

コンクリート構造物の凍害劣化要因の検討

草間 祥吾* 田口 史雄** 林田 宏*** 遠藤 裕丈****

1. はじめに

積雪寒冷地のコンクリート構造物が受ける被害として凍害のみの単独劣化と、凍害と塩害による複合劣化(以下、「複合劣化」という。)がある。凍害は寒暖の変化が大きく、水の供給を受けやすいコンクリート構造物の表層や端部に集中しやすい。そのため、かぶり部のコンクリートの劣化や、外部から供給される水や塩化物イオンなど劣化因子の浸透速度の増加に伴う鋼材腐食の助長が強く懸念される。

一方、コンクリート構造物の設計体系は、供用期間内における構造物の耐久性を設計段階から照査する性能照査型設計法への移行段階にある。照査を合理的に行うには、凍害の進行を予測できるモデルが必要となるが、未だ開発には至っていない。凍害は、凍結融解サイクルに加え、温度、飽水度、塩分など数多くの要因が複雑に組み合わさって発生すると言われている。そのため精度の高い劣化予測手法および耐久設計法を確立するためには、まず、凍害に影響を及ぼすこれら膨大な影響因子の中から比較的重要と思われる因子を絞り込む必要がある。また、凍害、複合劣化の研究に目を向けると、今日までに数多くの貴重なデータが蓄積されている。しかし、価値の高い有益な情報が多いものの、個々の影響に関する個別の分析・検討に留まっているものが殆どである。このため、これらの情報を収集し、わかりやすい形で体系的に整理することは、凍害の予測・耐久設計法の開発を進めていく上で極めて重要と考える。

そこで、凍害、複合劣化の進行に影響を与える重要な因子の絞り込みを図ることを目的に、過去20年間に発表された凍害、複合劣化を扱った文献を収集し、それらの調査・分析を行った。一般に、凍害に及ぼす影響因子は材料因子(水セメント比など)、外部環境因子の二種に大別されるが、今回の調査においては外部環境因子に着目して調査を行った。

2. 調査対象および方法

2.1 調査対象

文献調査は、論文と書籍を対象として行った。論文調査では、コンクリートに関する学術・技術上の代表的な下記①～④の学協会から発刊されている年次講演概要集・論文集より、凍害および複合劣化に及ぼす影響因子ならびに劣化度の評価方法を扱った論文を収集した。

- ① 日本コンクリート工学協会
- ② セメント協会
- ③ 土木学会
- ④ 日本建築学会

収集に当たっては、できるだけ広範囲かつ最新の情報を把握するため、1980年以降に発表されたものを検討の対象とした。

2.2 調査方法

論文調査においては、まず凍害、複合劣化に関する国内発表論文を約540編抽出した。続いて、軽量コンクリートなど特殊コンクリートを扱ったものや、テーマに合致していないものは対象外とし、最終的に約370編に絞り込んだ。

書籍調査では、凍害および複合劣化に影響を及ぼす外部環境因子のことが述べられている代表的な書籍について調査した。

そして、これらの調査結果をもとに、外部環境因子の影響について総合的に評価した。

3. 結果・考察

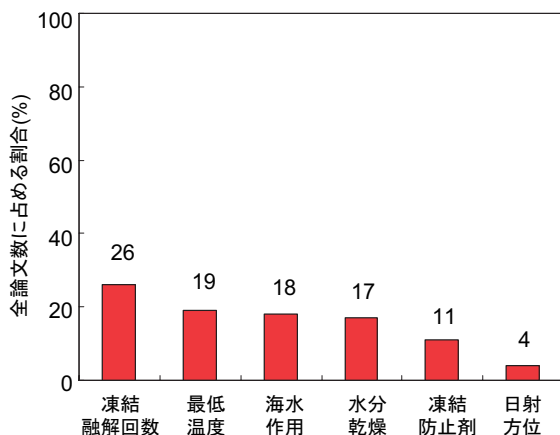
3.1 論文調査

(1) 考慮されている外部環境因子の傾向

収集した約370編の論文において、実験変数として採用されている外部環境因子の傾向を調べた結果を図-1に示す。ただし、併記している数値は単なる論文

数の割合であって、重要度を表すバロメータではない。
なお、一編の論文で因子が重複している場合は、それぞれの因子に対して1編ずつカウントしている。

調査した論文の中で注目度が最も高かった外部環境因子は凍結融解回数で97編(全体の26%)、次いで最低温度が71編(19%)、海水作用が66編(18%)、水分・乾燥が62編(17%)、凍結防止剤が41編(11%)、日射・方位が14編(4%)で、その他として積算温度、温度保持、風速、雪、標高などが数編あった。



