

論文 実橋規模の支間を有する RC スラブが凍害を受けた場合の破壊性状

林田 宏*1

要旨: 実橋の RC 床版と同等程度のせん断スパン比を有するスラブ供試体を製作し、凍害劣化がスラブの破壊性状に与える影響について実験的検討を行った。その結果、健全なスラブは押し抜きせん断破壊であったのに対し、凍害劣化を受けたスラブは曲げ降伏後の圧縮破壊となり破壊形式が変化した。この原因として健全なスラブでは曲げひび割れの分散とアーチ機構の形成により高い部材剛性が保たれていたのに対し、劣化したスラブでは凍害で発生した水平ひび割れによってアーチ機構が形成できず、また、凍害劣化で強度が低下していたため上面が圧壊し、荷重点直下で曲げひび割れが局所的に進展したことが原因として考えられた。
キーワード: RC スラブ, せん断スパン比, 凍害, 劣化深さ, 静的荷重試験, 破壊形式, 局所化

1. はじめに

図-1 は、疲労と凍害との複合劣化を受ける道路橋 RC 床版の劣化進行過程を示したものである。この図のように、劣化が深さ方向に進行していく場合、劣化の進行に伴って床版の耐力が低下することが懸念される。しかし、疲労と凍害との複合劣化を受ける RC 床版に関して、疲労寿命を明らかにする研究は行われているが、複合劣化と耐力との関係は十分には明らかになっていない。

そこで、筆者は凍害劣化深さをパラメータとしたスラブ供試体を用いて検討を行った。その結果、劣化深さの進行により破壊形式が変化し、耐力が大きく低下することを明らかにした²⁾。

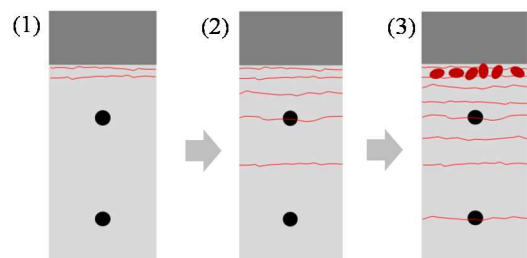
しかし、この知見は、凍結融解試験装置のサイズ制約のため、一般的な道路橋 RC 床版に比べてスパン長が短いスラブ供試体を用いて得られたものである。せん断スパン比の違いが RC はりなどの部材の破壊性状に与える影響は大きく、それは RC スラブにおいても同様であると考えられる。

そこで、本研究では、一般的な道路橋 RC 床版と同等程度のせん断スパン比を有するスラブ供試体を製作し、凍害劣化がスパンの大きなスラブの破壊性状に与える影響について、静的荷重試験による実験的検討を行った。

2. 実験概要

2.1 供試体概要

スラブ供試体の形状寸法、配筋を図-2 に示す。配筋およびスラブ厚 ($t=190\text{mm}$) は昭和 39 年の道路橋示方書で設計された床版供試体³⁾に準じている。凍結融解試験装置のサイズ制約のため、平面寸法は $2800 \times 2000\text{mm}$ とした。参考文献³⁾と同じせん断スパン比を確保するため、長辺方向を主鉄筋方向とした。また、下側主鉄筋と供試体上面には、図-2 に示す位置にひずみゲージを設置した。使用したコンクリートに関しては、早期に凍害劣化を顕在化させるため、コンクリートに AE 剤を使用せず、



