HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	セメント硬化体の凍害劣化抑制技術に関する研究［全文の要約］
Author(s)	西, 祐宜
Description	この博士論文全文の閲覧方法については、以下のサイトをご参照ください。 https://www.lib.hokudai.ac.jp/dissertations/copy-guides/
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第11505号
Issue Date	2014-06-30
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/56716
Type	doctoral thesis
File Information	Hironobu_Nishi_summary.pdf

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

学 位 論 文 内 容 の 要 約

博士の専攻分野の名称　博士（工学）　氏名　西 祐宜

学 位 論 文 題 目

セメント硬化体の凍害劣化抑制技術に関する研究
（Study on Frost Damage Restraint Technology of Hardened Cement-based Materials）

コンクリート構造物において，凍結融解作用に対する挙動および劣化作用機構の解明は，コンクリート構造物の維持管理上，非常に重要な課題である．セメント硬化体の凍害劣化のメカニズムは，氷晶の発生理論および発生後の水分の移動理論，それらと多孔組織との相互作用等から説明されるが，水の物性および環境条件，材料特性が多岐に渡るため，凍害劣化の支配度を限定することは困難である．耐凍害性を確保するには，セメント硬化体内部の飽水度の低下，エントレインドエアの連行，毛細管空隙の減少(低水セメント比化)が一般的な方法である．また，これらに影響を及ぼす養生条件および材齢，水和度等と調合条件および使用材料の品質も重要である．本研究では，凍害劣化の支配的要因として，運動性の高い巨視的水分を保管する毛細管空隙に着目し，その空隙連続性の遮断および氷晶浸透の抑制による飽和流動水圧の低減により，耐凍害性の向上を図ることを目的とした．

本研究は「凍結融解作用に対する抵抗性を改善した収縮低減剤(新規収縮低減剤)の開発」および「凍害劣化抑制剤の開発」の 2 種の新規混和剤の開発からなる．収縮低減剤を使用した際に懸念される著しい耐凍害性低下の改善とエントレインドエアに頼らない耐凍害性の確保を目標に，凍害劣化の主要因と考えられる氷晶浸透および水分移動の遮断物質をセメント硬化体中に導入する技術を検討した．本研究は凍害劣化抑制技術を確立するための，作用機構に基づく設計概念および設計手法，性能検証，実用化に関する研究である．

第 1 章は「序論」を示している．本研究の背景として，コンクリートを取り巻く社会的背景および現状の対策方法，従来技術の問題点，本論文の構成を示している．また，本研究の目的である，‘コンクリートの乾燥収縮の低減’および‘凍結融解作用による劣化抵抗性の向上’を達するにあたり，着目した現象とそれを改善する手法概念を示している．

コンクリート用化学混和剤は，コンクリートの性質を少量の使用量で改善させる効能を持つ．構造材料としてのコンクリートの品質向上には欠かせない材料であり，細分化するコンクリートの要求性能を満足させるために，常に研究開発が行われている．例えば，資源の有効利用や持続可能な社会形成の構築等の環境問題対応として，積極的に使用される混和材料の性能補完のための化学混和剤の開発．また，コンクリート構造物のひび割れについては，社会的関心の高まりおよび関連法律の制定，関連学会での収縮量の規制・関連指針の刊行が行われているが，乾燥収縮低減の一方策としても化学混和剤は注目されている．コンクリートが性能設計・性能照査型に移行する中で，コンクリート用化学混和剤は，目標性能を担保するために必要不可欠な材料といえる．一方，化学混和剤は必ずしも万能ではなく，新しい製品開発が常に望まれている．例えば，コンクリートの耐凍害性の確保には，AE