図－１ 論文で実験変数として採用されている外部環境因子の傾向

(2) 外部環境因子の体系的整理

収集した論文で述べられていた主な知見の概要を体系的に整理した結果を以下に示す。

a) 凍結融解回数・最低温度

凍結融解回数・最低温度の影響に関する知見の概要を表－１に示す。全般的に、凍結融解回数が多く、最低温度が低いほど劣化の進行は顕著という認識で共通していた。これは、最低温度が低くなるとコンクリート中の凍結水量が多くなるためと考えられる。また一方で、耐凍害性の良いコンクリートは最低温度の影響が小さいとする知見⁷⁾もあった。図－１から、凍結融解回数に関する資料が比較的充実していることがわかるが、室内試験結果と実環境との相関性について詳細な検討を加えた論文は見あたらなかった。

b) 塩分(海水・凍結防止剤)

塩分の影響に関する知見の概要を表－２に示す。何れの論文においても、塩分が作用する環境下では凍害が促され、特にスケーリングが生じやすいことが述べられていた。塩分が凍害を促す理由については、表－２に示すように飽水度の上昇、層間凍結、熱衝撃、化学的な作用の４種類に大別されていた。その他にも、

表－１ 凍結融解回数・最低温度の影響に関する知見の概要

出典	知見
文献1)	配合によって、相対動弾性係数が300サイクル終了時に80%以上でも、凍結融解回数2000回では60%以下になる場合がある。
文献2)	最低温度は凍害に強く影響する外的因子で、最低温度によって変化する凍結水量から劣化度を推定することが可能である。
文献3)	凍結融解成立時の最低気温の合計値と、凍害の発生割合は相関が高い。
文献4)	最低温度が -10°C 、 -20°C 、 -30°C と低くなると、凍害に影響する最小細孔径も約0.08、0.05、0.03 μm と小さくなる。
文献5)	最低温度 -20°C における残留膨張歪みは、最低温度 -40°C のときの約20%である。
文献6)	最低気温が -4.5°C の状態が433分、 -5.0°C が306分、 -5.5°C が233分、 -6.0°C が220分、 -6.5°C が193分持続すると、コンクリート中の水溶液は凍結する可能性がある。

表－２ 塩分の影響に関する知見の概要

出典	知見
文献8)	【飽水度の上昇】 塩化物の存在は、水が吸収されやすい状態を形成する。すなわち、凍害に対して不利となる。
文献9)	【層間凍結】 冷却が進行すると、温度が最も低い表層が最初に凍結する。内部も緩やかに冷却されるが、塩分によって融点が低下している層は凍結せず、それよりも深い範囲に位置する塩分濃度の低い層が凍結する。 その結果、未凍結層が二つの凍結層に挟まれる状態となる。冷却がさらに進んで未凍結層が凍結すると、凍結余剰水の逃げ場が上下の凍結層で塞がれている関係上、上方の凍結層を押し出す形で凍結水圧の緩和がなされる。これによりスケーリングが生ずる。
文献10)	【熱衝撃】 -5°C のコンクリート面に塩化ナトリウムを撒くと、吸熱反応によってコンクリートの熱量が奪われ、歪みが発生する。この歪み量とスケーリング量は対応する。
文献11)	【化学的影響】 塩化物にマグネシウムイオン、カルシウムイオンが存在する場合、セメントペーストの水酸化カルシウムの溶脱が生ずる。その結果、飽水度が大きく上昇する。この影響は、塩化物の濃度が高いほど顕著である。

スケーリングの挙動は塩分の濃度^{12) 13)}やセメントの種類¹⁴⁾によって異なるとの知見も報告されており、塩分に起因する凍害のメカニズムは極めて複雑と言える。

c) 水分

水分の影響に関する知見の概要を表－３に示す。凍害劣化においては凍結融解回数や最低気温よりも水分の影響が大きいことを強調する論文が多かった。

d) 乾燥(乾湿繰返し)

