

海氷によるコンクリート摩耗を対象とした 水中摩耗試験法の開発

長谷 一矢¹・増田 亨²・木岡 信治³

¹ 正会員 (国研) 土木研究所寒地土木研究所 (〒062-8602 北海道札幌市豊平区平岸 1-3-1-34)
E-mail: hase-k22ac@ceri.go.jp

² (国研) 土木研究所寒地土木研究所 (〒062-8602 北海道札幌市豊平区平岸 1-3-1-34)
E-mail: masuda-t22aa@ceri.go.jp

³ 正会員 (国研) 土木研究所寒地土木研究所 (〒062-8602 北海道札幌市豊平区平岸 1-3-1-34)
E-mail: kioka@ceri.go.jp

氷海域におけるコンクリート構造物の劣化は、主に凍害、塩害そして海氷摩耗の複合劣化であると考えられる。海氷摩耗を伴う複合劣化の研究には、氷とコンクリートの摩耗試験が不可欠である。そして、摩耗特性を明確に把握するためにも長期間の摩耗試験が必要である。しかし、従来の気中における摩耗試験では、コンクリートの摩擦面に氷膜が形成され、摩耗の進行が抑制されてしまうことから、長期間の摩耗試験が困難であった。そこで筆者らは、氷膜の形成を抑制する水中摩耗試験法を開発した。不凍液中で摩耗試験を実施することにより、氷膜の形成が抑制され、長期間の摩耗試験が可能であることを確認した。また、気中、塩水中、不凍液中における氷とコンクリートの動摩擦係数に、ほとんど差がないことを確認した。

Key Words : *Ice bound sea, Ice abrasion, deteriorated concrete structure, antifreeze, perfluorocarbon(fluorinert)*

1. はじめに

社会基盤構造物は我々の生活を支える重要な役割を担っているが、高度成長期に建設された多くのコンクリート構造物が老朽化の問題に直面している¹⁾。写真-1は、オホーツク海沿岸にあるコンクリート構造物である。海面付近のコンクリートが著しく劣化しているが、オホーツク海が氷海域であるという条件を考慮すると、この劣化要因は、主に凍害、塩害そして海氷摩耗である可能性が高い。そして、各要因による劣化は同時に進行することから、このコンクリート構造物の劣化は、各要因による複合劣化であると考えられる²⁾。

海氷摩耗を伴うコンクリートの複合劣化を研究するためには、氷によるコンクリートの摩耗試験が欠かせない。そして、試験条件の違いによる摩耗特性の変化を把握する上でも、長期間の摩耗試験により摩耗量の差を明瞭に示す必要がある。しかし、気中で氷とコンクリートが摩擦すると、コンクリートの摩擦面に氷膜が形成され摩耗が抑制されてしまうことから、この問題に対処しない限り長期間の摩耗試験は困難である。

そこで筆者らは、氷膜の形成を抑制できる試験法として、水中摩耗試験法を開発した。本研究では、気中での



写真-1 氷海域におけるコンクリート構造物の劣化状況

摩耗試験に対比して液体中での摩耗試験を水中摩耗試験と称している。この液体として不凍液を使用したところ、氷膜の形成が抑制され、長期間の摩耗試験が可能となった。本論文は、海氷摩耗を伴う複合劣化メカニズムの解明に有効と考えられる水中摩耗試験法について報告するものである。

2. 既存の摩耗試験法とその課題

氷海域におけるコンクリート構造物の劣化に関して

は、これまでも国内外の研究者によって調査・研究が行われ、様々な摩耗試験法が提案されてきた。例えば、Newwar et al.(1988)³⁾は、回転する中空円筒コンクリートに氷を接触させる方法で摩耗試験を実施しているし、ABAM project II（北極域に供する高強度軽量骨材の耐摩耗性調査）(Hoff(1988)⁴⁾においても同様の方法が提案されている。他にも ABAM project III (Hoff(1988)⁴⁾においては、摩耗試験として氷柱にコンクリート供試体が接触し往復運動する方法が提案されている。

