

浮水盤に作用する環境力と 水盤の移動速度に関する研究

北海道開発庁	北條 紘次
ハシヰックコンサルタント(株)	中澤 直樹
ハシヰックコンサルタント(株)	山崎 一弘
北海道工業大学	村木 義男
北海道大学工学部	佐伯 浩

1. まえがき

水海域に建設される海洋構造物を設計する場合、その支配外力は水力となる場合が多い。この水力は、大きな浮水盤に風や流れが流用し、その流体力により水盤が移動し、構造物に衝突し、水力を及ぼすことになる。この時、構造物に作用する最大の水力は構造物に衝突・接触した水盤が破壊する時に発生することになる。風や流れが水盤に及ぼす力(環境力)がいかに大きくても、構造物に作用する最大の水力は、水盤破壊時の水力を越えることがない。以上のような理由から、水海域に建設される各種構造型式の海洋構造物に作用する水力の算定は、一般に水盤を破壊させる力となっている。北極海や北部オホーツク海等のように、一枚の水盤の大きさが数100Km²もあるような海域に建設される海洋構造物の場合はそのような水力が支配外力として採用されるべきである。しかし個々の水盤の大きさがそれ程大きくない場合や、比較的狭い水域においては、海洋構造物に作用する水力は、水盤に作用する環境力が小さいため、水盤破壊まで至らないことになり、水力としては環境力を考えれば良いことになる。本研究は、水盤に作用する環境力と、その環境力による水盤の移動速度さらに海洋構造物に作用する水力の算定方法について明かにしたものであるが、この成果は、貯水池や湖沼といった閉水域に建設される取水塔やゲート等に作用する水力の算定にも利用できる。

2. 水盤の水平方向移動による水力

水盤には水盤下面に水の流動によるせん断力が、また水盤の表面には風によるせん断力が作用する。また海洋の面積が非常に広大な場合にはコリオリ力も作用することになる。さて、この風や流水に起因するせん断力によって水盤に作用する力は、水盤を介して海洋構造物に作用することになる。図1に示すように、(a)、(b)のように水盤と取水塔が凍着していない場合で、かつ水縁が接触していない場合、風や流水の作用で水盤が移動し海洋構造物に衝突する。この時の風や流水による力が大きくなると、ついには水盤が構造物に貫入することになる。

この流れや風による力は水盤に海洋構造物が貫入する時の水力(水盤が海洋構造物によって破壊する時の水力)を超えることはない。また、図1の(d)や(e)のように水盤が海洋構造物に凍着したり、接している場合は水盤が受ける風や流れによる力が作用し、水盤の破壊を起こす力以上にはならない。図(c)は、水盤と海洋構造物間の接触条件において、(a)(b)と(d)(e)との中間的な状況であるといえる。有限の水盤が構造物に衝突・貫入する時の構造物に作用する水力は、Michelなどの解析により近似的に次式で示される。

$$F_i = \beta \cdot V \cdot h \sqrt{2 \sigma_c \cdot \rho \cdot A} \quad (1)$$

ここで、 F_i は衝突時の水力、 h は水厚、 σ_c は水の貫入強度、 ρ は水の密度、 A は水の面積、 V は水盤の移動速度である。また β は、構造物の形状係数で1.0と考えてよい。また、水盤が流水や風によって強大な力を受けて、構造物が水盤中に貫入するような水力は、佐伯等により次式で示される。

$$F_B = R \cdot K \cdot C \sqrt{W \cdot h \cdot \sigma_c} \quad (2)$$

ここで C は構造物の断面形状によって決まる係数で円断面で5.0、矩型断面で7.2である。 K は貫入に伴う歪速度によって決まる係数で R は接触条件によって決まり、 W は構造物の投影幅、 σ_c は水の一軸圧縮強度(直径10cm、高さ20cmの円柱供試体を歪速度 $2 \times 10^{-3} \text{sec}^{-1}$ で破壊した時の強度)である。衝突時の水力 F_i は(2)式で示される貫入時の水力を超えることがないので次の関係が得られる。

$$F_i \leq F_B \quad (3)$$

よって水平方向水力の最大値は(3)式で示されるので、融解期の水厚 h と水の一軸圧縮強度 σ_c により最大水力を計算することが可能であるが過大な推定をすることになる。よって、(1)式により水力の算定をする必要となる。(1)式において、 σ_c は σ_c に等しいと考えることができるので、水盤の速度 V が得られれば F_i が求まることになる。

