

寒冷地の水路施設におけるコンクリートの
凍害劣化予測に関する研究

Prediction of Degradation Due to Frost Damage
for Concrete Waterway in Cold Region

2009年2月

林 大介

寒冷地の水路施設におけるコンクリートの
凍害劣化予測に関する研究

Prediction of Degradation Due to Frost Damage
for Concrete Waterway in Cold Region

2009年2月

早稲田大学大学院 理工学研究科

林 大介

目 次

第1章 序論	1
1.1 研究の背景	1
1.2 研究の目的	4
1.3 論文の構成	6
第2章 凍害劣化予測に関する研究の動向	9
2.1 凍害の機構	9
2.2 凍害劣化予測に関する既往の研究	13
第3章 水路施設の凍害調査	23
3.1 調査対象構造物	23
3.2 現地踏査およびコア試料の採取	26
3.3 コア試料の調査方法	35
3.4 コア試料の調査結果	38
3.5 水路施設の凍害調査のまとめ	51
第4章 凍害予測手法の構築	53
4.1 凍害のモデル化	53
4.2 凍害モデルによる用水路調査結果の再現性の検討	62
4.3 凍害予測手法の構築のまとめ	68
第5章 促進凍結融解試験による凍害モデルの検証	71
5.1 モデルの検証概要	71
5.2 使用材料およびコンクリート配合	72
5.3 試験方法	73
5.4 試験結果	74
5.5 モデルの検証	77

5. 6	凍害モデルの係数に関する考察	80
5. 7	促進凍結融解試験による凍害モデルの検証のまとめ	84
第6章	水路施設を対象とした事例解析	86
6. 1	水路施設の事例解析の方法	86
6. 2	水路施設の凍害進行予測	88
6. 3	水路施設のパラメータスタディ	91
6. 4	浸透性吸水防止材による耐凍害性向上効果の定量化に関する試算	99
6. 5	水路施設の事例解析のまとめ	113
第7章	結論	117
	あとがき	119
	謝辞	120
	研究業績	122

第1章 序論

1. 1 研究の背景

(1) コンクリート構造物の耐久性確保に向けた性能規定への移行

我が国では、この半世紀余りを中心として、着実な社会資本整備が行われてきた。今日では、橋梁やトンネル、ダム、用水路など、多くのコンクリート構造物が建設され、国民の生活および経済活動を支えるとともに、安全を確保する基盤としての重要な役割を担っている。

コンクリート構造物は、かつて永久構造物と呼ばれ、維持管理が不要なものであると考えられていた。しかし、1970年代に日本海沿岸部におけるPC橋梁の塩害による早期劣化が顕在化したことなどにより、環境作用の影響によって少なからず劣化するものであることが認識されることとなった。また、1990年代には、山陽新幹線などにおけるかぶりコンクリートの落下事故などが発生し、コンクリート構造物の耐久性に対する社会的な関心が集まった。こうした状況に至った原因として、コンクリート構造物の耐久性に対する過度の信頼や、高度成長期の莫大な需要に対応するための施工効率の追求、良質な骨材の不足などによる不適切材料の使用などの事情があったことは否めない。しかし、その根底には、設計時にコンクリート構造物の供用期間における性能を適切に評価するシステムが、ほとんど成熟していなかったという事実があったものと考えられる。すなわち、構造物を建設しようとする環境条件および想定される荷重条件において、如何なる材料および施工方法を適用すれば、将来、どの程度まで性能が低下するのかということを照査するシステムが存在していれば、こうした事態を回避できた可能性が高いものと考えられる。この命題に対し、コンクリートに携わる研究者および技術者は、日々、研究を続けており、コンクリートの耐久性に関する研究は、この20年間程度で急速な進展を遂げている。その象徴的な動向として、1999年に改訂された土木学会のコンクリート標準示方書〔施工編〕¹⁾以降、従来の仕様規定に代わる性能規定の考え方が適用されるに至っている。

従来の仕様規定による設計では、コンクリートの使用材料や配合、配筋条件などの構造細目の仕様を定め、安全係数を考慮することによって耐久性が確保されるものと

していた。それに対し、性能規定では、設計時において、設計耐用期間にわたる構造物の性能を評価し、それが要求性能を満足することを確認するものとしている。換言すれば、使用材料や施工方法を限定せずに設計を行なうことが可能であり、従来の仕様規定に比べて自由度の高い合理的な体系となっている。その一方で、構造物の長期間にわたる性能、すなわち、構造物が受ける劣化作用に対する抵抗性や、その抵抗性に対して使用材料および施工方法がどのように影響するのかなどを定量的に評価することが求められることとなる。本来、構造物が供用される条件は多種多様であり、長期間にわたる性能は所要の供用期間を経過しなければ確定されないものである。構造物の長期間にわたる性能を定量化しようとする場合、類似の環境および荷重条件において、類似の材料および施工方法を適用して建設された過去の構造物の状況から類推するか、あるいは、暴露試験や促進試験によって検証された劣化モデルを用いて予測することとなる。過去の構造物より類推する方法の場合、土木構造物が唯一無二であることを考えれば、条件に適合する過去の構造物を探すことは困難であり、幅広く適用できる方法とは言えない。一方、劣化モデルによって予測する方法の場合、幅広い環境条件や多種類の材料、各種の施工方法などに対応し、かつ精度の高いモデルに成熟させるためには多くのデータや知見が必要となり、一朝一夕に成し遂げられるものではない。塩害および中性化に関しては、膨大な実構造物の情報や研究成果が集約されつつあり^{2), 3), 4), 5)}、現行の土木学会のコンクリート標準示方書〔設計編〕⁶⁾においても、予測精度の課題は残るものの、実用的な予測方法を取り入れた設計体系が示されている。こうした取組みにより、コンクリート構造物の耐久性をより確実かつ合理的に確保することが可能なシステムが整備されつつある状況にあると言える。

(2) 凍害に対する照査の現状

コンクリート構造物における代表的な劣化要因の一つである凍害については、1940年代から研究が行われ⁷⁾、これまでに様々な知見が得られているが、劣化の実態が十分に把握されているとは言い難く、寒冷地では、ひび割れやスケーリングなどの損傷が後を絶たない。従来、寒冷地に供用される構造物の耐久性は、促進凍結融解試験によって凍結融解抵抗性が確認されたコンクリートを用いることで確保できるものとされてきた。実際、この方法により、合理性や経済性に欠ける面があるにせよ、多くの構造物の耐久性が確保されてきたことは事実であり、土木技術者の経験に基づいた工

学的な判断が一定の成果を挙げたことは評価すべきことと考えられる。

しかし、促進凍結融解試験は、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り、構造物の設計耐用期間にわたる凍結融解作用に対する耐久性を定量的に評価できるものではない。現行の土木学会のコンクリート標準示方書〔設計編〕⁶⁾においても、凍害については、性能照査の体系に基づいた整理がされているが、促進凍結融解試験の相対動弾性係数を指標として照査する方法が示されているに過ぎず、実質的には仕様規定による方法が採用されているものと言える。すなわち、現行の照査方法は、設計時において設計耐用期間にわたる性能を適切に評価することによって構造物の耐久性を確保しようという思想を具現化しているものとは言い難い。よって、今後は、性能規定による設計、施工および維持管理の方法を成熟させ、より確実かつ合理的に構造物の耐久性を確保するシステムを構築していくことが求められるものと考えられる。そのために、まず、凍害による劣化の実態を把握し、さらには、凍害の過程を定量的に予測することが可能な手法を構築していくことが必要とされている。

1. 2 研究の目的

(1) 凍害の実態に対する考察

凍害環境に供用される実構造物を広い範囲で調査した事例として、例えば、北海道における約 253 箇所 of 構造物を対象に、劣化の程度や範囲、形態、環境条件、コンクリートの外観などを定性的に評価し、劣化を受けやすい部位や環境条件などの傾向を整理した研究⁸⁾や、供用期間が 50 年以上に及ぶ 9 発電所の 164 箇所について、グレーディングを行って環境条件との関係を整理した研究⁹⁾、東北地方における主として供用期間が 8 年以下のプレキャスト製用水路の劣化の実態を調査し、コンクリートの品質の面から考察を加えた研究¹⁰⁾などがある。あるいは、供用期間が 10 年以上となる防波堤のスケーリングの状況についてコンクリートの詳細調査を含めた検討を行った研究¹¹⁾などもあり、その他にも、いくつかの調査事例¹²⁾が報告されている。

こうした研究を通じ、凍害に影響を及ぼす環境条件や部材形状などの傾向が明らかとなりつつあるものの、未だ事例数としては少なく、凍害の実態が十分に把握され、定量化が図られているとは言えないのが現状である。

こうした状況を鑑み、本研究では、北海道において約 40 年間供用された水路施設を対象とした詳細調査を行い、劣化に対して特に影響を及ぼす要因を明らかとすることを第一の目的とした。

(2) 凍害予測手法の提案

既往の研究などを基に、コンクリートの凍害の発生と防止に関する項目を整理した例として、図 1.2.1 がある¹³⁾。同図に示すように、コンクリートの凍害の進行には多岐にわたる要因が影響を及ぼすため、全てを考慮した劣化予測手法を導くのは難しいのが現状である（凍害劣化予測に関する研究の現状については次章に示す）。

しかしながら、凍害の劣化予測に対するニーズを踏まえると、精緻なモデル化の必要性は高いものの、実構造物の調査によって劣化の実態を把握し、調査データに基づいた合理的な予測手法の構築を検討する必要があるものと考えられる。

そこで、本研究では、第一の目的として掲げた水路施設の調査結果の考察に基づき、水路施設の凍害を再現することが可能な予測手法を提案することを第二の目的とした。さらには、構築された予測手法を用い、事例解析によって水路施設の耐凍害性向上に

関する知見を示すことを第三の目的とした。

ここで、コンクリートの凍害は、硬化コンクリートにおける凍害と、流動状態からある程度硬化した段階までのコンクリートにおける初期凍害の2種類に大別されるが¹⁴⁾、本研究では、硬化コンクリートにおける凍害を対象とする。

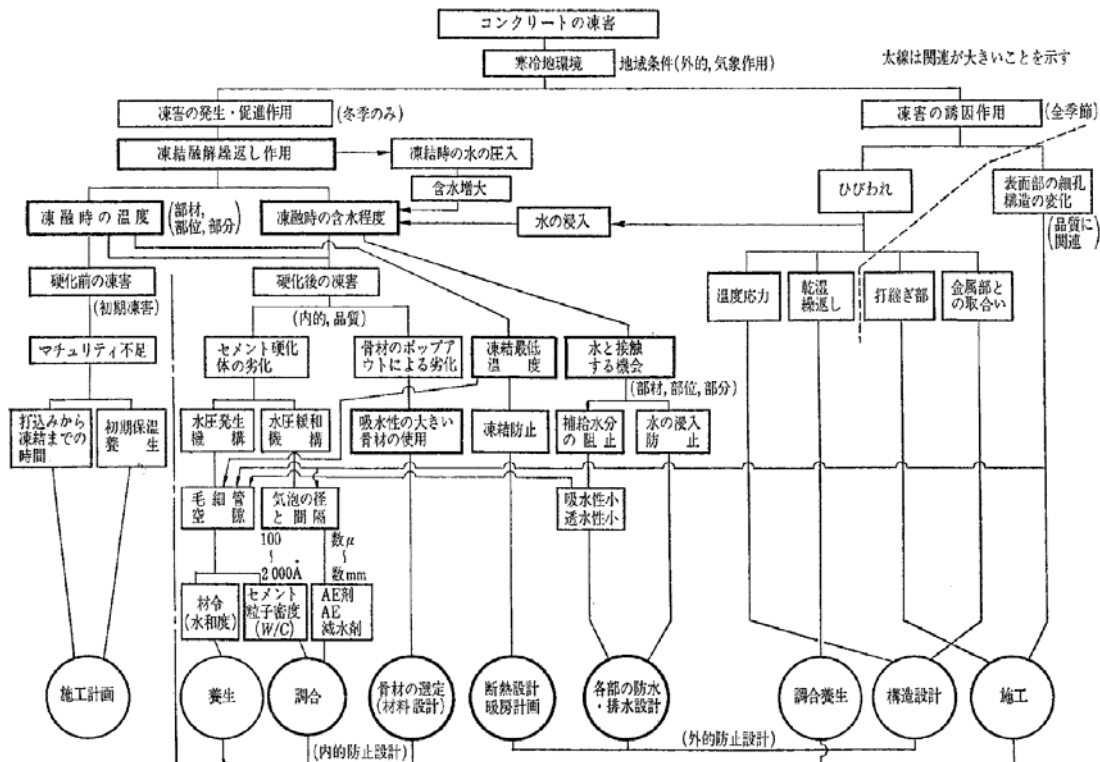


図 1.2.1 凍害の発生と防止に関する事項¹³⁾

1. 3 論文の構成

本論文は、以下に示す7章より構成されている。

「第1章 序論」では、研究の背景、目的および論文の構成を示している。背景として、コンクリート構造物の耐久性を確保するために仕様規定から性能規定への移行が図られており、現状では凍害に対する照査方法が確立されていないこと、また、本研究では、北海道に約40年間供用された水路施設の調査を通じた凍害の実態把握および調査データに基づいた合理的な凍害予測手法の提案を目的としていることを示した。

「第2章 凍害劣化予測に関する研究の現状」では、既往の研究で提案されている凍害のメカニズムおよび劣化予測の現状を示している。これまでの劣化モデル構築の試みを紹介し、凍害の進行には多岐にわたる要因が影響を及ぼすことから、全てを考慮した劣化予測手法は提案されていないのが現状であることを示した。

「第3章 水路施設の凍害調査」では、北海道の空知地区を北南方向に流れる供用期間34年から41年の農業用水路の凍害調査結果の考察を示している。凍害による劣化は部分的に生じる傾向があり、劣化の程度を動弾性係数によって評価できることおよび劣化の発生にはコンクリートの気泡組織が影響を及ぼすことを示した。

「第4章 凍害予測手法の構築」では、農業用水路の凍害を再現することが可能な予測手法の構築の過程を示している。凍害環境におけるコンクリート構造物の相対動弾性係数の経年変化に対し、硬化コンクリートの空気量および気泡間隔係数が及ぼす影響を評価することが可能な凍害モデルの構築の過程について示した。

「第5章 促進凍結融解試験による凍害モデルの検証」では、構築された凍害モデルの妥当性について検証した結果を示している。検証にあたっては、まず、最低温度を -18°C とする促進凍結融解試験を実施し、その結果から凍害モデルの係数を推定して予測式を得ている。次に、得られた予測式により、実環境を想定した最低温度を -10°C とする促進凍結融解試験における相対動弾性係数の経時変化を再現することが可能で

あるかを確認した。その結果、凍害モデルが妥当な手法であることを示した。

「第6章 水路施設を対象とした事例解析」では、水路施設の凍害進行予測、コンクリートの気泡組織に関するパラメータスタディおよび暴露試験に基づいた浸透性吸水防止材の耐凍害性向上に関する試算の結果を示している。調査対象とした水セメント比が50%の水路施設を事例とした場合、硬化コンクリートの空気量を3.0%以上とし、気泡間隔係数を250 μm 以下とすれば、50年間にわたって相対動弾性係数を60%以上に保持できることや、硬化コンクリートの空気量および気泡間隔係数がそれぞれ1.5%および300 μm となった場合でも、浸透性吸水防止材を塗布することにより、50年間にわたって相対動弾性係数を60%以上に保持できることなどを示した。

「第7章 結論」では、本研究の結論を示している。本研究で提案した凍害モデルによって、対象構造物の設計耐用期間および要求される相対動弾性係数に応じて、コンクリートに要求される空気量および気泡間隔係数を提示することが可能であることなどを総括した。

第1章の参考文献

- 1) 土木学会：【平成11年版】コンクリート標準示方書〔施工編〕，1999.1
- 2) 土木学会：鉄筋腐食・防食および補修に関する研究の現状と今後の動向(その2)，コンクリート技術シリーズ40，2000.12
- 3) 土木学会：鉄筋腐食・防食および補修に関する研究の現状と今後の動向，コンクリート技術シリーズ26，1997.12
- 4) 日本コンクリート工学協会：コンクリートの長期耐久性に関する研究委員会報告書，2000.5
- 5) 日本コンクリート工学協会：材料設計とコンクリート構造物の性能に関するシンポジウム，委員会報告書，1999.5
- 6) 土木学会：2007年制定コンクリート標準示方書〔設計編〕，2007.3
- 7) 日本コンクリート工学協会：セメント系材料・骨材研究委員会報告書，2005.9
- 8) 山下英俊，堺孝司，熊谷政行，喜多達夫：北海道におけるコンクリート構造物の複合劣化に関する研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.16，No.1，pp.543-548，1994.6
- 9) 成田健，小山慎一郎，三橋博三：水力発電設備の凍害被害状況について，コンクリートの凍結融解抵抗性の評価方法に関するシンポジウム，JCI-C72，pp.1-6，2006.12
- 10) 高橋和雄：コンクリート製品の凍害，岩手大学農学部農業造構学講座，1990.3
- 11) 遠藤裕丈，田口史雄，嶋田久俊，渥美洋一，窪内篤，星俊彦，太田利隆，佐伯昇：10数年経過した寒冷地のコンクリート防波堤での表面剥離調査，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，pp.215-222，2005.6
- 12) 日本コンクリート工学協会：コンクリート構造物の劣化および補修事例集，1996.10
- 13) 長谷川寿夫，藤原忠司：凍害，コンクリート構造物の耐久性シリーズ，1988.2
- 14) 洪悦郎，鎌田英治：コンクリートの凍害と初期凍害—そのメカニズムについて—，コンクリート工学，Vol.16，No.5，pp.1-11，1978.5

第2章 凍害劣化予測に関する研究の動向

2. 1 凍害の機構

凍害に関する研究は1940年代より続けられており¹⁾、その発生機構について、ある程度解明されていると言える。これまでに、洪・鎌田²⁾や鎌田³⁾により、凍害の機構に関する既往の知見が整理されている。また、いくつかの学協会の研究委員会^{4), 5), 6), 7)}においても、凍害の機構に関する研究動向の報告がされている。

コンクリートの凍害の機構については、1945年に発表された Powers⁸⁾の理論が基本となっている。これは、水の凍結による体積膨張が未凍結の水を移動させ、この際に生じる圧力によって凍害が発生すると考えるものであり、水圧説 (Hydraulic Pressure Theory) として知られている。この考えによれば、水が氷へと相変化する際に約9%の体積増加があるので、空隙の91%まで水で満たされた場合に劣化することとなるが、実際には、より低い飽水度でも劣化が生じる。この劣化の過程について、以下のような機構による説明がされた。

- ① 最初に、コンクリートの表面に接する水が凍結し、表面が氷でシールされた状態となる。
- ② 次に、表面に近い毛細管空隙中の水が凍結し、相変化に伴う体積膨張に見合う未凍結の水が、飽水度の低い未凍結の内部へと移動する。
- ③ この水の移動は微細な空隙内で生じるため、移動時に粘性抵抗による水圧勾配を形成する。
- ④ 形成された水圧が、コンクリート強度などで定まる限界値以下であれば、凍害は生じない。しかし、通常の凍結速度の範囲において、この水移動は、凍害破壊を引き起こすのに十分な圧力を形成し得る。

この機構によれば、コンクリート組織の透水性が低く、凍結が速く、飽水の限界を超えた部分の水量が多いほど、水圧が高くなり、凍害による劣化も激しいこととなる。この最初の水圧説は、その後、ACI 201 コンクリートの耐久性委員会からの要望に対する Powers の回答⁹⁾として、部分的に修正されている。それによれば、Powers と Helmuth の硬化セメントペーストの実験において、凍結過程で供試体温度を一定に持

続した場合に、気泡を含む供試体は収縮し、含まない供試体は膨張するという挙動が確認され、この現象を説明するために、毛細管内部で氷晶が生成された後、より小さな未凍結の細孔から水分を吸収するという機構を加えるようになった。拡散のエネルギーは、熱力学的に平衡状態にあった水が氷へと変化したため、あるいは氷晶形成後の水のアルカリ濃度が増加したためと説明されている。Cordon¹⁰⁾の解説によれば、ここで氷晶に拡散する水はゲル孔中のゲル水であるとしている。

しかし、鎌田・洪¹¹⁾は、氷晶面とゲル水の平衡について、ゲル空隙の大きさを考慮して検討した結果、径を20Å程度と想定していた Powers のゲル空隙はもとより、75Å程度の空隙に含まれる水ですら、-20°C程度の温度範囲において平面上に生成された氷晶以上に安定であったとして、この見解に疑問を呈した。その後、千歩ら¹²⁾の実験において、氷晶形成後の冷却の過程で温度を一定とした場合、供試体は収縮や膨張の挙動を示すのに対し、その後、過冷却水が存在しなくなると言われる-50°C以下まで冷却して再び同じ温度に保持した場合、これらの挙動が認められないことが確認された。ここで、過冷却とは、水を冷却した際に、本来の凍結温度より低い温度においても凍結せず、何らかの衝撃や異物の混入で突然凍結し始める現象である。上記の試験において、ゲル水が水として存在するにも係らず、過冷却水が存在しない条件では収縮および膨張の挙動が認められないことから、拡散に関与する水は毛細空隙中の過冷却水であるとの考えを示した。

こうした水圧説は、コンクリート中に分散した気泡の凍害に対する役割を、以下のように説明付ける。多孔質材料中において、水は微細な連続性のある空隙から充てんされ、球状の独立空隙である気泡には空気が存在する。空気は圧力による体積変化が容易で、水の凍結に伴う水流としての体積増加を吸収する。このため、気泡は移動した水流の逃げ場となり、凍結部分と気泡との間隔、すなわち水の移動距離が水圧の大きさを支配する。コンクリート中の気泡量（空気量）が同一であれば、個々の気泡が小さいほど、気泡間の距離が短く、水の移動距離も短い。これが、コンクリートの凍害で空気量よりも気泡間隔が重要である理由とされ、エントレインドエアがエントラップトエアよりも耐凍害性向上に効果がある理由であるとされる。

以上のように、凍害の機構については、コンクリート中の水の凍結に伴う水圧および過冷却水の相変化に伴う収縮・膨張挙動によるところが大きいものと理解されている。ここで、コンクリート中の水の凍結については、融点降下による影響を受ける。

融点降下とは、水が加圧状態にある場合や塩類が入っている場合に凍結温度および融解温度が低下する現象である。硬化コンクリート中の水分は、主として毛細管空隙の寸法効果により、融点降下を示すものと考えられており、これについて、いくつかの報告がされている。Helmuth¹³⁾は、細孔半径と凍結温度の関係に Powers の吸着層を考慮して融点降下と毛細管径の関係を考察した。また、樋口¹⁴⁾は、Helmuth の用いた式の中の、液-固体の界面張力を液体の表面張力とし、固体密度を液体密度とした関係式を提案した。この樋口の式によれば、Helmuth の式の 7 倍の径で水の相変化が生じることとなるが、鎌田・洪¹¹⁾により、樋口式の方が凍害の現象に近いことが確認されている。その後も、Fagerlund¹⁵⁾ や Blachere・Young¹⁶⁾ などにより、細孔半径と内部の水の融点降下の関係が提案されているが、一致した見解は認められていない。様々な研究で提案されている融点降下の理論値について、洪・鎌田²⁾は、図-2.1.1 のように整理して示している。凍害の機構として特に考慮しておくべきことは、コンクリート中の水は、温度低下に伴って粗大側の径の毛管から順次凍結していくということである。すなわち、凍結の際の最低温度によってコンクリート中で凍結する水量に違いが生じ、温度が低いほど、多量の水が凍結するために、凍害による劣化が著しくなる。

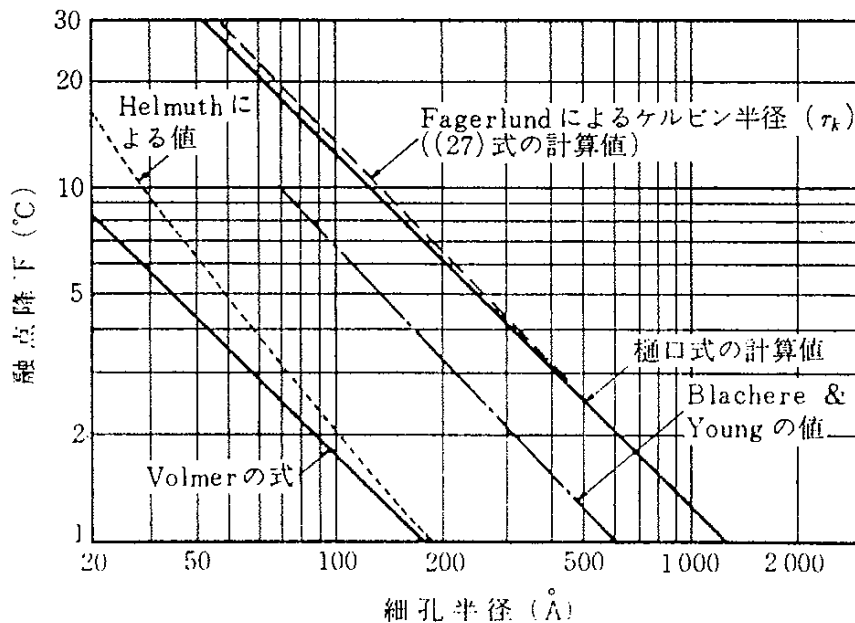


図-2.1.1 融点降下に関する理論値の比較²⁾

最近では、桂ら¹⁷⁾が、過冷却水の影響について、毛細管空隙中の凍結挙動に着目した検討を行い、過冷却水が凍結する際の急速な氷晶の成長によって急激な体積増が生じ、不凍水が大きな流速で移動する際に生じる不凍水圧により組織が破壊されるとした機構を提案している。これは、Powers⁸⁾の水圧説および鎌田¹⁸⁾による融点降下を考慮した凍害理論に基礎を置き、これまでに明らかにされていなかった組織破壊を起こす水圧の発生を、過冷却水が凍結する際の氷晶の急激な成長と、それに伴う不凍水流により説明したものである。

2. 2 凍害劣化予測に関する既往の研究

既往の研究において、実構造物への適用性が高い凍害劣化予測手法を示した例は少ない。

桂ら¹⁹⁾は、凍結融解作用時の最大変形量の約50%が融解後に残留する²⁰⁾という現象に着目し、長さ変化挙動が凍害の内部劣化の形態を示すものと位置付け、過冷却水の凍結による急速な不凍水の移動、圧力発生、組織破壊および変形をモデル化している。モデル化の手順は、①過冷却水の凍結に起因する不凍水の流速のモデル化、②水銀圧入法による細孔構造測定結果から透水性を表したLupingモデルに、毛細管空隙水の凍結による影響を考慮した水分移動のモデル化、③不凍水圧の発生と変形量の算定となっており、凍結温度、細孔構造、気泡組織および引張強度から凍結時の長さ変化挙動を予測することによって、凍結融解抵抗性の定量化を試みている。さらに、長さ変化と相対動弾性係数の関係を2直線の近似式で示し、耐久性指数の予測値と実験値の対応について検証している。その結果、耐久性指数が60以下の範囲では予測値が大きくなる傾向が認められるものの、予測値と実験値は水セメント比に係らず、ほぼ対応した傾向が得られている。この研究では、凍害の現象を説明する基礎的な機構をモデル化して示しているが、凍結融解抵抗性に影響を及ぼすとされる骨材品質²¹⁾や外部から供給される水分の影響²²⁾、凍結融解繰返しの影響が考慮されておらず、実構造物の予測が可能な段階には至っていない。

山下²³⁾は、実構造物への適用が可能な予測手法として、コンクリートの圧縮強度、気泡間隔係数、全細孔量および凍結水量を組み合わせ、式(2.2.1)に示す耐凍害指標を提案し、図2.2.1に示すように、耐凍害指標と、凍結融解回数および相対動弾性係数の関係を示した。

$$\beta = (f_c/300)^{0.019} \times (L/0.5)^{-0.903} \times (V_f/V_0)^{-0.107} \quad (2.2.1)$$

ここで、 β ：耐凍害性指標

f_c ：コンクリートの圧縮強度 (kgf/cm²)

L : 気泡間隔係数 (mm)

V_0 : 全細孔量 (cc/g)

V_f : 凍結水量 (cc/g)

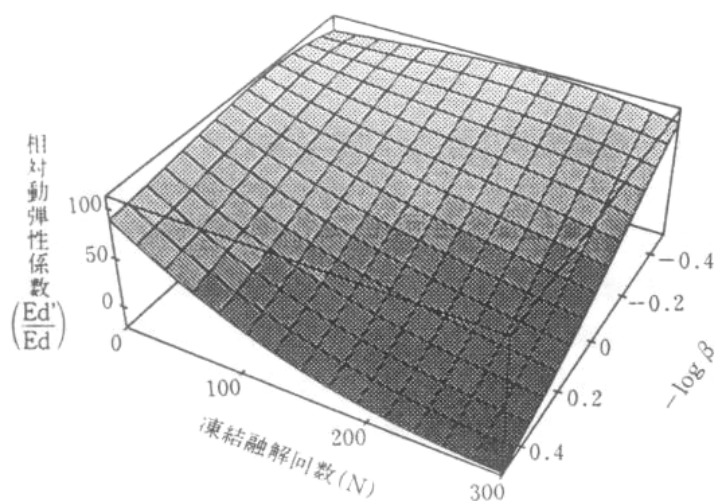


図 2.2.1 耐凍害指標と、凍結融解回数および相対動弾性係数の関係²³⁾

耐凍害指標については、コンクリート材料の物理的および力学的性質と、環境条件の関係より表されるものと定義しており、耐凍害指標に最も影響を及ぼすものは、気泡間隔係数であることを報告している。

また、コンクリートの凍害を、力学的疲労問題として捉えることを提案し、式(2.2.2)に示すように線形劣化累積損傷理論による劣化予測の方法を示している。この考え方は、凍害による劣化の過程を巨視的に捉えたものと言え、実構造物における凍害が凍結融解作用の繰返しを受けて発生している実態を再現する上で、適用性の高い考え方の一つと考えられる。

$$D_m = \sum_{i=1}^m D_i = \sum_{i=1}^m \frac{n_i}{N_i} \quad (2.2.2)$$

ここで、 D_m : 累積損傷度

D_i : i 番目の凍結融解における損傷度

n_i : $-\log\beta_i$ における凍結融解回数

N_i : i 番目の平均寿命

同式によれば，コンクリート構造物が受ける凍結融解の最低温度と回数を基に，コンクリートの損傷度を推定することが可能となる。

その一方で，このモデルには，凍害に影響を及ぼすとされる飽水度²⁴⁾、²⁵⁾ や骨材品質²¹⁾ などが考慮されていないという課題がある。

石井ら²⁶⁾ は，促進凍結融解試験で相対動弾性係数が 60% を下回る凍結融解サイクル数（破壊サイクル数と定義）と凍結水量の間に相関があることを確認し，凍結水量はセメント水比および最低温度と相関があるものとして，図 2.2.2 に示すように，任意のセメント水比および最低温度における凍結融解作用の影響を評価する方法を示した。

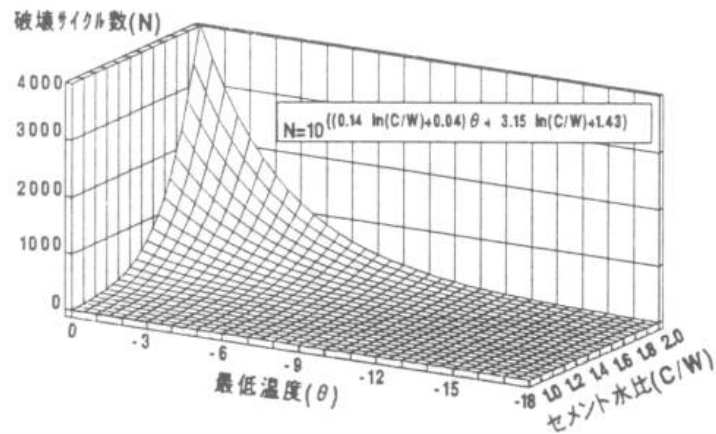


図 2.2.2 セメント水比および最低温度と破壊サイクル数²⁶⁾

また，同図を基に，式 (2.2.3) によって定義される重み係数を導入し，式 (2.2.4) によって表される基準化凍結融解回数を定義している。

$$\phi = \frac{Nd([C/W]_{st}, [\theta]_{st})}{Nd([C/W]_t, [\theta]_t)} \quad (2.2.3)$$

$$Ni' = \phi \cdot Ni \quad (2.2.4)$$

ここで、 ϕ ：重み係数

$Nd([C/W]_{st}, [\theta]_{st})$ ：基準とするコンクリートのセメント水比および最低温度の破壊サイクル数

$Nd([C/W]_t, [\theta]_t)$ ：目的とするコンクリートのセメント水比および最低温度の破壊サイクル数

N_i' ：基準化凍結融解サイクル数

N_i ：凍結融解サイクル数

この基準化凍結融解サイクル数を用いることにより、水セメント比および凍結融解における最低温度の影響を考慮した劣化予測を行うことが可能になる。例えば、水セメント比が 50% のコンクリートで、凍結融解の最低温度が -5°C の場合を基準とした基準化凍結融解サイクルにより、凍結融解試験の相対動弾性係数を回帰すると式 (2.2.5) のような凍害モデルを得ることができる。

$$Ed = 100 \exp(-1.84 \times 10^{-4} \times Ni'^{3.19}) \quad (2.2.5)$$

ここで、 Ed ：相対動弾性係数 (%)

