

橋脚形状が氷盤のアーチ形成に及ぼす効果に関する研究

Study on the Condition of Arch Formation due to Ice Floes at Bridge Piers

原 文宏*・榎 国夫**・佐伯 浩***

By Fumihito HARA, Kunio ENOKI, Hiroshi SAEKI

This research clarified the influence of cross-sectional shape of bridge piers and the inclination of bridge nose in the arch formation by the movement of ice sheets at the bridge piers through a systematic experiment. In addition, we made clear by an experiment that the sudden increase in river water at Kotonihassam River in Sapporo on Feb. 22, 1994 was due to the formations of the arch of ice sheets and ice jam and following collapse at the bridge pier.

Keywords: ice floe, arch formation, ice jam, bridge pier.

1. はじめに

寒冷地における結氷する河川に建設される橋脚の設計においては、氷盤と橋脚間の相互作用に対して十分な配慮がされねばならない。米国、カナダそれにロシア等の寒冷地諸国の設計示方書においては、上部工、下部工、基礎工の設計に当たっての構造、水理、材料等に係わる諸規定だけでなく、橋脚に及ぼす氷の影響も考慮している。氷に対する配慮として、橋脚にかかる氷力については比較的详细に記述されているが、橋脚の設置位置、設置間隔については、氷盤との相互作用に配慮すべきことが述べられている程度で、それらを決定するための具体的な内容は述べられていない。

北半球に位置する寒冷地諸国の河川は、日本と違って上流部からの氷の融解が始まる河川が多い。それらの河川では、流下する氷盤が下流の未融解大氷盤や橋脚部に発生した氷盤のアーチによってのトラップされ Ice Jam を形成し、周辺地域に水害をもたらすことが知られている。そのため、このような地域の橋梁の計画に際して、模擬氷盤を用いて模型実験を行ない橋脚の位置と間隔を決める例もある¹⁾。

* 正会員 北海道大学大学院工学研究科博士課程 土木工学専攻
(〒060 札幌市北区北13条西8丁目)

** 正会員 秋田工業高等専門学校教授 物理科
(〒011 秋田市飯島文京町1-1)

*** 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)

過去の氷盤によるアーチ形成に関する研究としては、Calkins²⁾ が1スパンだけに注目してスパン長や氷盤条件を変化させて模型実験を行っている。また、榎等³⁾ は我が国でよく用いられる小判型断面の模型橋脚を使用して、多スパンの橋梁についてアーチ形成条件に関する実験を行ない、その結果を報告している。Babic 等⁴⁾ や Melanie等⁵⁾ は個別要素法により河道内両岸が支点となることができるアーチ形成のシミュレーションを行なっているが、その結果は既存の実験結果とは大きく異なっている。

本研究では、橋脚の断面形状及び橋脚Noseの傾斜角がアーチ形成に及ぼす影響を、系統的な実験から明らかにするとともに、1994年2月22日に札幌市近郊を流れる琴似発寒川で発生した流量の急変が、橋脚位置での氷盤によるアーチ形成に起因するIce Jam の発生と崩壊によって説明されることを、実験結果を基に検証した。なお、氷盤によるアーチ形成とは、流下する氷盤群がある瞬間に橋脚位置でほぼ水面の高さでアーチ状に組み合わせられ、橋脚を支点にアーチ状の氷盤をかいして流体力との間に平衡状態が成立し、氷盤が静止する状態をいう。その後、流れてくる氷盤がアーチ形成部にせき止められ、流体抵抗が大きくなるにしたがって氷盤が水面下へ潜りこんだり、水面上に積み上がってJam 状の塊まりとなることをIce Jam という。つまり、アイスジャム発生のかっかけの一つが氷盤によるアーチ形成である。

