

論文 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

林田 宏^{*1}・佐藤 靖彦^{*2}

要旨：凍害劣化域の大きさ（凍害深さ）と位置を変数とした RC はりの載荷実験を行い、凍害劣化域が部材の圧縮側と引張側のどちら側に存在するか、また、その大きさにより、最大耐力、変形状、破壊形式が大きく異なることを明らかにした。具体的には圧縮側の劣化に着目すると、凍害深さが大きいほど剛性や最大荷重時の変位は低下し、破壊形式は斜め圧縮破壊に移行しやすくなること、また、引張側の劣化に着目すると、凍害深さが小さければ、付着強度の低下によりタイドアーチ機構に移行し変形性能が向上するが、凍害深さが大きければ、脆性的な斜め引張破壊を起こすことで変形性能が低下する可能性があることを見出した。
キーワード：凍結融解作用、RC はり部材、凍害深さ、劣化位置、耐力、変形状、破壊形式

1. はじめに

積雪寒冷地におけるコンクリート構造物は、凍害および凍害と塩害の複合劣化を受け、耐久性に深刻な影響を受ける。例えば、北海道における橋梁点検結果では、凍害もしくは凍害と塩害の複合劣化を受けた構造物は約 4 割と膨大な数になっており¹⁾、量的な深刻さも増している。

これまでに、凍害等の劣化を受けたコンクリート構造物の材料劣化に伴う構造性能の変化については、小型の RC 供試体や有限要素法解析を用いた検討が行われているが^{例えば 2)~3)}、実構造物を想定したような大きさの供試体を用いて検討が行われておらず、現段階では十分に明らかにはなっていない。そのため、劣化を受けた構造物の補修・補強においては、構造物の構造性能が評価できず、材料劣化の程度に基づき補修の要否を判断しているのが現状である。より効率的かつ適切にコンクリート構造物の維持管理を行っていくためには、劣化を受けた部材の性能低下を適切に評価する必要がある。すなわち、構造物点検で得られた材料劣化に関するデータから部材レベルでの安全性等を適切に評価することが可能となれば、より合理的な補修を行えるようになり、ライフサイクルコストの縮減につながる。

著者らは、凍結融解作用を受けた鉄筋コンクリート部材の構造性能（最大荷重、変形挙動等）の予測手法の開発を最終的な目的とし、これまで検討を進めてきたが⁴⁾、本論では、凍害劣化域の大きさと位置をパラメータとした RC はり部材の曲げせん試験を行った結果を報告する。

2. 実験概要

2.1 供試体

供試体の形状寸法、配筋、実験変数等の設定に当たっては、積雪寒冷地において凍害劣化が顕著なコンクリー

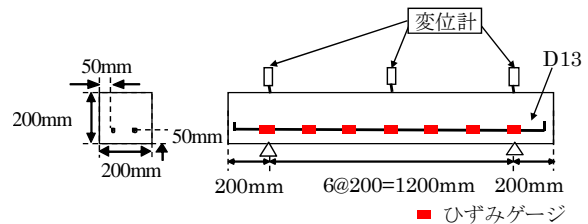


図-1 供試体

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 (%)
184	61	47.6	2.0

ト構造物である「壁高欄」および「道路橋床版」を考慮し、決定した。両者ともに、面外力を受ける構造物である。しかし、一般的に凍害劣化が卓越している領域は、「壁高欄」が内面、すなわち、部材の引張側であり、一方、「道路橋床版」は上面、すなわち、部材の圧縮側と、両者で異なる。もちろん、いずれにおいても、凍害劣化は表面から内部に向かって劣化が進行する。

以上のことを考慮し、本研究では、図-1 に示す寸法 200×200×1600mm の RC はり部材を用意した。これは、主鉄筋に D13 を用いた曲げ破壊型 RC はり部材である。また、早期に凍害劣化を顕在化させるために、コンクリートに AE 剤を使用せず、水セメント比を 61% と大きめに設定した。圧縮強度の目標値は 22.8N/mm² である。なお、セメントには早強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。打設面は、図-1 の上面（部材の圧縮側）である。

