

# 論文 含水状態・水分移動が高強度コンクリートの凍害劣化におよぼす影響

中野 佑樹<sup>\*1</sup>・千歩 修<sup>\*2</sup>・長谷川 拓哉<sup>\*3</sup>・酒井 正樹<sup>\*1</sup>

要旨：non-AE 高強度コンクリートが乾湿繰返しを受けると耐凍害性が大きく低下する機構を検討するため、断面寸法の異なるコンクリート試験体の乾湿繰返し・凍結融解における電極法による含水状態および埋込み型歪ゲージによる長さ変化の連続的な測定を行った。その結果、表層からの距離や断面寸法の違いにより、コンクリート内部の含水状態が異なり、凍結融解を繰返すことにより試験体内部で水分移動が生じていることが考えられた。以上のことから、含水率分布を考慮した凍結融解時のコンクリート内部の水分移動のメカニズムを検討した。

キーワード：高強度コンクリート，乾湿繰返し，凍結融解，含水率分布，水分移動

## 1. はじめに

non-AE高強度コンクリートは、2週水中養生直後に凍結融解試験を行うと高い耐凍害性を示すものでも、軽微な乾湿繰返しを受けると耐凍害性が大きく低下するものがあることが報告されている<sup>1)</sup>。この耐凍害性の低下の理由として、乾燥または乾湿繰返しによるコンクリート内部の水分移動・水分逸散の影響<sup>2)</sup>や微細ひび割れの発生などが考えられる。また、断面寸法の異なる試験体を用い、屋外暴露・屋内放置後に凍結融解試験を行うと、断面寸法の大きな試験体は小さなものに比べて大きなひび割れが発生すること、さらに、屋外暴露では断面寸法の小さな試験体は、断面寸法の大きな試験体に比べて、耐凍害性が高く評価されることが報告されている<sup>3)</sup>。これは、乾燥収縮時の内部拘束の影響と考えられるが、断面内の含水状態・水分移動状況が大きく異なっており、これが耐凍害性に影響していることも考えられる。

本研究は、低水セメント比の non-AE 高強度コンクリートが、軽微な乾湿繰返しを受けると耐凍害性が大きく低下するメカニズムの検討を目的としたものである。ここでは、断面寸法の異なる試験体を作製し、実環境を想定した乾湿繰返しを行った後、凍結融解試験を行い、コ

ンクリート内部の含水状態(比抵抗)および長さ変化率を測定し、乾湿繰返し・凍結融解時の水分の移動と劣化の進展について検討し、乾湿繰返しを受けた高強度コンクリートの凍害劣化メカニズムを検討する。

## 2. 実験概要

表-1 に実験計画を示す。本実験では、水セメント比25%のnon-AEコンクリートを対象としている。試験は、表層からの距離、断面の大きさによる水分移動の違いについて検討するために、断面寸法の異なる5種類の試験体を作製し、2週水中養生後に乾湿繰返しを行った後、凍結融解試験を行うものである。測定項目として、埋込み型歪ゲージおよびダイヤルゲージでの長さ変化率、電極法<sup>4)</sup>での比抵抗による含水状態、温度、質量変化とした。

表-2 に各試験体のコンクリートの調合表を、表-3 に基礎性状を示す。セメントは普通ポルトランドセメント(密度 3.16g/cm<sup>3</sup>)、細骨材は勇弘産陸砂(表乾密度 2.56g/cm<sup>3</sup>, 吸水率 1.26%)、粗骨材は常盤産砕石(表乾密度 2.56g/cm<sup>3</sup>, 吸水率 2.69%, 最大寸法 20mm)を使用した。高性能AE減水剤はフローが 60cmになるように調整して添加した。試験体は、比抵抗測定用電極、熱電対、ダイ

