

論文 凍害を受けた上面が圧縮疲労破壊し疲労寿命が短くなる RC スラブ

林田 宏*1

要旨：凍害と疲労との複合劣化がスラブの耐力や疲労寿命に与える影響を検討するため、上面からスラブ厚の 1/4 の範囲に凍害劣化を与えた後、上限荷重が静的降伏荷重の 7 割である定点疲労載荷試験を行った。その結果、凍害を受けたスラブは最終的に押し抜きせん断コーンが抜け落ちて破壊に至ったが、これよりも前の段階でスラブ内部に付着割裂破壊が発生していた。この付着破壊が起こった原因として、スラブはアーチ的耐荷機構を形成していたが、アーチクラウンの強度が凍害劣化により低下していたこと、また、この強度低下によりアーチクラウンが圧縮疲労破壊しやすくなり、アーチが消失したことが要因として考えられた。

キーワード：RC スラブ、凍害、疲労、複合劣化、凍害深さ、圧縮疲労破壊、疲労寿命

1. はじめに

既往の研究¹⁾で、凍害を受けたスラブの静的載荷試験の結果について報告を行った。その際、比較に用いた健全なスラブでは、図-1 に示すように、アーチ的耐荷機構が形成されていた。それを見て、以下のようなことを考えた。「凍害劣化は上面から内部へと進行するので、アーチクラウンの部分は、真っ先に劣化してしまう。」

「荷重はアーチで支えられているのに、アーチクラウンの部分が凍害で劣化していたら、疲労で早く壊れてしまうのではないか？」

このような疑問（懸念）が、今回、報告を行う本実験を行った背景である。実験の結果、懸念は現実のものとなった。本論文では、この実験の詳細について述べるとともに、凍害がスラブの疲労寿命などに与える影響について考えていきたい。

2. 実験概要

2.1 供試体概要

今回の実験では、既往の研究¹⁾と同じ形状寸法、配筋、コンクリート配合のスラブ供試体に凍害を与えた後、疲労載荷試験を行った。この供試体を供試体 FC (Frost damage and Cyclic loading) と呼ぶ。この供試体の実験結果を既往の研究¹⁾の健全なスラブ（供試体 N）の静的載荷試験結果と比較した。表-1 に供試体名と実験変数を示す。また、スラブ供試体の形状寸法、配筋、ひずみゲージおよび変位計の位置を図-2 に、コンクリートの配合を表-2 に、コンクリートの 28 日標準水中養生後の圧縮強度と鉄筋の材料特性を表-3 に示す。

2.2 凍結融解試験

コンクリート打設後、4 週目まで散水養生を行った後、凍結融解試験を開始した。供試体 FC の劣化深さは、アーチクラウンの厚さを考慮し、スラブ厚の 1/4 に設定した。劣化深さを制御するため、図-3 のようにスラブ厚の 1/4 の位置である深さ 47.5mm の位置に温度センサー

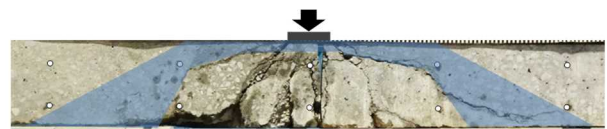
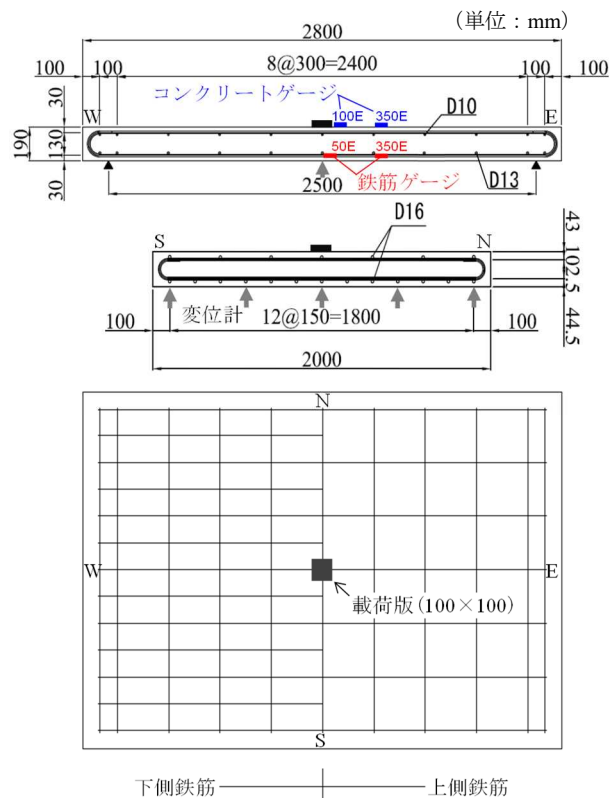
図-1 健全なスラブにおけるアーチ的耐荷機構の形成¹⁾