実験変数は凍害劣化を与える領域を圧縮側と引張側の 2 つに大別し、かつ、はりの高さ 200mm に対して、圧縮縁または引張縁から 50, 100, 150mm の 3 水準の深さに設定した。なお、設定した劣化領域以外の部分と支

*1 (独) 土木研究所寒地土木研究所 基礎技術研究グループ 耐寒材料チーム 主任研究員 (正会員)

*2 北海道大学大学院工学院 北方圏環境政策工学部門 准教授 博士(工) (正会員)

点部分は、劣化を防ぐため図-2に示すように断熱材をシリコン樹脂によりコンクリート表面に接着し、水分供給と温度変化を抑制した。表-2に供試体の名称と実験変数が実験結果とともに示されている。供試体名のCは圧縮側の劣化を、Tは引張側の劣化を意味する。なお、凍結融解を与えていない基準供試体を供試体Nと呼ぶ。引張側50mmの劣化供試体に関しては、断熱材の設置状況が悪く、劣化域の制御に失敗したため、検討から外した。

2.2 凍結融解試験の概要

コンクリート打設後、約4週目まで湿布養生を行った後、凍結融解試験を開始した。凍結融解条件については、気中凍結水中融解とし、最低温度を -18°C 、最高温度を 5°C として、1サイクル約14時間の凍結融解作用を与えた。本研究では、凍結融解回数を設定するのではなく、凍害劣化程度が比較的大きい供試体について検討するため、劣化領域の超音波伝播速度が 2km/s 程度以下になるまで凍結融解を繰り返した。各供試体の繰り返し回数は、表-2に示されている。供試体T15の凍結融解回数は、他の供試体に比べ大きくなっている。これは、ブリージングの影響、すなわち、RCはりの上部と下部では緻密性が異なり、その影響が表れた可能性がある。なお、標準円柱供試体を用いた予備試験において、超音波伝播速度

が 2km/s 程度で圧縮強度が約40%低下しており、劣化部と健全部の差異を明確にできると考え、 2km/s をしきい値と設定した。

2.3 静的載荷試験の概要

本実験では、単純支持した供試体の中央部1点を載荷する曲げせん断試験を行った。変位計は基本的に支点上および中央部の3点に設置し、必要に応じて中央点から支点の間に増設した。また、主鉄筋には 200mm 間隔でひずみゲージを貼付した(図-1)。測定項目は荷重、変位および主鉄筋ひずみである。

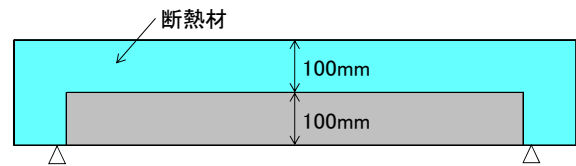


図-2 断熱材貼付の概念図(T10の場合)

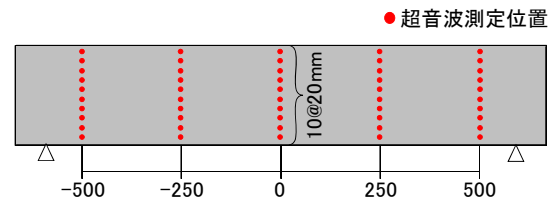


図-3 超音波伝播速度測定位置

表-2 供試体名称、実験変数、実験結果等一覧

供試体概要				実験結果							
名称	劣化面	劣化深 (mm)	凍結融解 回数	P_y (kN)	d_y (mm)	P_u (kN)	d_u (mm)	ひび割れ		鉄筋 降伏	破壊形式
								平均間隔(mm)	本数		
N	-	-	-	40.1	2.1	68.9	36.4	100	8	有	曲げ圧縮
C5	圧縮側	50	291	42.9	4.8	68.1	30.2	175	3	有	せん断圧縮
C10	圧縮側	100	291	36.7	7.7	46.4	13.7	133	4	有	斜め圧縮
C15	圧縮側	150	291	32.0	14.4	32.6	15.4	-	1	有	斜め圧縮
T10	引張側	100	291	47.0	3.1	68.9	40.9	250	3	有	曲げ圧縮
T15	引張側	150	469	39.2	7.4	43.0	8.6	217	4	有	斜め引張