表-1 実験計画

試験体記号	試験方法	測定項目	試験体内訳
153 106 71 56 44	・153は乾湿繰返し無試験体[S] 乾湿繰返し有試験体[d] ・106, 71, 56, 44は乾湿繰返し有 ・乾湿繰返し(乾燥40・42h,水中浸漬6h/7c) ・凍結融解試験(JIS A 1148 B法) ・251サイクル以降は同じ凍結融解温度で手動にて, 凍結22.5h・融解1.5hの1日1サイクルとした。	・長さ変化率(埋込み型歪ゲージ) ・長さ変化率(ダイヤルゲージ) ・比抵抗(電極法) ・温度(熱電対) ・質量変化率	153(計2体, :1体, :1体) 106(計5体, :1体, :2体, :2体) それ以外(3体ずつ, :1体, 1体, :1体) 注) 44, 56 は破損

試験体記号は、試験体(円柱)の直径(mm)を表す

\*1 北海道大学大学院 工学研究科 空間性能システム専攻 (正会員)

\*2 北海道大学大学院 工学研究科 空間性能システム専攻教授 工博 (正会員)

\*3 北海道大学大学院 工学研究科 空間性能システム専攻准教授 博(工) (正会員)

ヤルゲージで測定するためのゲージプラグ、埋込型歪ゲージを型枠の所定の位置に埋め込まれるよう、木棒と針金等を用いあらかじめ型枠に固定した後、コンクリートの打込みを行った。図-1に電極形状を示す。図-2にそれぞれの試験体の歪ゲージ、電極、熱電対の埋込み位置を示す。なお、試験体の長さはすべて400mmである。

乾湿繰返しの条件は、実環境を考慮したものととして6時間 20 水中 42時間 40 乾燥を7サイクル<sup>1)</sup>とし、凍結融解試験はJIS A 1148 B法(気中凍結水中融解法)に準じて行った。図-3に凍結融解試験のフローを示す。試験体は乾湿繰返し後に試験機の都合上 153では2日間の水中浸漬を行い、44, 56, 71, 106では7日間の水中浸漬を行い、凍結融解試験を開始した。56, 71, 106は、凍結融解試験251サイクルを終えた時点で試験を一時中断した。その後7日間の水中浸漬後に、手動での凍結融解試験(1日1サイクル, 5に調整した水槽と庫内温度-20の冷凍庫を使用)を行ったが、285サイクル(中断後34サイクル)に至っても長さの増加が見られないため、40・7日間の再乾燥を行い、その後改めて手動での凍結融解試験を行った。

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 乾湿繰返し試験結果

図-4に乾湿繰返し時の比抵抗の変化を示す。なお、グ

ラフに途切れている部分があるのは、データが破損したためである。また、比抵抗の急激な上昇が湿潤過程において見られるが、これは温度差の影響によるものと考えられる。また、0サイクル目で比抵抗が異なるのは、打込み時期の違いによる基礎性状の違いが原因であると考えられる。なお、乾湿繰返し7サイクルを通して、目視できるひび割れは観察できなかった。

44, 56, 71, 106内部を比べると、断面寸法が大きくなるにつれ、乾燥時に比抵抗の増加は少なく、コンクリート内部では高い含水状態を保っていることがわかる。106においては、乾燥時には表層のみで比抵抗の上昇が大きく、表層の乾燥程度が大きくなっており、乾燥時には断面内で含水率分布が生じていると考えられる。153においては、表層、中間、内部の比抵抗の差は小さくなっているが、これは基礎性状の違いとともに、ごく表層の著しく含水率の低い部分が、電極位置に達していないことが考えられる。また、全ての試験体で、乾湿繰返し7サイクルを通して、開始時より比抵抗が上昇していることがわかる。このことから、乾湿繰返しにより、試験体が乾燥したことがわかる。

図-5に乾湿繰返し時の長さ変化率を示す。断面寸法が小さいほど乾燥時の長さ変化率の低下が大きく、乾燥程度が大きいものと考えられる。また、乾湿繰返し7サイクルを通して、試験体が収縮していることから、凍結融

表-2 調合表

W/C (%)	目標 AIR (%)	目標 スランプフロー (cm)	細骨材率 (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )				混和剤量 (C×%)
				水	セメント	細骨材	粗骨材	高性能AE減水剤
25	1.0	60.0×60.0	41.0	175	700	634	931	1.25