乾燥(乾湿繰返し)の影響に関する知見の概要を表－４に示す。乾燥(乾湿繰返し)についても、乾燥温度が高いほど、また軽微な乾湿繰返しであっても耐凍害性にマイナスの作用を与えることが主に述べられていた。

表－3 水分の影響に関する知見の概要

出典	知見
文献15)	気象観測所の凍結融解サイクル数がほぼ同値でも、被害は場所によって異なり、サイクルだけでは被害の程度との関係を明確にできず、湿潤の度合と被害の程度が密接に関係する。
文献16)	空気中において凍結融解作用を1500サイクル与えたところ、劣化の進行は緩慢で、相対動弾性係数はわずかしき低下しなかった。
文献17)	耐凍害性に劣るコンクリートを架台に12年暴露したところ、相対動弾性係数の低下はほとんど認められなかった。自然環境下での劣化は、最低気温や凍結融解回数以上に水分の供給・保持条件の影響が大きい。
文献18)	コンクリートの飽水度が85～90%以上になると耐凍害性が得られなくなる。

表－4 乾燥の影響に関する知見の概要

出典	知見
文献19)	凍結融解時の吸水作用は、凍結過程の水の押し込みと、融解過程の水の吸い込みの二種類がある。乾燥は、融解過程の吸い込みを大きくするため、促進試験の凍結融解回数を単純に年数に置き換えることはできない。
文献20)	コンクリートが乾燥を受けると、ペーストのシリケートアニオンの配列に異変が生じ、その結果、細孔構造が粗くなる
文献21)	乾湿の繰り返しを受けたコンクリートでは特にスケーリングが顕著に生ずる。その影響は乾燥温度が高いほど大きい。
文献22)	温度が20℃の軽微な乾湿繰り返しであっても耐凍害性は低下する。

表－5 日射・方位の影響に関する知見の概要

出典	知見
文献23)	コンクリートの温度変化に及ぼす日射の影響は大きい。
文献24)	環境条件が最も厳しい南側隅角部は、最低気温の年間極値と対応しており、この値を用いることでコンクリートの凍害に対する耐久設計を簡便に行うことが可能である。

e) 日射・方位

日射・方位の影響に関する知見の概要を表－5に示す。外部環境因子として日射の重要性を指摘する報告があるものの、凍結融解回数や最低温度に比べて日射に関する報告は少ない。これは、室内試験で日射を再現させることが難しいことが理由として考えられる。

f) 風

風の影響として雪を付着させて湿潤状態とすることや、部材の表面を急激に冷やすこと等が考えられる。なお、気温の低下とともに、風作用によりコンクリートの温度がさらに低下する可能性もある。

g) 凍結速度

凍結速度を変えた凍結融解試験⁹⁾では、凍結速度が大きい程、劣化程度が大きいとされていた。これは、凍結時間が短く氷の形成に伴って発生する水圧が緩和されにくいこと、冷却速度が大きいものは表面付近と内部の温度差が常にあることなどが原因と考えられている。

3.2 書籍調査

表－6は、外部環境因子のことが述べられている代表的な書籍を調査した結果である。何れの書籍も、凍結融解回数、最低温度、水分については影響が大きいとしており、論文調査の傾向と一致している。日射、乾燥、風については言及されていないものもあるが、論文調査の結果を勘案すると、少なからず影響があると考えてよいように思われる。

また、実環境でのコンクリート構造物の凍害に及ぼす外部環境因子の影響に関する主な知見を以下に示す。

表－6 書籍で取り上げられていた外部環境因子

	文献9)	文献17)	文献25)	文献26)
凍結融解回数	○	○	○	○
最低温度	○	○	○	○
日射			○	
凍結持続日数			×	
凍結速度	×		×	
乾燥		○		
水分	○	○	○	○
風			○	
主な内容	●最低温度が低いほど劣化程度が著しい ●室内試験では冷却速度の影響が大きい可能性もあるが、実構造物では冷却速度の影響は小さい ●凍結融解回数は重要 ●限界飽水度以下では劣化は生じないが、以上では僅かな凍結融解でも凍害劣化を生じる	●耐凍害性に劣るコンクリートを12年暴露しても相対動弾性係数の低下はほとんど認められず、自然環境下での劣化には最低気温や凍結融解回数以上に水分の供給・保持条件の影響が大きい ●暴露試験では乾燥の影響が大きい ●凍結融解回数、最低気温、水分の供給などの影響が大きい	●風がコンクリートの温度を低下させる ●最低温度が低い地域ほど劣化程度が著しい ●室内試験では冷却速度の影響が大きいとする例もあるが、実構造物では室内試験ほど冷却速度は大きくないため、この影響を重視する必要はない ●気温上昇、日射により融解する地域は条件的に厳しい ●水が凍害の主役	●最低温度が低いほど劣化程度が大きい ●凍結融解回数が多いほど劣化の進行は早い ●日射のある環境の方が凍結融解回数は多い ●飽水度が高い＝多くの水分が供給される環境では凍害が生じやすい