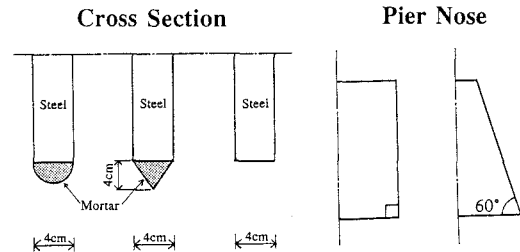
2. 実験方法

実験は榎等³⁾ と同様の長さ20.0m、深さ 0.5m、幅 2.0m 可変勾配水路を用いた。氷盤の大きさ及び厚さと橋脚の幅から、フルードの相似則より、おおよそ1/50となっている。模型橋脚は厚さ 5 mm の鋼鉄板製の幅 4 cm、長さ10cm、高さ50cmの箱にモルタルで半円形と三角形のNoseを取付けたものと、なにも取付けない矩形の3タイプを使用した。水路上に模型水を供給するフィーダーは、0～30cm/secの速度範囲で模型氷盤を送り出すことが出来る。氷盤の移動速度は2段階を設定し比較した。フィーダーから水路に放出する模型氷が水面を覆う割合（Q：カバー率）は、フィーダーの氷盤を送り出す速度を調整し10%～100%の間で変化させて実験を行った。橋脚の位置に到達するまでの氷盤の移動速度と表面流速は、氷盤のカバー率に関係なくほぼ同じ速度となった。主に実験を行った橋脚間の心距離（ b_2 ）は30, 40, 50cmの3種類で行った。橋脚の純間隔は b_1 で表す。

模型氷盤は一辺が10cmの正方形で厚さ1 cmである。1回の実験に使用した模型氷盤は約1,600枚で、模型氷盤には自然水の密度と同じ0.9 g/cm³のポリプロピレン板を用いた。ポリプロピレン板同士の摩擦係数は、自然氷相互の動摩擦係数0.1～0.2 とほぼ同じであった（乾燥実験状態で0.188、水中で0.146）。

3. 橋脚形状のアーチ形成に及ぼす影響

アーチ形成の判定は以下の基準による。水路全幅に対し一度形成されたアーチが10数分以上変化しない場合、極めて安定したアーチが出来た例で archingと分類する。逆にまったくアーチが出来ないか、20～30秒間出来るごく弱いアーチはno archingに分類した。数分間アーチができる状態を transitive arching とし arching、transitive arching、no archingの3つに分類し検討した。橋脚形状のアーチ形成に与える影響を検討するために橋脚Noseの傾きが90° と60° の場合について、それぞれ半円形、三角形、矩形の3種類の



図－1 橋脚の形状

断面で実験を行った。氷盤の移動速度は10cm/sec程度と5 cm/sec程度の2種類で径間は主に26、36、46cmの3種類で行った。橋脚形状を図－1に示す。本実験では厚さ1 cm、1辺10cmの正方形ポリプロピレン板を用いたが模型氷の厚さや辺長を変えてもHara等⁶⁾の結果よりアーチ形成条件は、著者等が用いる無次元量で示せば同一の結果となることが確認されている。また、アーチ形成条件はCalkins²⁾、榎等³⁾の結果に基づき

氷盤のカバー率 Q 、氷盤の辺長 a と橋脚の純間隔 b_1 の比 a/b_1 及び氷盤の移動速度 V と氷厚 h で表されるフルード数を2乗した値 V^2/gh で示した。長さの基本量として氷厚 h をとったのは、氷盤によるアーチ形成が橋脚と氷盤、氷盤と氷盤の接触面の摩擦力に強く依存するため、接触面に直接関係のある厚さが重要となる。また、水面変動に伴う氷盤の上下動の影響も強く受けることによるためである。

3.1 橋脚Nose90° の場合のアーチ形成限界曲線

橋脚Noseが90° の各断面形状に関する実験結果を図-2に示す。図からも明らかのように各断面共通して橋脚の純間隔 b_1 が広くなるにしたがって、archingをおこす氷盤のカバー率が100%に近くなり、archingを起こしづらくなる傾向を示している。断面形状による違いを見るために氷盤の移動速度ごとに3種類の断面のアーチ形成限界曲線を重ね合わせると断面によるアーチ形成の違いはほとんどない。