表-3 コンクリートの基礎性状

試験体	実測AIR (%)	実測フロー (cm)	圧縮強度 (MPa)	ヤング係数 (GPa)
44,56,71,106	1.8	53.0×53.0	111.4	37.0
153	2.5	49.5×48.5	102.7	35.0

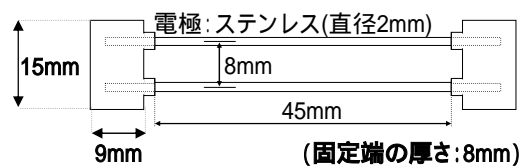
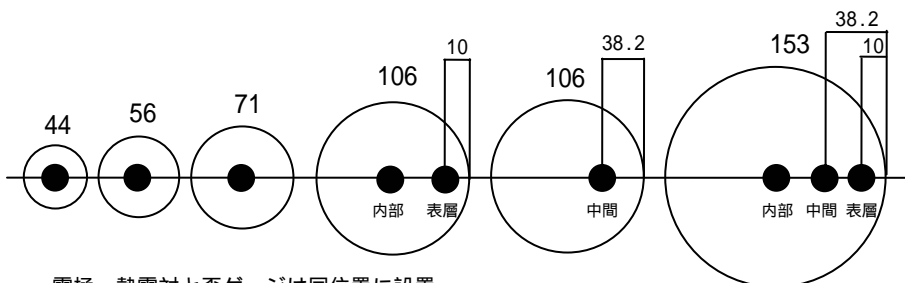