N_i' ：基準化凍結融解サイクル

さらに、自然環境下における不規則な最低温度の凍結融解繰返しの影響を評価する方法として、図 2.2.3 のような最低温度ごとの凍結融解回数のデータより、式 (2.2.6) によって表される基準化凍結融解サイクルの累計値を用いる方法を提案している。

この方法も、前述の山下²³⁾と同様、凍害による劣化の過程を巨視的に捉えたものと言え、実環境と促進凍結融解試験結果を対応付けることができるものである。同様の考え方として、浜ら²⁷⁾も、ある地域の気象条件下で、コンクリートが 1 年間に受ける凍結融解作用を、ASTM C-666A 法の標準条件の最低温度である -18°C を基準とし

た ASTM 相当サイクル数として表す実験式を導出している。

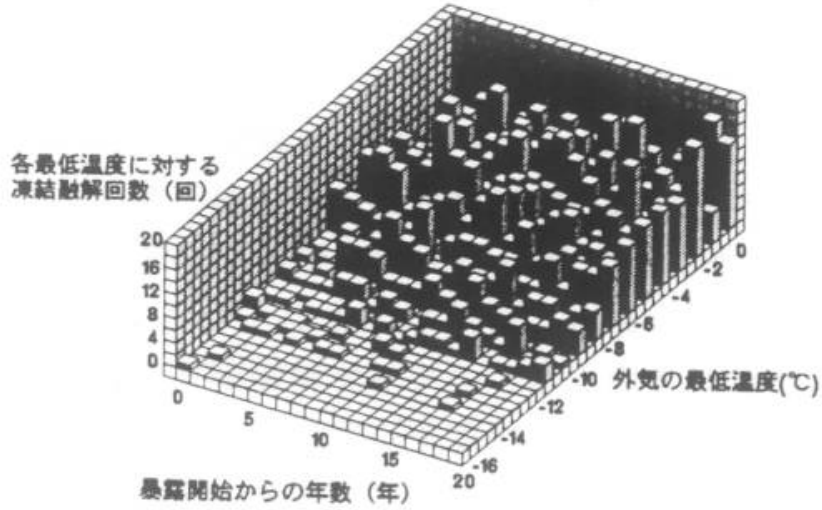


図 2.2.3 凍結融解回数に関するデータ ²⁶⁾

$$N' = \sum_{i=1}^n \{N'i\} = [Nij]\{\phi_j\} \quad (2.2.6)$$

$$\{N'i\} = \begin{Bmatrix} N'_{(1)} \\ N'_{(2)} \\ \cdot \\ \cdot \\ N'_{(n)} \end{Bmatrix}, \quad \{\phi_j\} = \begin{Bmatrix} \phi_{(0)} \\ \phi_{(-0.5)} \\ \cdot \\ \cdot \\ \phi_{(m)} \end{Bmatrix}$$

$$[Nij] = \begin{pmatrix} N_{(1,0)} & N_{(1,-0.5)} & \cdot & \cdot & N_{(1,m)} \\ N_{(2,0)} & \cdot & \cdot & \cdot & N_{(2,m)} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & N_{(i,j)} & \cdot \\ N_{(n,0)} & N_{(n,-0.5)} & \cdot & \cdot & N_{(n,m)} \end{pmatrix}$$

ここで， N' ：基準化凍結融解サイクルの累計値

$\{N_i\}$: 材齢 i における基準化凍結融解サイクル

$[N_{ij}]$: 材齢 i における最低温度 j に対する凍結融解回数

$\{\phi_j\}$: ある水セメント比, 最低温度 j_0 を基準としたときの破壊サイクルに及ぼす最低温度 j の重み

n : 評価材齢

m : 現地の最低温度の最小値

促進凍結融解試験結果を活用することの利点として、コンクリートの細孔構造や気泡組織、骨材品質、強度などの材料特性を包括的に反映させた評価を行うことができるということが挙げられる。しかし、このモデルでは、構築の根拠となる暴露試験が湿潤条件であることから、モデルの適用が可能な環境条件が常時湿潤の状態に限定される。

千歩ら²⁸⁾は、凍結融解作用によって劣化する限界の飽水度と吸水性状が、乾湿繰返しや屋外暴露によって変化することを見出し、これらの指標の比較から耐凍害性を評価する新しい限界飽水度法を提案した。この研究により、実用的な凍害劣化予測手法を提案できる可能性を示しているが、限界飽水度を実験で求めることには手間と時間が掛かることから、これを予測する方法が必要であることを課題の一つとして挙げている。

他にも、劣化予測手法を提案した研究ではないが、遠藤ら²⁹⁾は、凍害によるスケーリングの現象に着目し、コンクリートのスケーリングに対する抵抗性が、表面の強度と透水性との釣合いによって決定されることを示し、プルオフ強度と透水係数を基にスケーリングに対する抵抗性を評価する重回帰式を提案した。

また、加藤ら³⁰⁾は、海水と凍結融解の複合劣化によるスケーリングの発生に着眼し、海水中では、最低温度が低いほど、また氷点以下に保持される時間が長くなるほど、セメントペースト中の凍結水量が多くなり、微細ひび割れが生じてスケーリングが発生しやすいことを示した。

このように、コンクリートの物性値の変化に着眼して凍害の進行を予測する方法と

して、いくつかのモデルが提案されているが、実環境における複雑な要因を全て考慮して、現象を再現できるモデルを導くことは難しいのが現状である。そのような中で、山下のモデルや石井らのモデルは、工学的なアプローチにより、限定された条件において、実現現象を再現できる可能性を示している。本研究においても、次章に示す実構造物の調査によって凍害の実態を把握し、工学的な考察に基づいて、実現現象を再現できる凍害モデルを構築することを目指すこととする。

第2章の参考文献

- 1) 日本コンクリート工学協会：セメント系材料・骨材研究委員会報告書，2005.9
- 2) 洪悦郎，鎌田英治：コンクリートの凍害と初期凍害－そのメカニズムについて－，コンクリート工学，Vol.16，No.5，pp.1-11，1978.5
- 3) 鎌田英治：セメント硬化体の微細構造とコンクリートの凍害，コンクリート工学，Vol.19，No.11，pp.36-42，1981.11
- 4) 日本コンクリート工学協会：材料設計とコンクリート構造物の性能に関するシンポジウム，委員会報告書，1999.5
- 5) 融雪剤によるコンクリート構造物の劣化研究委員会，報告書・論文集，1999.11
- 6) 日本コンクリート工学協会：コンクリートの長期耐久性に関する研究委員会報告書，2000.5
- 7) 日本コンクリート工学協会：複合劣化コンクリート構造物の評価と維持管理計画研究委員会，2001.5
- 8) T. C. Powers : A Working Hypothesis for Further Studies of Frost Resistance of Concrete, Proc, of ACI, Vol.41, 1945
- 9) T. C. Powers : Freezing Effect in Concrete, ACI Committee 202, Durability of Concrete in Service, SP 47-1, pp.1-11, 1975
- 10) W. A. Cordon : Freezing and Thawing of Concrete-Mechanisms and Control, ACI Monograph No.3, 1966
- 11) 鎌田英治，洪悦郎：人工軽量骨材コンクリートの凍害機構に関する考察，セメント技術年報，XXV，pp.285-290，1971
- 12) 千歩修，鎌田英治，洪悦郎：硬化セメントペーストの凍結水量と凍結挙動，建築学会大会講演梗概集，1981
- 13) R. A. Helmuth : Capillary Size Restrictions on Ice Formation in Hardened Portland Cement Pastes, Forth International Symposium on the Chemistry of Cement, Washington, pp.855-869, 1960
- 14) 樋口泉：多孔体の毛細管に分散した物質の性質と毛管構造，表面，Vol.6，No.3，pp.168-176，1968
- 15) G. Fagerlund : Non-Freezable Water Contents of Porous Building materials, Report

42, Lund Sweden, 1974

- 16) J. R. Blachere and J. E. Young: The Freezing Point of Water in Porous Glass, Journal of the American Ceramic Society, Vol.55, No.6, pp.306-308, 1972
- 17) 桂修, 吉野利幸, 鎌田英治: 過冷却水の凍結を考慮したセメント硬化体の凍害機構, コンクリート工学論文集, Vol.10, No.2, pp.51-63, 1999
- 18) 鎌田英治: コンクリートの凍害と細孔構造, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.10, No.1, pp.51-60, 1988
- 19) 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, Vol.11, No.2, pp.49-62, 2000
- 20) 鎌田英治, 名和豊春, 藤井弘司, 洪悦郎: 硬化セメントペーストの凍結水量と凍結挙動の測定, セメント技術年報, Vol.33, pp.298-301, 1979
- 21) 例えば, 宮川秀和, 古谷賢二, 下村祥: 結晶粒径の異なる石灰石を用いたコンクリートの物性, セメント技術年報, No.39, pp.73-76, 1985
- 22) 例えば, 今井益隆: コンクリート構造物の凍害調査, コンクリート工学, Vol.14, No.11, pp.16-22, 1976.11
- 23) 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, 学位論文, 1999.3
- 24) A. M. Neville : Properties of Concrete, Pitman(Canada), 1963
- 25) 永倉正: コンクリートの配合諸条件が凍結融解抵抗性に及ぼす影響に関する基礎的研究, 土木学会論文集, No.98, pp.15-25, 1963.10
- 26) 石井清, 江川顕一郎, 堤知明, 野口博章: 凍結融解作用を受けるコンクリートの劣化予測に関する研究, 土木学会論文集, No.564/V -35, pp.221-232, 1997.5
- 27) 浜幸雄, 松村光太郎, 田畑雅幸, 富坂崇, 鎌田英治: 気象因子を考慮したコンクリートの凍害予測, 日本建築学会構造系論文集, No.523, pp.9-16, 1999.9
- 28) 千歩修, 満渕えり, 平井雄太郎, 長谷川拓哉: 限界飽水度法を用いたコンクリートの凍結融解抵抗性の評価, コンクリートの凍結融解抵抗性の評価方法に関するシンポジウム論文集, pp.31-36, 2006.12
- 29) 遠藤裕丈, 田口史雄, 嶋田久俊: スケーリング抵抗性の予測・判定手法の一提案, コンクリートの凍結融解抵抗性の評価方法に関するシンポジウム論文集, pp.23-30, 2006.12

- 30) 加藤利奈, 鮎田耕一, 猪狩平三郎: 海水中で凍結融解作用を受けたモルタルにおける微細ひび割れの発生とスケーリングの関係, セメントコンクリート論文集, No.60, pp.361-365, 2007.2

第3章 水路施設の凍害調査

3.1 調査対象構造物

本研究において調査対象とした構造物は、北海道の空知地区を北南方向に流れる供用期間 34 年から 41 年の農業用水路である。この流域の岩見沢市の 1999 年から 2003 年までの凍結融解回数を、降水量、日射時間および降雪と併せて表 3.1.1 に示す¹⁾。同表より、岩見沢市では、最低気温が 0℃以下となる凍結融解回数の 5 年間の平均値は 71.4 回であった。そのうち、最低気温が-5℃以下および-10℃以下となる凍結融解回数の 5 年間の平均値は、それぞれ 29.0 回および 10.6 回であった。長谷川²⁾は、温度要因と湿潤要因の影響を数値化して凍害危険度の分布図を示しており、それによれば、当該地域は、凍害の予想程度が大きい地域に区分される。

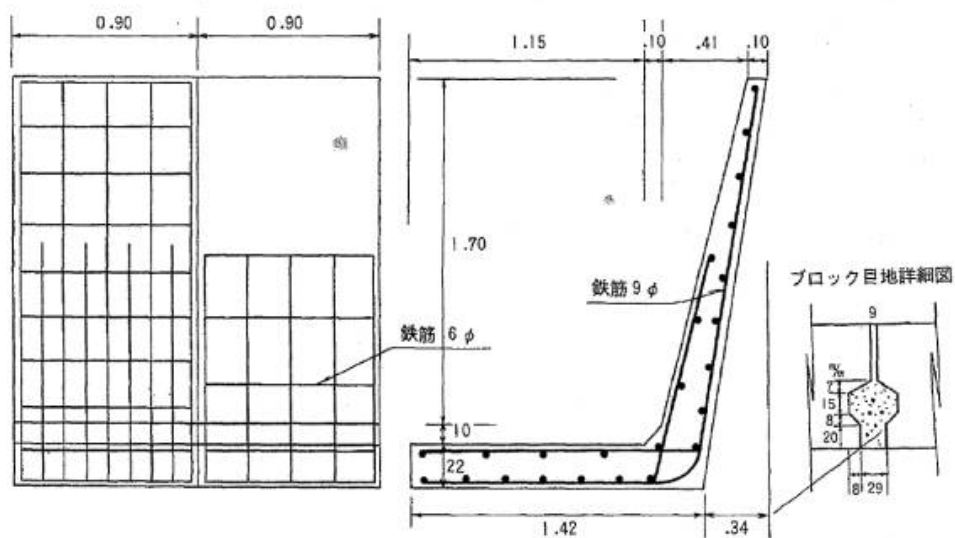
表 3.1.1 岩見沢市の凍結融解回数¹⁾

西暦	最低気温ごとの凍結融解回数			降水量の 合計(mm)	日照時間 (h)	降雪の合 計(cm)
	0℃以下	-5℃以下	-10℃以下			
1999	71	36	15	1096.0	1715.0	985
2000	68	33	10	1575.5	1542.8	785
2001	60	15	9	1421.5	1641.3	883
2002	82	26	11	1187.0	1616.6	755
2003	76	35	8	986.0	1796.9	875
平均	71.4	29.0	10.6	1253.2	1662.5	856.6

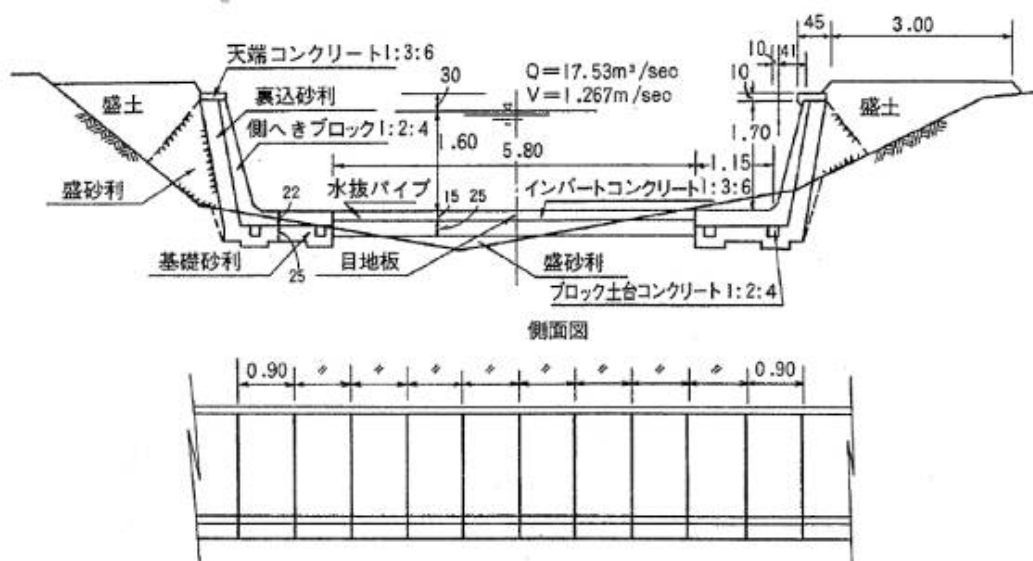
用水路の構築には、L 型ブロックと呼ばれる現場施工のプレキャスト部材が使用されている³⁾。L 型ブロックは、工事費の低減や年間の事業量の増大を目的として、積雪寒冷地における施工最適期間の 5 月から 8 月にかけて現場で製造され、9 月から 10 月に据え付けられたものである。ブロックの製造では、水路の断面にあたる面（L 型

の面) が上下の面となるようにメタルフォームの型枠が組まれ、コンクリートの打込みが行われている。

L型ブロックの詳細図を図 3.1.1 に示す。また、コンクリート配合を表 3.1.2 に示す。同表に示すように、用水路に用いられたコンクリートは、AE 減水剤などが使用されていないプレーンコンクリートである。



(a) L型ブロック形状および寸法



(b) 用水路形状および寸法

図 3.1.1 L型ブロック詳細図³⁾

表 3.1.2 L型ブロックのコンクリート配合

Gmax (mm)	スランプ (cm)	W/C (%)	空気量 (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)			
					W	C	S	G
25.0	8.0±1.5	50.0	1.5	41.7	158	316	783	1136

3. 2 現地踏査およびコア試料の採取

コア採取に先立ち、現地踏査を実施した。対象構造物の状況の一例を写真 3.2.1 に示す。



写真 3.2.1 対象構造物の状況の一例

写真 3.2.2 に一例を示すように、現地踏査により、用水路側面の L.W.L.より高い位置において、スケーリング、ひび割れおよび剥落が確認された。このひび割れの分布は鉄筋位置と合致しておらず、剥落した箇所に錆汁および腐食した鉄筋は認められなかった。よって、これらの損傷は、鉄筋腐食に起因するものではなく、凍害によるものと推察される。L.W.L.より低い位置については、流水の磨耗によるものと推察される粗骨材の露出が認められたが、スケーリング、ひび割れおよび剥落は確認されなかった。



写真 3.2.2 用水路側面のスケーリング，ひび割れおよび剥落の状況の一例

損傷が認められるブロックでは，L.W.L.より高い位置のほぼ全面に，同様の損傷が認められる傾向があった。また，外気温，日射および湿潤状態がほぼ同様と考えられる区間内であっても，損傷が認められるブロックと認められないブロックがあった。そこで，損傷が認められた9箇所をNo.1からNo.9として選定し，損傷が認められない箇所と認められる箇所をそれぞれ健全部および劣化部として各1本のコア試料を採取した。各箇所の健全部と劣化部のコア採取位置は数m以内の距離にある。No.1からNo.9のコア採取位置の概要を表3.2.1に示す。また，コア採取面の状況を写真3.2.3に示す。ここで，コア試料の採取位置周辺には，日射に影響を及ぼすような建造物はほとんど存在しない。また，コア試料の採取位置は，用水路のH.W.L.よりも高い範囲としたが，No.1についてはH.W.L.とL.W.L.の間であり，流水の影響を受けたことが推察される形跡が認められた。

表 3.2.1 コア採取位置の概要（その1）

No.	供用 年数	採取面 の方位	部位	コア試料寸 法（mm）	水の影響	外観の状態
1	35	西向き	健全部	φ150×212	流水の形跡	流水によるものと考えられる粗骨材の露出があるが、ひび割れなどはない。
			劣化部	φ150×211	流水の形跡	粗骨材が露出し、左右方向に数本のひび割れが発生している。
2	35	南向き	健全部	φ150×127	なし	粗骨材の露出やひび割れなどはない。
			劣化部	φ150×129	上側から供給の形跡	左右方向に多数のひび割れが発生し、遊離石灰などが析出している。
3	35	南向き	健全部	φ150×134	なし	粗骨材の露出やひび割れなどはない。
			劣化部	φ150×125	目地および上側から供給の形跡	亀甲状にひび割れが発生し、遊離石灰などが析出している。
4	35	南向き	健全部	φ150×135	なし	粗骨材の露出やひび割れなどはない。
			劣化部	φ150×111	目地から供給の形跡	表面が広い範囲で剥落し、粗骨材が露出している。

表 3.2.1 コア採取位置の概要（その2）

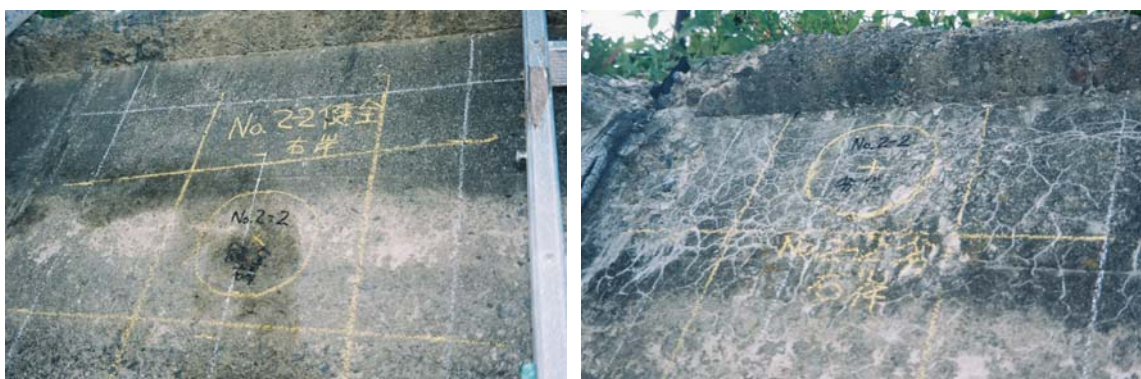
No.	供用 年数	採取面 の方位	部位	コア試料寸 法 (mm)	水の影響	外観の状態
5	34	西向き	健全部	φ 150×203	なし	粗骨材の露出やひび割れなどはない。
			劣化部	φ 150×216	なし	左右方向に多数のひび割れが発生し、遊離石灰などが析出している。
6	34	西向き	健全部	φ 150×202	なし	粗骨材の露出やひび割れなどはない。
			劣化部	φ 150×196	なし	左右方向に数本のひび割れが発生している。
7	34	西向き	健全部	φ 150×209	なし	粗骨材の露出やひび割れなどはない。
			劣化部	φ 150×202	なし	左右方向に数本のひび割れが発生し、遊離石灰などが析出している。
8	41	北向き	健全部	φ 150×195	なし	粗骨材の露出やひび割れなどはない。
			劣化部	φ 150×223	なし	左右方向に数本のひび割れが発生し、遊離石灰などが析出している。
9	41	南向き	健全部	φ 150×208	なし	粗骨材の露出やひび割れなどはない。
			劣化部	φ 150×175	上側から供給の形跡	表面が剥落し、左右方向に多数のひび割れおよび遊離石灰などがある。



(a) No.1 (左：健全部，右：劣化部)



(b) No.2 (左：健全部，右：劣化部)



(c) No.3 (左：健全部，右：劣化部)

写真 3.2.3 コア採取位置の状況 (その 1 : No.1 から No.3)



(d) No.4 (左：健全部，右：劣化部)



(e) No.5 (左：健全部，右：劣化部)



(f) No.6 (左：健全部，右：劣化部)

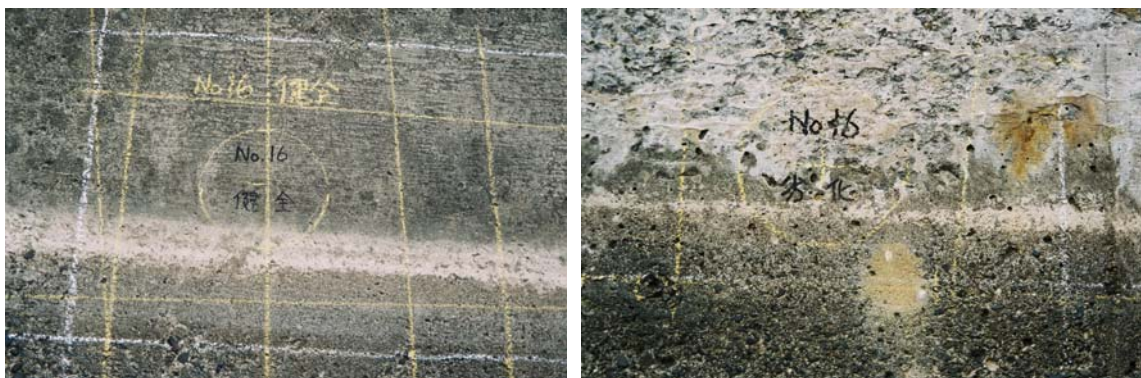
写真 3.2.3 コア採取位置の状況 (その 2 : No.4 から No.6)



(g) No.7 (左：健全部，右：劣化部)



(h) No.8 (左：健全部，右：劣化部)



(i) No.9 (左：健全部，右：劣化部)

写真 3.2.3 コア採取位置の状況 (その 3 : No.7 から No.9)

コア採取位置の劣化部の損傷程度と採取面の方位について確認すると、最も損傷が著しかったのは、南向きの No.4 および No.9 であり、表面が剥落している状態であった。次に損傷が著しかったのは、同様に南向きの No.3 であり、亀甲状のひび割れが生じていた。比較的、損傷が軽微であったのは、西向きもしくは北向きの No.6, No.7 および No.8 であり、左右方向に数本のひび割れがあった。方位によって損傷の傾向が異なる理由として、南向き面は日射を受けて融解しやすいのに対し、西向きの面や北向きの面は日中に日射を受けにくく、凍結の状態から融解しにくいことが考えられる。実際に、写真 3.2.4 に示す近隣の用水路において、冬季の日中に、南向きの側面（写真の左側）および北向きの側面（写真の右側）に、それぞれ水を噴霧したところ、南向きの側面では水が凍結しなかったのに対し、北向きの側面では、写真 3.2.5 に示すように噴霧直後に水が凍結する状況が確認された。



写真 3.2.4 冬季の日中の用水路の状況



写真 3.2.5 北向きの側面における水の凍結状況

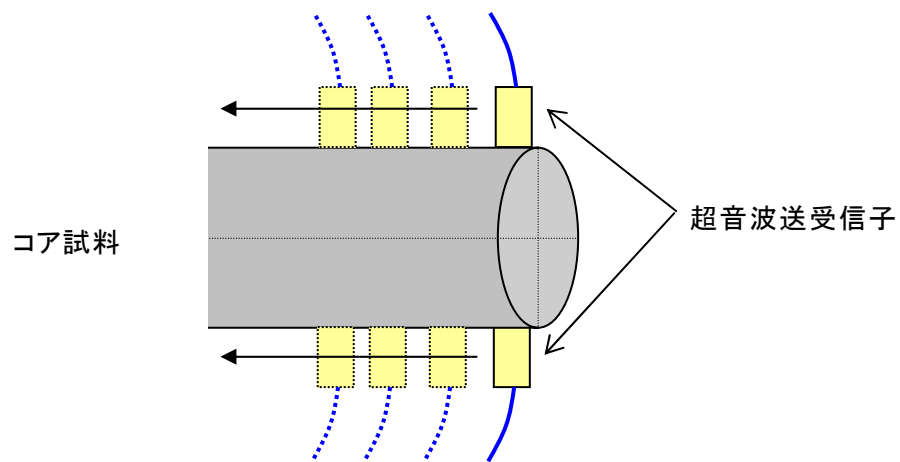
3. 3 コア試料の調査方法

(1) 調査項目

採取したコア試料の損傷の程度を調査するために超音波伝播速度および動弾性係数の測定を行った。また、コンクリートの気泡組織の測定を行った。

(2) 超音波伝播速度の測定方法

図 3.3.1 に示すように、コア試料の側面を挟むように超音波の送受信子を当て、表面より 10mm 間隔で超音波伝播速度を測定した。測定では、コア採取の際の上下および左右の 2 方向を対象とし、平均値を評価対象とした。



表面から 10mm 間隔に上下および左右の 2 方向の測定

図 3.3.1 超音波伝播速度の測定概要

(3) 動弾性係数の測定方法

JIS A 1127 共鳴振動によるコンクリートの動弾性係数、動せん断係数及び動ポアソン比試験方法-1993 により、コア試料に駆動端子を当てて縦振動を加え、共鳴する振動数から動弾性係数を測定した。ここで、同規格に示されているように、供試体の長さで断面寸法の比が小さい場合、一次共鳴振動数が求めにくいことがある。採取したコア試料の中には供試体の長さで断面寸法が同程度のものが含まれていたことから、陰極線オシロスコープの表示などに留意しながら、一次共鳴振動数が得られていることを確認の上、測定を行った。

コア試料採取の際には、凍害によるコンクリートの内部劣化を評価するために、用水路の部材中心よりも深い位置までの試料を採取した。コンクリートの凍害では、表層付近が極端に劣化することが多く、上記の測定方法では、表層部の影響を受けることが懸念されるところであるが、山下の研究⁴⁾によれば、超音波伝播速度の測定結果に対して表層部の劣化はほとんど影響を及ぼさず、内部劣化の影響が大きいことが確認されており、動弾性係数の測定結果についても同様の傾向が得られるものと考えられる。ただし、コア試料の長さが不均一であることは誤差の原因になる可能性がある。

(4) 気泡組織の測定方法

コア試料より、構造物の表面と平行な厚さ 50mm のスライス試験片を切り出し、ASTM C457 顕微鏡による硬化コンクリートの気泡システムのパラメータと空気量の測定方法-2006 のリニアトラバース法に準じて円形断面の空気量および気泡間隔係数を測定した。スライス試験片の採取深さは 30 から 110mm 程度であり、測定の際には、試験片の両面を用いてトラバース長が 2400mm となるようにした。

スライス試験片の一例および気泡組織の測定状況を、それぞれ写真 3.3.1 および写真 3.3.2 に示す。



写真 3.3.1 スライス試験片の一例



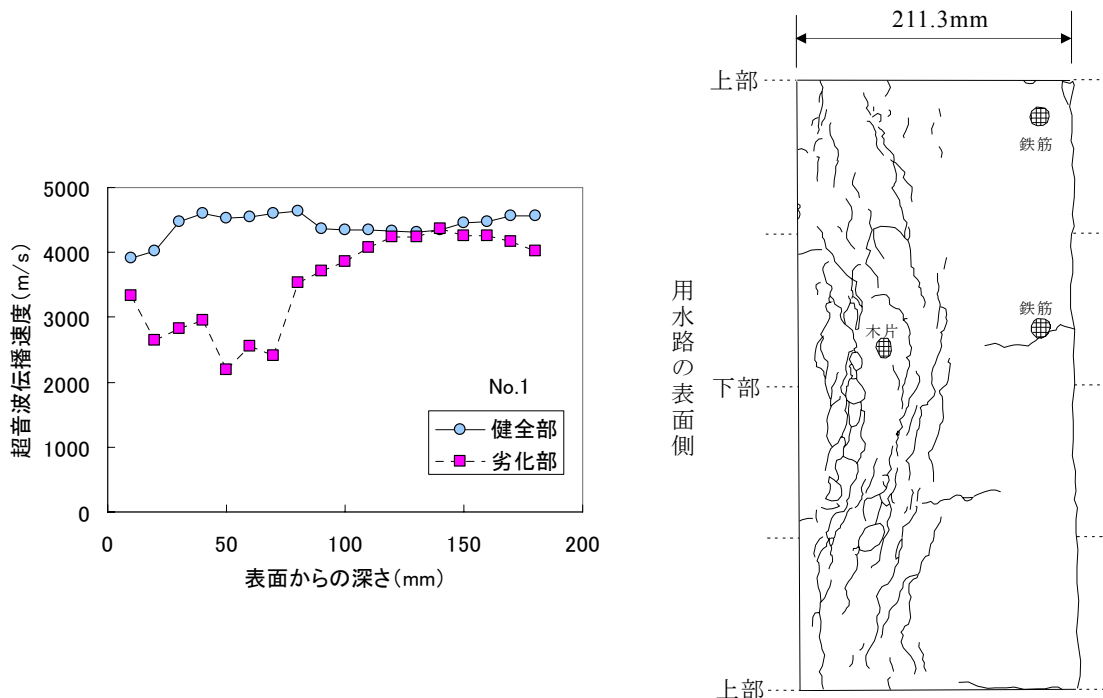
写真 3.3.2 気泡組織の測定状況

3. 4 コア試料の調査結果

(1) 超音波伝播速度

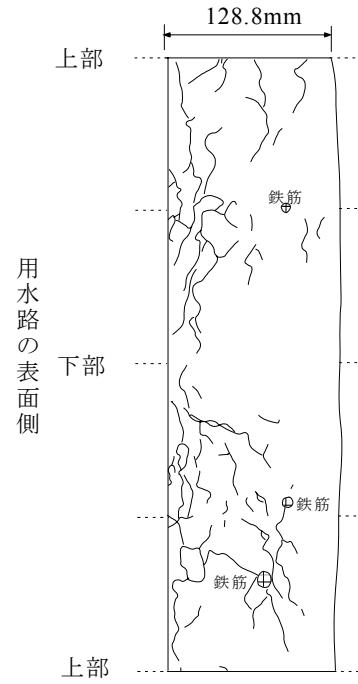
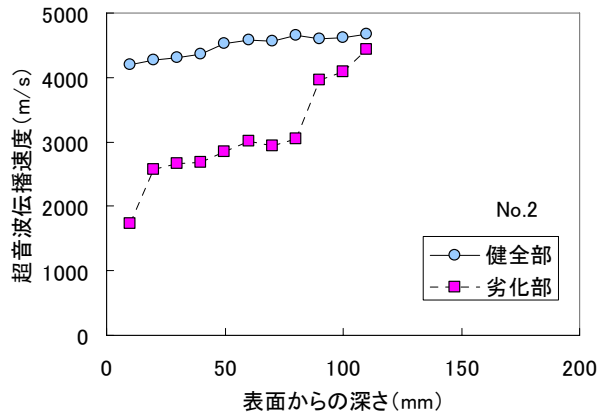
超音波伝播速度の測定結果を、劣化部のコア試料側面のひび割れ分布図（展開図）と合わせて図 3.4.1 に示す。同図より、劣化部の表面付近では、超音波伝播速度が低下する傾向が認められた。劣化部のコア試料の側面を観察したところ、表面付近を中心として円周方向の微細なひび割れが認められており、この範囲の超音波伝播速度が低下している状況が確認される。このひび割れ分布より、調査対象とした用水路では、凍害による内部劣化が進行していることが確認される。