剤(Air entrained agent)を使用して，エントレインドエアを連行することが一般的な技術であるが，低強度のコンクリートおよびフライアッシュを混和材として使用したコンクリート等では，必ずしも最良の技術とはいえない．また，空気泡の連行は，耐久性の低下(水セメント比の低下，単位セメント量の増加)に直結する．昨今注目される収縮低減剤においても，収縮低減効果の増大に伴い，耐凍害性が著しく低下する問題が顕在化している．このような中，本研究では，凍結融解作用に対する抵抗性を改善した収縮低減剤(新規収縮低減剤)の開発を試みた．開発はコンクリートの乾燥収縮および凍結融解時の挙動を考慮して設計を行っている．コンクリートは多成分で構成される材料であるが，この構成材料に新材料を導入することで，目標性能の達成を試みている．乾燥収縮は，コンクリートが曝された外環境と平衡状態になるまでコンクリート中の水分が拡散し，体積減少する現象である．凍結融解は，コンクリート中の水分が，凍結時に固体，融解時に液体になる水分の相転移現象である．何れも，水分の移動，拡散，凝集，相転移といった水分に関わる現象から生じる．また，これらの現象が生じる‘場’としての，コンクリート中の空隙構造も重要な要因となる．本研究では，コンクリート中の水分移動および氷晶浸透の遮断により，耐凍害性の向上を図っている．比較的運動性の高い巨視的水分を保有する毛細管空隙に注目し，この空隙の連続性を新材料で遮断することを試みた．コンクリート中には様々な径の空隙が存在するため，水分移動および氷晶浸透により凍害劣化を生じる径を明確にすることが非常に重要となり，作用機構を想定しながらの設計が必要となる．本研究は，新規混和材の実用化により，寒冷地域での収縮低減コンクリートの製造を可能とし，耐凍害性を大幅に向上するコンクリートの製造を可能にすることを最終の目標としている．

第 2 章は「既往の研究」を示している．対象は乾燥収縮および収縮低減剤に関する研究，凍結融解に関する研究である．調査した既往の研究から，新規混和剤の開発に必要な情報を抽出している．コンクリートの乾燥収縮は，乾燥に伴う空隙水の移動および蒸発が要因であるため，水分の蒸発と凝集，溶解物質による浸透圧の発生について整理した．また，セメントペーストの乾燥収縮機構では，①毛細管張力理論，②表面エネルギー理論，③層間水の移動理論，④分離圧理論についてそれぞれ既往の研究を基に考察を行った．収縮低減を達するにあたり，それぞれの理論背景を基に収縮低減剤の作用機構を推察している．空隙水の表面張力の低下は，平衡する Kelvin 半径が小さくなるため脱水量が増加する．空隙水の表面張力の低下は収縮応力を低下させる効果ではなく，平衡時間に達するまでの時間を延長するに過ぎないと考えられる．表面エネルギー理論は，妥当な理論と言えるが，適用湿度が非常に低湿度であり，一般的なコンクリートの収縮低減を目的とした場合，対象にすべき理論とはいえない．層間水の移動は，収縮の起点時に脱水させている，もしくは，脱水した CSH の形状を形成している場合は，収縮を低減できる可能性がある．または，CSH 外部に層間水の移動を抑制する物質を混和し，移動抑制を図ることも収縮低減につながると考えられる．分離圧は，現状では最も妥当性の高いメカニズムと考えられる．セメント硬化体中の吸着遮断領域を考慮すれば，固体に拘束された水分と自由水のエネルギー差が分離圧となるため，自由水自体のポテンシャルエネルギーを低下させることで差圧は減少する．例えば，収縮低減剤のような非吸着の有機化合物が自由水中に存在すれば差圧は減少する．また，吸着遮断領域の水分は非常に強固に拘束されているが，強い圧力で遮断領域内の水分を移動させれば，収縮の起点からの変異量は減少する．例えば，拘束水よりも自由水のポテ

ンシャルエネルギーを低下させることで浸透圧を発生させ，脱水させる可能性も考えられる．次に，比表面積を減少させることで収縮は抑制されるが，これは水和反応率を低下させることを意味するので他の耐久性への影響が懸念される．体積弾性率も同様である．現実的には，吸着水の膜厚が厚くなるように，セメント硬化体内部の相対湿度を高く保つ，もしくは，平衡状態への移行時間を延長することで収縮を低減することが考えられる．そのため，空隙水に保水効果を持たせる，保水するような空隙構造を形成することで，セメント硬化体に発生する分離圧差を低減させる方法が収縮低減に有効であると考えられた．乾燥収縮低減剤については，毛管張力説に基づかず収縮低減剤を設計すれば，表面張力の低下作用が高い化合物を選定する必要はなくなる．また，非イオン系界面活性剤を使用した場合はセメント粒子に吸着せず，液相に残存するため，空隙水の化学的特性と収縮低減効果の関係性を確認する必要がある．例えば，分子量の影響，ミセルサイズの影響を考慮する必要がある．分離圧に収縮低減剤が影響を及ぼすと考えれば，空隙水の飽和蒸気圧(化学 Po)の低下に伴い，拘束水との分離圧差が減少することも収縮低減剤の特徴と考えられた．