図-1 電極の形状



電極・熱電対と歪ゲージは同位置に設置

図-2 歪ゲージ・電極・熱電対の位置

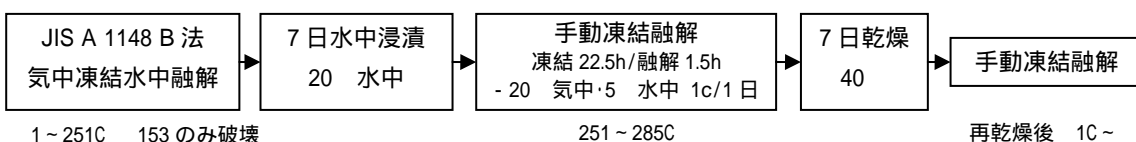


図-3 凍結融解試験のフロー

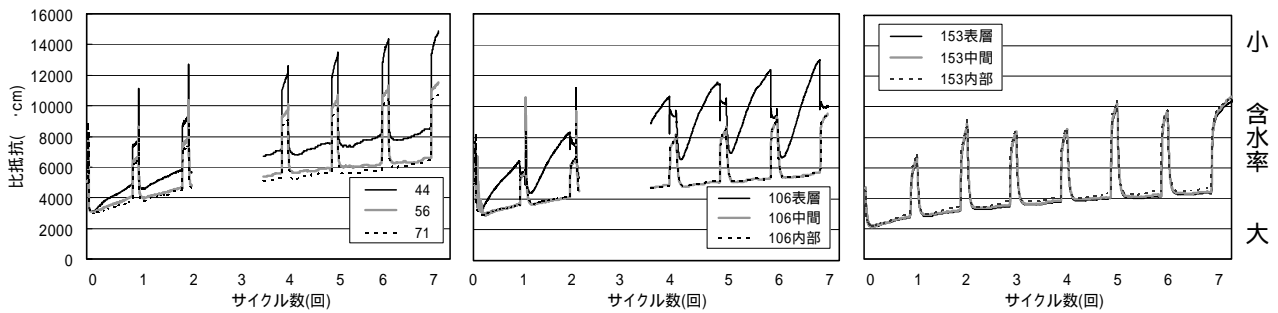


図-4 乾湿繰返し時の比抵抗の変化

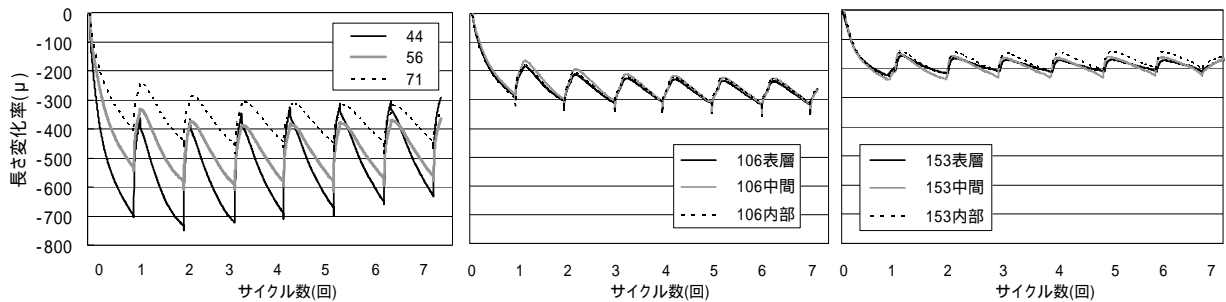


図-5 乾湿繰返し時の長さ変化率

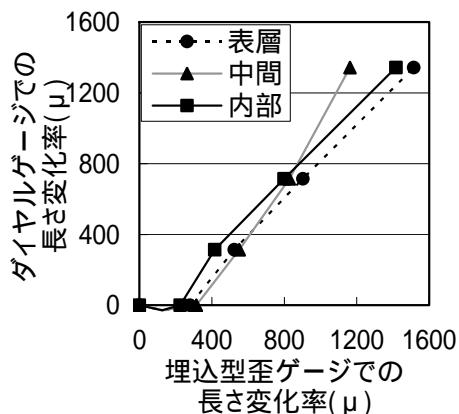


図-6 凍結融解時の埋込型歪ゲージとダイヤルゲージの長さ変化率の関係(153)

解は乾燥収縮の影響のある状態から開始しているものと考えられる。106, 153 をみると、表層・中間・内部での長さ変化率の変動はほぼ一様であり、最も乾燥すると考えられる表層でも、長さ変化は内部と同様で小さいことがわかる。これらの理由として、表層の乾燥による収縮が内部に拘束され、その結果、長さには変化が出なかったこと、あるいは、乾湿繰返しにより表層に発生する微細ひび割れが長さ変化を緩和させていることなどが考えられる。

### 3.2 再乾燥前の凍結融解試験結果

図-6 に凍結融解時の埋込型歪ゲージとダイヤルゲージの長さ変化率の関係を示す。この結果、双方には相関が見られ、埋込型歪ゲージによる凍結融解時の劣化評価が可能であると確認できた。以下、両者による長さ変化は同等のものとして検討を行う。

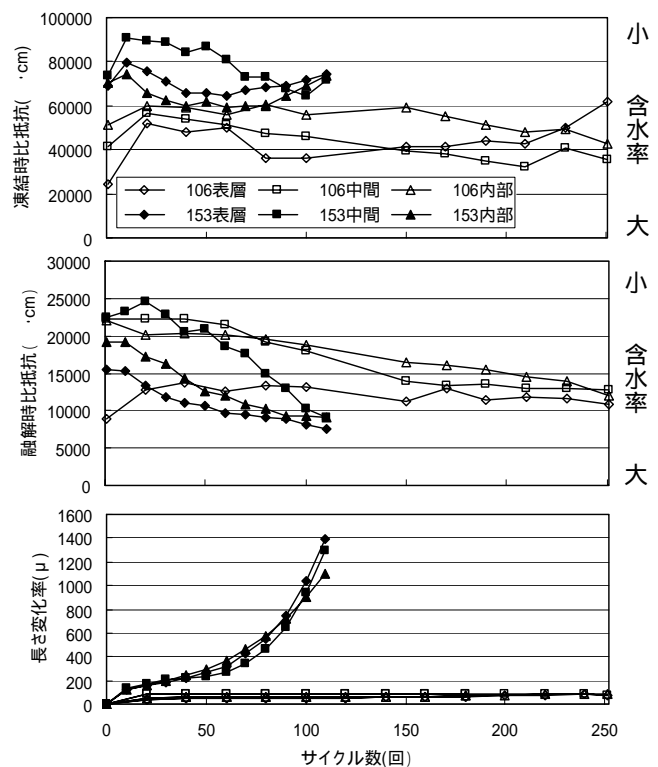


図-7 凍結融解時の比抵抗の変化・長さ変化率

図-7 に 153, 106 の凍結融解時の比抵抗の変化・長さ変化率を示す。153 は凍害劣化による膨張を示したが、106 では長さに変化が見られず、251 サイクルまで劣化の兆候を示さなかった。また、44, 56, 71 も同様に劣化を示さなかった。

