

室内試験における凍結融解サイクルと実環境における供用年数との関係把握に向けた基礎実験

国立研究開発法人土木研究所 寒地土木研究所 寒地技術推進室 ○川村 浩二
国立研究開発法人土木研究所 寒地土木研究所 耐寒材料チーム 遠藤 裕丈
国立研究開発法人土木研究所 寒地土木研究所 道北支所 高田 尚人

一般にコンクリートの耐凍害性は室内で行われる凍結融解試験の結果をもとに評価されるが、室内試験と実環境下における凍結融解作用の関係については十分に整理されていない。そこで、既往の指針に示された凍害進行予測式を活用し、同じ材料・配合のコンクリートを室内試験により得られる予測式と寒冷地の実環境（ここでは寒地土木研究所の屋上）に曝した際の予測式を比較し、本論文の範囲でサイクルと供用年数の関係把握を試みた。屋外に曝してまだ1冬経過した程度であるが、曝される環境によって定まる予測式を構成する係数をもとに、室内試験における凍結融解サイクルと屋外における年数の関係を概ね把握することができた。

キーワード：凍結融解サイクル、供用年数、凍害進行予測式

1. はじめに

北海道の道路コンクリート構造物は、厳しい寒冷環境下に曝されている。道路管理者は冬期間、路面に凍結防止剤を散布し、車両走行の安全確保に努めている。現在散布される凍結防止剤の多くが塩化物系であることに鑑みると、山間部でも海岸部と同様、凍結融解と塩化物の複合作用に対するコンクリート構造物の合理的な耐久性設計が求められる。

一般にコンクリートの耐凍害性は、室内で行われる凍結融解試験の結果をもとに評価される。しかし、室内試験は実際の環境条件を再現したものではなく、中には温度勾配などの諸条件が実環境に対して厳しいという意見もある。コンクリートが曝される環境は多様であり、曝される環境に見合った合理的な耐凍害性評価を行うには、室内試験における凍結融解サイクルと実環境下での年数との関係を明らかにすることが大切である。

ここでは既往の指針²⁾に示された凍害進行予測式を活用し、同じ材料・配合のコンクリートを室内ならびに屋外に曝し、室内での凍結融解試験で得られる予測式と実環境に曝した際の予測式を比較し、本論文の範囲でサイクルと供用年数の関係把握を試みた。

2. 研究の概念

コンクリートの凍害形態はスケーリングとひび割れに

大別されるが、本論文ではスケーリングに着目した評価を行う。

既往の指針にはスケーリングの予測式として式(1)が示されている²⁾。

$$D_m = ae^{b \log \frac{t}{A}} \quad (1)$$

ここに、 D_m は剥離度(mm) (平均剥離深さと測定範囲に占めるスケーリング面積の割合との積³⁾)、 t は凍結融解履歴で一般に供用年数(年)、 A は t を無次元化させるための係数(一般には調査時の供用年数の1/2)、 a 、 b は係数である。

同じ材料・配合のコンクリートを室内ならびに屋外に曝し、室内で凍結融解試験を行った際に得られる予測式と実環境に曝した際に得られる予測式は、双方の劣化指標が同じ D_m であるため、式(2)のように表現できる。

$$D_m = ae^{b \log \frac{t}{A}} = a'e^{b' \log \frac{cyc}{A'}} \quad (2)$$

ここに、 cyc は凍結融解サイクル、 a' 、 b' は室内試験の諸条件によって定まる係数、 A' は cyc を無次元化させるための係数(ここでは最長凍結融解サイクルの1/2とする)である。

それぞれの係数が定まると、式(2)の変数は供用年数 t と凍結融解サイクル cyc の2つだけとなり、室内試験における凍結融解サイクルと実環境における供用年数の関係

表-1 コンクリート配合

使用セメント	水セメント比(%)	単位量(kg/m ³)				AE剤
		水	セメント	細骨材	粗骨材	
高炉セメントB種	55	147	267	865	1058	添加
普通ポルトランドセメント	55	155	282	875	1058	無添加
高炉セメント	55	150	273	864	1057	添加
普通ポルトランドセメント	55	158	287	872	1058	無添加

【使用したAE剤の種類および使用量】

- AE減水剤（リグニンスルホン酸化合物とポリオール複合体）
使用量(ml/m³)=セメント量(kg/m³)×2.5ml/kg
- AE助剤（変性ロジン酸化合物系陰イオン界面活性剤）
使用量（1%希釈溶液）(g/m³)=セメント量(kg/m³)×2.5(g/kg/A)×1.7~2.3(A)
上記の式における単位「A」は、目標空気量によって定まる値
(配合試験により決定)

