

コンクリートの耐凍害性評価方法に関する研究

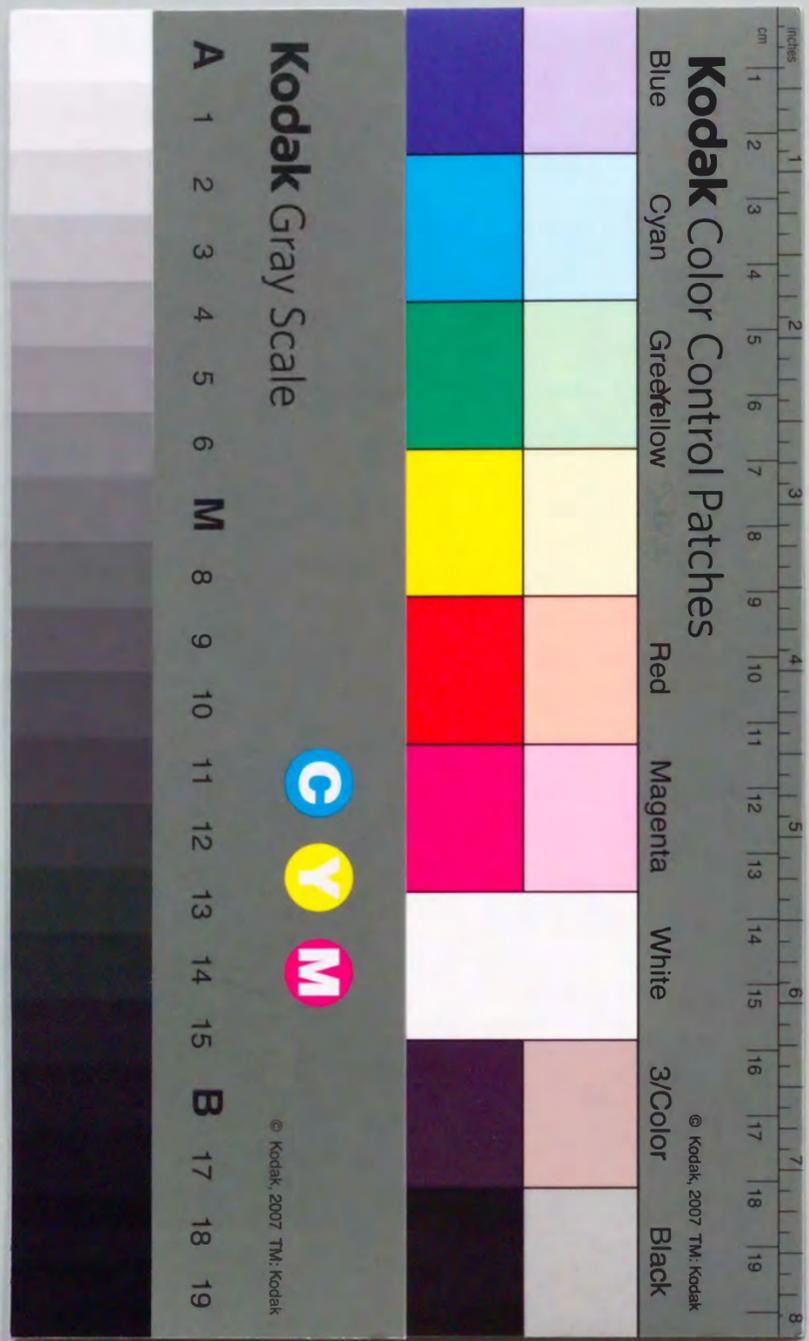
大和, 竹史

<https://doi.org/10.11501/3090248>

出版情報 : 九州大学, 1992, 博士 (工学), 論文博士
バージョン :
権利関係 :

