

委員会報告 コンクリートの凍結融解抵抗性の評価方法に関する 研究委員会

河野 広隆^{*1}・千歩 修^{*2}・田口 史雄^{*3}・名和 豊春^{*2}・阿波 稔^{*4}・近松 竜一^{*5}・片平 博^{*6}

要旨：コンクリートの耐凍害性の評価は、凍結融解繰り返し試験から求めた耐久性指数で評価する方法が定着している。試験方法も JIS A 1148 として 2001 年に JIS 化されたが、試験に多大の労力と時間がかかること、試験機の仕様によって結果が変動すること等の問題点が指摘されている。さらには、相対動弾性係数、長さ変化、質量変化の 3 項目を測定するが、それらとコンクリートの耐久性能との関連性については、未だ共通の見解をみていない。そこで、環境外力と凍害の実態の関連、コンクリート自体の耐凍害抵抗性の性能の把握を行い、これらを反映して、コンクリートの耐凍害性を評価する試験方法についての提案を行った。

キーワード：コンクリートの凍害、劣化機構、劣化実態、耐久性能、凍結融解繰り返し試験

1. はじめに

コンクリートの凍害は古くからある、コンクリート構造物の代表的な劣化のひとつである。しかし、その劣化の実態や構造物への影響などは必ずしも十分に把握されているとはいえない。一方、コンクリートの耐凍害性を評価する方法として、凍結融解繰り返し試験が広く用いられているが、実際の劣化との関連が不明確なこと、試験装置間の変動があること、大変に時間と労力を要する試験であることなど、いろいろと問題点も指摘されている。

そこで、JCI では平成 18 年度から「コンクリートの凍結融解抵抗性の評価方法に関する研究委員会」を設置し、コンクリートの耐凍害性を適切かつ簡易に評価できる手法の検討を行うことにした。この検討のためには、環境外力とコンクリート構造物の凍害の実態の関連を把握し、コンクリート自体の耐凍害性を決定する要因を明

らかにする必要がある。その上で、それらを実評価する各種試験方法との関連を明らかにしなければならない。このため、委員会では次の 3 つの WG を設置して 2 年間にわたって検討を行った。

凍害環境評価 WG は、過去の文献や劣化事例調査をもとに、外部からのコンクリート構造物への凍結融解作用の定量評価について検討を行った。耐凍害性能評価 WG は、凍結融解作用に対するコンクリートの抵抗性について、過去の劣化モデルや影響要因の整理を行い、その評価法について検討を行った。耐凍害性試験法 WG は、既存の凍結融解試験方法をレビューし、改善・合理化に関する調査研究を行った。以下、章ごとに各 WG の成果の概要を報告する。

なお、本委員会では再生骨材やポーラスコンクリートなどの特殊なコンクリートの耐凍害性については対象外とした。

表-1 委員会構成

委員長	河野広隆	(京都大学)			
幹事	千歩 修	(北海道大学)	田口史雄	(土木研究所)	
	名和豊春	(北海道大学)	阿波 稔	(八戸工業大学)	
委員	近松竜一	(大林組)	片平 博	(土木研究所)	
	石川雄康	(太平洋セメント)	遠藤裕文	(土木研究所)	緒方英彦 (鳥取大学)
	小田部裕一	(住友大阪セメント)	小山田哲也	(岩手大学)	加藤利菜 (北見工業大学)
	十河茂幸	(大林組)	高田良章	(フローリック)	高田龍一 (松江工業高等専門学校)
	高橋幸一	(八洋コンサルタント)	長谷川拓哉	(北海道大学)	羽生賢一 (住友大阪セメント)
	濱 幸雄	(室蘭工業大学)	林 大介	(鹿島建設)	林田 宏 (土木研究所)
	三橋博三	(東北大学)	宮里心一	(金沢工業大学)	

*1 京都大学大学院 工博 (正会員)

*2 北海道大学大学院 工博 (正会員)

*3 土木研究所 寒地土木研究所 (正会員)

*4 八戸工業大学大学院 工博 (正会員)

*5 大林組 技術研究所 工博 (正会員)

*6 土木研究所 つくば中央研究所 (正会員)

2. 凍害劣化の環境要因とその定量化

2.1 凍害と劣化の進行

凍害の事例・資料を収集し、コンクリートの凍害とその劣化形態、さらに凍害の劣化パターンと劣化の進行を表-2 ように整理した。劣化の進行の一例を図-1 に示す。

2.2 凍害劣化の環境要因に関する調査

凍害劣化に影響する環境要因を抽出するため、日本コンクリート工学協会、セメント協会、土木学会および日本建築学会の1980年以降の年次講演概要集・論文集を調査した。関連する約370編の論文で実験変数として採用されていた主要な劣化環境要因を図-2[1]に示す。これ以外に、凍結持続時間、凍結速度等があるが、実環境において影響は小さいと考えられる。その他、風等の影響もあるが、図-2の環境要因に含まれているものと考えられる。これらをまとめると、凍害劣化の環境要因としては、温度条件(最低温度・凍結融解回数)と含水状態が基本的なものであり、塩化物や乾燥等の影響を考慮する必要があるといえる。

2.3 凍害劣化の環境要因の定量化の現状

既往の劣化予測法の研究で使用されている環境要因を表-3 に示す。これらの方法では、促進試験で得られたデータを用いて重回帰分析で影響要因を定量化し、この結果から劣化予測式を提案している。基本的な環境要因については、2.2と同様に温度条件(最低温度・凍結融解回数)と水分となっている。

環境要因の定量化に関する研究については、地域条件を凍害危険度等で表現したもの、最低温度等の条件を変えた実験結果からその影響を定量的に評価したもの、実構造物の含水状態に着目して検討したものの、実際の建物の劣化の激しい部位をとり

まとめたもの等がある。なお、凍結防止剤の影響を受ける場合、凍結防止剤を含む融雪水が流れる部位の劣化が激しくなり[2]、一般地域とは異なる部位条件の設定が必要と考えられる。