- (1) かぶり部分で層状剥離が発生
- (2) 鉄筋付近や下側でも層状剥離が発生
- (3) 上縁付近で砂利化が発生

図-1 疲労と凍害で複合劣化する床版の劣化進行¹⁾

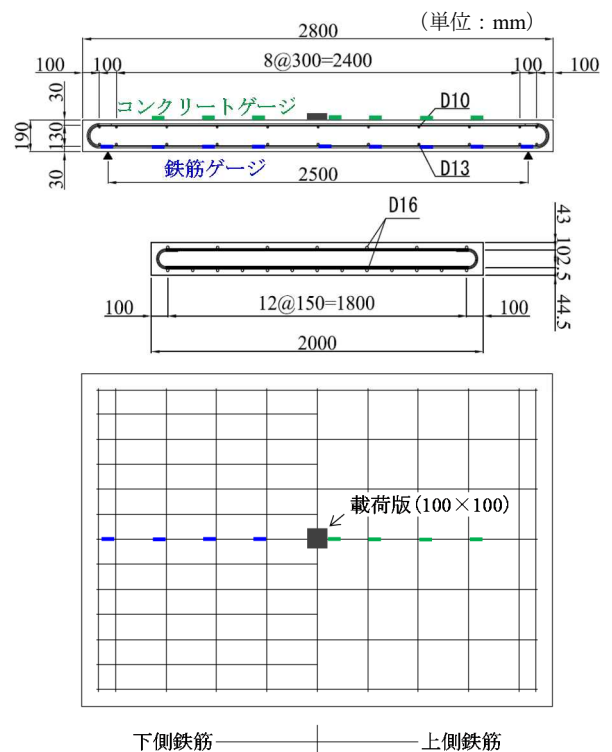


図-2 スラブ供試体の形状寸法、配筋

(上: 長辺方向断面 中: 短辺方向断面 下: 平面図)

*1 (国研) 土木研究所 寒地土木研究所 耐寒材料チーム主任研究員 (正会員)

水セメント比を 65%と大きめに設定した。なお、セメントには普通ポルトランドセメントを、骨材には粗骨材最大寸法 20mm の砕石を用いた。配合表を表-1 に示す。また、コンクリートと鉄筋の材料特性を表-2 に示す。なお、コンクリートの圧縮強度は、28 日標準水中養生後に実施した圧縮試験結果によるものである。また、鉄筋の降伏強度はミルシートの値である。

実験変数は凍結融解の有無である。表-3 に供試体名と凍結融解回数を示す。

2.2 凍結融解試験

コンクリート打設後、4 週目まで水中養生を行った後、凍結融解試験を開始した。劣化深さは参考文献²⁾と同じスラブ厚の 1/2 に設定した。凍結融解試験に当たっては、以下の 2 つの方法により劣化深さを制御した。1) 上面以外の面には断熱材を設置し、供試体の冷却・加熱は供試体上面からのみ行った。2) 設定した劣化深さの範囲のみに凍結融解作用を与えることとし、設定した劣化深さよりも下側の範囲では凍結を持続させた。具体的には、図-3 のように、スラブ厚の 1/2 の位置である深さ 95mm の位置に温度センサーを設置し、このセンサーの測定温度が $-18\sim 0^{\circ}\text{C}$ になるように温度を制御した。また、劣化程度を把握するため、温度センサーにあわせてモールドひずみゲージを鉛直方向に設置した。

このような温度条件で、気中凍結水中融解による凍結融解作用を 384 回与えた。この回数は、劣化が参考文献²⁾と同じ程度、すなわち、モールドひずみゲージの値が 2000μ 以上となるまでに要した回数である。

2.3 静的載荷試験

支持条件は 2 辺単純支持で、支間は 2500mm とした。せん断スパン比は 7.8 である。載荷版には $100\times 100\text{mm}$ の鋼板を使用し、供試体中央を一点集中載荷した。載荷装置には 1000kN 用油圧シリンダと手動ポンプを使用し、載荷速度が一定 (約 0.01mm/s) となるように操作を行った。計測項目は荷重、中央変位、および図-2 に示す位置に設置したゲージのひずみである。

3. 供試体 F の劣化状況 (採取コアの超音波速度)

凍害による供試体 F の劣化状況を確認するため、静的載荷試験終了後、載荷による損傷が比較的少ないと判断した箇所からコアを採取し、外観観察を行った。また、このコアを用いて、高さ方向に 10mm の間隔で、透過法による超音波速度の測定を行った。その結果を図-4 に示す。図の右側に示すコアの外観では、深さ 6cm 付近に、凍結融解作用によって発生したと考えられる水平ひび割れが確認できる。なお、凍結融解試験方法が同様であることから、水平ひび割れの発生原因は参考文献⁴⁾と同様に、内部の未凍結層が遅れて凍結する時に形成される