コンクリートの耐凍害性評価方法に関する研究

大 和 竹 史



コンクリートの耐凍害性
評価方法に関する研究

大和竹史

第1章 序論	
1.1 研究の背景	1
1.2 コンクリートの耐凍害性に関する既往の研究と問題点	2
1.2.1 はじめに	2
1.2.2 凍害機構に関する研究	2
1.2.3 耐凍害性に影響を及ぼす要因	3
1.2.4 実構造物の凍害状況および自然条件下での暴露試験体の 長期経年変化	5
1.2.5 耐凍害性判定のための促進試験方法	5
1.3 本研究の目的	6
1.4 本論文の構成	6
第2章 コンクリートの耐凍害性に対する影響要因	
2.1 はじめに	8
2.2 急速凍結融解試験方法	9
2.3 セメントの相違が耐凍害性に及ぼす影響	12
2.4 粗骨材の材質が耐凍害性に及ぼす影響	16
2.4.1 普通骨材および軽量骨材を用いたコンクリートの耐凍害性	16
2.4.2 各種の砕砂および砕石を用いたコンクリートの耐凍害性	22
2.4.3 反応性骨材を用いたコンクリートの耐凍害性	28
2.5 混和材料が耐凍害性に及ぼす影響	31
2.5.1 各種の減水剤およびA E剤を用いたコンクリートの耐凍害性	31
2.5.2 高性能減水剤を用いたコンクリートの耐凍害性	37
2.5.3 水中不分離性混和剤を用いたコンクリートの耐凍害性	52
2.5.4 シリカフェームを用いたコンクリートの耐凍害性	63
2.6 蒸気養生条件が耐凍害性に及ぼす影響	71
2.6.1 目的	71
2.6.2 実験方法	71
2.6.3 実験結果および考察	72

2.7 含有塩化物がコンクリートの耐凍害性に及ぼす影響	76
2.7.1 目的	76
2.7.2 実験方法	77
2.7.3 シリーズIにおける実験結果および考察	80
2.7.4 シリーズIIにおける実験結果および考察	98
2.8 コンクリートの耐凍害性に影響を及ぼす外的要因の検討	103
2.8.1 目的	103
2.8.2 凍結最低温度の影響	103
2.8.3 初期材令での乾燥程度の影響	122
2.8.4 飽水度の影響	133
2.9 内的要因および外的要因を考慮した耐久性指数推定式の決定	142
2.9.1 目的	142
2.9.2 解析に採用する要因	142
2.9.3 多変量解析結果	143
2.9.4 外的要因を考慮した耐久性指数推定式	146
2.9.5 耐久製指数推定式による計算値と実測値との比較	155
2.10 本章の要約	157
2.10.1 コンクリートの耐凍害性に影響を及ぼす内的要因に関する要約	157
2.10.2 コンクリートの耐凍害性に影響を及ぼす外的要因に関する要約	158
2.10.3 内的および外的要因を考慮した耐久性指数推定式に関する要約	160
第3章 九州および北海道における各種コンクリートの戸外暴露試験	
3.1 はじめに	161
3.2 下笠ダムにおけるコンクリート試験体の戸外暴露試験	162
3.2.1 使用材料	162
3.2.2 コンクリートの配合	163
3.2.3 戸外暴露試験方法と急速水中凍結融解試験方法	165
3.2.4 急速水中凍結融解試験結果および考察	169
3.2.5 戸外暴露試験結果および考察	172
3.2.6 戸外暴露試験結果と急速水中凍結融解試験結果の相関性	188
3.3 苫小牧におけるコンクリート試験体の戸外暴露試験	190

3.3.1 使用材料およびコンクリートの種類	190
3.3.2 コンクリート試験体の作製および戸外暴露試験方法	190
3.3.3 戸外暴露試験結果および考察	194
3.3.4 戸外暴露試験結果と急速水中凍結融解試験結果の相関性	196
3.4 耐久性指数推定式による耐久性指数と戸外暴露試験体の 相対動弾性係数の比較	203
3.5 本章の要約	206
第4章 凍結融解過程におけるNON-AEおよびAEコンクリートの 温度・長さ変化関係、ダイレーションおよび凍結水量の測定	
4.1 はじめに	209
4.2 凍結融解の繰り返しに伴うNON-AEおよびAEコンクリートの 諸性状の推移	210
4.2.1 実験方法	210
4.2.2 実験結果および考察	214
4.3 凍結融解過程におけるモルタルおよびコンクリートの長さ変化 および示差熱解析による凍結水量の測定	219
4.3.1 目的	219
4.3.2 凍結融解過程におけるモルタルの温度・長さ変化関係および 等価凍結水量の測定	220
4.3.3 凍結融解過程におけるコンクリートの温度・長さ変化関係および 等価凍結水量の測定(その1)	228
4.3.4 凍結融解過程におけるコンクリートの温度・長さ変化関係および 等価凍結水量の測定(その2)	237
4.4 本章の要約	246
第5章 総括	247
参考文献	249
謝辞	258