表-1 供試体名と実験変数

供試体名	凍害深さ	載荷
N	-	静的
FC	H/4	疲労

図-2 供試体の形状寸法、配筋、ゲージ、変位計
(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)

表-2 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

を設置し、センサーの測定温度が $-18\sim 0^{\circ}\text{C}$ となるように温度を制御した。その他の条件、具体的には 1) 上面からのみの冷却・加熱、2) 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ることなど凍結融解試験に当たっての条件は既往の研究¹⁾と同じである。このような条件で気中凍結水中融解による凍結融解作用を 1131 回与えた。この回数は劣化程度を大きくするため、モールドゲージの値が 6000μ 以上となるまでに要した回数である。

2.3 疲労載荷試験

疲労載荷試験は、周波数 1Hz の正弦波で、供試体中央を定荷重とした。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 (2500mm, $a/d=7.8$)、載荷版 (100×100mm) などの条件は、既往の研究¹⁾の静的載荷試験と同じである。計測項目は荷重と図-2 に示す位置の変位とゲージのひずみである。なお、実橋の床版では上面が滞水している場合が多いことを想定し、疲労載荷試験中、スラブ上面には定期的に散水を行った。

3. 供試体 FC の劣化状況 (採取コアの超音波速度)

凍害による供試体 FC の劣化状況を確認するため、疲労載荷試験終了後、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、透過法による超音波速度の測定と蛍光エポキシ樹脂注入法によるひび割れ状況の確認を行った。その結果を図-4 に示す。凍結持続層 (灰色) に位置する深さ 5~15cm の測定点では、速度の低下は小さく、それほど劣化はしていない。一方、凍結融解層 (水色) に位置する深さ 1~4cm の測定点では、凍害劣化によって速度が低下していた。なお、深さ 4cm 地点の速度が大きく低下しているのは、図-4 の右側に示すように、凍結融解作用に伴って発生した水平ひび割れが影響しているためである。また、深さ 16~18cm 地点の速度低下は、載荷に伴う引張作用により発生した微細なひび割れが影響していると考えられる。

4. 載荷試験結果

図-5 は供試体中央における上限荷重時の変位 (以下、「上限変位」) の推移を示したものである。また、図-6 は供試体下面のひび割れ状況を示したものである。

図-5 を見ると、上限変位の推移は、コンクリートの疲労に関する既往の研究と同様に、「遷移期」「定常期」「加速期」の 3 つの段階を示していることが分かる。以下では、この 3 つの段階ごとに、順に見ていきたい。