既往の基準類では、様々な方法で凍害劣化環境が表示されている。コンクリート標準示方書(土木学会)では、昭和24年の初版以降、数回の改定が行われており、耐久性関連の表の表現が変化しているが、基本的には気象条件と構造物の水との接触状態・断面の厚さで区分して規定されている。建築学会では、JASS5の中で凍結融解作用係数(地域の最低気温、日射・部位係数を考慮)および凍害危険度のマップが解説で示されており、高耐久性鉄筋コンクリート造設計施工指針(案)・同解説では、凍害地域とそれ以外の2地域区分、鉄筋コンクリート造建築物の耐久設計施工指針(案)・同解説では、ASTM相当サイクル数および凍害危険度を利用した3地域区分が

表-2 コンクリートの凍害の劣化パターンと劣化の進行

コンクリートの凍害とは	コンクリート中の水分の凍結または凍結融解の繰返しによってコンクリートに劣化を生じさせる現象
コンクリートの凍害の劣化形態	1 スケーリング 2 ポップアウト 3 ひび割れ 4 崩壊
劣化パターンと劣化の進行	(1) スケーリング→スケーリング増大(一般地域) (2) スケーリング→スケーリング増大・粗骨材露出(海岸構造物・凍結防止剤の影響) (3) 全体的に組織の緩み→全体的崩壊 (4) 表層ひび割れ→内部にひび割れ進行 (5) 表層にひび割れ→鉄筋の露出→剥離・剥落 (6) 局部的ひび割れ→剥落 (7) ポップアウト

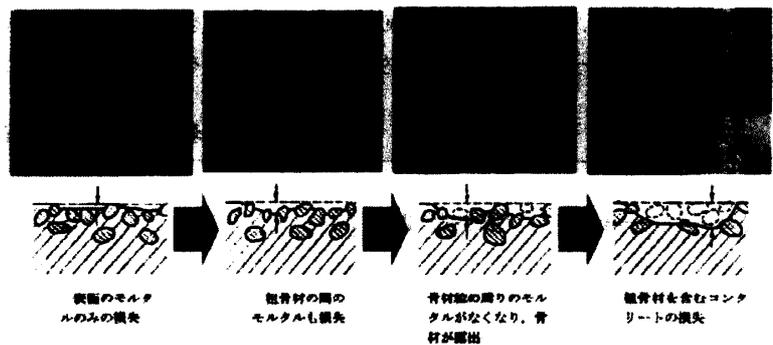


図-1 道路縁石のスケーリングと進行模式図

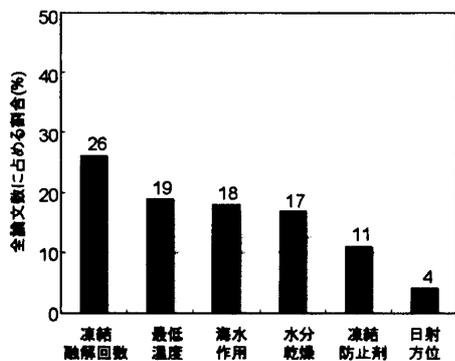
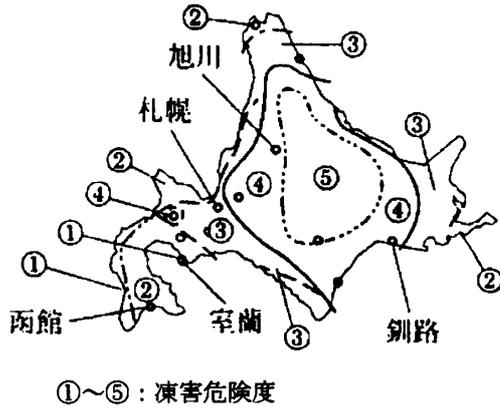


図-2 論文で採用されている主要な環境要因[1]

表-3 各劣化予測法で取り扱われていた環境要因

	ASTM相当サイクル数 (浜ら、1999)	基準化凍結融解サイクル (石井ら、1997)	耐凍害性指標値 (山下ら、1992)
凍融回数	○	○	○
最低温度	○	○	○
凍結持続	×		
凍結速度	×		
水分	○	○	○
乾燥	○		
日射	○		

※「×」:検討は行われたが、実構造物に与える影響は小さく、予測式には入らなかったもの。



①～⑤：凍害危険度

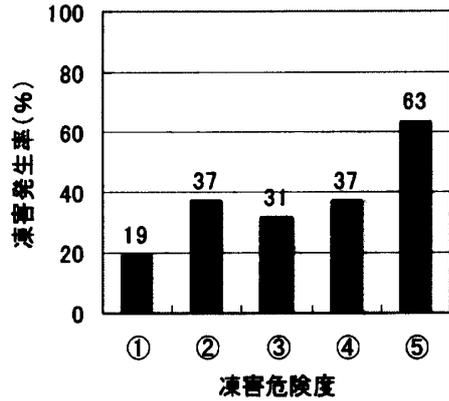


図-3 凍害危険度と道路橋の凍害発生率[3]

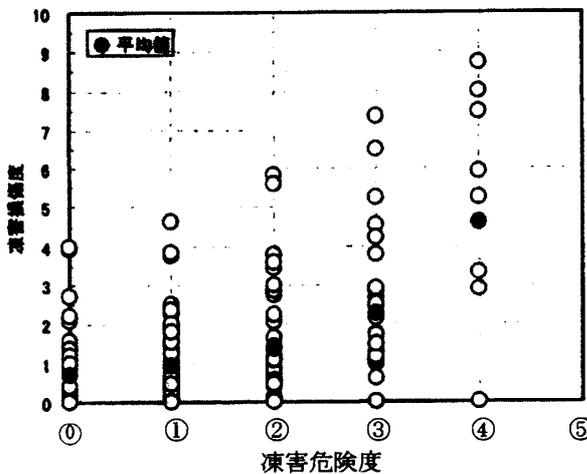


図-4 凍害危険度と凍害損傷度の関係[4]

併用されている。

法令では、住宅の品質確保促進等に関する法律に基づく住宅性能表示制度の鉄筋コンクリート造住宅の劣化対策等級において「日最低気温の平滑年平値が 0℃を下回らない地域とそれ以外」で地域が区分されている。また、建築基準法第 37 条に基づく平成 12 年告示第 1446 号には凍害対策としての空気量の規定があるが、地域等の具体的基準については示されていない。

