

# 論文 凍結融解作用で水平ひび割れが発生した RC スラブの疲労载荷試験

林田 宏\*1

**要旨:** 凍害によって生じる材料劣化や水平ひび割れがスラブの疲労寿命に与える影響について検討するため、凍害深さがスラブ厚の 1/4 と 1/2 のスラブを作製し、定点疲労载荷試験を行った。その結果、凍害深さが深いほど疲労寿命は短くなり、凍害深さがスラブ厚の 1/4 の供試体では健全の約 1/2 に、1/2 の供試体では健全の約 1/140 になった。この原因は、1) 凍害劣化に伴う引張強度の低下に起因して、上面側の劣化した部分に斜めひび割れが発生したこと、2) 凍結融解作用による水平ひび割れによって、荷重を支えるスラブの厚さが減少したため、健全なスラブに比べて短い载荷回数で破壊に至ったからである。

**キーワード:** RC スラブ, 凍害, 疲労, 凍害深さ, 水平ひび割れ, スラブ厚, 疲労寿命

## 1. はじめに

既往の研究<sup>1)</sup>で、凍害を受けたスラブの静的载荷試験の結果について報告を行った。写真-1 は、载荷後の切断面の状況である。上側に示す健全供試体では、载荷点から供試体下面までせん断ひび割れが発生している。一方、下側に示す凍害供試体では、せん断ひび割れが発生しているのは载荷点付近だけで、途中から水平方向のひび割れになっている。破壊時のひび割れに関して、両供試体でこのような違いが生じたのは、以下のことが原因であると考えられた。

- 1) 凍害供試体では、凍結融解作用によって水平ひび割れが発生していたこと
- 2) 水平ひび割れによって载荷点から伸びるせん断ひび割れの向きが水平方向へ変えられたこと

以上のような静的载荷試験の結果から、凍害劣化がスラブの破壊性状に影響を与えることが明らかとなった。

一方で、凍結融解作用によって水平ひび割れが発生していた場合、疲労寿命にも影響を与えることが想定される。そこで、本研究では、凍害がスラブの疲労寿命に与える影響について検討するため、2 水準の凍害供試体を作製し、定点疲労载荷試験による実験的検討を行った。以下、その検討結果について報告を行う。

## 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-1 に示す。配筋およびスラブ厚 ( $t=160\text{mm}$ ) は、昭和 39 年の道路橋示方書に準じて設計を行った。

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、水セメント比を 65% 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 の碎石を用いた。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