表-3 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

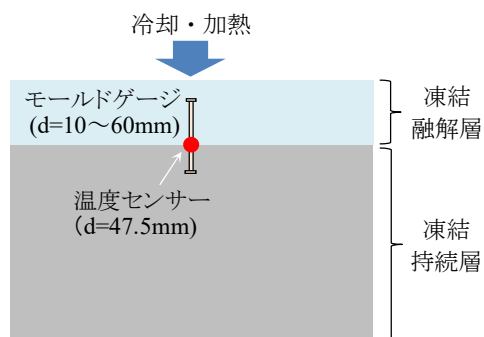


図-3 温度センサー、モールドゲージの設置深さ

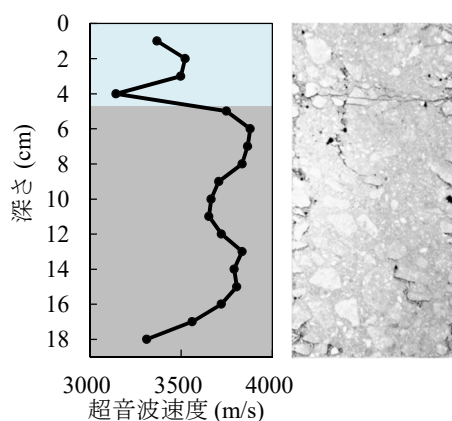


図-4 採取コアの超音波速度と水平ひび割れの状況

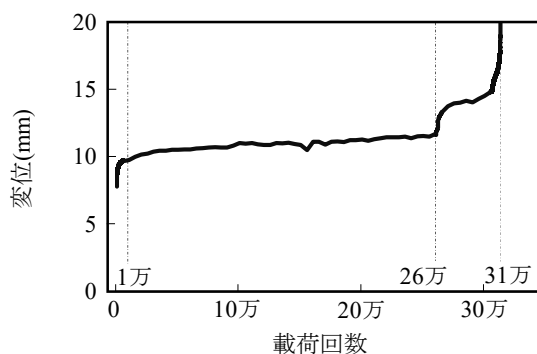


図-5 上限荷重時の変位の推移

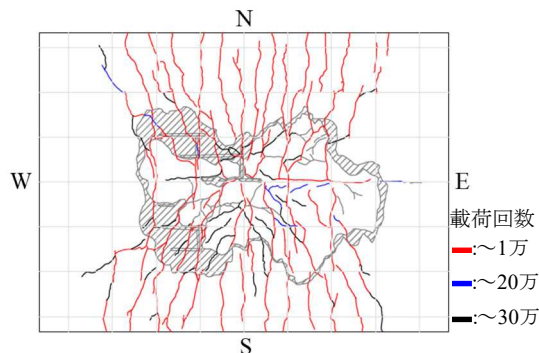


図-6 下面のひび割れ状況

まず、1万回までの「遷移期」である。図-6の赤線で示すように、下面のひび割れは大半がこの期間で発生した。「遷移期」における変位の伸びは、これらのひび割れの発生に伴うものであると考えられる。

次に、26万回までの「定常期」である。図-5に示すように、この期間の変位の増加は非常に緩やかであった。また、この期間では、図-6の青線で示すように、ひび割れの発生も少なかった。

最後に、31万回までの「加速期」である。図-5に示すように、26万回の時点で、変位が一時的に急増したが、その後、しばらく増加は緩やかとなった。しかし、29万回から再び変位の増加が加速し始め、31万回で変位が急増するとともに、図-6に示す押し抜きせん断コーンの抜け落ち（以下、「陥没」）が発生し、破壊に至った。図-7は荷重-変位曲線の推移を示したものである。黒丸で示す供試体Nの最大荷重時（最大荷重266kN、変位62mm）と比較すると、供試体FCの破壊時（31万回、紫色）の荷重は供試体Nの最大荷重の60%で、また、破壊時の変位（22mm）は、供試体Nの35%と、大幅に小さな変位で破壊したことになる。

写真-1および写真-2は、載荷終了後の供試体の切断面である。なお、各写真には比較のため、供試体Nの切断面も合わせて示している。写真-1（上）に示す主鉄筋方向の切断面、特に載荷点から右側に入っているせん断ひび割れに着目すると、写真-1（下）に示す供試体Nのひび割れとほぼ同様の経路で発生していることが分かる。このことから、供試体FCにおいても、供試体Nと同様にアーチ的耐荷機構が形成されていたと考えられる。なお、供試体FCの載荷点付近では水濡れが発生している。この水濡れは圧縮疲労で生じた微細なひび割れが水分を保持しているためであると考えられる。

一方、写真-2（上）に示す配力筋方向の切断面、特に載荷点から右側に入っているせん断ひび割れに着目すると、写真-2（下）に示す供試体Nとは異なり、一般的な押し抜きせん断ひび割れのように45°に近い角度を持つひび割れとなっている。なお、供試体FCの配力筋方向で発生した左右のせん断ひび割れのうち、右側（N側）のせん断ひび割れが先に発生していたと考えられる。その根拠については、次章で述べる。