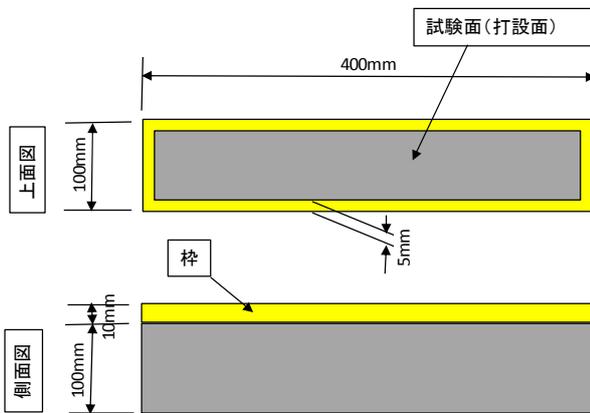


図-1 供試体

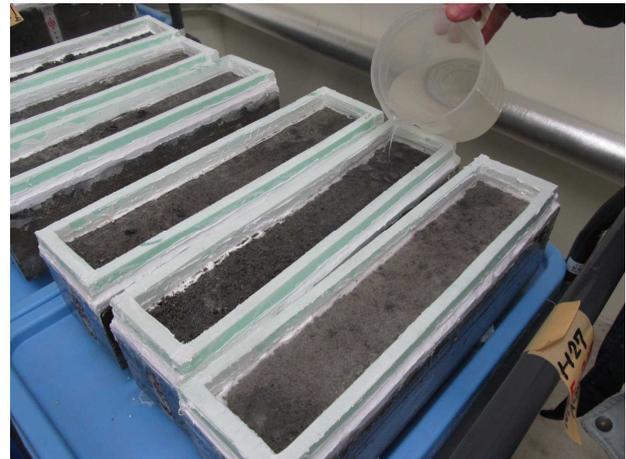


写真-1 室内試験状況

を示す形となる。すなわち、室内試験の結果をもとに、曝される環境に見合った合理的な耐凍害性評価が定量的に行えるようになる。なお、剥離度はスケーリングの程度を表す指標であり、式(2)の D_{ml} はスケーリング量(g/cm²)に置き換えることもできる⁴⁾。

以上を踏まえ、ここではスケーリング量を劣化指標とし、室内試験と屋外暴露におけるスケーリングの進行予測式をそれぞれ求め、室内試験における凍結融解サイクルと屋外暴露における年数との関係を調べた。

3. 実験概要

(1) コンクリート配合

コンクリートの配合を表-1に示す。セメントは寒冷地で広く使用されている高炉セメントB種と普通ポルトランドセメントの2種類とした。水セメント比は内陸部における最大値である55%⁶⁾とした。細骨材は苫小牧市錦岡産海砂（表乾密度2.67g/cm³、絶乾密度2.65g/cm³、吸水率0.87%、粗粒率2.80、除塩処理済み）、粗骨材は小樽市見晴産碎石（表乾密度2.67g/cm³、絶乾密度2.64g/cm³、吸水率1.66%、粗粒率7.04）を使用した。粗骨材の最大寸法



写真-2 屋外暴露状況

は25mmとした。

土木学会コンクリート標準示方書によると、寒冷地でAEコンクリートの使用が原則となったのは昭和42年⁶⁾からで、それ以前の示方書は「AEコンクリートを用いるのが望ましい」と記述され、原則とはなっていない⁷⁾。そのため現在も使用されている供用年数が長いコンクリート構造物の一部はAEコンクリートでない可能性もあることに鑑み、AE剤無添加の供試体も作成した。AE剤を添加する場合の空気量は内陸部で一般的な4.5±1.5%⁶⁾