融解時比抵抗(値が小さいほど含水率が大きい)をみ

ると、凍結融解サイクルが進むにつれて、全体的には低下の傾向を示しており、全体的に含水率が上昇していることがわかる。153 と 106 の違いとして、凍結融解試験開始時に、153 では表層、中間、内部ともに全体的に乾燥していたのに対し、106 では表層の含水率が特に高い値を示している。なお、この違いは153の凍結融解開始前の水中浸漬の期間は2日間あったのに対して、106は7日間であったためである。凍結融解試験が始まると、153の中間は含水率が低下しているのに対し、106の中間は含水率の低下傾向を示さず、含水率が上昇している。この153の中間の含水率低下が凍害劣化に関与していることが考えられる。

凍結時比抵抗をみると、106では、表層の値が小さく、凍結水量が少ないことが考えられる。この原因として、乾湿繰返しで表層に生じた微細ひび割れなどの組織の変化が未水和セメントの水和によって治癒したこと、含水率の上昇により毛細管が水で満たされ水の生成できる空間が減少したことなどが考えられる。

このことから、表層が適度な乾燥を受けた状態のときに、凍結融解によって劣化が進むと考え、再乾燥を行うこととした。

### 3.3 劣化時の長さ変化の挙動について

図-8に153の凍結融解時の埋込型歪ゲージによる長さ変化率の挙動を示す。

乾湿繰返し無試験体[S]は、表層・中間・内部のいずれも、300サイクルまで長さ変化率がほとんど増加しておらず、凍結融解による劣化はほとんど生じていないと考えられる。しかし、凍結融解1サイクルを通じての変

化をみると、部位の違いによって長さ変化率の変動量は異なっており、内部、表層、中間の順に変動が大きくなることわかる。とりわけ内部では、凍結融解1サイクルを通じて、約200 $\mu$ の膨張と収縮が生じており、乾湿繰返しよりも大きな長さ変化となっている。

乾湿繰返し有試験体[d]は、乾湿繰返し無試験体[S]に比べ大幅に耐凍害性が低下し、凍結融解100サイクルに達した付近で長さ変化率が1000 $\mu$ を超え、幅1mm程度の目視できるひび割れが試験体の表層に生じた。表層・中間・内部ともに、凍結融解試験開始直後の1サイクル目で、大きな残留膨張が生じたが、それ以降60サイクル程度までは、凍結融解が繰返されるごとに少しずつ膨張が蓄積されている。60サイクル程度までの、残留膨張の蓄積をみると、表層、中間に比べて、内部の残留膨張の蓄積が小さくなっている。その後80サイクル程度になると、内部に凍結時に大きな膨張挙動が見られ、試験体全体で融解時の残留膨張の蓄積が大きくなり始める。内部の長さ変化率も急激に増加量が大きくなり、表層・中間・内部で、大きな膨張挙動が見られる。このことから、劣化は表層から始まり、内部に進行し、内部まで組織の破壊が進むと、全体で急激な膨張が始まると考えられる。

### 3.4 再乾燥後の凍結融解試験結果

図-9に再乾燥後凍結融解時の比抵抗の変化・長さ変化率を示す。153のみ乾湿繰返し後のデータである。153をみると長さ変化率が增大しており、106ではその兆候がみられると考えられる。