以上のように、供試体FCは、31万回で押し抜きせん断コーンが抜け落ちて破壊に至ったが、実際には定常期の後、26万回で変位が急増した時点で、すでに破壊した状態であったと考えられる。次章では、陥没に至るまでの損傷過程を推察するとともに、「26万回で破壊した」と考える根拠について説明したい。

5. 陥没が発生するまでの損傷過程に関する考察

図-8は、陥没が生じるまで、スラブ内部でどのように損傷が進んでいったのかを示した概念図である。また、図-9は、損傷過程を考察する上で用いたひずみの推移である。以降、図-8に従って、順に見ていきたい。

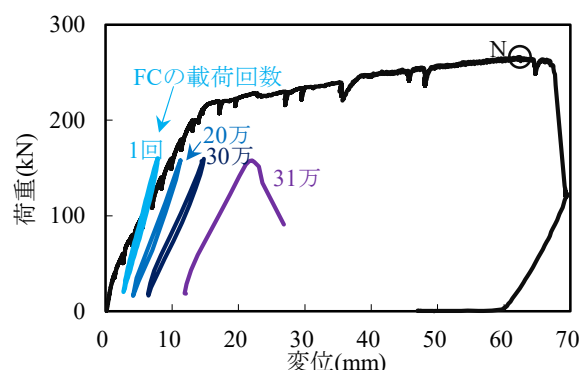


図-7 荷重-変位曲線の推移

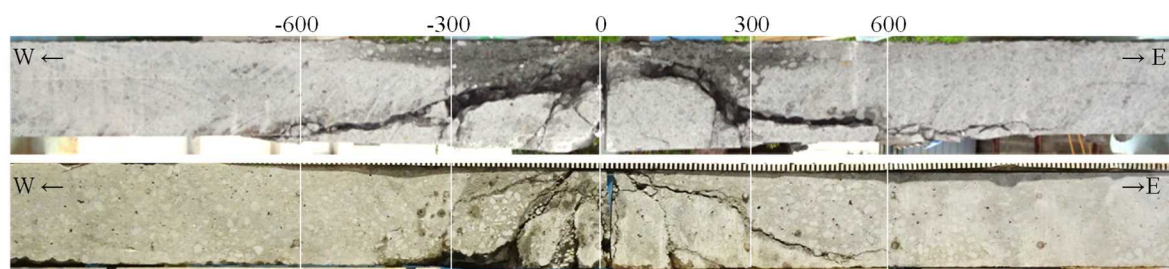


写真-1 切断面（支間（主鉄筋）方向）（上：FC 下：N）

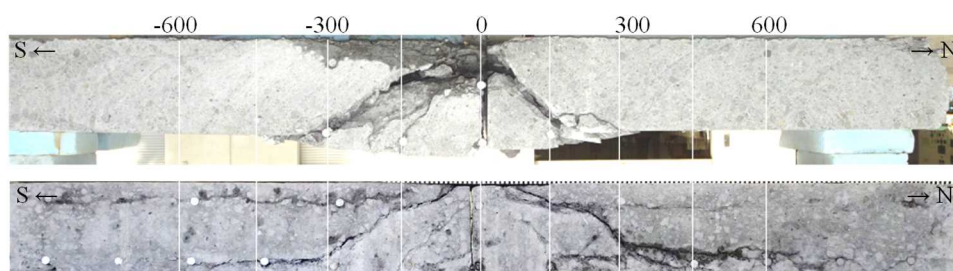


写真-2 切断面（支間直角（配力筋）方向）（上：FC 下：N）

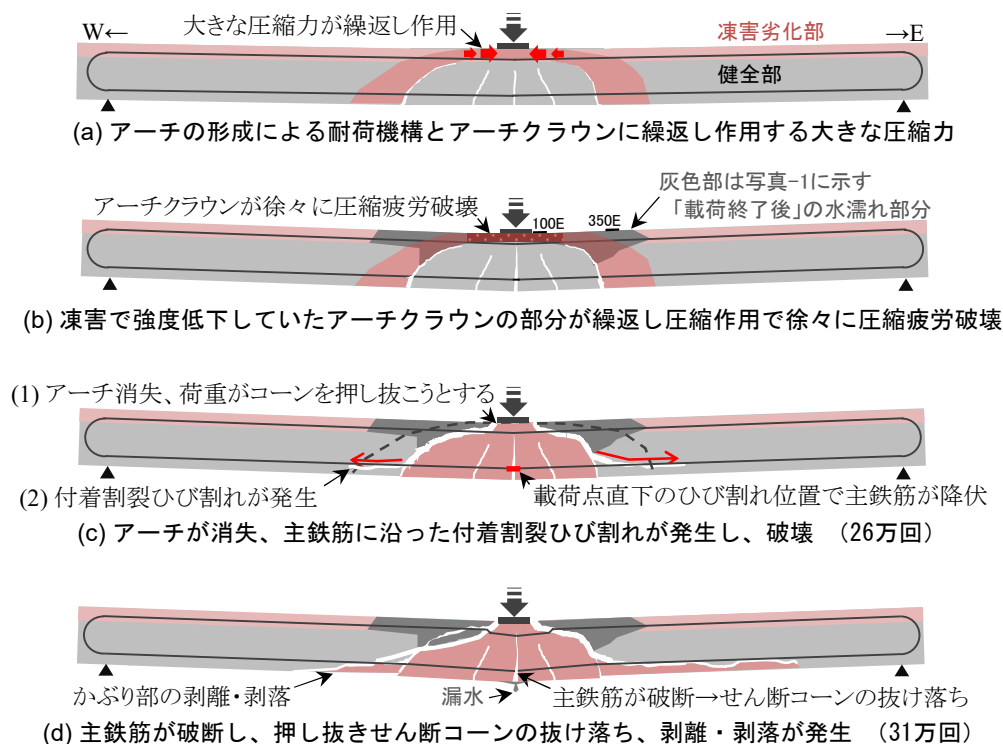


図-8 押し抜きせん断コーンの抜け落ちが発生するまでの損傷過程（支間（主鉄筋）方向）

5.1 荷重初期から形成されていたアーチのアーチクラウン部分が徐々に圧縮疲労破壊していく段階（破壊前）