しかし、共通して問題となったのがコンクリート供試体への氷の移着である。氷の移着によりコンクリート供試体表面に氷膜が形成され、コンクリートの摩耗が抑制されてしまうことから、摩耗試験の継続に支障をきたす。Newwar et al.(1988)は、氷とコンクリートの接触面を塩水に浸漬させ、氷膜形成の防止を図っている。ABAM project II では、1時間毎にコンクリート表面にエタノールを塗布することにより対処している。ABAM project IIIの方法を提案した佐伯ら⁵⁾の研究論文では、氷膜形成の防止方法について詳しく述べられていないが、コンクリート供試体表面の摩耗量の計測を頻繁に実施していることから、氷膜が完全に形成される前に計測を実施し、その都度、形成しかけた氷膜を除去することで摩耗試験を継続していたものと推察される。

このように、コンクリート供試体表面における氷膜形成の抑制が摩耗試験の課題であり、長期間の摩耗試験継続を必要とする場合は、この課題解決が不可欠である。

3. 水中摩耗試験法の開発

(1) 概要

前述のとおりコンクリート摩耗面に氷膜が形成される問題に対しては、既往の研究において塩水やエタノールが使用されており、これはコンクリートと氷の摩耗面に何らかの液体が介在することにより、氷の移着が起こりづらくなることを示唆している。そこで筆者らは、摩耗試験を水中で実施可能な試験法の開発を試みた。その結果、この試験法により氷膜の形成が抑制され、摩耗試験を長期間継続できることを確認したので報告する。

(2) 試験装置

写真-2は本実験で使用した摩耗試験機の全景、図-1はその装置図である。摩耗試験には様々な方法が提案されているが、本研究では氷柱にコンクリート供試体が接触して往復運動する面接触の滑動式(ブロック・オン・プレート)を採用している。

図-2に示すとおり、アクリル製水槽(長さ73 cm, 幅21 cm, 高さ14 cm)の中に氷柱(長さ48 cm, 幅8 cm,



写真-2 摩耗試験機の全景

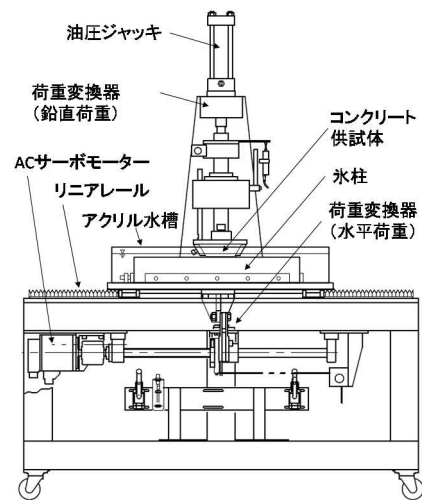


図-1 摩耗試験機の装置図

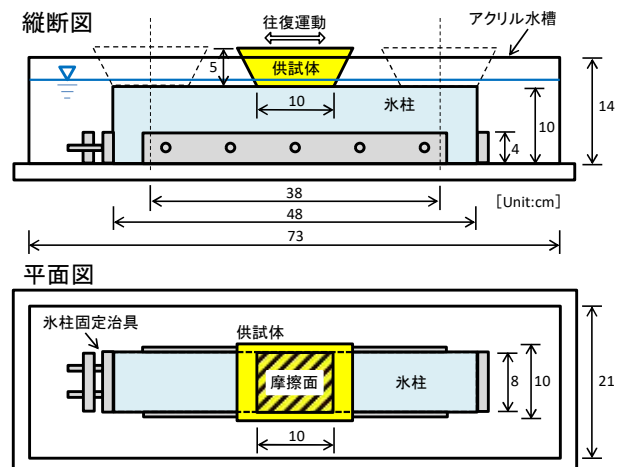


図-2 水槽詳細図

高さ10 cm)を治具で固定し、構造物を意図したコンクリート供試体(長さ10 cm, 幅10 cm, 厚さ5 cm)を接触させ、往復運動により両者が摩擦する機構となっている。水槽内を任意の液体で満たすことにより、液体中での摩耗試験が可能となる。装置上部にある油圧ジャッキの圧力を手で制御することにより、コンクリート供試体に任意の鉛直荷重を与えている。また、水槽の往復

表-1 コンクリート供試体の配合

W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)				A (C×%)
		W	C	S	G	
47.1	43.4	140	297	793	1063	2.97