融解時比抵抗をみると、106も153と同様に凍結融解試験開始直後に中間の含水率が低下していること

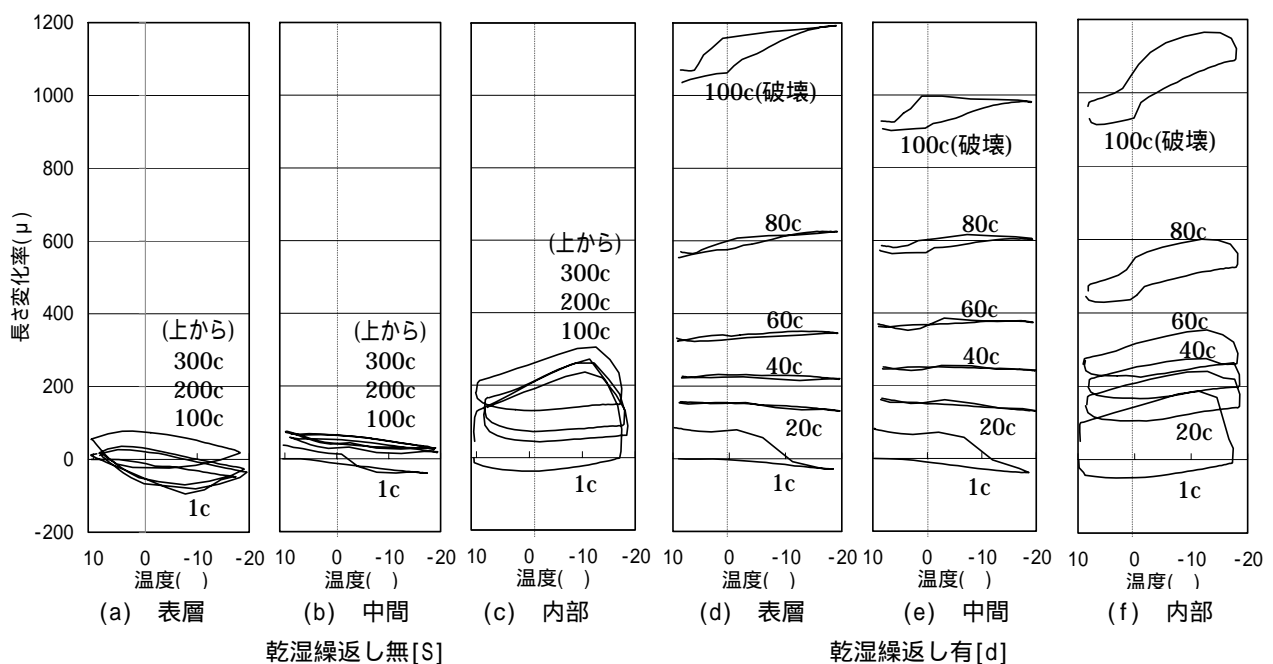


図-8 凍結融解時の埋込型歪ゲージによる長さ変化率の挙動(153)

がわかる。しかしながら 106 の表層の含水率が急激に上昇しており、表層部分はすでに劣化が進んでいることが考えられる。また、凍結時比抵抗をみると、106 の表層はかなり大きな値を示している。これは凍結水量が多いことを意味し、表層が劣化し、微細なひび割れが生じているものと考えられる。なお、目視でも表層のひび割れは観察されている。

### 3.5 断面寸法の違いが内部の含水率に与える影響

図-9 の 44, 56, 71 の融解時比抵抗をみると、44, 56, 71 では融解時比抵抗、凍結時比抵抗の再凍結融解時の値がともに大きくなっているが、これは、再乾燥で中心部まで乾燥し、その影響が残っているものと思われる。また凍結融解開始直後の融解時、56, 71 は、一度含水率が低下してから含水率が上昇しており、

44 は、含水率が低下せずに上昇していることがわかる。この原因として、56, 71 には乾燥後も内部に水が残存しており、表層の凍結により、内部の水が表層方向へ移動したためであると考えられる。また、44 については、断面寸法が小さいため、内部まで乾燥し、移動可能な水が残存していなかったためであると考えられる。さらに、56 と 71 では、56 のほうが、凍結融解試験開始後の乾燥の程度が大きいことがわかる。この原因として、56 のほうが、内部から表層までの距離が近いいため、内部の水が移動しやすいためと考えられる。