コア試料にこのような損傷が認められる理由として、表面に近いほど外部から水が供給されやすく、また外気温の影響を受けやすいため、凍結融解の際の挙動が深さ方向に異なったことが考えられる。その結果として、表面付近ほど損傷が著しく、また、挙動の違いによるひび割れが表面と平行に発生したものと考えられる。

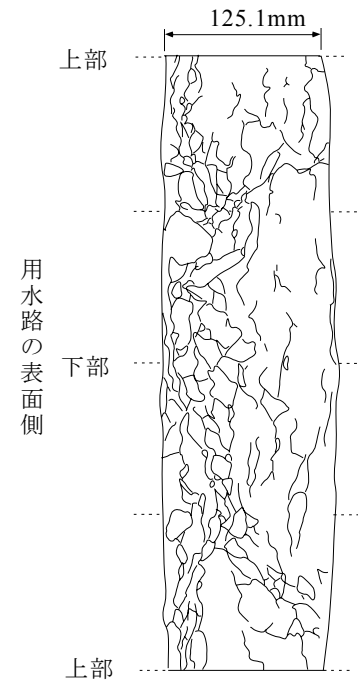
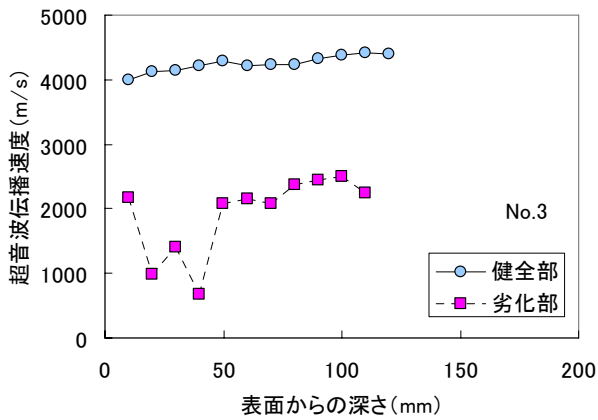


(a) No.1 (左：超音波測定結果，右：劣化部のひび割れ分布)

図-3.4.1 超音波測定結果およびひび割れ分布（その1：No.1）

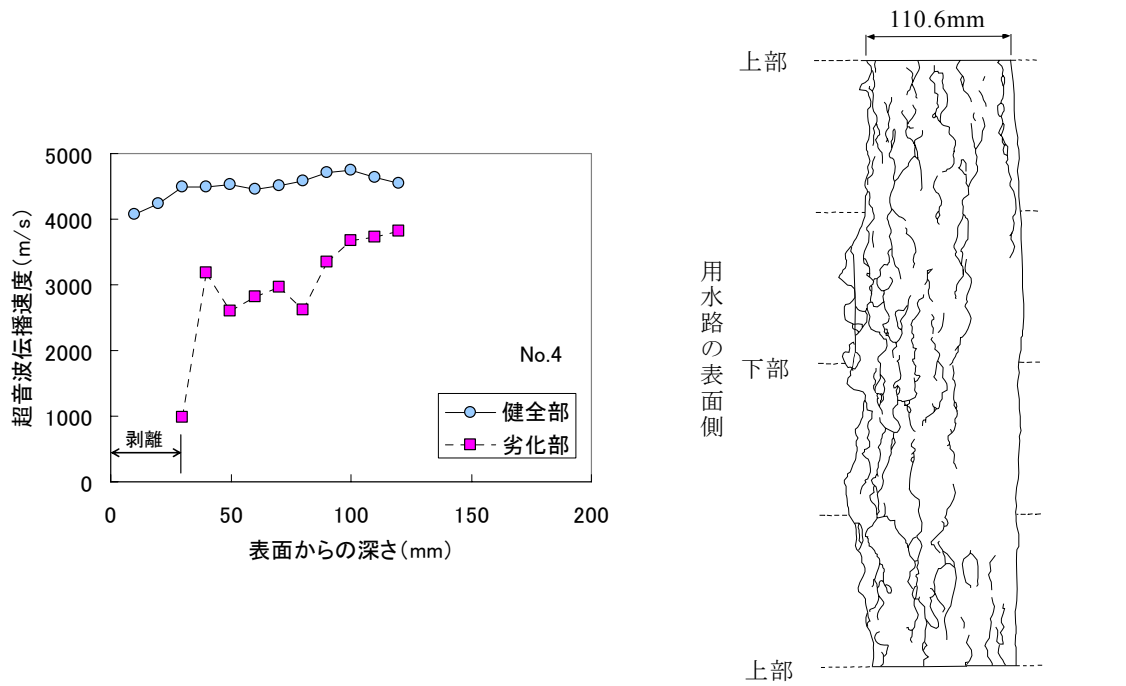


(b) No.2 (左：超音波測定結果，右：劣化部のひび割れ分布)

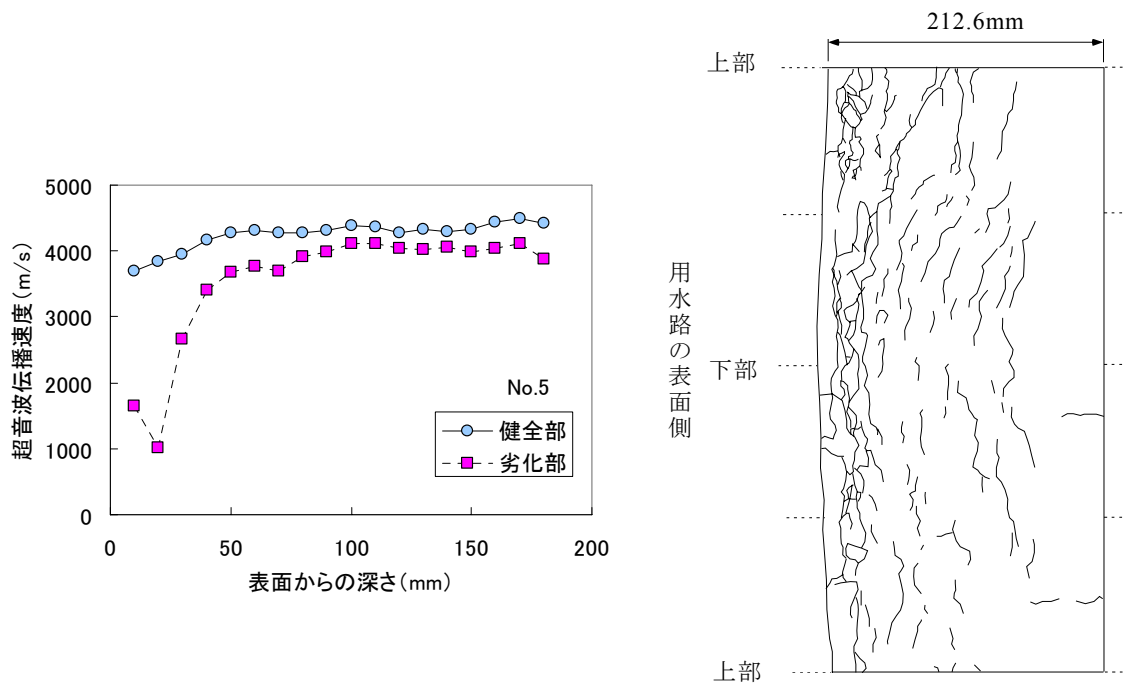


(c) No.3 (左：超音波測定結果，右：劣化部のひび割れ分布)

図-3.4.1 超音波測定結果およびひび割れ分布 (その 2 : No.2 および No.3)

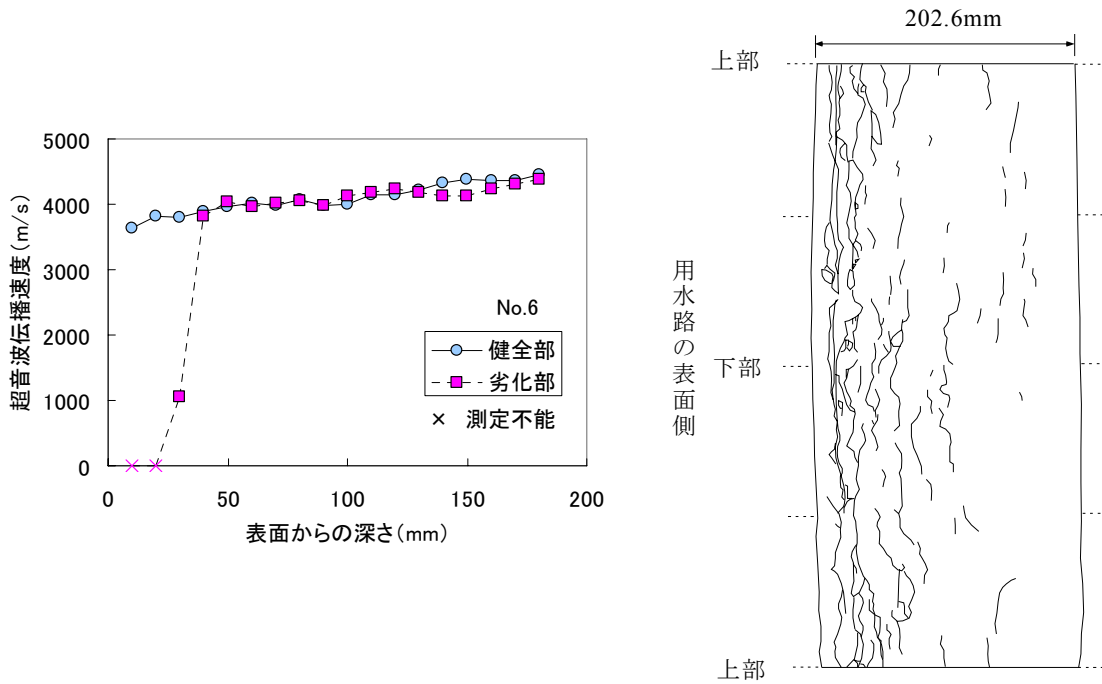


(d) No.4 (左：超音波測定結果，右：劣化部のひび割れ分布)

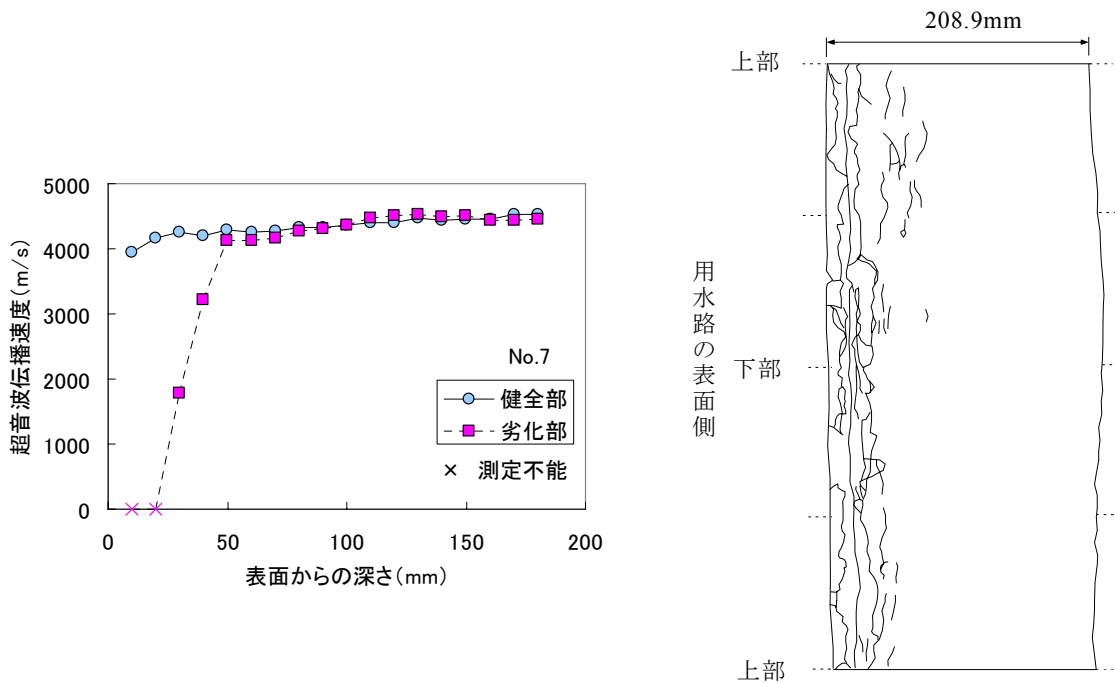


(e) No.5 (左：超音波測定結果，右：劣化部のひび割れ分布)

図-3.4.1 超音波測定結果およびひび割れ分布 (その 3 : No.4 および No.5)

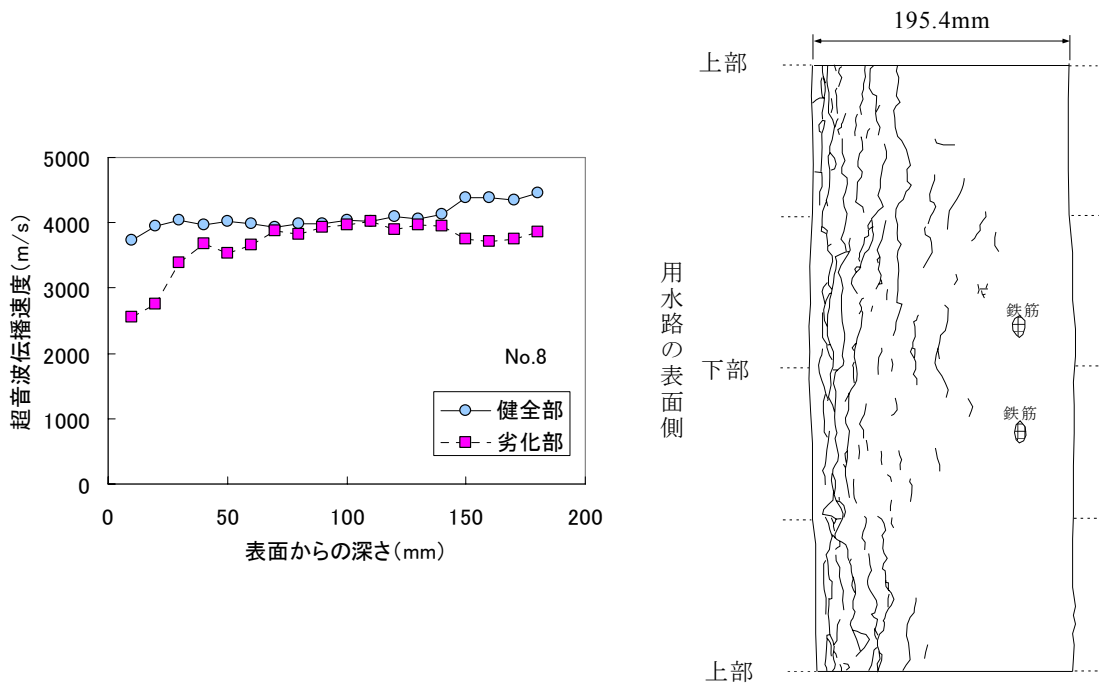


(f) No.6 (左：超音波測定結果，右：劣化部のひび割れ分布)

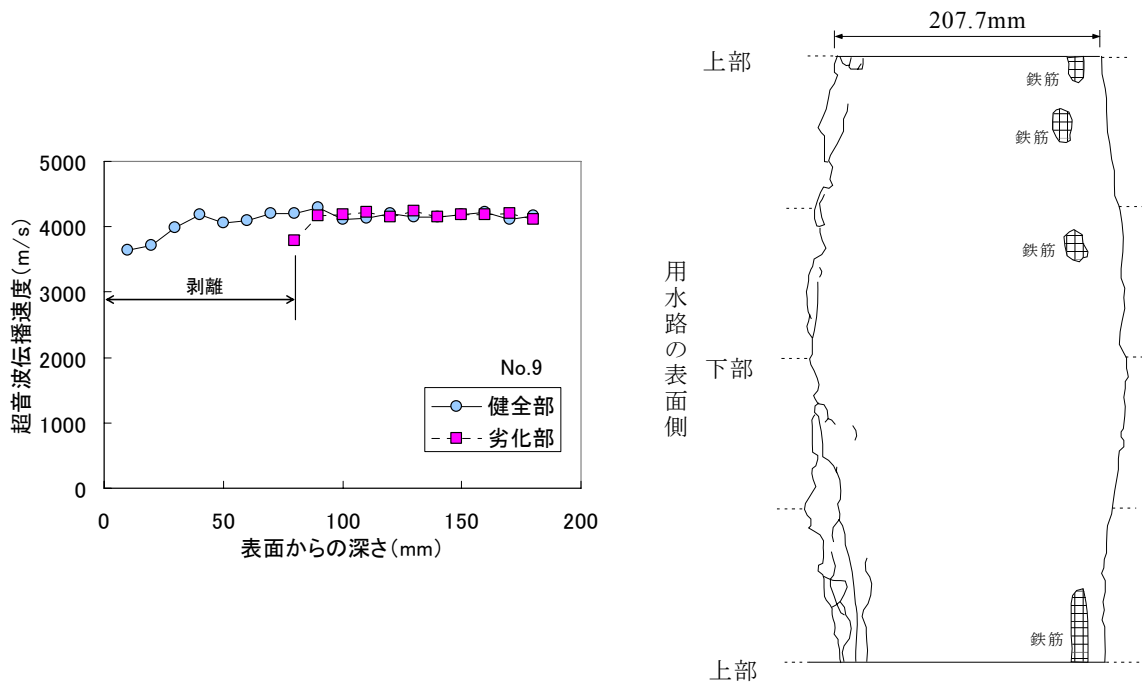


(g) No.7 (左：超音波測定結果，右：劣化部のひび割れ分布)

図-3.4.1 超音波測定結果およびひび割れ分布 (その4：No.6 および No.7)



(h) No.8 (左：超音波測定結果，右：劣化部のひび割れ分布)



(i) No.9 (左：超音波測定結果，右：劣化部のひび割れ分布)

図-3.4.1 超音波測定結果およびひび割れ分布 (その5：No.8 および No.9)

(2) 動弾性係数

動弾性係数の測定結果を図 3.4.2 に示す。ここで、No.4 および No.9 の劣化部では、スケーリングによって表面が剥落していたため、測定対象外とした。

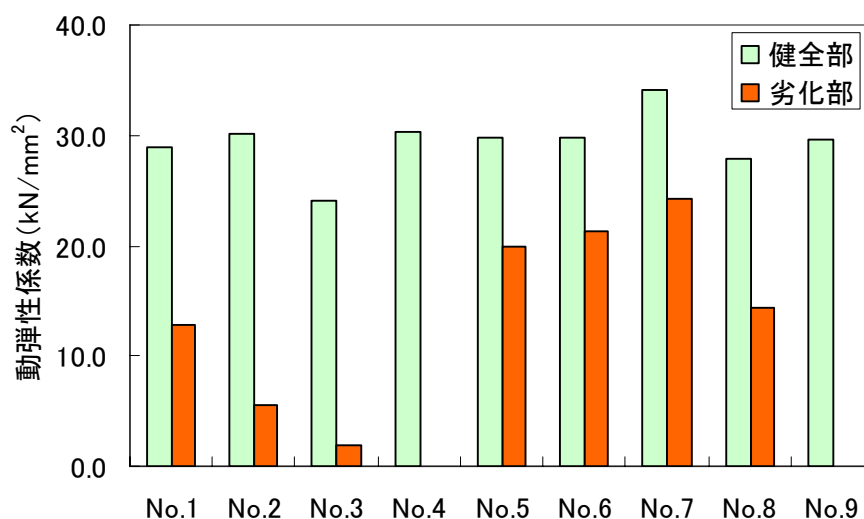


図 3.4.2 動弾性係数の測定結果

同図より、健全部の方が、劣化部よりも動弾性係数が大きい傾向が認められた。松村ら⁵⁾は、図 3.4.3 に示すように、促進凍結融解試験における相対動弾性係数と、圧縮強度、曲げ強度、中性化速度係数およびひび割れ本数には、高い相関が認められるとして、相対動弾性係数を凍害の劣化程度を表す指標として適用することの妥当性を報告しており、本調査の結果も同様の傾向を示しているものと言える。

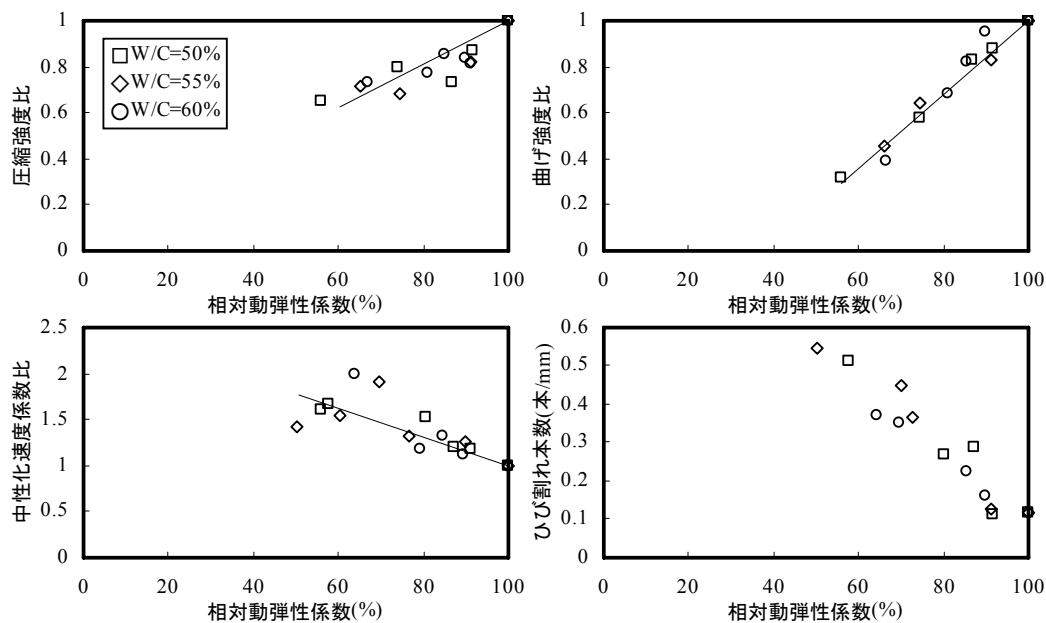


図 3.4.3 相対動弾性係数とコンクリート性状の関係⁵⁾

コンクリートの相対動弾性係数と劣化の程度の関係については、既往の研究の調査結果を踏まえて、以下のような見解が示されている⁶⁾。すなわち、JIS A 1148 コンクリートの凍結融解試験方法-2001 では、「試験の終了は、300 サイクルとし、それまでに相対動弾性係数が 60%以下になったものは、そのサイクルで終了する」としており、その注釈として、「相対動弾性係数が 50%以下になると一次共鳴振動数の測定が困難となるため、測定の継続は望ましくない」ことを示している。このことを踏まえれば、コンクリートの相対動弾性係数が 50%以下になると、著しい劣化となることが考えられ、60%が限界値の目安となることが示唆される。また、桂ら⁷⁾は、コンクリートの相対動弾性係数と長さ変化の関係について、相対動弾性係数が 90%程度以上では、ほとんど長さ変化が認められないものの、80%程度より低くなると、長さ変化が大きくなる傾向を示すことを示しており、85%がコンクリートの品質に影響が生じてくる変曲点の目安となり得ることを示している。

(3) 超音波伝播速度と動弾性係数の関係

半無限体のコンクリートでは、理論的に動弾性係数と超音波伝播速度の間に式(3.4.1)の関係がある⁸⁾。

$$E_D = \frac{\rho \cdot V^2}{g} \cdot \frac{(1 + \mu)(1 - 2\mu)}{1 - \mu} \quad (3.4.1)$$

ここで、 E_D ：動弾性係数 (kgf/cm²)

ρ ：コンクリートの密度 (kgf/cm³)

V ：超音波伝播速度 (cm/s)

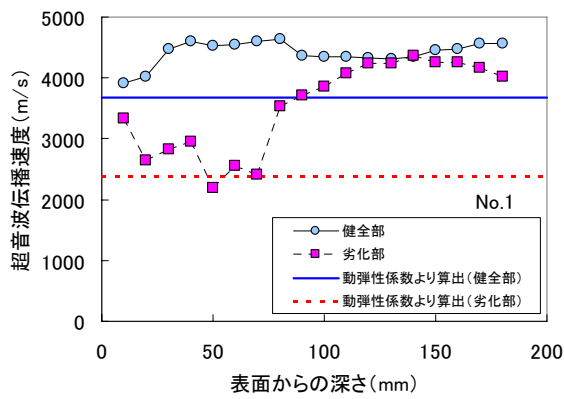
g ：重力加速度 (980cm/s²)

μ ：ポアソン比

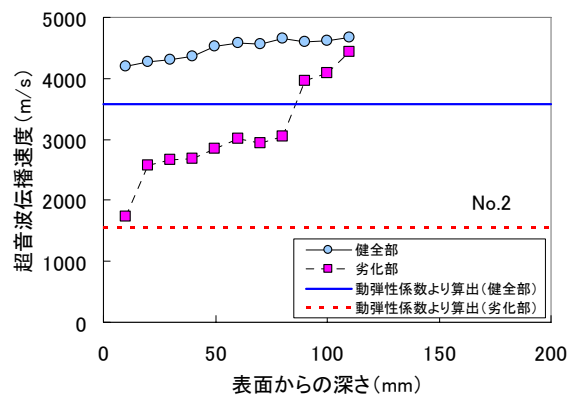
同式に、実測のコンクリート密度および 0.2 と仮定したポアソン比を代入し、動弾性係数の測定値から超音波伝播速度を算出した結果を、超音波伝播速度の測定値と比較して図 3.4.4 に示す。

同図より、健全部については、動弾性係数より算出した超音波伝播速度の方が、測定値よりも低い値を示す傾向があるものの、概ね近い値を示している。劣化部について比較すると、動弾性係数より算出した値は、ひび割れが発生している深さの測定値の範囲にある傾向が認められる。

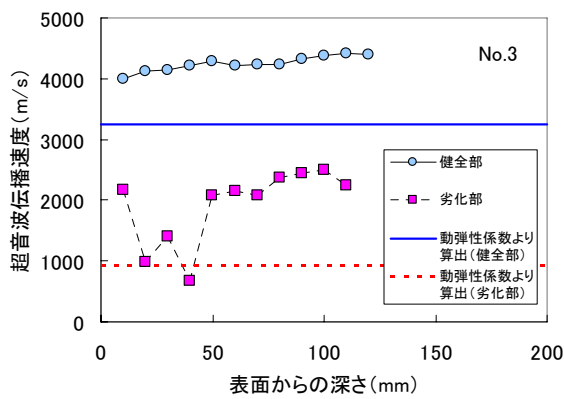
また、動弾性係数より算出した超音波伝播速度の健全部と劣化部の値を比較すると、劣化部の値が、健全部よりも低下しているものほど、測定値における表面付近の低下が内部まで及んでいる傾向が認められる。このことより、動弾性係数の値は、コンクリート表面付近の劣化の程度よりも劣化深さの影響を大きく受けることが示唆される。



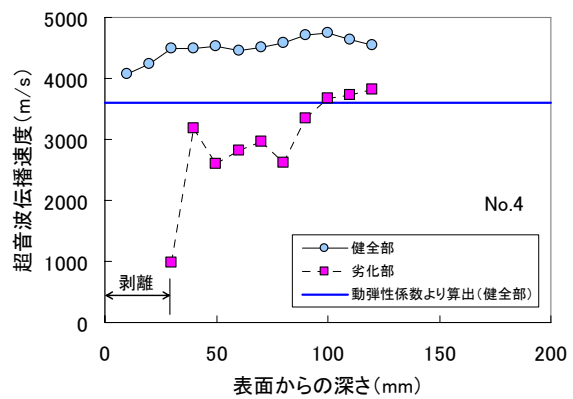
(a) No.1



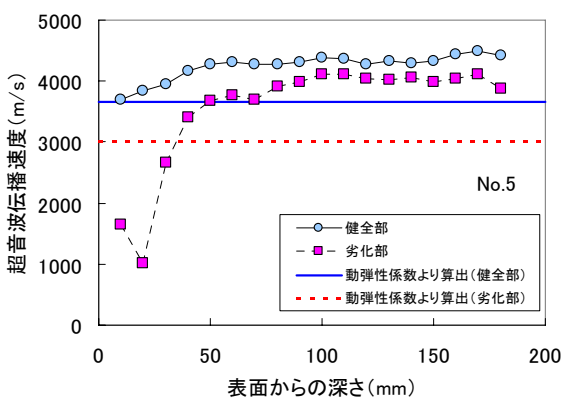
(b) No.2



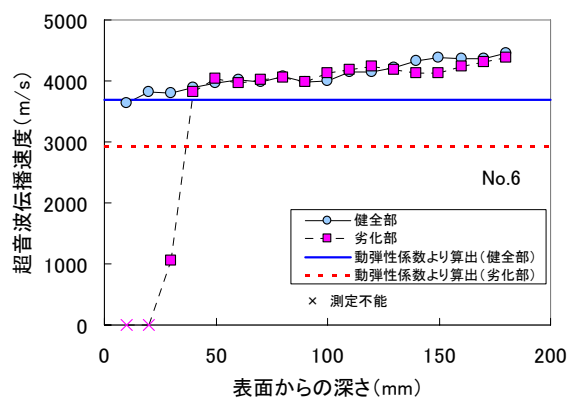
(c) No.3



(d) No.4



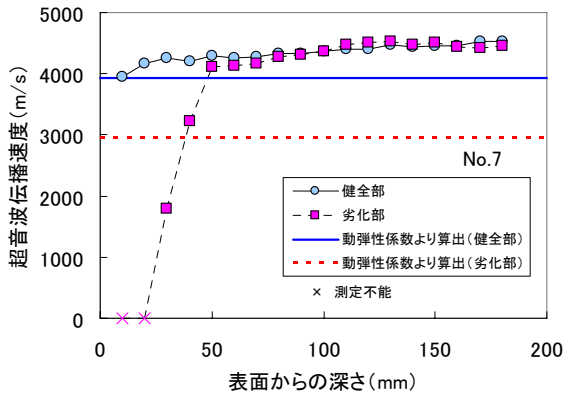
(e) No.5



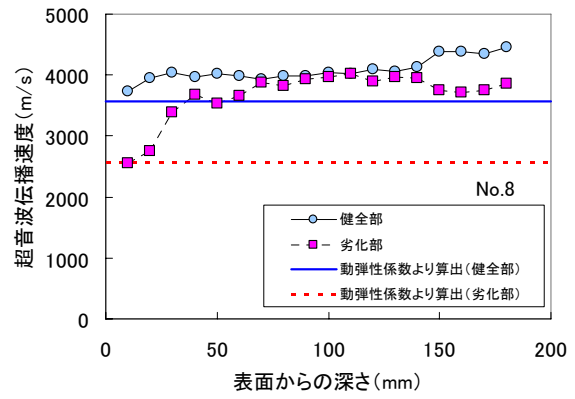
(f) No.6

図 3.4.4 動弾性係数より算出される超音波伝播速度と測定値の比較

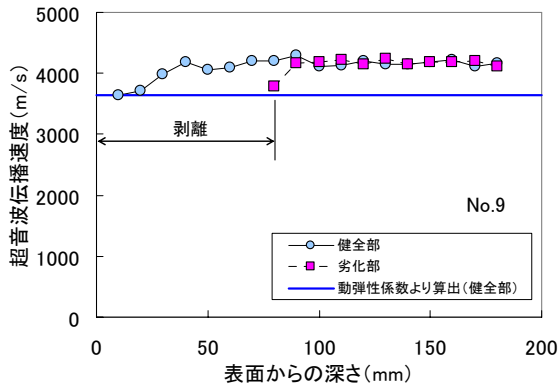
(その 1 : No.1 から No.6)