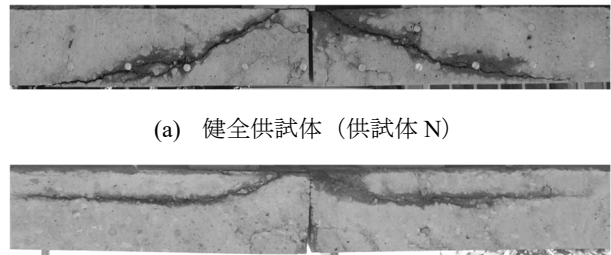


写真-1 静的载荷試験終了後の切断面 (橋軸方向)<sup>1)</sup>

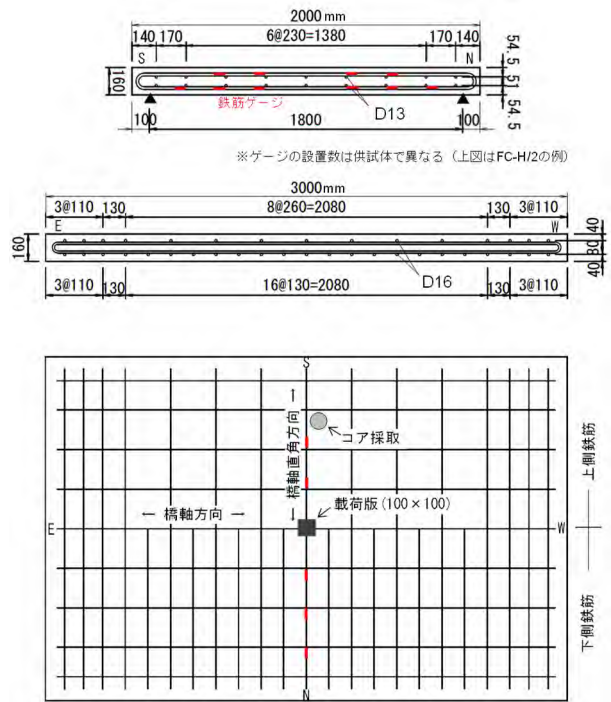


図-1 スラブ供試体の形状寸法、配筋  
(上:橋軸直角方向断面 中:橋軸方向断面 下:平面図)

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。なお、スラブ供試体の形状

\*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)

寸法，配筋，コンクリート配合は，既往の研究<sup>1)</sup>と同じものである。

実験変数は凍害深さである。表-3 に各供試体の凍害深さと供試体名を示す。ここで，実験変数を凍害深さとしたのは以下の理由からである。凍害は一般的に構造物表面から内部へと劣化が進行する。また，道路橋床版では凍害劣化の要因である水分が主に上面から供給される。これらのことから，凍害劣化は床版上面から下面方向へと深さ方向に進行すると考えられる。この仮定に基づき，各供試体の凍害深さとして，FC-H/4 はスラブ厚の 1/4 である上面から 40mm まで，FC-H/2 はスラブ厚の 1/2 である上面から 80mm までを劣化範囲として設定した。なお，凍結融解を与えていない健全供試体を供試体 NC と呼ぶ。また，以下では，FC-H/4 と FC-H/2 を供試体 F シリーズと呼ぶ。

## 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，供試体 F シリーズの凍結融解試験を開始した。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-2 のように，FC-H/4 は深さ 40mm の位置に，FC-H/2 は深さ 80mm 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（以降，温度センサーを設置した位置を「0℃点」と呼ぶ）。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（基長：50mm，適用温度範囲： $-20\sim +60^{\circ}\text{C}$ ）を鉛直方向に設置した。このような温度条件で，上面に 10mm 程度の水を張った水中凍結水中融解による凍結融解作用を FC-H/4 は 382 回，FC-H/2 は 349 回与えた。この回数はモールドひずみゲージの値が  $8000\mu$  以上となるまでに要した回数である。なお，前回の実験<sup>1)</sup>では，ひずみの目標値を  $2000\mu$  としていたが，水平ひび割れを確実に発生させるため，今回は前回よりも大きめの値に設定した。

## 2.3 疲労載荷試験

疲労載荷試験は，周波数 1Hz の正弦波で，供試体中央を定点載荷した。載荷時の上限荷重は，供試体 N の降伏荷重の 70% (160kN)，下限荷重は上限荷重の 10% (16kN) とした。支持条件 (2 辺単純支持)，支間 (1800mm)，載荷版 (100×100mm) などの条件は，既往の研究<sup>1)</sup>の静的載荷試験と同じである。ただし，FC-H/2 については，支承の設置を予定していた隅角部付近が，凍害劣化によって断面欠損していたため，支承位置をずらし，支間を 1710mm とした。

表-1 配合表

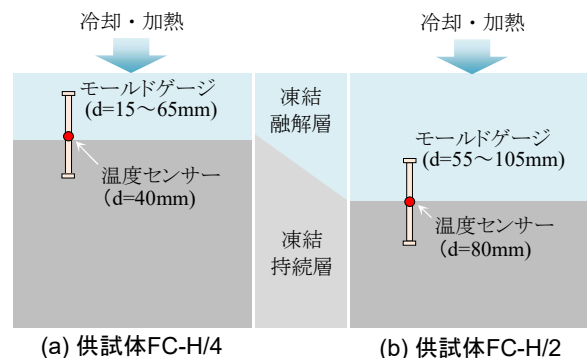
W/C (%)	Air (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )			
			W	C	S	G
65	2.0	48.6	171	263	904	947

表-2 材料特性

コンクリート 圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	鉄筋 降伏強度 (N/mm <sup>2</sup> )
24.9	393

