Ⅴ-200　凍結融解を受けるコンクリートの劣化シミュレーション

武蔵工業大学　正会員　石田　聡
武蔵工業大学　　　　　小林秀昭
武蔵工業大学　正会員　吉川弘道

１.はじめに

本研究は、外気温度の上昇・降下を受けるコンクリート構造物を対象とし、凍結融解の繰り返し過程における凍結融解サイクル数、凍結水量Vf、耐凍害指標値βをコンピューター上に再現し、時系列での劣化シミュレーションをおこなうものである。

２.劣化シミュレーション解析手順（図-1）

①入力データのとして、環境条件・コンクリートの物理的・力学的性質などのデータの準備。

②凍結融解回数のカウントは、外気温度の上昇・降下により融解状態から凍結状態になり、再度融解状態にもどることにより1回とする。

③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としたとき、最低温度Tまで降下したときの凍結水量Vfを次式にて求める［1］。

$$Vf=-\int_{\infty}^{r} V_0F(r)dr \fallingdotseq \sum_{i=1}^{n} V_0F(r_i)\Delta r_i \qquad (1)$$

④気泡間隔係数L、全細孔量V_0、圧縮強度f_c、凍結水量Vfによって、耐凍害指標値β（a,b,c定数）を次式にて算出する。

$$\beta=(f_c/300)^a\times(L/0.5)^b\times(Vf/V_0)^c \qquad (2)$$

⑤動弾性係数の低減率$z=Ed^*/Ed_0$を劣化特性値とし、劣化特性曲面を用いて損傷増分を求める。

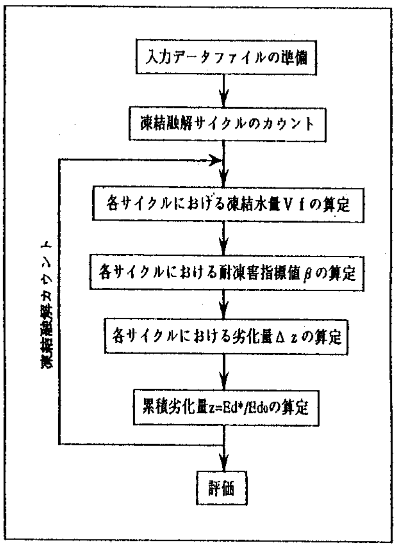

図-1　凍結融解を受ける
コンクリートの劣化フロー

３.劣化特性値の増分計算のアルゴリズム

耐凍害指標値βは、環境温度（特に、最低温度）の関数として表されるため、自然環境下における劣化特性値を追跡する場合、この値がサイクル1回ごとに常に変化する。そこで、増分計算によって、サイクル1回ごとの劣化増分値Δz を求めるとともに、その累積値$z=\sum\Delta z$を算定し、劣化過程をシミュレートするもので図-2に示すアルゴリズムを考える。ここで劣化特性値zが$z=F(x,y),(x=-\log\beta, y=N)$なる単調減少関数とし、例えば、凍結融解サイクルを3回受けた後、劣化特性値がz_3の状態にある場合を考える。ここで、第4回目のサイクルでは、$x_4=-\log\beta_4$なる凍結負荷を受けたとすると、$z=F_4(x_4,y)$上の曲線をa→bに変動することになる（ただし、この時$\Delta y=1$）。この第4回目のサイクルでは劣化増分量がΔz_4　(<0) であり、累積された劣化特性値は、$z_4=z_3+\Delta z_4$ と計算される。次の第5回目のサイクルでは点bから水平移動し、$z=F_5(x_5,y)$（ただし、$x=-\log\beta_5$）上をc→dに降下する。同様に、累積劣化特性値は、$z_5=z_4+\Delta z_5$ にて、以下同様に1サイクルごとに異なる曲線上を順次$\Delta y=1$だけ移動し、そのときのβ値に応じた増分値だけ減ぜられることになる。

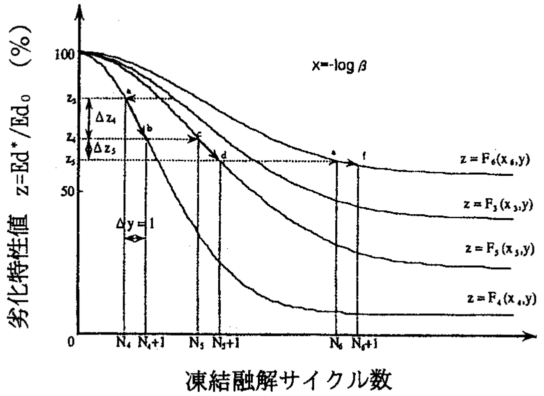

図-2　劣化特性値の増分計算に関する模式図

ここで最も重要な仮定は、x値が異なる場合、水平方向に移動したことである。すなわち、次のサイクルに移動する際、劣化特性値zを引数とするものである。このような計算手法は、温度依存性を考慮したクリープひずみ、最大応力や最大振幅の異なる疲労寿命などと全く同じアルゴリズムが成立する。

