

論文

[1126] 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

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 吉川弘道 (武蔵工業大学土木工学科)
 正会員 田中典明 (東京電力技術研究所)

1. まえがき

凍結融解を受けるコンクリートの劣化は、降下温度、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。これは、主にコンクリート中の水が凍結しコンクリートが膨張するため、さらに常温と低温の繰り返しを受けることによって、膨張と収縮を繰り返し、内部組織が緩むことが原因となっている。

本研究では、コンクリートの微細構造を表す細孔径分布と氷点降下に着目して、降下温度に伴う凍結水量を算出すること、ならびに凍結要因のうちの圧縮強度、気泡間隔係数、全細孔量、凍結水量を組み合わせることにより、コンクリートの耐凍害性を評価し得る耐凍害指標値βを提案するものである。さらに、促進凍結融解試験結果と対応することによってこの提案方法の適用性について検討を加えることとする。

2. 凍結水量の算定方法

セメントペーストの内部には、大小様々な空隙が存在し、空気孔、毛細管孔、ゲル孔に分けられる。これらのうち、毛細管空隙は凍害に及ぼす影響が大きいことが知られており¹⁾、通例、細孔径分布として表される。そして温度降下に伴い粗大径側の毛細管中の水から順次凍結していく。これは、細孔中の水はメニスカスによって凍結しにくくなっており、細孔径の大小によって凍結温度が決定されているため、氷点降下現象としてよく知られている。そして、 10^3 \AA 以上の細孔中の水は 0°C 以下になると直ちに凍結するが、より小さい細孔径では温度の低下に伴って徐々に凍結していく。このため、セメントペースト中の水は凍結部と未凍結部が混在し、凍結温度を一義的に決めることはできず、コンクリートの劣化を直接的に表す凍結水量を降下温度ごとに算出することが必要となる。

そこで、細孔半径を r 、細孔径分布の密度関数を $F(r)$ 、全細孔容積を V_0 とすると、ある細孔半径 r における細孔量は次のような式

(1)で表される²⁾(図-1(a))。

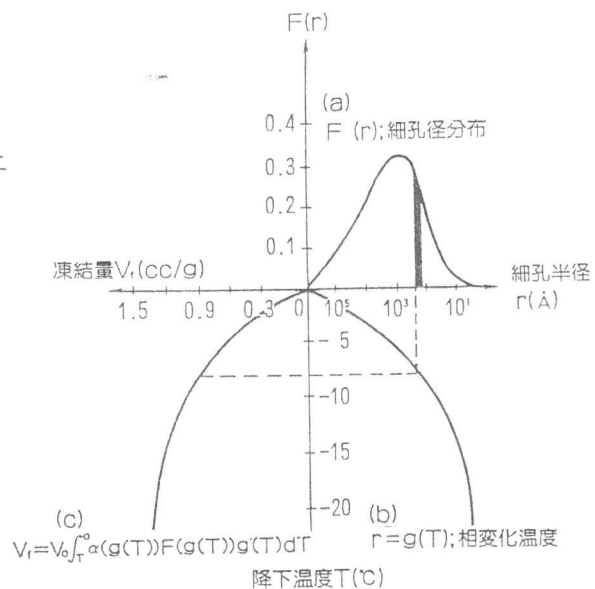


図-1 細孔径分布と相変化温度と凍結量の関係

$$V_0 F(r) \quad (\text{ただし、} \int_0^\infty F(r) dr = 1) \quad (1)$$

そして、ある細孔半径の増分 dr における凍結水量は $V_0 F(r) dr$ で表すことができるので、粗大径側から順次凍結していく過程を考えると、ある温度 T まで降下したときの凍結水量 V_f は、次式のように記述できる。

$$V_f = - \int_\infty^r \alpha(r) V_0 F(r) dr \cong \sum_{i=1}^n \alpha(r_i) V_0 F(r_i) \Delta r_i \quad (2)$$