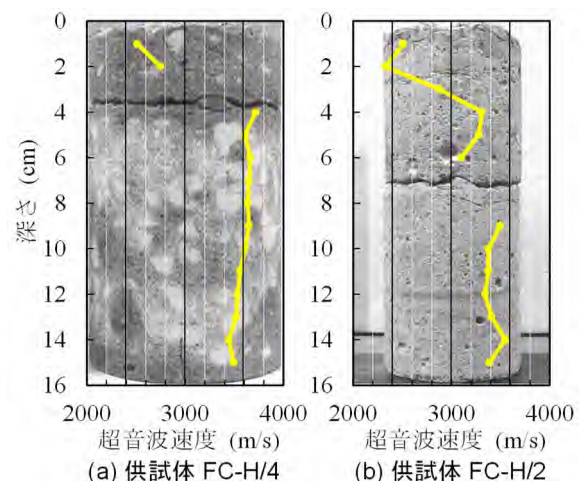
表-3 供試体名と凍害深さ

供試体名	凍害深さ
NC	なし(健全)
FC-H/4	40mm
FC-H/2	80mm



(a) 供試体FC-H/4 (b) 供試体FC-H/2

図-2 温度センサー，モールドゲージの設置深さ



(a) 供試体 FC-H/4 (b) 供試体 FC-H/2

図-3 採取コアの超音波速度と水平ひび割れの状況

載荷は，上限変位や下面のひび割れ状況などから供試体内部でせん断ひび割れが生じ，破壊に至ったと考えられた時点で試験を終了した。計測項目は荷重，中央変位，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 シリーズの劣化状況

供試体 F シリーズの凍害劣化状況を確認するため、凍結融解試験終了後、**図-1** に示す位置からコアを採取し、高さ方向に 10mm の間隔で超音波速度の測定を行った。その結果を**図-3** に示す。

#### 3.1 供試体 FC-H/4

**図**の左側に示すように、FC-H/4 の 0°C 点である深さ 4cm の近くに水平ひび割れが発生していた。これは、0°C 点付近に滞留した水の層間凍結によって生じたものである<sup>2)</sup>。また、超音波速度のグラフでは、0°C 点より上側の凍結融解層に位置する深さ 1~2cm の範囲については速度が大きく低下していた。一方、凍結持続層に位置する深さ 4~15cm では、速度はほとんど低下していなかった。なお、深さ 3cm のデータが欠損しているのは、水平ひび割れによって計測できなかったためである。

#### 3.2 供試体 FC-H/2

**図**の右側に示すように、FC-H/4 のコアと同様に、FC-H/2 においても、0°C 点である深さ 8cm の近くに水平ひび割れが発生していた。また、超音波速度のグラフでは、0°C 点より上側の凍結融解層に位置する深さ 1~6cm の範囲については速度が大きく低下していた。一方、凍結持続層に位置する深さ 9~15cm では、速度の低下は小さかった。なお、深さ 7cm と 8cm のデータが欠損しているのは、水平ひび割れによって計測できなかったためである。

## 4. 荷重試験結果

各供試体の上限荷重時の中央変位の推移を**図-4** に示す。また、供試体下面のひび割れ状況を**図-5** に、荷重終了後の供試体切断面を**写真-2**~**写真-4** に示す。

#### 4.1 供試体 NC

**図-4** に黒で示す供試体 NC に関しては、荷重回数が 25000 回くらいから変位が急増し始め、その後、荷重が上限荷重まで上がらなくなったため、試験を終了した。

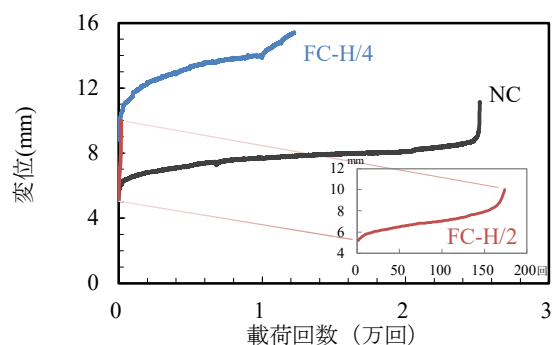
試験終了後、下面のひび割れ状況を確認したところ、**図-5** 左に黒線で示すように、下面には押し抜きせん断コーンのものと思われるひび割れが発生していた。また、**写真-2** に示す荷重終了後の供試体切断面には、この下面のひび割れに連続する斜めひび割れが発生していた。

