

北海道大学工学部                      ○正会員 原 文宏  
 北海道道路管理技術センター      正会員 高橋陽一  
 北海道大学工学部                      正会員 佐伯 浩  
 北海道開発技術センター              佐藤 浩

### 1. はじめに

結氷する水域に建設される橋脚や水理構造物の設計においては、氷盤移動が激しい場合、氷盤移動による構造物表面の摩耗について十分な配慮が必要である。移動する氷盤による諸材料表面の摩耗に関する過去の研究では、各材料に対する摩耗速度（氷盤の移動距離1kmによる材料表面の平均的な摩耗深さ、単位mm/km）が与えられれば、氷盤の累加移動距離と氷盤移動時の水位変動のデータを用いて構造物表面の摩耗量（深さ）の分布が求められることが明らかになっている。本研究は、この摩耗速度に大きな影響を与える橋脚に作用する氷盤の接触圧力について既存の成果をまとめたものである。橋脚に作用する接触圧力は、その断面形状やNoseが傾斜しているか直立であるかによって異なる。

本研究では、図-1に示すような、橋脚の基本形式ごとに検討を行った。

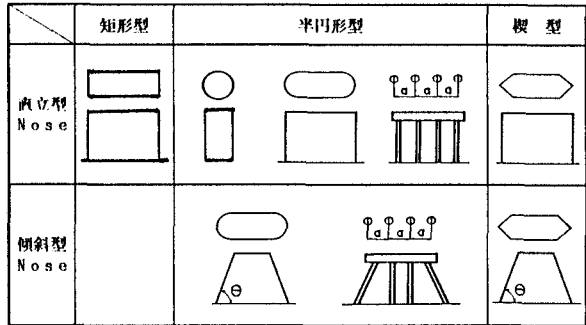


図-1 橋脚の基本形状

### 2. 直立型Noseを有する橋脚に作用する接触圧力

#### (1) Noseが矩形の場合

理論氷力式及び実験氷力式に橋脚幅と氷厚を仮定し、平均接触圧 $\sigma_v$ を算出したのが表-1である。ここで、 $\sigma_c$ は氷盤の一軸圧縮強度を示す。

Noseが矩形の場合の平均的な接触圧は理論氷力式からは一軸圧縮強度の1.06~1.64倍、実験式から0.43~0.48

倍となっている。また、佐伯等や田中等による矩形断面構造物に作用する氷圧力の実験では、最大の局部氷圧力（接触圧）が、一軸圧縮強度の2.6~6.5倍となっている。氷の三軸圧縮強度は一軸圧縮強度の4.5倍程度となっていることを考えると局部接触圧の最大値は、一軸圧縮強度の4.5倍程度と考えてよい。

したがって、鉄筋コンクリート構造物の場合は、コンクリートの摩耗による鉄筋の露出を防ぐ必要があることから、安全性を考慮して接触圧は一軸圧縮強度の4.5倍として設計されるのが適当と考えられる。

#### (2) Noseが半円形の場合

佐伯等の実験式から求めた半円形の橋脚に作用する平均接触圧力を表-2に示す。また、佐伯等や田中等が行った円断面構造物に作用する氷圧力（接触圧力）分布の測定結果によれば $\sigma_{vmax}/\sigma_c$ は、1.84~6.28の範囲となっている。

これに対し構造物に作用する全氷力が最大になる時（氷が破壊する時）の各歪速度に対する無次元氷圧力

表-1 矩形断面の場合の接触圧力

|     | 平均接触圧力                                        | 備 考                        |
|-----|-----------------------------------------------|----------------------------|
| 理論式 | $\sigma_v = (1.59 \sim 1.64) \times \sigma_c$ | Reinckeの理論式より導入            |
|     | $\sigma_v = (0.16 \sim 1.08) \times \sigma_c$ | Morgenstern & Nuttalの式より導入 |
| 実験式 | $\sigma_v = (0.43 \sim 0.48) \times \sigma_c$ | 佐伯等の式                      |

（橋脚幅 200~250cm ・ 氷厚50cmと仮定）

( $\sigma_v/\sigma_c$ ) の分布をみると、各ケースの最大無次元接触圧力は2.0～2.4である。したがって、円断面の場合も局部氷圧力の最大値は、一軸圧縮強度の4.5倍を採用すれば安全側の設計が可能となる。

