

はじめに ダム貯水池などにおいて、温度上昇に伴う氷の膨張は、構造物に水平力を生ずる。本研究は、欧米諸国に於ける氷圧の計算式について概説し、比較的最近に発表された Monfore の研究結果を利用して東北地方、及び北海道における氷圧の実験について調べたものである。

1 欧米における氷圧の計算法

U.S.A ではダム貯水池における数多くの実験例があり、氷圧は自然条件に応じて 3.5~20 kip/ft 程度の値がえられている。カナダではダムのような rigid な構造物に対して 10~15 kip/ft、ゲートのような比較的 flexible な構造物に対して 5 kip/ft が通常用いられている。ソ連では USSR NORMS CN-76-59 (1959) により式(1)が用いられている

$$\sigma_{max} = 0.78 \frac{(0.35\theta_a + 1)^{3/2}}{\theta_a^{0.33}} \quad (1)$$

ただし σ_{max} = 最大圧力 (kg/cm²)

θ_a = 空気の24時間平均温度 (°K)

2 Monfore の研究

Monfore は氷圧が氷の初期温度と温度上昇率によると考え、これらをパラメータに、実験的に氷圧を求めた。sample は、直径 4 in. 長さ 4 in. の円筒形に整形され、この円筒軸は氷層の水平方向にとられ、実際の応力の方向と同じくした。氷の温度は空気循環流を利用して調整し、氷温は、氷中に埋め込まれた熱電対で測定している。氷の膨張による応力は、sample の長さを一定に保つために必要な荷重を測ることによって求めている。従って sample は、温度上昇によっても一定の長さに保たれている。多くの実験結果から得られた「圧力-時間」曲線は、初期温度: -30, -20, -10, 0, 10, 20°F、温度上昇率: 2, 5, 10, 15°F/hr について得られている。Fig. 2 は、温度上昇率 5°F/hr を示している。また温度上昇率と最大圧の関係は Fig. 2 に示される。

3 大気温度変化に伴う氷温の計算法

大気温度変化に伴う氷の内部の氷温分布は、次の一次元熱伝導方程式

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = h^2 \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} \quad (2)$$

を境界条件 $\theta(0, t) = 0$

$$E(\theta - \theta_a) = -k \left\{ \frac{\partial \theta}{\partial x} \right\}_{x=L}$$

で解いて得られる

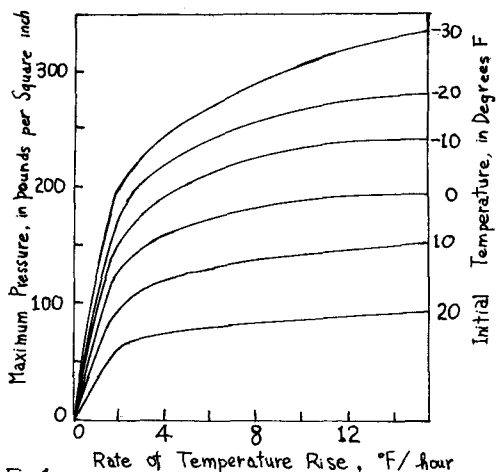


Fig. 1

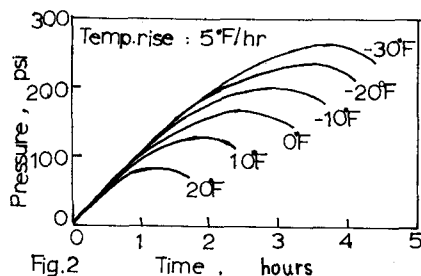


Fig. 2

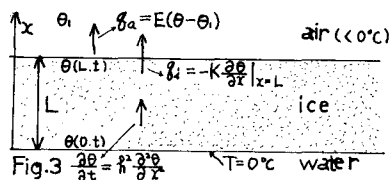


Fig. 3

$$\theta(X,t) = \frac{EL}{EL+K} \theta_1 \left[\sum_{n=1}^{\infty} A_n \sin \frac{\alpha_n X}{L} e^{-h^2 \frac{\alpha_n^2}{L^2} t} + \frac{X}{L} \right] \quad (3)$$

に於て α_n は次の方程式の連続する根

$$\tan \alpha_n = -\frac{K}{EL} \alpha_n$$

$$A_n = \frac{-2(\sin \alpha_n - \alpha_n \cos \alpha_n)}{\alpha_n(\alpha_n - \cos \alpha_n \sin \alpha_n)}$$