供試体 FC では、図-8(a)に示すように、荷重初期の段階から健全なスラブと同様にアーチ機構が形成されていた。アーチ機構で荷重を支えているため、繰返し荷重の作用に伴って、アーチクラウンには、大きな圧縮力が繰返し作用する。しかし、図-8(b)に示すように、アーチクラウンの部分は、凍害劣化により強度が低下しているため、大きな圧縮力に耐えられず、徐々に圧縮疲労破壊が進む。図-9 に青色で示す 100E のコンクリートひずみの推移を見ていただきたい。荷重版に近い 100E では約 10 万回でひずみが急増しており、圧縮疲労破壊が起こったと考えられる。一方、荷重版から離れた 350E（水色）では、圧縮ひずみが徐々に減少しており、26 万回の時点でも破壊には至っていなかったと考えられる。

5.2 アーチが消失、主鉄筋に沿った付着割裂ひび割れが発生し、破壊する段階（破壊時）

アーチクラウンの部分の圧縮疲労破壊が進行すると、アーチ的耐荷機構が維持できなくなる。図-8(c)に示すように、アーチの消失に伴って、荷重がせん断コーンを押し抜こうとし、主鉄筋に沿った付着割裂ひび割れが発生したと考えられる。4 章で述べた 26 万回における変位の急増は、この付着破壊に伴うものであると考えられる。RC はりでは、このような付着破壊が起こると、急速に耐力を失う。したがって、この時点では、せん断コーンの陥没は生じていないが、部材としては、すでに破壊していると言える。また、図-9 に赤色で示す 50E の鉄