### 3.6 コンクリート内部の水分移動のメカニズム

実験の結果に基づき、考えられるコンクリート内部の水分移動の概念図を図-10 に示す。乾燥または乾湿繰返しを受けると、表層がもっとも乾燥の影響を受け、含水

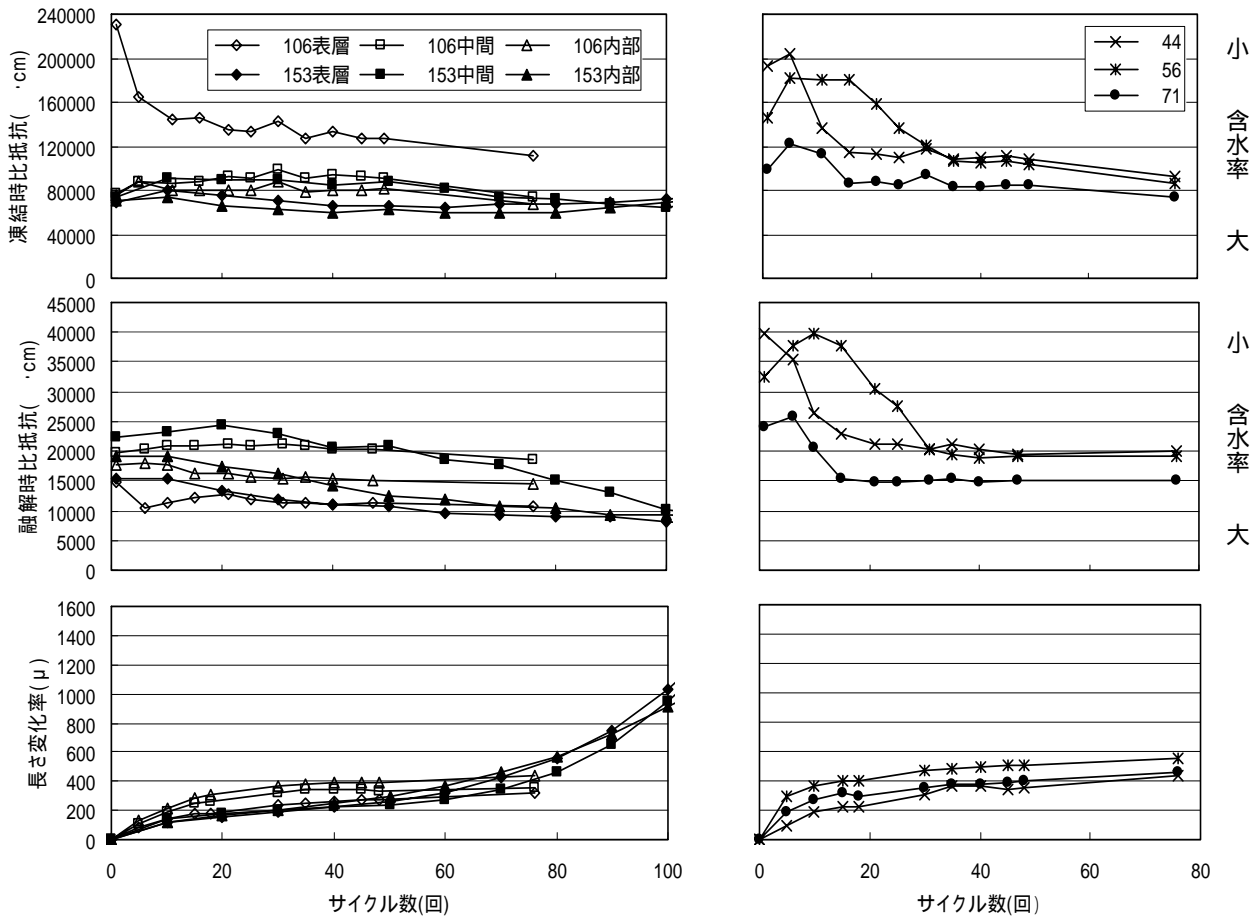


図-9 再乾燥後凍結融解時の比抵抗の変化・長さ変化率

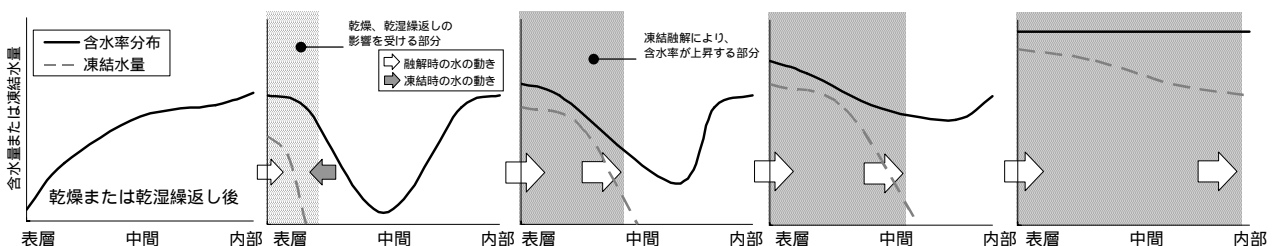


図-10 水分移動の概念図

率が低下する。凍結融解試験を開始すると、融解時には外部から水が供給され、凍結時には表層から凍結する。表層は乾燥または乾湿繰返しの影響を受けるため、表層では水の凍結できる変化が生じ凍結融解試験開始初期は、表層のみ凍結水量が多くなる。表層の水が凍結すると、中間の水が表層方向に移動し、中間の含水率が低下する。表層が凍結融解を繰返すと、凍結融解により含水率が上昇する部分が中間へ進み、中間の含水率が上昇する。このとき、表層もさらに含水率が上昇する状態になっており、融解時の外部からの水の供給が大きくなるため、内部の水が中間方向へ移動することはなく、内部の含水率は低下しない。最終的に、凍結融解により含水率が上昇する部分が内部まで進むと、外部からの水の供給も、より一層激しくなり、内部、中間、表層ともに、高含水状態となる。試験体全体の凍結水量も多くなり、破壊に至る。

#### 4. まとめ

- (1) 高強度コンクリートは、表層部が乾燥した含水率分布のある状態で凍結融解を行うと、劣化が生じやすい。
