

武蔵工業大学 正会員 吉川弘道
 (株)間組技術研究所 正会員○坂本 守
 " 正会員 村上祐治
 東京電力(株) 正会員 田中典明

1. まえがき

コンクリートの耐凍害性に寄与する要因として、圧縮強度、空気量、細孔径分布、気泡間隔係数等の材料特性や、最低温度、凍結速度、飽水度、凍結融解回数等の外的要因が挙げられる。本報告は、コンクリートの耐凍害性を、凍害発生要因と氷点降下や細孔径分布などの一般的に知られた物理的問題を組み合わせることにより、定量的かつ客観的に評価し得る耐凍害指標値 β を提案するととも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ものである。

2. 耐凍害指標値の提案

凍害の要因は様々であるが、その要因が耐凍害と正、あるいは負の相関があるかどうかで判断すると、正の要因として、コンクリートの圧縮強度 f_c 、未凍結細孔量 $V_0 - V_f$ (V_0 は全細孔量)が考えられ、負の要因として気泡間隔係数 L 、および著者らの併報で算出した細孔中の凍結水量 V_f が考えられる。これらの凍害発生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を示す耐凍害指標値 β を次式で示し、複合的にコンクリートの耐凍害性を評価する。

$$\beta = (f_c/300)^a \times (L/0.5)^b \times \left(\frac{V_0 - V_f}{V_f} \right)^c$$

第1項は、一般的なコンクリートの圧縮

強度 300 kgf/cm^2 を基準値とし、この値で除することにより無次元化している。また、Powers ら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¹⁾では、気泡間隔係数が 0.5 mm を境に収縮から膨張に転じていることから、第2項も第1項と同じように、気泡間隔係数 L を 0.5 mm で除し無次元化している。第3項では、全細孔量 V_0 と凍結水量 V_f を用いて、凍結水量に対する未凍結細孔量の割合とした。そして、各項の影響度を a 、 b 、 c で表現し、それぞれの凍害発生要因の重みを表した。(ここで、第2項は負の要因であるから、 b はマイナスとなる。)

3. 凍結融解試験

試験に用いたコンクリートの配合を表-1に示す。また促進凍結融解試験は、材令14日において水中凍結水中融解法(A法)で行い、その試験結果を表-2に示す。

表-1 コンクリートの配合

配合 No	水 W/C (%)	細骨 材率 S/a (%)	スラ フの 率 S/b (%)	空気 量 (%)	単 位 量 (kg/m^3)						単 位 量 (kg/m^3)		
					水 W	セ メント C	ス ラ フ Sg	細骨 材 S	粗骨 材 G	中 分 散 和 剤	AE 減 水 剤	AE 助 剤	高 性 能 減 水 剤
1	4.5	15± 2.5	5 ±1	165	300	—	807	1025	—	—	0.75	0.5A 3A	—
2													
3													
4													
5	4.8	12± 2.5	—	180	229	98	866	974	—	—	—	—	—
6													
7													
8													
9	4.0	50± 2.5	5 ±1	215	274	117	632	982	2.3	0.98	—	2A 2A 2A 2A	11.7
10													
11													
12													

表-2 実験結果一覧

配 合 No	圧縮強度 (kgf/cm^2)		全細 孔量 V_0 (CC/g)	凍結 水量 V_f (CC/g)	相対動弾性係数 E_d/E_0 (%)			気泡 間隔 係数 L (mm)
	7日	14日 f_c			3日 サイクル	15日 サイクル	30日 サイクル	
1	352	403	0.1170	0.0835	97	92	87	0.235
2	194	293	0.1288	0.0765	97	96	93	0.234
3	312	410	0.1222	0.0627	102	101	103	0.215
4	358	438	0.0985	0.0603	85	10	0	1.510
5	299	400	0.1043	0.0597	87	45	8	0.996
6	264	381	0.1079	0.0511	94	42	0	0.992
7	342	451	0.1037	0.0549	82	29	0	1.214
8	231	301	0.1207	0.0721	89	6	0	0.611
9	218	326	0.1355	0.0703	92	84	13	0.567
10	282	365	0.1263	0.0747	95	49	0	0.502
11	301	410	0.1334	0.0597	98	96	40	0.530

(V_f は -18°C での凍結水量を示す)

