

[14] 北海道内3都市の気象条件をモデル化した凍結融解試験

正会員 ○田 畑 雅 幸 (北海道大学 工学部)
 正会員 洪 悦 郎 (北海道大学 工学部)
 正会員 鎌 田 英 治 (北海道大学 工学部)

1. はじめに

寒冷地域に使用されるコンクリート構造物の耐凍害性を、その気象条件に対するコンクリートの耐用年数としてとらえることを究極の目的に、各種の凍結融解試験と屋外暴露試験を試行している。

本研究では、寒冷地域のモデルとして、気象条件の異なる北海道内の札幌市、釧路市および北見市の3都市を選び、公表されている「気象庁月報」あるいは「北海道の気象」の気温から冬期の気象をモデル化し、実験の汎用性や一般化を検討した。この気象モデル条件による凍結融解試験は、ASTM法や最低温度を異にした一定温度の繰り返しによる凍結融解試験と比較し、試験条件の影響を検討するとともに、屋外暴露試験との比較により、実際における適用性を検討することをねらいとしている。しかし、比較の対象となる屋外暴露試験の経過が1年未満のものもあり、この点についての検討は本報告の範囲から除外した。

2. 実験の方法

実験は2年にわたって行つたものである。その試験の内容と実験の流れを表1、図1に示す。

試験条件の比較は、同一バッチより作製したコンクリートで各種の凍結融解試験を行い、それぞれの試験条件に対する劣化程度を比較することにより行つた。実験に用いたコンクリートは、表2に示すとく、目標スランブを18cmとした建築

表1 実験の範囲

シリーズⅠ (55年)	1) 水中凍結水中融解試験 (ASTM-A法) [水中凍融 -18℃]
	2) 気中凍結水中融解試験 (ASTM-B法) [気中凍融]
	3) 気象モデルの凍結融解試験
	(1) 気中気象モデルⅠ-札幌 (3年分) [気中気象モデルⅠ-札幌] (2) " " Ⅰ-釧路 (3年分) [" " Ⅰ-釧路] (3) " " Ⅰ-北見 (3年分) [" " Ⅰ-北見] (4) " " Ⅱ- (各都市各3年の計9年分) [気中気象モデルⅡ] (5) " " Ⅲ- (" " ") [" " "]
シリーズⅡ (56年)	1) 水中凍結水中融解試験
	(1) 最低温度 -5℃ [水中凍融 -5℃] (2) " " -10℃ [" " -10℃] (3) " " -18℃ (ASTM-A法) [" " -18℃] (4) " " -30℃ [" " -30℃]
	2) 気中凍結水中融解試験 (ASTM-B法)
	3) 気象モデルの凍結融解試験
(1) 水中気象モデル-札幌 (1年分) (2) " " -釧路 (1年分) (3) " " -北見 (1年分) (4) 気中気象モデル (各都市各3年の計9年分)	
4) 屋外暴露試験	
(1) 札幌 (2) 釧路 (3) 北見	

