数値なので、図-4(b)に示すように配合が同じコンクリートでも、最低温度の違いにより凍結水量が異なり、β値は変化する。つまり、コンクリートの材料特性がわかり、その置かれる環境が明らかになれば、 $-\log\beta$ 値は計算でき、なおかつ寿命予測が可能であることがわかった。なお、図中の配合Noは表-1に示すものと一致する。

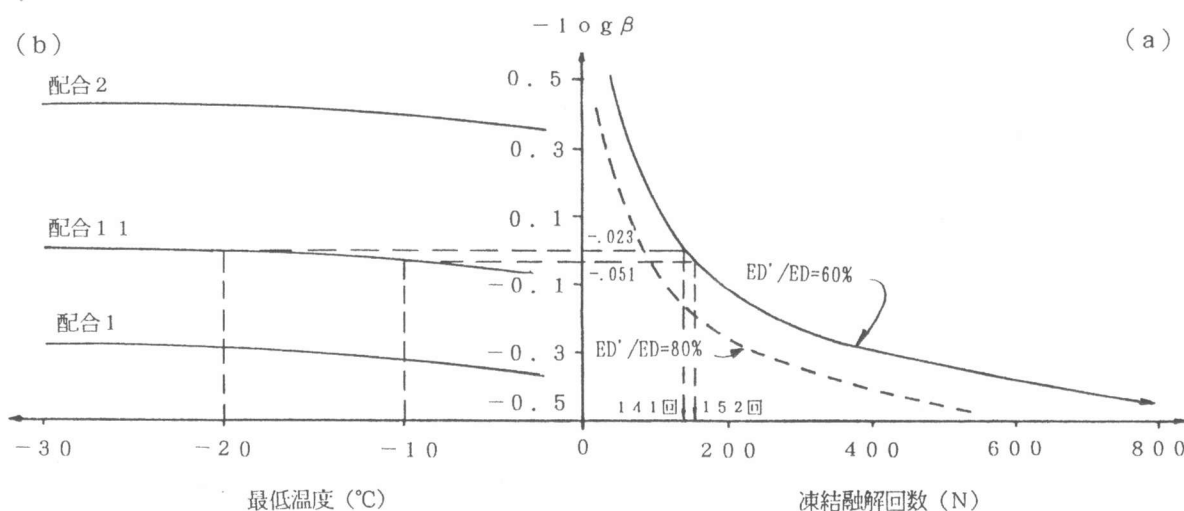


図-4 最低温度と凍結融解回数と耐凍害指標値の関係

表-4 適用構造物別の必要最低相対動弾性係数 (案)

Grade	分類	適用構造物		相対動弾性係数 (%)
		種類	名称	
I	美観	高品質構造物	住宅 (重要構造物)	≥ 0.9
II	使用性	高機能構造物 特殊構造物 (寒冷地、etc)	ダム、水路、橋台 擁壁、トンネル	≥ 0.8
III	耐久性	一般構造物	防波堤	≥ 0.6

次に、凍害による劣化を考えると、コンクリートは凍結融解作用を受けることにより、基本的には、温度降下時に低温のある段階から膨張し上昇時に収縮する。そしてその繰り返しによって、次第に内部組織がゆるみ劣化していく。つまり、力学的疲労問題として捉えることができ、ここでは累積損傷理論（マイナー則）より劣化予測を行うこととする。