×) 影響が小さいと記述されているもの

a)凍結融解回数

竣工後から数年は健全なものでも年月を経て凍害が発生・進行していくこと、冬期に日射の影響で融解する南面の劣化が多いこと²⁵⁾等は凍結融解回数の影響と考えることができる。しかしながら、実環境における凍結融解回数の影響について定量的に明らかにしている研究は少ない。

b)最低温度

実環境においても地域の最低気温が低い地域の凍害劣化が著しい²⁵⁾ことは、最低温度が凍害劣化に大きく影響していることを示すものといえる。

c)水分

耐凍害性に劣るコンクリートを架台に12年暴露しても、相対動弾性係数の低下はほとんど認められなかったとする報告¹⁷⁾等もされており、自然環境下での劣化は最低気温や凍結融解回数以上に水分の供給・保持条件の影響が大きいとされていた。

d)凍結持続日数・凍結速度

凍結持続日数と凍結速度については、室内促進試験においては影響があるとしつつ、実構造物の凍害劣化に対しては影響が小さいと記述されていた。

3.3 分析結果の評価

まず、凍害の単独劣化に及ぼす比較的重要な外部環境因子としては、下記の6因子が抽出された。

- ① 凍結融解回数
- ② 最低温度
- ③ 水の供給
- ④ 乾燥(乾湿繰返し)
- ⑤ 日射(方位)
- ⑥ 風

温度変化のみでは凍害劣化は殆ど進行しないとする知見(表-3)から、これら①～⑥の中で最も影響が大きい外部環境因子は水の供給、次いで凍結融解回数、最低温度、日射など温度変化に関係する因子と言える。

一方、塩分との複合劣化に関して、表-2では塩分は凍害の進行性に影響する因子であることが全般的に述べられていた。このことから、塩分は凍害の進行性に影響する因子と言える。

以上の結果、凍害、複合劣化の進行に及ぼす重要な外部環境因子を、①～⑥に塩分を加えた7因子に絞り込むことができた。

4. まとめ

凍害および複合劣化の進行性と外部環境因子との関連性の明確化は、実環境下のコンクリート構造物の耐久性を適切に診断・評価する上で不可欠な課題である。

これまでにストックされた貴重な情報を分析した結果、凍害および複合劣化に影響を及ぼす比較的重要な外部環境因子を7因子抽出することができた。

今後は、抽出した外部環境因子が実構造物の劣化に及ぼす影響について定量的に明らかにしていきたい。

参考文献

- 1) 山下英俊：コンクリート構造物の凍害の劣化評価と予測に関する研究、北海道大学学位論文、1999
- 2) 野本高憲、江川顕一郎、野口博章、山下英俊：最低温度が凍結融解作用下のコンクリートの劣化に及ぼす影響について、コンクリート工学年次論文集、Vol.14、No.1、pp.1015-1020、1998
- 3) 袴田豊、山内茂樹、宇美方章裕、藤原忠司：岩手県及び北海道南部におけるコンクリート構造物の凍害の現状とその原因、セメント・コンクリート論文集、No.53、pp.409-416、1999
- 4) 岡本修一、魚本健人：細孔構造から見た凍害への凍結最低温度の影響について、土木学会年次学術講演概要集、pp.634-635、1998
- 5) 村上祐治、山下英俊、喜多達夫、吉川弘道：最低温度の違いによるコンクリートの変形挙動とAE特性、土木学会年次学術講演概要集、pp.438-439、1992
- 6) 松村光太郎、川瀬清孝、土井希祐：コンクリート中の水分凍結に関する実験的研究、コンクリート工学年次論文集、Vol.20、No.2、pp.907-912、1998
- 7) 漆崎要、桂修、鎌田英治：コンクリートの凍害に及ぼす最低気温の影響に関する実験、コンクリート工学年次論文集、Vol.20、No.2、pp.919-924、1998
- 8) M.Pigeon and R.Pleau : Durability of Concrete in Cold Climate, E&FN SPON, pp.11-30, 1995
- 9) Jochen Stark and Bernd Wicht (太田利隆、佐伯昇訳)、DAUERHAFTIGKEIT VON BETON (コンクリートの耐久性)、セメント協会、pp.180、1995
- 10) 床谷征美、月永洋一、阿波稔、原忠勝：塩化物の影響を受けるコンクリートのスケーリング発生過程における歪み挙動に関する2、3の実験、セメン