ここで、 $\alpha(r)$ は細孔半径別の飽水度を示す関数とする。

式(2)の右辺は、細孔径分布が離散的に与えられた場合を示す。また、このときの温度 T と凍結する細孔半径 r との関係は通例、 $r = g(T)$ のような特性曲線(相変化温度)として表される(図-1(b))。そして、この特性曲線 $r = g(T)$ を用いると、式(2)は式(3)のように変数変換することができ、降下温度 T とセメントペースト中の凍結水量 V_f の関係が得られる(図-1(c))。

$$-V_f = V_0 \int_T^0 \alpha(g(T)) F(g(T)) g(T) dT \quad (3)$$

相変化温度に関する曲線は、理論的もしくは実験的に数多く提案されているが、本文では樋口式を用いて計算する³⁾。

$$1/r = -4.99 \times 10^{-8} \log(T/T_0) \quad (4)$$

実際の計算では密度関数 $F(r)$ が連続量として与えられないこと、および演算の簡便性を勘案して、式(2)の右辺を用いて算定する。

3. 配合別凍結水量の算定

ここで、異なる3つの配合の測定結果を用い、本算定方法によりその凍結水量の算定を試みた。配合は表-1に示すもので、細孔径分布は水銀ポロシメーターによって測定した。

図-2は配合別の細孔径分布を示し、図-3は降下温度 T と凍結水量 V_f との関係について試算した結果である。いずれも $T = 0^\circ\text{C}$ 付近から凍結が始まり、温度低下に伴って凍結水量が増加していることを示しているが、定量的には配合の違いが明瞭に表れている。たとえば、粗大径に細孔を多く含むNA80は 0°C 直後から凍結水量が急激に増加するのに対して、微小径に細孔を多く含むBA65

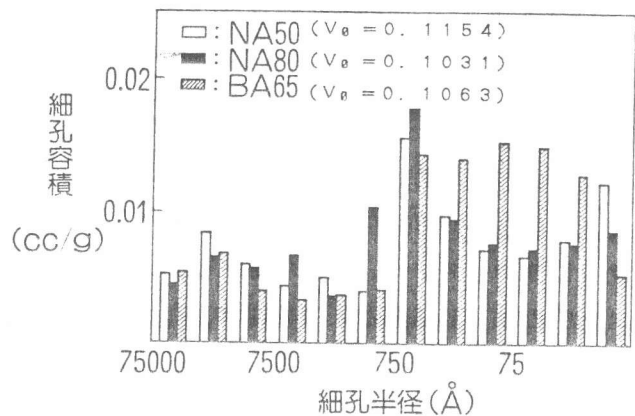


図-2 凍結水量の試算に用いた配合別細孔径分布

表-1 コンクリートの配合

配合名	水セメント W/C	セメント の種類	細骨材率 s/a	単位量 (kg/m ³)				
				水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤 (%)
NA50	50	普通	46	182	364	779	915	0.035
NA80	80	普通	46	182	228	831	976	0.035
BA65	65	高炉	46	182	280	808	949	0.035

は0℃直後からは徐々に増加していることが確認できる。以上のようにコンクリートの微細構造を表す細孔径分布の違いが、イオン濃度等の影響も無視できないが直接的に凍結水量の違いとして反映させることができ、本手法における特徴の1つであると言える。

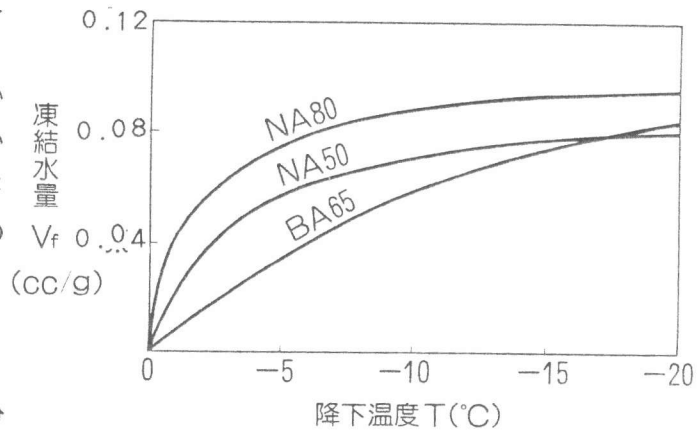


図-3 降下温度と凍結水量の違い

4. 耐凍害指標値の提案

凍害の要因は外的要因と内的要因に分けることができる。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_0 が挙げられ、負の要因として気泡間隔係数 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、コンクリートの耐凍害性に対する安全性指標値 β (以後、耐凍害指標値 β と呼ぶ。) を式(5)のように提案した⁴⁾。