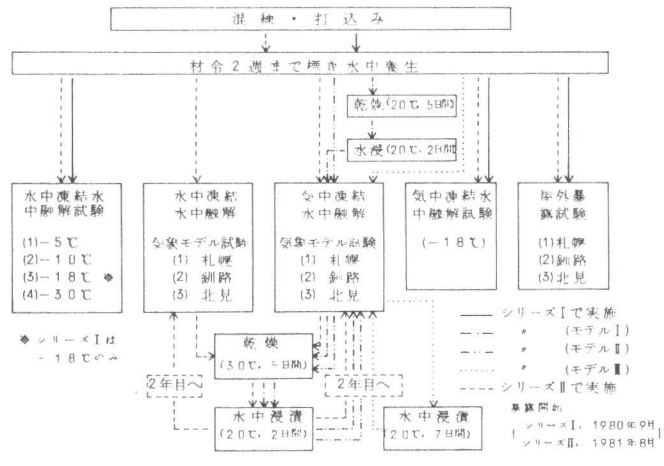


図1 実験の流れ

表2 調合およびコンクリートの性状

記号	調 合 表								砕り上がり性状						目標強度 (kg/cm ²)				
	水セメント比 (%)	細骨材率 (% vol)	単位水量 (kg/m ³)	混和剤 (OC/m ³)	絶対容積 (L/m ³)			スランブ (cm)		空気率 (%)		砕り上がり量 (kg)		単位容積重量 (kg/m ³)		材令2週		材令4週	
					セメント	細骨材	粗骨材	I	II	I	II	I	II	I	II	I	II		
5N	50	43.9	183	—	112	303	288	—	18.5	—	2.0	—	20.0	—	2.32	—	30.2	—	34.8
6N	60	46.0	185	—	97	326	382	19.0	17.1	2.3	2.5	21.5	19.7	2.30	2.30	21.6	19.2	29.6	23.9
7N	70	48.2	191	—	86	344	369	18.5	18.0	2.4	2.6	20.5	18.5	2.28	2.27	12.3	15.0	17.8	20.1
7V	"	48.2	191	—	86	344	369	15.0	—	—	—	20.2	—	2.28	—	10.6	—	14.7	—
	"	48.2	197	—	89	339	365	—	18.0	—	0.8	—	20.8	—	2.31	—	16.3	—	21.1
7W	"	49.0	201	—	91	342	356	19.5	—	1.4	—	21.0	—	2.22	—	12.7	—	17.4	—
	"	47.7	180	51.4	81	333	366	18.5	20.1	4.9	5.5	20.9	19.5	2.23	2.20	10.2	11.2	14.3	14.6
9N	90	51.0	202	—	71	366	351	18.0	17.5	2.3	3.1	20.0	18.5	2.27	2.23	6.8	6.8	9.2	8.8

※ IはシリーズⅠ, ※※ IIはシリーズⅡ, ※※※ 和賀川産山砂と大野産山砂を使用, 他は広島産の山砂, 山砂利を使用

用軟練りの調合で、意図的に吸水率の大きい骨材（和賀川産川砂，5.21%，大野産山砂利，5.09%）を用いたコンクリートや、減圧下（水銀柱約90～30mmHg）で練り混ぜ、他のコンクリートよりもエントラプトエアを減じたコンクリートも作製した。

3. 気象条件のモデル化

前報³⁾では、寒冷地の気象条件を冬期の凍結融解作用と夏期の乾燥作用とに分け、札幌市に暴露したコンクリートの実測値から気象モデルを作成したが、本実験では、冬期の寒冷地の気象作用を一般化することを目的に、札幌市、釧路市、北見市の1970年～1980年の最近10年間の気温を「気象庁月報」又は「北海道の気象」から調査してモデルを決定した。図2は、1日の最低温度がマイナスで最高温度がプラスの日数をかぞえた結果で、最低温度が0℃以下となつた日数のほか、最低温度が-10℃以下となつた日数についてとりまとめたものである。図から、最近10年間の0℃以下となる繰り返し回数、-10℃以下となる繰り返し回数が平均値に近い年として、1971年から72年にかけての冬を選び、このデータをもとに気象モデルを作製することとした。表3は、この冬の温度段階別の凍結融解回数を示したものであるが、表中の-0.1～-0.9℃までは凍害の影響が少ないことと、2～3時間の凍結時間では、試験体中心温度の追従が困難なことから、気象モデルの作製ではこの間の凍結融解は考慮せず、また、連続してマイナス日（真冬日）が続いた場合の最低温度は、その間の最低温度とすることとした。

気象モデルの凍結融解の条件は、この1971～72年の冬の最低温度が-1℃以下となる日の最低温度を凍結最低温度とし、融解温度を+5℃とした繰り返しを、この期間全体にわたつて行うこととし、繰り返し速度は1日6サイクルに限定することとした。したがつて、札幌市の一冬について74回の凍結融解条件を約13日（測定時間を除く）に促進化したこととなる。夏期の条件は前報³⁾と同様に30℃、5日間の乾燥とし、冬期の凍結融解と夏期の乾燥で、1年間の気象条件をモデル化した。

4. 凍結融解試験

凍結融解試験の開始条件は、シリーズIの気中気象モデルIを除き、各試験とも標準水中養生材令2週とした。以下に各試験の概要を述べる。

1) 水中凍結水中融解試験

シリーズIでは、ASTM C666のA法に準じた水中凍結水中融解試験とした。（ASTM-A法又は水中凍融-18℃）シリーズIIは、この他に凍結最低温度-5℃、-10℃、-30℃の実験（水中凍融-5℃、-10℃、-30℃）を加え、4種類の実験を実施した。

2) 気中凍結水中融解試験

シリーズI、IIともASTM C666のB法に準じた気中凍結水中融解試験とした。（気中凍融）

3) 気象モデルの凍結融解試験

(1) 気中気象モデルI：標準水中養生材令2週後直ちに夏期条件の20℃、5日間の乾燥を与え、水中浸漬2日間ののち冬期条件として、3都市の気象条件を与えた実験である。2年目以降の夏期条件は、30℃、5日間の乾燥と20℃、2日間の2種類として3年分の繰り返しを行った。（気中気象モデルI-札幌，釧路，北見）

