

## 凍結融解によるコンクリートの水平ひび割れ発生機構の検討

Examination of the mechanism of horizontal crackings in concrete due to freeze-thaw cycles

北海道大学大学院工学院 ○学生員 赤坂 健太 (Kenta Akasaka)  
 北海道大学大学院工学研究院 正員 松本 高志 (Takashi Matsumoto)

## 1. はじめに

橋梁 RC 床版では内部に層状の水平ひび割れが発生することで、耐久性が低下することが知られている。積雪寒冷地の橋梁の RC 床版で水平ひび割れが多く発生することから凍害が一原因と推察されている。積雪寒冷地のコンクリート構造物の主な劣化要因は凍害であり、これらの地域の橋梁 RC 床版でも内部に侵入した水分の凍結融解作用の繰り返しによって損傷を起こしている。このときに内部に層状のひび割れが形成される機構については解明されていない。

既往の研究<sup>1)</sup>では、実橋の RC 床版の温度分布を想定した凍結融解実験が行われた。実験結果から床版の水平ひび割れの発生について、凍結過程で床版表層が先に凍結して内部が遅れて凍結する際に凍結層と未凍結層の境界面付近にアイスレンズが生成され、そのアイスレンズがコンクリートを押し広げることでひび割れが発生する可能性を指摘している。アイスレンズは土の凍上現象において生成される氷の層で、この土の凍上現象と同様の現象が床版内部で起こる可能性がある。

そこで本研究では小規模の円柱コンクリート供試体に対して凍結融解実験を行い、コンクリートの凍結過程で内部にアイスレンズが生成されることでひび割れが発生するという仮説の下、水平ひび割れの発生機構を検討することを目的とする。本研究で行う凍結融解実験は既往の研究<sup>2)</sup>と同様の手法を採用して、小規模の供試体に対してペルチェ素子を使用することで温度境界条件を与える。実橋の温度分布を想定した温度境界条件と温度分布を上下対称とした温度境界条件の凍結融解実験を行い、凍結融解層の水平方向のひび割れの観察から水平ひび割れの発生機構の解明を試みた。

## 2. 凍結融解実験

## 2.1 供試体

供試体の寸法を、図-1 に示す。直径 36mm、高さ 50mm の普通ポルトランドセメント円柱供試体を用いた。供試体の寸法が小さいため粗骨材最大寸法 15mm の碎石を使用した。ひび割れを発生させやすくするために、供試体には AE 剤を使用せず、水セメント比は一般的なコンクリートよりも大きい 60% に設定した。養生方法は水中養生として養生期間は 1 カ月以上とした。側面からの水分の浸透を防ぐために供試体側面にはエポキシ樹脂系の塗料を塗布した。実験開始前までの期間、供試体の上面および下面は湿潤な状態を保持した。ブリージングの影響を考慮して打設面を上とした供試体と打設面を下とした供試体について凍結融解実験を行った。

## 2.2 温度境界条件

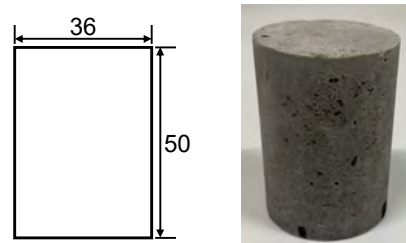
表-1 に凍結温度および融解温度を示す。実験条件は(上面の温度境界条件)-(下面の温度境界条件)で表すこととする。またこの実験条件を供試体の名称とする。打設面を下とした供試体の名称は実験条件の後ろに-r を付けることとする。積雪寒冷地の実橋の RC 床版と同様の温度分布を想定した実験では、中央部が-15°C~3°Cとなるように上面から凍結融解を与えて下部は凍結を維持した温度境界条件(以下、FT-F)とする。温度分布を上下対称とした実験では、中央部が-15°C~3°Cとなるように上面および下面から同時に凍結融解を与える温度境界条件(以下、FT-FT)とする。供試体の温度は供試体上面および下面から制御して熱の移動は高さ方向のみとした。なお、実験中は供試体内部の温度測定はしていないが、事前の予備実験で熱電対を下面から高さ 10mm、25mm、40mm の位置の円断面の中心に埋め込んだ供試体を使用して各温度境界条件での供試体内部の温度履歴を確認した上で本実験の温度境界条件を設定している。

