

橋脚による氷盤の a r c h 形成条件に関する実験的研究

Experimental study on the conditions
of arch formation at bridge piers

榎 国夫*・國松 靖**・佐伯 浩***

By Kunio ENOKI, Sei KUNIMATSU and Hiroshi SAEKI

A model study of the formation of ice arching at the upstream faces of rounded bridge piers was conducted in a hydraulic flume. Polypropylene plastic was used to simulate square ice floes (10mm in thickness and 100mm in width). It was found that the conditions of ice arch formation at bridge piers were determined by ice covered ratio, ratio of span length and size of ice floes, and V^2/gh (V : surface velocity, h : ice thickness).

Keywords: ice floe, bridge pier, ice arching

1. まえがき

流れと橋梁橋脚の相互作用に関しては、我が国においては、橋脚周囲における局所洗掘が重要となっている。これに対して、結氷する河川に建設される橋脚の設計においては、氷盤が橋脚や上部工に及ぼす影響について十分な注意がはらわれねばならない。カナダ、米国、それにソ連の設計示方書においては橋脚に及ぼす氷の影響を特に考慮している。その中で橋脚の設置位置、設置間隔については、上部工や基礎工だけでなく、氷盤のことも配慮すべきことが述べられている。カナダや米国それにソ連では日本と異なって上流部から河川氷の融解が始まる河川が多い。それらの河川では、上流部から流下する氷盤が下流部の未融解の大氷盤の下にたまり、ついにはIce Jamを形成しそれが融雪期の水害をもたらしたり、場合によっては橋脚によってIce Jamを誘発しそれが洪水を起こしたり、上部工を持ちあげたりすることがあり、その種の橋梁の被害も数多く報告されている。

* 正会員 秋田工業高等専門学校 教授

(〒011 秋田県秋田市飯島文京町1.1)

** 北海道大学学生 工学部土木工学科

(〒060 札幌市北区北13条西8丁目)

*** 正会員 工博 北海道大学教授 工学部土木工学科

(〒060 札幌市北区北13条西8丁目)

Smith¹⁾はカナダのサスカトゥーン市の近郊を流れる南サスカトゥーン川を横断する橋梁のスパン割に当たって、詳細な模型実験を行ってそのスパン割に当たっての基礎資料としている。

本研究は橋脚によって流下する氷盤が阻止され、アーチを形成する条件を調べたものであるが、これはIce Jamを起こさないための橋梁のスパン割に決定に役立つとともに、氷盤移動を制御するための施設の配置を決定するのにも役立つと考えられる。

2. 実験方法

氷盤のarchingに関する実験は、図-1に示すように長さ20.0m、深さ0.5m、幅2.0m可変勾配水路を用いた。上部端より6.3mの水路上部にこの実験に使用した模型氷を供給するフィーダーを設置し、1600枚の模型氷を0~30cm/sec の速度範囲で自由に送り出すことができるようになっている。このフィーダーの先端より