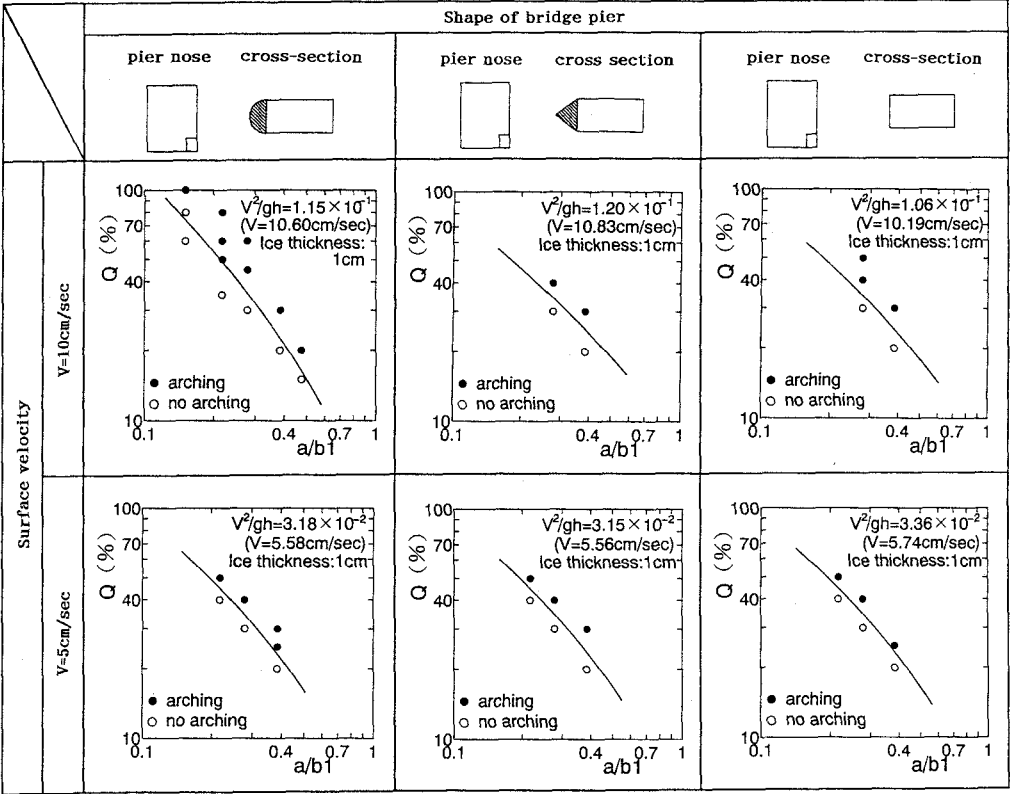


図-2 橋脚Nose90° の時の各断面ごとのアーチ形成限界曲線

3.2 橋脚Nose60° の場合のarching 限界曲線

橋脚Noseが60° に傾斜した場合の各断面の実験結果を図-3に示す。橋脚Noseが90° の場合と比べて各断面のアーチ形成限界曲線に多少違いがみられる。半円形の断面に比べて、三角形、矩形断面の限界曲線がやや左下方にあり、同一径間で同じ氷盤の大きさであれば、三角形や矩形断面の方が半円形断面に比べてアーチを起こしやすい傾向を示した。また、橋脚Noseの傾斜がアーチ形成に与える影響については図-2、図-3より判断してNoseに傾斜があった方がやや archingが起こりやすく、特に三角形や矩形断面にこの傾向が見られる。

また、実験中の観察の中で、arching が発生した時のアーチの形状が、橋脚断面の形によってかなり異なることが明らかとなった。模型氷盤が正方形のため、橋脚Noseの形状が直線的な面を持つ三角形や矩形断面の場合は氷盤の面と橋脚Noseの面が一致するような形でアーチ形成する場合が多く、設置幅が広く摩擦力も大きくなるために、しっかりとしたarchを形成すると推測される。