#### 4.2 供試体 FC-H/4

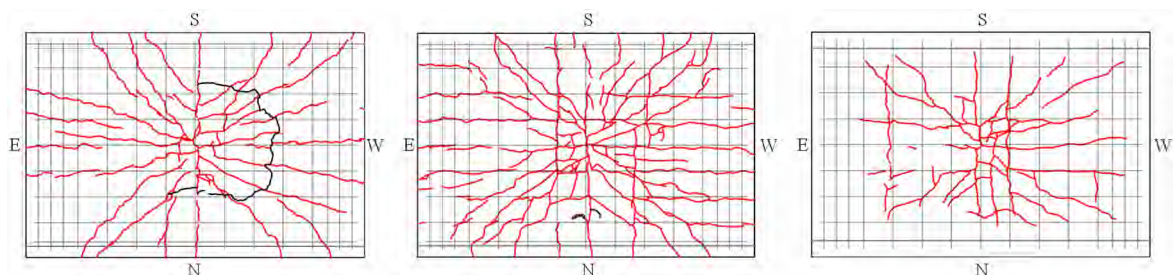
**図-4** に青で示す FC-H/4 に関しては、荷重回数が 10000 回から 12000 回の間で変位が急増したため、12300 回で試験を終了した。後ほど述べるが、FC-H/4 では、この時点で斜めひび割れが発生しており、この時点を経過寿命とすると、その寿命は NC の約 1/2 となる。また、試験終了後、下面のひび割れ状況を確認したところ、**図-5** 中央に黒線で示すようなひび割れが N 側に発生していた。そして、荷重終了後の供試体切断面には、**写真-3** 上に示すように、この下面のひび割れに連続する斜めひび割れが発生していた。一方で、写真下に示す橋軸方向には、橋軸直角方向のような斜めひび割れは発生しておらず、代わりに凍結融解作用による水平ひび割れが全面に発生していた。

#### 4.3 供試体 FC-H/2

**図-4** に赤で示す FC-H/2 に関しては、荷重回数が 120 回くらいから変位が急増し始め、174 回で荷重が上限荷重まで上がらなくなったため、試験を終了した。後ほど述べるが、FC-H/2 では、この時点で斜めひび割れが発生しており、この時点を経過寿命とすると、その寿命は NC の約 1/140 となる。また、試験終了後、FC-H/4 のようなせん断ひび割れに連続するひび割れが下面に発生していないか確認を行ったが、そのようなひび割れは見られなかった。斜めひび割れに連続するひび割れが下面に発生しなかったのは、**写真-4** 上のように、供試体内部には支点近くまで伸びる斜めひび割れが発生したが、このひび割れの先端が下面に達していないからである。



**図-4** 中央変位の推移 (上限荷重時)



**図-5** 下面のひび割れ状況 (左から NC, FC-H/4, FC-H/2)

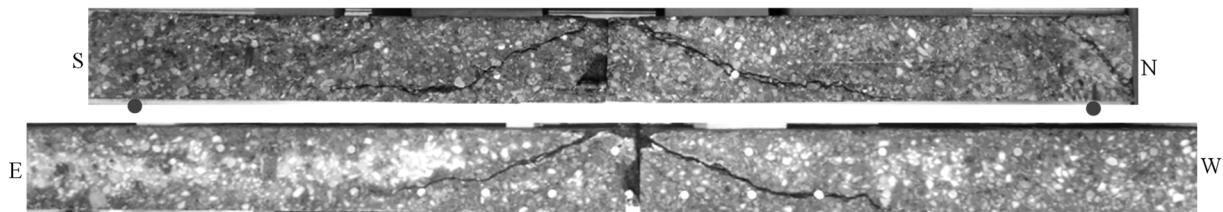


写真-2 供試体 NC の切断面 (上：橋軸直角 下：橋軸方向)

