

V-21

透水性コンクリートの耐凍害性

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

河川空間に対する改修の中に近頃、“修景緑化”という概念が取り入れられてきている。これは河川空間に対し、過去に改修され現在残されているものを含め、自然環境の要素をできるだけ多く取り入れようとするもの（多自然工法）であり、空間に於ける調和を、人間に対するアメニティ空間、及び動植物との共存で図ろうとするものである。これにより、今日までの改修に際して多量に用いられてきた、コンクリート構造物の使用法についても、変容の必要性が求められつつある。

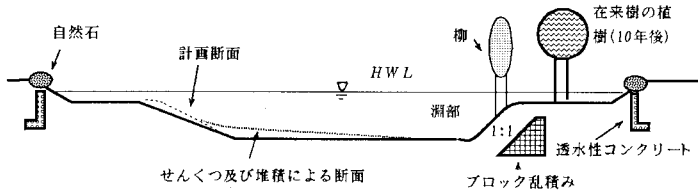


Fig.1 多自然工法の一例

我々は河川に於けるコンクリート構造物の意義に対し、例えば洪水及びせんくつに対する最終的な堤としての位置づけを仮定した。コンクリートが河川空間に及ぼす影響として様々な事が推察されるであろうが、その中でも特に地下水流の遮断が挙げられる。例えば空間に植生を求めうえて、また最近問題となっている周辺水路の増水の点等での影響が推察される。その他数多くの考慮が必要かと思われるが、我々は特に“修景緑化”を重視し、これに対し透水性コンクリートを適用する事を仮定した[Fig. 1]。

更に寒冷地に於いては、冬期間なんらかの形で凍害を受ける可能性があり、材料の耐凍害性の確保が必要になると予想される。本研究では過去の理論の検証と実験により、後に述べる透水性を持つコンクリートの耐凍害性との相関へのアプローチを試みる事を目的とした[Fig. 2][Fig. 3]。

透水係数の設定

地下水流の流路を確保するうえて、コンクリートがそれを遮蔽する可能性があるならば、植生などに対し何らかの影響が予測される。それにかかわる因子として、コンクリートが接する環境に比較的近い透水性の必要性がある。その環境つまり土と、その透水係数の相関は複雑な様相を呈するが、ここに農業土木的な要素¹⁾を取り入れることにより簡便化される[Table. 1]。これより、透水性が比較的良好と判断され、且つ現実的な土性を目安として、本研究では $K=10^{-4}$ (cm/s)を中心として $K=10^{-2} \sim 10^{-6}$ (cm/s)程度を透水係数の適用範囲と定めた。

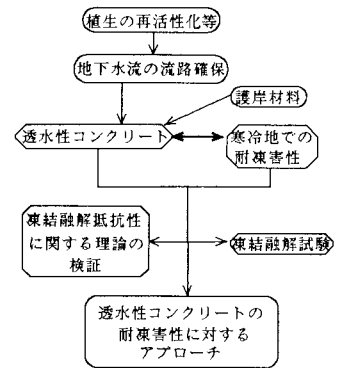


Fig. 2

Table. 1 土性と飽和透水係数

礫	砂	細砂及びシルト	粘土
$K=1$	10^{-2}	10^{-4}	10^{-6}
			10^{-8} (cm/s)

Frost Resistance of Permeable Concrete

by Hidenobu TOKUSHIGE, Noboru SAEKI, Takashi MIKAMI and Kazunori SHIMURA

既往の理論の検証

凍害によってコンクリート内部に作用する力については、T.C.Powersの水圧理論が最も一般的であるが、しかしながら次に述べるように、透水に関しての概念に於いてそのままでの適用は困難であるように思われる。

1) Powersの水圧説

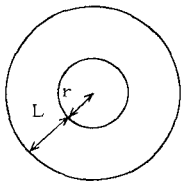
T.C.Powers²⁾は凍結時にマトリックスに作用するものとして氷晶生成時に空隙より排出される水分による水圧とする説を提案している[Fig. 4]. 1)式は、Powersの水圧式のセメントペーストの透水係数 K (cm^2)を K (cm/s)に書き換えたものである。

$$P = \frac{1}{3} \left(109 - \frac{1}{s} \right) \frac{\rho g u R t}{K} \left(\frac{L^3}{r} + \frac{3L^3}{2} \right) \quad \text{.....1)}$$

$$K = \frac{\rho g}{\eta} \times 35000 \times e^{3.6} \times 10^{-17} \quad \text{.....2)}$$

s : 飽水度 ρ : 水の密度 g/cm^3 g : 重力加速度 cm/s^2
 R : 凍結速度 $^\circ\text{C/h}$ K : 透水係数 cm/s u : 凍結水量 g°C
 L : 気泡間隔係数(影響半径) cm r : 空隙径 cm
 η : 水の粘性係数 poise e : 毛細管空隙率