$$\beta = (f_c/300)^a \times (L/0.5)^b \times (V_0/V_f)^c \quad \begin{matrix} f_c : \text{kgf/cm}^2 \\ L : \text{mm} \end{matrix} \quad (5)$$

すなわち、 f_c 、 L 、 V_0 、 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⁵⁾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項ではこれを基準値とした。第3項は全細孔量 V_0 を凍結水量 V_f で除すことにより、全細孔量に対する凍結水量の割合を表した。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 、 c は正の要因であるからプラスに、 b は負の要因であるからマイナスになる。)

5. 凍結融解試験結果及び耐凍害指標値 β の適用

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-2は、20種配合について、 β に含まれる4要因および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) と耐凍害指標値 β 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、重回帰分析により各 a 、 b 、 c を同定した。表-3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

表-2 実験結果一覧

配合 no	圧縮強度 fc (kgf/cm ²)	気泡間隔 係数 L (mm)	全細孔量 V0 (cc/g)	凍結水量 Vf (cc/g)	降下温度 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	2.155	92
2	293	0.234	0.1460	0.077		2.256	96
3	410	0.215	0.1374	0.063		2.518	101
4	438	1.510	0.1033	0.060		0.422	10
5	400	0.996	0.1087	0.060		0.618	45
6	381	0.992	0.1135	0.051		0.648	42
7	451	1.214	0.1097	0.055		0.530	29
8	301	0.611	0.1339	0.072		0.957	6
9	326	0.567	0.1483	0.070		1.053	84
10	365	0.502	0.1407	0.075		1.144	49
11	410	0.530	0.1466	0.060		1.156	96
12	450	0.182	0.1154	0.066		2.787	98
13	310	0.269	0.1292	0.074		1.959	88
14	223	0.324	0.1031	0.079		1.553	83
15	395	1.503	0.0911	0.066		0.404	0
16	294	0.223	0.1063	0.066		2.274	96
17	356	1.085	0.1081	0.075		0.544	20
18	450	0.182	0.1154	0.086		-70	2.632
19	310	0.269	0.1292	0.098	1.844		80
20	395	1.503	0.0911	0.085	0.384		0

数であることが分かる。

加えて、相関係数は R =

0.921 となり、耐凍害指標値βと相対動弾性係数は高い相関関係にある

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に加えた。このように、β値は耐凍害抵抗性に対する材料特性を表す値であるが、図-5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β値が決定されていることが分かる。そして、表-4、図-5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が大きくなることを示している。

また、a, b, cを同定するにあたり、他サイクルにおいて重回帰分析を行ったが、それら

表-3 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 : 0.012	0.921	0.848
log (L/0.5)	b : -0.890		
log (V0/Vf)	c : 0.216		

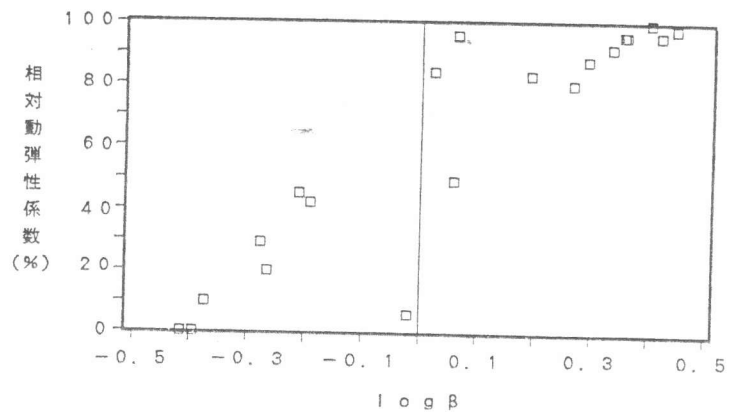


図-4 耐凍害指標値βと相対動弾性係数との関係 (150サイクルにおける)