※ P_y は降伏荷重、 d_y は降伏時の変位、 P_u は最大荷重、 d_u は最大荷重時の変位

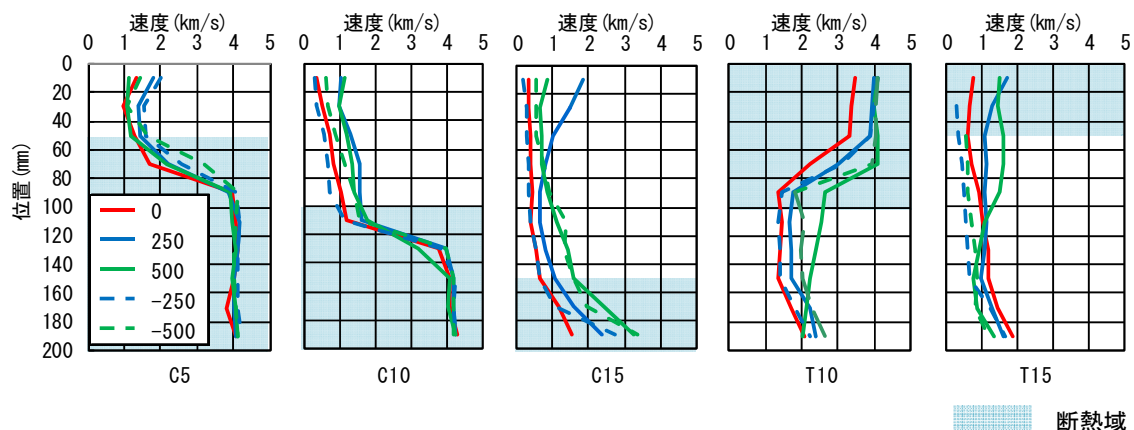


図-4 超音波伝播速度測定結果

3. 実験結果および考察

3.1 凍結融解による凍害劣化度評価

凍害劣化範囲と程度を把握するため、**図-3**に示す供試体中央位置、中央から±250mmの位置、中央から±500mmの位置の計5断面で透過法により超音波伝播速度測定を行った。あわせて、外観観察も行った。なお、超音波伝播速度測定は、凍結融解終了直後の含水が多い状況で行った。

超音波伝播速度測定結果を**図-4**に示す。その結果、いずれの供試体も断熱材で覆わなかった部分（以下、「劣化域」）の速度は概ね2km/s以下まで低下していた。また、断熱材で覆っていた部分（以下、「断熱域」）の速度は、供試体C5、C10、T10が20～40mm程度の遷移域を挟み、凍結融解前と同程度の速度を保っていたが、供試体C15は3km/s以下、T15は2km/s以下まで速度が低下し、全域に渡り、凍害劣化を受けていた。なお、供試体左右の断面の速度を比較すると、若干の速度差が見られた。

外観観察では、全ての供試体において、劣化域のコンクリート表面に非常に幅の小さいひび割れが網目状に見られた。供試体C15の側面では**写真-1**に示すような幅1mm程度のひび割れが水平方向に見られ、供試体T10およびT15の下面には**写真-2**に示すような比較的幅の小さいひび割れが軸方向に多数見られた。また、供試体C10およびC15では供試体中央から左側約400mmの範囲の上面に、**写真-1**に示すような深さ10～20mm程度のスケールリングによる断面欠損が見られた。

3.2 曲げせん断試験における破壊性状

静的荷重試験の結果を表-2に示す。また、供試体Nの曲げ耐力(P_{uc})とせん断耐力(V_{uc})を表-3に示す。これら耐力は、打設後4週目のコンクリートの圧縮強度 $f_c = 30.4\text{N/mm}^2$ および鉄筋降伏強度 $f_y = 361\text{N/mm}^2$ を用い、すべての安全係数を1.0としてコンクリート標準示方書⁵⁾に準拠して算出した値である。