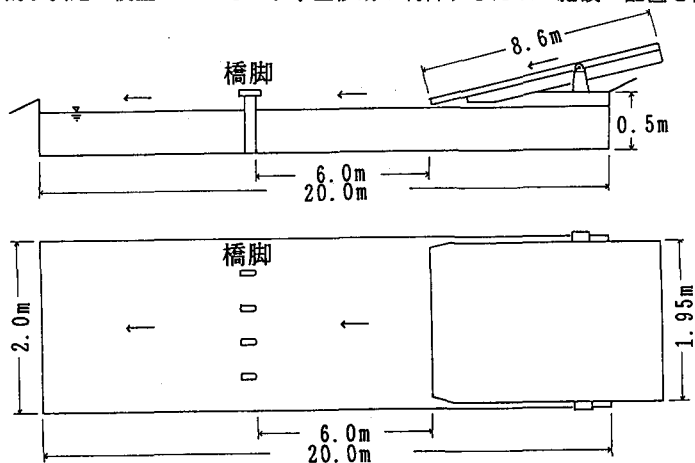


図-1 arching 実験水路

6m下流の位置に模型橋脚を設置した。この模型橋脚は厚さ5mmの鋼鉄板で幅5cm、長さ10cm、高さ50cmの鋼鉄の箱を作り、橋脚の上流側に直径5cm、高さ50cmの円柱の縦割りにした形の物をモルタルで作りこれと鋼鉄箱をシリコンシーラントで接着した。これにより、模型橋脚を流体中に設置した場合橋脚の粗度や、流体から受ける抵抗がより実物の橋脚のそれに近づかせることができた。また、この実験においてはフルード則に従って縮尺1/50程度としているので実験に用いた模型橋脚は、実規模では幅2.5m、長さ5m程度の通常世界的に用いられている橋脚の寸法に相当する。また使用した模型氷は、氷の密度と同じ0.9gf/cm³のポリプロピレンを用いた。形状は10cm角の正方形で厚さは1cmである。このポリプロピレンの板同士の摩擦係数は氷相互の動摩擦係数0.1~0.2とはほぼ同じであった。(乾燥状態で 0.188、水中で0.146) 実験で用いた流速は3.27, 5.69, 5.73, 8.17, 8.73, 10.58 14.61, 20.24, 30.0cm/secの10種類であり、1/50縮尺とすると実規模でいうと約23~210cm/secの範囲に当たる。また、フィーダーから水路に放出する模型氷の水面を覆う割合(カバー率)はフィーダーの送り速度を調整し13%から100%の間で11種類に変化させて実験を行った。橋脚の心間距離は、25, 30, 40, 60cmの4種類であり径間距離はそれぞれ20, 25, 35, 55cmになる。1つの実験でまず表面流速を決め、これに対して模型氷が橋脚に最初に達した時間を基準に観測はなされた。実験に使用した諸元を図-2に示す。ここで、V: 表面流速 Q: 模型氷のカバー率 b_1 : 径間距離 b_2 : 心間距離 B: 水路幅 h: 模型氷の厚さとする。実験観測の一例を図-3に示す。図の上側には実験条件が与えられている。流量、水深、表面流速、橋脚の径間距離、心間距離、模型氷カバー率である。今回の実験では流量28 l/sec、水深25.98cm、表面流速 5.69cm/sec、模型氷の幅10cm、径間距離35cm、模型氷カバー率100%ということになる。中央部に左岸側から橋脚に番号を付け、この部分で出来るarchを時間経過とともにスケッチしており、同時に写真撮影、ビデオ撮影も行っている。さらに表-1は左岸から番号を

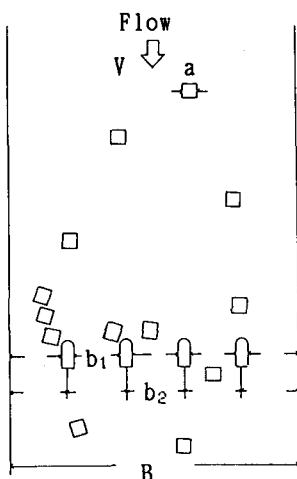


図-2 実験の諸元

つけ各径間を模型水が何枚通過していったかを5分間隔でカウントしたものである。このデータと図-3のスケッチとを対比させると、模型水がどのような状態でarchを作り、またそのarchが時間的にどのように変化していったか明白に読みとることが出来る。また、表-1のデータで0~5分の項に数字が和の形で入っているのは最初のarchが出来るまでに径間を流出した模型水の数とその後5分までに流出した数とを示している。本実験の例では最初の模型水が橋脚に達した後、2分後にはじめて弱いarchが出現しこの間に橋脚0~1間では74枚が流出し、その後3分間で22枚流出して行ったことからこの部分ではあまり安定したarchが出来なかったことを示している。本ケースは大部分の模型水が流出するまでの33分間続けられた。以上に述べた様に、arch形成の過程は、経過時間とともに刻々と変化することが明かとなった。よって本研究では、次節で述べるように3つの定義に分けて、arch形成の条件を調べた。

3. 実験結果と考察

40例を越す実験を行ったがarchができるか否かを前述のデータより判定してみる。一度形成されたarchが10数分以上もほとんど変化しない場合、極めて安定したarchが出来た例でarchingと分類する。逆にまったくarchingが出来ないか、ほんの数秒か長くても20~30秒間archが出来るごく弱いarchが出来る例はno archingに分類される。それ以上数分のオーダーでarchができる状態をtransitive archingとし、arching, transitive arching, no archingの3つに分類し検討してみる。ただし、このtransitive archingは arching か no archingのどちらかに分類するとすれば弱いarchingではあるが数分間は存在することからarchingの方に分類されるべきものであろう。