第 1 章 序論

1.1 研究の背景

土木学会のコンクリート標準示方書を繙くときまず目につくのは「コンクリートは所要の強度・耐久性・水密性ならびに鋼材を保護する性能等を持ち、品質のばらつきの少ないものでなければならない」という条文である。しかしながら、近年、コンクリート構造物において塩害（塩化物による鋼材腐食）やアルカリ骨材反応による被害等の劣化が生じており、人々のコンクリートに対する信頼が失われたかの感がある。

コンクリートに携わる研究者および技術者にとって、コンクリートに対する信頼を回復させることが急務である。そのためには、コンクリート構造物の設計時において、施工中と供用期間中に構造物が作用荷重に対し適度な安全性を有することを確認するとともに、供用期間中に十分な耐久性を発揮できることを検討しておく必要がある。このうち荷重に対する安全性の検討については土木学会のコンクリート標準示方書〔設計編〕に詳細な規定が示されている。しかしながら、耐久性の検討については体系的に示されていないのが現状である。所要の耐久性を有するコンクリート構造物を建造するためには設計、施工、材料等について総合的に検討する必要がある。このような観点から土木学会「コンクリートの耐久設計小委員会」では昭和63年にコンクリート構造物の耐久設計指針（試案）を作成している。そもそも「耐久設計」の概念がコンクリート工学に導入されてきたのは比較的最近のことであり、コンクリート構造物の耐久性を定量的に評価するためには今後、耐久性に及ぼす要因を総合的に考慮する必要がある。

コンクリートを劣化させる作用には乾燥湿潤、加熱冷却、凍結融解、アルカリ骨材反応、中性化、骨材とモルタル間の熱膨張量の差、各種の塩とコンクリート間の反応などの他に火熱、雪氷、海水、地下水、油、酸類などが挙げられる。これらの中で気象作用に対する耐久性は避けて通ることが出来ない必須のものであるが、被害の激しさから寒冷地では凍結融解作用に対する抵抗性（以下、耐凍害性と記す）が特に重要である。もとよりコンクリートの耐凍害性に関する個々の研究例は我が国に限ってもかなりの量になるが、今後は耐凍害性に及ぼす諸要因の影響を総合的に評価することが上記の耐久設計に欠かせないものと考えられる。

1.2 コンクリートの耐凍害性に関する既往の研究と問題点

1.2.1 はじめに

屋外に暴露された湿潤状態のコンクリートは凍結作用を受けると内部の水分凍結に伴う圧力を受け、コンクリート組織が緩み膨張する。凍結融解作用を繰り返し受けると劣化が進行し、ついには崩壊に至ることがある。しかしながら、実用上、A E 剤やA E 減水剤の使用により空気泡を連行したA E コンクリートにすれば耐凍害性は増大することが知られている。ここでは、コンクリートの耐凍害性に関する既往の研究と問題点について、凍害機構、耐凍害性に及ぼす諸要因、凍害状況及び暴露試験体の長期経年変化、促進試験方法の順に述べる。

1.2.2 凍害機構に関する研究

凍害機構に関する研究は主としてT. C. Powersを中心とするアメリカポルトランドセメント協会のグループで進められた。Powersら¹⁻⁹⁾は1933年から1961年にかけてコンクリートの凍結作用について精力的な研究を行っている。Powers¹⁾は、1945年に、コンクリートの凍害を水圧説 (Hydraulic Pressure Theory) で説明した。この説は、凍結した水の体積膨張が未凍結水の移動を引起し、その際に生じる水圧が凍害の原因となり、その大きさはペーストの凍結度、湿潤度、透水性および空隙までの距離に左右されるとするものである。

1953年、PowersとHelmut⁹⁾はこの水圧説と実験結果が一致しないことを見出した。これはセメントペーストの凍結時に水の移動の大部分は未凍結水側ではなく、凍結領域に向かっていること、凍結速度が早ければ一般に膨張量が小さくなるという理由から発見したものである。そして、この凍害の原因を以下のように説明している。セメントペースト中の空隙水は弱アルカリ性溶液であることを指摘し、毛細管中の水はまず、粗大径の毛細管中で氷晶の生成が始まるがこの結果、この毛細管内の未凍結分のアルカリ濃度が増加し、周囲の未凍結のゲル水との間に浸透圧が発生する。このため、ゲル水が毛細管中の未凍結水へ拡散し、未凍結水濃度の希釈が行われ、この結果、凍結が始まり、氷の成長による膨張圧でペーストを崩壊するとしている。Cordonの解説書⁷⁾では、セメントペースト部の凍害は最初の水圧説とゲル水拡散説 (浸透圧説) で説明されている。