表-1 配合表

単位水量 (kg/m^3)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	空気量 (%)
171	65	48.6	2.0

表-2 材料特性

コンクリート 圧縮強度 (N/mm^2)	鉄筋 降伏強度 (N/mm^2)
29.0	384

表-3 供試体名と実験変数

供試体名	凍結融解回数
N	無 (健全)
F	384回

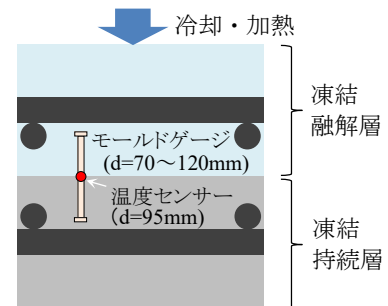


図-3 温度センサー、モールドゲージの設置深さ

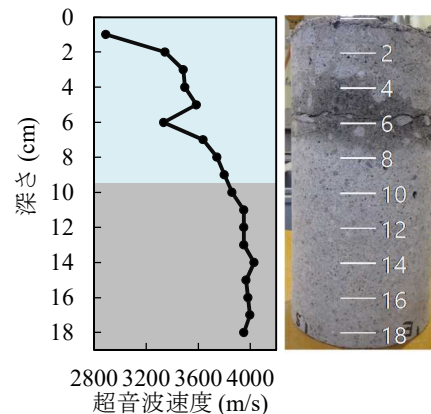


図-4 採取コアの超音波速度と水平ひび割れの状況

アイスレンズであると考えられる。また、図の左側に示す超音波速度の測定結果を見ると、凍結持続層に相当する深さ 11cm より下側の部分については、超音波速度の低下程度は小さく、ほとんど劣化はしていないと考えられる。一方、凍結融解作用を与えた深さ 10cm より上側の部分については、上面に近づくほど、超音波速度の低下程度が大きくなる速度分布となっていた。また、水平ひび割れ位置に近い深さ 6cm 地点では、隣接する地点の速度に比べて、一段と大きな速度の低下が見られた。

4. 静的荷重試験結果

図-5 に各供試体の荷重-変位曲線を示す。図中の○印は最大荷重時を示す。なお、表-2 の材料特性を用いて、コンクリート標準示方書⁵⁾に準拠して算出した供試体 N の押し抜きせん断耐力は 358kN であった。また、供試体下面のひび割れ状況を図-6 および図-7 に、載荷終了後の供試体切断面を写真-1 および写真-2 に示す。

4.1 供試体 N

図-5 の黒線で示す供試体 N に関しては、荷重 220kN で曲げ降伏した後、変位 62mm で最大荷重 266kN に達した。最大荷重に達した直後、荷重が急落して破壊に至った。その際、供試体下面の W 側では、図-6 の黒線で示す押し抜きせん断コーンのようなひび割れや剥離が急激に発生した。また、写真-1 上に示すように、切断面では、この押し抜きせん断コーンのひび割れに連続する載荷ひび割れ（赤線）が確認できた。したがって、供試体 N の破壊形式は、「押し抜きせん断破壊」である。

4.2 供試体 F

図-5 の赤線で示す供試体 F に関しては、変位 30mm 程度までは供試体 N とほぼ同様であり、部材剛性の低下は見られなかった。これは、前章で述べたように、曲げひび割れが発生、進展する引張領域のコンクリートがほぼ健全であったことが、その原因として考えられる。

しかし、変位 30mm 以降の供試体 F の挙動は、供試体 N とは異なるものとなった。図-5 に示すように、変位を増加させても、供試体 N のように荷重はあまり増加せず、写真-3 の赤四角で示すように、支間中央付近において、支持方向と平行な方向に上面のコンクリートが圧壊し、変位 50mm で最大荷重 239kN（N の耐力の 90%）に達した。なお、このような上面の圧壊は供試体 N では