海外では、凍害対策として、空気量と水セメント比およびまたは圧縮強度で規定しているものが多い。部位条件としては水との接触条件(moderate/severe)の2条件の区分が多く、EN206-1 ではこれに塩分の影響を加えて 4 条件に区分されている。また、EN12620 では、地域条件として、Mediterranean, Atlantic, Continental の 3 区分としている。

図-3[3]および図-4[4]に地域条件の凍害危険度と地域による劣化発生状況の関係を示す。凍害危険度の大きなところでは、凍害の発生率・損傷度が高くなる傾向があるが、バラツキが大きくなっている。この原因として、

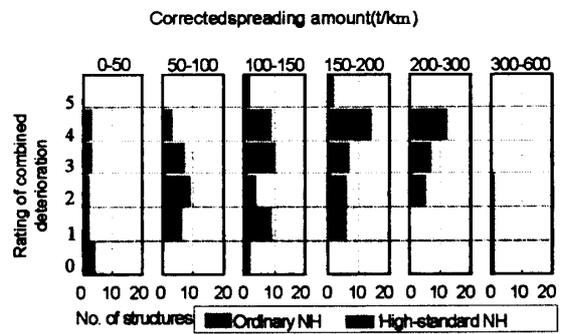


図-5 推定塩化物凍結防止剤散布量とスケーリング劣化グレード目視評価点（地覆車道側面）の比較[2]

表-4 凍害劣化環境要因の定量化で対象とする劣化の進行

劣化の進行	表-2の番号
1) 組織の緩み	(3)、(4)、(5)
2) 一般地域のスケーリング	(1)
3) 海岸構造物・凍結防止剤の影響がある場合のスケーリング	(2)

部材の含水状態と温度条件が適切に評価されていないことが考えられる。図-5[2]は、凍結防止剤の推定散布量と地覆車道側面のスケーリング劣化グレード目視評価点の比較である。凍結防止剤の散布量が多くなるほど、スケーリングが多くなる傾向が認められる。

2.4 凍害劣化の環境要因の定量化方法の提案

ここでは、既往の研究成果・実験データを活用し、環境要因の定量化を検討する。凍害劣化の環境要因としては、温度条件(最低温度・凍結融解回数)と含水状態が基本的なものとし、必要に応じて影響の大きな要因を加えるものとする。また、凍害の劣化パターンによって劣化の進行が異なることが考えられ、ここでは、表-4 のように分類して環境要因の定量化について検討を行う。

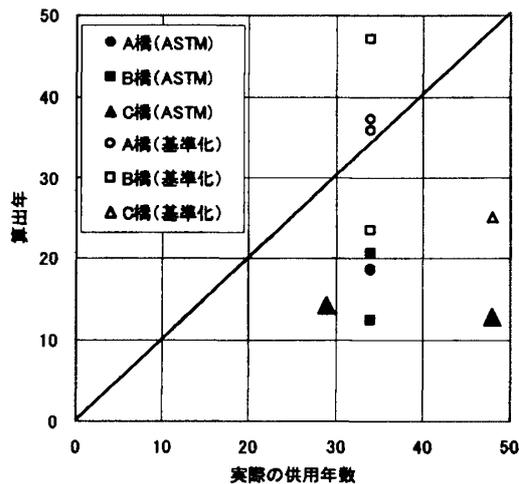


図-6 実構造物の実際の供用年数と予測手法により求めた算出年の関係[1]

組織の緩みに対する劣化予測については表-3 のような既往の方法があり、これらの方法による算出年と実構造物の供用年数の関係を図-6[1]に示す。なお、年数の算出は、この構造物と同様な配合の促進凍結融解試験により、動弾性係数の変化を求め、これと実構造物の超音波速度から求めた相対動弾性係数を比較して求めたもので、年数の換算にはアメダスデータから求めた ASTM 相当サイクル数および基準化凍結融解サイクルを用いている。この図では、ばらつきは大きくなっているが、部位の含水状態・温度等の条件を適切に設定できれば、精度が向上することが考えられる。

一般地域のスケーリング劣化予測については、既往の JIS A 1148(ASTM C 666)A 法の質量変化率のデータを収集・整理し、各種要因が質量変化率におよぼす影響を検討した。この結果、質量変化率の進行予測式は、図-7中の式のように表現できる。さらに、図中の式のようにスケーリングに対応する ASTM 相当サイクル数 (S-ASTM 相当サイクル数) を用いると、気象データから質量変化率の推定が可能になる。この推定結果と暴露試験結果を比較したものが図-7 である。比較的よい推定結果となっており、予測手法として可能性のあるものと考えられる。

海岸地域・凍結防止剤の影響のある場合のスケーリングについては、影響要因が多く、影響要因の定量化は困難である。しかしながら、既往の ASTM C672 のスケーリング試験の結果を整理し、空気量を確保し、セメント種別・水セメント比および溶液の種類・濃度を限定した場合には、図-8 に示すように塩化物のある場合のスケーリングは真水の場合のスケーリングの数倍の値となっており、一般環境のスケーリングに倍率をかけることで評価できる可能性があるものと考えられる。

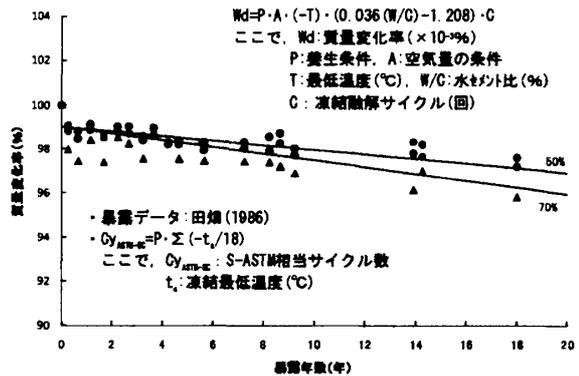


図-7 スケーリングの予測結果と屋外暴露試験との対応

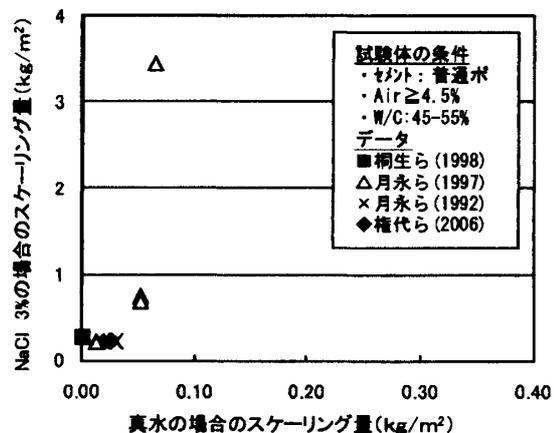


図-8 既往のスケーリング試験結果のまとめ (ASTM C672の場合)