流量 = 28ℓ/s a=10cm
水深 = 25.98cm b₁=35cm
平均流速=5.69cm/s Q_i=100%

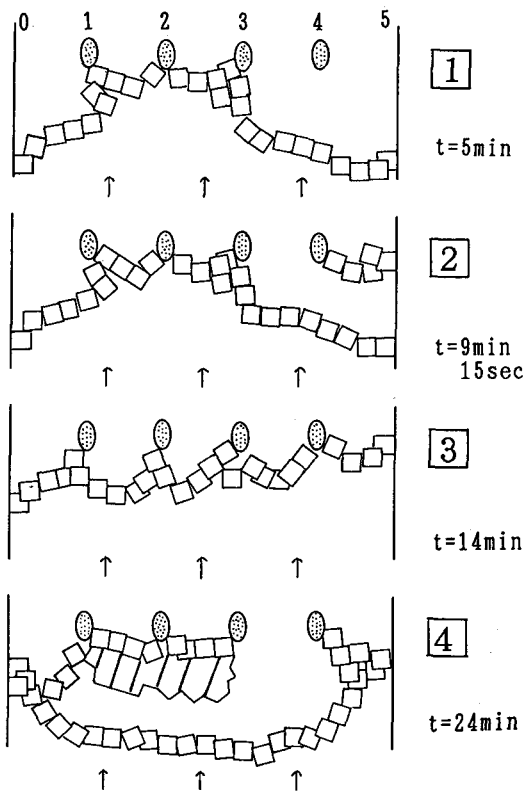


図-3 実験例

表-1 5分間の流出枚数

径間 時間(分)	0~1	1~2	2~3	3~4	4~5	TOTAL
0~5	74+22	52+0	32+3	36+48	66+34	367
5~10	0	0	0	43	65	108
10~15	24	32	16	5	0	77
15~20	0	9	0	16	2	27
20~25	7	6	69	70	0	152
25~30	1	11	9	6	13	40
TOTAL	128	110	129	224	180	771

arching あるいは no archingを識別する諸元として、Calkinsの成果に基づいて次のような関係を与える。

$$A = f(Q_i, a, b_1, b_2, B, V, h, h', g, \rho_w, \rho_i, \mu) \quad \dots (1)$$

A : 識別関数

h' : 水深

g : 重力加速度

ρ_w : 水の密度

ρ_i : 氷の密度

Q_i : 模型氷のカバー率

μ : 摩擦係数

これらの諸元を無次元化した型に書き換えると

$$A = f\left(Q_i, \frac{a}{b_1}, \frac{b_1}{B}, \frac{\rho_i}{\rho_w}, \frac{h}{h'}, \frac{\mu a^2 g}{V^2 h}, \frac{V^2}{g h}, \frac{b_1}{b_2}, \frac{a}{h}\right) \quad \dots (2)$$

ここで今回の実験条件より定数となる項を考慮すると、(2)式は

$$\frac{a}{b_1} = F\left(Q_i, \frac{b_1}{B}, \frac{\mu a^2 g}{V^2 h}, \frac{V^2}{g h}\right) \quad \dots (3)$$

で表される。ただし、右辺第3項に関して我々の過去の報告³⁾で述べたように今回の実験範囲では、摩擦係数： μ はほとんど一定であるので因子的には第4項と同じ性質を持つと考えられ、結果として a/b_1 は(4)式で示される3つの因子の関数となる。

$$\frac{a}{b_1} = F\left(Q_i, \frac{b_1}{B}, \frac{V^2}{g h}\right) \quad \dots (4)$$