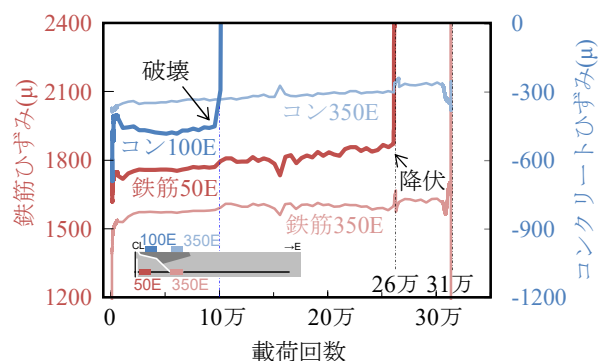


図-9 ひずみの推移

筋ひずみの推移を見ると、26 万回の時点で主鉄筋のひずみが急増し、降伏に至ったことが分かる。

5.3 押し抜きせん断コーンの抜け落ち、かぶり部分の剥離・剥落が発生する段階（陥没発生時）

26 万回の時点でスラブは、すでに破壊している状態であるが、実際に陥没が生じたのは、さらに 5 万回後の 31 万回の時点であった。26 万回で付着破壊が起こった時点で、直ちに陥没に至らなかった理由として、「上限荷重が降伏荷重以下であったこと」、また、「付着破壊でスラブの耐力は低下したが、その耐力が上限荷重を下回らなかった」ことが要因として考えられる。このことは、上限荷重が作用した際の荷重は、せん断コーンを介して、上下の主鉄筋と配力筋によって支えられていることを意味している。しかし、図-8(c)に示すように、26 万回の時点で主鉄筋は降伏している。降伏した箇所に繰返し、引張が作用したため、図-8(d)に示すように、31

万回の時点で、主鉄筋が破断した。この鉄筋破断に伴い、耐力がさらに低下し、荷重を支えきれなくなったため、**図-8(d)**に示すような、せん断コーンの陥没とかぶり部分の剥離、剥落が発生したと考えられる。なお、26万回以降、**図-8(d)**に示す載荷点直下のひび割れ(**写真-3**では黒枠で示すひび割れ)から、遊離石灰を含む水が漏れてくるようになった。また、同様の漏水は、**写真-3**の白枠で示すひび割れでも発生した。

5.4 破壊までの損傷過程（支間直角方向）

図-10は破壊時(26万回)前後の支間直角方向の上限荷重時の変位分布を示している。

まず、破壊前の状態である20万回時の変位分布(紺色)を見ると、S側、N側ともに450の位置で、上に凸となるような変位分布となっている。このことから、載荷点に近い部分では**図-11(a)**に示すように、せん断変形が生じていたと考えられる。

次に、26万回で破壊が起こった後の状態である30万回時の変位分布(**図-10** 紫色)を見ると、N側の変位が大きく変化している。これは**図-11(b)**に示すように、N側でせん断ひび割れが発生したためと考えられる。支間直角方向で発生した、このせん断ひび割れは、5.2で述べた支間方向の付着割裂ひび割れとほぼ同時に発生したと考えられる。すなわち、これらのひび割れは**写真-4**において載荷点の下に桃色矢印で示すようにアーチクラウンの部分で圧縮疲労破壊し、荷重がせん断コーンを押し抜こうとした際、ほぼ同時に発生したと考えられる。

そして、この時、支間直角方向のせん断ひび割れは、上面から下面まで貫通した状態となった。このため、スラブ下面では、26万回以降、**写真-4**の青矢印で示すように、せん断ひび割れに沿って、漏水が発生するようになったものと考えられる(**写真-3**では白枠の部分)。

6. 凍害がスラブの疲労寿命や損傷速度に与える影響

図-12は、今回の実験結果を基に、凍害深さと耐力低下との関係や耐力と疲労寿命の関係などを示した概念図である。以下、順に説明したい。

6.1 静的耐力に比べて大きく低下するスラブの疲労耐力

まず、**図-12**(右上)に示す凍害深さと耐力低下との関係を見ていただきたい。黒点線は、今回の実験と同じスラブを用いた静的載荷試験の結果である¹⁾。静的試験における耐力の低下はスラブ厚の1/2の範囲が劣化していても10%と、その低下程度は小さい。ただし支間が短い場合、低下が大きくなる場合がある(灰色点線)²⁾。

一方、今回、報告を行ったように、凍害深さがスラブ厚の1/4の疲労載荷試験では、健全なスラブの静的耐力の60%の荷重で破壊に至った。すなわち、凍害と疲労との複合劣化を受けるスラブは、静的耐力に比べて大幅に