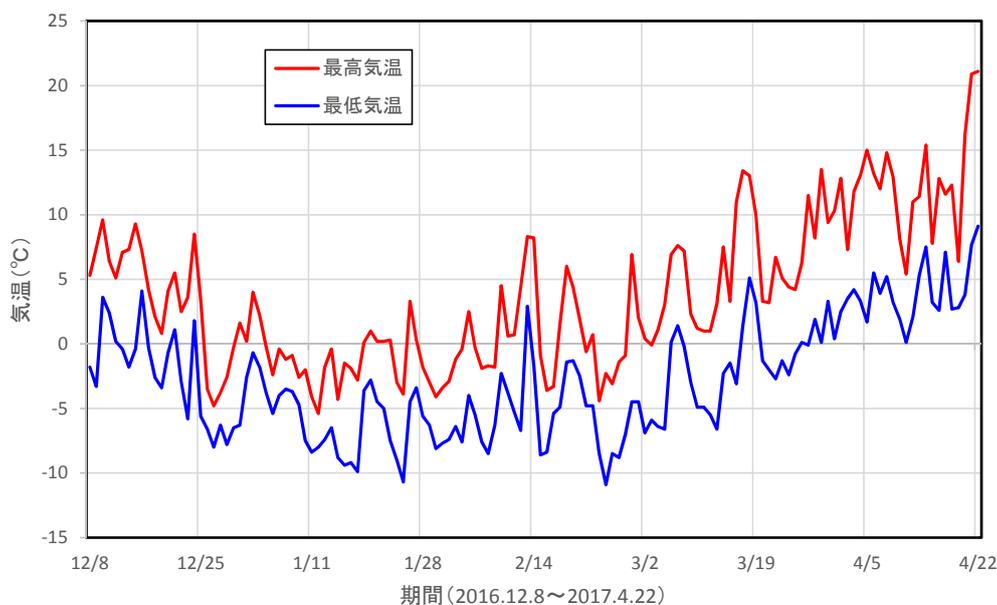


図-2 札幌アメダスデータ（札幌管区气象台）

とした。

(2) 供試体

図-1に供試体を示す。供試体は 100mm×100mm×400mmの角柱とした。打設後、材齢7日まで湿布養生を行った後、材齢28日まで恒温恒湿室（温度20℃、湿度60%）に静置した。静置期間中に発泡スチロールを使用して高さ10mm、幅5mmの枠を作製し、材齢21日にエポキシ樹脂とシリコンを用いて枠を打設面（100mm×400mm、以下、試験面と記す）に据え付けた。

(3) 室内試験（凍結融解試験）

試験は材齢28日目から開始した。ここでは、ASTM C 672 にならい、試験面に凍結防止剤に見立てた濃度3%の塩化ナトリウム水溶液（以下、塩水と記す）を深さ6mm張り、-18℃で16時間、23℃で8時間の1日1サイクルの凍結融解試験を300サイクルまで行った。写真-1に試験状況を示す。ここでは25サイクルおきにスケーリング量の測定を行った。スケーリング量は、試験面から剥離片を採取し、110℃で乾燥させた後、剥離片の質量を測定して求めた。スケーリング量は供試体3個の平均を測定値とした。

(4) 屋外暴露

材齢28日経過後、室内試験と同様に、試験面に塩水を深さ6mm張り、札幌市の寒地土木研究所第1実験棟（3階建て）屋上に暴露した。写真-2に暴露状況を示す。写真に示すように、降雪・降雨の影響で塩水濃度が変化しないように、暴露供試体の上部に簡易な屋根を設置した。屋外暴露は平成27年12月8日に開始した。スケーリング

量の測定は、暴露開始から0.16年経過した平成28年2月16日と、0.32年経過した同年4月22日に行った。塩水は測定の都度、新しく入れ替えている。図-2に示す札幌のアメダスデータをもとに、気温が0℃未満に低下したときから0℃以上に達するまでの期間を1サイクルとして屋外暴露の凍結融解回数をカウントしたところ、暴露開始から平成28年2月16日迄で28サイクル、同年4月22日迄で55サイクルであった。スケーリング量は室内試験と同様の方法により求めた。室内試験と同様、供試体3個の平均を測定値とした。

4. 実験結果および考察

(1) スケーリング量の測定結果

図-3に高炉セメントB種を用いた供試体におけるスケーリング量の推移を示す。計算値は予測式から算出される値で、供試体3個の平均である実測平均値の予測を表すものである。室内試験の結果を見るとAE剤添加供試体は、AE剤無添加供試体に比べるとスケーリングが小さい傾向となっている。屋外暴露の傾向も室内試験とほぼ同様であった。いずれの供試体も、試験開始もしくは暴露開始以降、スケーリングが進行している。

図-4に普通ポルトランドセメントを用いた供試体におけるスケーリング量の推移を示す。今回の試験では、高炉セメントB種を用いた場合とは対比的に、室内試験ではAE剤無添加供試体よりもAE剤添加供試体の方がスケーリング量が多い結果が示された。AE剤を添加すると耐凍害性を増大させることが広く知られており、試験結