(4)式を用いて実験結果を図-4に示す。縦軸には b_1/B をとり横軸には $V^2/g h$ をとって、 a/b_1 毎にグラフにプロットしたものである。この図-4にプロットされた実測値はいずれも模型氷のカバー率が100%の場合である。明らかに安定したarchができるarching zoneとarchのできない no arching zoneの間の transitive arching を含めた arching と no arching の間には明らかに限界が存在していることが判る。また、 $V^2/g h$ に比例して arching の限界値が上昇していくことが判る。経間に較べて氷盤の代表長さが大きい程、氷厚が一定の場合流速が大きい程、arch が形成されやすいことを示している。この arching の限界値を調べるため、氷のカバー率を種々に変化させて実験を行った。図-5-(a)は模型氷のカバー率 Q_i を縦軸に模型氷の幅を経間距離で除した a/b_1 を横軸にとり $V^2/g h = 3.35 \times 10^{-2}$: ($V = 5.73 \text{ cm/sec}$) の実測値をプロットしたものである。黒くぬりつぶした点は arching、白抜きの点は no arching を表している。これらの実測値より限界線を描いた。曲線の右側では arching zone 左側は no arching zone で、曲線が arching の限界を示している。模型氷の厚さは1cmである。図-5-(b)は図-5-(a)と同じ条件で $V^2/g h = 7.78 \times 10^{-2}$: ($V = 8.73 \text{ cm/sec}$) の例であり、図-5-(c)は $V^2/g h = 1.14 \times 10^{-1}$: ($V = 8.73 \text{ cm/sec}$) の例であり、図-5-(d)は $V^2/g h = 9.18 \times 10^{-1}$: ($V = 30.0 \text{ cm/sec}$) の例であり、図-5-(e)

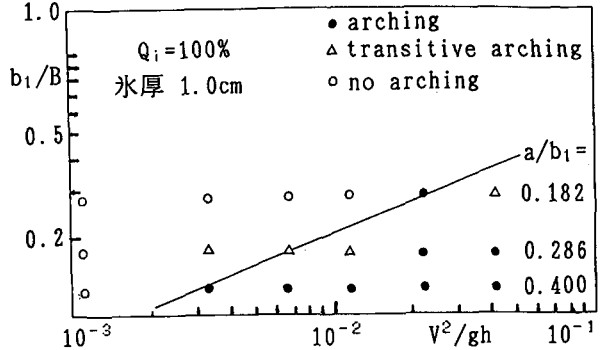


図-4 archingの限界-1

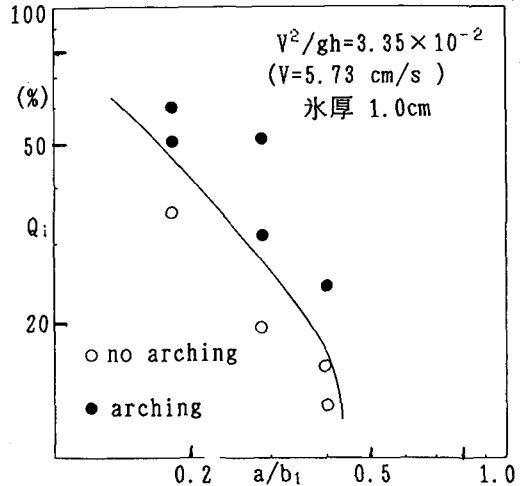


図-5-(a) archingの限界-2

はそれらの曲線を1つの図にまとめて描いたものである。明らかに a/b_1 が大きくなるにつれてカバー率が大きい程、 V^2/gh が小さい程 arching がより顕著に現れることがわかる。図-5-(f)は、特別に厚さ2cm模型氷を作り、表面流速を15.1cm/secとして、実験を行った例で、この実験では $V^2/gh = 1.16 \times 10^{-1}$ となり、図-5-(c)の実験で与えられた $V^2/gh = 1.14 \times 10^{-1}$ とほぼ同じ値をとる。図-5-(c)、図-5-(f)から見られるようにその arching の限界もほとんど同じであることがわかり、このことにより模型氷の厚さによる形状効果の差異はほとんど無く、arch 形成領域は Q_i 、 V^2/gh 、 a/b_1 で表されることを示しているし、フルード相似則を満足することがわかる。ここで我々の実験結果と Calkins⁴⁾の実験結果を図-5-(g)に示す。我々の結果は V^2/gh が 7.78×10^{-2} と 1.14×10^{-1} との例を実曲線で示しており、Calkins の場合は V^2/gh が 1.01×10^{-1} の実験例を破線で示しており、我々の結果からみると arch が出来やすい領域側に寄っていると思われる。これは1つには今回の実験では arch 形成の条件を数分間安定した状態を基準にしたのに対して、Calkins の場合はたかだか30sec間程度の安定を基準にしているため、arch が生じやすい領域に片寄ったと考えられる。また、Calkins の実験では、氷厚は6.4mmで一定であるが、大きさが37mm角と74mm角の2種類ありこれを混合して、実験を行ったときの模型氷の代表長さ $\bar{a}$ を