凍害劣化の主要因は，セメント硬化体中の水分の相転移に起因するため，空隙水の凍結特性について整理を行った．溶解物質の影響および表面力と低温相転移，過冷却現象，過冷却・拘束圧力・氷の比容積による氷の浸透について整理した．セメント硬化体のような様々な空隙を有する多孔体物質中の水分が凍結する際は，過冷却を生じて凍結する．過冷却は，氷核形成エネルギーおよび溶解物質による空隙水のモル濃度の増加，氷晶が浸透する空隙径に依存すると考えられる．しかし，実際には凍結はある温度で一気に進行するため，空隙水の凍結特性のみではセメント硬化体の凍結進行過程を評価することは困難であると考えられた．そのため，現在までに提案されている凍害劣化メカニズムを整理し，その中でも妥当性が高いモデルを抽出し，凍害劣化抑制方法を想定した．水圧説を破壊メカニズムの根幹とした場合，水中凍結水中融解時のように，コンクリートが氷に覆われ，氷晶は容易にセメント硬化体内部に浸透し，外部に未凍結水が排出されない場合，エントレインドエアの導入が最も耐凍害性の向上に効果的である．過冷却は，本来の凍結点以下の温度で一気に凍結し，凍結速度も速く，局所的に非常に大きな水圧を発生させる．高強度コンクリートのように細孔組織を微細化することで，凍結を迎えず過冷却から融解に至れば当然，凍害は生じない．氷と未凍結水が接触している系では，空隙の連結性が減少すれば，過冷却が進み，氷晶の浸透も抑制される．巨視的氷相分離理論は，水蒸気として氷晶へ水分が移動するため，水圧説よりも水分の移動は容易と考えられる．計算上の破壊圧力は，水圧説よりも低いが，凍結箇所に向う水蒸気を遮断することは困難と考えられる．また，水-氷とは異なり水-気-氷であるので移動経路の選択肢が高く，移動経路のサイズも異なると考えられる．ただし，移動距離の短縮が凍害抑制に有効な点は水圧説と同様である．氷晶生成により初めて飽和蒸気圧差によって水蒸気が移動するため，氷晶生成量の抑制が最も効果的な対策となる．これらの考察を基に，乾燥収縮の抑制，凍害劣化の抑制について方策を考えた．乾燥収縮の抑制は，吸着水膜厚が厚くなるようにセメント硬化体内部の相対湿度を高く保つことが最も効果的であり，空隙水の表面張力の低下は効果がないと想定した．凍害劣化の抑制は，氷晶の浸透および水分の移動を，遮断性物質を用いて抑制することが効果的であると考えられる．本研究では，巨視的水分を保有する毛細管空隙に着目しているため，このサイズの空隙連続性を遮断性物質で絶つ必要があると考えられる．

第 3 章は「新規収縮低減剤の設計」を示している．新規混和剤の一つである新規収縮低減剤の設計概念を示している．新規収縮低減剤は，従来の収縮低減剤と同混和量の際，同等以上の収縮低減効果を有し，凍結融解作用に対する抵抗性を担保できる一液タイプの製品設計が目標となる．必要な効能は，①収縮低減性能，②凍害劣化抑制性能となる．新規収縮低減剤は其々の機能を分与した 3 成分から構成される．収縮低減機能を付与する「収縮低減成分」．遮断性物質(疎水性化合物)となる「油性成分」と「乳化成分」である．其々の化合物に求められる性能をモルタル試験にて確認し，化合物の選定を行った実験経緯を示している．収縮低減成分は非イオン系界面活性剤を主成分とする種々の化合物から，収縮低減効果および水和反応の遅延性を考慮して収縮低減成分を選択した．実験により，非イオン系界面活性剤のアルキル基の炭素数が 4 以下の場合はアルキル基の炭素数が多く，EO 付加モル数 1～2 が最も収縮低減効果が高いことが判明した．疎水性化合物は化学的腐食を考慮して，鉱物油およびエステル，植物油を選定した．疎水性化合物を乳化分散する乳化剤は，乳化剤単体及び新規収縮低減剤として設計した際の空気連行性を確認した．新規収縮低減剤として設計した際は，乳化剤が疎水性化合物に吸着し，疎水性化合物の消泡効果が減少する現象が確認された．また，未吸着の乳化剤が空気連行性(起泡か消泡)に及ぼす影響も確認している．選定した化合物を処方して設計した新規収縮低減剤のアルカリ水中での粒子径分布を確認した．その結果，エマルジョンタイプ(3 成分+水)の新規収縮低減剤は微細な粒子径分布を示し，乳化製剤タイプ(3 成分)は比較的粗大な粒子径分布を示した．測定された粒子径分布でセメント硬化体中に導入されるとは限らないが，アルカリ水中での粒子径分布とセメント硬化体中での粒子径分布は相関性を示すものと考えた．また，乳化剤処方量を増量すると粒子径は小径へシフトし，多量に増加すると異なる粒子径ピークを示すことが確認された．この結果は，乳化剤処方量により，任意のサイズに疎水性化合物を混和できる可能性を示唆している．凍害劣化に支配的な，遮断すべき氷晶浸透および水分移動の空隙径が未知であるため，本設計手法で 0.1~200μm 程度の疎水性化合物を，第 4 章で実際にセメント硬化体に導入し，凍結融解作用に対する抵抗性を確認することとした．乳化製剤中の収縮低減成分の水相への移行性を確認している．その結果，選定した収縮低減成分は水分と混合直後速やかに疎水性化合物から水相へ移行することが確認され，3 成分構成でも十分に収縮低減効果を発現すると考えられる．第 3 章では想定した効能を発揮するように 3 成分其々の機能を設定し，想定通りの活性を示すことを確認した．