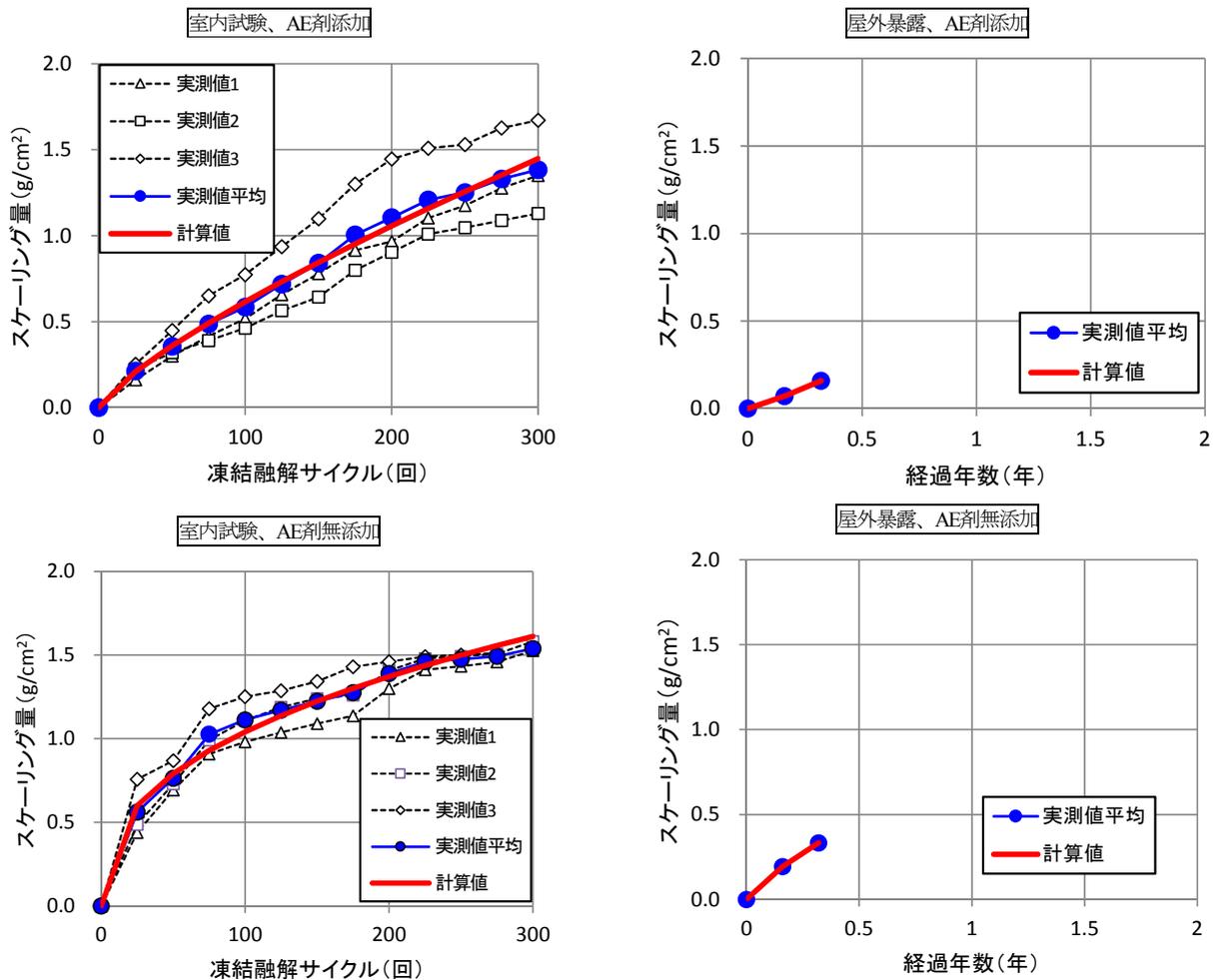


図-3 高炉セメントB種を使用した供試体におけるスケーリング量の推移

果はこれと対応していない。このことについては、原因の特定に至らなかった。一方、屋外暴露については、AE剤添加供試体は0.32年経過までの範囲ではスケーリングがほとんど認められなかったのに対し、AE剤無添加供試体は経時的にスケーリングが増加しており、AE剤有無の特徴が明確に表れた。

表-2、3は今回示した実測データの範囲で整理した予測式の各係数である。図-3、4に示すように、いずれの供試体も実測平均値と予測式から求まる計算値は良く対応している。