の値に大きな差は生じなかった。つまり、コンクリートの材料特性が明らかであれば、最低温度、凍結融解回数に依存しない係数 a , b , c を有することが推察された。さらに、30、150、300サイクルにおける実験結果をもとに概略的に描いたものを図-6に示す。このような考え方が認知されるには、さらに多くの系統的な実験による検証が必要であるが、凍結融解回数の進行過程における劣化度をほぼ表すことができたと言えよう。そして、凍結融解回数が少ない場合には上に凸、回数が多い場合には下に凸の曲線を描いている。

6. 実構造物への適用

本文で提案した耐凍害指標値 β を実構造物に適用するためには、サイクル数 N の増加に伴う劣化進行及び凍結速度の影響を考慮する必要がある。これは、促進凍結融解試験と実際の構造物の置かれた場所における凍結速度を考えた場合、大きな違いがあるからである。既往の文献によれば、凍結速度が速くなるに従い、劣化速度も助長される⁶⁾。これは、凍結速度が速くなると凍結水量の増加割合も速く、内部膨張圧が大きくなるためである。試験機による違いこそあれ、凍結融解試験は凍結速度が約 $10^\circ\text{C}/\text{h}$ であるのに対し、実際の構造物がおかれている環境では $0.5 \sim 2^\circ\text{C}/\text{h}$ が一般的であり、凍結速度に大きな差異がある。そこで実験の追認は不可欠であるが、図-7に示すような概念図が考えられる。つまり、凍結速度の違う場合における耐凍害指標値 β と相対動弾性係数の関係を定量化できれば、実際の構造物のおかれた環境別に凍結速度を算定し、ならびにコンクリートの材料特性を示す耐凍害指標値 β を算出することにより、凍結融解回数別の劣化度を求めることができると思われる。

以上の影響を考慮したモデル化は非常に複雑となることが予想される。本文では、式(6)のように表現できると考え、定性的に考察を行ってみた。

$$E_d/E_d' = f(N) \times g(h) \times R(\log \beta) \quad (6)$$

表-4 配合別相対動弾性係数の違い

	相対動弾性係数 (E_d'/E_d)		
	30サイクル	150サイクル	300サイクル
NA50	100	98	97
NA80	89	83	76
BA65	97	96	96