3. 凍結融解作用を受けるコンクリートの性能評価

3.1 概要

コンクリートの凍害劣化に及ぼす影響要因は、使用材料の品質やコンクリートの製造 (配 (調) 合), 施工など、硬化体形成以前の要因である「先天的要因」と、環境作用や荷重などの硬化体形成後 (構造物供用後) の要因である「後天的要因」に大別できる。これら先天的・後天的要因の負荷の大小によりコンクリート構造物の寿命 (耐久性能) が決定されることになる。しかしながら、凍結融解作用を受けるコンクリートの劣化は、多種・多様な要因の影響を受け、その挙動は非常に複雑であることから、これまで凍害の劣化速度や劣化程度を時間軸上で予測する評価システムは開発されていない。

そこで、本章ではまず劣化外力に焦点をあて凍害メカニズムについて整理を行った。次に、一次共鳴振動数 (相対動弾性係数), 長さ変化, 質量減少 (スケーリング), 凍害深さなどの凍害劣化の評価指標の位置づけと課題について整理した。そして、劣化メカニズムに影響する各種要因と凍害劣化との関係について、空隙構造, 気泡,

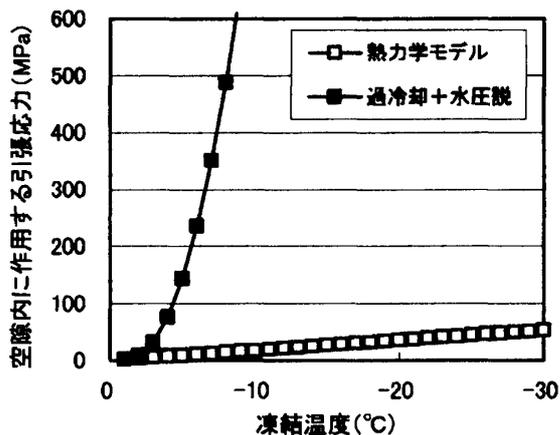


図-9 空隙内に作用する水分凍結による引張応力
(低飽水度)

骨材、塩化物および熱的性質の観点から取りまとめた。

3.2 凍害メカニズム

凍害メカニズムを劣化外力の発生の視点から整理した。さらに、表面から内部へと連続する空隙が水で満ちている場合（高飽水度）と空隙中の水分が必ずしも連続していない場合（低飽水度）に分けて、水圧説と浸透圧説（熱力学モデル）の二つのメカニズムを中心に、凍害劣化外力の算出例について示した。

セメントペースト空隙内の水が氷へ相変化する際に未凍結水が凍結ゾーンから大きな流速で排出されることになる。Powersは水圧説において、この水の流速を生じさせる水圧が内部水分の凍結によると考え、Darcy則に従い多孔体中での水の流れを示した。さらに、過冷却現象下における結晶の成長速度を考慮することにより、細孔空隙中の液体に作用している圧力（劣化外力）を算出することが可能となる。

一方、浸透圧説は、コンクリート中の水分凍結による収縮・膨張現象を、熱力学的理論から説明したものである。その場合、未凍結水と氷の化学ポテンシャル（蒸気圧）の相違によって未凍結水の移動が生じる。従って、空隙の表面に形成された氷の結晶が周囲のより細かな空隙やゲル空隙から未凍結水を引き寄せる力（吸引力：負の圧力）を劣化外力として算出することになる。

図-9は、低飽水度下において空隙内に作用している圧力（凍害劣化外力）の一例を示したものである。過冷却を考慮し水圧説に基づいて算出した凍害劣化外力と、熱力学モデル（蒸気圧の平衡）から算出した凍害劣化外力を比較すると、高飽水度のケースと同様に、低飽水度の領域でも明らかに過冷却を考慮した水圧説に基づく凍害劣化外力の方が大きくなることが分かる。

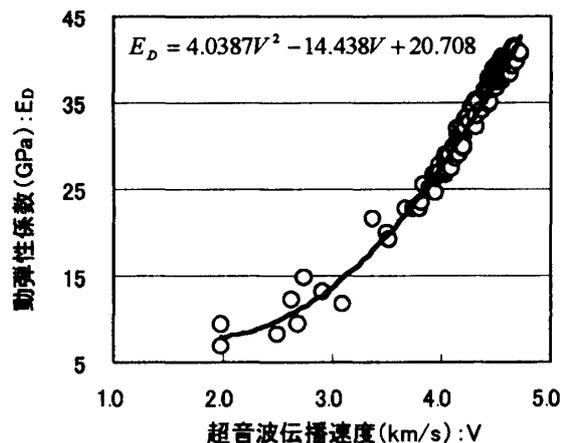


図-10 超音波伝播速度と動弾性係数の関係[5]

3.3 凍害劣化の評価

(1) 凍害劣化評価指標

現在まで用いられている主な凍害劣化指標を劣化形態に基づき、①内部劣化：一次共鳴振動数（相対動弾性係数）、超音波伝播速度、長さ変化、②表層劣化：質量減少（スケーリング）、凍害深さ、のように分類し、それらの関連性や評価基準、使用にあたっての課題などについて整理した。

これまで、一次共鳴振動数から算出される動弾性係数（相対動弾性係数）を用いた評価が一般的に行われている。しかし、超音波伝播速度や長さ変化を用いた評価実績は少ないものの、この三者には対応関係が認められることから、直接的あるいは間接的に相互評価が可能であることを示した。その一例として、超音波伝播速度と動弾性係数の関係を図-10[5]に示す。

また、凍害を受けたコンクリートの相対動弾性係数が85%程度以下になると長さ変化が大きくなるとの知見がある[6]。さらに、相対動弾性係数が60%まで低下したコンクリートでは約0.1% (1×10^{-3})の長さ変化（膨張）が生じることが知られている[7]。このことから、相対動弾性係数85%は凍害による劣化が顕在化する変曲点、相対動弾性係数60%は事実上の限界値として考え得ることが可能である。