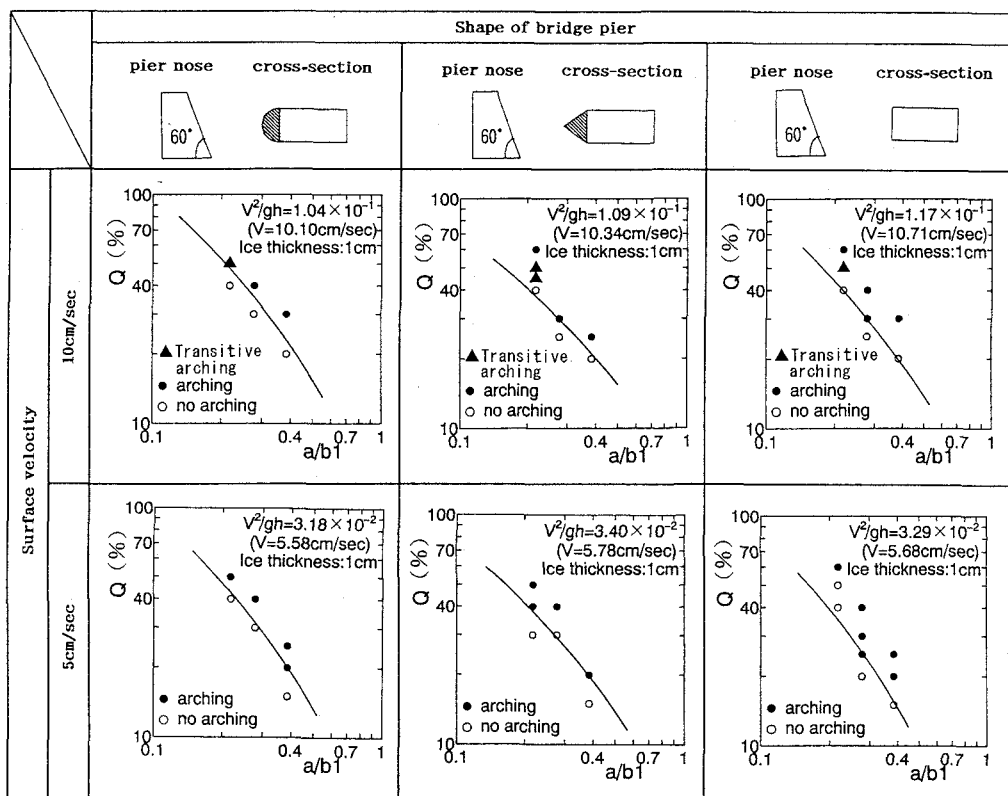


図-3 橋脚Nose60°の時の各断面ごとのアーチ形成限界曲線

3.3 実験結果のまとめ

本実験の結果を以下にまとめる。①本実験においては、断面形状がアーチ形成に与える影響は小さいと考えられる。②強いといえば、断面形状が半円形に比べて三角形や矩形の方がarchingを起こしやすい傾向が見られた。これは、使用した模型水が正方形であったことから橋脚面との接点が円形の場合は点的なのに対し、三角形や矩形は面的な接点をもつためと考えられる。したがって、今後は水が特に厚い場合や形状が四角形でないものについても検討の必要性があると考えている。③橋脚Noseが傾斜した場合、90°に比べて一般的にarchingが出来やすい傾向がある。この傾向は三角形や矩形断面でやや顕著で、流速が遅いほどこの傾向があらわれる。これは橋脚Nose前面では水位が上昇するため、氷盤がNose上に乗り上げた状態となり、直立Noseと比べて安定した状態を保ち易いことによると思われる。④現在までの実験結果を使って、流速ごとの小判型橋脚についてアーチ形成限界曲線のチャートを作成した(図-4)。この図を利用することによって、氷盤の大きさa、氷厚h、移動速度Vそれに水面のカバー率を与えることによってアーチを形成しない橋脚スパンを大まかに判定することができる。

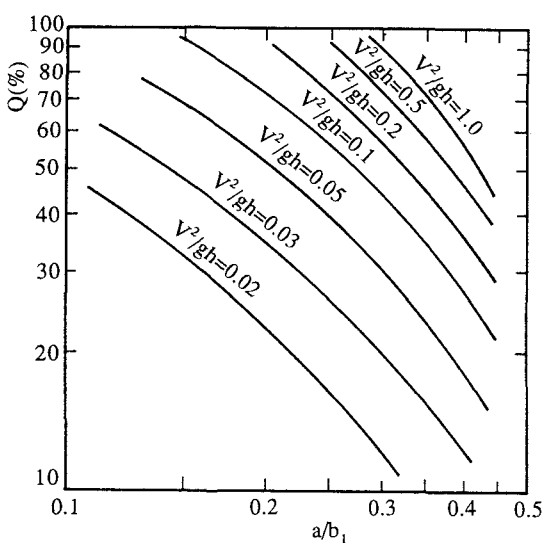


図-4 流速ごとのアーチ形成限界曲線

4. 琴似発寒川における橋脚位置での氷盤によるアーチ形成の可能性

1994年2月21日から22日にかけて、北海道に2月としては異常に大量の雨を降らせた。そのため、札幌市では中小河川が氾濫し住宅や店舗が床上、床下浸水したほか道路も冠水した。このような状況の中、札幌市の北西部を流れる琴似発寒川で、22日午前9時45分頃、河道内で魚道工事をしていた作業員が急激な増水によって流され行方不明となった。同僚の証言によると作業員が流される少し前の工事現場は、ほとんど水が流れておらず、この出水が急激に発生したことを裏付けている。現地調査結果では、上流の長栄橋位置で大量の氷盤と雪によって河道が閉塞をおこした後、決壊して一気に流出したと考えられる。この閉塞の要因となったのが長栄橋の橋脚と氷盤によるアーチの形成によるIce jamである可能性が高く、現地調査と図-4を利用して、その発生の有無を検証する。図-5に長栄橋の概略図を示す。