この理論展開の中の実験結果に、 e と u は W/C に大きく依存している事が示されている。いま $Rt=12$, $S=1$, $r=20$ とすると、 W/C の違いによって、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、[Fig. 5]の様に表す事ができる。また2)式中の e は毛細管空隙比であり、 $K=1.9 \times 10^{-9} \text{cm/s}$ 以上では $e \geq 1$ となり前述した様な比較的高い透水係数で論じるのは不適切である。Powersは e の適用範囲を $e=0.1 \sim 0.35$ としている[Fig. 6]. 従って、セメントペーストの透水度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考慮するのは困難であると思われる。



Powersのモデル
Fig. 4

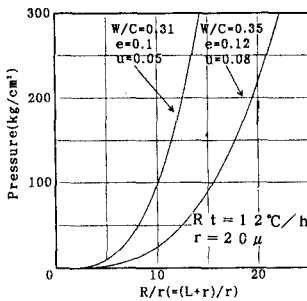


Fig. 5 $(L+r)/r-P$

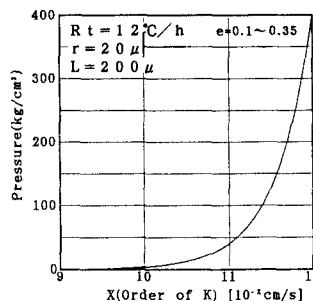
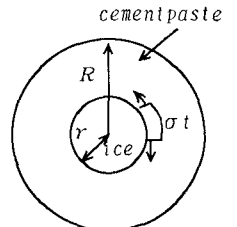


Fig. 6 $K-P$



Grubelのモデル

Fig. 7

2) Grubelの水圧説

水の体積膨張率9%が直接的に氷晶圧として作用する事に加え、V.P.Grübl³⁾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。0℃以下の一定温度に於いて、空隙径の差異により氷を有するものと未凍結部が存在する事は、微視的な観察結果からも報告がされている。その系がさらに冷却され、氷圧のない場合は収縮が生じるが、氷とセメントペーストの線膨張係数の差異により、より低い冷却によって氷が大きな収縮を生じ、空隙壁との隙間に未凍結水が拡散し、再び氷によってそれが閉じる。この系が再び加熱を受けると氷はセメントペーストに比べ著しい膨張をし、セメントペーストに氷圧を生じるものである[3)式][Fig. 7].

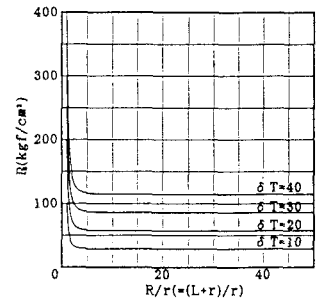


Fig. 8 $R/r-P_B$

$$P_B = \frac{(\alpha_i - \alpha_c) \delta T \left(2 \frac{r^3}{R^3} + 1 \right)}{\frac{1}{E_c} \left[\left(2 \frac{r^3}{R^3} + 1 \right) - V_c \left(4 \frac{r^3}{R^3} - 1 \right) \right] + \frac{2}{E_i} (1 - 2V_i) \left(1 - \frac{r^3}{R^3} \right)} \quad \dots\dots 3)$$

セメントペースト	氷
$E_c = 200000 \text{ kgf/cm}^2$	$E_i = 100000 \text{ kgf/cm}^2$
$V_c = 0.2$	$V_i = 0.3$
$\alpha_c = 1.0 \times 10^{-5} \text{ 1/K}$	$\alpha_i = 5.0 \times 10^{-5} \text{ 1/K}$

空隙中心より壁圧を含む距離と空隙径の比 $[R/r]$ と、空隙壁に作用する引張力 $[P_B]$ の相関を[Fig. 8]に示す。 $R/r > 10$ に於いては、 R/r の増加に関わらず P_B はほぼ一定となる。また文献⁴⁾によると $\alpha_i \approx \alpha_c$ 。温度を t_0 とし、 t_0 と t_i ($-45 < t_i < -10$)の差を δT とするとしている。しかし α_i と α_c の差を考えると、これら非常に近似し難い様に思われる。従ってここでは氷が融解する時点 (0°C) で氷圧からは解放されると仮定し、 $t_0 = 0$ とする。