W/C:水セメント比, s/a:細骨材率, W:水, C:セメント, S:細骨材, G:粗骨材, A:AE減水剤, 空気量の目標値は5.5%

運動については、AC サーボモーターとリニアレールにより等速往復運動を可能としている。コンクリート供試体の配合は、飛沫帯の海洋コンクリートを想定し、表-1に示す配合(C-5S相当, 最大骨材寸法を20 mmに調整)とした。

(3) 適用する液体

水中摩耗試験は室温が氷点下の低温室内で行われる。本論文の試験条件としては室温-5.0℃としている。試験環境が氷点下であるため、水槽内を淡水で満たすことはできないことから、凝固点が-5.0℃以下の液体を使用することとなる。そこで、濃度7.4%の塩水(凝固点約-5.0℃)と不凍液としてパーフルオロカーボン(フロリナートFC-770:3M社,以降フロリナートと称す)を使用することとした。写真-3は水槽内をフロリナートで満たした状況である。フロリナート(FC-770)は、流動点-127℃,比重1.79の完全フッ素化合物であり、熱的・化学的に安定性が高く、高温低温を問わずほとんどの物質に溶解しない。表-2にフロリナートの物性値を示す。また、フロリナート(FC-770)は気化しやすいため、濃度10%の

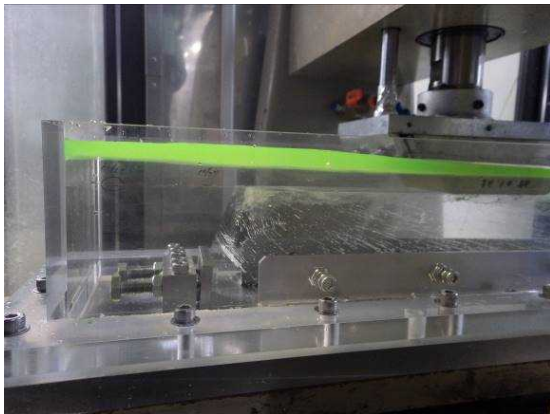


写真-3 摩耗試験機水槽 (フロリナート中での試験状況)

表-2 物性値⁹⁾

	空気 (20℃)	水 (25℃)	フロリナート (25℃)
凝固点, 流動点[℃]	-	0	-127
粘度[×10 ⁻³ Pa·s]	0.018	0.890	1.432
動粘度[mm ² /sec]	15.15	0.89	0.80
密度[g/cm ³]	0.0012	1.00	1.79
比熱[J/g·K]	1.01	4.18	1.04
熱伝達係数[W/m ² ·K]	10	300	50

塩水(緑色に着色)を表面に張り、気化を防止した。

(4) 試験条件

試験条件は任意に調整可能であるが、ここでは後述する4.(1)(2)の試験条件について述べる。試験条件は、室温を-5.0℃,コンクリート供試体の接触圧を約0.3 MPa,氷柱の往復速度を5.0 cm/s,往復振幅距離を38 cmとした。氷柱の往復累計距離を摩耗距離Lと定義し、設定した摩耗距離に至るまで試験機は運転を継続する。

摩耗試験後は、変位計(精度1μm)を用いてコンクリート供試体表面の凹凸を等間隔に9側線測定した。そして、その平均値を平均摩耗量 \bar{S} と定義した。なお、摩耗試験は、気中、塩水中、フロリナート中の3ケース実施した。

4. 水中摩耗試験法の有効性の検証

(1) 氷膜の形成状態

コンクリート供試体表面の氷膜の状態を確認する目的で、摩耗距離0 kmから13.6 kmまでコンクリート表面を段階的に撮影し、その状態を写真-4に整理した。

a) 気中試験

写真-4における、気中のコンクリート供試体表面に着目すると、摩耗距離4.0 kmで既に供試体表面全体が固い氷膜で覆われている。そして、摩耗距離13.6 kmの写真が示すとおり、その後も表面の氷膜状態に変化はなかった。

b) 塩水中試験

写真-4における、塩水中のコンクリート供試体表面に着目すると、摩耗距離4.0 km, 13.6 kmのいずれも表面に固い氷膜は形成されていない。表面の凹凸を観察すると、凹部に柔らかいシャーベット状の氷(削れた氷柱の氷片)が残っている状態であった。摩耗距離13.6 km(乾燥)に示す気中と塩水中の写真と比較すると、摩耗は塩水中の方が明らかに進行しており、塩水中において氷膜の形成が抑制されたことを示唆している。

c) フロリナート中試験

写真-4における、フロリナート中のコンクリート供試体表面に着目すると、塩水中と同様に表面には固い氷膜は形成されていない。そして、供試体表面の凹部には、塩水中と同様にシャーベット状の氷が残っている状態であった。供試体表面に筋状の跡が見られるが、これはシャーベット状の氷である。摩耗距離13.6 km(乾燥)に示す気中とフロリナート中の写真と比較すると、摩耗はフロリナート中の方が明らかに進行しており、塩水中試験と同様に氷膜の形成が抑制されたことを示唆している。なお、摩耗距離13.6 kmに至るまでのフロリナート中に