- トコンクリート論文集、No.54、pp.370-375、2000
- 11) 藤井卓：塩分環境において凍結融解作用をうける硬化セメントペーストのスケーリング劣化機構に関する研究、北海道大学学位論文、1984
 - 12) Verbeck George and Killer Paul：Studies of Salt Scaling of Concrete, Highway Research Board, Bulletin 150, pp.1-13, 1957
 - 13) John J.Valenza II and George W.Scherer：Mechanism for Salt Scaling, J.Am.Ceram.Soc., pp.1161-1179, 2006
 - 14) 遠藤裕丈、田口史雄、嶋田久俊：塩化物水溶液による長期凍結融解作用を受けたコンクリートのスケーリング特性、土木学会論文集、No.725、V-58、pp.227-244、2003
 - 15) 藤原忠司、河村慶次、帷子國成：道路橋におけるコンクリートの凍害、コンクリート工学年次論文集、Vol.10、No.2、pp.553-558、1988
 - 16) 広永道彦、遠藤孝夫、服部清一、高橋幸保：気中で凍結融解作用を受けたコンクリートの劣化要因に関する一考察、土木学会年次学術講演概要集、pp.396-397、1991
 - 17) 自然環境とコンクリート性能評価に関するシンポジウム委員会報告書、日本コンクリート工学協会、pp.14、2005
 - 18) 鮎田耕一：コンクリート構造物の耐久性上の問題点とその対策 凍害(その2)、コンクリート工学年次論文集、Vol.32、No.2、pp.72-77、1994
 - 19) 浜幸雄、千歩修、友澤史紀：乾燥の影響と吸水性状を考慮したコンクリートの耐凍害性の評価方法、セメント・コンクリート論文集、No.57、pp.266-271、2003
 - 20) 青野義道、松下文明、柴田純夫、浜幸雄：乾湿繰返しによるセメントペーストの細孔構造変化、コンクリート工学年次論文集、Vol.28、No.1、pp.731-736、2006
 - 21) 千歩修、濱田英介、友澤史紀：乾湿繰返しコンクリートの吸水性状と耐凍害性に及ぼす影響、コンクリート工学年次論文集、Vol.25、No.1、pp.731-736、2003
 - 22) 相川葉月、千歩修、長谷川拓哉、酒井正樹：実環境を考慮した乾湿繰返しコンクリートの耐凍害性に及ぼす影響、コンクリート工学年次論文集、Vol.28、No.1、pp.899-905、2006
 - 23) 嶋田久俊、堺孝司：凍結融解作用を受けるコンクリートの温度特性に及ぼす環境条件の影響、土木学会年次学術講演概要集、pp.406-407、1991
 - 24) 松村光太郎、浜幸雄、千歩修、富板崇：コンクリートの凍害を対象とした自然環境下におけるコンクリート温度に関する検討、コンクリート工学年次論文集、Vol.22、No.2、pp.793-798、2000
 - 25) 長谷川寿夫、藤原忠司：コンクリート構造物の耐久性シリーズ「凍害」、技報堂、1988
 - 26) 2005年制定、土木学会コンクリート標準示方書維持管理編、土木学会



草間 祥吾*

寒地土木研究所
寒地基礎技術研究グループ
耐寒材料チーム
研究員



田口 史雄**

寒地土木研究所
寒地基礎技術研究グループ
耐寒材料チーム
上席研究員
技術士(建設)



林田 宏***

寒地土木研究所
寒地基礎技術研究グループ
耐寒材料チーム
主任研究員



遠藤 裕丈****

寒地土木研究所
寒地基礎技術研究グループ
耐寒材料チーム
研究員