$$\bar{a} = \frac{n_1 a_1 + n_2 a_2}{n_1 + n_2}$$

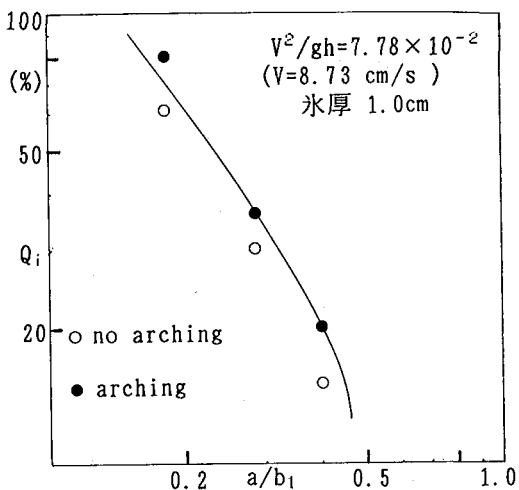


図-5-(b) archingの限界-2

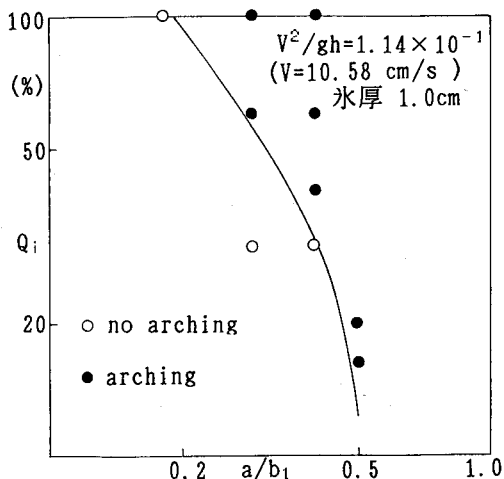


図-5-(c) archingの限界-2

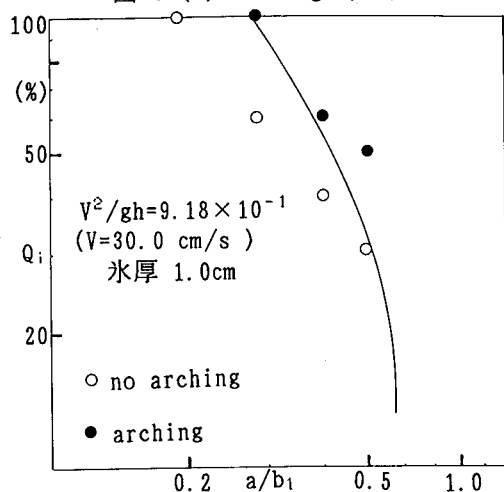


図-5-(d) archingの限界-2

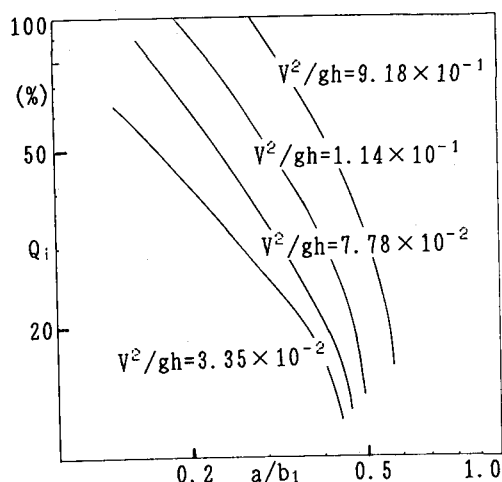


図-5-(e) archingの限界-2

で表している。ここで a_1 , a_2 は小さい方と大きい方 100 の模型氷の代表的長さであり、 n_1 , n_2 はそのときのそれぞれの枚数を示している。実験的にみるとこの $\bar{a}$ の扱いの妥当性の検証が望まれ、weight のかけ方に一工夫する必要があり、これが実験結果の差異につながったと思われる。