(2) 室内試験と屋外暴露における凍結融解履歴の関係

図-5は表-2、3の結果をもとに室内試験と屋外暴露における凍結融解履歴（凍結融解サイクルと経過年数）の関係を式(2)を用いて整理したものである。図中に併記した数値は、その時点のスケーリング量(g/cm²)を示している。

1冬暴露した範囲であるが、寒地土木研究所第1実験棟の屋上における0.3年（1冬）経過時のスケーリング量は、室内試験では高炉セメントB種を用いたAE剤添加供試体で16サイクル、同AE剤無添加供試体で5サイクル、普通

ポルトランドセメントを用いたAE剤添加供試体で0.01サイクル、同AE剤無添加供試体で116サイクルのスケーリング量と同程度となる結果が示された。特異な傾向を示した普通ポルトランドセメントを用いたAE剤無添加の供試体を除くと、本論文の範囲では、屋外暴露の0.3年（1冬）は室内試験の0.01～16サイクルに相当すると言える。今後もデータを積み重ね、室内試験と今回の試験箇所である屋外における凍結融解履歴の関係についてさらに詳細に整理していきたい。参考までに今冬期の屋外暴露の状況を写真-3に示す。

5. まとめ

本論文では、ASTM C 672に準じた凍結融解試験を300サイクル実施した際のデータと、札幌市の寒地土木研究所第1実験棟の屋上に1冬暴露した際のデータを用いて、室内試験のサイクルと屋外における年数の関係の把握を試みた。

得られた結果をまとめると、以下のようになる。

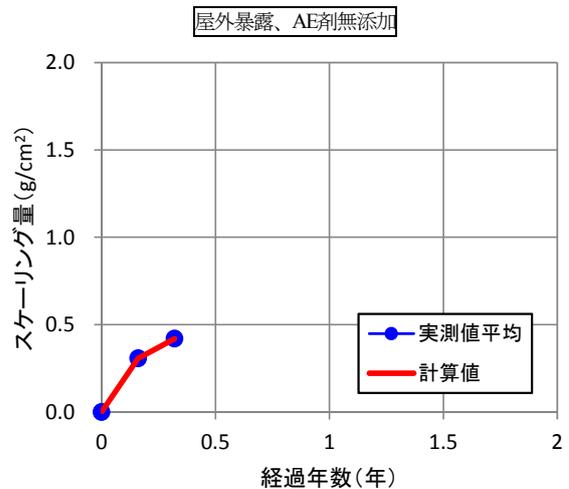
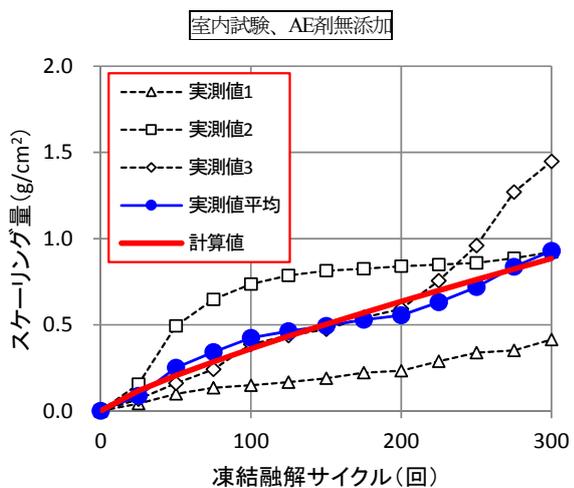
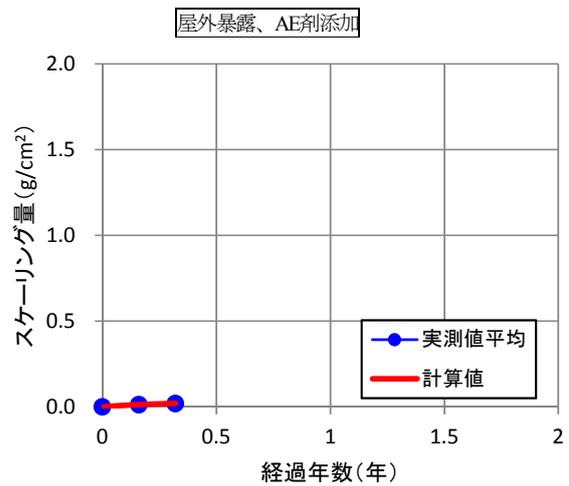
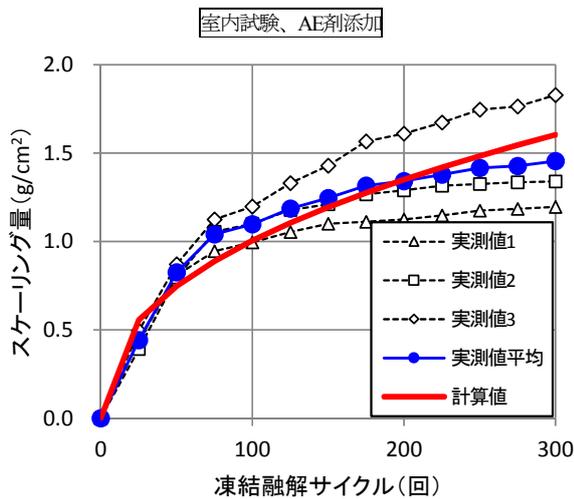