以上より、第kサイクルの劣化増分値および、第kサイクル終了後の劣化特性値z_kは、次のような一般式が得られる。

第kサイクルの劣化増分値 $\Delta z_k=\left.\dfrac{\partial F(x_k,y)}{\partial y}\right|_{y=N_k}\cdot\Delta y$ （ただし、$z_{k-1}=F_k(x_k,y)$） (3)

第kサイクル終了後の劣化特性値 $z_k=z_{k-1}+\Delta z_k$ (4)

4.劣化特性値の計算過程

凍結融解サイクル数Nおよびその時の耐凍害指標値βの関数として次式のような劣化特性曲面$z=Ed^*/Ed_0$を採用する。

$$z=ax^3+bx^2y+Cxy^2+dy^3+ex^2+fxy+gy^2+hx+iy+j \quad (5)$$

$z=Ed^*/Ed_0$:劣化特性値, $y=N$:凍結融解サイクル数, $x=-\log\beta$:耐凍害指標値β

（ここで定数 a,b,.....,j は、一定温度振幅による実験にて、同定されたものである。）

従って、式(3)で必要とする引数y_kは、

$$dy_k{}^3+(cx_k+g)y_k{}^2+(bx_k{}^2+fx_k+i)y_k+(ax_k{}^3+ex_k{}^2+hx_k+j-z)=0 \quad (6)$$

なる曲線上の点として与えられ、NEWTON-RAPHSON法にて解くことにより求められる。

また、偏導関数$\partial F/\partial y$は、式(5)から、$\dfrac{\partial F}{\partial y}=3dy^2+2(cx+g)y+(bx^2+fx+i)$ と計算されるので、式(3)にて得られるΔz_k は、具体的に次のようになる。

$$\Delta z_k=\left.\frac{\partial F(x_k,y)}{\partial y}\right|_{y=N_k}\cdot\Delta y=3dN_k{}^2+2(cx_k+g)N_k+(bx_k{}^2+fx_k+i) \quad (\Delta y=1) \quad (7\text{-}1)$$

このように、現サイクル$x_k=-\log\beta_k$と前サイクルのz_{k-1}にてz_kは記述できる。また、増分Δy 間(y_k〜$y_k+\Delta y$)の接線勾配をより精度よく求めるには、次のようにする必要がある。

$$\Delta z_k=\frac{1}{2}\left\{\left.\frac{\partial F(x_k,y)}{\partial y}\right|_{y=N_k}+\left.\frac{\partial F(x_k,y)}{\partial y}\right|_{y=N_k+\Delta y}\right\} \quad (\Delta y=1) \quad (7\text{-}2)$$

5.数値シミュレーションと考察

ここでAEコンクリート・NON-AEコンクリートを用いた劣化シミュレーションを試みる。位置は、北海道旭川を想定し、外気温が氷点下となる11月から翌3月を、1シーズンとし、北面と南面についてシミュレートしたものであり、その結果を図-3に示す。

AEコンクリートとNON-AEコンクリートを比較すると、AE剤を混入したコンクリートの耐久性が特に優れていることが確認された。また、NON-AEコンクリートでは、北面に比べ南面の劣化が著しいことがわかる。これは、南面の日最高温度が、日射の影響により、融解温度を越えることが多く凍結融解回数が、促進されるためと考えられる。

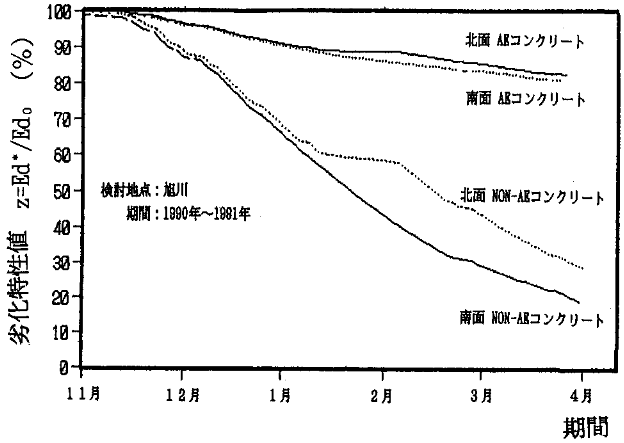

図-3 数値シミュレーション例

【参考文献】

[1] 山下英俊、吉川弘道：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書、1991年、第13巻第、PP729〜734.