Lilvan^{8, 9)}によれば、毛細管中の表面の吸着水や未凍結水が凍害に大きい影響を有し、その過冷却と氷の蒸気圧の差のため、水が凍ることの出来るより大きい空隙や外表面に移動しようとするため抵抗力を受け、内部圧力で半結晶の水を生じて崩壊をもたらすと説明している。

鎌田ら¹⁰⁾の凍害機構の解釈は、主として硬化セメントコンクリート内の凍結水量と細孔構造との関係、および劣化の様相を考慮して導いており、通常の凍結融解試験の温度範囲に対して以下のようなものである。

- 1) ゲル孔を含めて、半径数百Å以下の細孔中の水分は凍害に関与しない。
- 2) 半径数百Åから数千Åまでの細孔中の水分は、含まれている細孔が小さいほど凍結温度が低く、この水分凍結は、より大きな細孔中の水分が凍結状態となった段階で、細孔径に依存する温度で生ずる。
- 3) 半径数千Å以上の細孔内の水分は、2)と同様に凍結温度の細孔径依存性をもつものの、0℃付近で凍結する。

鎌田ら¹⁰⁾はまた、ゲル水拡散説に否定的でセメント硬化体の温度変化に伴う膨張収縮挙動の例を挙げ、拡散に寄与する水は過冷却水であるとしている。

セメントペーストの凍害は連行空気量によって緩和することが可能であるが、コンクリートの凍害を論ずる場合には骨材の凍結挙動も考慮しなければならない。骨材の影響に関してはVerbeckとLandgren¹¹⁾、MacInnisとLau¹²⁾らが骨材の諸性質と凍結融解作用との関連性をPowers説の立場から説明し、さらに、粗骨材の大きさは耐凍害性に大きく影響し凍っても損傷を受けない寸法限界の存在を示した。DunnとHudec¹³⁾は骨材の劣化の主要原因は凍結によるものでなく吸着水の膨張に起因することを提唱し、凍結しなくても崩壊する粘土性石灰石骨材の例を挙げている。

1.2.3 耐凍害性に影響を及ぼす要因

コンクリートの耐凍害性に影響を及ぼす要因は使用材料や配合条件に関する内的要因とコンクリートが受ける凍結融解条件に関する外的要因に大別される。まず、内的要因に関する既往の研究について述べる。

空気連行が凍結融解作用に対して有効であるという報告が1941年にSwayze¹⁴⁾によってなされ、1944年にアメリカコンクリート協会 (ACI) により開催されたA E 剤を使用したコンクリートに関するシンポジウムでも高品質のセメントペーストと骨材を用いて空気連行を行えば耐凍害性を確保する上で極めて有効であることが確認された¹⁵⁾。

セメントの影響について、ACI 201委員会報告¹⁶⁾はASTM C150に適合するポルトランドセメントかASTM C595に適合する混合セメントであれば、種類が異なっても同程度の耐凍害性を示すと報告している。小林ら¹⁷⁾も普通ポルトランドセメントの品質がコンクリートの耐凍害性に及ぼす影響は認められないことを確認している。

武田^{1⁸)}、三和^{1⁹)}、前川ら^{2⁰)}は、粗骨材の規格試験値とコンクリートの耐凍害性との関連性について検討している。人工軽量骨材を使用したコンクリートの耐凍害性に関しては、Klieger^{2¹)}が空気量および吸水程度の影響を、国分^{2²)}は空気量と骨材最大寸法の影響を、鎌田ら^{2³)}は粗骨材付着面におけるき裂の発生を、西岡ら^{2⁴)}は吸水量との関係を強調している。

A E 剤および減水剤の影響は Powers^{2⁴)} が基本的には明らかにしており、左右田^{2⁵)} および小林^{2⁶)} は空気量が同程度であっても空気泡の大きさや分布性状の影響が大きいことを指摘している。1960年頃から日本で、高性能減水剤が開発され、従来より小さい水セメント比でワーカビリティに富む高強度コンクリートの作製が可能となった。高性能減水剤を用いた高強度コンクリートの耐凍害性に関しては、1979年の第1回 Superplasticizer in Concrete に関する国際会議で議論が始まり、1981年の第2回国際会議では Roberts と Schiner^{2⁷)}、岡田ら^{2⁸)}、小林ら^{2⁹)}、Malhotra^{3⁰)} らがそれぞれ研究成果を報告した。国内では、後藤と三浦^{3¹)}、服部^{3²)} らの研究がある。これらの結果より高性能減水剤を用いた場合でも適切な A E 剤を用いれば耐凍害性のあるコンクリートを作製できることが示された。しかし、水セメント比の影響を明確に整理して報告した例はない。