しかし、コンクリートの表層劣化を評価するための指標としての凍害深さについては、評価方法を確立すると共に、基準値も含めた総合的な検討が必要である。

さらに、凍害劣化の指標は、劣化の形態に応じて適宜選択しなければならないが、相対動弾性係数などの力学的性状だけでなく、凍害による表層部コンクリートの組織の緩みを評価するための指標として、物質移動抵抗性を採用することも十分に可能である。

表-5 評価要因と評価指標

劣化形態	評価項目	評価指標	評価要因								
			材 料				配(調)合			環 境	
			セメント	骨材	混和材	混和剤	W/C	空気量	圧縮強度	乾湿	塩化物
内部損傷	力学性状	一次共振振動数	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	
		超音波伝播速度	○	○	○	○	○	○	○		
		長さ変化	△		△		◎	◎			
表層劣化	表面コンクリートの品質 鉄筋腐食	質量減少(スケールンク)	◎	○	△	△	◎	○	△	○	◎
		凍害深さ	○		○		○	○	○	○	○
		物質移動抵抗性	○		○		○	○		△	○

◎:直接的に評価可能で、且つ評価指標との関係が明確なパラメータ
 ○:直接的に評価可能であるが、評価指標との関係が不明確なパラメータ
 △:間接的に評価可能なパラメータ

(2) 凍害劣化要因と凍害劣化指標

凍害メカニズムに影響する要因と評価指標の関係を表-5のようにまとめた。表中の◎印は、ある要因を評価しようとする場合、対応する指標を用いて直接的に評価でき、かつ試験研究データも比較的整っており、評価基準との関係が明確であることを示している。また、○印は、直接的に評価可能ではあるが、試験研究のデータが不十分であることから評価指標との関係が不明確であり、評価基準が設定できない項目である。○印の項目については、今後さらなる研究の進展が期待される。さらに、△印は、間接的に評価している要因を示しており、これまであまり直接的な評価が検討されてこなかった項目である。

なお、次節以降、各評価要因がコンクリートの凍害劣化に及ぼす影響について述べるが、紙面の都合上、その概要を説明する。詳細は、委員会報告書を参照されたい。

3.4 空隙構造と凍害劣化

(1) 内的要因(使用材料、配(調)合)

一般に、セメント種類、混和材料および配(調)合がコンクリートの凍害劣化形態の一つである内部損傷に及ぼす影響は、その水セメント比や水和度などに起因する空隙構造に大きく依存する。つまり、氷晶が形成することが可能な毛細管空隙の量とその連続性が損傷度と密接に関係していると言える。既往の文献を概観すると、特に中程度の径(0.02~1 μ m)をもつ細孔が硬化セメントペーストの耐凍害性に大きな影響を与えており、この範囲を超える細孔量が少なくなるほど耐凍害性は向上し、この細孔半径の下限値は凍結最低温度が低くなるほど小さくなる傾向にある。

(2) 外的要因(環境条件)

構造物が設置される暴露環境の条件は、コンクリート組織の空隙構造に著しい変化をもたらす。近年、低水セメント比のコンクリートでは、乾燥によりC-S-Hのナノ構造レベルにおける空隙構造が粗大化し、耐凍害性を低

下させる一因となることが指摘されている[8]。さらに、コンクリート中の水分の飽和度が高いケースほど、凍結過程においてより多くの水分が凍結することから、その耐凍害性は急激に低下する。これらの現象は、特にnon-AEコンクリートにおいては、ナノあるいはマクロな空隙構造の粗大化と組織の膨張により内部損傷を引き起こすことになる。このように、実環境におけるコンクリートの耐凍害性を評価するためには、乾湿の繰返し作用や水分の飽和度を評価要因として適切に取り入れ、検討する必要がある。

3.5 気泡と凍害劣化

コンクリートの凍結融解抵抗性を確保するためには、微小な空気泡を十分に連行し、未凍結水の移動圧を緩和する機構を構築することにある。特に、コンクリート組織の膨張に起因した内部損傷を緩和するための気泡の役割は、他の評価要因と比較してはるかに大きく、相対動弾性係数や長さ変化を指標とした評価と基準の設定を行うことができる。また、コンクリートの凍結融解抵抗性の向上に有効に機能する微小気泡の範囲は300 μ m以下とされ、300 μ m以下の部分空気量が1.8%程度以上確保されれば、十分な凍結融解抵抗性を有するコンクリートが得られることが指摘されている[9]。さらに、コンクリートの空気連行性は、骨材の種類・品質、混和材料の種類・量などの影響を大きく受けることとなり、その影響についても整理を行った。

しかし、コンクリートの表層劣化と空気量の関係については、一般には空気量の増加に伴いスケールンク量は減少する傾向にはあるが、定量的な評価基準を設定するまでには至っていない。

3.6 骨材と凍害劣化

骨材のコンクリートの凍害劣化への係わりは、他の材料要因と比較して大きいと考えられており、骨材の選定はコンクリートの凍結融解抵抗性を大きく左右する。ま

表-6 所要の耐久性指数を確保するために必要な空気量の目安*1 (参考例)

耐久性指数	粗骨材の吸水率 (%)	水セメント比 (%)				
		45以下	50	55	60	65
85	2以下	3.0	4.0	5.0	5.0	5.5
	2を超える~3以下	4.0	(4.5)	5.0	5.5	(6.0)
60	2以下	2.5	3.0	4.5	4.5	5.0
	2を超える~3以下	3.0	(3.5)	5.0	5.0	(5.5)

一:十分な収集データがない x:凍結融解抵抗性の確保が困難(安全側) ():前後の項目より検討した参考値

*1:粗骨材の吸水率と水セメント比のみを指標として(他の要因は考慮しないで)、必要な空気量を検討した場合の標準的な値であり、骨材によっては凍結融解抵抗性(耐久性指数)の確保が困難なケースもある。また、検討に用いたデータベースの空気量の範囲は1.0%~9.0%(フレッシュコンクリートの空気量)、粗骨材の最大寸法の範囲は15mm~25mmである。