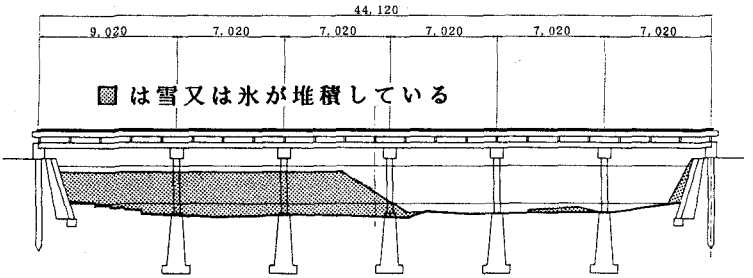


図-5 長栄橋の概略図

4.1 氷盤の性状

現地で流下してきた氷盤の形状及び厚さについての調査を行った。氷盤の形状としては、4角形や5角形が多く、長方形に近い形状のものが多かった。調査を行った氷盤の数は71個である。図-6は、氷盤の面積を計算し、それを正方形換算した時の氷盤の1辺の長さの分布である。100～140 cmの長さをもつ氷盤の割合が多く、おおむね80～160 cmの範囲の中に殆どが存在する。

また、図-7は氷盤の厚さと面積の関係について表した図である。全体的な傾向として面積が大きくなるにしたがって氷盤の厚さも増加している。正方形換算した時に最も頻度の高かった100～140 cmの長さをもつ氷盤の厚さは、およそ20～30 cmの範囲となっている。

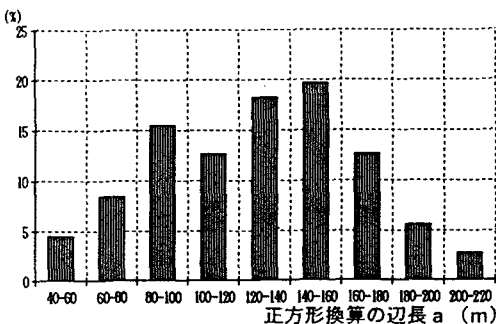


図-6 正方形換算氷盤の大きさの分布

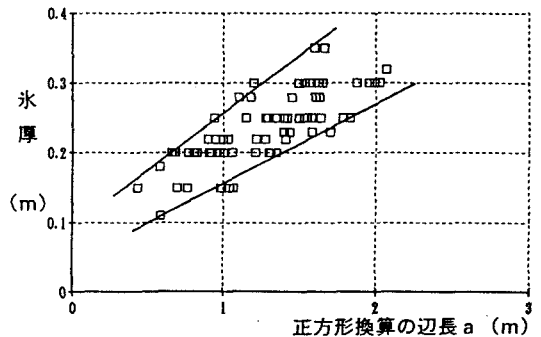


図-7 氷盤の辺長と厚さの関係

4.2 氷盤によるアーチ形成の推定

当時の流量や流速を正確に導くことはその時の観測データがない以上、極めて難しい。ここでは、河道が閉塞した長栄橋から上流約850mある床止工で、河川断面と当時の最高水位を両岸に残された痕跡をもとに測定し、越流量の式から流量を推定すると $Q=30.86 \text{ m}^3/\text{sec}$ となった。また、床止工下流の直線部で2月24日にマンシングの粗度係数と最高水位(痕跡高)を測定したものから流量を推定すると約 $28.5 \text{ m}^3/\text{sec}$ となった。この流量から当時の流速を推定する。河川断面は、閉塞した長栄橋上流の河川横断面図から、閉塞による影響をあまり受けていないと思われる上流90m位置で 24 m^2 であった。したがって水位が最大の時の流速は 1.29 m/sec となる。以上の結果は最大流量時の流速である。平常時の流速は、札幌土木現業所が2月に行った流量観測結果より $0.25 \text{ m}^3/\text{sec}$ (2月4日)で、その時の流速は $V=0.43 \text{ m/sec}$ と推測された。また、氷盤の辺長

a は80~180 cm、長栄橋の橋脚の純間隔 b_1 は702 cm、平均水深 h は25cmとすると a/b_1 は0.11~0.26、 v^2/gh は0.08~0.68と計算される。

