

UDC 627.821.042.5

ダムに対する氷圧
温度変化の影響に関する研究

Ice pressure against Dams:
Studies of the effects of temperature variations,
by Bertil Löfquist

Proc. of ASCE, vol. 78 December, 1952
Separate No. 160

この論文は、スウェーデンの State Power Board で
行われた実験を述べたものである。

1. 従来の研究について 温度上昇によつて生ずる
永圧については、今まで種々の意見が発表されてい
て、初め永圧は、氷の圧縮強度と、その弾性によつて
決まると考えられていた。この考えによると氷圧は非
常に大きいものとなり、現在の多くのダムはこれに耐
えることはできぬはずであるが、実際には、こう云う
ことは見られない。これは、氷の塑性によつて氷圧が
かなり減ずるためで、氷の塑性は、温度上昇による氷
圧を無視することができるほど、大きいものであるこ
とがわかつている。

急激な温度上昇によつて生ずる氷圧は、厚さ 1m の
氷で最大 30 t/m であると発表されている (1922 年,
Nils Royen)。温度が直線的に上昇するときの氷圧に
ついては、1932 年、E. Brown と G. C. Clarke に
よつて実験されているが、天然の氷層では、温度上昇
は時間や氷の各部分によつて異なり、直線的ではない
ので、この実験結果を実際に応用することは困難であ
る。これに対して E. Rose と B. R. McGrath は、
温度上昇の曲線に沿つて積分し、氷圧を求める方法を
発表している。しかしながら、氷の中ではその塑性の
ために応力と歪とは比例しないこと、および、実際の
氷層においては熱膨脹を拘束する条件が時間とともに
変化することが考えられるから、この方法には数学的
にも物理的にも疑問があり正しくないと思われる。ま
たこの方法によると、氷圧と氷の厚さとの関係はほと
んど直線的であると認められるが、これについても疑
問の点があると考えられる。

このように、実験室における実験結果から氷圧を算
定しようとしても、氷の塑性および応力の分布を求め
ることがむづかしいので、よい結果をうることができ
ないのである。氷圧に関する問題を解決するには、現
場で氷圧を直接測定すること、実験室における実験と

を平行して行う方法が最もよいと考えられるのであ
る。

2. 実験室における実験 1943 年に行つた実験で、
実際の氷層における条件を低温室において再現し、氷
の温度と応力とを直接測定しようとしたものである。

直径 50 cm のコンクリート製円筒内で種々の厚さ
の氷をつくり、この氷の温度を上げてゆき、氷内の各
点の温度と応力(円筒の軸と直角方向)との変化を測
定したものである。

その結果は図-1~4 (原文 Fig. 3~6) のごとくで
あつた。低温室の温度を 17 時間に -30°C から $+6^{\circ}\text{C}$
まで上げたとき氷の最大圧力は約 20 t/m であつた。

図-1

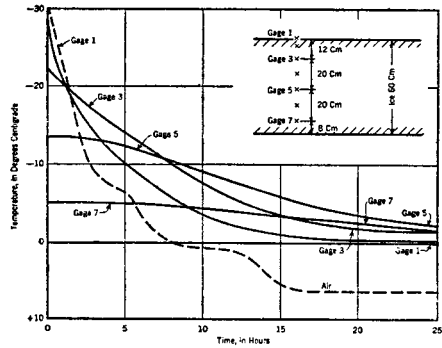


FIG. 3.—RATE OF TEMPERATURE RISE, TEST NO. 4

図-2

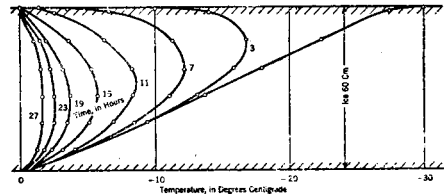


FIG. 4.—TEMPERATURE DISTRIBUTION, TEST NO. 4

図-3

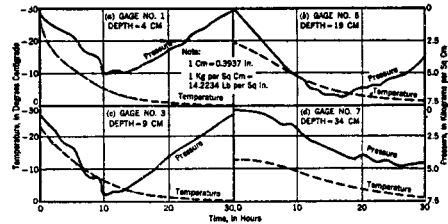


FIG. 5.—TIME VARIATION OF PRESSURE AND TEMPERATURE FOR GAGE NO. 4

図-4

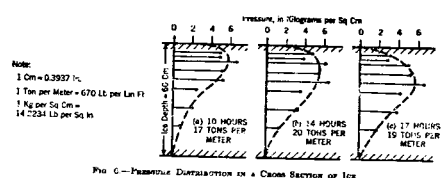


FIG. 6.—PRESSURE DISTRIBUTION IN A CROSS SECTION OF ICE

コンクリート容器が熱膨張しないとして計算すると、この値は約 25% 増しとなる。

氷の温度を下げると氷にクラックができ、このクラックのために、氷圧が小さくなる傾向があつた。図-3 の曲線の小さな凹凸は主としてこのクラックのためであると考えられる。また、円筒の軸方向の氷の膨脹が、コンクリート容器の壁と氷との附着によつて妨げられるから、氷の中央部に圧縮応力が、また表面では引張応力が水平方向に働く。このため実際の圧力分布は図-4 のごとくはつきりとした「梨型」ではないが、やはりこれに似たものであると考えられる。