表-2 Noseが半円形の場合の平均接触圧力

| 条 件                     | 備 考                                    |
|-------------------------|----------------------------------------|
| 直線の半無限のedgeを持つ氷盤の貫入する場合 | $\sigma_v = (0.32 \sim 0.35) \sigma_c$ |
| 氷盤が半円のNoseに完全に密着した場合    | $\sigma_v = (0.83 \sim 0.91) \sigma_c$ |

(橋脚幅200～250cm、氷厚50cm貫入に伴う歪速度 $10^{-2} \sim 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ )

### (3) Noseが楔形の場合

構造物に作用する全氷力に関するKorzhavinの平衡式より、平均接触圧力 $\sigma_v$ を求める式と佐伯等が導いた楔形Noseを有する構造物に作用する全氷力の式から、平均接触圧力を計算すると(1)式となる。

ここで、 $C$ ：楔の角度による係数（ $2\alpha=90^\circ$ で4.5）、 $W$ ：橋脚幅、 $\mu_k$ ：動摩擦係数  $\alpha$ ：楔の交角である。橋脚断面を幅200cm、 $\alpha=45^\circ$ ： $\mu_k=0.3$ と仮定すると平均接触圧力は(2)式となり、直立構造物に作用する平均接触圧は、楔形の場合が最も小さいことが明らかとなった。

$$\sigma_v = C \cdot \sigma_v / \sqrt{W} (1 + \mu_k / \tan \alpha) \cdots \cdots (1) \quad \sigma_v = 0.25 \sigma_v \cdots \cdots (2)$$

### 3. 傾斜型Nose（半円形断面）を有する橋脚に作用する接触圧力

傾斜している半円形断面の構造物に氷盤が貫入する場合の接触圧力(局部氷圧力)を直接測定した結果は未だ報告されていない。平山等の実験結果によると傾斜したNoseに作用する水平方向氷力 $H$ は(3)式で示される。

$$H = 1.6 \cdot \sigma_f \cdot h^2 \cdot \gamma \cdots \cdots (3) \quad \gamma = \tan(\theta + \phi) \cdots \cdots (4) \quad \phi = \tan^{-1} \mu_k \cdots \cdots (5)$$

ここで $\sigma_f$ 、 $\theta$ はそれぞれ氷盤の曲げ強度とNoseの傾斜角である。また、 $\mu_k$ は氷盤とNose材料間の動摩擦係数である。この式より、Noseへの氷盤貫入量と接触面積を計算して平均接触圧力を導き橋脚幅を200～250cmと仮定すると、平均接触圧力は(6)式のようになる。

$$\sigma_v = (0.31 \sim 0.35) \times \sigma_c \cdots \cdots (6)$$

## 4. 結 論

●直立型の橋脚においては矩形のNoseの場合、平均の接触圧力は理論氷圧力式からは $(1.06 \sim 1.64) \times \sigma_c$ となり、氷力の実験式からは $(0.43 \sim 0.48) \times \sigma_c$ となるが、局部氷圧力(局部接触圧)の実験結果が判断すると、安全側を考慮して、 $4.5 \sigma_c$ を採用することが望まれる。

●半円断面形の場合は、氷力式から求められる平均接触圧はedgeが直線の場合 $(0.32 \sim 0.35) \times \sigma_c$ 、edgeがNoseに密着した状態の場合は $(0.83 \sim 0.91) \times \sigma_c$ となり、円断面に作用する局部氷圧力に関する実験から判断すると、最大接触圧力は $6.28 \times \sigma_c$ となるが、氷の三軸圧縮強度を考慮して $4.5 \sigma_c$ を採用すれば安全と考えられる。

●Noseが楔形の場合はKorzhavinの平衡の式と佐伯等の実験氷力式から、平均の接触圧は $0.25 \sigma_c$ となる。

●傾斜型橋脚で、半円断面を有する場合の接触圧については未だ実験は行われていないが、平山等の氷力式と若干の仮定を用いると平均の接触圧力は $(0.31 \sim 0.35) \sigma_c$ となることが明らかとなった。

## 参考文献

- 1) 佐伯、小野、山田、尾崎：直立構造物に使用する海水の力に関する研究、第28回海工論文集、p369～400、1981
- 2) Tanaka, S., T. Ono and H. Saeki: The Distribution of Ice Pressure Acting on Offshore Pile Structure and Failure Mechanics of Ice Sheet, Jour of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, ASME, Vol.1, p76～86、1987