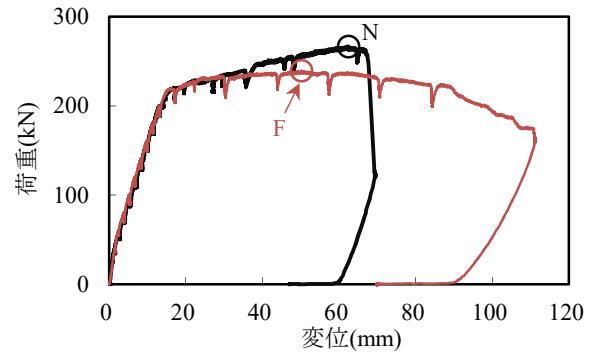


図-5 荷重-変位曲線

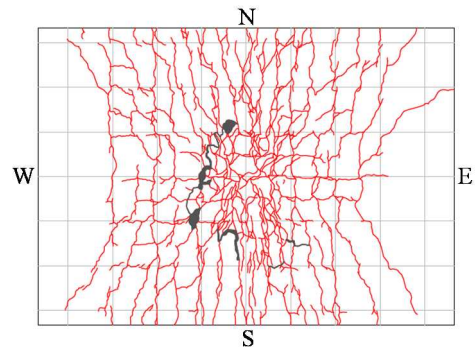


図-6 下面のひび割れ状況（供試体 N）

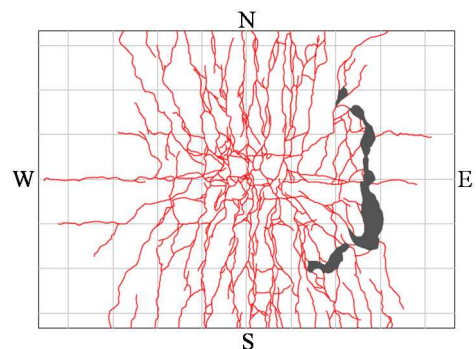


図-7 下面のひび割れ状況（供試体 F）

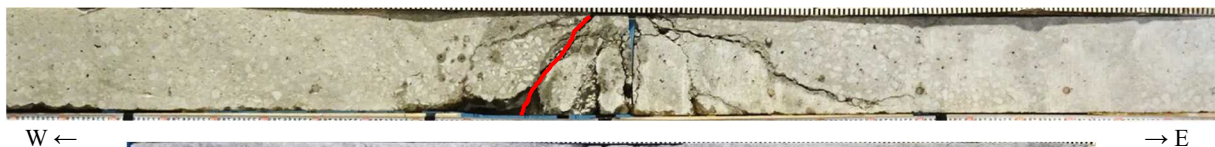


写真-1 切断面（供試体 N）



写真-2 切断面（供試体 F）

（上：主鉄筋方向 下：配力筋方向）

見られなかった。破壊形式を最大荷重直後のものであると定義すると、供試体 F の破壊形式は、「曲げ降伏後の圧縮破壊」である。

その後、変位 90mm 程度までは荷重が緩やかに低下した。変位 90mm 以降は、荷重の低下速度がやや速くなったが、外観上、上面の圧壊部分の変化や下面における新たなひび割れの発生はあまり見られなかった。変位が 110mm 程度に達すると、供試体 N のように急激ではないものの、供試体下面の E 側では押し抜きせん断コーンのようなひび割れや剥離が発生した（図-7 黒線）。なお、この時点の荷重は 169kN（N の耐力の 63%）であった。また、写真-2 上に示すように、切断面では、この押し抜きせん断コーンのひび割れに連続するせん断ひび割れ（赤線）が水平ひび割れよりも下側で発生していた。

5. 破壊形式変化のメカニズムに関する考察

供試体 F が供試体 N とは異なる破壊形式になったのは、凍害劣化に伴う強度低下のため、圧縮領域のコンクリートが圧壊し、載荷点直下において曲げひび割れが局所的に進展したことで、部材の変形が局所化したことが主な原因として考えられる。以下に、その根拠を述べる。