図-5 (原文 Fig. 7) において、Brown-Clarke の曲線と本実験の曲線とがいちじるしく違うことがわかるが、これは実験方法が異なることと氷の種類が異なるためであると思われる。Brown-Clarke 曲線は、1 方向の応力条件のときであり、本実験は 2 方向であつた。

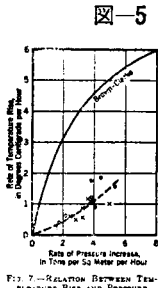


FIG. 7.—RELATION BETWEEN TEMPERATURE RISE AND PRESSURE RISE, TESTS 3 AND 5.

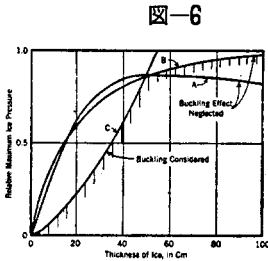


FIG. 8.—PROBABLE RELATION BETWEEN MAXIMUM ICE PRESSURE AND ICE THICKNESS.

また、氷が塩類を少しでも含んでいると、その氷の性質がいちじるしく変るからこの点注意しなければならない。氷は沸騰させて、水中の空気を追出したものを実験に用い、氷の圧縮強度は氷の表面に平行方向で約 50 kg/cm² であつた (0°C において)。

この実験によつて求められた氷圧の絶対量はあまり信頼しうる値ではないが、氷圧と氷の厚さとの関係について次のことが云える。氷圧は氷の厚さとともに多少増加し、厚さが約 50 cm のとき最大となりそれ以上では減少する。氷によつては、厚さが 50 cm を越しても氷圧は減少しないからわずか増すに過ぎない。これは、氷の厚さが 50 cm 程度になると氷の温度上昇が急に鈍るためと思われる。

図-5 によれば、氷の温度上昇の割合が大きくなると氷圧の増加も大きくなつている。

また、気温の上昇の状態と氷中の温度の変化とを知れば、微分方程式を用いて、氷の熱拡散係数を求めることができ、その値を求めたところ 0.0048 m²/hr であつた。これは従来測定された値とよく一致しているものである。以上のことから、気温の上昇の状態を知れば、氷の温度上昇の割合の平均を知ることができ

る。また図-1~4 から、氷圧は氷の平均温度が約 -4°C のとき最大となつていることが認められる。最大氷圧が -4°C のとき生ずると仮定して、氷の温度上昇の割合の平均から、各種の厚さの氷についても圧力の相対的關係を求めると図-6 (原文 Fig. 8) となる。図-6 から氷圧が約 50 cm のとき最大であることがわかる (Curve A)。氷厚がかなり大きくなると、最大氷圧は -4°C より幾分低い氷温で生じ、50 cm 以上の氷ではさらに低い氷温で最大氷圧が生ずると考えられるから、氷温が -4°C のとき最大氷圧が生ずると云う仮定は氷圧が 50 cm 以上のときは不適当となつている (Curve B)。

氷厚が約 50 cm のとき氷圧が最も大きいと云うことは、実験の結果、認められた氷の性質から云い得たにすぎないのであつて、現場の条件の下でもこのことが云えるかどうかはわからぬことである。しかしながら、現場において、厚さの小さい氷は日中温度が上るとともに氷圧も大きくなり、夕方再び温度が下り始めるときに氷圧が最大になると考えられること、および厚さの大きい氷では最大圧力に達するのに、20 時間以上の温度上昇が必要であると考えられること、この 2 点から現場においても、氷厚が 50 cm 程度の氷圧力が最も大きいと考えてよいのではないかと思われる。