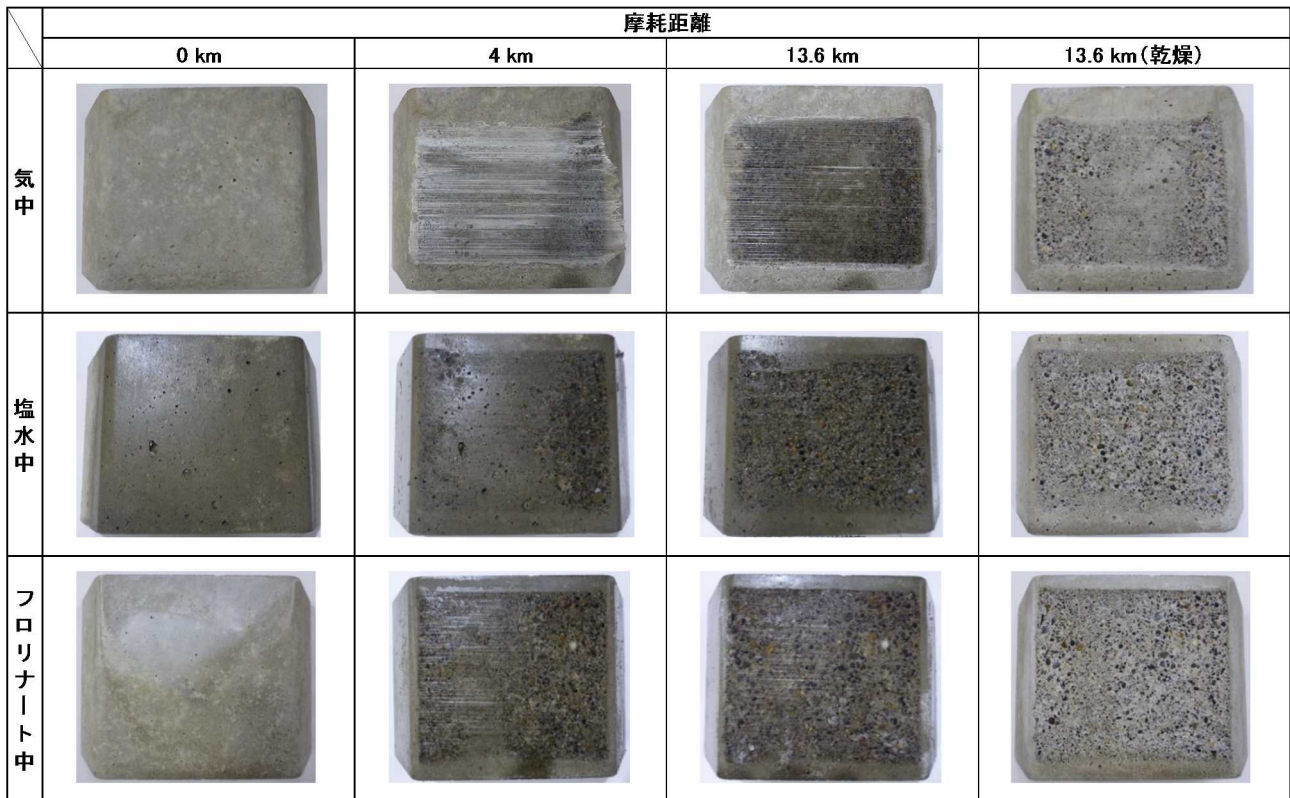


写真4 コンクリート供試体の表面状態

おける摩耗の進行は、概ね塩水中における摩耗の進行と同じであった。

(2) 摩耗試験の継続性

図-3は、気中、塩水中、フロリナート中の摩耗試験結果である。横軸に摩耗距離 L 、縦軸に平均摩耗量 \bar{S} を示している。凹凸測定は摩耗距離 13.6 km に到達した段階で行い、フロリナート中の試験については、摩耗距離 71.5 km まで段階的に測定を継続した。