各供試体の荷重-変位曲線を**図-5**に、最大荷重時付近の各供試体の状況を**写真-3**に示す。なお、鉄筋のひずみゲージが 1700μ に達した時点を経験上の降伏点と判断した荷重を、**図-5**中に○印で示す。また、各供試体の終局時の状況を**写真-4**に示す。

以下に各供試体の破壊性状を説明する。

(1) 供試体 N

約20kNで供試体中央部付近の下縁に曲げひび割れが発生し、剛性勾配が若干低下した。その後、荷重の増加に伴い、ひび割れ本数が増加し、降伏点付近では中央から-300と+400mmの範囲に8本のひび割れ（平均間隔100mm）が発生し、中央2本のひび割れは下縁から約150mmの高さに達していた。鉄筋の降伏により、剛性勾配が大きく低下した変位3mm以降では、新たなひび割

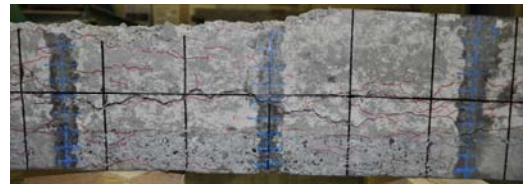


写真-1 水平ひび割れ、スケールリング (C15)



写真-2 下面の軸方向ひび割れ (T10)

表-3 計算曲げ、せん断耐力 (N)

計算曲げ耐力 P_{uc} (kN)	47.2
計算せん断耐力 V_{uc} (kN)	56.2

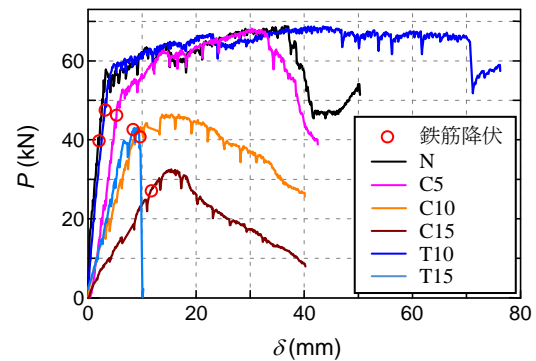
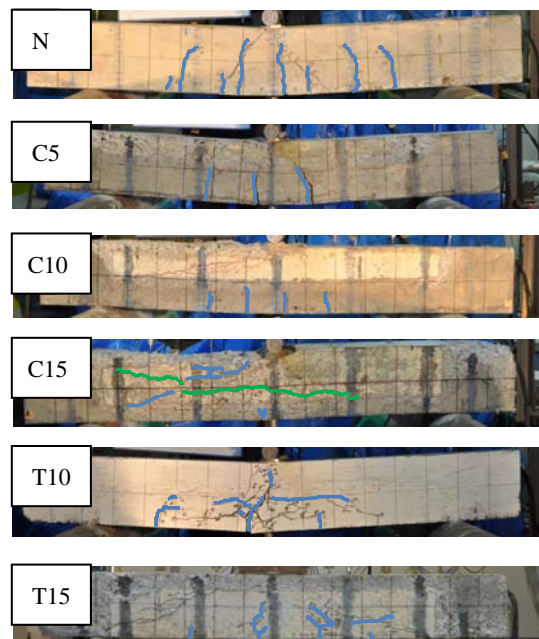