(g) No.7



(h) No.8



(i) No.9

図 3.4.4 動弾性係数より算出される超音波伝播速度と測定値の比較

(その 2 : No.7 から No.9)

(4) 空気量

空気量の測定結果を図 3.4.5 に示す。この空気量は、硬化コンクリートの試験片を測定して得られたものである。ここで、No.8 および No.9 の健全部の空気量が他の箇所比べて多いが、径の大きなエントラップトエアは確認されず、いずれも 0.1mm 前後をピークとする気泡分布であった。調査対象のコンクリートには化学混和剤が使用されていないため、気泡組織が不均一になりやすかった可能性が高く、施工の際にエアの巻き込みや抜きなどが生じて気泡組織が不均一になったことが想定される。

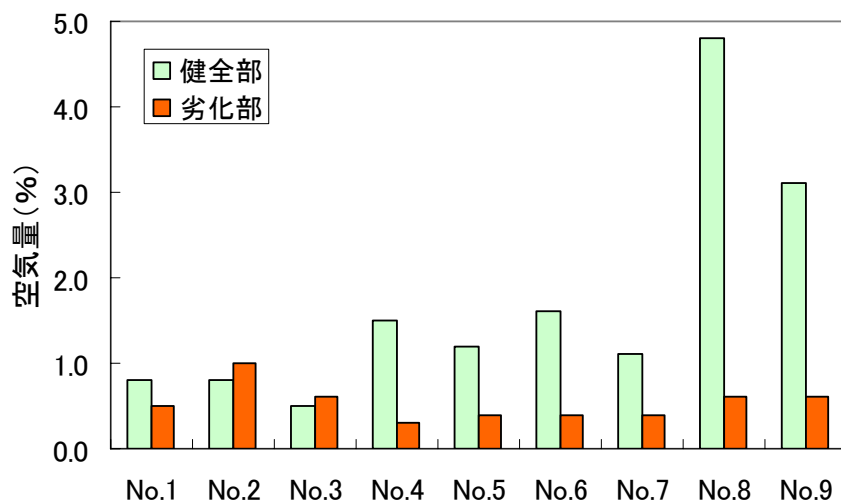


図 3.4.5 空気量の測定結果

同図より、おおむね健全部の方が劣化部よりも空気量が多い傾向が認められた。No.2 および No.3 については、劣化部の方が健全部よりも空気量が多いものの、その差は小さく、ほぼ同程度と考えられる範囲にあった。

(5) 気泡間隔係数

気泡間隔係数の測定結果を図 3.4.6 に示す。同図より、同一部位では、健全部の方が劣化部よりも気泡間隔係数が小さい傾向が認められた。小林⁹⁾は、室内における促進凍結融解試験結果に基づき、我が国の環境条件で凍結融解抵抗性を確保するための目安として 250 μm を提案している。当該地域の供用期間 34~41 年における劣化部の最小値は 409 μm であり、この提案よりも大きな範囲にあった。

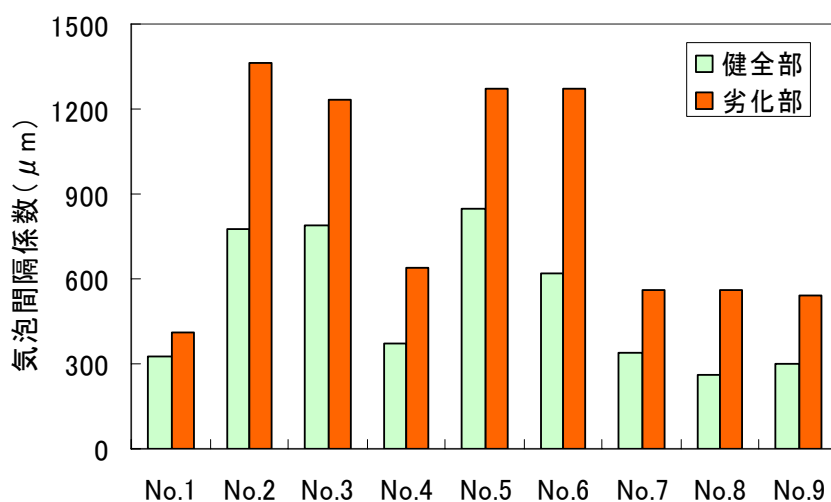


図 3.4.6 気泡間隔係数の測定結果

以上の結果より、調査対象とした用水路における凍害の劣化に対して、コンクリートの空気量および気泡間隔係数が影響を及ぼしたことが確認された。

(6) 空気量と気泡間隔係数の関係

空気量と気泡間隔係数の関係を図 3.4.7 に示す。同図より、用水路のコンクリートの空気量は、設計値が 1.5% であるため、ほとんどの測定値が 1.5% から、それ以下の範囲に分布している。空気量に対する気泡間隔係数の値は大きくばらついており、これは、前述のとおり、施工の際にエアの巻き込みや抽出などが生じたためと推察される。既往の研究^{10), 11)}において、化学混和剤を用いたコンクリートの空気量と気泡間隔係数の相関を示した報告があるが、本調査の範囲では良好な相関が得られなかった。また、促進凍結融解試験において、 $0.01\sim 1.0\mu\text{m}$ 付近の細孔径分布の変化が確認されているように⁴⁾、凍害による内部劣化の過程で微細なひび割れが生じ、気泡組織が変化する可能性も考えられるところであるが、顕微鏡による測定の目安となる径 $10\mu\text{m}$ 以上のオーダーの気泡の範囲¹²⁾では、健全部の方が劣化部よりも空気量が多い結果であり、内部劣化の影響が推察されるような傾向は認められなかった。

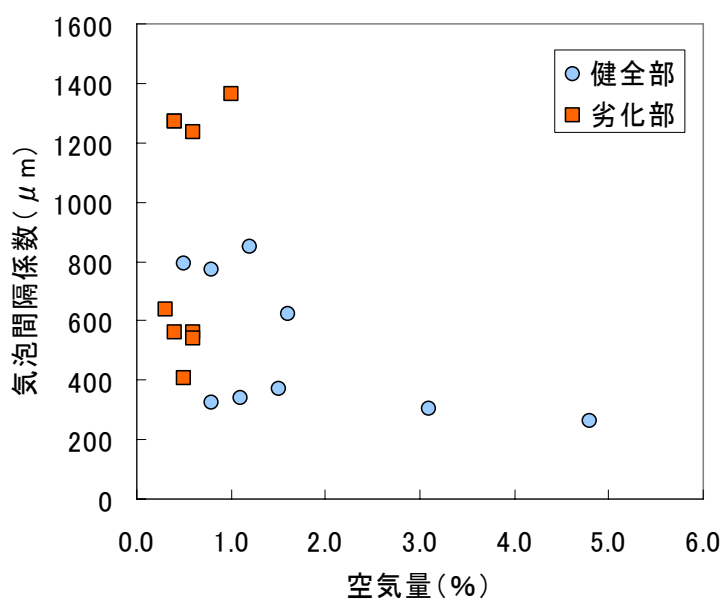


図 3.4.7 空気量と気泡間隔係数の関係

3. 5 水路施設の凍害調査のまとめ

北海道の空知地区において、水セメント比が 50%で、空気量が 1.5%の配合のコンクリートによって構築された供用期間 34 年から 41 年の水路施設には、部分的な凍害によるひび割れ、剥離および剥落が認められた。

凍害による損傷が認められた 9 箇所を選定し、健全部と劣化部より、それぞれコア試料を採取して各種試験を実施した結果、劣化部では、健全部よりも空気量が少なく、また、気泡間隔係数が大きい傾向が確認された。

このことより、当該水路施設における凍害の顕在化には、コンクリート打込みの際のエアの巻き込みや締固めによるエアの抜き出しなどによって生じた不均一な気泡組織が多大な影響を及ぼしたものと考えられる。

第3章の参考文献

- 1) 気象庁：気象統計情報，<http://www.jma.go.jp/jma/index.html>
- 2) 長谷川寿夫：コンクリートの凍害危険度算出と水セメント比限界値の提案，セメント技術年報，No.29，pp.248-253，1975.
- 3) (財)日本水土総合研究所内部資料
- 4) 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，学位論文，1999.3
- 5) 松村宇，桂修，吉野利幸：凍害を受けたコンクリートの性状と劣化度評価法に関する研究，日本建築学会構造系論文集，No.563，pp.9-14，2003
- 6) コンクリート工学協会：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報告書，2008.8
- 7) 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，Vol.11，No.2，pp.49-62，2000
- 8) 日本建築学会：コンクリート強度推定のための非破壊試験方法マニュアル，1983
- 9) 小林正几：各種 AE 剤ならびに減水剤がコンクリートの諸性能に及ぼす影響について，セメント・コンクリート，No.249，1967
- 10) 小林正几，田中弘：高強度コンクリートの凍結融解に対する抵抗性について，セメント技術年報，No.28，pp.295-297，1974
- 11) 近松竜一，入谷桂史郎，十河茂幸：各種減水剤を用いた AE コンクリートの凍結融解抵抗性，コンクリートの凍結融解抵抗性の評価に関するシンポジウム論文集，pp.37-42，2006.12
- 12) セメント協会：C&C エンサイクロペディア，1996.7

第4章 凍害予測手法の構築

4. 1 凍害のモデル化

(1) モデル化の概要

北海道に約40年間供用された水路施設の調査によって得られた知見などを踏まえ、凍害モデルを構築した。モデル化にあたっては、凍害による劣化の進行に影響を及ぼす要因が多岐にわたることから、現象を精緻にモデル化するプロセスを経るのではなく、工学的な判断に基づき、調査対象の水路施設および既往の凍結融解試験における傾向を再現することが可能な回帰式を考案することとした。

以下のモデル化では、まず、劣化に影響を及ぼす指標として、飽水していない空気量および凍結融解履歴の影響を表す指標という2つを定義し、次に、相対動弾性係数を劣化の指標とする式を決定した。ここで示される相対動弾性係数の値は、コンクリート表面より200mm程度の範囲の劣化を表すものである。採取したコア試料の調査結果によれば、用水路における動弾性係数の低下は、主としてコンクリート表面から内部にかけて発生したひび割れによって生じたものと考えられることから、本モデルで考慮される事象は、凍結融解の繰返しによって生じるコンクリート表面および内部のひび割れの程度と捉えることができる。

なお、本モデルでは、評価の対象期間をコンクリート構造物の供用期間として考えており、初期の水和反応による強度増進の影響を考慮していない。このため、長期間の評価に影響を及ぼすものではないが、新設構造物の初期時点の評価については、コンクリートの水和による強度増進の影響を受ける可能性があることに留意が必要である。

実構造物への適用性が高い凍害劣化予測と考えられる山下の方法¹⁾および石井らの方法²⁾の2つの方法と、本研究で提案する凍害モデルとの違いについては、以下に示すとおりである。

まず、凍害劣化予測に考慮されるコンクリートの材料特性について、山下の方法¹⁾は、圧縮強度、気泡間隔係数、全細孔量および凍結水量を組み合わせた耐凍害指標を用いるものであるが、空気量および飽水度の影響が考慮されていない。また、石井ら

の方法²⁾は、促進凍結融解試験結果の活用により、材料特性を包括的に考慮した評価を行うものであるが、そのために、空気量、飽水度および気泡間隔係数の個々の影響を評価できない。よって、いずれの方法も用水路の調査で確認された凍害の傾向を再現することができない。

本研究の凍害モデルは、用水路の調査で確認された傾向を踏まえ、コンクリートの空気量、飽水度および気泡間隔係数を考慮することが可能なものである。

その他の材料特性として、全細孔量および凍結水量については、セメント水比および最低温度と相関があるとした石井らの方法²⁾によって考慮することとし、圧縮強度や骨材品質などについては、モデル中に係数を設けて包括的に考慮している。

一方、凍害による劣化の過程については、山下の方法¹⁾および石井らの方法²⁾と同様に、本研究でも、これを力学的疲労問題として捉え、線形劣化累積損傷理論によって考慮しようとしている。

(2) 飽水していない空気量の導入

コンクリートの空気量および気泡間隔係数が、凍害による劣化に影響を及ぼす機構は、以下のように説明される³⁾。まず、コンクリートの凍害は氷晶形成による直接的な圧力のみでなく、それに伴う水の移動圧にもよるものとされている。コンクリート中の気泡には、圧力に対する体積変化が容易な空気が存在し、水の凍結に伴う水流としての体積増加を吸収する。このため、移動した水流の逃げ場となる気泡量およびその間隔が凍結融解抵抗性に影響を及ぼす。よって、Neville⁴⁾や永倉⁵⁾などが促進凍結融解試験を基に確認しているように、気泡の飽水状態によって凍結融解作用を受けた際の影響が異なることが推察される。すなわち、コンクリートの気泡中における飽水していない部分の体積が、凍害の劣化状態と高い相関を示すものと考えられる。このことを踏まえ、凍害モデルの構築では、コンクリート体積に対する飽水していない空気量 V_d という指標を導入することとし、これを式(4.1.1)のように定義した。

$$V_d = V_a(1 - R/100) \quad (4.1.1)$$

ここで、 V_d : 飽水していない空気量 (%)

V_a : 硬化コンクリートの空気量 (%)

R : 相対含水率 (%)

上式の相対含水率 R は、秋田ら⁶⁾が定義した指標であり、コンクリートを 105°C で炉乾燥した状態を 0% とし、水中養生後の飽水状態を 100% と考えるものである。相対含水率 R は、式(4.1.2)によって算出される。

$$\begin{aligned} R = & 33.4 + 1.46H - 0.287W/C - 0.0158H^2 \\ & - 0.0145H \cdot W/C + 0.000422W/C^2 + 0.0000773H^3 \\ & + 0.000174H^2 \cdot W/C - 0.00000422H \cdot W/C^2 \end{aligned} \quad (4.1.2)$$

ここで、 H : 相対湿度 (%)

W/C : 水セメント比 (%)

実際には、式(4.1.2)は細孔も含めたコンクリート全体の相対含水率を示すものであり、気泡のみに生じる水分移動を評価しているものではないと考えるのが妥当であるが、式(4.1.1)では、空気量における飽水の度合いが、細孔も含めたコンクリート全体の相対含水率と同様の割合であると仮定した。

用水路の調査結果の空気量を基に、飽水していない空気量 V_d を算出すると図 4.1.1 に示すようになる。ここで、前掲の表 3.2.1 において、現地状況より推察される水の影響の有無を「なし」と記載した部位の相対湿度には、岩見沢市の 1999 年から 2003 年までの 5 年間の平均値である 77.9% を用い⁷⁾、それ以外の水の供給が推察される部位の相対湿度には 100% を用いた。実際の用水路における相対湿度は、日々刻々と変化するものであるが、本研究では、コンクリート構造物の供用期間という長期間を対象とした評価を目的としているため、短時間における変化を考慮する必要性は低いものと判断し、5 年間の平均値を与えた。

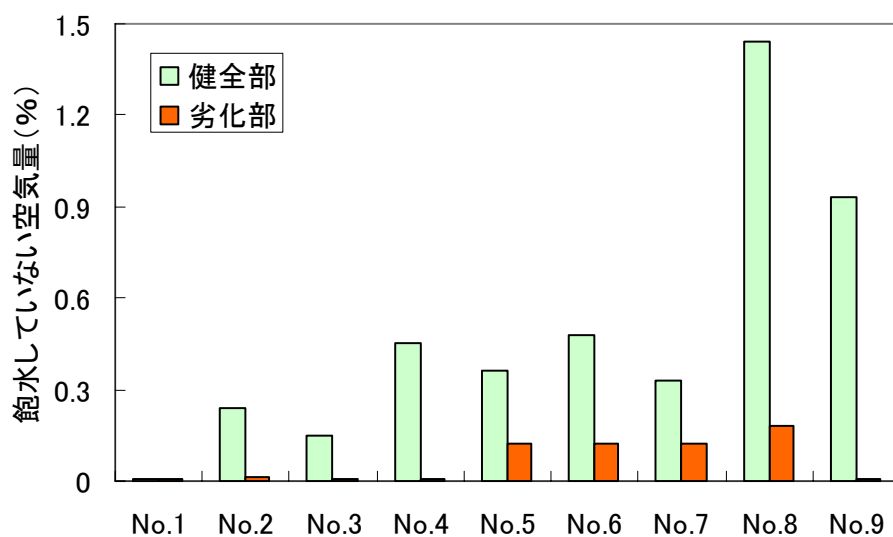


図 4.1.1 飽水していない空気量

同図より、健全部の方が劣化部よりも飽水していない空気量が多いことが確認され、その傾向は図 3.4.4 の空気量を指標とする場合よりも顕著であることが確認できる。

(3) 凍結融解履歴の影響を表す指標の導入

コンクリートが凍結融解作用を受けるとき、凍結融解回数と凍結時における最低温度が劣化に影響を及ぼすことが知られている。これは、硬化セメントペースト中の水分が、空隙の寸法効果によって融点降下を示し、凍結時の最低温度に応じて凍結水量が異なるためであり、Helmuth⁸⁾や Blachre⁹⁾、盛岡ら¹⁰⁾によって細孔径と相変化温度の関係が示されている。鎌田・洪¹¹⁾は、このことを実験によって確認し、盛岡らの提案式が他の提案式よりも現象に近い値を示すことを報告している。石井ら²⁾は、細孔径分布および最低温度を基に樋口式によって求めた凍結水量とセメント水比に相関があることを確認し、相対動弾性係数が60%となる凍結サイクル数を破壊サイクル数と定義して式(4.1.3)のように示している。

$$N = 10^{[0.14 \ln(C/W) + 0.04] \theta + 3.15 \ln(C/W) + 1.43} \quad (4.1.3)$$

ここで、 N ：破壊サイクル数

θ ：凍結融解の凍結時の最低温度（℃）

C/W ：セメント水比

凍害モデルの構築では、1回の凍結融解作用が劣化に及ぼす影響の程度を表す相対的な指標として $1/N$ を用いることとし、供用期間中の凍結融解履歴の影響を表す指標 FT を式(4.1.4)のように定義した。

$$FT_m = \sum_{i=1}^m 1/N_i \quad (4.1.4)$$

ここで、 FT_m ： m 回の凍結融解作用を受けた際の凍結融解履歴の影響を表す指標

N_i ： i 回目の凍結融解作用における最低温度およびセメント水比を基に、式(4.1.3)によって算出される破壊サイクル数

凍結融解履歴の影響を表す指標 FT は、凍結融解作用を受けるほど大きな値となるため、供用期間が長いほど大きな値となる。

(4) 相対動弾性係数を指標とする凍害モデル

以上の指標を導入し、コンクリートの空気量および気泡間隔係数が、相対動弾性係数の経年変化に及ぼす影響を再現することが可能な凍害モデルとして式(4.1.5)を考えた。

$$P_{pm} = 100 \cdot f(L, FT_m) \cdot f(V_d, FT_m) \cdot f(t_m) \quad (4.1.5)$$

ここで、 P_{pm} : m 回の凍結融解作用を受けた際の相対動弾性係数 (%)

L : 気泡間隔係数 (μm)

FT_m : m 回の凍結融解作用を受けた際の凍結融解履歴の影響を表す指標

V_d : 飽水されていない空気量 (%)

t_m : m 回の凍結融解作用を受けた際の供用期間 (年)

同式では、用水路の調査結果において空気量と気泡間隔係数の間に良好な相関が得られなかったことを考慮し、これらに関係付けなかった。藤原ら¹²⁾によれば、同一県内における 59 のレディーミクストコンクリート工場で実際に製造されているレディーミクストコンクリートの耐久性指数について調査し、硬化コンクリートの空気量と気泡間隔係数の関係として整理した結果、図 4.1.2 に示すような傾向が得られている。これによれば、同一の気泡間隔係数であっても、空気量によって耐久性指数が 60% 以上となる場合および 60% 未満となる場合があり、こうした傾向を検討する上でも、空気量および気泡間隔係数を関係付けない方が、都合がよいものと考えられる。

また、その影響は小さいことが推察されるものの、凍結融解作用以外の理由によって相対動弾性係数が経年変化する可能性も考慮し、式中に供用期間を加えた。

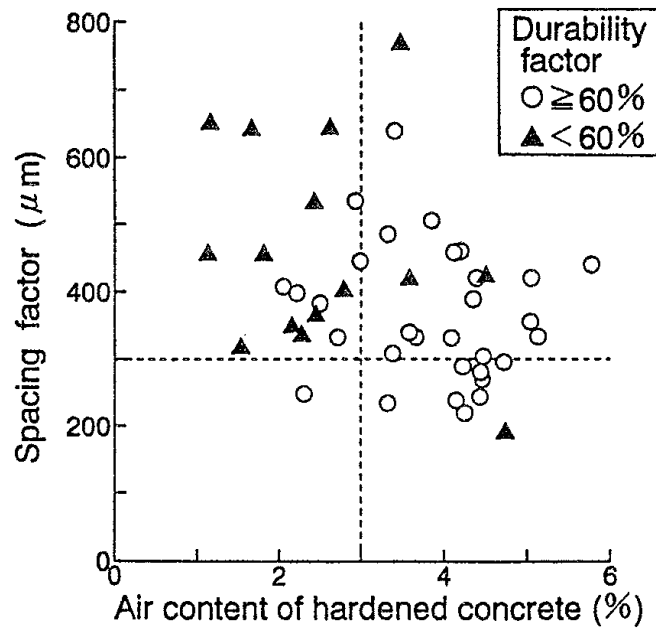
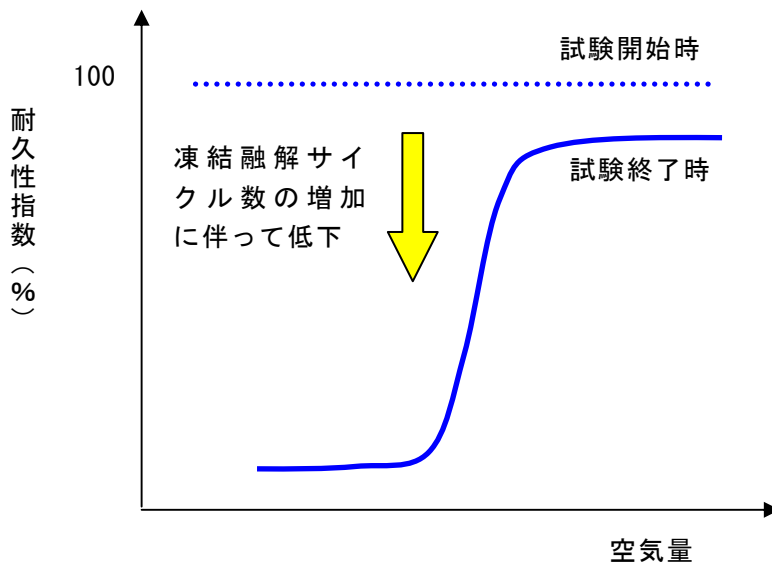
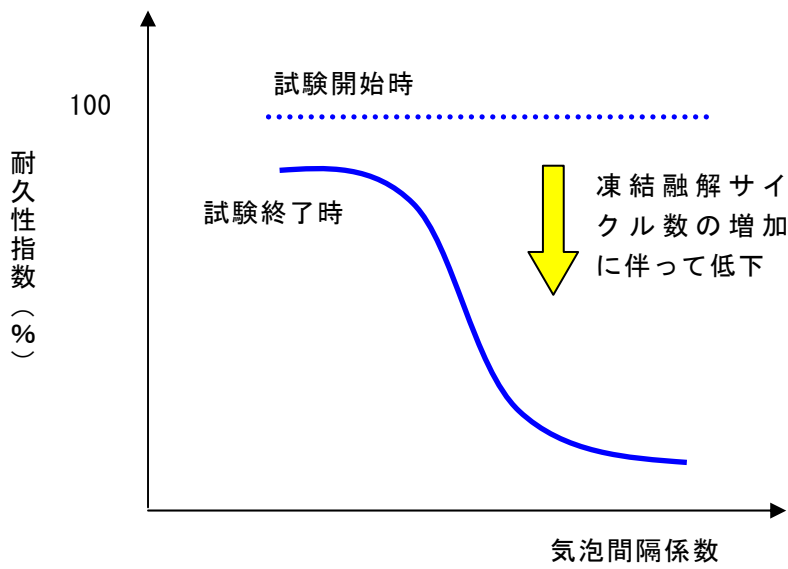


図 4.1.2 空気量および気泡間隔係数と耐久性指数の関係¹²⁾

次に、既往の促進凍結融解試験に基づく以下の知見を参考にして回帰式を決定した。Cordon・Merrill¹³⁾や岡田・六車¹⁴⁾などは、促進凍結融解試験の耐久性指数と空気量の関係を示しており、いずれの結果においても、図 4.1.3 (a) に示すような、空気量が少ない範囲では耐久性指数が 0 に近く、空気量の増加に伴って耐久性指数が高くなり、さらに空気量が多い範囲では、耐久性指数が高い範囲でほぼ一定の値をとる傾向が得られている。また、Neville⁴⁾や小林¹⁵⁾などは、促進凍結融解試験の耐久性指数と気泡間隔係数の関係を示しており、いずれも、図 4.1.3 (b) に示すような、気泡間隔係数が大きくなるほど耐久性指数が低くなる傾向が得られている。これらの傾向は、複数の研究によって確認されており、凍結融解履歴を受けた実構造物においても該当するものと考えられる。



(a) 耐久性指数と空気量の関係



(b) 耐久性指数と気泡間隔係数の関係

図 4.1.3 既往の促進凍結融解試験で得られた傾向

以上を踏まえ、図 4.1.3 を再現することができ、かつ、供用開始時点では、空気量および気泡間隔係数によらず相対動弾性係数が 100% となり、著しい凍結融解作用を受ける場合であっても相対動弾性係数が 0% より低い値にならないことを前提とする式(4.1.6)を決定した。

$$P_p = \frac{100 \exp(-a \cdot L \cdot FT - b \cdot t)}{[1 + \exp\{-c(V_d - d \cdot FT + e)\}]} \quad (4.1.6)$$

ここで、 P_p : 相対動弾性係数 (%)

L : 気泡間隔係数 (μm)

FT : 凍結融解履歴の影響を表す指標

t : 供用期間 (年)

V_d : 飽水されていない空気量 (%)

a, b, c, d, e : 係数

式(4.1.6)中には、図 4.1.3 を再現するための回帰係数として a, b, c, d, e が含まれている。現状では、用水路の調査結果のような実構造物のデータや促進凍結融解試験の結果などを回帰することによって各係数を算出することが必要である。今後、様々なデータの蓄積により、これらの回帰係数に影響を及ぼす要因を詳細に考察していくことが必要と考えられる。特に、同式の凍害モデルには、環境条件の影響が考慮されているが、使用材料の特性が考慮されていないため、コンクリート配合や強度、骨材種類などの違いによって、これらの係数がどのように変化するのか検討することが必要と考えられる。

図 4.1.3 に示す傾向は、プレーンコンクリートおよび AE コンクリートのいずれの場合にも、該当するものと考えられるが、前述のとおり、式(4.1.5)および式(4.1.6)では、用水路のプレーンコンクリートを対象とした調査結果を再現できるように空気量と気泡間隔係数を関係付けていない。したがって、AE コンクリートを対象とする場合には、空気量と気泡間隔係数の相関について検討の上、それぞれの値を与えることを検討することが必要と考えられる。

4. 2 凍害モデルによる用水路調査結果の再現性の検討

(1) 調査結果の再現性の検討概要

用水路の調査結果を用いて式(4.1.6)の係数 a, b, c, d, e を回帰し，凍害モデルによる相対動弾性係数の再現性を検討した。

(2) 相対動弾性係数の推定方法

用水路の調査では動弾性係数を測定したが，凍害モデルでは相対動弾性係数を劣化の指標としているため，初期の動弾性係数を推定して相対動弾性係数を算出した。

本検討では，セメント水比から式(4.2.1)によって材齢 28 日の圧縮強度を推定し¹⁴⁾，推定された圧縮強度を基に式(4.2.2)によって初期の動弾性係数を推定した¹⁶⁾。

$$\sigma_c = 131 + 136C/W \quad (4.2.1)$$

$$E_D = 5.3\sigma_c^{0.342} \quad (4.2.2)$$

ここで， σ_c ：圧縮強度 (kgf/cm²)

C/W ：セメント水比

E_D ：初期の動弾性係数 (kN/mm²)

材齢 28 日の圧縮強度を推定する場合，凍害による劣化が生じていない部位からコア試料を採取して圧縮強度試験を行い，長期材齢における圧縮強度の増進を考慮して求める方法が最も確実と考えられるが，本調査では，外観上，健全部と判断される部位でも，凍結融解繰返しの影響を受けた可能性が高いことを考慮し，上記の方法とした。

(3) 凍結融解履歴の影響を受ける係数の推定

凍結融解履歴の影響を示す係数 FT の推定には、外気温の履歴が必要である。本検討では、岩見沢市で観測された 1999 年から 2003 年までの 5 年間の日最高気温および日最低気温を用い⁷⁾、これが 5 年ごとに繰り返されるものと仮定して供用期間 34 年から 41 年の外気温の履歴を推定することとした。しかし、この値は地上から 1.5m の高さに設置された百葉箱で測定されたものあり、実構造物の表面温度と異なることが推察される。宗岡ら¹⁷⁾は、冬期における百葉箱中の温度と東西南北の各方向に面する傾斜表面の温度を測定し、百葉箱よりも東西南北の各表面の方が、平均気温が、それぞれ 4.7℃、2.9℃、6.6℃および 2.3℃高いことを示している。この違いは日射などの影響によるものと考えられるため、本検討では、日射の影響を受ける日中の最高気温に、方位に応じてそれぞれの値を加え、用水路の表面における外気温の履歴として扱った。最低気温については、日射の影響を受けない夜間に観測される値であることから、余熱の影響なども考えられるものの、百葉箱で観測された温度を用いることとした。以上の考えを用い、各方位の外気温履歴を推定し、0℃以下に低下した外気温が 0℃以上に上昇した場合に 1 回の凍結融解が生じるものとして算出した百葉箱および各方位の地表面の凍結融解回数を表 4.2.1 に示す。同表より、各方位の凍結融解回数は、多い順に、南、東、西および北となった。

表 4.2.1 百葉箱および各方位の凍結融解回数

西暦	凍結融解回数 (回)				
	百葉箱	東向き	西向き	南向き	北向き
1999	71	134	112	140	107
2000	68	135	116	143	104
2001	60	116	92	135	85
2002	82	128	114	135	101
2003	76	134	112	135	104
平均	71.4	129.6	109.2	137.6	100.2

以上のように方位を考慮して凍結融解履歴を推定した後，1回の凍結融解ごとに，最低温度およびセメント水比の2.0を基に，式(4.1.3)を用いて破壊サイクル数 N を算出し，供用期間内における各凍結融解に対する $1/N$ の総和である凍結融解履歴の影響を示す係数 FT を算出した。

(4) 凍害モデルの回帰データの整理

式(4.1.6)の係数 a, b, c, d, e の推定に用いた回帰データを整理して表 4.2.2 に示す。ここで、気泡間隔係数 L については調査結果を用い、飽水されていない空気量 V_d については前掲の図 4.1.1 の値を用いた。

表 4.2.2 回帰に用いた用水路のデータ

No.	部位	相対動弾性 係数 P_p (%)	供用期間 t (年)	気泡間隔係 数 L (μm)	未飽水の気 泡量 V_d (%)	凍結融解履 歴係数 FT
1	健全部	69.9	35	325	0.01	20.31
	劣化部	31.2	35	409	0.01	20.31
2	健全部	73.1	35	774	0.24	29.38
	劣化部	13.3	35	1362	0.01	29.38
3	健全部	58.3	35	792	0.15	29.38
	劣化部	4.6	35	1235	0.01	29.38
4	健全部	73.3	35	369	0.45	29.38
	劣化部	0.0	35	639	0.00	29.38
5	健全部	71.9	34	849	0.36	19.73
	劣化部	48.4	34	1269	0.12	19.73
6	健全部	71.9	34	622	0.48	19.73
	劣化部	51.5	34	1269	0.12	19.73
7	健全部	82.5	34	339	0.33	19.73
	劣化部	58.8	34	561	0.12	19.73
8	健全部	67.5	41	261	1.44	21.28
	劣化部	34.8	41	563	0.18	21.28
9	健全部	71.6	41	301	0.93	34.42