第 4 章は「新規収縮低減剤の諸特性」である．第 3 章で設計した新規収縮低減剤の性能検証を実施した．実施項目は，設計した新規収縮低減剤のアルカリ水中での分散状態，セメントペースト試験による沈降凝縮，含水性状，平衡含水率，乾燥収縮率，水和反応率，反射電子像による疎水性化合物観察，示差走査熱量測定より求めた凍結水量，コンクリート試験である．アルカリ水中での新規収縮低減剤および従来の収縮低減剤の形態を散乱式粒度分布レーザー回折で確認した結果，遮断物質として混和する疎水性化合物は，新規収縮低減剤がエマルジョン形態のとき 0.77μm，乳化製剤形態ときは 22.80μm にピークが発生した．新規収縮低減剤に使用する疎水性化合物および乳化剤の種類，各々の組成比により粒形のサイズは調整可能であることを確認した．また，非イオン系界面活性剤(収縮低減成分)では，約 20μm に存在しないはずのコロイド粒子が確認された．この粒子は，各種ミセル，ニート相，ベシクルのような分子集合体と考えられる．この分子会合体は内包する水分量が多いと推察

され，耐凍害性の低下要因の一つである可能性が高い．セメントペーストの沈降凝縮試験では，非イオン系界面活性剤(収縮低減成分)は，沈降高さが高くなる傾向が認められ，この現象はセメント硬化体の空隙量増加を意味し，含水率および凍結水量の増加を誘引する現象と考えられる．また，枯渇凝集理論を基に収縮低減成分共存時のセメント粒子のフロック形成量の増加についても考察を行っている．105℃および 40℃含水率は，新規収縮低減剤および非イオン系界面活性剤(収縮低減成分)共に混和量の増加に従い含水率が増加する傾向が確認され，その傾向は 40℃含水率に顕著に現れた．セメントペーストの平衡含水率および乾燥収縮率を確認した．設計した収縮低減剤は市販収縮低減剤と同程度の収縮低減効果を有していた．非イオン系界面活性剤(収縮低減成分)を混和した場合，18nm 以上の粗大空隙が増加し，6.2nm 以下の空隙が減少する傾向が確認された．収縮低減剤の種類により各湿度での乾燥収縮率は変化する現象が確認され，新規収縮低減剤は相対湿度 60→30%での収縮進行が遅滞し，30%以下で収縮が進行する．一方，非イオン系界面活性剤(収縮低減成分)は，94.2→84.0%では添加率により乾燥収縮率に差異が認められるが，それ以下の湿度では同様の収縮傾向を示す．また，新規収縮低減剤は添加率 2.0%のとき相対湿度 20~70%，添加率 5.0%のとき相対湿度 25~80%が最も有効に作用する．非イオン系界面活性剤(収縮低減成分)は，添加率 2.0%のとき相対湿度 30%以上，添加率 5.0%のとき相対湿度 30~80%が最も有効に作用する．両者を比較すると明らかに相対湿度と収縮低減率の関係性が異なる．この現象は，導入された疎水性化合物の影響によるものと推察される．X 線回折から水和反応率を確認した結果，若材齢時においては新規収縮低減剤および非イオン系界面活性剤(収縮低減成分)を混和することで反応率は低下するが，新規収縮低減剤は材齢 28 日にほぼ無混和と同様のセメント反応率を示す．一方，市販収縮低減剤の一部は，材齢 91 日までセメント反応率が遅滞する．新規収縮低減剤が市販収縮低減剤よりも高いセメント反応率を示した原因は，同添加率であっても新規収縮低減剤に処方される収縮低減成分が減じられているためと考えられる．反射電子像からから確認したセメント反応率は，新規収縮低減剤は X 線回折の結果同様，若材齢ではセメントの反応率が若干減少するものの長期材齢においては回復する傾向が確認された．また，反射電子像から疎水性化合物を観察した結果，若材齢では空隙中に疎水性化合物が存在するため，反射電子像に疎水性化合物の粒子は確認できないが，材齢の進行に従い空隙が水和生成物で充填され，球形の粒子で存在することが確認された．画像解析により算出した材齢 28 日における疎水性化合物の平均サイズは 17.36μm であり，アルカリ水中でのピーク粒子径 22.80μm と近似するサイズであった．