図-5 荷重-変位曲線



※緑線は凍結融解により発生したひび割れ、青線は降伏荷重までに発生したひび割れ

写真-3 最大荷重時付近の各供試体の状況

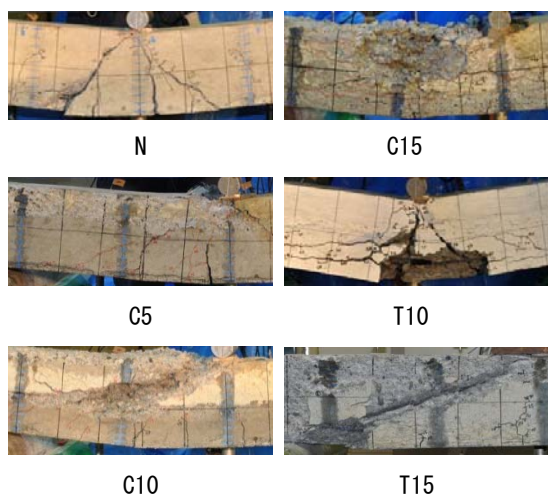


写真-4 各供試体の終局時の状況

れは発生せず、中央2本の曲げひび割れ幅が拡大するとともに、変位12~15mm付近で、それらのひび割れが曲げせん断ひび割れとして発展し、更なる変位の増加に伴い、ひび割れ幅が拡大し、変位36mm付近で最大荷重68.9kNに達した。その後は中央2本の曲げせん断ひび割れ幅の更なる拡大に伴い、緩やかに荷重が低下した。破壊形式は、主鉄筋降伏後の曲げ圧縮破壊であった。圧縮破壊領域は、載荷点直下に限定されていた。

(2)供試体 C5

降伏点付近までの剛性勾配は、供試体Nに比べ大きく低下した。降伏点付近では、-200~+150mmの範囲に3本の曲げひび割れ(平均間隔175mm)が発生し、下縁から約100mmの高さに達していた。剛性勾配が低下した変位5mm以降では、新たな曲げひび割れは発生せず、既存の曲げひび割れ幅が拡大するとともに、変位21mm付近で、主鉄筋に沿う付着割裂ひび割れが発生し、更に変位24mm以降では、供試体Nと同様に、既存の曲げひび割れにつながるようなせん断ひび割れ(曲げせん断ひび割れ)が載荷点を中心に左右に2本発生し、変位30mm付近で最大荷重68.1kNに達した。ただし、曲げせん断ひび割れの角度は、供試体Nのそれと比べ小さかった。更に変位を増加させると、曲げせん断ひび割れ幅の更なる拡大と、右側に比べ超音波速度が低く劣化が若干大きい左スパン上縁の圧壊に伴い、緩やかに荷重が低下した。破壊領域の大きさは、供試体Nよりも大きく、また、その位置は、載荷板直下ではなく、左スパン側に寄っていた。それゆえ、曲げ降伏後のせん断圧縮破壊と定義する。

(3)供試体 C10

降伏点付近までの剛性勾配は、C5よりも更に低下した。曲げひび割れについては、降伏点付近では-200~+200mmの範囲に4本の曲げひび割れ(平均間隔133mm)が発生し、下縁から約80mmの高さに達していた。降伏点以降に関しては、NやC5で見られた明確な剛性勾配の低下

区間(以下、「降伏棚」)はあまり見られず、変位13~14mm付近では、スケーリングによる断面欠損が発生していた左スパンの劣化域に、載荷点と支点を結ぶような角度の小さい複数本のせん断ひび割れが発生し、また、断熱域には劣化域よりも角度の大きいせん断ひび割れが発生し、直後に最大荷重46.4kNに達した。なお、その際、新たな曲げひび割れの発生は見られず、既存の曲げひび割れ幅の拡大もほとんど見られなかった。更に変位を増加させると、劣化域のせん断ひび割れの進展や幅の拡大、本数の増加、ならびに左スパンの劣化域での腹部コンクリート圧壊が進み、緩やかに荷重が低下した。本論文では、降伏後の斜め圧縮破壊とする。

(4)供試体 C15

降伏点付近までの剛性勾配は、供試体C10よりも更に低下した。曲げひび割れについては、中央付近に下縁からの高さが約40mm程度のひび割れが1本のみ発生した。一方、載荷前から見られていた側面の微細な水平方向のひび割れの幅が、荷重増加に伴って若干広がった。なお、幅が広がった微細ひび割れは長さが短いものから長いものまで様々で、また、その発生位置についても載荷点と支点を結ぶ領域の劣化域の中でランダムに発生した。降伏点以降に関しては、供試体C10と同様に明確な降伏棚は見られず、降伏点を過ぎた直後の変位15mm付近で最大荷重32.6kNに達した。更に変位を増加させると、スケーリングによる断面欠損が発生していた左スパンの劣化域において、載荷点と支点を結ぶ線上にある既存ひび割れが進展・拡大し、最終的に、左スパンの劣化域でのコンクリートの圧壊に進み、徐々に荷重が低下した。この破壊形式は、供試体C10同様、主鉄筋降伏後の斜め圧縮破壊であるが、圧縮破壊領域の大きさは、供試体C10に比べ、かなり大きかった。

