

凍結融解作用を受ける透水性コンクリートの劣化挙動

北海道大学大学院 学生員 徳重英信
 北海道大学工学部 正 員 佐伯 昇
 北海道大学工学部 正 員 三上 隆
 北海道大学工学部 正 員 志村和紀

はじめに

近年、河川改修の概念の中に修景緑化という要素が取り入れられてきており、構造物としてのコンクリートのその中での意義がこれまでとは異なったものになりつつある。自然環境の要素をできるだけ取り入れる近自然工法において、コンクリートが周辺環境に及ぼすものとして植生に対する遮水に着目し、これに透水性コンクリートを用いて影響を低減させることを仮定した。本研究では、寒冷地では避ける事のできない凍結融解作用を受ける、透水性をもたせたコンクリートの劣化挙動を追う事を目的とした。

実験及びその結果

透水性をもつコンクリートとして、混和剤(起泡剤・AE減水剤)を用いた起泡コンクリートと骨材粒径の操作により構造的に空隙をつくるポーラスコンクリートの2種を供試体として用いた。両者ともに透水試験により透水係数を求めた。凍結融解試験は起泡コンクリートについては材令14日で行い、コンクリート内温度、最高13℃(5時間)～最低-21℃(12時間)、1cycle/dayで凍結融解をかけた。融解時にシャワー方式により水分を供給する事により供試体を湿潤状態に保ち、透水性の差異による劣化の挙動を観た。一例として、非常に小さいオーダーではあるが、透水係数 $K=9.4 \times 10^{-8}$ cm/sの起泡コンクリートの埋め込みゲージによるひずみ、及び小型圧力センサーによる内部圧力の、温度変化との相関を図-1、図-2に示す。両者ともに1～10cycle程度の比較的初期の測定結果ではあるが、通常のコンクリート($K < 10^{-12}$ cm/s)のひずみ測定結果とはすでに相違を生じており融解過程において凍結時とは違った経路をたどる事が確認された。この挙動を次に示す3つの理論と照らし合わせる事を試みた。

既往の理論との照査

T. C. Powers¹⁾は凍結時にマトリックスに作用するものとして、氷晶生成時に空隙より排出される水分による水圧説を提案している。Powersの式¹⁾中で $R_t=12$, $S=1$, $r=20$ とすると $W/C=0.35$ において、空隙中心部からの影響半径と空隙径の比 $[(L+r)/r]$ と水圧の関係を図-3の様に表す事ができる。しかしこの式では透水係数 $K=1.9 \times 10^{-8}$ cm/s以上では毛細管空隙比 $\epsilon \geq 1$ となり、これより高い透水係数では水圧がほぼ0となる。従ってセメントペーストの透水性を上げるために導入する比較的大きな空隙による影響をそのままこの理論中で議論するのは困難であると思われる。

一方、氷の体積膨張率9%が直接的に氷晶圧として作用する事に加え、V. P. Grubel²⁾はセメントペーストと水の線膨張係数の差により、融解時に氷晶圧が生じるという説を提案している。空隙中心より壁圧を含む距

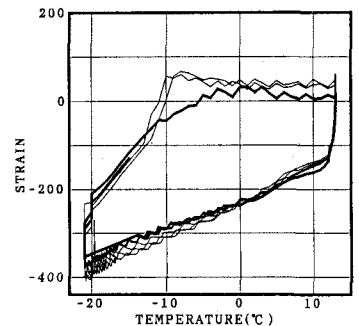


図-1 温度と内部ひずみ

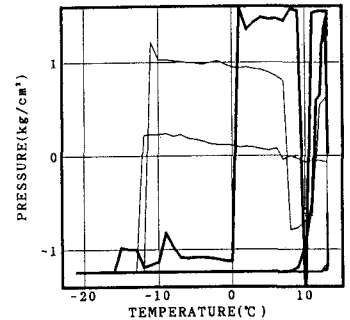


図-2 温度と内圧

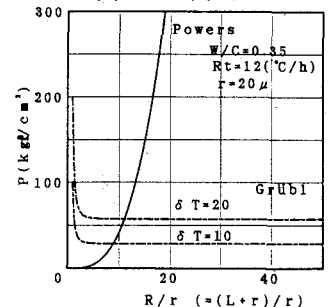


図-3 Powers, Grubelの計算結果

離と空隙径の比 $[R/r]$ と、空隙壁に作用する引張力 $[P_s]$ の相関を図-3に示す。 $R/r > 10$ に於いて P_s はほぼ温度変化のみに依存する。尚、本研究では簡便的に氷が融解する時点で氷圧からは解放されるものと仮定し、Grüblの式²⁾中の氷圧発生時の温度変化 δT の基準点を $t_0=0$ とした。