(5) 凍害モデルによる相対動弾性係数の再現性

以上のように用水路の調査結果を整理した表 4.2.2 のデータを式(4.1.6)に代入し、回帰によって係数 a, b, c, d, e を求めて得られた予測式を式(4.2.3)に示す。

$$P_p = \frac{100 \exp(-0.000018L \cdot FT - 0.005t)}{[1 + \exp\{-10(V_d - 0.030FT + 0.75)\}]} \quad (4.2.3)$$

ここで、 P_p : 相対動弾性係数 (%)

L : 気泡間隔係数 (μm)

FT : 凍結融解履歴の影響を表す指標

t : 供用期間 (年)

V_d : 飽水されていない空気量 (%)

式(4.2.3)による予測値と実測に基づく推定値の比較結果を図 4.2.1 に示す。図中、誤差の大きなデータに[1]から[4]の番号を付記した。

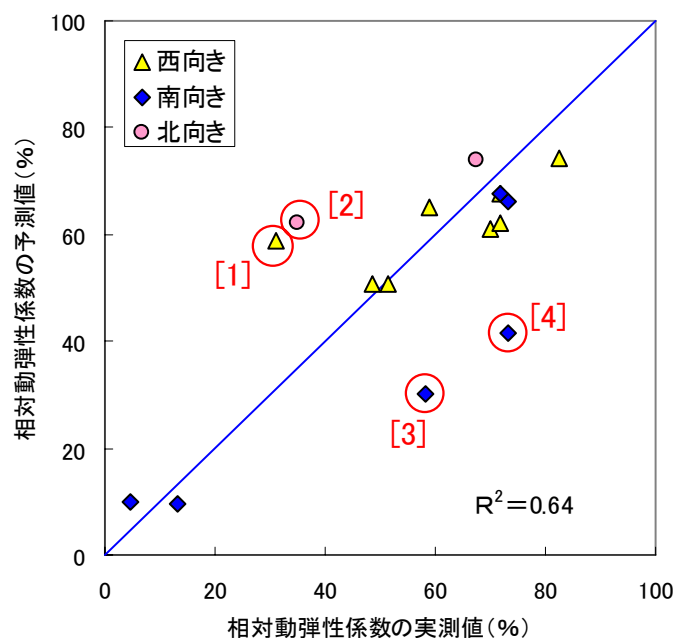


図 4.2.1 相対動弾性係数の予測値と実測値の比較

同図より、凍害モデルによる相対動弾性係数の予測値は、誤差の大きなデータもあるものの、供用期間や環境条件の異なる複数のデータに対して、おおむね傾向を捉えている。誤差の大きなデータに着目すると、西向きの[1]は実測値よりも高く予測されたが、これは H.W.L.と L.W.L.の間から取得したデータであり、こうした箇所ではモデルで考慮されない水流の影響によって予測値よりも低い値となることが推察される。また、北向きの[2]は実測値よりも高く推定され、南向きの[3]および[4]は低く推定される傾向があった。これらは、水の影響を受けない箇所より取得したデータであり、相対湿度の影響によって誤差を生じた可能性が高いものと考えられる。すなわち、北向きでは、日射を受けないため、結露などの影響によってコンクリートの相対含水率が高くなることが考えられ、これを考慮して高い相対湿度を与えれば、予測値はより低い値を示す。一方、南向きでは、日射の影響によってコンクリートの相対含水率が低くなることが考えられ、これを考慮して低い相対湿度を与えれば、予測値はより高い値を示す。ただし、これらの方角より取得した他のデータが傾向を捉えていることを踏まえると、他の要因の影響を受けた可能性もあり得るところである。

以上のことより、構築した凍害モデルによって、実構造物の相対動弾性係数をおおむね再現できるものと考えられる。

4. 3 凍害予測手法の構築のまとめ

凍害環境におけるコンクリート構造物の相対動弾性係数の経年変化に対して、硬化コンクリートの空気量および気泡間隔係数が及ぼす影響を評価することが可能な凍害モデルを、式 (4.3.1) のように提案した。

$$P_p = \frac{100 \exp(-a \cdot L \cdot FT - b \cdot t)}{[1 + \exp\{-c(V_d - d \cdot FT + e)\}]} \quad (4.3.1)$$

ここで、 P_p : 相対動弾性係数 (%)

L : 気泡間隔係数 (μm)

FT : 凍結融解履歴の影響を表す指標

t : 供用期間 (年)

V_d : 飽水されていない空気量 (%)

a, b, c, d, e : 係数

同式中の係数は、凍結融解試験結果や実構造物の調査データを基に回帰して与えるものであり、今後、コンクリート強度や骨材種類などの使用材料が、この係数に及ぼす影響を検討していくことが必要と考えられる。

また、提案した凍害モデルにより、北海道の空知地区における水路施設の相対動弾性係数をおおむね再現できることが確認された。

第4章の参考文献

- 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，学位論文，1999.3
- 2) 石井清，江川顕一郎，堤知明，野口博章：凍結融解作用を受けるコンクリートの劣化予測に関する研究，土木学会論文集，No.564/V-35，pp.221-232，1997.5
- 3) 鎌田英治：セメント硬化体の微細構造とコンクリートの凍害，コンクリート工学，Vol.19，No.11，pp.36-42，1981.11
- 4) A. M. Neville：Properties of Concrete, Pitman(Canada), 1963
- 5) 永倉正：コンクリートの配合諸条件が凍結融解抵抗性に及ぼす影響に関する基礎的研究，土木学会論文集，No.98，pp.15-25，1963.10
- 6) 秋田宏，藤原忠司，尾坂芳夫：乾燥を受けるコンクリート中の水分移動を解析する手法，土木学会論文集，No.490/V-23，pp.101-110，1994.5
- 7) 気象庁：気象統計情報，<http://www.jma.go.jp/jma/index.html>
- 8) R. A. Helmuth：Capillary Size Restrictions on Ice Formation in Hardened Portland Cement Pastes, Forth International Symposium on the Chemistry of Cement, Washington, pp.855-869, 1960
- 9) J. R. Blachere: The Freezing of Water in Consolidated Porous Materials, Thesis: Alfred University, 1969
- 10) 盛岡良雄，小林純一，樋口泉：細孔内毛管凝縮体の相転移に基づく異常熱容量についての理論的考察，日本化学会誌，pp.1549-1556，1949
- 11) 鎌田英治，洪悦郎：人工軽量骨材コンクリートの凍害機構に関する考察，セメント技術年報，XXV，pp.285-290，1971
- 12) 藤原忠司，佐藤匡昭，鈴木昭彦，中澤岩男：実際に製造されている生コンクリートの耐凍害性，セメント技術大会講演集，No.49，pp.798-803，1995
- 13) W. A. Cordon, and D. Merrill：Requirement for Freezing and Thawing Durability for Concrete, Proc. ASTM, Vol.63, pp.285-297, 1963.
- 14) 岡田清，六車照：コンクリート工学ハンドブック，1981.11
- 15) 小林正凡：各種 AE 剤ならびに減水剤がコンクリートの諸性質に及ぼす影響について，セメント・コンクリート，No.249，1967

- 16) 高野俊介:コンクリートの動弾性係数と強度の関係,セメント技術年報,Vol.5,
1951
- 17) 宗岡寿美,土屋富士夫,辻修,武田一夫:冬期の気象現象が斜面の積雪・凍
結に及ぼす影響,日本雪氷学会誌,Vol.66, No.2, pp.217-226, 2004.3.

第5章 促進凍結融解試験による凍害モデルの検証

5.1 モデルの検証概要

凍害モデルを適用する場合、現状では、促進凍結融解試験結果などを基に係数 a, b, c, d, e を推定し、構造物の供用期間における凍害の進行を予測することとなる。この手法の妥当性について、最低温度を -18°C および -10°C とする2種類の促進凍結融解試験を行って検証した。

モデルの検証方法については、最低温度を -18°C とする促進凍結融解試験によって得られる予測式を用いて実構造物における凍害の進行を予測し、その整合性を評価する方法が採用されるべきであるが、検証するためのデータが揃った適切な実構造物を得ることが困難であったため、実環境に見立てて最低温度を -10°C とした促進凍結融解試験を実施することとした。

すなわち、 -18°C の促進凍結融解試験結果によって係数 a, b, c, d, e を推定し、得られる予測式を用いて環境条件が異なる -10°C の促進凍結融解試験の相対動弾性係数の経時変化を再現することが可能であるかを評価し、凍害モデルの検証を行うこととした。

本モデルは、化学混和剤を用いないコンクリート（以下、プレーンコンクリート）の調査で得られた知見を基に構築されたものであるが、検証ではモデルの汎用性を高めることを意図して、プレーンコンクリートと、AE減水剤およびAE助剤を用いたコンクリート（以下、AEコンクリート）の2種類を対象とした。

なお、前掲の表3.1.1に示した岩見沢市の凍結融解回数¹⁾によれば、最低温度が -5°C から -10°C の範囲となる凍結融解は、年間に概ね20回程度であり、最低温度が -10°C 以下となる凍結融解は、年間に概ね10回程度である。

5. 2 使用材料およびコンクリート配合

使用材料およびコンクリート配合を、それぞれ表 5.2.1 および表 5.2.2 に示す。同表に示すとおり、本試験では、細骨材として、密度 2.64g/cm^3 および吸水率 1.10%の小笠原産山砂と佐原産山砂の混合砂を使用し、粗骨材として最大寸法 20mm，密度 2.65g/cm^3 および吸水率 0.62%の青梅産砕石を使用した。

表 5.2.1 使用材料

材料	記号	摘要
セメント	C	普通ポルトランドセメント，密度 3.16g/cm^3
細骨材	S	小笠山産山砂と佐原産山砂を 8:2 の割合で混合， 密度 2.64g/cm^3 ，吸水率 1.10%
粗骨材	G	青梅産砕石，Gmax20mm，密度 2.65g/cm^3 ， 吸水率 0.62%
混和剤	Ad1	AE 減水剤（高変性ポリオール複合体）
	Ad2	AE 助剤（変性ロジン酸化合物系陰イオン界面活性剤）

表 5.2.2 コンクリート配合

種類	G_{\max} (mm)	スラン プ(cm)	W/C (%)	空気量 (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m^3)				Ad1 (C%)	Ad2 (C%)
						W	C	S	G		
プレーンコ ンクリート	20	3.5	55	1.6	42.0	168	305	796	1107	—	—
AE コンク リート	20	12.5	55	4.6	45.0	168	305	820	1006	0.25	0.20

5. 3 試験方法

上記の2種類のコンクリートを用い、JIS A 1148 コンクリートの凍結融解試験方法-2001 に準じて、最低温度を-18℃とする促進凍結融解試験を行った。また、同様の方法により、最低温度を-10℃とする促進凍結融解試験を実施した。

試験終了後、最低温度を-10℃とする促進凍結融解試験の供試体の中央付近より100×100×20mm の試料を採取し、100×100mm の面の中心部 80×80mm の範囲を対象として、ASTM C457 顕微鏡による硬化コンクリートの気泡システムのパラメータと空気量の測定方法-2006 のリニアトラバース法によって空気量および気泡間隔係数を測定した。また、最低温度を-18℃とする促進凍結融解試験の供試体については、試験後の供試体の劣化が著しく、試料採取が不可能であったため、供試体作製時に同時に作製した 100×100×400mm の供試体から試料を採取して空気量および気泡間隔係数を測定し、各値を促進凍結融解試験に供したコンクリートの値として扱った。

5. 4 試験結果

最低温度を -18°C および -10°C とする促進凍結融解試験を、それぞれ図 5.4.1 および図 5.4.2 に示す。

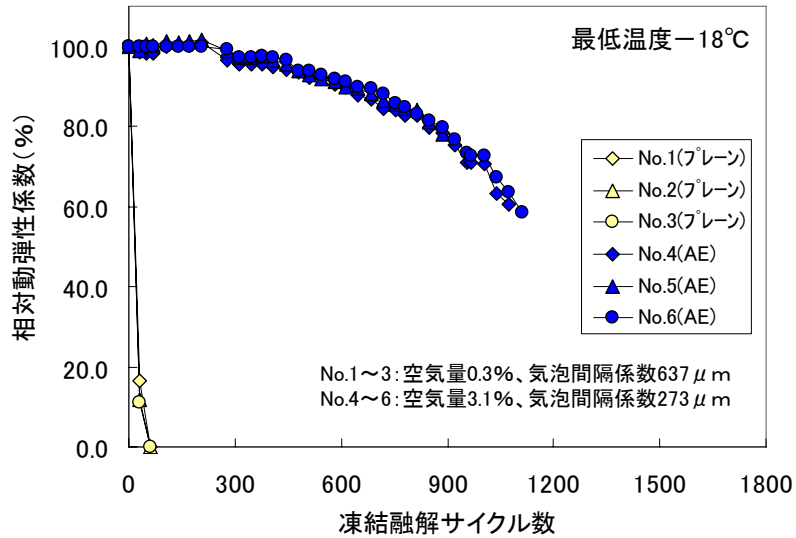


図 5.4.1 最低温度を -18°C とした促進凍結融解試験の結果

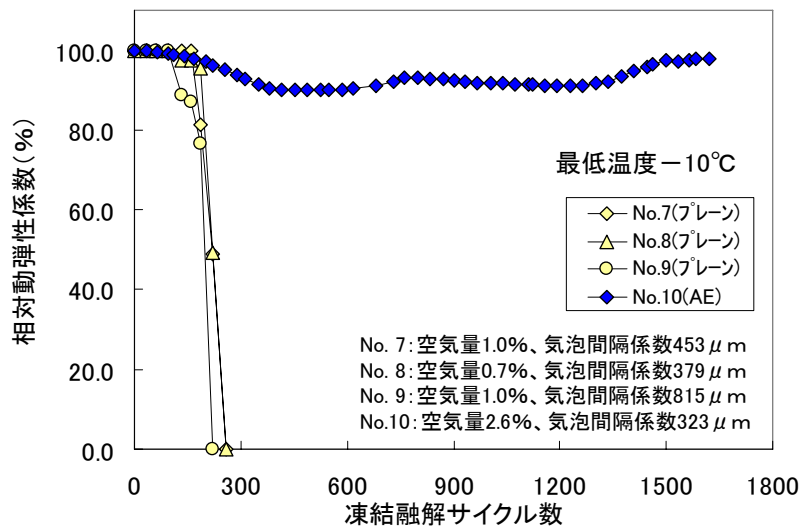


図 5.4.2 最低温度を -10°C とした促進凍結融解試験の結果

最低温度を-18℃とする促進凍結融解試験におけるプレーンコンクリートの相対動弾性係数は、30 サイクルで 20%程度の値となり、60 サイクルで 0%となった。また、AE コンクリートの相対動弾性係数は、300 サイクル以降、緩やかに低下し、900 サイクルで 80%程度となり、1100 サイクルで 60%を下回った。試験終了後の供試体を観察したところ、プレーンコンクリートの供試体は、ほとんど外観上の変化がなく、AE コンクリートの供試体は表面に骨材が現れている状態であった。

最低温度を-10℃とする凍結融解試験におけるプレーンコンクリートの相対動弾性係数は、180 サイクル以降、低下する傾向を示し、210 サイクル程度で 60%を下回った。また、AE コンクリートの相対動弾性係数は、長期間に及ぶ試験の過程で 95%程度まで低下することもあったものの、ほとんど低下しなかった。600 サイクル付近および 1300 サイクル付近で若干回復しているような傾向を示しており、これはコンクリート表面の状態などの影響を受けた可能性も考えられるところであるが、明確な理由は分からなかった。最終的に、写真 5.4.1 に示すように供試体表面の骨材の露出が顕著となった時点で試験を終了した。

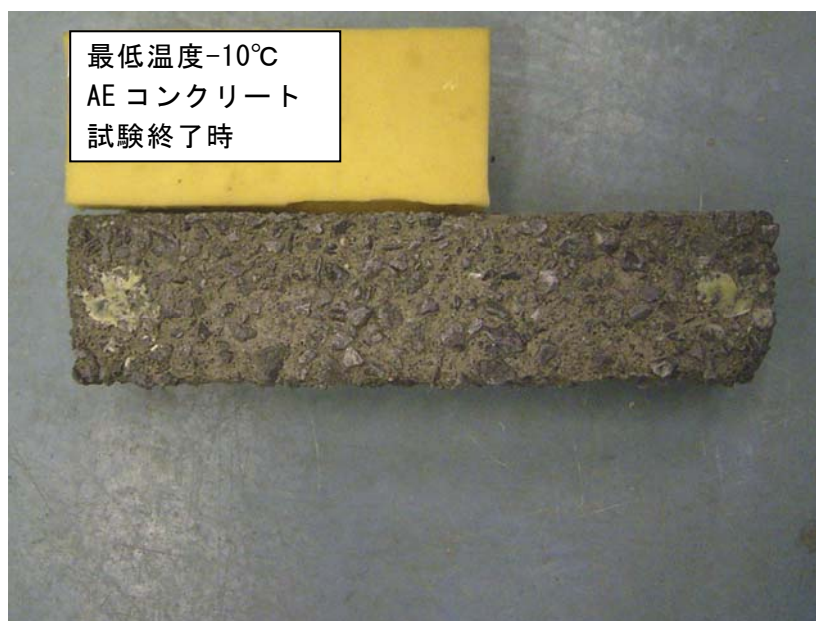
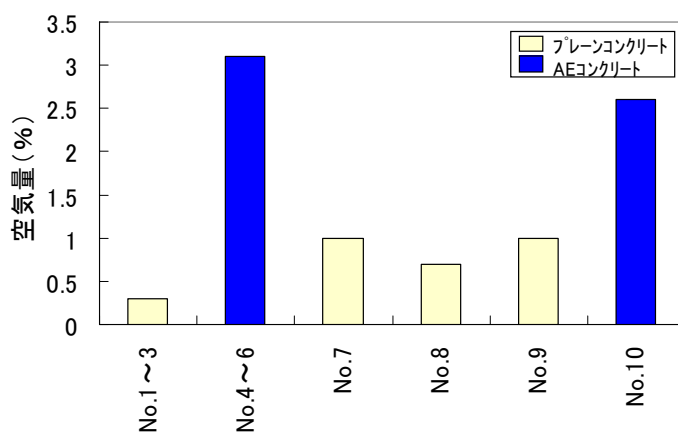


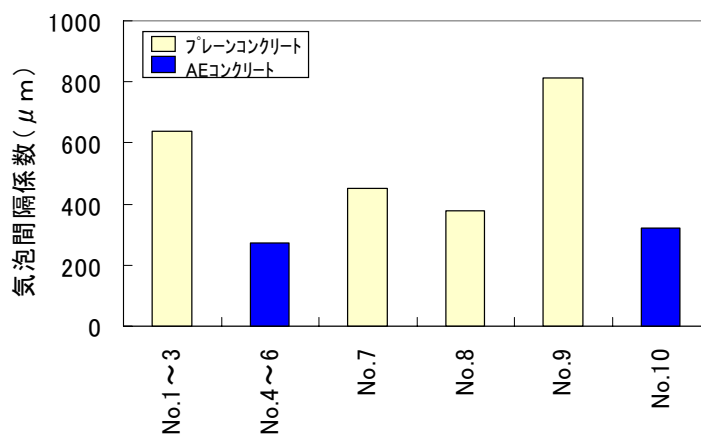
写真 5.4.1 AE コンクリートの最低温度を-10℃とした試験終了後の状況

いずれの温度条件においても、エントレインドエアの導入による凍結融解抵抗性の向上効果が確認される結果となった。また、いずれのコンクリートについても、最低温度を -10°C とする凍結融解試験結果の方がサイクル数に対する相対動弾性係数の低下が小さく、凍害の劣化程度に及ぼす最低温度の影響²⁾が確認される結果となった。

各供試体の空気量および気泡間隔係数を図 5.4.3 に示す。硬化したプレーンコンクリートの空気量および気泡間隔係数は、それぞれ 0.3~1.0%および 379~815 μm の範囲にあった。また、硬化した AE コンクリートの空気量および気泡間隔係数は、それぞれ 2.6~3.1%および 273~323 μm の範囲にあった。本試験では、AE コンクリートの方が、プレーンコンクリートよりも空気量が多く、気泡間隔係数が小さくなっており、妥当な傾向を示している。



(a) 空気量



(b) 気泡間隔係数

図 5.4.3 空気量および気泡間隔係数の測定値

5.5 モデルの検証

プレーンコンクリートについて、最低温度を -18°C とする促進凍結融解試験の回帰式を図 5.5.1 に示す。ここで、回帰係数 a, b, c, d, e の算出にあたっては、試験条件が水中凍結水中融解であることから、相対湿度を 100% として飽水していない空気量 V_d を算出した。また、促進凍結融解試験における 1 サイクルの凍結融解の最低温度である -18°C およびセメント水比の 1.81 を基に、式(4.1.3)を用いて破壊サイクル数 N を算出し、データ採取の各サイクル数における $1/N$ の総和である凍結融解履歴の影響を示す係数 FT を算出した。これらの値と気泡間隔係数 L の測定値を代入して回帰係数 a, b, c, d, e を算出した。

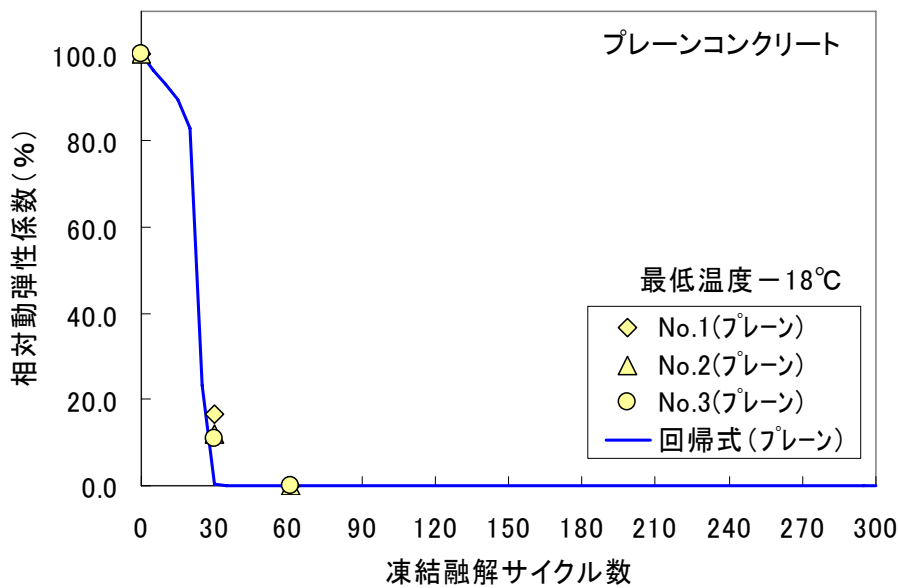


図 5.5.1 プレーンコンクリートの凍害モデルへの回帰

回帰式を用いて、最低温度が -10°C の促進凍結融解試験の供試体を解析した結果を試験結果と比較して図 5.5.2 に示す。同図より、解析結果と試験結果はほぼ同様の傾向を示している。

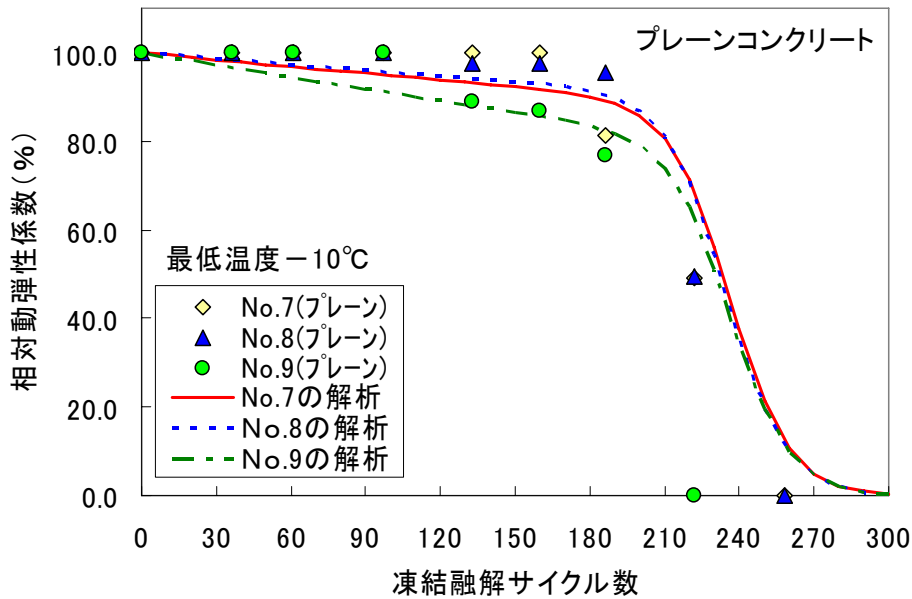


図 5.5.2 プレーンコンクリートの解析値と試験値の比較

また, AE コンクリートについて, 最低温度を -18°C とする促進凍結融解試験を図 5.5.3 に示す。図中に示す回帰式は, プレーンコンクリートと同様の手順によって回帰係数 a, b, c, d, e を算出したものである。

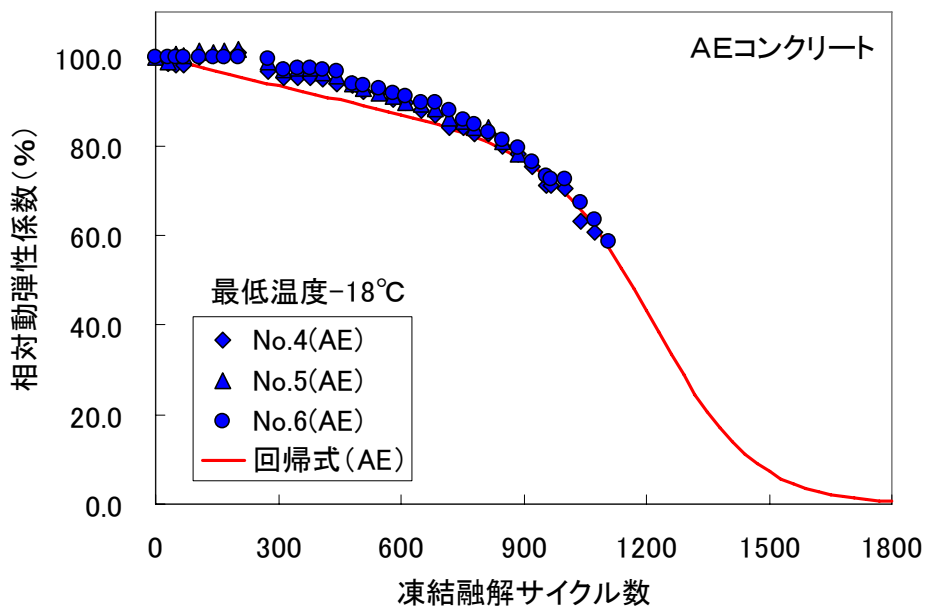


図 5.5.3 AE コンクリートの凍害モデルへの回帰

最低温度が-10℃の凍結融解試験の供試体の解析結果と試験結果の比較を図 5.5.4 に示す。最低温度を-10℃とする供試体については、相対動弾性係数が低下する前に試験を終了したものの、本試験の範囲では、ほぼ同様の傾向を示している。

以上の結果から、凍害モデルにより、促進凍結融解試験における相対動弾性係数の低下を再現することが可能と考えられる。

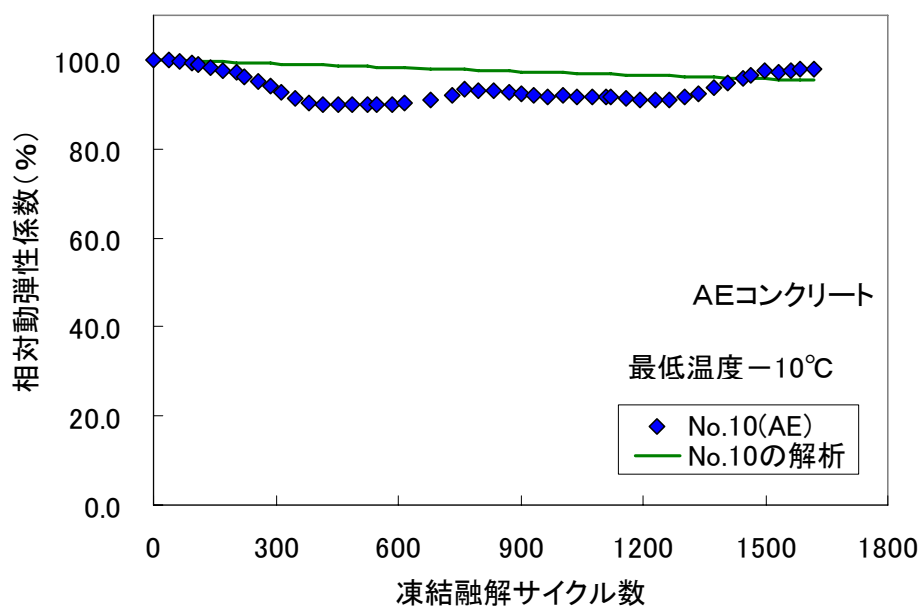


図 5.5.4 AE コンクリートの解析値と試験値の比較

5. 6 凍害モデルの係数に関する考察

(1) 促進凍結融解試験の AE コンクリートと用水路の係数の違いについて

促進凍結融解試験結果の回帰によって得られたプレーンコンクリートおよび AE コンクリートの凍害モデルの係数 a, b, c, d, e を，用水路の調査結果より得られた値と併せて表 5.5.1 に示す。

表 5.5.1 凍害モデルの係数

コンクリートの種類		a	b	c	d	e
促進凍結 融解試験	プレーン コンクリート	0.00014	0.005	40	0.25	-0.49
	AE コンクリート	0.000010	0.005	20	0.00050	-0.47
用水路	用水路の コンクリート	0.000018	0.005	10	0.030	0.75

同表より，促進凍結融解試験のプレーンコンクリートと AE コンクリートは，同一材料を用い，配合もほぼ同様であるが，係数の値が異なる結果となった。この理由として，プレーンコンクリートの相対動弾性係数が急激に低下したのに対し，AE コンクリートの相対動弾性係数は徐々に低下しており，破壊の形態に違いがあったことの影響が示唆される。調査した用水路のコンクリートの劣化に近い挙動を示しているのは，AE コンクリートの供試体の方と考えられる。

AE コンクリートと用水路のコンクリートの凍害モデルの係数の各値を比較してみると，式の形から，気泡間隔係数に関連する a の値が大きい用水路のコンクリートのほうが，AE コンクリートよりも，同一の気泡間隔係数において早期に相対動弾性係数の低下が生じる結果となっている。

また，飽水されていない空気量に関連する係数については， c, d および e の 3 つがあるために傾向が把握しにくくなっているが， c が大きい AE コンクリートの方が，

同じ凍結融解履歴における健全と劣化の違い，すなわち相対動弾性係数の高低が顕著に現れやすい結果である。 d および e については，相対動弾性係数の低下速度に影響を及ぼす係数であり， d が大きいほど，また e が小さいほど，早期に低下する傾向となるが，AE コンクリートおよび用水路のコンクリートでは，これらが相反する結果になっている。これは，回帰によって値を得ているために生じることであるが，全体としては， d の値が著しく小さい用水路のコンクリートの方が，飽水されていない空気量が同一の場合において，早期に相対動弾性係数の低下が生じる結果である。

例えば，硬化コンクリートの空気量および気泡間隔係数を，AE コンクリートの供試体と同様に，それぞれ 3.1% および $273\mu\text{m}$ とした場合の促進凍結融解試験結果を予測して比較すると，図 5.5.5 のようになる。