(5)供試体 T10

降伏点付近までの剛性勾配は、供試体Nに比べ、若干低下している程度であった。曲げひび割れについては、降伏点付近では-350~+150mmの範囲に3本の曲げひび割れ(平均間隔250mm)が発生し、中央のひび割れは下縁から約180mmの高さに達していた。また、荷重の増加に伴い、いくつかの箇所でも水平ひび割れが発生した。この水平ひび割れは大きく2つに分けられる。ひとつは劣化域と断熱域の境界部である下縁から約100mmの高さ付近において見られる水平ひび割れであり、載荷点と支点を結ぶ線の内側である-350~+250mmの範囲に比較的長めのひび割れが断続的に発生していた。もうひとつは主鉄筋位置付近において見られる付着割裂ひび割れであり、中央と左側の曲げひび割れにつながるような形で発生していた、比較的短めの水平ひび割れである。次に、剛性勾配が低下した変位4mm以降では、新たな曲げひ

び割れは発生せず、中央の既存の曲げひび割れ幅が拡大するとともに、既存の水平ひび割れの進展や幅の拡大、また、新しい水平ひび割れが発生した。更に変位 24mm 付近で、供試体 N で見られたのと同様な曲げせん断ひび割れが発生し、変位 41mm 付近で最大荷重 68.9kN に達した。その後、更に変位を増加させると、上記の付着割裂ひび割れや曲げせん断ひび割れの進展や幅の拡大に伴い、非常に緩やかに荷重は低下するものの、ピークとほぼ変わらないレベルを暫く保った後、変位 71mm 付近で急激に荷重が低下し、載荷点直下の圧縮破壊により終局に至った。なお、劣化域と断熱域の境界部に発生していた水平ひび割れの幅の拡大は、終局まで見られなかった。破壊形式は、主鉄筋降伏後の曲げ圧縮破壊である。

(6) 供試体 T15

降伏点付近までの剛性勾配は、供試体 N に比べ、大きく低下した。曲げひび割れについては、降伏点付近では -300~+350mm の範囲に 4 本の曲げひび割れ（平均間隔 217mm）が発生し、中央のひび割れは下縁から約 100mm の高さに達していたが、他のひび割れはごく短いものであった。また、荷重の増加に伴い、供試体 T10 と同様に、主鉄筋位置付近において付着割裂ひび割れと考えられる比較的短めの水平ひび割れの発生や曲げせん断ひび割れの発生が見られた。降伏点以降に関しては、明確な降伏棚は見られず、変位 9mm 付近で最大荷重 43.0kN に達した直後に載荷点と支点を結ぶようなせん断ひび割れが左右両側に発生した。更に変位を増加させると、変位 13mm 付近で左側のせん断ひび割れが大きく開口するとともに、荷重が急激に低下し、終局に至った。破壊形式は、斜め引張破壊と言える。なお、降伏点付近で発生していた曲げひび割れや水平ひび割れについては、終局まで幅の拡大や進展は見られなかった。

以上のように、T15 は N や T10 に比べて、降伏点付近までの剛性勾配が低く、明確な降伏棚も見られず、最大荷重とその時の変位は大きく低下した。また、破壊形式に関しては、今回の供試体の中ではピーク後の荷重が一気に低下するような唯一の脆性的な斜め引張破壊であった。