これらの値を図-4にプロットしたものが図-8である。 a が80~180 cmで流速 V が0.43~1.29m/secの範囲では、斜線の部分の中では氷盤によるアーチが橋脚位置で形成される。例えば、流速が0.43m/secで氷盤の大きさが180cmの時は氷盤の水面カバー率が約50%でアーチが形成する。また、図から明らかなように水位のピーク時の流速1.29m/secでは、この程度の氷盤の大きさではアーチが形成されないことから、水位のピークを迎える前に、橋脚位置には既に氷によるアーチが形成されていたと推定される。その後、流下する水や雪がアーチ部に急激に堆積し、Ice jamを形成するとともに河道を閉塞した可能性は極めて高い。

この長栄橋近傍の最大水位痕跡高を示したものが、図-9である。橋脚は3本のコンクリートパイルが流軸方向に並んでいて、その下流側の杭を起点として測定した。上流側は標高21.8m程度と一定となっていて橋脚より下流側で急激に水位が低下していることを図示している。これは橋脚部でIce jamが形成され、水位が21.8mの標高まで上昇した所でIce jamが崩壊し、一気に氷盤と河川水が流下したと考えられる。このことを裏づけるように、事故直後の2月22日16時の調査結果では、長栄橋下流2km地点の河道内には膨大な量の氷盤が存在していた。以上のことから、流量の少ない冬期の河川工事においても降雨等の直後には十分な配慮が必要であることを認識すべきである。

参 考 文 献

- 1) Smith, C.D.: Model study of Ice Movement at Idylwyld traffic Bridge, Proc. of IAHR International Symposium on Ice, Vol.1, 1981, pp.436-447.
- 2) Calkins, D.J.: Arching of Model Ice Floes at Bridge Piers, Proc. of IAHR International Symposium on Ice, Vol.2, 1988, pp.495-507.
- 3) 榎国夫, 國松靖, 佐伯浩: 橋脚による氷盤のarch形成条件に関する実験的研究, 水工学論文集, 第36巻, 1992, pp.299-304.
- 4) Babic, M., Shen, H.T. and Bjedov, G.: Discrete Element Simulation of River Ice Transport, Proc. of IAHR International Symposium on Ice, Vol.1, 1990, pp.564-574.
- 5) Melanie Schachter and Don Spenser: Parameters Influencing Ice Arch Formation, Proc. of IAHR International Symposium on Ice, Vol.2, 1994, pp.847-856.
- 6) Hara, F., Kunimatsu, S., Saeki, H. and Enoki, K.: Study on Drift Ice Control Utilizing Arch Formation of Ice Floes, Proc. of International Offshore and Polar Engineering Conference, Vol.2, 1993, pp.736-741.

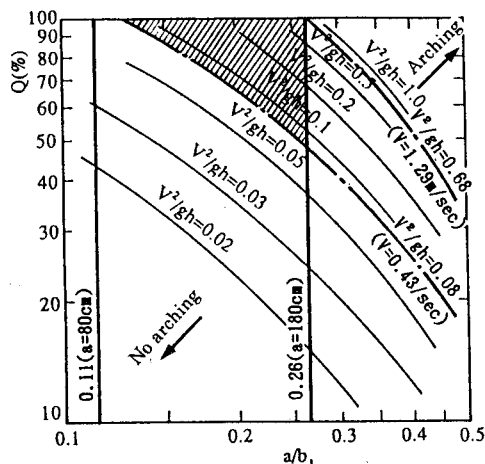


図-8 長栄橋でのアーチ形成判定

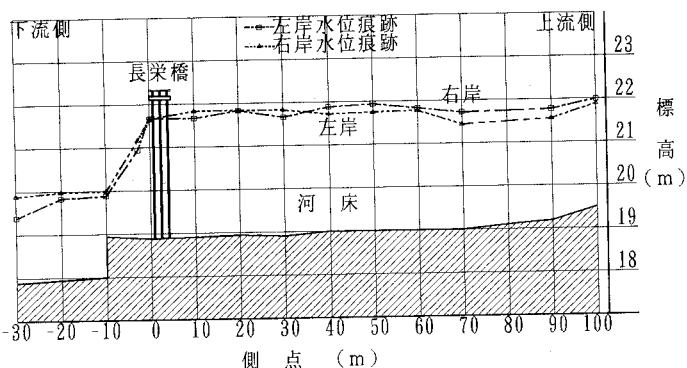


図-9 長栄橋近傍の最大水位痕跡高