## 2.3 実験方法

図-3 に実験装置を示す。供試体の上面と下面にペルチェ素子を設置して、供試体側面を断熱材で被覆して側面からの熱の移動を遮断した。ペルチェ素子は板状の機器で電流を流すと一方の面が冷却されて反対の面が加熱される特徴を有しており、電流の方向を変えると冷却面と加熱面が入れ替わる。この特徴を利用して凍結過程と融解過程で電流の方向を変えて実験を行った。凍結融解サイクルは合計 400 回とし、25 回ごとに供試体の計測を行った。計測項目については次節で述べる。

## 2.4 計測項目

計測項目は、供試体側面の撮影、打音試験および X 線 CT 装置を使用した供試体内部の撮影である。



(a) 断面図(単位: mm) (b) 実験前の供試体

図-1 供試体

表-1 凍結温度および融解温度

実験条件	供試体温度		
	上部	中央部	下部
FT-F	-20°C~20°C	-15°C~3°C	-15°C~-8°C
FT-FT	-20°C~15°C	-15°C~3°C	-20°C~15°C

供試体側面の撮影と打音試験は実験前と凍結融解サイクル 25 回ごとに行った。供試体側面の撮影は 4 方向から行った。打音試験は実験時の供試体上面から 10mm、20mm、30mm、40mm の位置の側面で行った。打音試験後、録音した音声の解析から得られた周波数と音圧の関係を用いて供試体内部の劣化状況を推定した。なお打音試験は内部の劣化が確認された後には行わない。

X 線 CT 装置を使用した供試体内部の撮影は実験前、打音試験で劣化が確認された時および凍結融解サイクル 400 回時に行った。撮影後は X 線画像の二値化処理を行い、X 線画像と二値化画像を用いて供試体内部の観察を行った。X 線 CT 装置による撮影で 8bit の画像を取得して、閾値を階調数 170 として二値化処理を行った。二値化画像は空隙およびひび割れを黒色で表し、骨材およびセメントを白色で表した。

### 3. 実験結果

#### 3.1 供試体側面の観察結果

図-4 に各供試体の実験前および凍結融解サイクル 400 回時の側面の様子を示す。供試体の撮影は実験時の供試体の向きで行った。例えば FT-F-r は打設面を下とした状態で実験を行ったため撮影時も打設面を下とした。

各供試体の実験前と凍結融解サイクル 400 回時の側面の様子を比較したが変化は見られなかった。これは供試体と防水塗料との接着により供試体側面の変形が妨げられたためと考えられる。FT-F 上部では防水塗料が剥がれていることが確認された。防水塗料が剥がれたことで供試体上部の側面から水分が浸透した可能性がある。

#### 3.2 打音試験結果

図-5 に各供試体の実験前および打音試験によって劣化が確認された時の周波数と音圧の関係を示す。ここで、FT-F、FT-FT および FT-F-r については実験時の上面から 10mm の位置の結果を示し、FT-FT-r については実験時の上面から 40mm の位置の結果を示す。0~300Hz の低周波数領域で高い音圧が確認されたがこれらは打音試験時以外でも常に確認されたためノイズと判断して検討の対象から除外した。打音試験では音圧が低下した時、供試体が劣化したと判断する。

FT-F および FT-FT では音圧が低下した凍結融解サイクル 300 回時に劣化した。FT-F-r では音圧が低下した凍結融解サイクル 350 回時に劣化した。FT-FT-r では音圧が低下した凍結融解サイクル 325 回時に劣化した。

#### 3.3 X 線 CT による内部観察結果

図-6 に供試体内部の X 線画像と二値化画像を示す。画像は供試体の表面から 18mm の位置を示す。FT-F および FT-FT は実験前の X 線 CT による撮影を行っていない。

FT-F は凍結融解サイクル 300 回時に上面から約 10mm までの位置でひび割れおよび骨材の界面剥離が見られた。中央部ではひび割れは見られなかった。400 回時には 300 回時に見られたひび割れおよび骨材の界面剥離の幅が拡大した。上面から約 25mm までの位置で新たに骨材の界面剥離が見られた。また X 線画像から供試体上面の隅角部で供試体が欠損したことが分かる。下部は凍