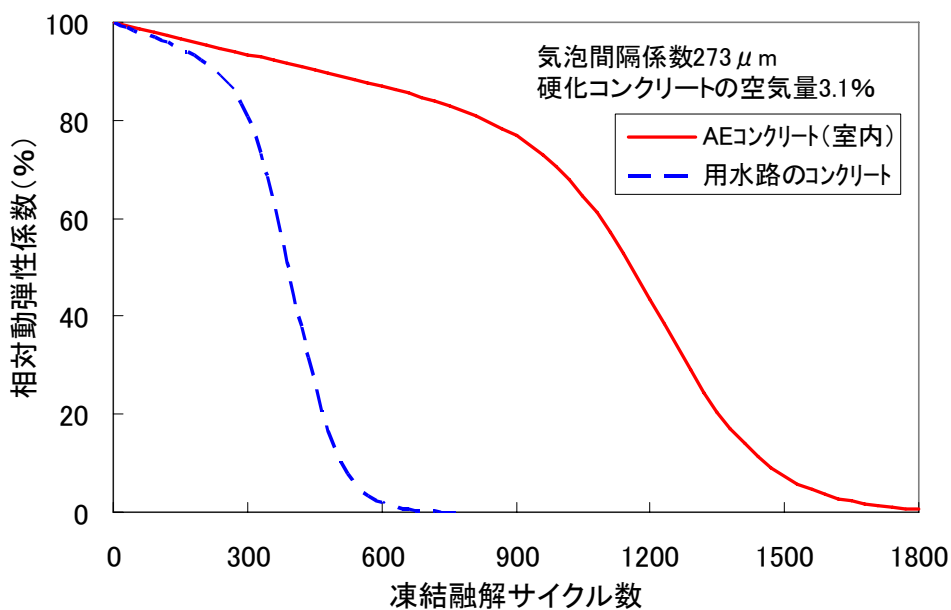


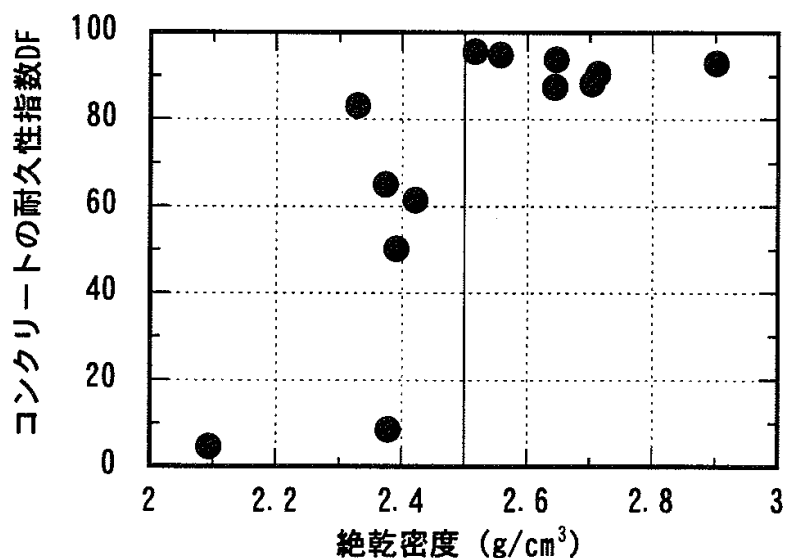
図 5.5.5 AE コンクリートと用水路のコンクリートの比較

(2) 促進凍結融解試験の AE コンクリートと用水路の使用材料について

凍害モデルの係数には、コンクリート強度や骨材種類などの使用材料が多大な影響を及ぼすことが考えられるため、本研究における AE コンクリートと用水路のコンクリートの使用材料について、以下に示す。

用水路のコンクリートの使用材料に関する情報は、配合のみしか現存しない。AE コンクリートおよび用水路のコンクリートの水セメント比について比較すると、それぞれ 55% および 50% であり、用水路のコンクリートの方が耐凍害性に優れた仕様であるものの、大差ない範囲と言える。

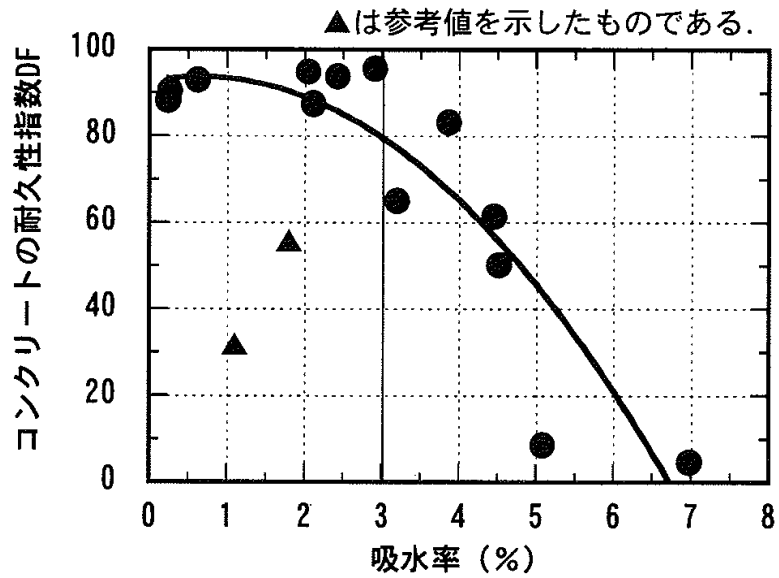
コンクリートの耐凍害性に大きな影響を及ぼす使用材料の要因の一つとして、粗骨材の品質がある。用水路のコンクリートについては、粗骨材の品質に関する情報が無いが、AE コンクリートについては、最大寸法 20mm、密度 2.65g/cm^3 および吸水率 0.62% の青梅産砕石が使用されている。阿波ら³⁾は、粗骨材の密度および吸水率と、耐久性指数の関係について、図 5.5.6 を示しており、それによれば、本研究の AE コンクリートに使用されている粗骨材は、耐凍害性に優れているものであることが確認される。また、砕石を使用したコンクリートについて、三和⁴⁾は、砂利を使用したものと同等の耐凍害性を有することを確認している。



(a) 粗骨材の密度と耐久性指数の関係

図 5.5.6 粗骨材の密度および吸水率と、耐久性指数の関係³⁾

(その 1: 粗骨材の密度と耐久性指数の関係)



(b) 粗骨材の吸水率と耐久性指数の関係

図 5.5.6 粗骨材の密度および吸水率と，耐久性指数の関係³⁾

(その 2：粗骨材の吸水率と耐久性指数の関係)

以上のことより，本研究で使用した AE コンクリートの粗骨材は耐凍害性に優れたものであり，このことが凍害モデルの係数に大きな影響を及ぼしたことが示唆される。今後，使用材料の違いが，凍害モデルの係数に及ぼす影響について，さらに考察していくことが必要と考えられる。

5. 7 促進凍結融解試験による凍害モデルの検証のまとめ

最低温度を -18°C とする促進凍結融解試験結果を基に凍害モデルの係数を推定し、得られた予測式を用いて、最低温度を -10°C とした促進凍結融解試験の相対動弾性係数を再現することが可能であるかを評価した。

その結果、プレーンコンクリートおよび AE コンクリートのいずれの供試体についても、解析結果と試験結果はほぼ同様の傾向を示すことが確認された。

このことから、促進凍結融解試験の結果などを基に凍害モデルの係数を設定することによって、コンクリートの相対動弾性係数の経時変化を再現することが可能であることが検証された。

また、凍害モデルの係数には使用材料の違いが影響を及ぼし、本研究の AE コンクリートと用水路のコンクリートの係数の違いには、粗骨材の品質が影響を及ぼした可能性があった。

第5章の参考文献

- 1) 気象庁：気象統計情報，<http://www.jma.go.jp/jma/index.html>
- 2) 鎌田英治，洪悦郎：人工軽量骨材コンクリートの凍害機構に関する考察，セメント技術年報，XXV，pp.285-290，1971
- 3) 阿波稔，庄谷征美，月永洋一：細孔構造特性に着目した粗骨材の品質とコンクリートの凍結融解抵抗性，コンクリートの耐久性データベースフォーマットに関するシンポジウム論文集，コンクリート技術シリーズ 46，pp.41-46，2002.12
- 4) 三和久勝：砕石コンクリートの耐久性について，セメント・コンクリート，No.281，pp.2-8，1970.7

第6章 水路施設を対象とした事例解析

6.1 水路施設の事例解析の方法

前掲の表 4.2.2 に示した用水路の調査結果を凍害モデルに代入し、回帰係数を求めて得られた式 (6.1.1) (前述の式(4.2.3)と同じ式) を用い、用水路が設置される岩見沢市の気象条件¹⁾ を用いて、水路施設の凍害進行予測およびコンクリートの気泡組織に関するパラメータスタディを行った。また、浸透性吸水防止材に関する暴露試験結果を基に、浸透性吸水防止材による耐凍害性向上効果に関する試算を行った。ここで用いた凍結融解の履歴は、前掲の表 4.2.1 の凍結融解回数より算出されるものであり、供用年数に応じた凍結融解履歴の影響を表す指標 FT は表 6.1.1 に示すとおりである。また、本解析では、コンクリートの品質の限界として、相対動弾性係数が 60% の状態に着眼して考察を行った。

$$P_p = \frac{100 \exp(-0.000018L \cdot FT - 0.005t)}{[1 + \exp\{-10(V_d - 0.030FT + 0.75)\}]} \quad (6.1.1)$$

ここで、 P_p : 相対動弾性係数 (%)

L : 気泡間隔係数 (μm)

FT : 凍結融解履歴の影響を表す指標

t : 供用期間 (年)

V_d : 飽水されていない空気量 (%)

表 6.1.1 凍結融解履歴の影響を表す指標 FT の値

供用年数	東向き	西向き	南向き	北向き
10年	7.3	5.8	8.39	5.2
20年	14.6	11.6	16.8	10.4
30年	21.9	17.4	25.2	15.6
40年	29.2	23.2	33.6	20.8
50年	36.5	29.0	42.0	25.9

ここで得られる解析結果は当該施設のコンクリートのみに該当するものであるが、これまでに、コンクリートの気泡組織が実構造物の凍害に及ぼす影響について示した知見は少なく、寒冷地のコンクリート構造物の耐凍害性に関する有益な知見になり得るものと考えられる。

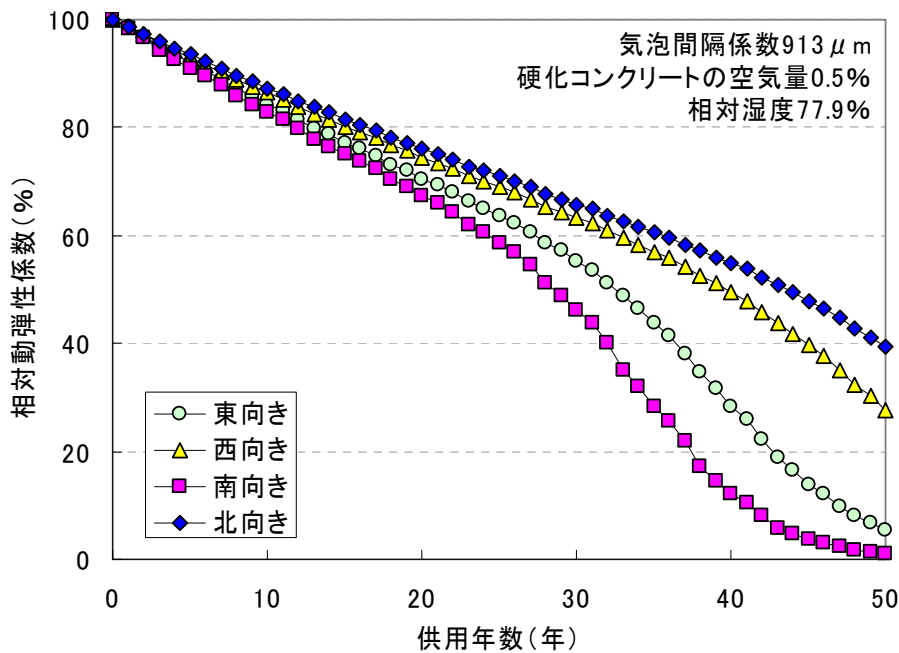
また、構造物の構築の際に、コンクリートの空気量と気泡間隔係数を別々に制御することは難しいと考えられるが、用水路の調査結果のように、既に構築された構造物の空気量と気泡間隔係数が必ずしも高い精度で相関しない場合があることや、一つの構造物の中でもこれらの値にばらつきが生じること、同一県内のレディーミクストコンクリートにおいても空気量と気泡間隔係数の関係が広い範囲に分布する調査結果があること²⁾などを考慮し、空気量および気泡間隔係数のパラメータスタディを、それぞれ行った。

6. 2 水路施設の凍害進行予測

用水路の供用開始から供用期間 50 年までの経時的な凍害の進行を予測した。検討ケースは表 6.2.1 に示す 2 ケースとした。ケース 1 では劣化部を想定しており，硬化コンクリートの空気量および気泡間隔係数として，それぞれ劣化部の平均値である 0.5% および 913 μm を与えた。一方，ケース 2 では，フレッシュコンクリートに 4.5% の空気量が混入され，かつ気泡間隔係数が 250 μm に抑制された場合を想定した。ここで，フレッシュコンクリートに 4.5% 混入された空気量が，施工の過程で 3.0% まで減少することについては，高橋の研究³⁾を参考に想定した。予測結果を図 6.2.1 に示す。

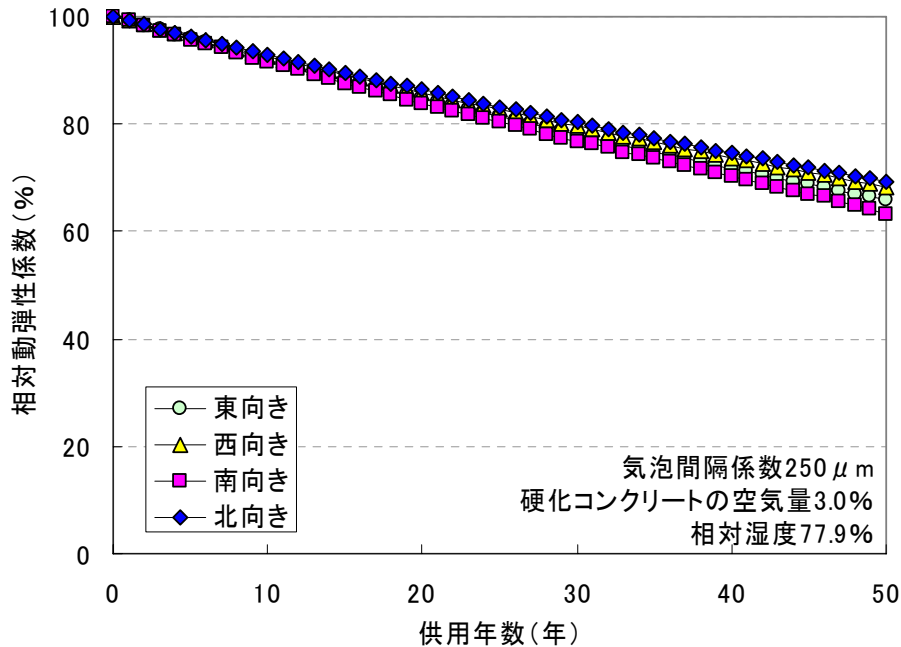
表 6.2.1 検討ケース

No.	硬化コンクリートの空気量	気泡間隔係数
ケース 1	0.5%	913 μm
ケース 2	3.0%	250 μm



(a) ケース 1

図 6.2.1 水路施設の凍害予測結果 (その 1: ケース 1)



(b) ケース 2

図 6.2.1 水路施設の凍害予測結果 (その 2: ケース 2)

ケース 1 では、経年に伴う相対動弾性係数の低下が著しい順に、南向き、東向き、西向き、北向きとなった。各方位の相対動弾性係数が 80%を下回る年数は 12 年から 15 年程度の範囲にあり、60%を下回る年数は 24 年から 35 年程度の範囲にあった。また、供用期間 50 年の時点の相対動弾性係数は、南向き、東向き、西向きおよび北向きにおいて、それぞれ 1%、5%、28%および 39%であった。

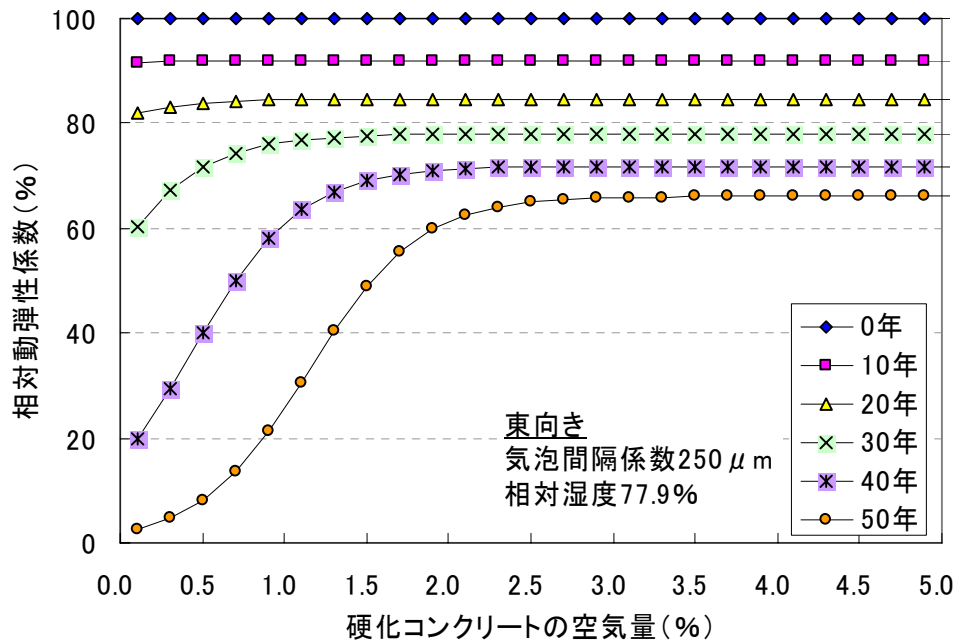
一方、ケース 2 では、方位の違いによる相対動弾性係数の違いがほとんど認められなかった。このことからコンクリートの気泡組織を適切に制御した場合、供用期間が 50 年程度の構造物における方位の違いは、大きな影響を及ぼさないことが推察される。また、相対動弾性係数が 80%を下回る年数は 26 年から 31 年の範囲にあり、いずれの方位においても 50 年の間に 60%を下回ることにはなかった。これまで、我が国の環境条件に対して、コンクリートの気泡間隔係数を 250 μ m 以下とすることが、経験的に推奨されてきたが⁴⁾、当該用水路の条件で硬化コンクリートの空気量が 3.0%の場合、気

泡間隔係数を 250 μm に抑制することにより, 50 年間にわたって相対動弾性係数を 60% 以上に確保できることが予測できる。なお, ACI の報告^{5), 6)} では, コンクリートを凍結融解作用から保護するために, 気泡間隔係数を 200 μm 以下に制御することを奨励している。

6. 3 水路施設のパラメータスタディ

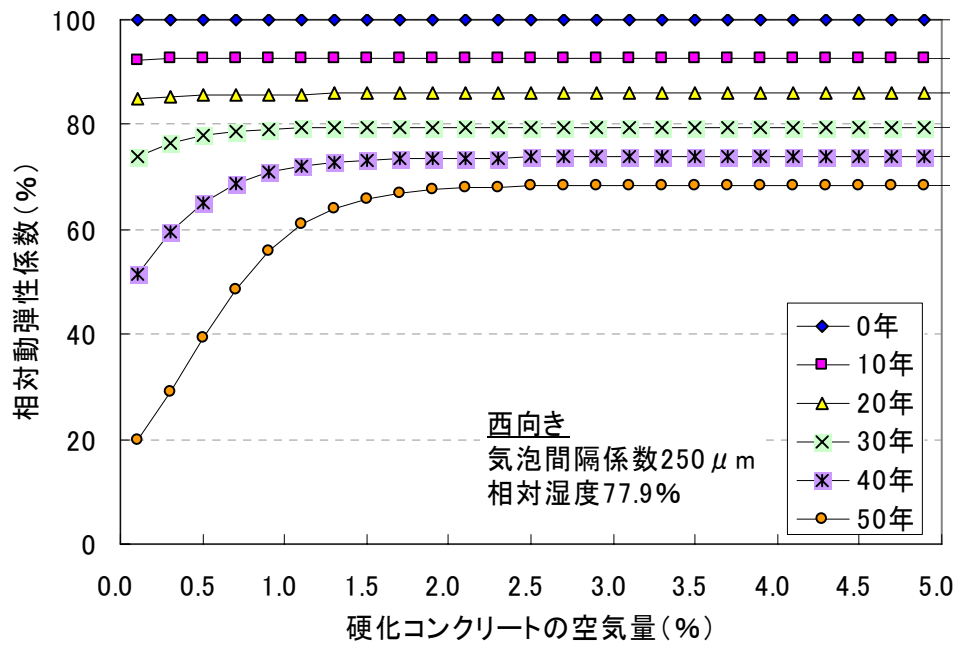
(1) 空気量に関するパラメータスタディ

硬化コンクリートの空気量について、気泡間隔係数を $250\mu\text{m}$ とした場合のパラメータスタディを行った。これは、コンクリート構造物の耐久性を確保するための気泡間隔係数として $250\mu\text{m}$ が推奨されていることを踏まえたものである。パラメータスタディの結果を図 6.3.1 に示す。

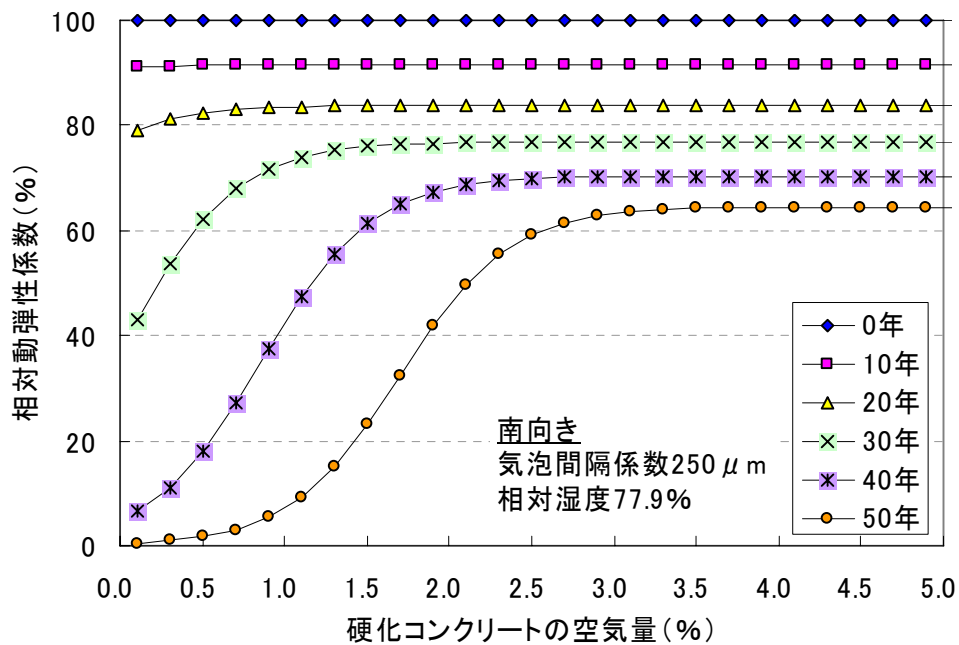


(a) 東向き

図 6.3.1 空気量に関するパラメータスタディ結果 (その 1: 東向き)

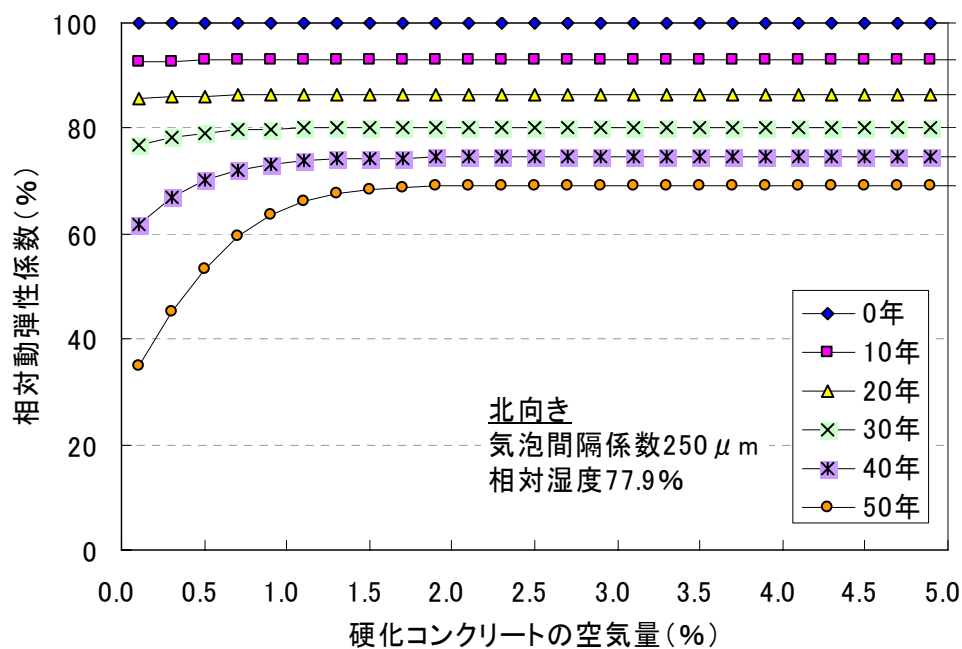


(b) 西向き



(c) 南向き

図 6.3.1 空気量に関するパラメータスタディ結果 (その2: 西向きおよび南向き)



(d) 北向き

図 6.3.1 空気量に関するパラメータスタディ結果 (その 3 : 北向き)

東向きでは、供用期間 20 年までは空気量に係わらず相対動弾性係数を 80%以上に保持できる結果となった。供用期間 30 年では、空気量に係わらず 80%を下回るものの、60%以上を保持できる結果となった。供用期間 40 年および 50 年になると、それぞれの期間で空気量が 0.9%程度以上および 1.9%程度以上の範囲にある場合、相対動弾性係数を 60%以上に保持できる結果となった。

西向きにおいても、東向きと同様の傾向が得られたが、空気量に対する相対動弾性係数の値が東向きよりも高くなった。この傾向は、特に空気量が 2.5%程度以下の範囲において顕著であった。供用期間 40 年では、空気量が 0.3%程度以上の範囲にある場合、相対動弾性係数を 60%以上に保持できる結果となった。同様に、供用期間 50 年では、空気量が 1.1%程度以上の範囲にある場合に、相対動弾性係数を 60%以上に保持できることが明らかとなった。

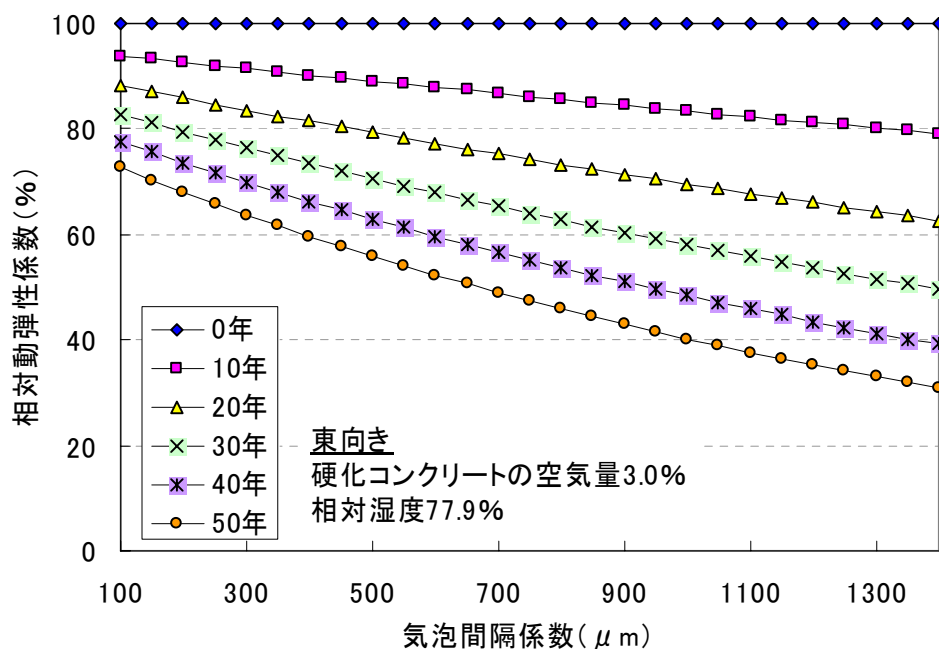
南向きでは、空気量に対する相対動弾性係数の値が、4 方位の中で最も低くなった。供用期間 30 年、40 年および 50 年において、相対動弾性係数を 60%以上に保持するた

めに必要な空気量は、それぞれ、0.5%程度以上、1.5%程度以上および2.5%程度以上であった。

北向きでは、空気量に対する相対動弾性係数の値が、4方位の中で最も高くなり、供用期間40年までは、空気量に係わらず相対動弾性係数を60%以上に保持できる結果となった。供用期間50年においては、空気量が0.7%程度以上の範囲にある場合、相対動弾性係数を60%に保持できる結果となった。実際には、気泡間隔係数が $250\mu\text{m}$ に制御された硬化コンクリートの場合、0.7%以上の空気量が確保される可能性が極めて高いことから、同図に示す結果は、北向きにおいて気泡間隔係数が $250\mu\text{m}$ であれば、50年間にわたる凍結融解抵抗性が確保されていると判断することができることを示している。

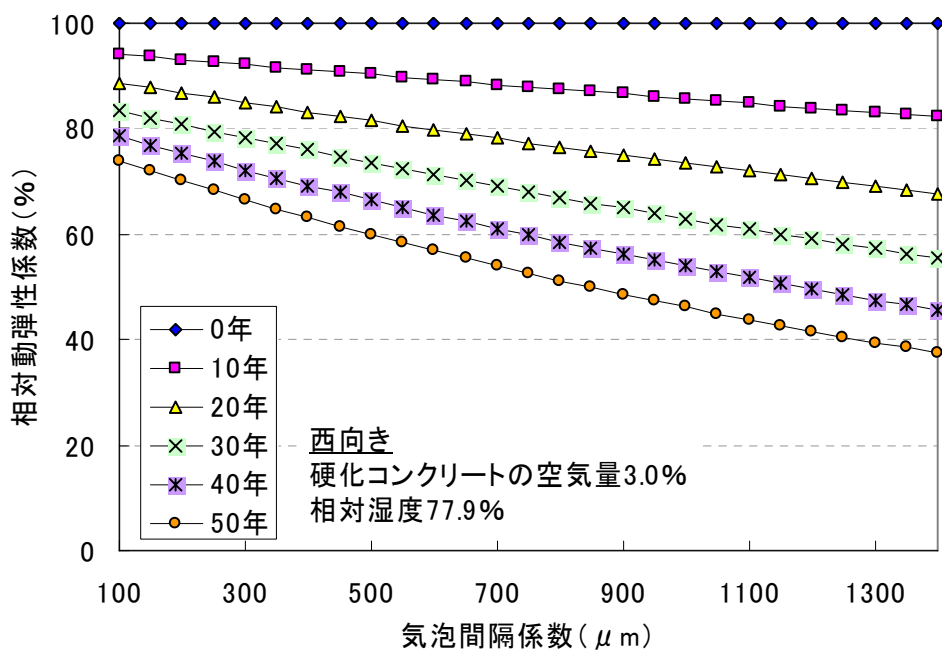
(2) 気泡間隔係数に関するパラメータスタディ

コンクリートの気泡間隔係数について、硬化コンクリートの空気量を3.0%とした場合のパラメータスタディを行った。これは、フレッシュコンクリートとして4.5%の空気量を含む場合を想定しているものである。パラメータスタディの結果を図6.3.2に示す。

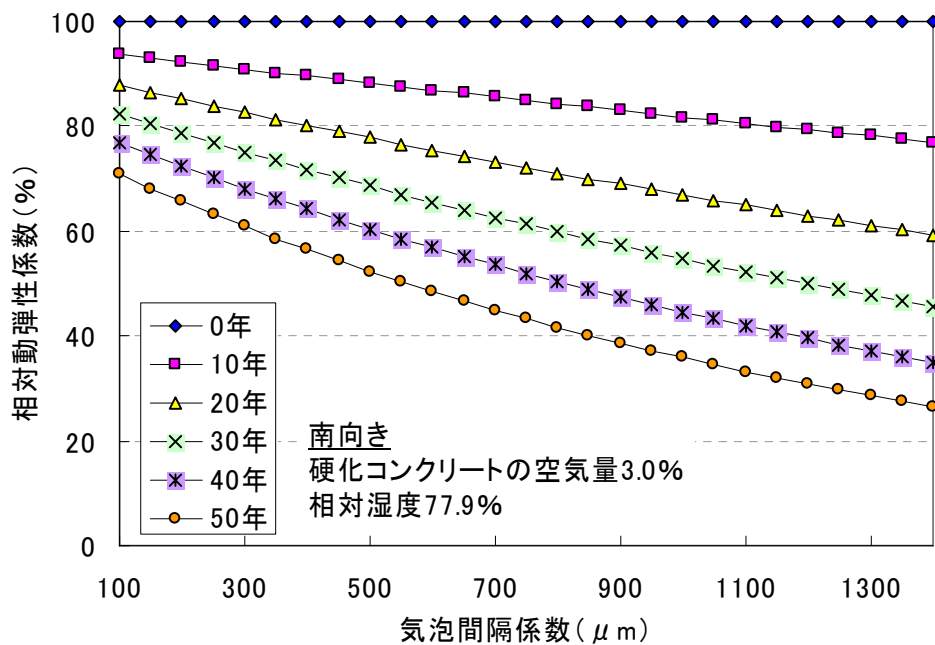


(a) 東向き

図 6.3.2 気泡間隔係数に関するパラメータスタディ結果 (その1: 東向き)