3. 広い氷の挫屈 厚さが 20~30 cm の氷には、しばしば挫屈が生ずるが、50 cm ではまれであつた。この氷の挫屈から、弾性床上の版、梁の理論によつて氷圧を計算しうる。広い氷の挫屈荷重 H は次式で示される。

$$H = \sqrt{\frac{kd^3Em^2}{3(m^2-1)}} \dots\dots\dots (1)$$

k : 反力係数 (水の揚圧力), d : 氷の厚さ, E : 弾性係数, m : ポアソン比

氷の塑性が大きいため、 E の値を正しく求めることが困難であるから、 E の代りに変形係数 (Modulus of deformation) F を用いると (1) 式は次式となる。

$$H = \sqrt{\frac{kd^3F}{3}} \dots\dots\dots (2)$$

氷に対する揚圧力の研究から、 E と F の関係は次式で示すとき氷の撓みの測定値とよく一致することがわかっている。

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{E} + \frac{C\sqrt{h}}{t+1} \dots\dots\dots (3)$$

C : 常数, ton, m, °C, hr. の単位の時その値は 8×10^{-5} . h : 挫屈が起るまでの時間, t : 氷温。

$1/E$ は $1/F$ に比べて、ここでは無視する。前述の

ごとく、最大氷圧は -4°C で生ずるが、氷の歪は上下面において最も大きいから、 -2.5°C で最大氷圧が生ずると仮定する。

また、氷が挫屈するまでに要する時間は図-3 から 2~4 時間であるとすれば、厚さ 50 cm の氷において、 $t=2.5, h=3$ を (3) 式に入れると $F=30\,000\text{t/m}$ 、また、(2) 式より $H=35\text{t/m}$ となる。氷の挫屈荷重は普通の条件では 30~40 t/m であると考えられる。

図-6 の Curve C は氷厚と挫屈荷重との関係を示している。厚さが 50 cm 以下の氷では氷圧の量は挫屈荷重より決まり、50 cm 以上の氷では挫屈は生じないと仮定したとき、氷厚と氷圧との関係を示しているのが、図-6 の Curve A, B および C である。

最大氷圧を求めるこの方法について種々議論されているが、かなり正しい値が得られるようである。

4. 水位の変化による氷圧 氷が張っている河川等の水位が下ると、水によつて氷が支えられないため、氷が破壊される。水位が上ると、氷のクラックに再び氷ができる。これをくり返す際に氷圧が認められている。この水位の変化による氷圧は、広い面積に張つた氷では比較的小さいが、狭い面積の氷では温度上昇による氷圧と同程度であると考えられる。この氷圧は、現場の条件によつて、いちじるしく異なるため一般に水位の変化による氷圧は計算できない。しかし特殊な例では、(2), (3) 式を用いて計算できる場合もある。氷がアーチ状をなし、スパンが 20~40 m のとき、水位の変化による氷圧が最も大きくなるようである。

水位の変化による氷圧は、温度上昇による氷圧に比べて概して大きくはないが、その起る機会が多いようである。

なお、この論文の討議は June 1, 1953 号に掲げられるはずである。

(電力中央研究所 西沢紀昭)

UDC 666.97 : 536.421.4

普通のコンクリートの早期凍結

Early Freezing of Non-Air-Entraining Concrete, By Donald C. McNeese, Journal of the American Concrete Institute, December, 1952

従来コンクリートの示方書中にはいろいろ寒中コンクリート施工時の低温からの防護について述べられているが、それでは打ち込まれたコンクリートが何時、何度で凍結すればどのような害を及ぼすかということについて明確な解答を与えた論文はなかつたといつてよい。この問題は何時、何度でコンクリートを保護することが望ましいかという、寒中コンクリートの根本

問題に関係しているものであるが、以下に紹介する Mc Neese の論文はこの問題に対し、はじめて明確な解答を与えようと努めたものである。

McNeese はアラスカの空軍基地建設に当り、この問題がしばしば検討されたが、一致した意見が得られたので以下のような実験を行った。

配合 標準 I 型ポルトランドセメント 94 lb, 砂 270 lb, 砂利 415 lb, 水 56.4 lb, $w/c=0.6$

試験方法 コンクリートの温度 72°F で造つた標準円筒供試体 ($6'' \times 12''$) を打ち込み直後、打ち込み 1 時間後、3 時間後、6 時間後に 5°F , 15°F , 25°F の温度に凍結させた。所定の凍結期間を終えたコンクリートは 72°F で融解し、その後、標準養生を行つて材令 3 日、7 日、28 日で試験をした (表-1)。次には上の試験に際し、凍結中のどの段階において、害が与えられるかということが試験された (表-2)。

表-1 凍結した円筒供試体の相対強度

凍結温度 (F)	養生期間 (日)	成型後、時間を要して凍結させた場合のコンクリートの相対強度 (%)			
		0 時間	1 時間	3 時間	6 時間
5	3	44	50	63	81
	7	52	56	80	91
	28	54	58	72	83
15	3	51	60	71	92
	7	66	75	78	98
	28	60	71	89	98
25	7	73	—	96	—