た、その基本メカニズムは、①凍結融解作用によって骨材自身が崩壊すること、②コンクリートの凍結過程で骨材中の水分が周囲のペースト部分に排出され、ペースト部分の飽和度が高まることによって生じるペースト部分の崩壊、③コンクリートの温度変化に伴うセメントペースト部と骨材部の変形性能の相違(熱膨張係数の差)、の3点に分けて考えることができる。

そして、骨材自身の凍結融解抵抗性および、骨材がコンクリートの凍結融解抵抗性に及ぼす影響について、粗骨材の細孔構造特性に着目して基本的なメカニズムを整理した。その結果、コンクリートの凍結融解抵抗性は、粗骨材の全細孔容積の増加に伴い低下する傾向にある。そして、今後は骨材の細孔構造を考慮した総合的評価が必要であると考えられるが、現実的には、骨材の凍害メカニズムから推察した場合、その全細孔容積を間接的に反映している吸水率が重要な指標の一つとなり得る可能性があると考えられる。

また、近年、良質な骨材資源の枯渇化などに伴って低品質骨材の有効利用の要請が高まっており、低品質骨材と凍結融解抵抗性の関係やその利用の可能性についても、最近の研究の成果をもとに知見を取りまとめた。

さらに、コンクリートの凍結融解抵抗性データベースを作成し、それに基づいてコンクリートが所要の凍結融解抵抗性を確保するために必要とされる気泡パラメータと骨材品質について整理した。表-6は、コンクリートが所要の耐久性指数を確保するために必要とされる粗骨材の吸水率と空気量の関係について水セメント比毎に検討した結果(参考例)を示したものである。

3.7 塩化物共存下における凍害劣化(スケーリング)

塩化物の作用がコンクリートの凍害(スケーリング)に及ぼす影響は、塩化物の吸湿特性による飽和度の増加、空隙中の過冷却水が凍結する際の急激な結晶成長、凍結防止剤の散布による温度衝撃などである。また、コンク

リート表面におけるスケーリングの発生は、内部への塩化物の浸透・拡散を早める要因となることから、表層部における物質移動抵抗性とも関連した評価と基準設定が必要と考えられる。さらに、塩化物環境下におけるコンクリートのスケーリング試験方法の規準化、その評価指標の確立も望まれる。

3.8 コンクリートの熱的性質と凍害劣化

凍結期間におけるコンクリートの熱拡散率は非凍結期間のそれよりも大きくなることが指摘されており、より厳密に凍結速度などの環境作用の影響を解析するためには、凍結に伴うコンクリートの熱的性質の変化を考慮した評価も必要となる。ここでは、その解析モデルと解析例を示している。その結果、凍結期間における外気中の温度の日振幅が大きい場合、凍結時のコンクリートの熱拡散率の影響により、より内部まで熱が伝わることを解析的に明らかにした。

4. コンクリートの凍結融解試験方法に関する調査

4.1 コンクリートの耐凍害性の規定における凍結融解試験の位置づけ

土木学会の2007年制定コンクリート標準示方書[設計編]では、コンクリートの耐凍害性は、JIS A 1148「コンクリートの凍結融解試験方法」(以下、JIS A 1148と表記)により求まる相対動弾性係数を特性値とし、そのコンクリート構造物に必要な相対動弾性係数の最小限界値より大きいことを照査するよう規定され、対象とする構造物の環境条件や部材条件に応じて、300サイクル試験終了時の相対動弾性係数の最小限界値が60、70、85%の3ランクに区分されている。

日本建築学会の建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事では、構造体コンクリートが長期間にわたる凍結融解作用を受けることによって生じる凍害の防止を目的として、環境や部材の諸条件から3つ

の性能区分を設定し、それぞれにコンクリートの品質が規定されている。これらのうち2つのランクで、耐凍害性に関するコンクリートの品質として、JIS A 1148 (A法)による300サイクルにおける相対動弾性係数が60%と200サイクルにおける相対動弾性係数が60%のランクが区分けされている。

以上のように、わが国ではコンクリートの耐凍害性を評価する指標としてJIS A 1148による相対動弾性係数が用いられている。しかし、JIS A 1148の条文では、「この試験法は、使用材料や配合などの異なるコンクリートの凍結融解抵抗性を相互に比較するためのものであって、コンクリート構造物における耐凍害性を直接評価したり、耐凍害性によって定まるコンクリート構造物の耐用年数を測定するものではない」と明記されている。したがって、本試験の結果から耐凍害性を評価する場合は、本試験の結果と実構造物における凍結融解による劣化との相関が必ずしも明確でないことを前提とする必要がある。

4.2 規格化されているコンクリートの凍結融解試験方法

日本、欧州および米国で規格化されているコンクリートの凍結融解試験方法について調査した。結果を表-7に示す。欧州や米国では、日本のJIS A 1148に相当する内部劣化を対象とした試験だけでなく、スケーリングを対象とした試験方法も規格化されている。これらの試験方法の概要を以下に示す。

(1) 内部劣化を対象とした試験方法

a) ASTM C666

ASTM C666は米国で規格化されている試験で、JIS A 1148はこの試験をもとに規格化された。

供試体全面から水を吸収させ、+5℃から-18℃までの凍結融解サイクルを1日6~8サイクルで300サイクルまで繰り返し、質量および相対動弾性係数を測定する。

表-7 規格化されているコンクリートの凍結融解試験方法

評価対象 実施地域	内部劣化を 対象とした試験	スケーリングを 対象とした試験
日本	JIS A 1148	該当なし
欧州	RILEM CIF	SS 13 72 44 (北欧) German Cube (ドイツ) RILEM CDF (ヨーロッパ)
米国	ASTM C 666	ASTM C 672

b) JIS A 1148

前述したように、わが国において唯一規格化されているコンクリートの凍結融解試験方法である。

c) RILEM CIF

RILEM CIFは、2001年にRILEM TC-176で提案された試験方法である。供試体の下面から水を吸収させ、+20℃から-20℃までの凍結融解を1日2サイクルで27日間繰り返し、吸水量および相対動弾性係数を測定する。