ある耐凍害指標値 $-\log \beta_i$ ($i=1, 2, 3, \dots, m$) に対する疲労寿命を N_i ($i=1, 2, 3, \dots, m$) とすると、実際に作用する凍結融解回数が n_i ($i=1, 2, 3, \dots, m$) であったとすれば、 $-\log \beta_i$ における疲労損傷は n_i/N_i で表される。そして、すべての $-\log \beta_i$ による累積疲労損傷が1になったとき、疲労破壊が生じるとする。つまり累積損傷度 D_m は式(4)で表せる。

$$D_m = \sum_{i=1}^m D_i = \sum_{i=1}^m (n_i/N_i) \quad (4)$$

D_m : 累積損傷度

D_i : i 番目の損傷度

n_i : $-\log \beta_i$ における凍結融解回数

N_i : 劣化特性曲線より求まる i 番目の平均寿命

以上の手順から、一例として相対動弾性係数が60%に低下するまでの配合11の損傷度を計算する。配合11の $-\log \beta$ は -10°C で -0.051 、 -20°C で -0.023 であり、そのときの寿命は、式(2)よりそれぞれ152回、141回である。例えば、この配合11のコンクリートが -10°C まで25回、 -20°C まで50回の凍結融解作用を受けたとすると、その損傷度は式(5)で表すことができる。

$$D = \frac{n_{-10}}{N_{-10}} + \frac{n_{-20}}{N_{-20}} = \frac{25}{152} + \frac{50}{141} = 0.52 \quad (5)$$

このように、コンクリート構造物の立地場所の最低温度と凍結融解回数を過去の気象データから明らかにすれば、配合別の損傷度を計算することができる。

さらに、劣化予測の基準となる相対動弾性係数は図-3から任意に与えることができるので、筆者らは、耐久性設計にこの手法を取り入れるにあたり、表-4に示すような1つの基準を作成した。つまり、適用構造物別にその必要性を考え、促進凍結融解試験の供試体の劣化状況から判断すると、たとえば、美観を重視する住宅などの高品質構造物は、スケーリング等を起こし美観上好ましくなくなる相対動弾性係数90%を基準とし、設計上それ以上に設定することが望ましい。また、ダム、擁壁などの高機能構造物は、使用上において問題のない相対動弾性係数80%以上を保てばよく、防波堤などの一般構造物は、スケーリングや一部の剥離が起こっても構造上問題がなく、コンクリート破片の落下による危険性もないと判断されれば、相対動弾性係数は60%以上でよいという考え方ができる。

以上のように、適用構造物別にその必要性を検討し、その構造物に適した相対動弾性係数を選択すれば、立地予定場所の環境条件（外気温など）を過去のデータから明らかにすることによって、そのコンクリートの寿命を予測することができる。言い換えれば、健全に保ちたい年数が明らかにされれば、それに必要なコンクリートの特性値を与えることができる。

5. あとがき

コンクリートの凍害劣化は、細孔水の凍結による膨張と、融解による収縮の繰り返しによるコンクリート組織の緩みが原因とされる。そこで、その直接的要因である細孔水の凍結水量とコンクリートの材料特性である圧縮強度と気泡間隔係数、全細孔量を組み合わせることにより、耐凍害指標値を与え、コンクリートの耐凍害性を客観的、定量的に評価した。また、この指標値と凍結融解回数、相対動弾性係数の関係を劣化特性曲面として表し、総合的に凍害劣化を表現した。さらに、その関係図から求まる凍結融解回数と耐凍害指標値の関係より、適用構造物別にコンクリートの劣化予測を試みた。以上のように、今回の研究により各要因を合理的に組み合わせることにより、総合的かつ定量的にコンクリートの耐凍害性を評価できたと思う。

しかし、凍害の発生要因には今回の劣化特性曲線に用いた以外にも、凍結速度、飽水度、骨材の品質等多岐多彩にわたっており、これら全てを用いて評価することは現実的には非常にむずかしいと思われる。そこで、今後も系統的な実験を行い、その結果と対応させることにより、より信頼性が高く簡便で実用的な指標となるように研究を進めて行きたいと思う。

【参考文献】

- 1) 山下英俊ほか:凍害を受けるコンクリートの凍結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、1991.6
- 2) Powers, T. C. and Helmuth, R. A.: Theory of Volume Changes in Hardened Cement Paste During Freezing, Proceedings, Highway Research Board, v. 32, pp285-297, 1953
- 3) J I S 原案:コンクリートの凍結融解方法(案)