表-2 凍結の各段階に低温 (5°F) から取り去られた円筒供試体の強度

低温状態にあつた時間	低温から取り出される前、この時を基準として測つた時コンクリート中の温度が 32°F になつた時間	7 日強度 (psi)	標準養生の場合の強度に対する相対強度 (%)
	標準養生	2 590	100
2	0	2 560	100
3	1	2 300	89
4	2	1 610	62
4.5	2.5	1 550	60

表-3 低温でつくり凍結した円筒供試体の相対強度

凍結温度 (F)	養生期間 (日)	標準養生の場合の強度に対する相対強度 (%)
25	3	51
	7	53
5	28	51
	3	44
-15	7	57
	28	52
-15	3	62
	7	57
	28	56

最後に、低温の材料でつくられたコンクリート（打ち込み時の温度 40°F）を打ち込み後、ただちに凍らせてその結果を検討した（表-3）。

試験結果 試験結果はそれぞれ表-1~3 のとおりである（養生期間には低温にあつた時間を含まない）。

結論として次のような事項があげられる。

1. 凍結による圧縮強度の損失と (a) 打ち込み後何時凍結されたか、また (b) 凍結時の温度は何度であつたかの両条件とは明確な関連を有している。

2. 強度損失は標準養生の場合に比し、約 50% にも及ぶが、この 50% という値は、本論文にあげたような凍結試験においては大体最大限の値を示すものと思われる。

3. 打ち込み温度が 75°F のコンクリートに凍結による顕著な害を与えるには、打ち込み後 6 時間以内に、酷寒にさらさなければならない。

4. 打ち込み温度が 40°F であれば 25°F 程度の軽い凍結で強度損失を 50% にも達せさせることができる。

5. 一旦コンクリートが完全に凍結したら、その後何度に下がつたか、またどれだけの間凍結していたが、の 2 条件は強度にあまり影響しない。

6. またコンクリートがプラスチックな間に凍結し、その後 75°F で融解した場合でも強度の損失は 45% にのぼる。

（鉄道技研 樋口芳朗）

土木学会刊行物一覽

土木工学論文抄録 第3集	A 4 判 230頁	実費 500円	(送料 60円)
〃 〃 〃 第4集	A 4 判 173頁	〃 450円	(〃 60円)
土木学会論文集 第3号	B 5 判 183頁	〃 160円	(〃 30円)
〃 〃 〃 第4号	B 5 判 134頁	〃 200円	(〃 30円)
〃 〃 〃 第5号	B 5 判 140頁	〃 250円	(〃 30円)
〃 〃 〃 第6号	B 5 判 140頁	〃 250円	(〃 30円)
〃 〃 〃 第7号(仁杉博士)	B 5 判 33頁	〃 60円	(〃 10円)
〃 〃 〃 第8号(国分博士)	B 5 判 24頁	〃 50円	(〃 10円)
〃 〃 〃 第9号(小西博士)	B 5 判 9頁	〃 20円	(〃 10円)
〃 〃 〃 第10号(岡本博士)	B 5 判 18頁	〃 40円	(〃 10円)
〃 〃 〃 第11号(林 泰造)	B 5 判 ^英 文 11頁	〃 50円	(〃 10円)
〃 〃 〃 第12号(沼田・丸安・黒崎)	B 5 判 26頁	〃 60円	(〃 10円)
〃 〃 〃 第13号	B 5 判 54頁	〃 80円	(〃 10円)
〃 〃 〃 第14号	B 5 判 ^英 53頁	〃 120円	(〃 10円)
〃 〃 〃 第15号(結城博士)	B 5 判 ^英 文 7頁	〃 60円	(〃 10円)
〃 〃 〃 第16号	B 5 判 66頁	〃 120円	(〃 10円)
コンクリート標準示方書(昭和26年度)	B 6 判 266頁	〃 180円	(〃 20円)
水理公式集	A 5 判 167頁	〃 200円	(〃 20円)
最新土質工学	B 5 判 118頁	〃 150円	(〃 20円)
第6回年次学術講演会講演概要	B 5 判 100頁	〃 150円	(〃 20円)
第7回	〃	〃 200円	(〃 20円)
第8回	〃	〃 150円	(〃 20円)
第9回	〃	〃 150円	(送料共)
昭和26年夏季講習会パンフレット	B 5 判 66頁	〃 150円	(送料共)
Ⅰ コンクリートとダム	〃	〃 120円	(〃)
Ⅱ 橋	B 5 判 92頁	〃 200円	(〃)
昭和27年夏季講習会パンフレット	〃	〃 150円	(〃)
建設機械化	B 5 判 176頁	〃 300円	(〃 30円)
土木製図基準(Ⅰ)	B 5 判 46頁	〃 200円	(〃 30円)