(2) スケーリングを対象とした試験方法

欧州では、試験の精度や経済性を考慮し、規格の国際統一化を図るため、21の機関において共通試験(Round Robin試験)が実施された[10], [11]。その結果、SS 13 72 44 (The Scandinavian Slab), German CubeおよびRILEM CDF (Capillary Suction of De-icing Chemicals and Freeze-Thaw-Test)の3つの試験方法が推奨された。

a) SS 13 72 44

供試体の寸法は15×15×15cmの立方体である。打設後24±2時間で脱型後、6日間水中養生(20±2℃)を行い、その後14日間気中養生(温度20±2℃, 湿度65±5%)する。供試体の成形は、打込み面に対して直行方向に切断し(15×15×7.5cm)、厚さ5cmのスラブに成形する。立方体の中心面を暴露面とし、この暴露面以外はゴムシートを接着して7日間気中養生(20±2℃, 65±5%)を再度実施する。材齢28日に試験面に3%NaCl水溶液を3mm浸し、3日間20℃で供試体に吸水させる。材齢31日から暴露面以外を断熱材で覆い、水溶液が蒸発しないよう凍結融解試験を行う。凍結融解温度は、20±4℃~-18±2℃で1サイクル24時間とし、0℃以上となる時間は7時間以上9時間以下とする。温度の管理は供試体上面の溶液で行う。測定は、1, 2, 4, 6および8週で供試体をブラッシングし、試験液を濾紙で濾過し、残った滓を105℃で一定量なるまで乾燥させ、その質量をスケール量(kg/m²)とし4段階で評価する。

b) German Cube

供試体寸法は、10×10×10cmの立方体である。打設後1日で脱型し、6日間の水中養生(20±2℃)を行い、その後20日間気中養生(温度20℃, 湿度65%)を行う。試験は材齢28日に3%NaCl水溶液中に供試体を浸漬させて凍結融解試験を行う。凍結融解温度は、20±2℃~-15±2℃で1サイクル24時間とする。温度管理は供試体の内部で行う。測定はSS 13 72 44と同様である。

c) RILEM CDF

RILEM CDFは、種々のコンクリート寸法で試験を実施できる。通常は15×15×15cmの立方体を作製し、打込み面に対し直行方向に2つに切断する。打設後24±2時間で脱型し、6日間の水中養生(20±2℃)を行い、その後21日間気中養生(温度20℃, 湿度65%)する。暴露

表一八 骨材の耐凍害性を評価するための試験方法

試験 方法 実施 地域	安定性試験		コンクリートを 使用する試験
	硫酸ナトリウム 水溶液を使用	水を使用	
日本	JIS A 1122	該当なし	JIS A 1148
欧州	EN1367-2	EN1367-1	該当なし
米国	ASTM C 88	該当なし	ASTM C1646

面以外をブチレングムまたはエポキシ樹脂で被覆した後、試験容器に設置し、暴露面に3%NaCl水溶液を5mm浸して7日間浸漬させる。凍結融解温度は、20℃～-20℃で1サイクル12時間とし、20℃～-20℃の温度降下が4時間、-20℃で3時間保持、-20～20℃の温度上昇が4時間、20℃保持が1時間で、28サイクルまで実施する。温度の管理は試験槽で行う。測定は、4または6サイクル毎に試験液を濾紙により濾過し、残った滓を乾燥させ、その質量をスケール量(g/m²)とする。評価は28サイクル時のスケール量を1500g/m²を限界値としている。

d) ASTM C 672

塩類がコンクリート表面のスケールングに及ぼす影響を試験する方法である。板状の供試体上面(表面積0.045mm²)にNaCl水溶液をため、+20℃から-18℃まで凍結約17時間、融解約7時間で1サイクルとし、5、10、15、25および50サイクルで6段階の目視レーティングにより評価する。

(3) 骨材の凍結融解抵抗性を評価する試験方法

骨材の凍結融解抵抗性の評価に用いられる試験方法について調査した。結果を表一八に示す。

JIS A 1122, EN 1367-2 および ASTM C 88 は、いずれも硫酸ナトリウム水溶液あるいは硫酸マグネシウム水溶液に骨材を浸漬した際の膨張圧に対する安定性によって、凍結時の水の膨張圧が骨材に及ぼす影響を評価する試験方法である。EN1367-1では、水を用いて1日1サイクルの+20℃から-17.5℃まで凍結融解を10日間繰り返す、凍結融解抵抗性を評価する。

また、米国では、日本と同様に、対象とする骨材の凍結融解抵抗性を、その骨材を使用したコンクリートの凍結融解試験によって評価する試験方法として、ASTM C1646が規格化されている。

4.3 JIS A 1148 に関する課題と試験方法の合理化に向けた研究の動向

JIS A 1148に規定されている凍結融解試験方法に関する課題や留意点について、適用範囲、試験条件、評価指標など項目別に整理した。

凍結融解試験は1日5～6サイクルの凍結融解を300

サイクルまで実施すると約2ヶ月を要する。36サイクル以下の間隔で試験槽から供試体を取り出し、動弾性係数と質量を測定し、再び試験装置に戻す重量物を取り扱う作業である。材料準備から結果が出るまでに最短でも3ヶ月を要する試験であり、その間の作業量も多く、人手も手間がかかり、試験の合理化に対する要望は高い。

試験結果を評価する指標には、相対動弾性係数、質量減少率があり、附属書では長さ増加比も示されている。

相対動弾性係数は、JIS A 1127に規定されているたわみ振動の一次共鳴振動数から算出する。圧縮強度や曲げ強度などコンクリートの力学的特性と相関がある[7]。しかし、凍結融解試験中に水和が進行し、基準となる動弾性係数が変化する場合には凍結融解作用による劣化を適正に評価できないことがある。また、スケールングが著しいと一次共鳴振動数の測定が難しくなり、測定の精度が低下することに留意する必要がある。

長さ増加比は、凍結融解による供試体の残留膨張量を供試体の基長で除して求める。相対動弾性係数との相関も高い[12]。しかし、試験中のスケールングによりゲージラグの脱落や緩みといった不具合が生じることがある。

質量減少率は、骨材のポップアウトやスケールング現象を質量の減少として捉えている。しかし、供試体の質量変化から質量減少率を算出するため、吸水による質量が増加する影響を考慮すると、厳密にはスケールングの量を評価できないこともある。