遊離石灰を含む漏水が発生していたひび割れ

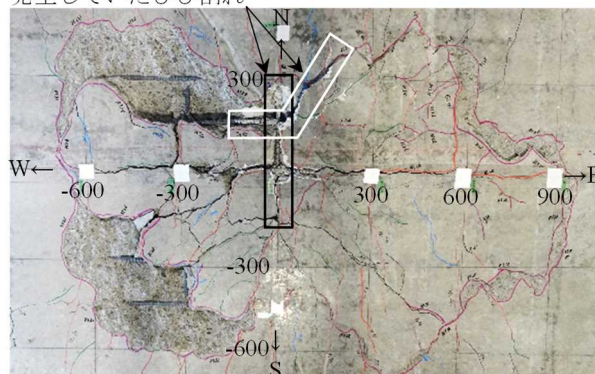


写真-3 26万回以降、漏水が発生したひび割れ

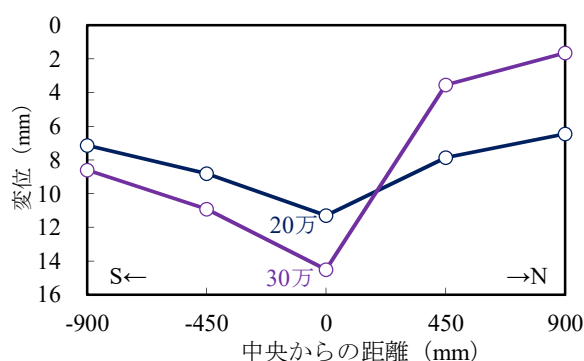


図-10 変位分布の推移（支間直角方向）

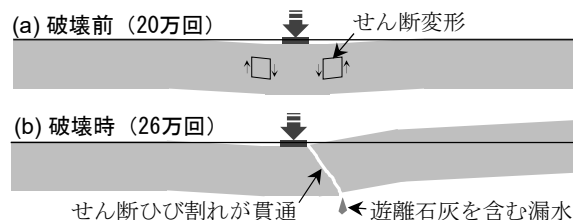


図-11 載荷点付近でのせん断ひび割れの発生

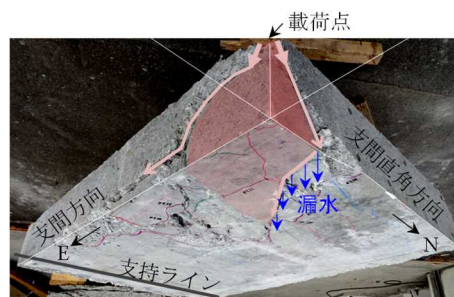


写真-4 付着割裂ひび割れを伴うせん断ひび割れ（支間方向）と押し抜きせん断ひび割れ（支間直角方向）

小さな荷重でも疲労破壊に至る可能性があるということである。

6.2 凍害によって短くなる疲労寿命と損傷の加速

次に、**図-12**(左上)に示す耐力と疲労寿命の関係を見ていただきたい。ここで、円柱供試体を用いた既往の

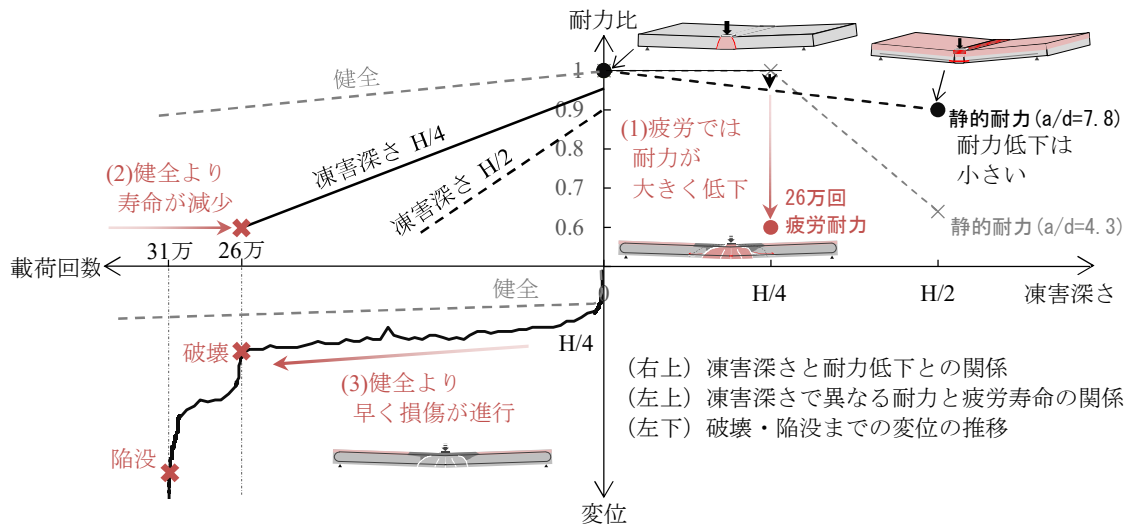


図-12 凍害による耐力の低下と疲労寿命の減少、損傷の加速

実験³⁾において、凍害劣化程度が大きいほど、圧縮疲労破壊しやすくなり、疲労寿命が短くなることが分かっている。図に示す「健全（灰点線）」と「凍害深さ H/2（黒点線）」は、このことを考慮した想定線である。

次に、黒実線で示す「凍害深さ H/4」を見ていただきたい。この図から「載荷回数を多くすれば、疲労耐力が小さくなるのは当たり前だ」と思われるかもしれない。しかし、重要なことは凍害で疲労耐力が小さくなることで、図の赤矢印のように「疲労寿命が健全な場合に比べて短くなること」が問題なのである。図-12（左下）の図を見ていただきたい。「疲労寿命が短くなる」ということは、健全なスラブに比べて、損傷が早く進行するということである。温暖な地域では損傷が顕在化しないような少ない交通量でも、寒冷地の道路橋床板では床版上面において、砂利化などの損傷が顕在化している事例が多々、報告されている⁴⁾。これは、床版上面が凍害劣化により圧縮疲労破壊しやすくなり、損傷が加速することが要因の一つであると考えられる。また、散水による水の存在は、損傷を加速させたもう一つの要因である。藤山ら⁵⁾は疲労載荷によってひび割れ間に水圧が発生し、疲労寿命が短くなることを指摘している。寒冷地の床版内部では、凍害によって微細ひび割れが発生する。この微細ひび割れ内部で発生する水の水圧も寒冷地の床板の損傷を加速させる要因であると考えられる。