また、空隙内の氷生成をアイスレンズの成長課程としてとらえ、石崎³⁾による凍上論を用いると次のようになる。アイスレンズ成長面では不凍水の存在が確認されており、長時間経過後アイスレンズの成長が止まった場合、氷の化学ポテンシャル μ_i と不凍水の化学ポテンシャル μ_w は等しいと考えられる(1式)。これより2)式が得られ、密閉された空間でバルク水と氷が接している場合、氷圧力 P_i と氷接面の水圧 P_w は等しくなり、2)式は[Clausius-Clapeyron]の式(3式)と一致する。土中に於いて P_w は大気圧に等しくなると考えると $P_w=0$ となり2)式は4)式の様に表される。4)式中の P は長時間経った後に凍上力が一定値に漸近した時の値であり、最大凍上力と呼ばれている。この理論では最大凍上力は土の固有値には関係なく温度条件(最低温度)のみに依存する事となる。

$$\mu_i(P_i, \theta_i) = \mu_w(P_w, \theta_i) \quad \dots\dots 1) \quad V_i P_i - V_w P_w = -L \frac{\theta_i}{T_m} \quad \dots\dots 2)$$

$$P = -L \frac{\theta_i}{(V_i - V_w) T_m} = -137.8 \theta_i \quad (\text{kgf/cm}^2) \quad \dots\dots 3)$$

$$P = -L \frac{\theta_i}{V_i T_m} = -11.4 \theta_i \quad (\text{kgf/cm}^2) \quad \dots\dots 4) \quad \frac{P}{\sigma_t} = 3.76 \frac{h}{D} \quad \dots\dots 5) \quad h: \text{被害深さ}$$

$$\frac{P}{\sigma_t} = 10.0 \frac{h}{D} \quad \dots\dots 6) \quad D: \text{penny shaped crackの直径}$$

考察

佐伯ら⁴⁾は表層強度を求める実験式を、penny shaped crackを想定したモデル実験によりコンクリートの引張強度(σ_t)と表層強度(P)の比で求め5)式で表しており、またBacheら⁵⁾はポップアウトが生じるときの骨材界面での膨張圧(P)をコンクリートの引張強度(σ_t)に対する比で表した実験式(6)式で提案している。両者に凍結融解による表面剥離の実験結果をあてはめたものと、前述した実験結果を、Grübl及び凍上の理論と照らし合わせると図-4のようになる。これより、通常のAEコンクリートの凍結融解作用による表層部の劣化は氷圧による理論で説明し易いことが推察され、透水性コンクリートの凍結融解による劣化の挙動も同様であると思われる。

まとめ

- 1)凍結融解を受ける透湿度をもたせたコンクリートは、内部劣化の挙動に於いて通常のコンクリートのそれとは異なり、特に融解過程において急激な膨張を呈する。
- 2)透水係数の ω - γ が 10^{-10} cm/sより大きくなるとPowersの水圧論では内部応力が非常に小さくなり、このような凍害については説明がつかない。従って新たな概念が必要である。
- 3)Grüblの水圧論における t_0 (氷とセメントペーストの線膨張係数がほぼ等しくなる温度(°C))の扱い、および石崎の凍上論の θ_i (アイスレンズの成長面温度(°C))の決定について議論が残されており今後の研究が必要であるが、コンクリートの凍害への凍上論の適用の可能性は十分にあると思われる。
- 4)AEコンクリートにおいても発生する海岸コンクリートのスケーリングの凍害については、Grübl及び凍上論で説明しやすいことがわかった。

謝辞：実験にあたって御助力を頂きました共和コンクリート工業(株)高島清宏氏、北海道ポラコン(株)山田茂氏に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) T. C. Powers : The Air Requirement of Frost-Resistant Concrete (1949)
- 2) V. P. Grübl, München : Über die Roll des Eises im Gefüge zementgebundener Baustoffe. Baustoffe. Beton 31 H. 2, pp. 54/58 (1981)
- 3) 石崎武志 : 凍上現象の物理 日本結晶成長学会誌 Vol. 18 No. 2 pp. 181-187 (1991)
- 4) N. Saeki, Y. Fujita and N. Takada : Surface Layer Strength of Concrete as a Measure of Scale Resistance Flyash Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete (CANMET/ACI) SP91-26, pp. 563-590 (1986)
- 5) H. H. Bach & J. C. Isen : Journal of ACI, June pp. 445-450 (1968)

i : 氷, w : 水, μ : 化学ポテンシャル

T_m : バルク水の凍結温度, V : 比容

L : 凍結潜熱, P : 氷圧, 氷圧

θ_i : アイスレンズの成長面温度(°C)

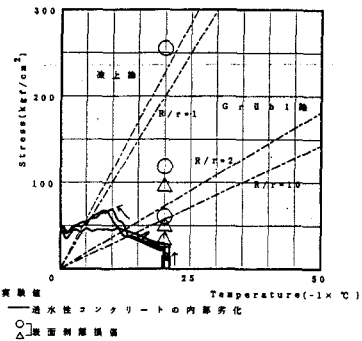


図-4 表層破壊圧及び凍上・Grüblでの内圧と歪から換算した内部応力