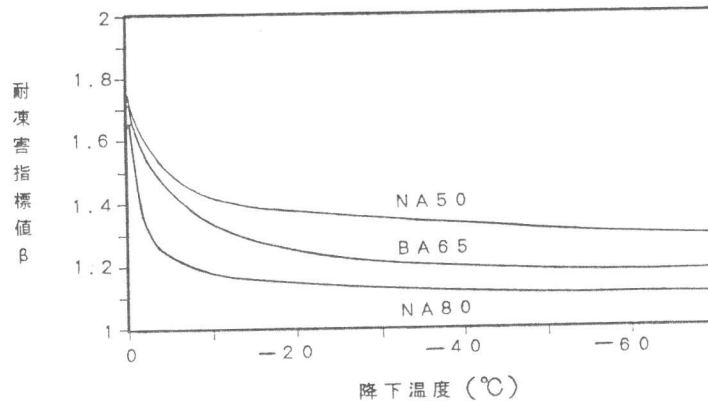


図-5 降下温度と耐凍害指標値 β の関係

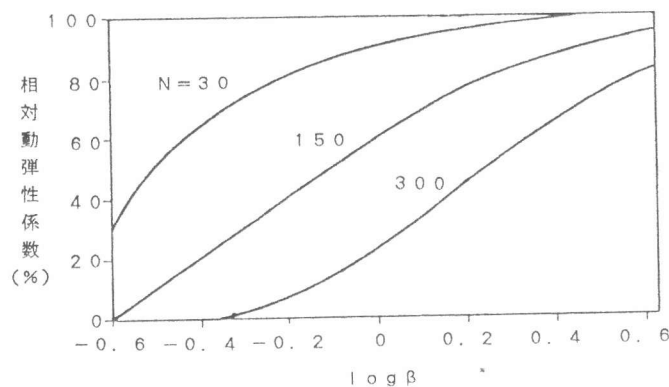


図-6 耐凍害指標値 β と相対動弾性係数との関係

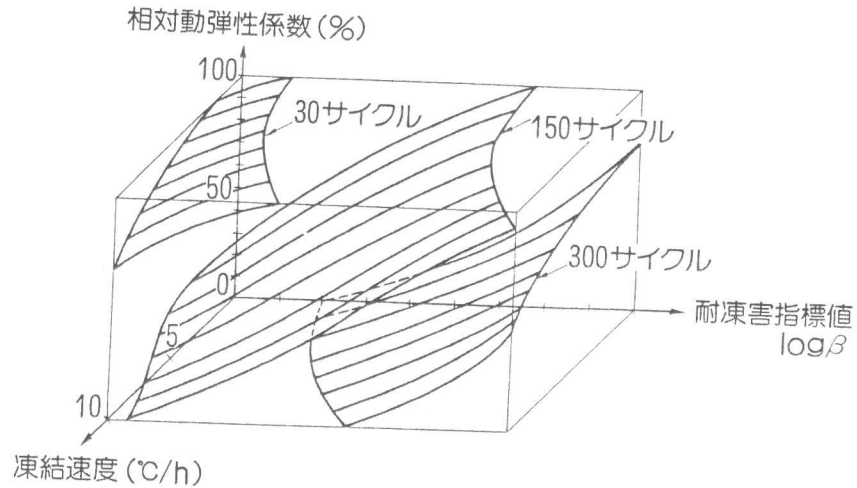


図-7 耐凍害指標値 β と相対動弾性係数と凍結速度の関係 (概念図)

ここで、 $f(N)$ は凍結融解回数の影響を、 $g(h)$ は凍結速度の影響を表し、 $R(\log \beta)$ は、例えば、図-4 から求まる関数を示している。図-7 から類推すると、 $f(N)$ は単調減少、 $g(h)$ も単調減少、 $R(\log \beta)$ は単調増加となるもので物理的考察と実験的な同定により決定されなければならない。

6. あとがき

コンクリートの細孔中の水は凍結することにより9%の体積膨張を生じ、内部に膨張圧を生じさせるため、凍結水量はコンクリートの劣化を直接的に表す要因と考えることができる。一方、それに対抗する材料特性は、圧縮強度や膨張圧を緩和させる空気量や気泡間隔係数などが挙げられる。従って、これらの諸数値を合理的に組み合わせることにより、コンクリートの耐凍害性を定量的、客観的に評価し得ると考えられ、本研究では、耐凍害指標値 β として提案している。本提案手法はまた、氷点降下や細孔径分布などの一般的に認知された要因を忠実に組み合わせたものであり、大きな仮定条件を含むものではなく、試験値の適用結果からも本提案式が凍害による劣化度を評価できる指標値として十分可能性をもっていることが分かる。しかし、コンクリートの耐凍害性は複雑かつ多くの要因に支配されているので、今後より信頼性が高く、簡便で実用的な指標とするためには、より多くの実験値への適用が必要となってくる。

【参考文献】

- 1) 鎌田英治:セメント硬化体の微細構造とコンクリートの凍害, コンクリート工学, vol. 19, NO. 11, Nov. 1981
- 2) 吉川弘道, 山下英俊他:凍結過程におけるセメントペースト中の凍結水量に関する算定方法, 土木学会第45回年次学術講演会, 1990, 9
- 3) 鎌田英治他: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, (25), 1971
- 4) 吉川弘道, 坂本守他:凍害を受けるコンクリートの耐凍害性指標値の提案, 土木学会第45回年次学術講演会, 1990, 9
- 5) Powers T. C., Helmut R. A.: Proc. Highw. Res Bd. [32], 1953
- 6) Pigeon M, Prevost J: Freeze-Thaw Durability Versus Freezing Rate, ACI JOURNAL, September-October, 1985