3.3 凍害による材料劣化と RC はり部材の構造性能に関する検討

(1) 劣化領域が最大荷重に及ぼす影響

図-6 に最大荷重と凍害深さの関係を示す。凍害深さの増大に伴い、最大荷重が低下し、その傾向は、劣化領域の位置により異なる。すなわち、同じ凍害深さでも、劣化を受けている領域が圧縮側か引張側かによって、最大荷重（安全性能）が異なるということである。

(2) 劣化領域が破壊形式や変形挙動に及ぼす影響

a) 圧縮側劣化シリーズ

圧縮側を劣化させたはり部材の破壊形式は、供試体 C5, C10, C15 の順で、せん断圧縮破壊、斜め圧縮破壊、斜

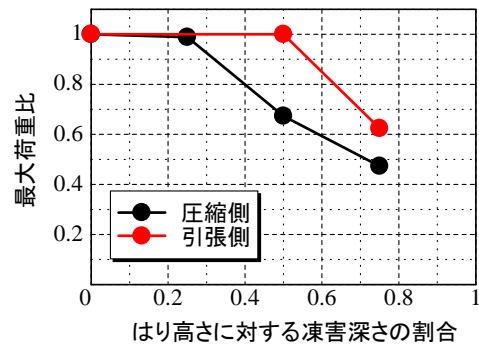


図-6 最大荷重と凍害深さの関係

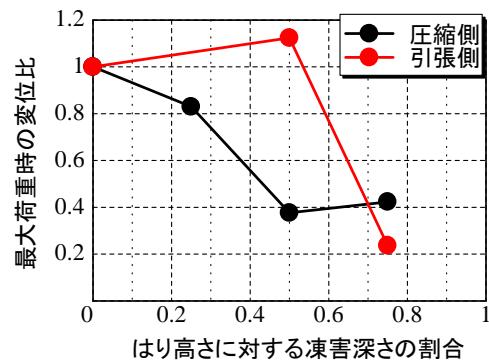


図-7 最大荷重時の変位と凍害深さの関係

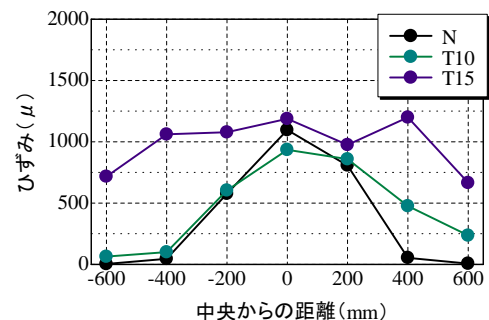
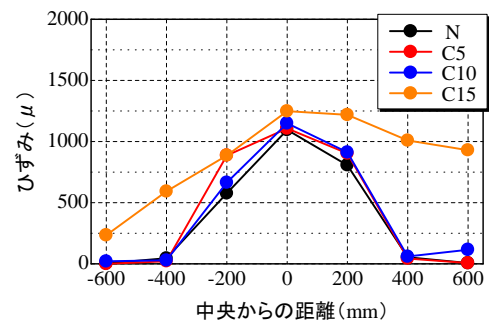


図-8 約 30 kN 時の各供試体の鉄筋ひずみ

め圧縮破壊であった。また、変形挙動については、図-7に示すとおり、凍害深さの増大に伴い、最大荷重時の変位 d_u は低下していく傾向にある。さらに、図-5に示す各供試体の荷重-変位曲線のピーク以降の変形挙動についても、変位の増加に伴い、圧壊領域が徐々に拡大していくため、緩やかに荷重低下が進むことも共通している。