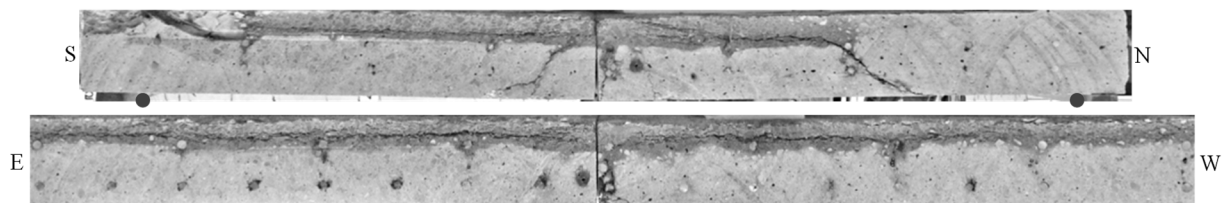


写真-3 供試体 FC-H/4 の切断面 (上：橋軸直角 下：橋軸方向)

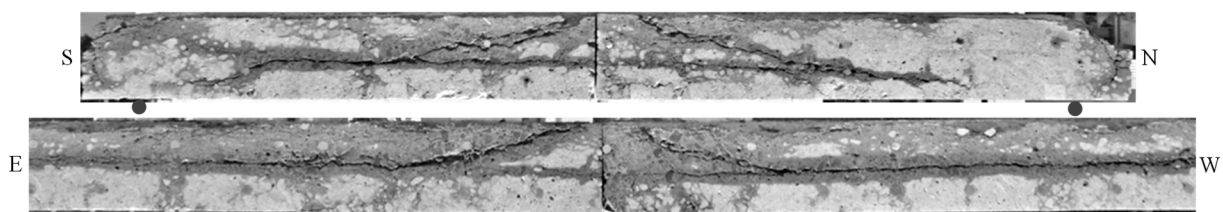


写真-4 供試体 FC-H/2 の切断面 (上：橋軸直角 下：橋軸方向)

## 5. F シリーズの疲労寿命が短くなった理由に関する考察

前章で述べたように、凍結融解作用によって水平ひび割れが発生していた F シリーズの疲労寿命は NC に比べて大幅に短くなった。本章では、凍害を受けたスラブの疲労寿命が、このように短くなるメカニズムについて、斜めひび割れの進行過程とともに考えてみたい。

### 5.1 供試体 NC

供試体 NC の破壊が F シリーズと異なる点は、(1) 押し抜きせん断コーンが発生し、急激に破壊に至ったこと、(2) 押し抜きせん断コーンを形成する斜めひび割れが橋軸方向と橋軸直角方向の両方において、下面付近にまで達していることである。以降では、この斜めひび割れがどのタイミングで発生したのかについて、下鉄筋のひずみのデータを用いて考えてみたい。

図-6 は支間中央から S 側 280mm 位置 (以下、「S280」) における下鉄筋のひずみの推移である。グラフの 20000 回を過ぎたあたりに着目すると、鉄筋のひずみが急増していることが確認できる。これは、20000 回付近で、図中の写真に示す斜めひび割れが S280 付近まで進展し、鉄筋が引っ張られたためだと考えられる。その後、23000 回を境にひずみが急激に減少しているのは、押し抜きせん断破壊に伴うものであると考えられる。具体的には、載荷点付近において斜めひび割れが圧縮領域を貫通したのと同時に、図中の写真のように、斜めひび割れが支点方向へと進展し、付着割裂ひび割れが発生したため、S280 の位置では、ひずみが急激に減少したと考えられる。