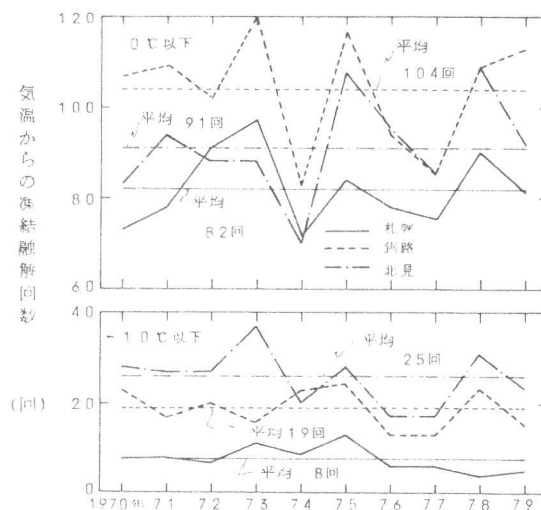


図2 北海道内3都市における10年間の気温からの凍結融解回数

表3 気象モデル年の温度および凍結融解回数

	-0.1 -0.9℃	-1.0 -5.0	-5.1 -10.0	-10.1 -15.0	-15.1 -20.0	-20.1 -25.0	-25.1 -30.0	合計 回数	気象モデル※		
									回数	凍結温 度(℃)	平均融 解温 度(℃)
札幌	4	4.4	2.2	8	0	0	0	7.9	7.4	-3.8	-5.2
釧路	1.4	4.6	3.5	1.3	2	1	0	11.1	9.7	-5.9	-6.1
北見	1.1	3.8	1.8	1.2	1.3	1	1	9.4	8.3	-6.6	-8.0

※ 気象モデル年，1971年10月～1972年4月

※※ 合計回数から-0.1～-0.9℃の回数を差し引いた回数

(2) 気中気象モデルⅡ：標準水中養生材令2週後直ちに冬期条件を行い、札幌市、釧路市、北見市の順で各都市各3年分の計9年分行つた気中凍結水中融解試験。(気中気象モデルⅡ)

(3) 気中気象モデルⅢ：冬期条件は(2)の気中気象モデルⅡと同様であるが、夏期の期間乾燥の替わりに20℃で、7日間の水中浸漬を行い、乾燥行程が入らない方法。(気中気象モデルⅢ)

(4) 水中気象モデル：気中気象モデルⅡの条件のうち気中凍結を水中凍結とし、各都市の条件で1年分行つた実験。(水中気象モデル-札幌、釧路、北見)

5. 実験結果

凍結融解試験の結果は、すべて材令2週のを基準と

した質量減少率(従来は重量百分率又は重量変化率で表示)、長さ増加比(従来は長さ変化率又は凍伸度で表示)および相対動弾性係数で表わした。また、図5、6、7、8は、気象モデルによる1年間の凍結融解の繰り返しを74~97回であることから、乾燥行程および水中浸漬の行程を含めた1年間の気象モデルの結果をASTMの試験法の100サイクルに対応させて同一のグラフ上に図示した。

1) ASTM-A法による結果

ASTM-A法の結果を図3(シリーズI)、図4(シリーズII)に示す。

意図的にエントラプトエアを除いた7Vコンクリートは、シリーズI、IIとも数サイクルで容易に崩壊し、5Nおよび7Aコンクリート以外はA法の条件で50サイクル以前に被害を急激に受けるコンクリートであった。

2) 気中気象モデル条件における夏期の乾燥条件の影響

試験開始前後の乾燥の影響を気中気象モデル-札幌と比較したものが図5である。養生後の乾燥行程が入らない気象モデルⅡ、Ⅲの条件では、1年目60サイクル時の相対動弾性係数で85%程度と

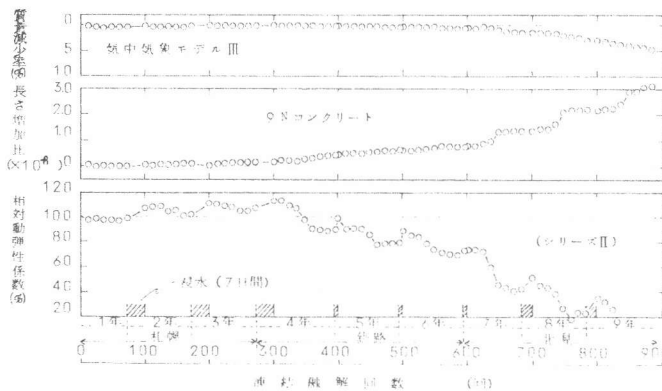


図7 各都市各3年間分の計9年間の気中気象モデルⅢの結果

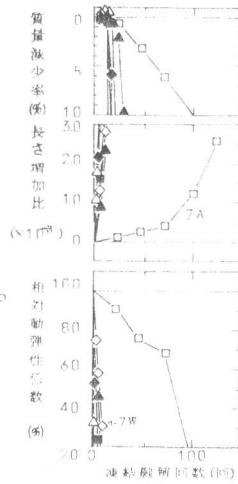


図3 ASTM-A法の結果(シリーズI)