3. 水盤の移動速度

図2に示すように、海洋構造物に最も大きな水力が作用するように、水盤の移動方向に風が作用すると仮定すると運動の式は次式で示される。但し流速はないものとする。

$$\rho_a A h \frac{dV}{dt} - \rho_w C_{Dw} A \cdot V^2 = T_a \times A \quad (4)$$

$$T_a = \rho_a \cdot C_{10} \cdot U_{10}^2$$

ここで ρ_a 、 ρ_w 、 ρ_a は水、水及び空気の密度、 A は氷盤の面積、 h は氷厚、 C_{Dw} は氷と水の間の摩擦係数、 C_{10} は風と氷盤あるいは雪面間の摩擦係数、 U_{10} は10m高さの風速である。(4)式の解は $t=0$ で $V=0$ として解くと次式が得られる。ここで氷盤の喫水は小さいとして形状抵抗は無視している。

$$t = \frac{\rho_a h}{\sqrt{\rho_w \cdot C_{Dw} \cdot T_a}} \cdot \tan^{-1} \sqrt{\frac{\rho_w \cdot C_{Dw}}{T_a}} \cdot V \quad (5)$$

よって、氷盤の最終速度は次式で示される。

$$V_{t \rightarrow \infty} = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{T_a}{\rho_w C_{Dw}}} = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{\rho_a C_{10} \cdot U_{10}^2}{\rho_w C_{Dw}}} \quad (6)$$

この氷盤の速度 V を決定するためには、 C_{10} と C_{Dw} を明かにせねばならない。田畑等は風速5m/s程度での氷盤に作用する力を直接測定して $10^3 \times C_{10}$ として0.92と1.06を得ている。これに対してAllisonなどは南極のMawson基地の近くの積雪のある氷盤で C_{10} を測定している。風速は6.7~12.5m/s(平均9.0m/s)で $C_{10} \times 10^3$ は0.82~2.02の範囲で変化し、平均は1.36であったとしている。この他、北極海の海水上で測定したLeavitt等の結果では 2.7×10^{-3} としている。これに対して、青田等は、結氷前の開水面、薄い結氷期、融解後の開水面で C_{10} を測定し、図3に示すように C_{10} は風速に依存することを示している。この結果においても風速2m/s以上では上述した種々の結果とほぼ一致していると考えられる。この他、 C_{10} については風速のみならず氷盤表面の粗さも影響することが、Banke等によって示されている。その結果が図4である。ここでは、13mm以下の波長の表面変動の二乗平均を意味している。次に氷と氷盤の相対的運動に対する氷盤下面の摩擦係数については、McPheeがAIDJEXプログラムの中で、夏期の北極海でのPack Iceの運動をCaribouにおいて詳細に観測している。その結果を示したものが図5である。図中の V は氷盤の移動速度である。McPheeによると図中の実線は全データより最小二乗法により求めた曲線である。図中の $|T_w|$ は流れによるせん断力 T_w を水の密度 ρ_w で除したものである。 T_w と V の関係は次式で示される。

$$T_w = \rho_w \cdot 0.0055 V^2 \quad (7)$$

よって C_w は0.0055を採用しても良いと思われる。以上の結果を用いて C_{10} をAllisonの0.00136を採用するとすると(6)式より $V_{t \rightarrow \infty} / U_{10}$ を計算すると

$$\frac{V_{t \rightarrow \infty}}{U_{10}} = 0.026 \quad (8)$$

となる。Timokhovは風速と氷盤の移動速度の比を詳細な理論解析に基づいて得ている。それによると氷盤の面積が500m²以上では0.025となっていて、著者等の得た(6)式から得られる(8)式に示される0.026ときわめて近いことを示している。これに対して、Gordienkoは実際の氷盤の移動速度の測定から500m²以上の氷盤では風速と氷盤の移動速度の比が0.018としていて、以上の理論結果に比べて小さい値を示している。水面上を風が吹く場合の水面上の流速 U_s と風速 U_{10} についても過去に北大の研究グループが詳細に調べていて、その結果によると $U_s = 0.04 \times U_{10}$ となっていて、氷盤の速度は表層流れの速度より小さい値を示す。