a) 気中試験

気中試験の結果を●印でプロットしている。気中試験では写真-4 に示すとおり供試体表面に固い氷膜が形成されていたことから、常温で氷膜を溶かし、凹凸測定を行った。摩耗距離 13.6 km のプロット1点からは平均摩耗量が今後どのように変化していくのか読み取れないが、写真-4 で示されているように摩耗距離 4.0 km で既に固い氷膜が形成されていることや、供試体中央が全く摩耗していないことから、この先は摩耗がほとんど進行しないものと思われる。また、図に示された平均摩耗量は、氷膜形成前に供試体端部が摩耗した分であると考えられる。以上の結果から、頻繁に氷膜の除去を行わない限り、気中における長期間の摩耗試験継続は困難であると思われる。

b) 塩水中試験

塩水中試験の結果を○印でプロットしている。気中で

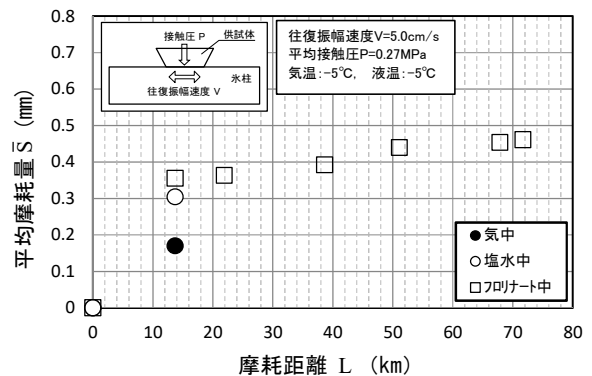


図-3 摩耗距離と平均摩耗量

の試験結果よりも平均摩耗量は大きくなっていることから、塩水中において氷膜の形成が抑制され、摩耗が継続して進行したものと考えられる。

しかし、塩水中では氷柱が溶解により痩せてしまう現象が確認された。氷柱幅の減少は、コンクリート供試体との接触面積を減少させるため、一定の鉛直荷重が供試体に作用する本試験においては、試験中に接触圧が変化することになる。塩水中の試験は、氷膜形成の抑制には効果が認められるが、試験中に試験条件が変化してしまう欠点がある。

c) フロリナート中試験

フロリナート中試験の結果を□印でプロットしている。気中で試験結果よりも平均摩耗量は大きくなって

いることから、塩水中試験と同様に氷膜の形成が抑制され、摩耗が継続して進行したものと考えられる。

着目すべきは、フロリナート中において氷柱が全く痩せなかったことである。写真-4の摩耗距離 13.6 km (乾燥)における気中と塩水中の摩耗跡に着目すると、摩耗跡の境界(供試体写真の上下の摩耗跡)が不明瞭となっている。供試体幅 10 cm に対して氷柱幅は 8 cm であるから、供試体表面の摩耗跡も幅 8 cm になるはずであるが、気中においては氷柱が昇華により痩せ、塩水中では氷柱が溶解により痩せたため、接触面積が減少し、摩耗跡が不明瞭になったものと考えられる。一方、フロリナート中では 8 cm 幅の摩耗跡が明瞭であり、氷柱が痩せないことを示唆している。これは、フロリナートがほぼ水に溶解しない特性によるものである。塩水中では、氷柱の痩せに伴い試験条件が変化してしまう問題があったが、フロリナート中ではその問題がなく、長期間の摩耗試験を行う上で有利な試験方法であると考えられる。

フロリナート中の試験については、摩耗距離 13.6 km 以降も試験を継続した。図-3の□印に着目すると、摩耗距離 13.6 km 付近を堺に摩耗量の増加率(以降、摩耗速度と称す)が変化し、13.6 km 以降は概ね一定の摩耗速度で摩耗が進行している。伊藤ら⁹⁾は気中における摩耗試験により、コンクリートの摩耗速度の変化について述べている。コンクリートの摩耗は大きく三段階に分類され、第一段階はコンクリート表面のセメントペーストの摩耗、第二段階は細骨材や粗骨材の一部が露出した状態における摩耗、第三段階はコンクリート表面における骨材の占有面積が 10% 以上の状態における摩耗であり、摩耗速度は、段階が進むに連れて低下すると説明している。図-3の結果も伊藤ら⁹⁾の見解に合致するものである。伊藤らによる気中での摩耗試験は摩耗距離 10 km 程度までに止まるが、氷膜形成の問題がないフロリナート中での摩耗試験は 71.5 km まで達しており、第三段階における摩耗傾向が明確に表れている。なお、摩耗距離 71.5 km は氷柱 1 本で試験可能な距離の目安であり、氷柱を交換することで、さらに摩耗試験を継続することが可能である。