L = 氷の厚さ (m)

θ_1 = 氷の上昇温度 (°C)

h^2 = 氷の熱伝散率 (0.00403 m²/hour)

E = 熱伝達率 (kcal/m²·hr·°C)

K = 氷の熱伝導率 (kcal/m·hr·°C)

t = 時間 (hours)

X = 氷層最下縁からの距離 (m)

ここで (3) 式の $\theta = 1^\circ\text{C}$ の単位温度での $\theta(X,t)$ を求めておく、空気温度が $F(t)$ とせよ氷の場合の氷厚の温度分布は、次の積分で表わされる

$$T(X,t) = F(0)\theta(X,t) + \int_0^t \theta(X,t-\tau) F(\tau) d\tau \quad (4)$$

4 岩手県における温度変化の大きさとその条件に伴う氷圧の推定

盛岡市の最近9年間の最低温度と3時間の上昇率を確率紙にプロットして20年確率値を求めた。最低温度 -14.6°C 、温度上昇率 2.9°C/hr 、これらの数値を用いれば、氷厚を0.3mと仮定した場合、(3)式から氷温分布が求められる。氷厚中10cm間隔に氷温を求め、氷の最低温度の時間を起算として、各層ごとの温度上昇率を求めて、Fig 1を利用して時間と圧力の関係を求めた。これを全厚について平均した。強制対流の条件である $E = 50 \text{ Btu/hr sq ft } ^\circ\text{F}$ を使うと 3.9 Kg/cm^2 が得られた。

5 金山ダムにおける氷圧の実測値と計算値の比較

金山ダム(石狩川水系知川)における氷圧の実測値について、上記の計算法を適用してみる。測定は夜間に行なわれ、天候は曇であった。厚さ60cmの氷層の上に13cmの積雪があり測定器はダムと氷層との間に挿入された。測定時前後の気温はFig 5に示される。計算では近似的に雪の効果を無視し、氷厚より空気への熱移動は自然対流の条件である $E = 5 \text{ Btu/hr sq ft } ^\circ\text{F}$ であらわされると仮定した。氷厚の温度変化はFig 5に、この温度変化に伴う氷圧をFig 4に示した。氷圧ピークは、大体実測値に一致し、絶対値は幾分大きめに計算された。これは Monfore の実験に用いられた氷と金山ダムの氷の力学的性質のちがい、貯水池岸の形状の効果などの原因が考えられる。

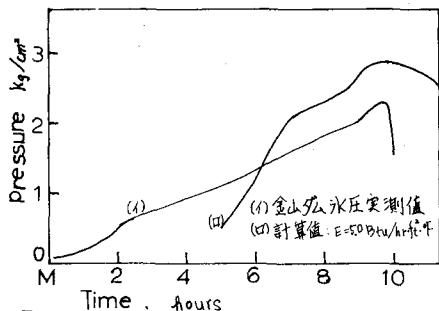


Fig. 4

参考文献

1. 北海道開発局石狩川開発建設部; 水資源開発に伴う結氷に関する技術資料, 昭和49年3月20日
2. Bernard Michel: Ice Pressure On Engineering Structures CRREL Report AD209625: June 1970
3. Monfore, G.E: Ice pressure against dams; Proc. of ASCE vol. 78 Tech. Separate No. 162

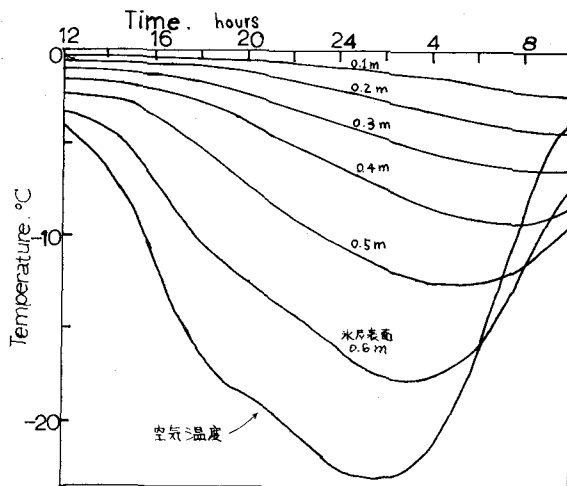


Fig. 5