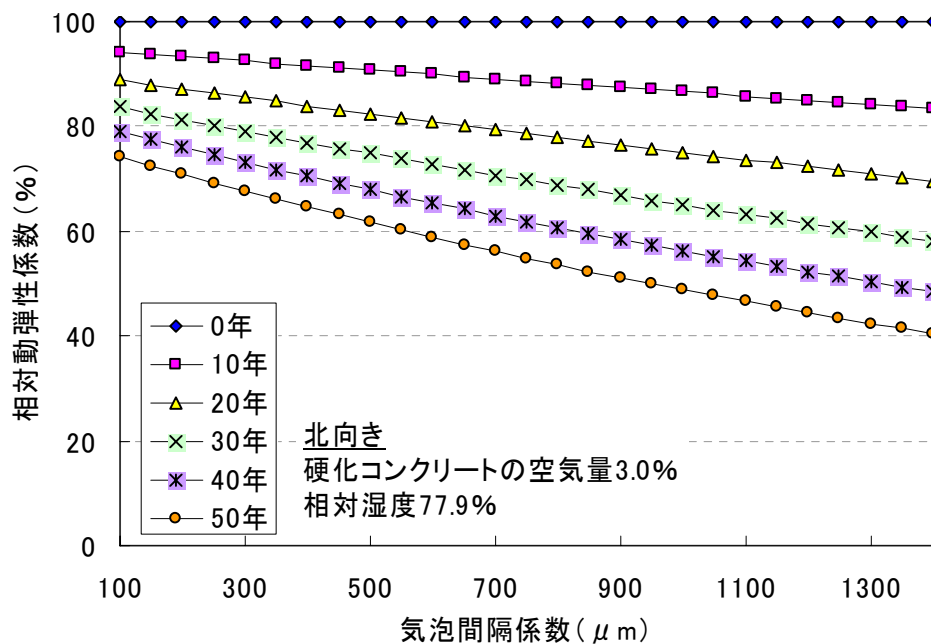
(b) 西向き



(c) 南向き

図 6.3.2 気泡間隔係数に関するパラメータスタディ結果

(その 2 : 西向きおよび南向き)



(d) 北向き

図 6.3.2 気泡間隔係数に関するパラメータスタディ結果 (その3: 北向き)

東向きでは、供用期間 20 年までは、気泡間隔係数が 1300 μm 程度以下の範囲にあれば相対動弾性係数を 60% 以上に保持できる結果となった。また、供用期間 30 年、40 年および 50 年において、相対動弾性係数を 60% に確保するために必要な気泡間隔係数は、それぞれ、900 μm 程度以下、600 μm 程度以下および 400 μm 程度以下であった。

西向きにおいても、東向きと同様の傾向が得られたが、気泡間隔係数に対する相対動弾性係数の値が東向きよりも高くなった。供用期間 30 年、40 年および 50 年において、相対動弾性係数を 60% に確保するために必要な気泡間隔係数は、それぞれ、1100 μm 程度以下、750 μm 程度以下および 500 μm 程度以下であった。

南向きでは、気泡間隔係数に対する相対動弾性係数の値が、4 方位の中で最も低くなった。供用期間 30 年、40 年および 50 年において、相対動弾性係数を 60% に確保するために必要な気泡間隔係数は、それぞれ、750 μm 程度以下、500 μm 程度以下および 300 μm 程度以下であった。

北向きでは、気泡間隔係数に対する相対動弾性係数の値が、4 方位の中で最も高く

なり、気泡間隔係数を 1300 μm 程度以内とすれば、供用期間 30 年まで相対動弾性係数を 60%以上に保持できる結果となった。供用期間 40 年および 50 年において、相対動弾性係数を 60%に確保するために必要な気泡間隔係数は、それぞれ 800 μm 程度以下および 550 μm 程度以下であることが明らかとなった。

(3) 供用期間 50 年の耐久性確保のための気泡組織

当該施設の相対動弾性係数を供用期間 50 年にわたって 60%以上に保持するために必要な空気量および気泡間隔係数を図 6.3.3 に示す。同図では、プロットよりも空気量が多い範囲あるいは気泡間隔係数が小さい範囲にある場合、相対動弾性係数を 60%以上に保持できることを示す。

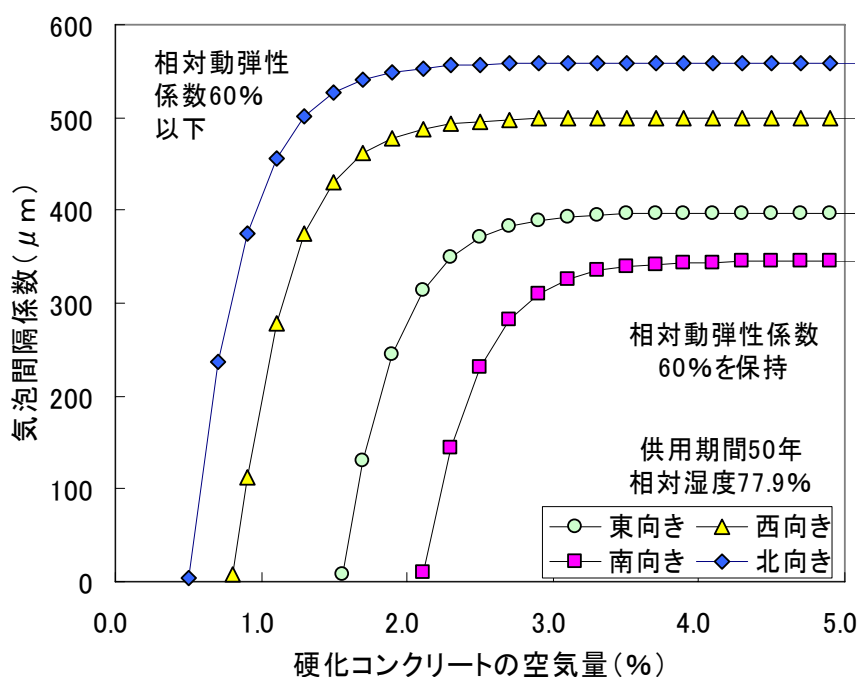


図 6.3.3 50 年間にわたって相対動弾性係数を 60%以上に保持するための
空気量および気泡間隔係数

同図より、当該施設の場合、供用期間 50 年にわたって相対動弾性係数を 60%以上に保持するためには、気泡間隔係数によらず最低限必要な空気量の範囲が存在し、同

様に, 空気量によらず最低限必要な気泡間隔係数の範囲が存在することが確認される。また, 例えば, 硬化コンクリートの空気量を 3.0%程度混入させた場合であっても, 気泡間隔係数は, 方位によって 320 μm から 560 μm 程度の範囲で違いがあり, 同様に, 気泡間隔係数を 250 μm 程度まで小さくしても, 空気量は, 方位によって 0.7%から 2.6%程度の範囲で違いがあることが確認される。

本検討では, 一例として供用期間 50 年および相対動弾性係数 60%に着目した結果を示したが, 対象とする構造物の重要度などに応じて予定供用期間および相対動弾性係数を設定することにより, コンクリートに要求される空気量および気泡間隔係数を明確にすることができることが明らかとなった。

6. 4 浸透性吸水防止材による耐凍害性向上効果の定量化に関する試算

(1) 試算の目的

これまでの検討により、コンクリート構造物の耐凍害性に対して、空気量および気泡間隔係数が多大な影響を及ぼすことが明らかとなった。したがって、コンクリート構造物の耐凍害性を確保するためには、施工の際、これらの値を管理していくことが重要であり、現在のところ、現位置におけるフレッシュコンクリートの空気量測定による品質管理が行われることが一般的である。気泡間隔係数については、浜ら⁷⁾による浮力法や、Ansari⁸⁾による光ファイバセンサを利用した方法などの検討が進められており、実用化が望まれる状況にある。

しかし、空気量および気泡間隔係数は、前述のとおり、施工の際に空気の巻き込みや抽出などが生じて不均一になる可能性があるのみでなく、コンクリートの練上り温度の影響⁹⁾や運搬時間などの影響も受けるため、構築されたコンクリート構造物の空気量および気泡間隔係数が、所要の範囲に入っていないような状況もあり得るものと考えられる。実際、本研究において調査対象とした用水路においても、これらの値には、広い範囲でばらつく傾向が認められた。硬化コンクリートの空気量および気泡間隔係数が、所要の範囲より大きく外れてしまった場合には、構造物の撤去および再構築を検討すべきであるが、所要の範囲に近い範囲で外れた場合には、耐凍害性を向上させるための予防保全などを検討することが合理的である。その場合、実施しようとする耐凍害性向上対策による効果を、凍害モデルによって定量化することが求められる。ここで、耐凍害性向上対策は、簡易でコストが低く、その後の維持管理が容易であることが望ましいと考えられる。例えば、表面被覆工法の場合、何層も塗重ねを行うことや、材料自体が劣化するために10年間隔程度で再施工が必要となることから、この条件には合致しない。これらを満足する方法として、近年、学協会などで技術的な知見が整理されつつある浸透性吸水防止材を塗布する方法^{10), 11), 12)}が考えられる。

以上の背景より、本試算では、用水路の空気量および気泡間隔係数が所要の値を得られなかった場合を想定し、浸透性吸水防止材の中でも長期的な耐久性が期待できる¹³⁾ シラン・シロキサン系浸透性吸水防止材¹⁴⁾を適用した場合の耐凍害性向上効果を凍害モデルによって定量的に表すことを試みた。

(2) 浸透性吸水防止材の効果に関する暴露試験

a) 浸透性吸水防止材の効果の定量化について

浸透性吸水防止材は、コンクリート表面に塗布することによって内部に浸透し、水の浸透を抑制する層を形成する材料である。コンクリート中の水分量を抑制できることから、耐凍害性向上に有効と考えられる。

最近では、様々な研究において、多岐にわたる浸透性吸水防止材の性能を統一的に評価しようとする検討^{13), 15), 16)}が行われるなど、技術的な知見が蓄積されつつあるが、凍害モデルを適用するためには、その効果をより定量的に表し、解析への反映方法を検討する必要がある。よって、凍害および塩害の複合劣化環境である北海道の沿岸部における暴露試験を実施し、その効果を定量的に評価することとした。ここで、凍害モデルでは複合劣化を対象としてないが、暴露試験では、より厳しい条件となる複合劣化環境を選定した。

b) 暴露試験の概要

①コンクリート供試体の概要

使用材料および配合を、それぞれ表 6.4.1 および表 6.4.2 に示す。

表 6.4.1 使用材料

項目	記号	摘要
水	W	上水道水，密度：1.0g/cm ³
セメント	C	普通ポルトランドセメント，密度：3.16g/cm ³
細骨材	S	新十津川産川砂，表乾密度：2.58g/cm ³ ，粗粒率：2.75，吸水率：2.26%
粗骨材 1	G1	毘砂別産碎石，表乾密度：2.66g/cm ³ ，実績率：58.8%，吸水率：1.60%
粗骨材 2	G2	毘砂別産碎石，表乾密度：2.65g/cm ³ ，実績率：58.3%，吸水率：1.57%
膨張材	E	エトリンガイト系
混和剤	Ad	高性能 AE 減水剤（変性リグニンスルホン酸系）

表 6.4.2 コンクリート配合

G _{max} (mm)	スラン プ(cm)	W/C (%)	空気 量(%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)						Ad (C%)
					W	C	E	S	G1	G2	
40	8	44.3	5.5	43.5	138	312	30	765	477	583	1.00

暴露試験には、径 125mm および高さ 250mm の円柱供試体を用いた。供試体作製の際には、コンクリートの打込み後、28 日間の湿潤養生を行った。

②シラン・シロキサン系浸透性吸水防止材の概要

浸透性吸水防止材は、原料成分によってシリコーン系、非シリコーン系および混合系に分類される¹⁰⁾。本研究に適用したシラン・シロキサン系浸透性吸水防止材は、シリコーン系に分類されるものであり、シリコーン分子を 80%程度含有し、溶媒として水を使用するものである。シリコーン系の浸透性吸水防止材は、シリコーンの疎水基がコンクリート表面および細孔表面に並ぶことで吸水防止効果を発揮する材料であり、非シリコーン系および混合系と違って細孔が充てんされないため、液体を透過せず気体を透過するという特長を有する¹⁰⁾。

本研究で対象としたシラン・シロキサン系浸透性吸水防止材は、JSCE-K571 表面含浸材の試験方法 (案) -2004 に準じて実施された共通試験¹¹⁾において、図 6.4.1 に示す性能を示している。同図より、モルタル基盤に対して 4mm 程度浸透し、中性化の抑制率は 40%程度であるものの、塩分浸透抑制率、透水抑制率、吸水抑制率および透湿性については、90%以上の高い値を示すことが確認される。

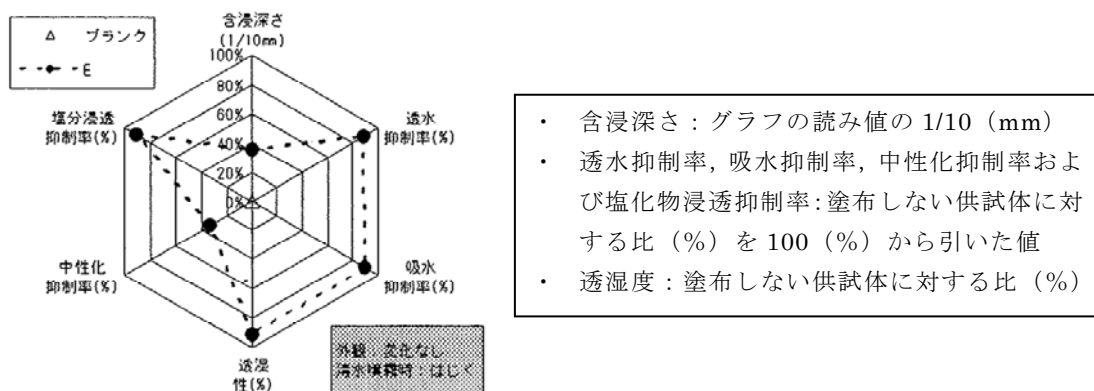


図 6.4.1 共通試験結果¹¹⁾

③ シラン・シロキサン系浸透性吸水防止材の塗布方法

コンクリート供試体の養生後，高周波式水分計による表面水分率が 5.0%以下になったことを確認してから，刷毛を用いて全面に 200g/m² のシラン・シロキサン系浸透性吸水防止材を塗布した。その際，円柱供試体の面積に対して正確な塗布量となるように，供試体の重量を管理しながら塗布を行った。

④ 試験項目および方法

試験項目および方法を表 6.4.3 に示す。

表 6.4.3 試験項目および方法

項目	試験方法
供試体の外観	目視による観察
供試体の重量	現地における重量測定
吸水防止層の深さ	割裂面に水を噴霧し，濡れ色にならない範囲を測定
塩化物イオン量	表面より 10mm 間隔の全塩化物イオン量を JIS A 1154 硬化コンクリート中に含まれる塩化物イオンの試験方法-2003 に準じて測定
中性化深さ	JIS A 1152 コンクリートの中性化深さの測定方法-2002 に準じて測定

⑤ 暴露場所の概要

2002 年 11 月に，北海道の日本海側に位置する石狩市浜益区の沿岸部に，シラン・シロキサン系浸透性吸水防止材を塗布した供試体と塗布しない供試体を設置し，暴露を開始した。供試体設置箇所は，写真 6.4.1 に示すように，急勾配の小規模河川の河口に位置しており，汀線より数メートルの距離にある。また，海からの強風による風雨および風雪があり，多量の飛来塩分が推察される環境にある。浜益区の 2002 年から 2007 年までの凍結融解回数，降水量の合計および日照時間¹⁾を表 6.4.4 に示す。



写真 6.4.1 供試体設置箇所の状況

表 6.4.4 浜益区の凍結融解回数，降水量の合計および日照時間¹⁾

西暦	最低気温ごとの凍結融解回数				降水量の 合計(mm)	日照時間 (h)
	0~-5℃	-5~-10℃	-10℃以下	合計		
2002	34	8	5	47	1256	1325.1
2003	31	16	6	53	943	1455.1
2004	43	12	6	61	1268	1354.8
2005	25	16	14	55	1400	1469.2
2006	45	12	5	62	1056	1407.3
2007	49	18	7	74	970	1645.2
平均	37.9	13.6	7.2	58.7	1148.8	1442.8
合計	227	82	43	352	6893	8656.7

これまでに、暴露開始から1年目、2年目、4年目¹⁷⁾ および5年目の4材齢について試験を実施した。現地で供試体の重量を測定した際の天候、気温および供試体数は、表 6.4.5 に示すとおりである。

表 6.4.5 現地測定の日候、気温および供試体数

年数	現地調査 年月日	天候	浜益の気温 (°C)		現地測定供試体数	
			最高	最低	塗布有り	塗布無し
1年目	2003.10.27	晴れ	13.9	6.8	30	30
2年目	2004.11.26	晴れ	10.6	5.7	27	27
4年目	2006.11.24	雪	3.7	-0.1	24	24
5年目	2007.11.22	雪	-0.5	-4.7	21	21

c) 試験結果

① 供試体外観

複合劣化環境下において5年間暴露を行った供試体を目視で観察した結果、シラン・シロキサン系浸透性吸水防止材を塗布した供試体および塗布しなかった供試体ともに、ひび割れ、ポップアウトおよびスケーリングは認められなかった。

この供試体に水を噴霧した際の状況を写真 6.4.2 に示す。



(a) 塗布有り



(b) 塗布無し

写真 6.4.2 暴露5年目における表面の撥水性

同写真に示すように、シラン・シロキサン系浸透性吸水防止材を塗布した供試体の表面の撥水性は、暴露5年目においてほとんど認められなかった。これまでの調査結果も含めると、表面の撥水性は、暴露2年目まで若干認められたが、暴露4年目¹⁷⁾および5年目には、ほとんど認められない結果である。

②供試体の重量

供試体の重量測定結果を図6.4.2に示す。同図に示すように、暴露5年目までの全測定において、シラン・シロキサン系浸透性吸水防止材を塗布した供試体の方が、塗布しない供試体よりも150g程度軽い結果となった。これは、コンクリートに含まれる水分量の違いによるものと考えられる。すなわち、各測定において、シラン・シロキサン系浸透性吸水防止材を塗布しない供試体は比較的湿潤した状態にあったが、塗布した供試体では、外部からの水の浸透が抑制され、内部の水分が水蒸気として放出されていたことが考えられる。

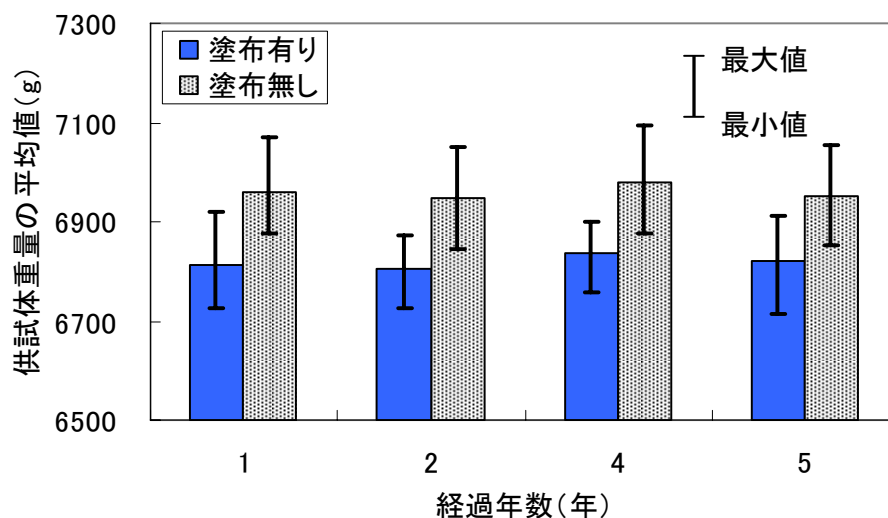


図 6.4.2 現位置における供試体重量

③吸水防止層の厚さ

吸水防止層の深さの測定結果を図6.4.3に示す。同図には、上面および底面の平均値を示した。同図より、暴露5年目までおおむね4mm以上の吸水防止層が確認され

た。また、吸水防止層の深さの経時変化については、1年目の値が小さいことから分かるように、ばらつきが含まれる測定結果となっており、今後、さらにデータを蓄積して考察することが必要と考えられる。

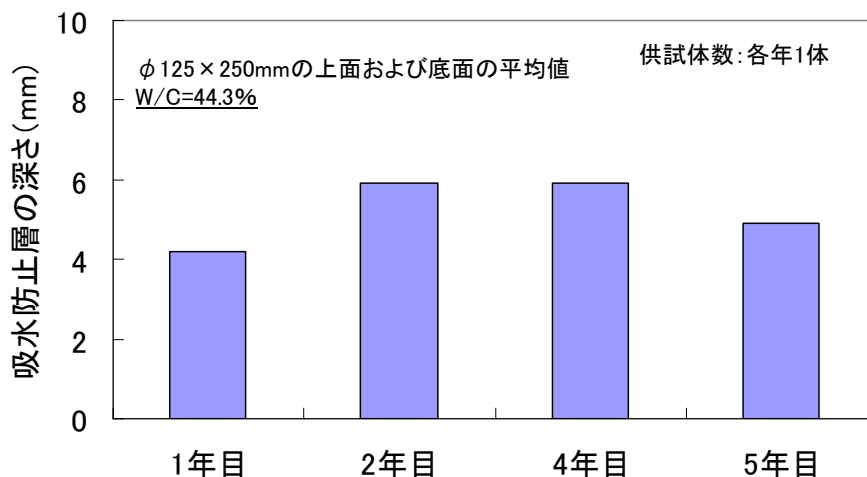


図 6.4.3 吸水防止層の深さ

④塩化物イオン量

塩化物イオン量測定結果を図 6.4.4 に示す。

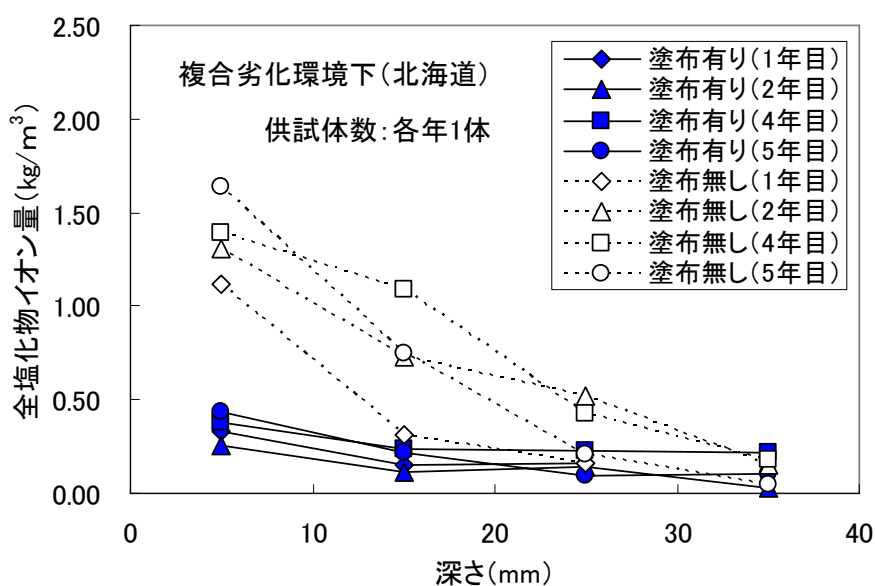


図 6.4.4 塩化物イオン量

暴露5年目までの結果を比較すると、シラン・シロキサン系浸透性吸水防止材を塗布しない供試体では、深さ5mmの1.6kg/m³から深さ35mmまで拡散している傾向が認められるのに対し、塗布した供試体では、深さ5mmにおいて塗布した供試体の1/4程度となる0.4kg/m³であり、それより内部にはほとんど拡散していなかった。この結果より、シラン・シロキサン系浸透性吸水防止材を塗布した供試体では、深さ4～6mmの吸水防止層よりも内部への水の浸透が抑制されたことに伴い、塩化物イオンの浸透が抑制されたことが考えられる。

⑤ 中性化深さ

中性化深さ測定結果を図6.4.5に示す。同図中には、中性化深さが時間の0.5乗に比例するものとした回帰式を示した。

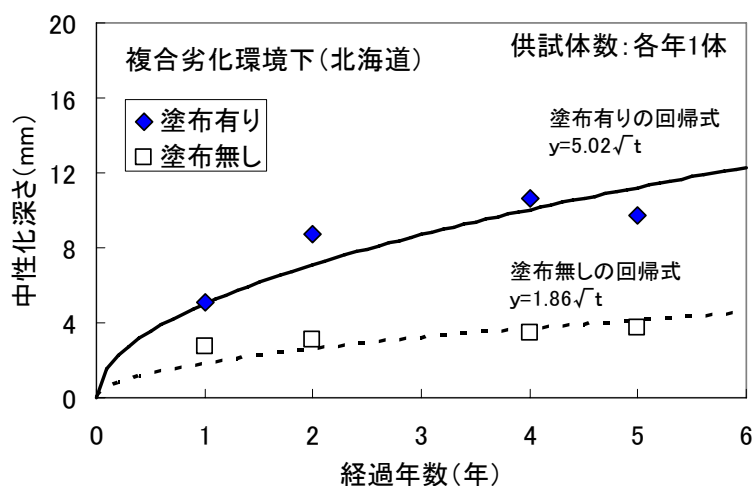


図 6.4.5 中性化深さ

シラン・シロキサン系浸透性吸水防止材を塗布した供試体の中性化深さの方が、塗布しない供試体よりも大きな値となり、回帰式の定数である中性化速度係数が2.7倍程度の値となった。この理由として、前述のとおり、シラン・シロキサン系浸透性吸水防止材を塗布したことによってコンクリートに含まれる水分量が減少し、結果として、中性化が進行しやすい含水量になったことが推察される。

以上の結果を踏まえ、シラン・シロキサン系浸透性吸水防止材による効果をコンク

リートの含水量の変化として捉え、その定量化を図るために、以下の検討を行った。

d) 浸透性吸水防止材を塗布したコンクリートの含水量の定量化に関する検討

①室内における重量測定の概要

複合劣化環境下で5年間暴露した供試体を回収し、91日間の水中浸漬後、表面の水分を拭き取って重量測定を行った。その後、21日間の105℃炉乾燥を行い、重量測定を行った。供試体数は、シラン・シロキサン系浸透性吸水防止材を塗布した供試体および塗布しない供試体について各1体とした。

測定対象とした供試体には、現地における暴露1年目、2年目、4年目および5年目の重量測定結果があるため、これら4材齢の平均値と、上記の測定結果を対比させて検討を行った。

②測定結果および考察

供試体重量の測定結果を図6.4.6に示す。

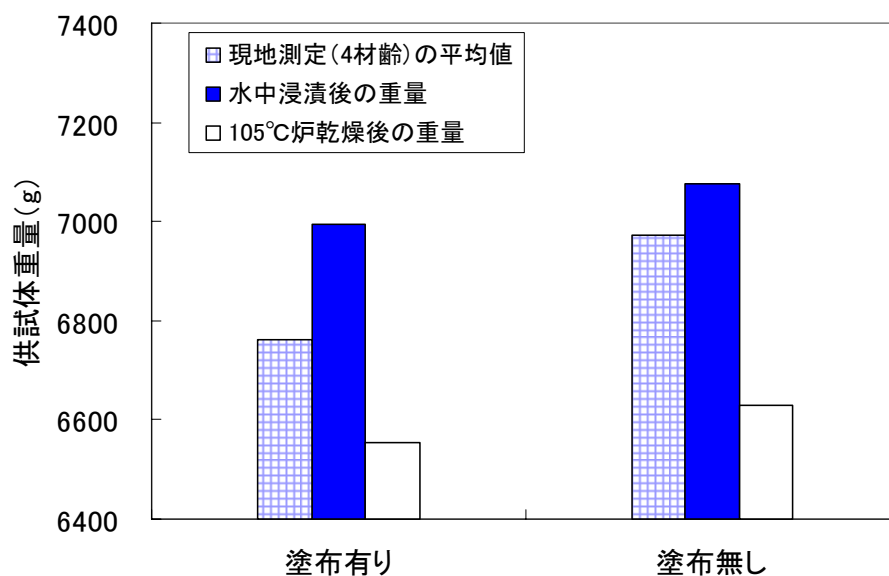


図 6.4.6 室内における供試体重量

同図より、シラン・シロキサン系浸透性吸水防止材を塗布した供試体および塗布しない供試体について、水中浸漬後の含水量を100%として、現地測定重量から105℃炉

乾燥後重量を引いた現地における含水量の割合を算出すると、それぞれ 47.2%および 76.2%となる。この値を基に、秋田ら¹⁸⁾による平衡含水率曲線を用いて相対湿度を逆算すると、それぞれ 42.4%および 82.1%となり、シラン・シロキサン系浸透性吸水防止材を塗布しない供試体の相対湿度の逆算値は、沿岸部において、おおむね妥当と考えられる範囲となる。一方、シラン・シロキサン系浸透性吸水防止材を塗布した供試体の含水量は、相対湿度が比較的高い条件であるにも関わらず、相対湿度 40%程度に相当する量となった。鄭ら¹⁹⁾によれば、コンクリートの中酸化速度係数は、相対湿度 40~50%程度の場合を最大値として、それよりも相対湿度が高くなるに従って低い値となる。例えば、水セメント比が 55%のモルタルの試験結果¹⁹⁾では、相対湿度 40%の中酸化速度係数が相対湿度 80%の値の 2.6 倍程度となり、本試験の結果とほぼ一致する。

浸透性吸水層の耐久性については、ごく表面が磨耗や紫外線などで劣化する可能性があるものの、内部の層は磨耗や紫外線によって劣化することがなく、中酸化が進行することによってアルカリによる加水分解が生じにくくなるため、長期的に保持されるものと推察される。

以上の結果より、浸透性吸水防止材の定量的な効果はコンクリート中の含水量が相対湿度 40%に相当する量まで低減するものとして、凍害モデルによる検討を行った。

(3) 浸透性吸水防止材による耐凍害性向上効果の試算

前述の凍害進行予測結果のとおり、当該用水路では、フレッシュコンクリートに 4.5%の空気量が混入され、かつ気泡間隔係数が 250 μm に抑制された場合、凍害に対して 50 年間にわたる耐久性を保持することができる。しかし、北海道の厳しい環境下では、例えば、硬化コンクリートの空気量および気泡間隔係数が、それぞれ 1.5%および 300 μm となると、図 6.4.7 (前掲の図 6.3.3 を基に作成) に示すように、南向き面および東向き面における耐久性が確保されない結果となる。ここで、硬化コンクリートの空気量の 1.5%という値は、フレッシュコンクリートの空気量が、 $4.5 \pm 1.5\%$ の下限値の 3.0%となる場合を想定したものであり、前述と同様に、高橋の研究³⁾を参考に設定した。