以上の結果は、フロリナート中での摩耗試験が長期間の試験継続を可能とすること、そして摩耗特性を調べる上で有効な試験法であることを示している。

(3) 摩擦特性

氷によるコンクリートの摩耗は、氷とコンクリートの摩擦特性に依存する⁷⁾。従来、摩耗試験は気中で行われてきたが、水中摩耗試験を実施するにあたり摩擦係数を調べることにした。摩擦測定は、3. で説明した摩耗試験機を使用した。装置の機構上、静止摩擦力の測定が困難であることから、動摩擦力の測定のみを行った。摩耗

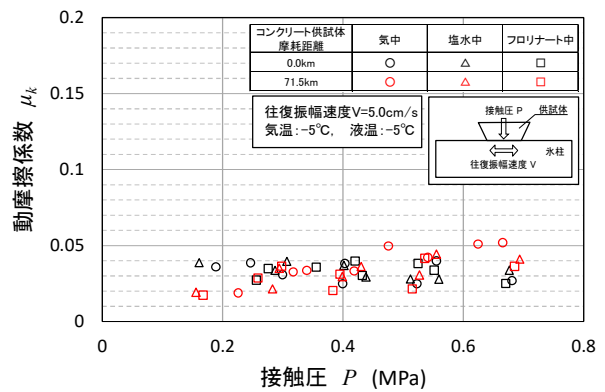


図-4 接触圧と動摩擦係数

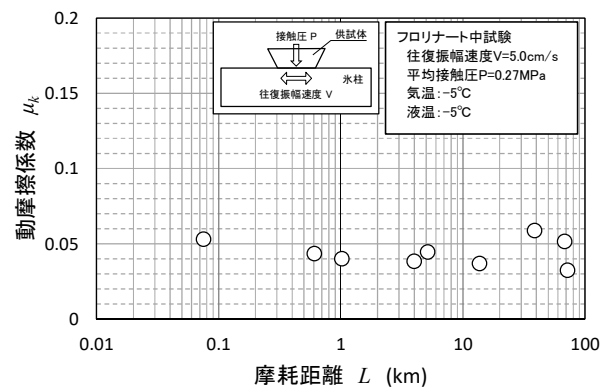


図-5 摩耗距離と動摩擦係数

試験機に設置されている荷重計により鉛直荷重と水平荷重を測定し、その値から動摩擦係数を算出した。試験を実施した低温室内の気温は-5°Cに制御されており、コンクリート供試体、氷柱、液体(塩水、フロリナート)も全て-5°Cである。コンクリート供試体と氷柱の摩擦速度は、図-3と同じ 5.0 cm/s とした。

図-4は、気中、塩水中、フロリナート中における氷とコンクリート供試体の接触圧と動摩擦係数の関係を示している。コンクリート供試体には、摩耗していない供試体(摩耗距離 0.0 km)と既に摩耗している供試体(図-3で使用した摩耗距離 71.5 kmの供試体)の2種類を使用した。図より、いずれの条件においても動摩擦係数は概ね 0.02 から 0.05 の範囲の値を示す。摩耗距離 0.0 km のプロット(黒色)に着目すると、接触圧の変化によらず、概ね一定の動摩擦係数を示している。そして、気中、塩水中、フロリナート中での動摩擦係数の差はほとんどない。摩耗距離 71.5 km のプロット(赤色)に着目すると、接触圧の増加に伴って動摩擦係数がやや増加する傾向が見られる。これはコンクリート供試体表面の露出した骨材の影響であると思われるが、摩耗距離 0.0 km の動摩擦係数と比較すると、その値に大差はない。そして、気中、塩水中、フロリナート中での動摩擦係数についても、摩耗距離 0.0 km と同様に明確な差はない。