4. 水力の算定方法

以上、氷盤の移動速度が求まるので、(1)式により氷盤衝突時の水力を求めることが可能となる。次に(1)式で水力を計算する場合、(2)式をこえることがないことを説明した。(2)式において、 R は氷盤と構造物の接触条件であって、図1の(d)や(e)の場合には $R=2.6$ 、(a)、(b)それに(c)のような接触条件の場合は $R=1.0$ である。また K は貫入時の歪速度 ε_p に依存する係数でその結果を図6に示す。

$$\varepsilon_p = \frac{V}{4W} \quad (9)$$

V : 氷盤の貫入速度、 W : 構造物の幅

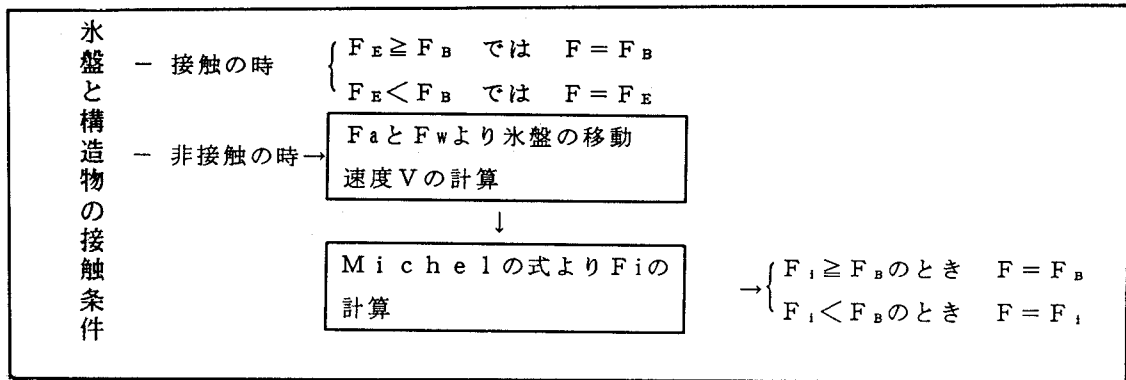
ここで ε_p は(9)式で求めることができる。

以上、貯水池内の浮氷盤の移動により海洋構造物に作用する水力(全水力)について述べたが、次に構造物に作用する局部水圧力について述べる。直立構造物に作用する水圧力の分布については、佐伯や田中等の研究があるが、氷盤そのものが等方等質の材料ではないため、構造物に接した部分の氷盤は同時に破壊せず、水圧力の分布形状は複雑である。佐伯等の結果によると、最大の局部水圧力は水の一軸圧縮強度の4~5倍となっている。

これは水の三軸圧縮強度に一致することから、構造物に接する氷盤の中心部では氷は三軸応力状態になっているものと判断される。以上の結果をまとめると、以下になる。氷盤の面積をAとすると、風による力は $F_a = T_a \cdot A$ 、流れによる力 F_w は $F_w = T_w \cdot A$ で表わされる。これらの環境力の和を F_E とすると F_E は次式で示される。