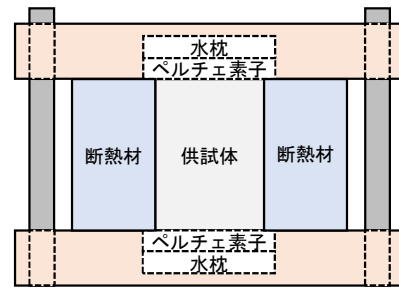
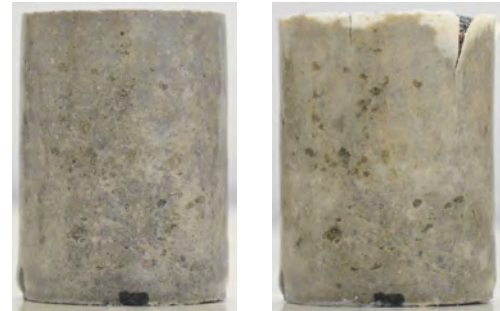
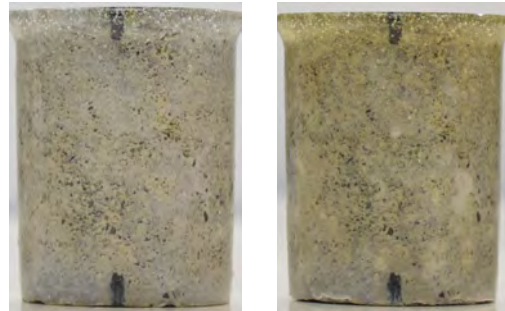


図-3 実験装置概略図



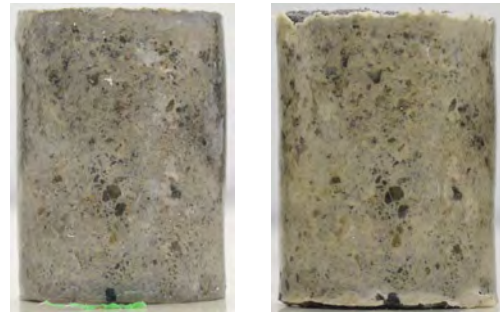
実験前 400 回時

(a) 供試体 FT-F



実験前 400 回時

(b) 供試体 FT-F-r



実験前 400 回時

(c) 供試体 FT-FT



実験前 400 回時

(d) 供試体 FT-FT-r

図-4 供試体側面の様子

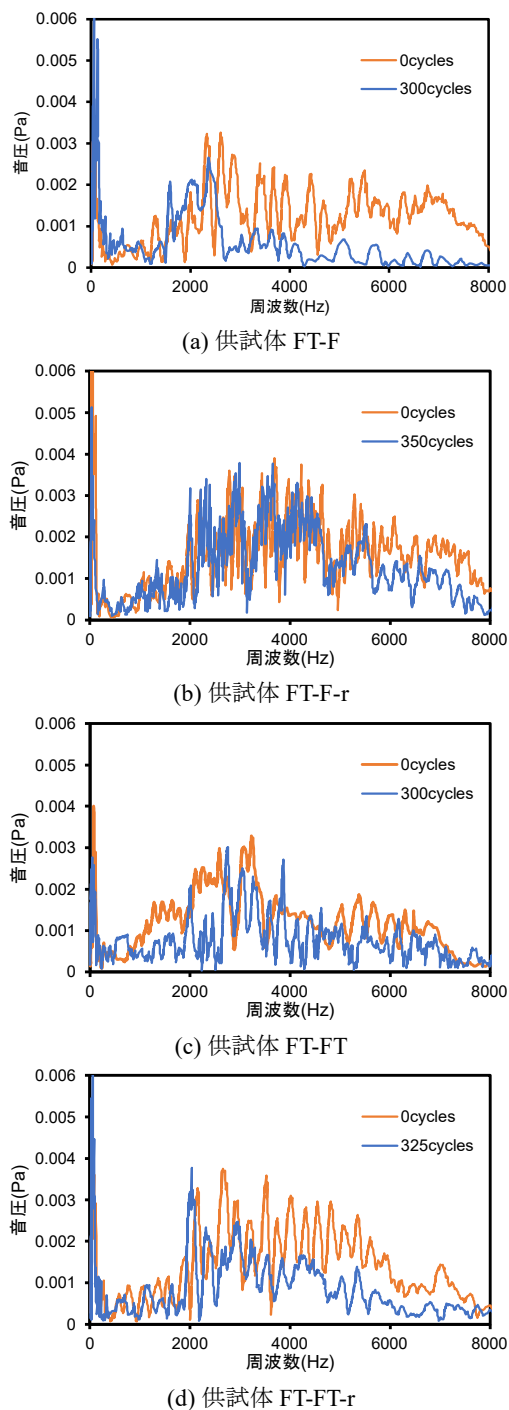


図-5 周波数と音圧の関係

結を維持したため変化はなかった。

FT-F-r は凍結融解サイクル 350 回時にひび割れは見られなかった。実験前の画像と 350 回時の画像を比較しても黒色の領域が全く増加していないことが分かる。