7. まとめ

凍害と疲労との複合劣化が RC スラブの耐力や疲労寿命に与える影響を検討するため、上面からスラブ厚の 1/4 の範囲に凍害劣化を与えた後、上限荷重が静的降伏荷重の 7 割である定点疲労載荷試験を行った。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) スラブ厚の 1/4 の範囲が凍害劣化を受けたスラブの疲労載荷試験では、健全なスラブの静的載荷試験の

場合と同様にアーチ的耐荷機構が形成されていた。

- (2) 凍害を受けたスラブは、31 万回で押し抜きせん断コーンが抜け落ちて破壊に至ったが、スラブ内部では 26 万回の時点で、すでに付着割裂破壊が発生していた。この付着割裂破壊の兆候として、26 万回時に変位が一時的に急増した。
- (3) 付着割裂破壊が発生したのは、アーチクラウンの部分が、凍害劣化により強度低下していたため、圧縮疲労破壊し、アーチが消失したことが一因であると考えられた。
- (4) 実験の結果から、寒冷地の道路橋床板において、少ない交通量でも床版上面で砂利化などの損傷が顕在化しているのは、床版上面が凍害劣化により圧縮疲労破壊しやすくなり、損傷が加速することが要因の一つであると考えられた。

参考文献

- 1) 林田宏：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，コンクリート工学年次論文集，Vol.42，No.1，pp.641-646，2020.7
- 2) 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，pp.2-13，2020.4
- 3) 林田宏，佐藤靖彦：疲労と凍害の複合劣化を受けたコンクリートの力学特性評価に関する基礎的検討，第 14 回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，pp.149-156，2014.10
- 4) 道路橋床版の維持管理マニュアル 2020，土木学会，2020
- 5) 藤山知加子，千々和伸浩，川中勲，前川宏一：移動荷重と水分の影響を同時に受ける RC 部材の疲労破壊特性，コンクリート工学年次論文集，Vol.30，No.3，pp.883-888，2008.7