$$F_E = F_a + F_w \quad (10)$$

設計に用いる全水力をFとすると設計に用いる全水力は以下の手順で計算できる。



参考文献

- 1) 佐伯浩：寒冷地海洋構造物の設計、水工学シリーズ 88-B-4, 土木学会水理委員会、1988
- 2) 佐伯浩：海水と海岸、海洋構造物、第15回水工学に関する夏期研修会講義集、B、1979
- 3) Michel, B: Ice Mechanics, Laval University Press, 1979
- 4) McPhee, M, G: An Analysis of Park Ice Drift in Summer, Sea Ice Processes and Models, R, S, Pritchard Ed, Washington Univ. press, P. 62-75,
- 5) Neralla, V, R, Liv, W, S. S. Venkatesh and M, B, Danard: Techniques for Predicting Sea Ice Motion, Sea Ice Processes and Models, R, S Pritchard Ed, Washington University press, p. 197-206.
- 6) Allison, I and G, Akerman: Sea Ice and Ocean Energy Balance Studies, Sea Ice Processes and Models, R, S, Pritchard Ed, Washington Univ, Press, P. 347-359,
- 7) Leavitt, E: Surface-based Air Stress Measurements Made during AIDJEX, Sea Ice Processes and Models, Ed, R, S, Pritchard, Washington Univ, Press, P. 419-429
- 8) Hibler, W, D, Sea Ice Growth, Drift, and Decay, Dynamic Press, P. 141-210, 1980
- 9) Timokhov, L, A.: Horizontally Uniform Wind Drift of Various Packed Ice, Dynamics of Ice A, Timokhov, A, A, Balkema, P. 123-135, 1984
- 10) 白沢邦夫, 田畑忠司：海水に及ぼす風の応力測定について1, 低温科学, 物理編 第35, P. 241-248, 1977
- 11) 青田昌秋, 白沢邦夫, 高塚徹：薄水域の大気境界層の観測, 低温科学, 物理編, 第47, P. 177-185, 1988