4. 試験結果への適用

まず、耐凍害指標値 β を求めるために、3. の促進凍結融解試験結果を式(1)に代入し、 β 値を求めた。相対動弾性係数(Ed'/Ed)と耐凍害指標値は、常用対数を取るにより直線関係にあると仮定し、最小2乗法にて各サイクル毎に a 、 b 、 c を算定した。表-3の結果に示すように、耐凍害指標値 β の3要因のうち最も重みのあるものは気泡間隔係数であることが分かる。ここで算定した a 、 b 、 c の組合せのうち、最も直線的に対応していると思われる150サイクルでの値を標準値とし、他の36サイクル、300サイクルに適用して、その分布を調べたのが図-1である。同図より、耐凍害指標値 β と相対動弾性係数の両者は極めて高い相関関係にあることがわかる。また、36サイクルでは上に凸、300サイクルでは下に凸の曲線を描いており、耐凍害指標値 β と相対動弾性係数(Ed'/Ed)の関係は概念的に図-2のように表せる。以上より両者の関係を次式で表すとする。

$$Ed'/Ed = (\log \beta)^d$$

この式において d は凍結融解回数の影響を表す係数であり、今回の場合150サイクルを基準としているため、 $N < 150$ であれば $d < 1$ となり上に凸、 $N > 150$ であれば $d > 1$ となり下に凸の曲線となる（150サイクルであれば $d = 1$ となる）。

耐凍害指標値 β と相対動弾性係数がこのような関係にあることは、耐凍害指標値 β が大きくなるような品質のコンクリートでは凍結融解抵抗性が高くなることを示している。

4. あとがき

本提案方法は、一般的に知られている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い。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として十分可能性を持っていることが分かる。しかし、凍害による劣化過程において、今回取り上げた発生要因のうち、圧縮強度は、劣化の進行に対応して低下していくことが、相対動弾性係数の低下からも予想できる。ここで与えた要因は、その時点における耐凍害指標値を表すものであり、より正確な値を知るためにも圧縮強度の低下率を考慮した数値代入が必要となってくる。このように、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おり、本提案手法は、今後の詳細な研究と要因の追加、あるいは修正、さらに多くの試験値に適用することによって、より信頼性の高い耐凍害指標値の算定式となることが期待される。

【参考文献】

1) Powers, T. C., Helmut R. A., Proc. Highw. Res Bd. [32], 1953, 285~297

表-3 重回帰分析の結果

サイクル	説明変数	標準回帰係数	重相関係数	寄与率
36	$\log(Fc/300)$	$a = 0.106$	0.914	0.836
	$\log(L/0.5)$	$b = -0.977$		
	$\log((V_a - V_r)/V_r)$	$c = 0.342$		
150	$\log(Fc/300)$	$a = 0.234$	0.889	0.791
	$\log(L/0.5)$	$b = -0.976$		
	$\log((V_a - V_r)/V_r)$	$c = 0.342$		
300	$\log(Fc/300)$	$a = 0.283$	0.926	0.857
	$\log(L/0.5)$	$b = -0.998$		
	$\log((V_a - V_r)/V_r)$	$c = 0.003$		

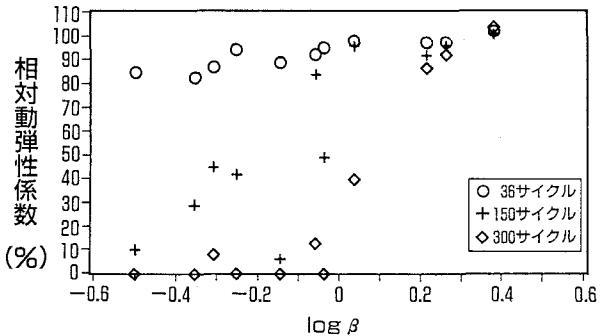


図-1 耐凍害指数値 β と相対動弾性係数の関係

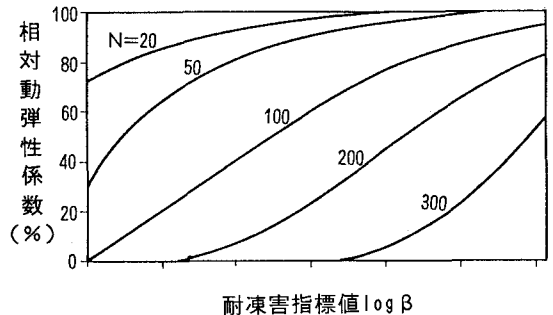


図-2 耐凍害性指標値と相対動弾性係数との関係（概念図）