FT-FT は凍結融解サイクル 300 回時に上面から 10mm までの位置と下面から 10mm までの位置にひび割れおよび骨材の界面剥離が見られた。中央部ではひび割れは見られなかった。400 回時には 300 回時に見られたひび割れおよび骨材の界面剥離の幅が拡大した。400 回時も中央部ではひび割れは見られなかった。また X 線画像から供試体下部が欠損したことが分かる。

FT-FT-r は凍結融解サイクル 325 回時に上面から

10mm までの位置と下面から 10mm までの位置にひび割れおよび骨材の界面剥離が見られた。

#### 4. 考察

FT-F、FT-FT および FT-FT-r の内部観察結果から骨材の界面で黒色の領域が見られたため、骨材の界面付近でひび割れおよび剥離が発生したことが分かる。また骨材内部は白色で表されたため骨材内部にひび割れは発生していないことが分かる。FT-F では上部の隅角部が欠損したがこれは塗料が剥がれたことで側面から水分が浸透して損傷が起きたと考えられる。界面付近のひび割れおよび界面剥離は水平方向に多く見られた。アイスレンズは凍結方向と鉛直な方向に生成されるが、本実験は側面を断熱して熱の移動を高さ方向のみとして行ったため供試体で見られた界面付近のひび割れおよび界面剥離はアイスレンズの生成により発生したと考えられる。FT-F では凍結融解サイクル 300 回時に骨材の界面剥離が上部で見られて 400 回時には中央部でも見られた。この結果から以下のことが考えられる。凍結融解の繰り返しにより、骨材とセメントペーストの結合が緩くなることで供試体の透水性が大きくなる。透水性が大きくなることで、未凍結状態の供試体の表面近傍に外部から水分が浸透して、凍結過程ですら表面近傍でアイスレンズが生成されひび割れが発生する。その後、凍結融解サイクルの増加に伴い供試体の透水性がさらに大きくなることで、浸透した水分が中央部に到達する。その水分によって中央部でアイスレンズが生成されてひび割れが発生する。FT-F 以外の供試体では中央部にひび割れや界面剥離は見られなかったが凍結融解サイクルの増加に伴い発生する可能性があるため、更なる検討が必要である。

また FT-F および FT-FT の内部観察結果から凍結融解サイクルの増加に伴い界面剥離幅およびひび割れ幅の拡大が見られた。ひび割れに浸透した水分が凍結融解により再度アイスレンズを生成してひび割れ幅を拡大させたと考えられる。

一方で、FT-F-r は同じ温度境界条件の FT-F と比較するとひび割れが発生していないことが分かる。これはフリージングの影響によるものと考えられる。FT-F は上面が打設面であるのに対して、FT-F-r の上面は打設面ではないことから、供試体の上面の品質が異なるため現時点ではひび割れが発生していない可能性がある。しかしながら、FT-FT および FT-FT-r では打設面でない面側にもひび割れが見られたため、今後の凍結融解サイクル 400 回時の X 線 CT による撮影で内部観察結果から検討する必要がある。

#### 5. まとめ

本研究では、小規模の円柱コンクリート供試体に対して凍結融解実験を行い、コンクリートの凍結過程でアイスレンズが生成されることでひび割れが発生するという仮説の下、水平ひび割れの発生機構を検討した。アイスレンズは凍結方向と鉛直な方向に生成されるため、本研究でも供試体側面を断熱して熱の移動を高さ方向のみとした実験を行った。その結果、骨材の界面剥離や界面付近