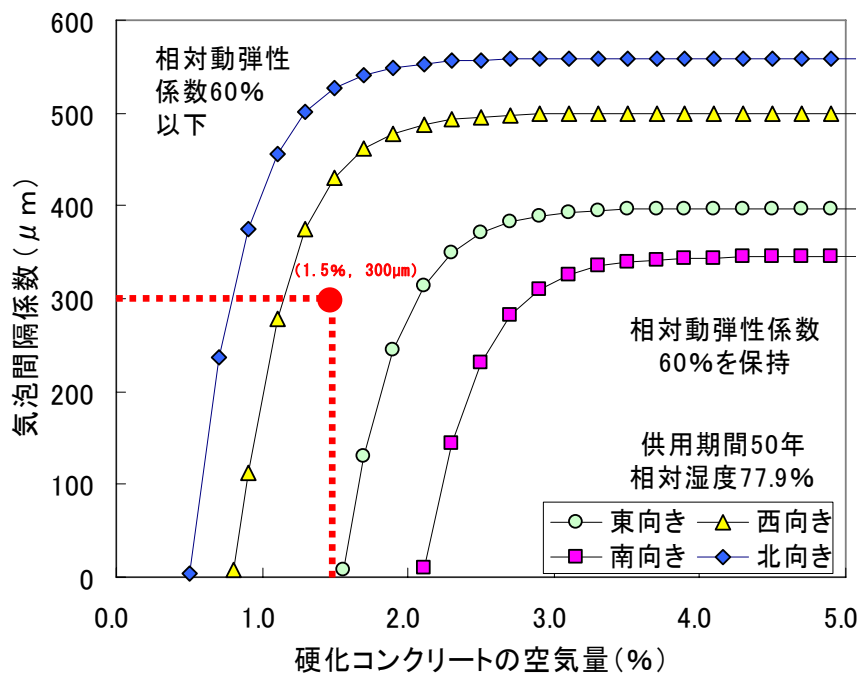


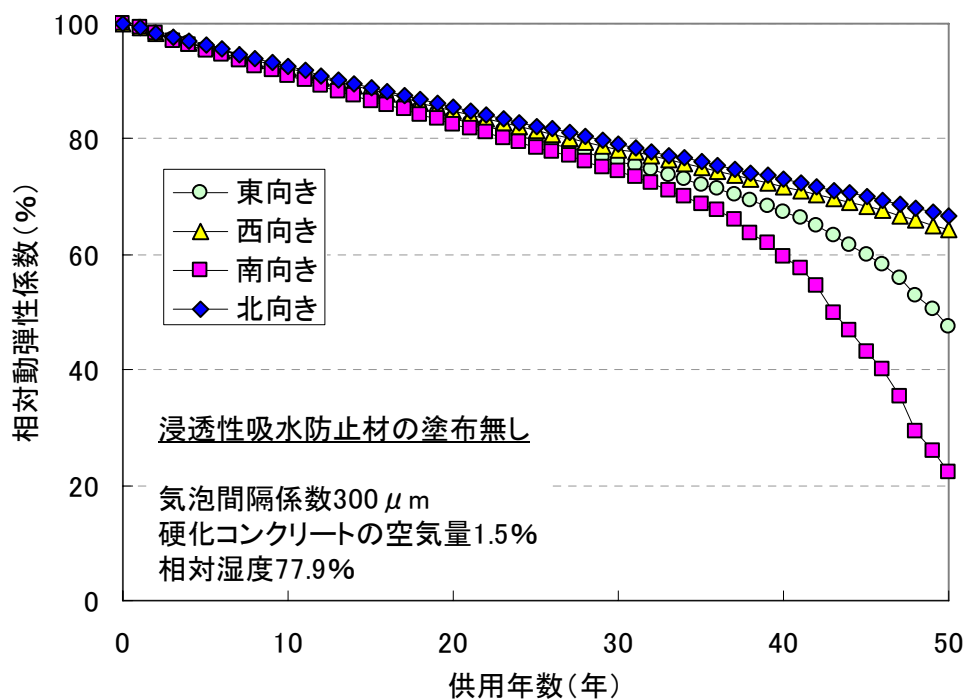
図 6.4.7 硬化コンクリートの空気量および気泡間隔係数がそれぞれ 1.5%および 300 μm の場合の耐久性

本試算では、このような状況に際して、シラン・シロキサン系浸透性吸水防止材を適用することによる相対動弾性係数の向上効果について解析を行った。試算の条件を表 6.4.6 に示す。

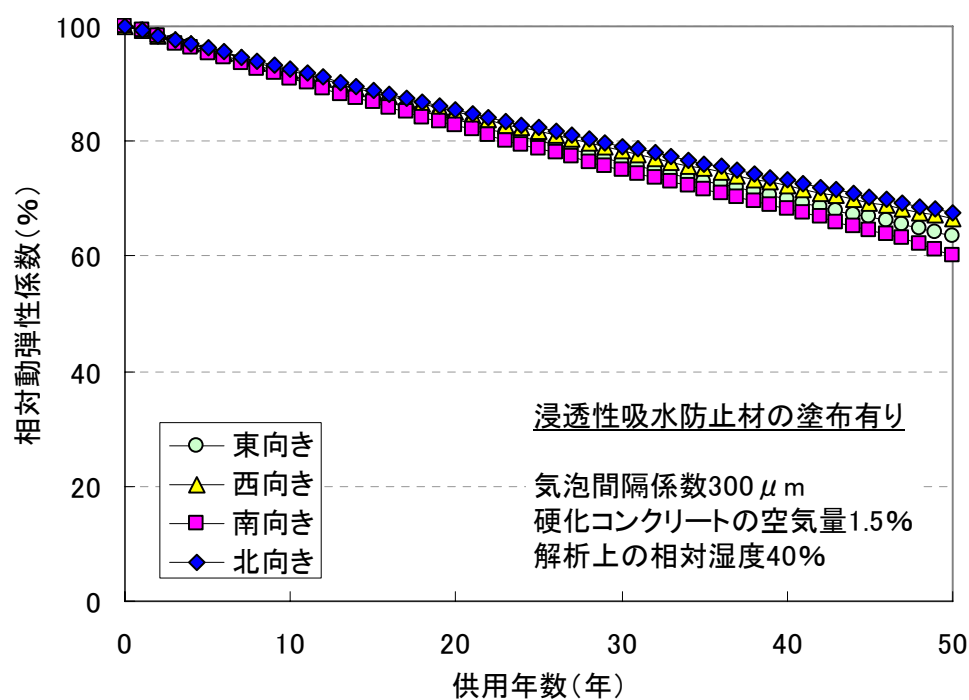
表 6.4.6 試算の条件

No.	硬化コンクリートの空気量	気泡間隔係数	浸透性吸水防止材の塗布の有無
ケース 1	1.5%	300 μm	無し (相対湿度 77.9%)
ケース 2	1.5%	300 μm	有り (解析上の相対湿度 40%)

浸透性吸水防止材の効果に関する試算結果を図 6.4.8 に示す。



(a) 浸透性吸水防止材の塗布無し



(b) 浸透性吸水防止材の塗布有り

図 6.4.8 浸透性吸水防止材の効果に関する試算結果

同図より、検討対象とした用水路の場合、施工などの要因により、硬化コンクリートの空気量および気泡間隔係数が、それぞれ 1.5% および 300 μ m となると、凍結融解回数が多い南向きおよび東向きの面では、それぞれ 40 年および 45 年程度で相対動弾性係数が 60% を下回り、50 年間にわたる耐久性を保持することができなくなることが確認される。

一方、これに対する対策として、簡易で比較的成本が低いシラン・シロキサン系浸透性吸水防止材を適用することにより、50 年間にわたって相対動弾性係数が 60% 以上の範囲に保持されることが確認される。

硬化コンクリートの空気量および気泡間隔係数が、この程度の範囲となることは十分に想定されることであり、本試算の方法により、浸透性吸水防止材による耐凍害性の向上効果を定量的に把握することが可能であることが確認された。

6. 5 水路施設の事例解析のまとめ

(1) 水路施設の凍害進行予測のまとめ

北海道に位置する水セメント比が 50% の RC 水路の事例解析により，硬化コンクリートの空気量および気泡間隔係数がそれぞれ 3.0% 以上および 250 μm 以下に抑制されれば，方位によらず，50 年間にわたって相対動弾性係数を 60% 以上に保持することができる結果を得られた。このことより，コンクリート構造物の凍害は，日射の影響によって，南向き，東向き，西向きおよび北向きの順に著しくなる傾向を示すが，コンクリートの気泡組織が適切に制御される場合には，方位の違いの影響は小さいことが推察される。

(2) 水路施設のパラメータスタディのまとめ

北海道の空知地区に位置する水セメント比が 50% の RC 水路を事例として，硬化コンクリートの空気量が相対動弾性係数に及ぼす影響の定量的な評価結果を示した。この事例において，気泡間隔係数が 250 μm である場合，最も緩やかな凍害環境となる北向きでは，空気量を 0.7% 程度確保することにより，50 年間にわたって相対動弾性係数を 60% に保持することができるものと推察される。一方，最も厳しい凍害環境である南向きでは，空気量を 2.5% 以上確保することにより，50 年間にわたって相対動弾性係数を 60% に保持することができるものと推察される。

同様に，北海道の空知地区に位置する水セメント比が 50% の RC 水路を事例として，コンクリートの気泡間隔係数が凍害に及ぼす影響の定量的な評価結果を示した。この事例において，硬化コンクリートの空気量が 3.0% 確保される場合，最も緩やかな凍害環境となる北向きでは，気泡間隔係数を 550 μm 程度以下に抑制することにより，50 年間にわたって相対動弾性係数を 60% に保持することができるものと推察される。一方，最も厳しい凍害環境となる南向きでは，気泡間隔係数を 300 μm 程度以下に抑制することにより，50 年間にわたって相対動弾性係数を 60% 程度に保持することができるものと推察される。

(3) 浸透性吸水防止材による耐凍害性向上効果の定量化に関する試算のまとめ

コンクリート構造物の空気量および気泡間隔係数は，広い範囲でばらつく可能性が

あるため、所要の範囲を若干外れることがありえる。その場合、簡易でコストが低く、その後の維持管理が容易なシラン・シロキサン系浸透性吸水防止材を適用することが有効と考え、暴露試験結果に基づいた効果の定量化を試みた。その結果、シラン・シロキサン系浸透性吸水防止材を塗布することにより、コンクリートの含水量が相対湿度 40%程度の場合に相当する量まで低減することが確認された。この知見を基に、北海道の空知地区に位置する水セメント比が 50%の RC 水路を事例として、シラン・シロキサン系浸透性吸水防止材の適用が、相対動弾性係数の経年変化に及ぼす影響を定量的に示した。この事例において、空気量および気泡間隔係数が、それぞれ 1.5%および 300 μ m となった場合でも、耐凍害性向上対策としてシラン・シロキサン系浸透性吸水防止材を塗布することにより、50 年間にわたって相対動弾性係数を 60%程度に保持することができるものと推察される。

第6章の参考文献

- 1) 気象庁：気象統計情報，<http://www.jma.go.jp/jma/index.html>
- 2) 藤原忠司，佐藤匡昭，鈴木昭彦，中澤岩男：実際に製造されている生コンクリートの耐凍害性，セメント技術大会講演集，No.49，pp.798-803，1995
- 3) 高橋和雄：コンクリート製品の凍害，岩手大学農学部農業造構学講座，1990.3
- 4) 小林正几：各種 AE 剤ならびに減水剤がコンクリートの諸性質に及ぼす影響について，セメント・コンクリート，No.249，1967
- 5) ACI Committee 212：Admixtures for Concrete, J. ACI, 60-11, 1963.11
- 6) ACI Committee 201：Guide to Durable Concrete, J. ACI, 74-12, 1977.12
- 7) 浜幸雄，太田宏平：フレッシュコンクリートによる気泡組織の測定方法に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.26，No.1，pp.669-674，2004.7
- 8) Ansari. F.：Rapid In-Place Air Content Determination in Fresh Concrete, Concrete International, Vol.13, No.1, pp.39-43, 1991.1
- 9) S. Walker, et al.：Concrete Containing Air-entraining Agents, J. ACI, 40-26, 1944.6
- 10) 土木学会：コンクリートの表面被覆および表面改質に関する技術の現状，コンクリート技術シリーズ 58，2004.2
- 11) 土木学会：表面保護工法設計施工指針（案），コンクリートライブラリー119，2005.4
- 12) コンクリートの表面被覆および表面改質技術研究小委員会報告，コンクリート技術シリーズ 68，2006.4
- 13) 林大介，守屋進，杉田好春：各種コンクリート保護材の性能に関する実験的検討，コンクリートの表面被覆および表面改質に関するシンポジウム論文集，pp.45-54，2004.2
- 14) 林大介，坂田昇，三村俊幸，神沢弘：シラン・シロキサン系撥水材の開発，コンクリート工学年次論文集，Vol.22，No.1，pp.301-306，2000.7
- 15) 綱島和彦，松田芳範，津吉毅，石橋忠良：撥水・浸透系防水材暴露試験 3 年目までの評価について，コンクリートの表面被覆および表面改質技術研究小委員会報告書，pp.225-236，2006.4
- 16) 遠藤裕丈，田口史雄，谷本俊充：寒冷環境下でのシラン系表面含浸材の試験

施工 1 年目の評価, コンクリートの表面被覆および表面改質技術研究小委員会
報告書, pp.237-254, 2006.4

- 17) 芦澤良一, 林大介, 坂田昇, 田口史雄, 遠藤裕丈: 凍害および塩害環境下における浸透性吸水防止材を塗布したコンクリートの暴露試験, 土木学会年次学術講演会講演概要集, Vol.62, 第 V 部門, 2007.9
- 18) 秋田宏, 藤原忠司, 尾坂芳夫: 乾燥を受けるコンクリート中の水分移動を解析する手法, 土木学会論文集, No.490/V-23, pp.101-110, 1994.5
- 19) 鄭載東, 平井和喜, 三橋博三: モルタルの中性化速度に及ぼす温度・湿度の影響に関する実験的研究, コンクリート工学論文集, Vol.1, No.1, pp.85-94, 1990.1

第7章 結論

本研究では、まず、コンクリートの凍害に対して特に影響を及ぼす要因を明らかにすることを目的として、北海道に約40年間供用された水路施設を対象とした詳細調査を実施した。その結果、凍害による劣化が確認される部位では、健全な部位よりも空気量が少なく、気泡間隔係数が大きい傾向が確認された。このことより、水路施設における凍害の顕在化には、コンクリートの打込みの際のエアの巻き込みや締固めによるエアの拔出しなどによって生じた不均一な気泡組織が多大な影響を及ぼすことを考察した。

次に、得られた傾向を基に、凍害環境における水路施設の相対動弾性係数の経年変化に対して、硬化コンクリートの空気量および気泡間隔係数が及ぼす影響を評価することが可能な式(7.1)の凍害モデルを提案した。

$$P_p = \frac{100 \exp(-a \cdot L \cdot FT - b \cdot t)}{[1 + \exp\{-c(V_d - d \cdot FT + e)\}]} \quad (7.1)$$

ここで、 P_p ：相対動弾性係数 (%)

L ：気泡間隔係数 (μm)

FT ：凍結融解履歴の影響を表す指標

t ：供用期間 (年)

V_d ：飽水されていない空気量 (%)

a, b, c, d, e ：係数

提案した凍害モデルにより、北海道の空知地区における水路施設の相対動弾性係数を再現できることを確認した。また、最低温度を -18°C とする促進凍結融解試験結果を基に凍害モデルの係数を推定し、得られた予測式を用いて最低温度を -10°C とした促進凍結融解試験の相対動弾性係数を再現することが可能であることを確認することによって、凍害モデルを検証した。

以上のとおり、本研究で提案した凍害モデルにより、対象構造物の設計耐用期間お

よび要求される相対動弾性係数に応じて，コンクリートに要求される空気量および気泡間隔係数を提示することが可能となった。

あとがき

本研究では、凍害環境におけるコンクリート構造物の相対動弾性係数の経年変化に対して、硬化コンクリートの空気量および気泡間隔係数が及ぼす影響を評価することが可能な凍害モデルを提案した。提案したモデルによれば、これらの気泡組織の影響に加え、外気温および相対湿度の影響についても検討することが可能である。

しかし、セメントや骨材などの材料特性の影響を考慮できるモデル化までには至っておらず、今後、実構造物を中心としたデータの蓄積を図り、材料特性の影響についても評価できるモデルとして発展させていきたいと考えている。

さらに、将来的には、本研究のテーマであるコンクリートの凍害予測に関する知見が集約され、性能規定による設計、施工および維持管理のシステムが確立されることにより、より確実かつ合理的に構造物の耐久性が確保されていくことが望まれる。

謝 辞

本研究を遂行するにあたり、早稲田大学理工学術院教授関博先生には、ご多忙にもかかわらず、論文審査における主査を務めて頂くとともに、終始温かいご指導ご鞭撻を賜りました。先生のご厚情に対し、心より感謝の意を表します。早稲田大学理工学術院教授依田照彦先生、同教授小泉淳先生、同教授清宮理先生には、論文審査における副査として、貴重なご助言と示唆を頂きました。ご高配に対し、深く感謝の意を申し上げます。

京都大学大学院工学研究科教授宮川豊章先生には、貴重なご助言と示唆を頂きました。心より感謝の意を表します。

本研究は、財団法人日本農業土木総合研究所（現財団法人日本水土総合研究所）より鹿島建設株式会社が受託した研究の成果を基礎としております。財団法人日本水土総合研究所主席研究員中島賢二郎博士には、研究の方向性について貴重なご意見を賜りました。また、研究成果の活用を快諾して頂くとともに、論文執筆に際して多くのご指導を頂きました。ここに心より感謝の意を表します。株式会社八洋コンサルタン卜調査・環境部調査・環境グループ長奥紀仁氏には、水路施設の現地調査に関する貴重なご助言を頂きました。心より感謝の意を表します。

本研究の中で、独立行政法人土木研究所寒地土木研究所と鹿島技術研究所との共同研究の成果を基にした検討をさせて頂いております。独立行政法人土木研究所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田口史雄博士、同研究員遠藤裕丈氏には、日頃より共同研究を通じて温かいご指導を賜るとともに、論文執筆に際してご指導を頂きました。心より感謝の意を表します。

小職は、本研究の遂行期間中にあたる2005年4月から2007年3月にかけて、財団法人首都高速道路技術センターに嘱託職員として出向しておりました。在職期間中、財団法人首都高速道路技術センター理事長北川久博士、同理事根本洋氏（現首都高メンテナンス神奈川株式会社代表取締役社長）、同理事森河久氏（現首都高技術株式会社常務取締役）、同構造管理部長半野久光氏（現首都高速道路株式会社技術管理室設計技術グループ総括マネージャー）、同構造管理部長佐々木一哉氏（現首都高速道路株式会社保全・交通部鋼構造物疲労対策グループ総括マネージャー）、同構造管理部管理第一課長床谷茂氏（現首都高速道路株式会社神奈川建設局建設管理グループ総括マネージ

ヤー),同構造管理部管理第一課長桑野忠生氏(現首都高速道路株式会社西東京管理局保全設計第一グループ総括マネージャー)には,研究の遂行についてご理解頂き,温かなご支援および激励のお言葉を賜りました。中でも,小職の直属の上司であられました床谷茂氏および桑野忠生氏には,格別のご配慮を頂きました。ここに篤くお礼申し上げます。

清水建設株式会社土木技術本部先端技術部コンクリートグループ課長杉橋直行氏には,関博先生をご紹介頂いたのみでなく,度々,研究の進捗を気に掛けて頂き,温かな激励のお言葉を頂きました。ここに篤くお礼申し上げます。

鹿島建設株式会社技術研究所土木構造・材料グループチーフ兼上席研究員坂田昇博士には,本研究のみならず公私にわたる温かいご指導を,時には厳しく,時には励ましの言葉として賜りました。また,同上席研究員横関康祐博士には,本研究のテーマである凍害をはじめとするコンクリート構造物の耐久性全般について温かいご指導を頂きました。同研究員芦澤良一氏には,小職の出向中にも実験を継続して頂くなど,多くの支援をして頂きました。ここに心より感謝の意を表します。また,同矢野佐保子氏には,論文の取りまとめや公聴会の準備などを補助して頂き,大変感謝しております。

鹿島建設株式会社技術研究所副所長日比谷啓介博士,同主席研究員日紫喜剛啓博士,同土木構造・材料グループリーダー兼チーフ兼上席研究員池谷毅博士,同チーフ兼上席研究員大野俊夫博士には,研究を推進しやすいようなご配慮を頂きました。また,同上席研究員坂井吾郎博士には,博士学位を取得された先達として貴重なご助言を頂きました。鹿島建設株式会社東京土木支店第三土木統括事務所裏高尾 JV 工事事務所副所長須田久美子博士,同技術研究所都市防災・風環境グループ上席研究員永田茂博士には,職務を通じ,研究の進め方について懇切丁寧なご指導を頂きました。ここに心より感謝の意を表します。

鹿島建設株式会社技術研究所土木構造・材料グループ材料チームの皆様には,日頃より,楽しく明るい職場環境の中で研究に没頭させて頂き,大変感謝しております。

最後に,私事になりますが,健康な体を授け,心身ともに丈夫に育ててくれた両親,林弘治,林サチに感謝致します。そして,二人の腕白の育児に追われながら家庭を守り,常に応援してくれた妻幸恵,父親のいない時間を我慢してくれて,常に明るく元気をくれた長男亮太,次男勇太の二人の子供達,本当にありがとう。

研 究 業 績

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
○論文	林大介、坂田昇、田口史雄、遠藤裕丈：浸透性吸水防止材を用いたコンクリートの塩害および凍害環境下における耐久性に関する考察、コンクリート工学年次論文集、Vol.30、No.2、pp.649-654、2008.7
論文	芦澤良一、松田芳範、林大介、坂田昇：実構造物に塗布した浸透性吸水防止材の長期耐久性および現位置吸水試験方法、コンクリート工学年次論文集、Vol.30、No.2、pp.655-660、2008.7
○論文	林大介、坂田昇、中島賢二郎、奥紀仁、関博：コンクリートの凍害劣化予測に関する研究、土木学会論文集 E、Vol.64、No.1、pp.142-159、2008.2
論文	林大介、芦澤良一、横関康祐、坂田昇：有機繊維補強セメント複合材料の耐久性評価に関する研究、コンクリート工学年次大会、Vol.27、No.1、pp.1585-1590、2005.6
論文	叶健児、守屋進、石川一郎、林大介：表面含浸工法による土木構造物の耐久性向上に関する研究、コンクリート工学年次論文集、Vol.27、No.1、pp.1897-1902、2005.6
論文	久保善司、外岡広紀、林大介、坂田昇：種々の発水系材料による A S R 膨張抑制効果について、コンクリート工学年次大会、Vol.27、No.1、pp.1621-1626、2005.6
論文	遠藤裕丈、田口史雄、林大介、坂田昇：浸透性吸水防止材を塗布したコンクリートのスケーリング特性、コンクリート工学年次大会、Vol.26、No.1、pp.987-992、2004.7
論文	溝淵利明、林大介、須田久美子、横関康祐：電磁波による鉄筋コンクリート中の塩分測定法の実構造物への適用性に関する検討、コンクリート工学年次大会、Vol.26、No.1、pp.1869-1874、2004.7
論文	林大介、横関康祐、永田茂、坂田昇：塩害環境下におけるコンクリート構造物の劣化予測に関する研究、コンクリート工学年次大会、Vol.25、No.1、pp.1835-1840、2003.7
論文	横関康祐、渡邊賢三、林大介、坂田昇、大即信明：水和反応と温度依存性を考慮したセメント系材料のイオン拡散係数予測モデル、土木学会論文集、No.725/V-58、pp.131-142、2003.2
論文	林大介、坂田昇、金氏眞：アクリル樹脂系ひび割れ注入材の初期硬化性および接着強さ、日本材料学会補修・補強・アップグレードシンポジウム論文報告集、pp.85-88、2001.10
論文	林大介、坂田昇、三村俊幸、神澤弘：シラン・シロキサン系撥水材の塗布方法に関する一実験、コンクリート工学年次論文集、Vol.23、No.1、pp.415-420、2001.6
論文	平石剛紀、坂田昇、林大介、山村正人：剥落防止を目的とした有機系繊維補強コンクリートに関する研究、コンクリート工学年次論文集、Vol.23、No.1、pp.469-474、2001.6
○論文	林大介、坂田昇、三村俊幸、神澤弘：シラン・シロキサン系撥水材の開発、コンクリート工学年次論文集、Vol.22、No.1、pp.301-306、2000.6
論文	林大介、横関康祐、末吉隆信：光ファイバを用いたひずみ測定手法に関する実験的検討、コンクリート工学年次論文集、Vol.21、No.1、pp.91-96、1999.6
講演	芦澤良一、林大介、坂田昇、田口史雄、遠藤裕丈：塩害および凍害環境下における浸透性吸水防止材を塗布したコンクリートの暴露試験、第 62 回土木学会年次学術講演会、第 V 部門、pp.151-152、2007.9
講演	外岡広紀、久保善司、林大介、坂田昇：種々の発水系材料の A S R 膨張抑制効果について、第 60 回土木学会年次学術講演会、第 V 部門、pp.49-50、2005.9
講演	神沢弘、林大介、芦澤良一、坂田昇：浸透性吸水防止材を塗布したコンクリートの海洋環境における暴露試験、第 60 回土木学会年次学術講演会、第 V 部門、pp.423-424、2005.9

研 究 業 績

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
講演	中込甲斐、溝渕利明、新開一生、坂田昇、須田久美子、 <u>林大介</u> ：電磁波を用いた塩分量推定における実構造物への適用に関する一考察、第 60 回土木学会年次学術講演会、第 V 部門、pp.1181-1182、2005.9
講演	佐竹伸康、松本圭司、小林怜史、溝渕利明、坂田昇、須田久美子、 <u>林大介</u> ：コンクリート表面部の測定法に関する考察、第 60 回土木学会年次学術講演会、第 V 部門、pp.1199-1200、2005.9
講演	松田芳範、津吉毅、 <u>林大介</u> 、坂田昇：プレキャスト部材に対する浸透性吸水防止材の適用に関する実験的検討、第 59 回土木学会年次学術講演会、第 V 部門、pp.519-520、2004.11
講演	中村昭男、市橋豊隆、下村匠、池津和弘、坂田昇、 <u>林大介</u> ：コンクリート用各種表面被覆材の物質遮蔽効果に関する実験的検討、第 59 回土木学会年次学術講演会、第 V 部門、pp.291-292、2004.11
講演	<u>林大介</u> 、永田茂、横関康祐、須田久美子、坂田昇：信頼性解析によるコンクリート構造物の塩害劣化評価に関する研究、第 58 回土木学会年次学術講演会、第 V 部門、pp.175-176、2003.9
講演	中村昭男、児玉守広、橘泰久、坂田昇、横関康祐、 <u>林大介</u> ：3成分系セメントの塩化物イオン浸透性に関する一実験、第 58 回土木学会年次学術講演会、第 V 部門、pp.15-16、2003.9
講演	橘泰久、児玉守広、中村昭男、坂田昇、横関康祐、 <u>林大介</u> ：室内促進試験に基づく塩化物イオン浸透予測に関する研究、第 58 回土木学会年次学術講演会、第 V 部門、pp.1-2、2003.9
講演	<u>林大介</u> 、村山八洲雄、須田久美子、坂田昇：地域特性および年代を考慮した設計基準強度に基づく水セメント比の推定、第 57 回土木学会年次学術講演会、第 V 部門、pp.535-536、2002.10
講演	安田和弘、坂田昇、 <u>林大介</u> 、三村俊幸、神澤弘：浸透性吸水防止材を塗布したコンクリートの海洋環境における暴露試験、第 57 回土木学会年次学術講演会、第 V 部門、pp.577-578、2002.10
講演	<u>林大介</u> 、坂田昇、三村俊幸、神澤弘：シラン・シロキサン系撥水材の撥水性および遮塩性に関する実験的検討、第 55 回土木学会年次学術講演会、第 V 部門、pp.804-805、2000
講演	三田一成、山中宏之、吉川正、秋山暉、 <u>林大介</u> ：繊維製袋補強杭の現場造成実験、第 54 回土木学会年次学術講演会、第 III 部門、pp.872-873、1999.9
講演	<u>林大介</u> 、秋山暉、平和男、吉川正、山中宏之：高強度繊維製袋補強杭の曲げ特性、第 53 回土木学会年次学術講演会、第 VI 部門、pp.532-533、1998.10
その他	<u>Daisuke Hayashi</u> , Toshiaki Mizobuchi, Kumiko Suda and Kosuke Yokozeki : Experimental Study on Applicability of Measuring Method of Chloride Content using Electromagnetic Wave in Reinforced Concrete Structures, The Third US-Japan Symposium on Advancing Applications and Capabilities in NDE, June 2005
その他	坂田昇、渡邊賢三、 <u>林大介</u> ：土木構造物におけるコンクリートの表面保護技術、橋梁と基礎、Vol.39、No.3、pp.41-46、2005.3
その他	<u>林大介</u> 、坂田昇、横関康祐、芦澤良一：シラン・シロキサン系浸透性吸水防止材を用いたコンクリート構造物の高耐久化技術の開発、鹿島技術研究所年報、Vol.52、pp.113-118、2004
その他	<u>林大介</u> 、守屋進、杉田好春：各種浸透性コンクリート保護材の性能に関する実験的検討、土木学会コンクリートの表面被覆および改質に関するシンポジウム論文集、pp.45-54、2004.2

研 究 業 績

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
その他	遠藤裕丈、田口史雄、小尾稔、 <u>林大介</u> 、坂田昇：撥水材を塗布したコンクリートのスケーリング抵抗性に関する基礎的研究、土木学会コンクリートの表面被覆および改質に関するシンポジウム論文集、pp.19-22、2004.2
その他	Toshiaki Mizobuchi, Kumiko Suda, <u>Daisuke Hayashi</u> and Kosuke Yokozeki : Experimental Study on Applicability of Measuring Method of Chloride Content using Electromagnetic Wave in Reinforced Concrete Structures, 11 th International Conference on Fracture, 2004
その他	<u>林大介</u> 、坂田昇、須田久美子、横関康祐、芦澤良一、増川淳二、溝淵利明、電磁波による鉄筋コンクリート中の塩分測定法の実構造物への適用性に関する検討、鹿島技術研究所年報、Vol.52、pp.119-120、2004
その他	<u>林大介</u> 、須田久美子、横関康祐、坂田昇、永田茂：塩害環境下におけるコンクリート構造物の劣化予測に関する研究、検査技術、Vol.8、No.12、pp.37-42、2003.12
その他	<u>林大介</u> 、横関康祐、永田茂、須田久美子、坂田昇：塩害環境下におけるコンクリート構造物の劣化予測に関する研究、鹿島技術研究所年報、Vol.51、pp.101-102、2003.9
その他	須田久美子、永田茂、 <u>林大介</u> ：コンクリート構造物の劣化評価技術および余寿命 LCC 評価システムの開発、電力土木、No.304、pp.116-120、2003.3
その他	K. Yokozeki, K. Watanabe, <u>D. Hayashi</u> , N. Sakata and N. Otsuki : Model for Estimating Ion Diffusion Coefficients in Cementitious Materials Considering Hydration Reaction and Temperature Dependence, Concrete Library International, No.42, pp.105-119, 2003
その他	<u>林大介</u> 、須田久美子、横関康祐、坂田昇、右近八郎、山崎篤子、金氏眞：コンクリート構造物のリニューアルプラン策定を支援「リニューアル最適化システムの概要」、セメント・コンクリート、No.670、pp.34-40、2002.12
その他	<u>林大介</u> 、横関康祐、渡邊賢三、坂田昇：コンクリート中への塩化物イオン浸透性に関する研究、鹿島技術研究所年報、Vol.50、pp.71-78、2002.9
その他	安田和弘、坂田昇、横関康祐、 <u>林大介</u> 、渡邊賢三：浸透性吸水防止材によるコンクリートの高耐久化技術、鹿島技術研究所年報、Vol.50、pp.79-80、2002.9
その他	<u>林大介</u> 、永田茂、須田久美子、坂田昇：気象及び配合条件の地域特性を考慮したコンクリート構造物の余寿命ライフサイクルコスト評価システム、検査技術、Vol.7、No.8、pp.14-20、2002.8
その他	平石剛紀、 <u>林大介</u> 、坂田昇、信田佳延：長寿命化を目標とした補修・補強材料に関する研究、構造物の診断と補修に関する第 13 回技術・研究発表会論文集、pp.115-121、2001.11
その他	<u>林大介</u> 、坂田昇、三村俊幸、神澤弘：シラン・シロキサン系撥水材の施工性に関する一実験、鹿島技術研究所年報、Vol.49、pp.99-100、2001.9
その他	永田茂、村山八洲雄、須田久美子、溝淵利明、増川淳二、 <u>林大介</u> 、平山泰典、有馬祐介：気象及び配合条件の地域特性を考慮したコンクリート構造物の劣化ポテンシャル評価システムの開発、鹿島技術研究所年報、Vol.49、pp.79-84、2001.9
その他	平石剛紀、坂田昇、 <u>林大介</u> 、山村正人：剥落防止を目的とした有機系繊維補強コンクリートに関する研究、鹿島技術研究所年報、Vol.49、pp.91-96、2001.9
その他	<u>林大介</u> 、金氏眞、坂田昇、須田久美子、新井淳一：インフラ・リニューアル最適化システム（栈橋編）、構造物の診断と補修に関する第 12 回技術・研究発表会論文集、pp.35-40、2000.11
その他	坂田昇、 <u>林大介</u> 、三村俊幸、神澤弘：優れた施工性と高い耐久性を有する「高性能撥水材」、リテック、Vol.4、pp.32-35、2000.11
その他	<u>林大介</u> 、新井淳一、佐久間光政：赤外線を用いたコンクリート表面被覆下のひび割れ検知、構造物の診断と補修に関する第 10 回技術・研究発表会論文集、pp.79-84、1998.11