図-4 普通ポルトランドセメントを使用した供試体におけるスケーリング量の推移

表-2 予測式の係数 (室内試験)

使用セメント	AE剤	a'	b'	A'
高炉セメントB種	添加	0.844	1.793	150
	無添加	1.223	0.915	
普通ポルトランドセメント	添加	1.194	0.979	
	無添加	0.502	1.879	

表-3 予測式の係数 (屋外暴露)

使用セメント	AE剤	a	b	A
高炉セメントB種	添加	0.066	2.664	0.15
	無添加	0.184	1.799	
普通ポルトランドセメント	添加	0.012	1.546	
	無添加	0.299	1.032	

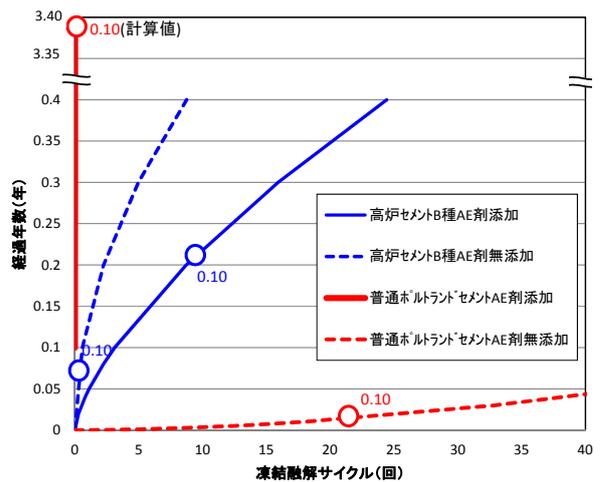


図-5 室内試験と屋外暴露における凍結融解履歴の関係

- (1) 普通ポルトランドセメントを用いたAE剤無添加を除くと、室内試験と屋外暴露では、スケーリングの進行の特徴は対応していた。
- (2) 予測式から求まる計算値は、実測値と良く対応した。

- (3) 普通ポルトランドセメントを用いた AE 剤無添加を除くと、屋外暴露の0.3年(1冬)は室内試験の0.01~16サイクルに相当する。



写真-3 屋外暴露実験状況
(破線で囲った部分が供試体)



写真-4 現在実施中の屋外暴露実験の一部

6. 今後の課題

今後もデータを積み重ね、曝される環境に見合った合理的な耐凍害性の評価に際して必要な屋外実験と室内実験の相関関係を整理する予定である。

また、現在は寒地土木研究所の屋上だけではなく、北海道内の環境条件が異なる複数の箇所でも同様の暴露実験を行っている。実験状況の一部を写真-4に示す。

参考文献

- 1) JIS A 1148 「コンクリートの凍結融解試験方法」、解説、2001
- 2) 北海道土木技術会コンクリート研究委員会：北海道におけるコンクリート構造物の性能保全技術指針、劣化機構編、p.18、2013.12
- 3) 北海道開発局港湾部港湾建設課、寒地港湾技術研究センター：海洋環境下におけるコンクリートの耐久性向上技術検討業務報告書、資1-10、2000.3
- 4) 凍結融解と塩化物による複合劣化に対するコンクリートの耐久性設計法および表面含浸材を活用した耐久性向上に関する研究、寒地土木研究所報告、第133号、pp.103-104、2011.3
- 5) 北海道開発局道路設計要領、第3集橋梁、第2編コンクリート、p.3-コ2.4
- 6) 土木学会：コンクリート標準示方書解説【昭和42年版】、p.32、1967.7
- 7) 土木学会：昭和31年土木学会制定コンクリート標準示方書解説、p.26、1958.12