3) 両者の比較

1) 式中の L は水圧の影響半径であるが、3) 式中の $(R-r)$ つまり空隙の壁圧とこれを本研究では近似できるものとした。

[Fig. 9]中の $(l+r)/r$ と R/r は厳密には意味が違う。 R は r の

値に影響される事のない値であるのに対し、 r と L はPowersの水圧説では相関を持っている。しかしながら、両者ともに応力が作用する影響半径という意味に於いて同義化されるものとした。

4) 凍上論

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ると、石崎⁵⁾により次のようになる。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[4)式]。これより5)式が得られる。密閉された空間でバルク水と氷が接している場合に、氷圧力 P_i と氷接面の水圧 P_w は等しくなり、[5)式]は[Clausius-Clapeyron]の式(6)式と一致し、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[5)式]は[7)式]の様に表される。7) 式中の P は長時間経った後、凍上力が一定値に漸近した値であり、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、温度条件に依存する事となる。

$$\mu_i(P_i, \theta_i) = \mu_w(P_w, \theta_i) \quad \dots\dots 4) \quad V_i P_i - V_w P_w = -L \frac{\theta_i}{T_m} \quad \dots\dots 5)$$

$$P = -L \frac{\theta_i}{(V_i - V_w) T_m} = -13.5 \theta_i \text{ (MPa)} \quad \dots\dots 6)$$

$$P = -L \frac{\theta_i}{V_i T_m} = -1.12 \theta_i \text{ (MPa)} \quad \dots\dots 7)$$

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 : 水圧, 氷圧
 θ_i : アイスレンズの成長面温度 $^\circ\text{C}$

5) 実験及び考察

著者ら⁶⁾はpenny shaped crackを想定したモデル実験により表層強度を求める実験式を、コンクリートの引張強度(σ_t)と表層強度(P)の比で求めたものを8)式で表している。

またBacheら⁷⁾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(9)式を提案している。両者に実験結果をあてはめたものがFig. 10に示してある。またGrübl, 凍上論と照らし合わせるとFig. 11となる。

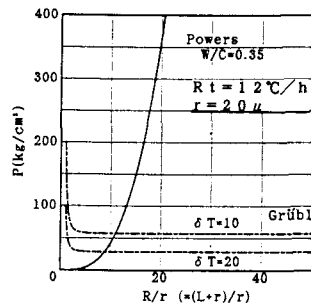


Fig. 9 $R/r-P$

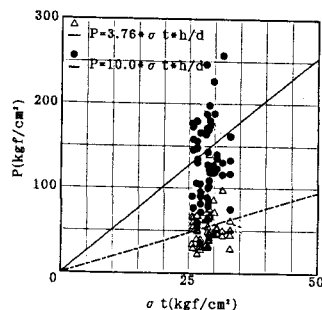


Fig. 10 σ_t-P

$$\frac{P}{\sigma_t} = 3.76 \frac{h}{D} \quad \dots\dots 8)$$

$$\frac{P}{\sigma_t} = 10.0 \frac{h}{D} \quad \dots\dots 9)$$

h:被害深さ D:penny shaped crackの直径

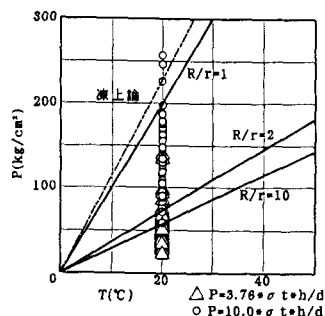


Fig. 11 T-P

まとめ

- 1) 透水係数のオーダーが 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、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。
- 2) Gröbl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、および石崎などの凍上論の θ_1 。(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り、また凍上論をコンクリートの凍害に適用するにあたって、空隙径および透水性の問題を含めた議論の可能性は十分にあると思われる。
- 4) 透水係数、内部応力及び劣化については実験的研究が現在進行中であるが、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、Gröbl及び凍上論で説明しやすいことが分かった。

[謝辞]

実験に際しまし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) 農業土木学会編 : 農業土木ハンドブック (改訂4版) 丸善 pp.1086~1087(1979)
- 2) T. C. Powers : The Air Requirement of Frost-Resistant Concrete (1949)
- 3) V. P. Gröbl, München : Über die Roll des Eises im Gefüge zementgebundener Baustoffe Beton 31 H. 2. pp. 54/58(1981)
- 4) A. M. Podvalny : Phenomenological Aspect of Concrete Durability Matériaux et Construction 9 pp. 151-162(1976)
- 5) 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)
- 6) N. Saeki, Y. Fujita and N. Takada : Surface Layer Strength of Concrete as a Measure of Scale Resistance
- 7) H. H. Bach & J. C. Isen: Journal of ACI June pp. 445-450(1968)