図-5は、フロリナート中における摩耗距離と動摩擦係

数の関係を示している。これは、図-3 に示したフロリナート中試験と同一のデータから算出したものである。図より、摩耗距離の増加によらず、動摩擦係数は概ね一定値を示している。

以上の結果より、本摩耗試験においては、気中、水中（塩水中、フロリナート中）における動摩擦係数の差はほとんどない。なお、本摩擦試験は限られた条件下で実施されたものであり、氷とコンクリートの摩擦係数を代表するものではない。

5. まとめ

- (1) 気中で氷とコンクリートが摩擦すると、コンクリートの摩擦面に氷膜が形成され、摩耗が抑制される問題があるが、水中（塩水中、フロリナート中）で摩耗試験を行うことにより氷膜の形成を抑制できる。
- (2) 塩水中における摩耗試験では氷柱が溶解により痩せてしまう問題があるが、フロリナート中では氷柱は溶解せず、形状を維持できることから、長期間の摩耗試験に適している。
- (3) フロリナート中における摩耗試験を摩耗距離 71.5 km まで実施したところ、摩耗距離の増加に伴って平均摩耗量も増加し続ける結果を得た。これにより、長期間の摩耗試験が可能であることを確認した。
- (4) 氷とコンクリートの動摩擦係数を気中と水中（塩水中、フロリナート中）で測定した結果、本研究の摩耗試験法においては、動摩擦係数の差はほとんどない。

謝辞：本研究における摩耗試験データの取得にあたっては、日本データサービス(株) 遠藤強氏、黒田雄介氏の協力を頂いた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 斎藤真樹, 飯田誠：北海道における国有港湾施設の現状と維持管理上の課題, 北海道開発局技術研究発表会論文集, 第60回, 2016.
- 2) 増田亨, 木岡信治, 本間大輔：積雪寒冷地の沿岸域におけるコンクリート構造物の複合劣化について, 北海道開発局技術研究発表会論文集, 第61回, 2017.
- 3) A.M. Nawwar et al. : Development of a test method to determine the resistance of concrete to ice abrasion and/or impact, American Concrete Institute SP 109, pp.401-426, 1988.
- 4) G.C. Hoff : Resistance of concrete to ice abrasion – A Review, American Concrete Institute SP 109, pp.427-455, 1988.
- 5) 佐伯浩, 浅井有一郎, 泉冽, 竹内貴弘：海水によるコンクリートの摩耗に関する研究, 海洋開発論文集, Vol. 10, 1985.
- 6) 理科年表 (平成 30 年/第 91 冊), 丸善出版, 2017.
- 7) H.Saeki, T.Ono, N.Nakazawa, M.Sakai, S.Tanaka : The coefficient of friction between sea ice and various materials used in offshore structures, Journal of Energy Resources Technology, vol.108, pp56-61, March 1986.
- 8) 中澤直樹, 寺島貴史, 佐伯浩：海水と各種構造物材料間の摩擦係数の評価について, 海洋開発論文集, Vol. 8, 1992.
- 9) 伊藤喜栄, 吉田明, 佐々木広輝, 泉冽, 佐伯浩：海水による各種コンクリートの摩耗特性, 海洋開発論文集, Vol. 3, 1987.

(2018.2.8 受付)

ICE ABRASION TEST METHOD DEVELOPMENT USING ANTIFREEZE ON CONCRETE STRUCTURES

Kazuya HASE, Toru MASUDA and Shinji KIOKA

In sea areas covered with ice where active sea ice movement is seen, the degradation and deterioration of marine and coastal structures of concrete has been caused by freeze and thaw, salt damage and ice abrasion. So far, although the test methods of the ice abrasion on concrete have been developed, such methods have had common faults.

For instance, one problem is that thin ice film grows gradually on the concrete surface to inhibit further abrasion of the concrete. For this reason, it was difficult to conduct an abrasion test between ice and concrete for a long period.

In this study, we developed a new method of the abrasion test under water to prevent ice film from forming on the concrete surface. We used flourinert as antifreeze, which has a freezing point of -127 deg. and is considered harmless in the concrete, in order to make it possible to perform the test under water. As results under various test conditions, we confirmed that the test method using by flourinert could prevent ice film from forming on the concrete surface and made it possible to conduct the ice abrasion test for a long time.