5.1 上面コンクリートと下側主鉄筋のひずみ

各供試体のひずみ分布を比較するため、供試体 F の最大荷重直前の荷重である 235kN 時における各供試体のコンクリートひずみと鉄筋ひずみの分布を図-8、図-9 に示す。まず、図-8 に示すコンクリートのひずみを見ると、W350 と E80 地点で供試体 F のひずみが供試体 N よりも大きくなっている。これは、供試体 F の圧縮領域のコンクリート強度が凍害劣化によって低下していたため、ひずみが大きくなったことが原因であると考えられる。次に、図-9 に示す下側主鉄筋のひずみを見ると、W350、E350、E650、E950 地点で供試体 F のひずみが供試体 N よりも小さくなっている。これは、供試体 F において、載荷点直下のひび割れが局所的に進展したことに伴い、上記の地点では鉄筋のひずみが小さくなったことが原因であると考えられる。

5.2 各供試体の破壊までの損傷過程

以下では、上記のひずみ分布や載荷試験中に確認した下面のひび割れの進展状況などを踏まえて、各供試体における破壊までの損傷過程を推察し、破壊形式が変化したメカニズムについて考察を行う。各供試体における破壊までの損傷過程の概念図を図-10、図-11 に示す。

(1) 供試体 N

供試体 N に関しては、破壊までの損傷過程において、供試体 F とは異なる 2 つの特徴がある。まず、1 つ目の特徴は「曲げひび割れの分散性が良好に保たれていた」ということである。前節で述べた鉄筋のひずみ分布や載

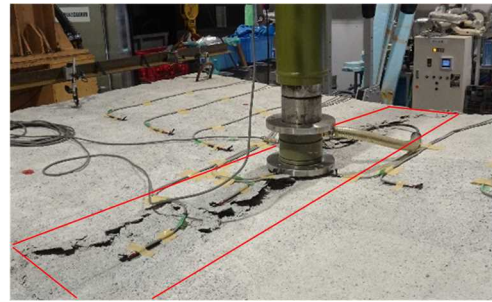


写真-3 供試体 F の上面の圧壊状況

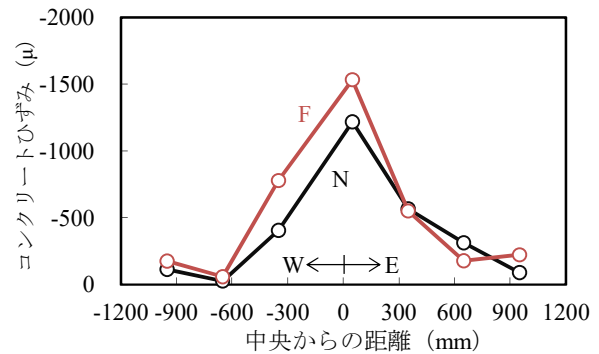


図-8 上面コンクリートのひずみ分布 (235kN 時)

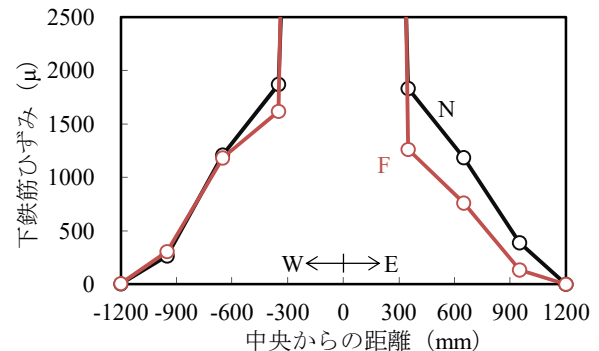


図-9 下側主鉄筋のひずみ分布 (235kN 時)