4. 結論と今後の課題

以上の事から、以下の結論が得られた。

(1) 橋脚全面の水面における arch 形成の条件は模型氷が水路表面を覆う割合 (カバー率) : Q_i 、模型氷の代表的長さ a と橋脚の径間距離 b_1 との比 : a/b_1 、それに表面流速 V と重力加速度 g 、氷厚 h の無次元量 : V^2/gh によって決定されることが明らかになった。

(2) 模型氷の厚さが 1cm の場合と 2cm の場合に対して、 V^2/gh をほぼ同じ値にとって実験したところ arch 形成の限界がほとんど同じ結果となった。このことから、氷厚に対するフルード則が明らかに満足されていることが判った。

(3) Calkins の実験結果との比較検討によって arch 形成の判定条件が arching の限界を決定する際、重要な要素となってくることが判った。

(4) また著者等の結果と Calkins の結果の比較から大きさの異なる模型氷を混合して実験を行う場合、その中の大きなサイズのものに結果が引きずられる現象が見られるが、この混合した模型氷の代表長さの扱いの妥当性の検証が必要である。

以上の結果から判断して本研究成果の実際の適用に際しては、氷盤の厚さ、大きさ、形状等の詳細なデータの取得が是非とも望まれるところである。

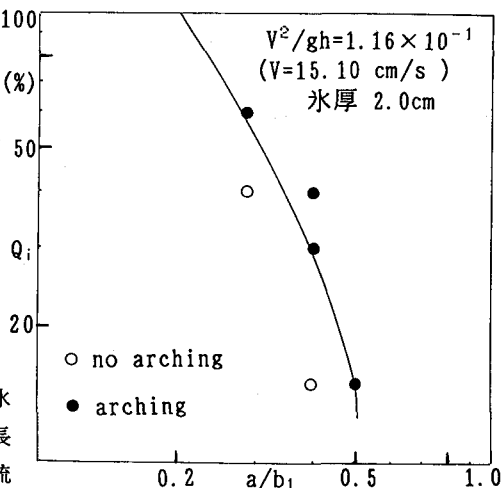


図-5-(f) arching の限界-2

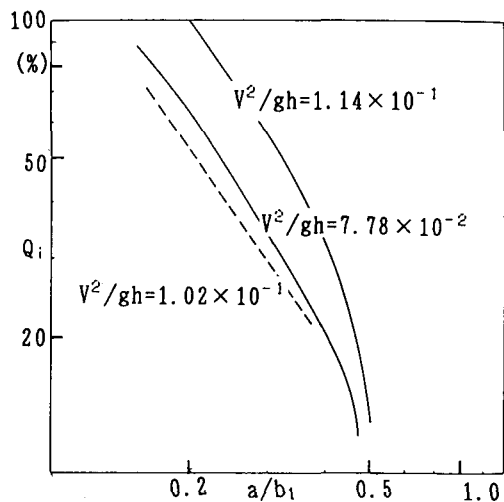


図-5-(g) arching の限界-2

Calkins の結果 (破線) との比較

参考文献

- 1) Smith, C. D "Model Study of Ice Movement at Idylwyld Traffic Bridge"
Pro. of IAHR International Symposium on Ice, Vol. 1 1981, PP436-447
- 2) 榎, 國松, 佐伯 等 "氷盤のアーチ形成に及ぼす橋脚の影響"
寒地技術シンポジウム, Vol. 7 1991, PP632-637
- 3) 榎, 國松, 佐伯 等 "新型 Ice Boom の開発"
寒地技術シンポジウム, Vol. 7 1991, PP638-643
- 4) Calkins, D. J "Arching of Model Ice Floes at Bridge Piers"
Pro. of IAHR International Symposium on Ice, Vol. 2 1988, PP495-507