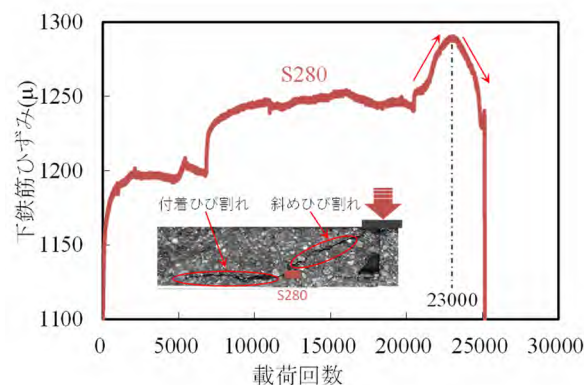


図-6 下鉄筋ひずみの推移 (供試体 NC, S 側 280mm 位置)

### 5.2 供試体 FC-H/4

#### (1) N 側に発生した斜めひび割れの進行過程

次に、供試体 FC-H/4 供試体の N 側に発生した斜めひび割れの進行過程について、鉄筋のひずみの推移から考えてみたい。図-7(a) は上鉄筋のひずみの推移を示している。図のように、それまで概ね圧縮を示していた各位置のひずみは、1 万回目に引張へと転じた。1 万回目を境に引張が急増する挙動は下鉄筋でも見られた。図-7(b) に示す下鉄筋のひずみの推移において、斜めひび割れの直近に位置する N510 (青色) に着目すると、1 万回目以降、引張が急増していることが確認できる。これらのことから、N 側の斜めひび割れは 1 万回目に発生したと考えられる。なお、斜めひび割れの発生に伴って引張が急増するメカニズムは、以下のとおりである。

- 1) 図-7(a)の下側に示す写真のように、凍結融解作用によって生じていた「水平ひび割れ」と新たに発生した「斜めひび割れ」によって、スラブは「荷重点側」と「支点側」に分離する。
- 2) 「荷重点側」には、直接、荷重が載っているため、下方向に下がろうとする。
- 3) 一方、「支点側」は、支点によって支えられているため、あまり下がらない。
- 4) このため、斜めひび割れの位置で「荷重点側」と「支点側」に変位差が生じる。
- 5) その結果、斜めひび割れの直近に位置する鉄筋には大きな引張が作用する。

(2) 斜めひび割れの進展に伴う水平ひび割れの開口

図-7(a)の写真で見られる上鉄筋付近の水平ひび割れは、比較的初期の段階で形成されていたと考えられる。このように考えるのは以下の理由からである。水平ひび割れがないスラブでは、荷重回数の増加によってたわみが増加すると、圧縮縁に近い上鉄筋のひずみは圧縮側へと増加していく。しかし、FC-H/4では、図-7(a)に示すように、荷重開始直後から概ね2000回までの間に各位置のひずみが引張側に大きく増加している。これは、荷重点から伸びる斜めひび割れの進展に伴って、凍結融解作用で発生していた水平ひび割れが開口していったため、鉄筋のひずみが引張側に増加したからだと考えられる。

(3) 疲労寿命が短くなった理由

以上のことから、FC-H/4の疲労寿命がNCに比べて短くなったのは、凍結融解作用によって生じていた水平ひび割れによって、荷重を支えるスラブの厚さが減少していたため、NCに比べて短い荷重回数で斜めひび割れが発生したことが原因であると考えられる。ただし、FC-H/4は、NCや後述するFC-H/2とは異なり、1万回目で斜めひび割れが発生しても、その後、2千回は荷重が低下することなく、繰返し荷重に耐えることができた。これは、S側や橋軸方向に斜めひび割れが発生していないため、荷重を広い範囲で支えることができたからだと考えられる。

5.3 供試体 FC-H/2

(1) 斜めひび割れの進行過程

図-8(a)はモールドゲージのひずみの推移を示している。なお、このモールドゲージは2章で述べた凍結融解に用いたものである。モールドゲージは荷重点直下にあることから、荷重開始から125回までは大きな圧縮を示している。しかし、126回目に大きく引張側に転じている。これは、斜めひび割れが発生したからだと考えられる。このことは、鉄筋のひずみの推移からも読み取れる。まず、図-8(b)に示す上鉄筋のひずみについて見ていきたい。図に示すS280(赤色)とN280(桃色)に着