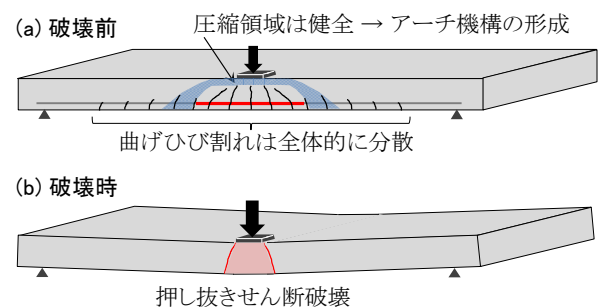


図-10 破壊までの損傷過程 (供試体 N)

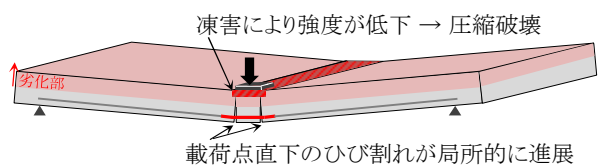


図-11 破壊までの損傷過程 (供試体 F)

荷試験中の下面ひび割れの状況から、断面における曲げひび割れの発生状況を推察すると、供試体Nにおいては、破壊に至る前まで、図-10 (a) のように、曲げひび割れが全体的に分散して発生していたと考えられる。次に、2 つ目の特徴は「アーチ的耐荷機構が形成されていた」ということである。参考文献⁹⁾では、RC床版の輪荷重走行試験において、比較的早期の段階からアーチ機構が形成されることを指摘している。供試体Nにおいても同様に、アーチ機構が形成されていたと考えられる。すなわち、後述する供試体Fとは異なり、供試体Nの圧縮領域は健全であったため、載荷点直下付近で生じる大きな圧縮力に対しても、コンクリートは破壊せず、図-10 (a) に示すようにアーチ機構の形成が可能であったということである。以上のことから、供試体Nにおいては、曲げひび割れの分散性が確保されており、かつ、アーチ機構が形成されていることから、比較的高い部材剛性が保たれていたと考えられる。そして、図-10 (b) のように最大荷重に達した時点でアーチクラウンを押し抜いたため、「押し抜きせん断破壊」に至ったものと考えられる。

(2) 供試体 F

供試体 F の損傷過程は、供試体 N とは対照的である。図-11 に示すように、載荷点付近では、圧縮領域のコンクリート強度が凍害劣化によって低下していたため、曲げに伴う大きな圧縮力に耐えられず、コンクリートが破壊した。この破壊に伴い、曲げひび割れが載荷点直下において局所的に進展し、部材の変形が局所化した。このようにして、供試体 F は「曲げ降伏後の圧縮破壊」に至ったものと考えられる。

6. 水平ひび割れが破壊性状に及ぼす影響

本章では、両供試体の破壊過程を比較することで、凍結融解作用により供試体 F で発生した水平ひび割れが、破壊性状に及ぼす影響について考えてみたい。

6.1 水平ひび割れがアーチ機構形成に及ぼす影響

前章で述べたように、供試体Nでは、図-12 上図に示すようにアーチ機構が形成されていたが、供試体Fではアーチ機構が形成されなかった。その一つの要因として、水平ひび割れが影響していた可能性がある。具体的には、図-12 下図に示すように、アーチリブに相当する部分を水平ひび割れが切断するような形となっていたため、アーチを形成するための応力伝達が十分にできなかった可能性がある。上面の圧壊や曲げひび割れが載荷点直下で局所的に進展した要因として、アーチ機構が形成できず、曲げ作用が卓越したことも一因であると考えられる。

6.2 水平ひび割れがせん断ひび割れの進展に及ぼす影響

また、水平ひび割れは、せん断ひび割れの進展にも影響していた可能性がある。図-13 下図は、写真-2 上の

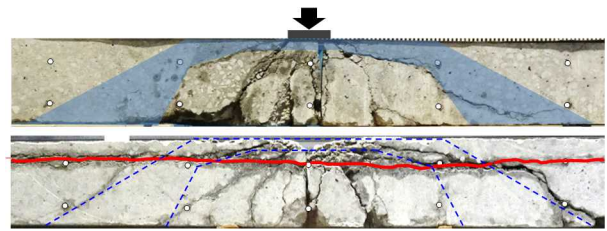


図-12 供試体 N のアーチ形成 (上図) と水平ひび割れのためアーチが形成できなかった供試体 F (下図)