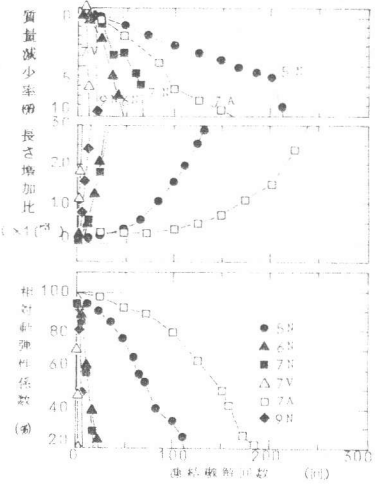


図4 ASTM-A法の結果(シリーズII)

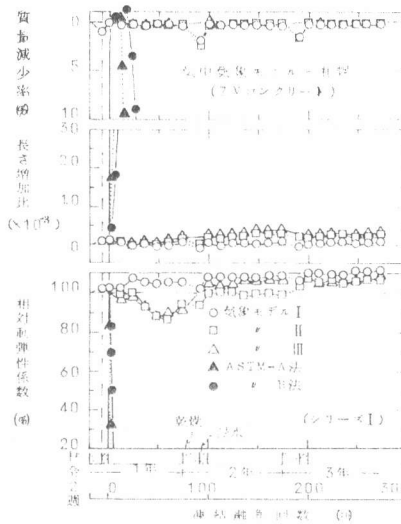


図5 夏期の乾燥条件の影響

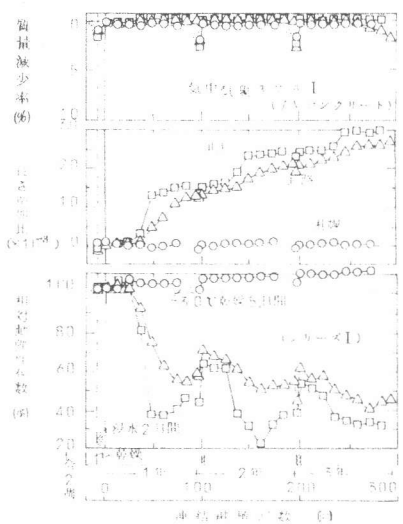


図6 道内3都市の気中気象モデルの結果

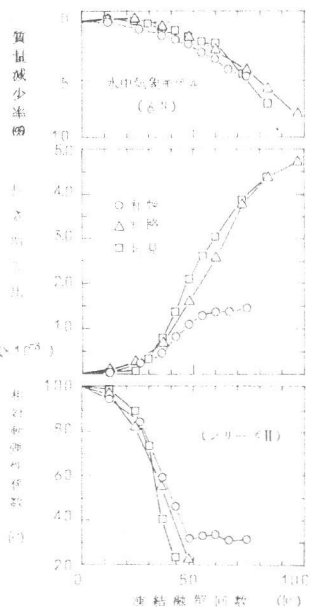


図8 3都市の水中気象モデルの結果

なるが、 -5°C 以下が2回しか出現しない60サイクル以降は回復傾向となり、2年目の浸水によつて材令2週時の値まで回復した。一方、気象モデルⅠは、養生終了後の 20°C で、5日間の乾燥で1年目から劣化傾向がなく、乾燥が耐凍害性向上に役立つことが示された。また、気中気象モデル-札幌による条件が乾燥行程の有無にかかわらず劣化の累積効果の少ないものであつた。(図5)

3) 道内3都市の気象モデルの比較

札幌の条件では被害のないコンクリートも、釧路、北見の順に劣化が大きい。特に、北見は36サイクルで急激に相対動弾性係数が低下し、 -2.5°C が出現する48~60サイクルで最低となるがそれ以降わずかな回復となつた。2日間の浸水によりかなりの回復となるが、2年目、3年目と劣化が累積される傾向となつた。一方、長さ増加比では、乾燥により $0.1 \sim 0.2 \times 10^{-3}$ 程度の収縮を示すが、凍結融解の繰り返しと共に凍害劣化による膨張が累積され、動弾性係数の回復時においてもわずかな膨張を示した。(図6)