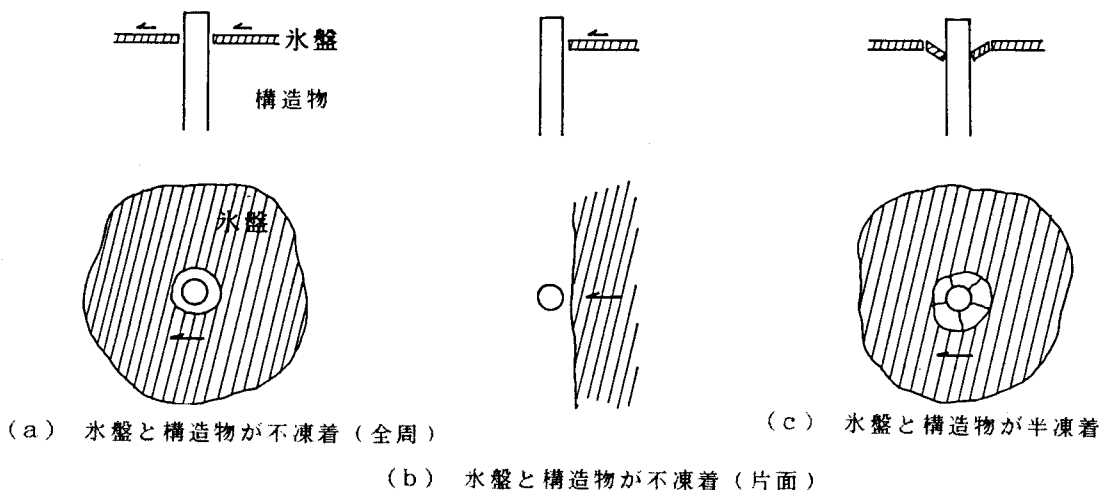


図1 氷盤の移動により構造物に作用する水力の概念図

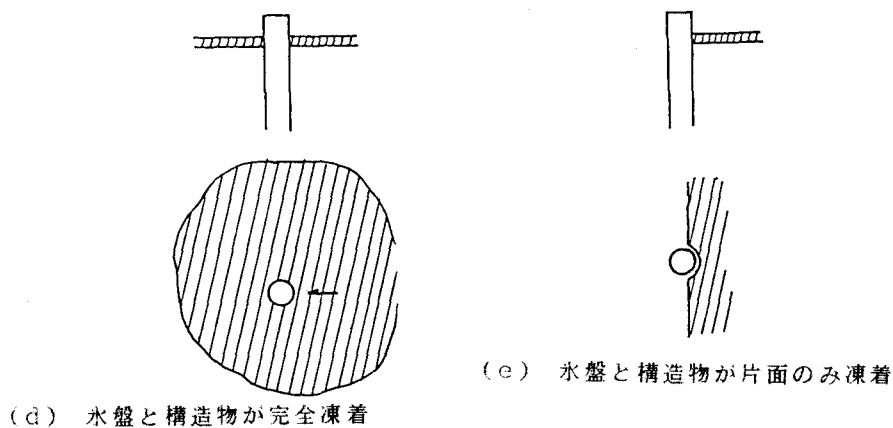


図1 水盤の移動により構造物に作用する水力の概念図

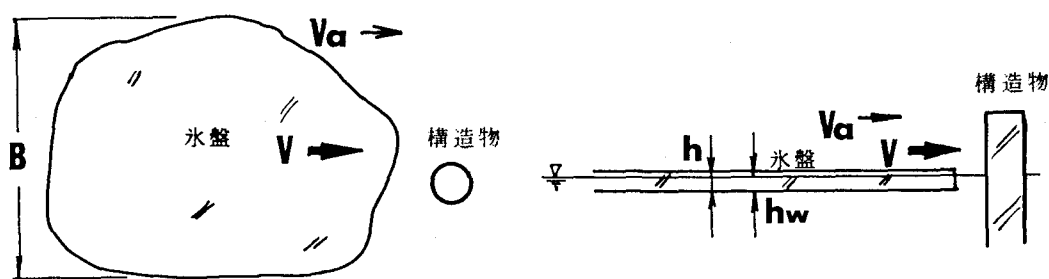


図2 移動水盤と構造物の概念図

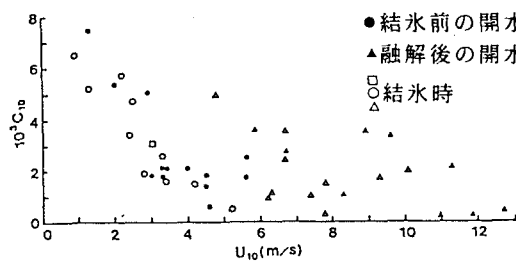


図3 抵抗係数と平均風速の関係

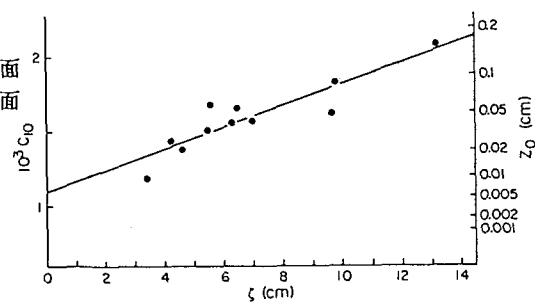


図4 抵抗係数と表面粗さの関係

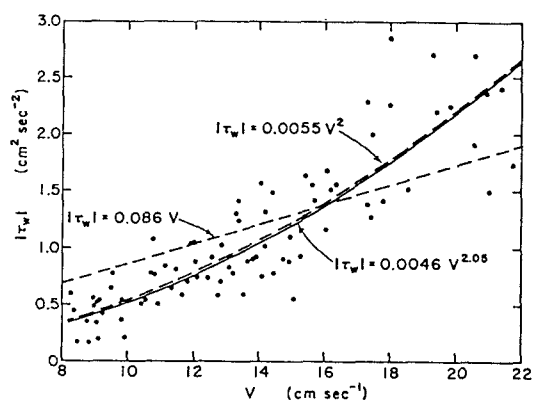


図5 Mcpheeによるせん断力
| τ |と水盤の移動速度の関係

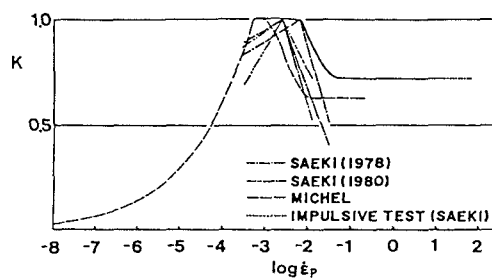


図6 水盤貫入時の歪速度と水力係数の関係