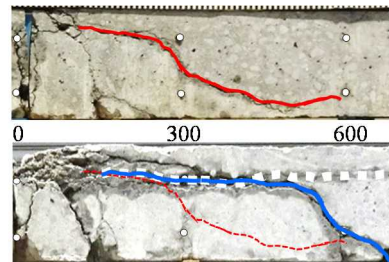


図-13 供試体 N (上) と F (下) のせん断ひび割れ

赤線で示した供試体 F のせん断ひび割れ部分を拡大したもので、上図は同じ位置の供試体 N のせん断ひび割れを示している。まず、図-13 上図に示す供試体 N について見ると、アーチリブの内側に沿ったせん断ひび割れ (赤線) が発生している。次に、図-13 下図に示す供試体 F を見ると、供試体中心から約 250mm までは、供試体 F のせん断ひび割れ (青線) は、供試体 N のせん断ひび割れ (赤点線) と概ね同じ経路をたどっている。しかし、その外側では、供試体 F のせん断ひび割れは、供試体 N のせん断ひび割れとは異なる経路で進展している。具体的には、以下のとおりである。供試体 F のせん断ひび割れ (青線) は、凍結融解作用により載荷前から発生していた水平ひび割れ (白点線) が存在しているため、供試体 N のせん断ひび割れ (赤点線) のように、斜め下方向には進展することができず、一旦、水平ひび割れに沿って進展している。そして、約 500mm の位置で斜め下方向に進展している。

6.3 水平ひび割れがピーク以降の挙動に及ぼす影響

4.2 で述べたように、供試体 F が最大荷重に達して、破壊した後も荷重は急速に低下しなかった。このような高い曲げじん性を示した理由として、水平ひび割れが関係していると考えられる。以降、その根拠について述べる。図-14 は、供試体 F に関して、最大荷重時 (ピーク時) の状況 (a) とピーク以降の挙動 (b) (c) を示した概念図である。また、図-15 の青線は、水平ひび割れがないと仮定した場合、ピーク以降に供試体 F の荷重がどのように低下するのかを想定したものである。