関^{3³)} はコンクリートの凍結水空気量比による配合の決定方法を提案し、永倉^{3⁴)} はコンクリートの配合諸条件すなわち、水セメント比、細骨材率、単位セメント量、空気量などの諸要素の影響を明らかにした。

特殊な養生の影響、初期材令における耐凍害性等に関する研究例についてはここでは除外した。

実際のコンクリート構造物の耐凍害性を論じる場合には凍結融解条件に関する外的要因の影響を検討することが非常に重要であるが、研究例は内的要因に比べて極めて少ない。これは外的要因の変動幅が大きいこと、試験方法が確立されていないことなどによるものと思われる。

長谷川ら^{3⁵)} は耐凍害性に及ぼす凍結最低温度の影響を、Malish^{3⁶)} は乾燥度合の影響を明らかにした。また、田畑ら^{3⁷)} は乾湿繰り返し性状と耐凍害性の関係を検討している。

三浦ら^{3⁸)} は LNG 貯蔵用コンクリート製タンクを想定し、極低温の繰り返しの影響を検討している。

塩化ナトリウムや塩化カルシウムなどの塩類をコンクリート舗装の凍結防止剤として使用した場合、ピッチングやスケーリングなどの表面劣化を促進する。このメカニズムは、

毛細管中の塩類の存在が凍結時の浸透圧を高め、未凍結水の空気泡への移動を拘束するため凍害が酷くなるというもので、Litvan^{3⁹、4⁰)} は、凍結防止剤がコンクリートの飽和度を高め、その結果、乾燥しにくくなると指摘している。Verbeck と Klieger^{4¹)} は凍結防止剤の濃度が 3～4% の時にスケーリングを起こすと述べている。Hudec^{4²)} は凍結防止剤の濃度が 3～5% の時に最もスケーリングが酷く、そのメカニズムを浸透圧で説明している。

以上、耐凍害性に影響を及ぼす要因に関する既往の研究について述べたが、内的要因および外的要因のうち何が主要な要因であるのか、また、これらの影響を耐凍害性評価に如何に取り入れるべきか、実験的かつ数値解析的に検討した例は少ない。

1.2.4 実構造物の凍害状況および自然条件下での暴露試験体の長期経年変化

実構造物の凍害状況の調査例は数多くあるが、たとえば、Idorn^{4³)} によるデンマークの港湾構造物、国分ら^{4⁴)} によるコンクリートダム表面部、Gjørsv^{4⁵)} によるノルウェーの港湾構造物、国分^{4⁶)} および林^{4⁷)} による土木構造物、服部^{4⁸)} および平井^{4⁹)} による建築構造物、中村^{5⁰)} による水路橋の報告などが挙げられる。

自然の気象条件下に暴露した試験体の経年変化に関する報告も数多いが、例えば、Kennedy と Mather^{5¹)} による Treat Island Marine での暴露試験、Jackson^{5²、5³)} による 27 種類のセメントで作製した試験体の 10～15 年間にわたる暴露試験、日本大ダム会議コンクリート凍害実験研究分科会^{5⁴)} による大型ブロックの長期暴露試験、横山^{5⁵)} による人工軽量骨材コンクリートの暴露試験、長谷川ら^{5⁶)} による凍害の地域差に関する長期暴露試験などがある。

わが国における実構造物の凍害調査や暴露試験は個々の機関や研究者により実施されてきた傾向がある。気象条件の相違、構造物の種類、コンクリート品質の相違などを考慮して実施した例は少ないが、前記の長谷川ら^{5⁶)}、北海道大学建築工学科の研究者グループが凍害の地域差を考慮した暴露試験を実施しているのは注目される。今後、暴露試験を実施する場合には、コンクリートの内的要因と気象条件による外的要因の影響を考慮した試験計画が必要と思われる。

1.2.5 耐凍害性判定のための促進試験方法

凍結融解作用の促進試験方法は、ヨーロッパを主体とする RILEM^{5⁷)} の方法、アメリカの ASTM-C666^{5⁸)} の A 法および B 法などで規定されているが、これらをさらに合理的にする研究も行われている。Powers^{5¹)} は供試体の膨張量によって耐凍害性を試験する方法を提案しており、Arni^{5⁹)} はアメリカにおける試験方法について報告している。また、Wills