この結果から，散乱式粒度分布レーザー回折で確認されたコロイド粒子径に近いサイズでセメント硬化体中に疎水性化合物が混和されることが検証された．示差走査熱量測定より凍結温度および凍結水量を算出した．高温での相転移は，新規収縮低減剤は材齢 7 日では添加率の増加に伴い無混和より凍結水量が減少し，材齢 28 日では添加率 2%で凍結水量の減少は停滞する傾向となった．この結果から，新規収縮低減剤は高温での相転移より確認される凍結水量を減じていると考えられる．非イオン系界面活性剤(収縮低減成分)を添加した際は，材齢に関わらず無混和よりも凍結水量が増加した．材齢 7 日では添加率 2%が最も凍結水量が多く，材齢 28 日では添加率の増加に伴い凍結水量が増加する．凍結水量の増加が，耐凍害性の著しい低下の一要因であると考えられる．

コンクリート試験により新規収縮低減剤のフレッシュ性状および耐久性状を確認した．本実験では，

収縮低減剤を調合の外割りで混和しているため，流動性は混和量に応じて若干増加する傾向であった．また，収縮低減剤を混和した場合，凝結時間は遅延傾向となるが，新規収縮低減剤の乳化製剤タイプは，市販収縮低減剤よりも遅延性の改善が確認できた．圧縮強度は混和量に応じて低下する傾向を示し，疎水性化合物(油性基剤)にエステル化合物や植物油を使用した場合は著しい圧縮強度の低下が認められた．新規収縮低減剤-乳化製剤タイプは市販収縮低減剤と同様の強度発現性を示した．乾燥収縮率は，収縮低減剤の種別や新規収縮低減剤の処方により収縮履歴は異なる傾向を示した．新規収縮低減剤-乳化製剤タイプは市販品と同様の収縮低減効果が認められた．耐凍害性の確認では，収縮低減剤の種別および形態を問わず殆どが凍結破壊に至った．非イオン系界面活性剤(収縮低減成分)を用いたものは，耐凍害性が著しく劣化する結果となった．エステル系化合物や植物油を疎水性化合物に用いたものは，一部で改善効果は確認されたが，加水分解を防げず耐凍害性が確保できない結果となった．一方，疎水性化合物に鉱物油を用いた系のみ，著しい耐凍害性の改善効果が確認された．非イオン系界面活性剤(収縮低減成分)を主成分とする収縮低減剤は，乾燥収縮比 85~95%で耐凍害性が極端に低下したが，疎水性化合物に鉱物油を用いた新規収縮低減剤は，大幅な収縮低減効果と良好な耐凍害性を兼備する目標性能通りの結果が得られた．耐凍害性を検証するために，気泡組織を確認した．従来，気泡間隔係数が 250μm 以下であれば耐凍害性は担保されるとしてきたが，収縮低減剤を混和した際はその限りではない結果となった．この現象は，収縮低減剤を混和した場合，気泡の効果が発現しないことを意味している．コンクリートの画像観察から空隙組織を確認した結果，新規収縮低減剤-乳化製剤タイプの形態は 60μm 以下に疎水性化合物の存在が確認でき，歪な空隙形成量も無混和と同等であった．非イオン系界面活性剤(収縮低減成分)を主成分とする収縮低減剤は，40~100μm の微細な空隙が減少し，40μm 以下で空隙が増加した．また，歪な空隙量が無混和よりも増加する傾向が確認され，これも耐凍害性低下の一因と考えられる．サイズの異なる疎水性化合物をセメント硬化体中に導入することで，凍結融解試験結果は異なる結果を示した．導入した粒子径が約 20μm の新規収縮低減剤-乳化製剤タイプでは著しい改善効果が確認され，2.6μm の新規収縮低減剤-エマルジョンタイプでは若干の改善効果に留まった。0.77μm の微細なエマルジョンでは，非イオン系界面活性剤(収縮低減成分)を主成分とする収縮低減剤よりも凍結融解作用に対する抵抗性は低下した。この結果からも，比較的粗大な疎水性化合物が，凍結融解作用による劣化を抑制していることが判明した．本章の結果より，収縮低減成分の混和により，セメント硬化体の空隙構造および生成される水和物が変化しても，約 20μm の氷晶浸透，水分移動の遮断性物質を混和すれば，耐凍害性は改善することが確認された．このことは，20μm 程度の比較的粗大な空隙(毛細管空隙)の量および連続性が，凍害発生の支配的要因である可能性を示唆している．