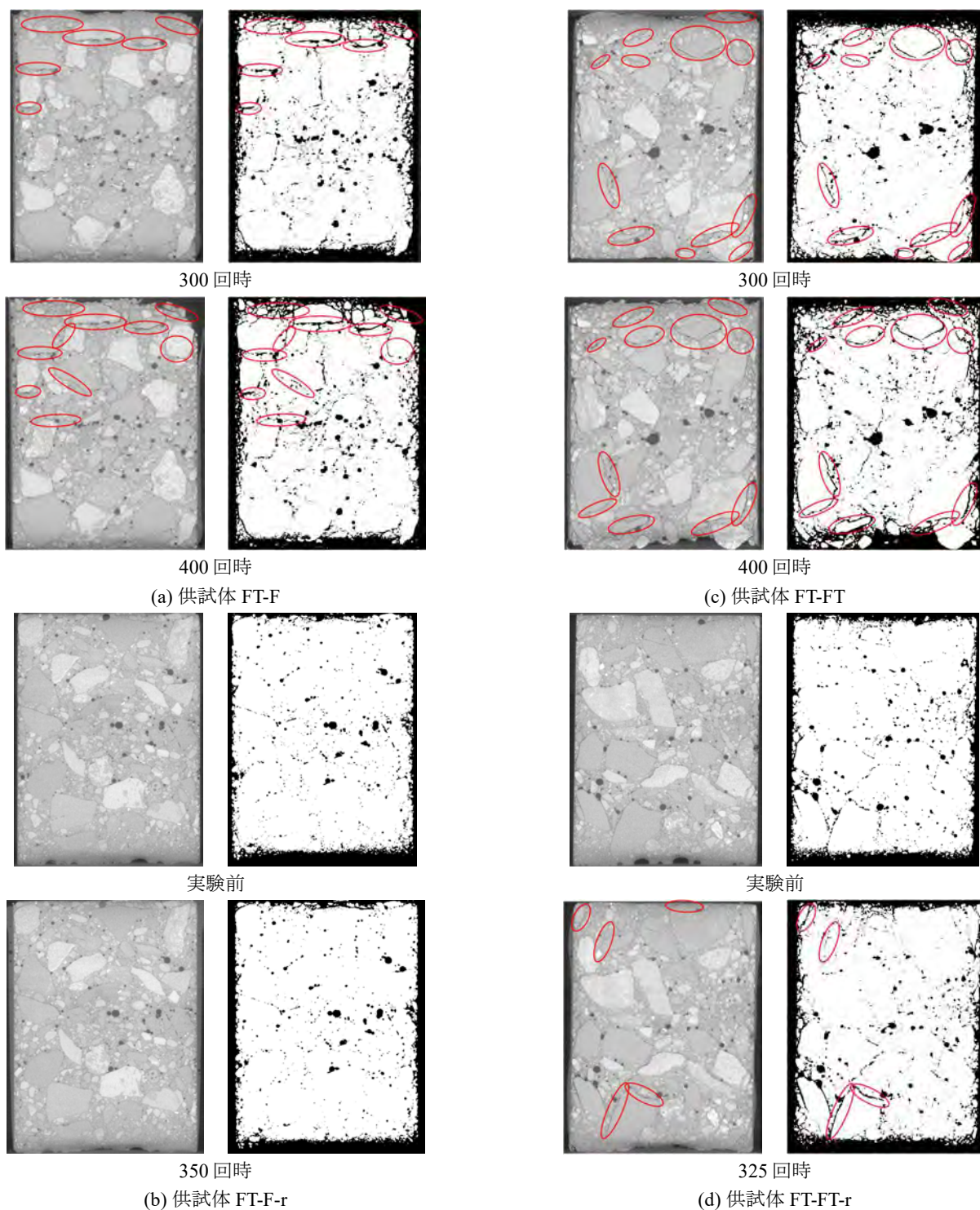


図-6 X線画像(左)と二値化画像(右)

のひび割れが水平方向に確認された。この結果からアイスレンズの生成によりひび割れが発生したことが考えられる。ひび割れの発生に関しては以下のことが考えられる。凍結融解により骨材とセメントペーストの結合が緩くなり、透水性が大きくなる。透水性が大きくなることで、未凍結状態の供試体の表面近傍に、外部から水分が浸透して、凍結過程でまずは表面近傍でひび割れが発生する。その後透水性がさらに大きくなることで水分が中央部に到達して中央部でひび割れが発生する。またひび割れ幅は浸透した水分が凍結融解により再度アイスレンズを形成することで拡大ことが考えられる。

#### 謝辞

本研究は公益財団法人鹿島学術振興財団国際共同研究援助金により実施された。ここに謝意を示す。

#### 参考文献

- 1) 林田宏：水平ひび割れの位置や凍害劣化深さの違いが床版の耐力低下に与える影響，寒地土木研究所，月報，No.804，2020。
- 2) 赤坂健太，鄧朋儒，松本高志：凍結融解によるコンクリート水平ひび割れ発生の一再現実験，第77号土木学会北海道支部論文報告集，A-48，2021。