ら^{6.0)} およびCady^{6.1)} は膨張量による評価方法の研究結果を報告した。鎌田ら^{6.2-6.4)} は凍結融解サイクル後の残留膨張量の積算値を凍伸度と定義し、これによる耐凍害性の評価法を提案している。小林^{6.5)} および国分^{6.6)} も長さ変化が耐凍害性の判定に有効であることを述べている。MacInnisとLau^{1.2)}、Vuorinen^{6.7)}、Rigan^{6.8)}らは1サイクルの凍結融解作用後の長さ変化で耐凍害性の評価が可能であるとしている。

洪と長谷川^{6.9)} はコンクリートの凍結融解試験方法のJIS 原案作成にあたって行った調査研究と試験方法に関する基本的な考え方を述べている。その中で、この試験方法は主として普通コンクリートに用いる材料および配合の耐凍害性の適否を判断する一手段として考えており、コンクリートの使用条件に合わせた凍結融解試験方法も考慮される必要性があるとしている。

1.3 本研究の目的

既往の研究結果にも指摘されているように、コンクリート構造物の耐凍害性に影響を及ぼす要因は使用材料、配合および施工方法に関係する本来コンクリート自身が有している内的要因（たとえば水セメント比、空気量）と構造物が建設される地理的条件による外的要因（凍結および融解温度、乾燥および湿潤作用等）とに分けて考えることができる。

内的要因については、実験室での促進試験(ASTM-C666による場合が多い)によって確認されている点も多いが、それらの中で何が重要な要因(key factor)であるのか実験的かつ数値解析的に検討した研究例は極めて少ない。外的要因の影響に至っては調査・研究がまだ不十分な段階である。

本研究では、まずコンクリートの耐凍害性に及ぼす主要な要因を既往の知見および実験的検討により確定し、これらの要因の影響を取り込んだ実用的な耐久性指数推定式を求めることを第一目的とし、次に、この耐凍害性推定方法が長年月の戸外暴露試験結果に応用できるのか検討することを第二目的とした。さらに、凍結融解過程におけるコンクリート供試体の温度・長さ変化関係および凍結水量の測定方法を確立し、この方法が凍害機構の解釈および耐凍害性の早期判定に有用であることを示すことを最終目的とした。

1.4 本論文の構成

本論文は5章から成る。

第1章では、本研究の背景について触れ、コンクリートの耐凍害性に関する既往の研究および問題点をとりまとめ、本研究の意義と目的について述べた。

第2章では、まず、コンクリートの耐凍害性に及ぼすセメント、骨材、混和剤等の品質、

養生方法、さらに、単位水量、単位セメント量、水セメント比、空気量等の配合条件を網羅した実験を行い、詳細にわたって検討した結果、粗骨材の種類、空気量、水セメント比が耐凍害性評価の際の重要な内的要因であることを明らかにした。次に、耐凍害性に及ぼす外的要因の影響についても実験的に検討を加え、供試体の凍結最低温度、乾燥度合、塩分環境の有無が耐凍害性評価の際に考慮すべき重要な外的要因であることを明らかにした。さらに、これらを考慮した実用的な耐久性指数の推定式を実験的かつ数値解析的に求めた。

第3章では、冬期に、軽微な凍結融解作用が加わる大分県の下笠ダムおよびかなり厳しい凍結融解作用が生じる苫小牧市において十数年にわたりコンクリート試験体の戸外暴露試験を実施し、使用材料、配合、暴露条件等がコンクリート品質の経年変化に及ぼす影響を検討した。その結果、相対動弾性係数はほとんどのコンクリート試験体において低下しておらず、促進試験の場合のように各要因の影響が認められないことを明らかにした。さらに、第2章で求めた耐久性指数推定式に外的要因の影響を考慮した暴露試験体の耐凍害性推定方法の妥当性を検討した。

第4章では、凍結融解作用におけるコンクリート試験体の劣化を判定する指標として長さ変化の有用性を実験的に検討し、次いで重要であるにもかかわらず開発されていなかった凍結融解過程におけるコンクリート供試体の温度・長さ変化関係および示差熱分析による凍結水量の測定装置を製作し、その機構と特徴を述べた。また、この装置がコンクリートの凍害機構の研究および耐凍害性の早期判定に有効であることを示した。

第5章は、以上の各章における結論を要約して総括とした。