第 5 章は「凍害劣化抑制剤の開発」である．従来，エントレインドエアを適正量導入することで，凍結融解作用に対する抵抗性を付与するのがコンクリートの凍害対策として一般的であるが，凍害劣化抑制剤の混和により NonAE コンクリートでも凍結融解作用に対する抵抗性を確保することを目的に研究を進捗した．新規収縮低減剤の凍害抑制成分を再設計し，疎水性化合物のセメント硬化体中への導入を実施した．目標性能は，NonAE コンクリートの条件で，JIS A 1148 水中凍結水中融解の A 法でも合格することである．凍害劣化抑制剤の処方を変化させた際の疎水性化合物の分散状態を把握し，

任意の粒子径サイズを設計可能とした．セメントペーストでの示差走査熱量測定にて凍結水量を確認し，凍結水量が減少する疎水性化合物の粒子径サイズは 10～110μm であることを確認した．

モルタル試験では，凍結融解作用時の体積変形を確認している．NonAE モルタルと同様に，凍害劣化抑制剤は，凍結膨張を示し，融解後に残留ひずみを生じるが，この挙動は約 10 サイクルで終了する．即ち凍害劣化抑制剤は，劣化を累積しないと考えられる．

コンクリートでの凍結融解試験および気泡組織測定により，混和された疎水性化合物の粒子径サイズと耐久性指数の関係性を整理し，さらに，気泡間隔係数と疎水性化合物の見掛けの気泡間隔係数も確認した．その結果，凍結融解作用に対する抵抗性は気泡間および疎水性化合物間の間隔に依存していることを示唆した．このことより，水中凍結水中融解の作用機構は，気泡および疎水性化合物間の毛細管空隙の長さで評価ができる可能性を見出した．解析の結果，毛細管空隙中を流動する飽和流動水圧と凍結水量および耐久性指数に高い相関性が確認され，高飽水度条件での凍害劣化メカニズムの支配的要因が本実験により検証された．高 W/C の NonAE コンクリートであっても 10~110μm の疎水性化合物をセメント硬化体中に導入することで，凍結融解作用に対する抵抗性の著しい改善が可能となった．本研究により，寒冷地域での高水セメント比のコンクリートの品質確保だけではなく，付随する効果として，空気泡の品質および空気連行性，空気量の経時安定性等のフレッシュコンクリートの品質管理の簡便化が図れる．

第 6 章は総括であり，各章から得られた知見を整理して，本研究の成果を総括した．代表的な成果として，耐凍害性と収縮低減性能を兼備した新規収縮低減剤および NonAE コンクリートであっても耐凍害性を担保する凍害劣化抑制剤を作用機構の想定から設計し，開発に成功した．従来，エントレインドエアでしか耐凍害性の確保は行えなかったが，開発した凍害劣化抑制剤を 1L/m^3 混和することで，耐凍害性は確保できる．この結果は，世界初の技術であり，必ずしもエントレインドエアに頼らずとも，耐久性に優れたコンクリートの製造を可能とする．また，10～110μm の疎水性化合物で効果が得られた事から，このサイズの空隙内の水分凍結が凍害劣化に支配的な影響を及ぼしていることを示し，水中凍結水中融解の劣化メカニズムを先進させることができた．