- (2) コンクリートの表層部が乾燥した状態で凍結融解作用を受けると、内部の水が表層へ移動し、内部の含水率が低下する場合がある。このような場合、その後、内部の含水率が上昇し、最終的には、内部、中間、表層ともに高含水状態となる。
- (3) 実験結果をもとに、含水率分布のあるコンクリートの凍結融解時の水分移動のメカニズムを検討した。

#### 謝辞

本研究の一部は、文部科学省科学研究費基盤研究(A)「寒冷地のコンクリート構造物の複合劣化に対する耐久設計と維持管理システム」(課題番号:19206048, 研究代表者:上田多門北海道大学教授)の中で行ったものである。また、実験の実施にあたり、北方建築総合研究所の吉野利幸さん、桂修さん、谷口円さんにご協力をいただきました。ここに記して謝意を記します。

#### 参考文献

- 1) 相川葉月他:実環境を考慮した乾湿繰返しが高強度コンクリートの耐凍害性に及ぼす影響,コンクリート工学年次論文集, vol.27, pp.899-905, 2005
- 2) 酒井正樹他:乾湿繰返し・凍結融解を受けるコンクリートの含水状態および長さ変化,コンクリート工学年次論文集, vol.29, No.1, pp.1167-1172, 2007
- 3) 酒井正樹他:部材の乾燥を考慮した高強度コンクリートの凍結融解抵抗性,コンクリート工学年次論文集, vol.28, No.1, pp.905-910, 2007
- 4) 鎌田英治他:コンクリート内部の含水率の測定,セメント技術年報, No.30, 1976
- 5) 米田恭子他:乾湿繰返しを加えた凍結融解試験による各種コンクリートの耐凍害性,コンクリート工学年次論文集, vol.29, No.1, pp.1131-1136, 2007