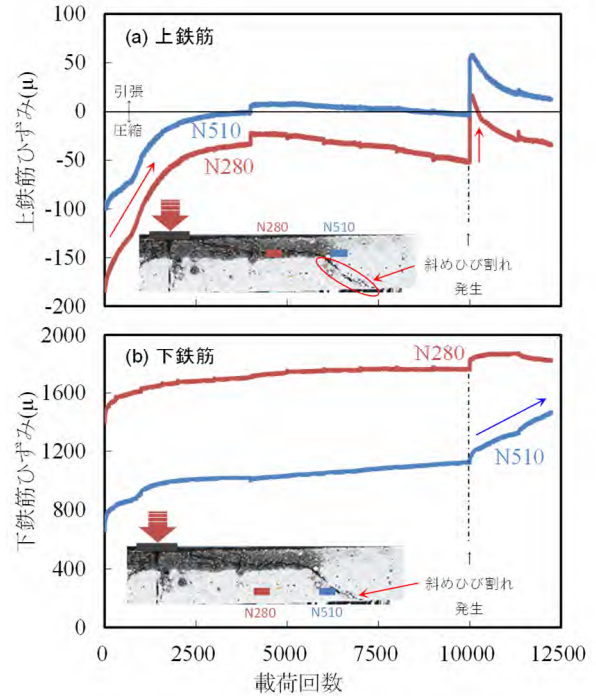


図-7 ひずみの推移 (FC-H/4)

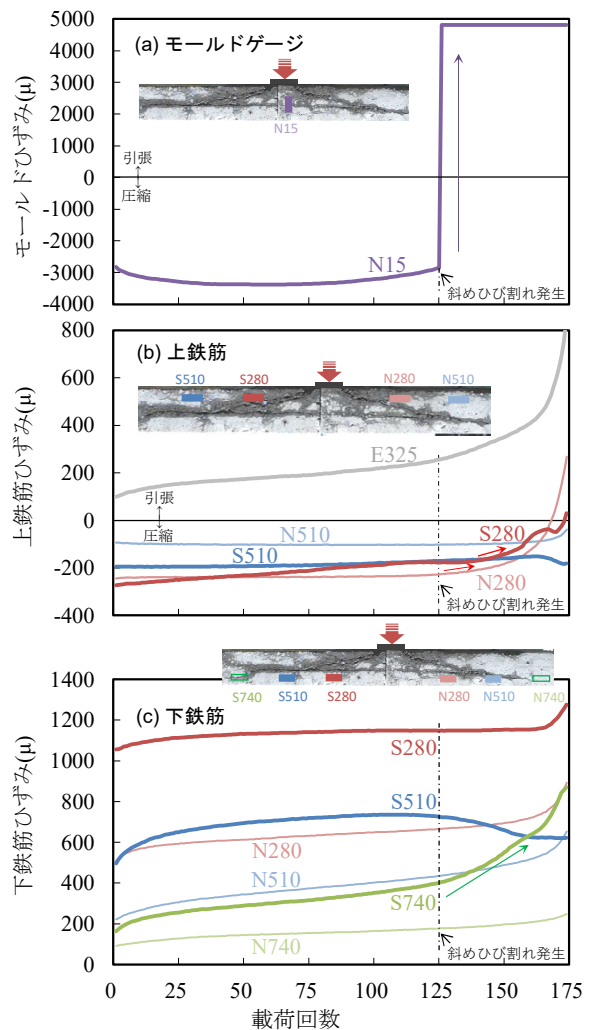


図-8 ひずみの推移 (FC-H/2)