ピーク以降の挙動は水平ひび割れの有無で異なる。水平ひび割れがない場合、図-14 (a) に示すように、上面は圧壊しているため、圧縮力を分担できず、図-15 の

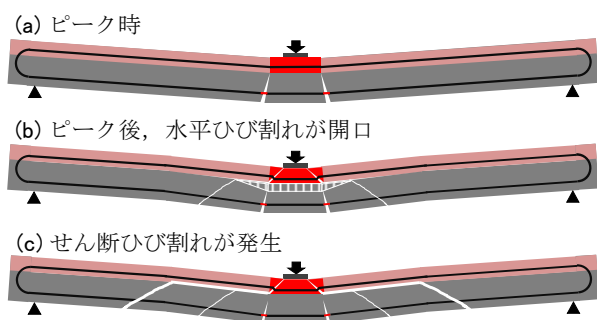


図-14 水平ひび割れによるピーク以降の挙動への影響

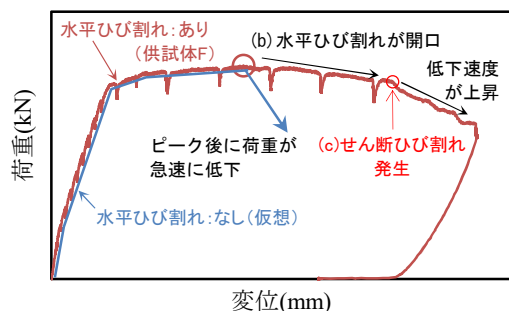


図-15 水平ひび割れの有無による荷重低下の違い

青矢印で示すように、変位の増加に伴い、荷重が急速に低下する。一方、実際に水平ひび割れが発生している供試体Fにおいて、変位を増加させると、図-14 (b) のように、水平ひび割れが開口して、上側（薄赤色）と下側（灰色）の版が異なる挙動を示す。荷重は、上側主鉄筋のダボ作用と赤色のせん断コーンを介して下側の版とで支えられている。ここで、下側の版の部材剛性について考えてみると、部材厚が薄くなったことに加えて、主鉄筋は下側のみになっているため、もとのスラブに比べて部材剛性は低下している。そのため、変位を増加させると、下側の版は曲げが大きくなり、赤色のせん断コーンに近い方から支点方向に向かって水平ひび割れが開口していく。図-13 下図では、せん断ひび割れ（青線）が、一旦、水平ひび割れに沿って進展した部分である。下側の版の曲げが大きくなるのに伴って、荷重は広い範囲で支えられる。図-14 (b) の白い縦縞線は、圧縮力の分担イメージである。このように、荷重が広い範囲で支えられているため、下側の版の上面では、水平ひび割れがない場合のような局所的な圧壊が起こらない。その結果、供試体Fはピーク以降においても高い曲げじん性を示したものと考えられる。しかし、さらに変位が増加し、下側の版の変形が大きくなると、下面に達するせん断ひび割れが発生する（図-14 (c)）。図-13 下図では、せん断ひび割れ（青線）が約 500mm の位置で斜め下方向に進展した部分である。4.2 で述べたように、変位 90mm 以降に荷重の低下速度が速くなったのは、このせん断ひび割れの発生によるものと考えられる。

7. まとめ

一般的な道路橋 RC 床版と同等程度のせん断スパン比を有するスラブ供試体を製作し、凍害劣化がスパンの大きなスラブの破壊性状に与える影響について、静的載荷試験による実験的検討を行った。本研究の範囲内で得られた知見を要約すると、以下のとおりである。

- (1) 健全な供試体 N は押し抜きせん断破壊であったのに対し、凍害劣化した供試体 F は曲げ降伏後の圧縮破壊となり、破壊形式が変化した。
- (2) 供試体 N では、曲げひび割れの分散とアーチ機構の形成により高い部材剛性が保たれていた。一方、供試体 F では、凍害で発生した水平ひび割れによってアーチ機構が形成できなかった。また、凍害劣化で強度が低下していたため、曲げに伴う大きな圧縮力に耐えられず、コンクリートが圧壊した。この圧壊に伴い、曲げひび割れが載荷点直下において局所的に進展し、部材の変形が局所化したことが、破壊形式が変化した原因として考えられた。
- (3) 供試体 F がピーク以降においても高い曲げじん性を発揮できたのは、水平ひび割れによって分離されている下側の版が荷重を広い範囲で支えていたことが一因であると考えられた。

今回の実験は、1) 境界条件が 2 辺単純支持であること、2) 支持方向の長さが支間方向の長さに比べて短いことなど、実橋床版とは条件が異なる。したがって、境界条件や支持方向の長さなどを実橋床版と合わせた際に、今回の知見が成り立つかどうか確認する必要がある。

参考文献

- 1) 道路橋床版の維持管理マニュアル, 土木学会, 2016
- 2) 林田宏: 凍害劣化の進行に伴う RC スラブの破壊形式の変化と耐力の低下, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, 第 19 巻, pp.441-446, 2019.10
- 3) 中谷昌一, 内田賢一, 西川和廣, 神田昌幸, 宮崎和彦, 川間重一, 松尾伸二: 道路橋床版の疲労耐久性に関する試験, 国土技術政策総合研究所資料第 28 号, 2002.3
- 4) 林田宏: 凍結融解作用により RC 床版内部に生じる水平ひび割れの再現実験, 土木学会第 74 回年次学術講演概要集 (V 部門), V-251, 2019.9
- 5) 2012 年制定 コンクリート標準示方書 [設計編], 土木学会, 2013
- 6) 田中良樹, 村越潤, 長屋優子: 道路橋 RC 床版の疲労損傷過程における上面かぶりの剥離の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.3, pp.913-918, 2008.7