乾燥行程の入らない気中気象モデルⅢの場合、釧路の条件から徐々に被害が出始め、サイクルの増加と共に劣化が累積された。さらに北見の条件ではいずれの指標においても劣化速度を増し、通算9年目には動弾性係数が測定不可能となつた。(図7)

水中凍結水中融解の気象モデルの条件は、気中気象モデルの条件で劣化のなかつた札幌市の条件も被害を受け、水中凍融の条件が厳しいことを示した。図8は、被害の大きい6Nコンクリートの場合であるが、各都市間の劣化の差は少なかつた。

4) 各種凍結融解試験方法の影響

図9は、シリーズⅡにおける各種の試験法の差を、6Nコンクリートで比較したものであるが、気象モデルは札幌の条件のみ図示した。図から、被害程度は、気中気象モデル-札幌、 -5°C 水中凍融、水中気象モデル-札幌と気中凍融、 -10°C 以下の水中凍融の4つのグループに分かれ、この順に凍結融解の条件が厳しくなることが示されている。従来試みて来た気中気象モデルの条件は最も影響が少なく、この条件で劣化したコンクリートは7Vのみであつた。

5) 水中気象モデルの条件と他の試験法との関係

水中気象モデルの条件に対応する一定温度の繰り返し条件を求める目的で気象モデルの1年間および一定温度繰り返し100サイクルの耐久性指数を比較したものが図10である。結果は、いずれの都市の条件も気中凍融と -10°C の水中凍融の間となり、より -10°C に近い値となつた。表2に示した気象モデルの平均気温が札幌 -5.2°C 、釧路 -6.1°C 、北見 -8.0°C を考慮すると、水中気象モデルの影響は、より低い温度に対応する結果となつた。

本研究は、第20回東レ科学技術助成(代表・洪悦郎)の援助を受け実験の一部には第19回竹中育英会建築研究助成によつて行つた。研究の遂行には、月津肇(現・間組)、大谷清介(現・戸田建設)両君の努力に負う所が多く、感謝します。

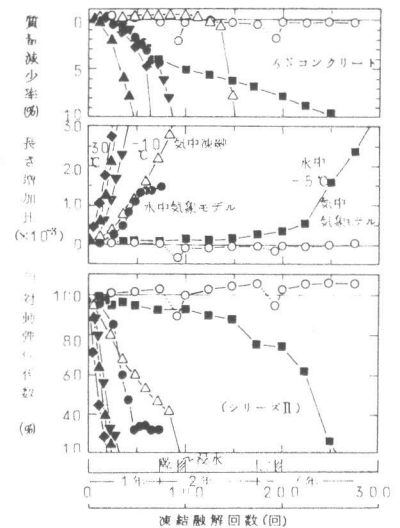


図9 各種凍結融解試験方法の影響

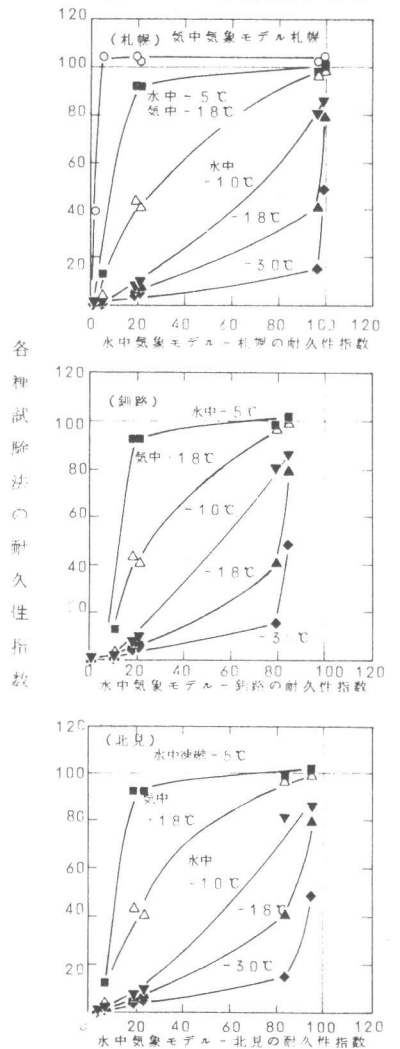


図10 水中気象モデルと各種試験法との関係

【参考文献】

- 1) 田畑, 鎌田, セメントコンクリート1979年№383
- 2) 財団法人 建材試験センター, 「構造材料の安全性に関する標準化のための調査研究報告書 1979年」
- 3) 田畑, 鎌田, 第3回コンクリート工学年次講演会講演論文集, 1981年