目すると、126 回目以降、両者のひずみは引張側に急増している。これは、図の上側に示す写真のように、S280 と N280 が斜めひび割れの直近に位置しているためである。すなわち、斜めひび割れの発生によって生じたせん断コーンが下方向に押されるのに伴って、両ゲージが位置する部分の鉄筋が強く引っ張られたため、ひずみの値が引張側に急増したと考えられる。次に、図-8(c)に示す下鉄筋のひずみについて見ていきたい。図に示す S740 (緑色)に着目すると、上鉄筋の S280 と N280 と同様に、126 回目以降、S740 のひずみが引張側に急増している。これは、図の上側に示す写真のように、S 側に発生した斜めひび割れが、凍結融解作用によって生じていた水平ひび割れを介して支点方向に進展し、支点近くに位置する S740 (緑色) の位置にまで達したからである。また、斜めひび割れが発生したのは、橋軸直角方向 (主鉄筋方向) だけではない。橋軸方向 (配力筋方向) にも、同時に斜めひび割れが発生したと考えられる。それは、図-8(b) の E325 (灰色) に示すように、126 回目以降、橋軸方向のひずみも引張側に急増しているからである。

## (2) 疲労寿命が短くなった理由

写真-5 は、FC-H/2 と同様、RC 梁に上面から半分の厚さまで凍害劣化を与え、静的載荷を行った後の写真である。写真のように、せん断スパンの劣化部分には、複数本の斜めひび割れが発生している。このように、せん断スパンの劣化部分に斜めひび割れが発生しやすくなるのは、以下の理由からである。

- 1) 変位がある程度大きくなると、せん断スパンにせん断変形が生じ、劣化したコンクリートに引張応力が作用する。
- 2) しかし、凍害劣化を受けた部分には、凍害によって多くの微細ひび割れが発生しているため、引張強度が低下している。
- 3) このため、凍害劣化を受けた部分では、斜め引張りひび割れが発生しやすくなる。

FC-H/2 でも RC 梁と同じことが起こったと考えられる。すなわち、上半分が凍害で劣化し、斜めひび割れが発生しやすくなっていたため、わずか 126 回で斜めひび割れが発生したということである。そして、この斜めひび割れは、凍結融解作用によって生じていた水平ひび割れを介して、支点近くまで進展した。その結果、FC-H/2 では、写真-6 のように、斜めひび割れの発生によって形成されたせん断コーンが、薄いスラブを押し抜こうとする状態となった。このような状態では、荷重を支えるスラブの厚さは当初の半分しかなく、耐力と剛性が大きく低下する。このため、その後の繰返し載荷に耐えられず、変位が急増するとともに荷重が低下し、斜めひび割れ発生からわずか 48 回後の計 174 回で破壊する結果となった。



写真-5 凍害を与えた RC 梁の静的載荷で発生した複数本の斜めひび割れ<sup>3)</sup>



写真-6 斜めひび割れの発生によって形成されたせん断コーンが薄いスラブを押し抜こうとする

## 6. まとめ

凍害によって生じる材料劣化や水平ひび割れがスラブの疲労寿命に与える影響について検討するため、凍害深さがスラブ厚の 1/4 と 1/2 のスラブを作製し、定点疲労載荷試験を行った。その結果、以下の知見が得られた。

- (1) 凍害深さが深いほど疲労寿命は短くなり、凍害深さがスラブ厚の 1/4 の供試体では健全の約 1/2 に、1/2 の供試体では健全の約 1/140 になった。
- (2) この原因は、1) 凍害劣化に伴う引張強度の低下に起因して、上面側の劣化した部分に斜めひび割れが発生したこと、2) 凍結融解作用による水平ひび割れによって、荷重を支えるスラブの厚さが減少したため、健全なスラブに比べて短い載荷回数で破壊に至ったからである。

## 参考文献

- 1) 林田宏：凍結融解作用で上筋付近に水平ひび割れが発生し、上半分が凍害劣化を受けた RC スラブの静的載荷試験，コンクリート工学年次論文集，Vol.44，No.1，pp.520-525，2022.7
- 2) 林田宏：凍結融解作用で床版内部に生じる水平ひび割れの発生メカニズムと層状ひび割れの進展メカニズム，寒地土木研究所月報 No.823，pp.18-33，2021.10
- 3) 林田宏，佐藤靖彦：凍害劣化域の大きさと位置に着目した RC はり部材の破壊性状，コンクリート工学年次論文集，Vol.34，No.1，pp.922-927，2012.7