以上の課題を踏まえ、JIS A 1148による凍結融解試験の省力化や測定方法の合理化に着目した研究の動向について調査し、超音波伝搬速度により内部劣化を評価する方法、縦振動による一次共鳴振動数から相対動弾性係数を算定する方法、埋込みひずみ計を用いて長さ増加比を求める方法などを紹介した。

4.4 新たな凍結融解試験および評価に関する研究の現状

JIS A 1148以外の新たな凍結融解試験方法や評価方法に関する研究の現状について整理した。

(1) スケールング試験

5.2で記述したように、欧州や米国ではスケールングに関する試験方法が規格化されており、我が国においても凍結防止剤の使用頻度を鑑みればスケールングに関する試験が望まれている。スケールング試験に関する研究としては、(a) ASTM C 672の試験条件を自動で制御し、試験対象面を変えて省力化を図り、目視レーティングではなくスケールング量で評価する簡便化法、(b) ASTM C 672によるスケールング量とプルオフ強度、透水係数を組み合わせた方法、(c) ASTM C 672によるスケールングを可視画像による骨材露出率やサーモグラフィーによ

る熱画像解析で評価する方法を紹介した。

(2) 気泡間隔係数による耐凍害性の評価

気泡間隔係数は一定の条件下では耐久性指数と高い相関が認められる。硬化コンクリートの気泡間隔係数測定は、一般的には ASTM C457 が適用される。試料の作製や測定に専門性を必要とするが、凍結融解試験に比べると測定に要する時間は短縮され、労力の軽減が図れる。「JISA 6204 コンクリート用化学混和剤」では、現状では使用材料や配合が規定されたコンクリートを用いて凍結融解試験を実施し相対動弾性係数で評価するよう規定されているが、材料の性能を評価する観点からは凍結融解試験の代わりに気泡間隔係数を用いることも考えられる。

(3) 骨材の耐凍害性を評価するための凍結融解試験

骨材の耐凍害性を評価するには、コンクリートを製造しないでも、骨材を対象として試験を実施するのが合理的である。そこで、現在規格化されている硫酸ナトリウムを用いた安定性試験の代替として骨材の耐凍害性を評価するための研究事例を紹介した。

4.5 まとめ

以上の調査結果をもとに、コンクリートの耐凍害性を評価する上での課題ならびに今後の展望について示す。

(1) 凍結融解試験方法の省力化

この試験を相対評価のための試験と位置づけるのであれば、作業の手間や労力を軽減し、試験方法の省力化を図ることが望ましい。特に、現状では凍結融解の繰り返しに伴う内部劣化の進展を動弾性係数やひずみの変化によって評価しているが、測定方法の自動化やさらに迅速に判定できる指標の検討が望まれる。

(2) スケーリングによる耐凍害性の評価

海外諸国では、凍結防止剤の作用を受けるコンクリートと受けないコンクリートで耐凍害性に関する試験方法や評価指標が異なり、前者はスケーリング量、後者は相対動弾性係数を用いて評価している。凍結融解の繰返し作用による凍害と塩化物イオンの作用による塩害の両者が複合される環境条件下においてコンクリートの劣化を直接的に評価するには、わが国においてもスケーリングによる耐凍害性の評価について検討することが望ましい。

(3) 凍結融解試験によらない耐凍害性の評価

耐凍害性を試験によって判定するのではなく、コンクリートの品質特性値をもとに間接的に判定できれば、より合理的である。耐凍害性を左右する硬化コンクリート中の気泡の指標として一般には空気量が用いられているが、気泡の径や分布の相違を反映できる気泡間隔係数を用いることでより適正に評価できる可能性がある。た

だし、気泡間隔係数の測定には特殊な装置が必要であること、試料の作製や測定に専門性を必要とするなど、一般的な指標とするには課題が残されており、今後の技術の進展が待たれる。

5. おわりに

コンクリートの耐凍害性を適切かつ簡易に評価できる手法の検討を行うことを目的に、凍害劣化の実態や試験法の現状などの多面的な検討を行った。その結果、当分野の研究の state-of-the-arts 的な報告書が得られ、いくつかの提案を行うことができた。今後の当分野の研究の方向付けに役立てば参加した委員の大きな喜びである。

<参考文献>

- [1] 林田ら：コンクリート構造物の凍害に関する環境要因と劣化予測の検討，第20回ふゆトピア研究発表会論文集，2008
- [2] F. TAGUCHI 他：Study on Concrete Deterioration due to Combined Freezing and Deicing Salt Damage, 5th International Conference under Severe Conditions, Environment and Loading (Consec'07), 2007
- [3] 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維持管理の手引き(案)，2006.3
- [4] 成田ら：実構造物群の調査結果に基づく凍害損傷リスクマップの作成に関する研究，コンクリート工学論文集，Vol.19, No.1, 2008
- [5] 緒方英彦，服部九二雄，高田龍一，野中賢博：超音波法によるコンクリートの耐凍結融解特性の評価，コンクリート工学年次論文集，Vol. 24, pp.1563-1568, 2002
- [6] 桂修，吉野利幸，鎌田英治：セメント硬化体の凍害機構モデル，コンクリート工学論文集，11(2), pp.49-62, 2000
- [7] 洪悦郎，長谷川寿夫：コンクリートの凍結融解試験方法の動向，コンクリート工学，Vol.19, No.9, pp.16-22, 1981
- [8] 青野義道，松下文明，柴田純夫，濱 幸雄：乾湿繰返し及ぼすコンクリートの耐凍害性への影響とその劣化メカニズムに関する研究，日本建築学会構造系論文集，No.607, pp.15-22, 2006
- [9] J. Stark, B. Wicht, (訳) 太田利隆・佐伯 昇：コンクリートの耐久性[第2版]，(社)セメント協会，2003
- [10] E. Siebel and T. Reschke：Three different methods for testing the freeze-thaw resistance of concrete with and without de-icing salt, Freeze-Thaw durability of Concrete, RILEM Proceedings 30, pp.231-246, 1997
- [11] H. Kukko and H. Paroll：Round robin tests on concrete frost resistance, Freeze-Thaw durability of Concrete, RILEM Proceedings 30, pp.223-230, 1997
- [12] 笠井芳夫，池田尚治編著：コンクリートの試験方法(下)，技術書院，pp.184-189, 1993