b) 引張側劣化シリーズ

引張側を劣化させた、供試体 T10 と T15 は、両者で破壊形式や変形挙動が異なっていた。

供試体 T10 については、破壊形式が供試体 N と同様の主鉄筋降伏後の曲げ圧縮破壊であったが、表-2 に示すように、最大荷重時の変位 d_u は供試体 N よりも増加した。更に、図-5 に示すように、ピーク以降に荷重が低下した変位についても、供試体 N が約 37mm であったのに対し、T10 は約 71mm と非常に大きな変形性能を示した。このように供試体 T10 の変形性能が、供試体 N よりも大きくなった原因として、凍結融解作用による鉄筋とコンクリートの付着強度の低下が起因していると考えられる。図-8 は荷重が約 30 kN 時の各供試体の鉄筋ひずみである。供試体 T10 の鉄筋ひずみは供試体 N に比べて、中央部分でのピークが低下するとともに、中央から離れた位置まで大きなひずみが生じている範囲が広がっている。また、表-2 に示すように、供試体 T10 は供試体 N に比べ、ひび割れ本数が減少するとともに、ひび割れ間隔も広がっていることから、供試体 T10 は、付着の低下に伴ってタイドアーチ機構に移行したため、供試体 N よりも変形性能が上がったものと考えられる。

一方、供試体 T15 については、破壊形式が脆性的な斜め引張破壊であり、最大荷重時の変位 d_u も供試体 N に比べて大きく低下した。供試体 T15 が T10 と同様に付着強度の低下を受けていたことは、図-8 に示すひずみ分布や表-2 に示すひび割れ本数や間隔などから明らかである。しかし、供試体 T15 が供試体 T10 と異なる破壊形式や変形挙動を示したのは、供試体 T10 の圧縮領域が劣化をあまり受けていなかったのに対し、供試体 T15 は、想定以上に圧縮領域が劣化を受けていたため、供試体 T10 のようにタイドアーチ機構が構成される前に、斜め引張破壊が起こったものと推察される。

今後は、非線形有限要素解析を用い、耐力と破壊形式に差が現れた機構を見出す予定である。

4. まとめ

断熱材により劣化域の位置と大きさ（凍害深さ）を変えた、せん断補強筋を持たない RC はり部材の凍結融解試験を行った後、曲げせん断試験を行った。その結果、以下のことが明らかとなった。

(1) 凍害劣化領域の位置や大きさの違いがはりの最大

荷重、変形性状、破壊形式に影響を与える。

(2) 凍害深さが大きいほど RC はりの最大荷重は低下する傾向にある。ただし、劣化領域が圧縮側か引張側かにより最大荷重の低下程度は異なる。

(3) 圧縮側に凍害劣化を受けた RC はりは、凍害深さの増大に伴い、剛性勾配や最大荷重時の変位は低下する傾向にあり、その破壊形式は、斜め圧縮破壊へ移行しやすくなる。

(4) 引張側に凍害劣化を受けた RC はりは、凍害深さにより破壊形式や変形挙動が異なる。凍害深さが比較的小さい場合には、凍結融解作用による付着強度の低下により、タイドアーチ機構に移行し、変形性能が向上する可能性がある。一方、凍害深さが比較的大きい場合には、付着強度の低下は起こるが、タイドアーチ機構が形成される前に、脆性的な斜め引張破壊を引き起こす場合がある。この違いは主に圧縮側の劣化範囲や程度に起因するものと考えられる。

上記の知見は劣化程度が比較的大きい供試体を対象として得られたものであり、せん断スパン比や鉄筋比などの供試体に関するパラメータも限られている。このため、更にデータの蓄積を行うなどして、凍害による材料劣化を受けたコンクリート部材の構造性能の定量的評価確立に向け、検討をさらに進めていく。

参考文献

- 1) 北海道におけるコンクリート構造物維持管理の手引き（案）、北海道土木技術会コンクリート研究委員会コンクリート維持管理小委員会、pp.2-47、平成18年3月
- 2) 桜井宏、鮎田耕一、佐伯昇：RC 構造物の耐久性評価のための部材のモデル化と促進試験の研究、セメント技術年報 42 号、pp.263-266、1988 年
- 3) 北川淳、後藤康明：凍害による部材特性の予測解析、凍害の予測と耐久性設計の現状、日本コンクリート工学協会北海道支部、pp.31-48、2006.6
- 4) 林田宏、佐藤靖彦、上田多門、針谷龍史、田口史雄：凍結融解作用を受けた RC はり部材の構造性能に関する研究、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 9 巻、pp.375-380、2009.10
- 5) コンクリート標準示方書【設計編】、土木学会、2007.12