

# 論文 凍結融解作用を受けた鉄筋コンクリートの一軸引張性状

三河 智将\*1・佐藤 靖彦\*2

**要旨**：積雪寒冷地において、鉄筋コンクリート（RC）構造物の凍害は非常に深刻な問題となっている。そこで、凍害がRCの付着性状に及ぼす影響を明らかにするために、凍結融解回数、ひび割れの有無、さらに、水分供給の有無に着目したRC部材の一軸引張試験を行った。その結果、凍結融解回数が多く、かつひび割れを有する方が、コンクリート平均応力や平均付着応力がより小さくなることが明らかとなった。また水の供給がなくても、温度変化だけでRC部材が付着劣化がおこる可能性があることを見出した。

**キーワード**：凍結融解、ひび割れ、水分供給、テンションスティフニング、付着応力

## 1. はじめに

北海道といった積雪寒冷地において、鉄筋コンクリート（RC）構造物の凍害は非常に深刻な問題になっている。スケーリングやポップアウトといった外観上の問題や構造物の耐久性の低下が起こるからである。しかし、コンクリート構造物としての凍害劣化メカニズムは未解明な部分があり、劣化した構造物の構造性能も予測できない状況にある。こうした中で、著者らは、凍害劣化したRC構造物の力学挙動の解明のための重要な足がかりとなる、鉄筋の付着に着目した研究を進めてきた<sup>1)</sup>。

鉄筋の付着劣化機構を解明する際に、劣化がどのように起こるのかを考慮しなければならない。つまり、RC構造物の表面から凍害が進行すると、ひび割れに冷気と水が浸入し、構造物の中から凍害が進行するものとは、付着性状や付着劣化機構が変わってくるものと考えられる。また、凍害の要因は一般的には温度変化と水の浸入であるが、線膨張係数がほぼ等しくても、熱特性の異なる鉄筋とコンクリート間の付着が、温度変化のみで劣化する可能性も考えられる。

そこで本研究は、回数、ひび割れの有無、水分供給の有無を変数としたRC部材の凍結融解試験を行った後に一軸引張試験を行い、凍害の影響を受けたRC部材のひび割れ進展、テンションスティフニング、平均付着応力に関する検討を行った。

## 2. 実験概要

### 2.1 実験変数と供試体

本実験では、9つの鉄筋コンクリート供試体を作製し、凍結融解回数、凍結融解時における水の供給の有無、ひび割れの有無（凍結融解試験前にひび割れを導入するか否か）の3つのパラメータに着目した実験を行った。

表-1に供試体一覧を示す。供試体N0は凍結融解試験を行っていない基準供試体である。供試体W50は水分

供給下で50サイクルを、供試体W100は水分供給下で100サイクルを経験した供試体である。供試体PW50は、ひび割れが導入された後に水分供給下で50サイクルを経験したもの、供試体PW100は、ひび割れが導入された後に水分供給下で100サイクルを経験したものである。供試体N100は、水を供給しないで100サイクルかけたものである。なお、供試体S100とPS100は内部の温度変化を測定するために用意された供試体であり、後者にはひび割れが導入されている。

供試体は、100mm×100mm×1000mmのコンクリート角柱の中央に、D16鉄筋が埋め込まれたものである（図-1）。供試体の鉄筋の端部には、油圧ジャッキなどの引張治具とカプラーを連結するために、長さ150mmのD25鉄筋が溶接されている。これにより、連結位置での鉄筋降伏の先行を回避させた。

両端の鉄筋がむき出しの状態での凍結融解試験に供すると、両端の鉄筋位置から急激な温度変化を受けることとなり、実構造物が置かれる状況と大きくかけ離れるも

表-1 実験供試体一覧

供試体	凍結融解回数	ひび割れの有無	水の供給の有無
N0	0	×	×
W50	50	×	○
PW50	50	○	○
W100	100	×	○
PW100	100	○	○
N100	100	×	×
PN100	100	○	×
S100	100	×	×
PS100	100	○	×

\*1 北海道大学大学院 工学院北方圏環境政策工学専攻（学生会員）

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

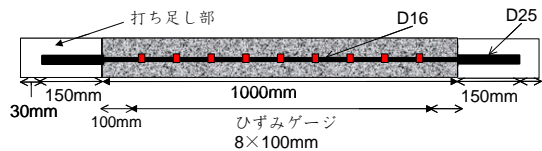


図-1 実験供試体

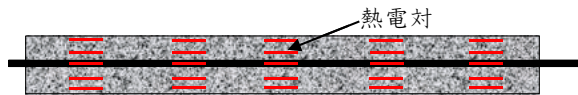


図-2 熱電対の設置位置

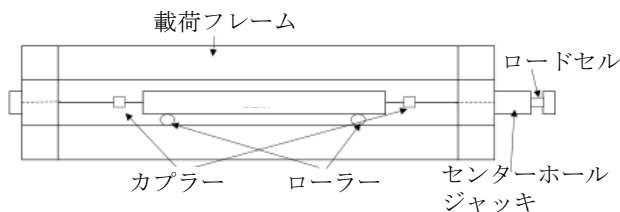


図-3 引張力作用方法

のと考えられた。そこで、両端部には、凍結融解試験前に、100mm×10mm×180mmのコンクリートを打ち足した。その際、端部の鉄筋を塩ビパイプで覆った。

鉄筋には、電気抵抗式ひずみゲージ（検長 5mm）が、細心の防水処理のもとで 100mm 間隔で貼り付けられた。貼付位置が図-1 に示されている。また、熱電対は、軸方向に 200mm、軸垂直方向に 25mm 間隔で計 25 個設置されている。その設置位置が図-2 に示されている。

使用したコンクリートの配合は、単位水量が 165kg/m<sup>3</sup>で、水セメント比が 0.55、細骨材比が 0.45 である。また、AE 剤は劣化を促進させるために加えていない。

使用した鉄筋のヤング係数は 177GPa、降伏強度は 351MPa である。

## 2.2 凍結融解試験概要

本研究では、凍結融解試験装置として独自に開発した外的環境制御室を用いた。図-4 は、供試体の設置状況を示す。各供試体は、ステンレス製のプール内に置かれている。水分を供給する各供試体は水で満たされている。

温度サイクルは 1 サイクル 18 時間である。2 時間で +25℃から-25℃に下げ、6 時間-25℃に保ち、2 時間で-25℃から+25℃まで上げ、さらに 8 時間+25℃を保つようにした（図-5）。これは、事前の検討において、供試体中心部の温度が-20 度まで下がり、かつ、融解時に氷が完全に溶ける温度パターンを試行錯誤的に見出したものである。

図-6 に凍結融解試験 70 サイクル時の、供試体中心部の鉄筋付近の温度と端部の表面の温度を示す。供試体内の温度は、内部で一様ではなく、最大で 4.7℃の差がある。コンクリート表面付近の温度幅（最大温度と最小温度）は 37.2℃、鉄筋位置での温度幅は 40.5℃であった。



図-4 凍結融解試験状況

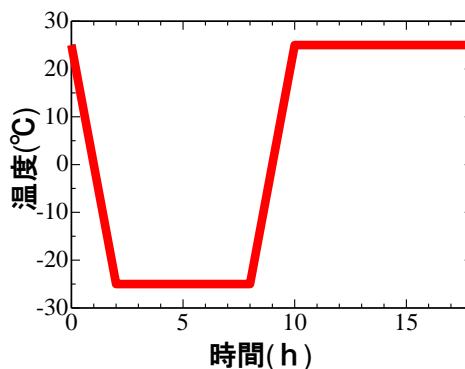


図-5 凍結融解試験の温度パターン

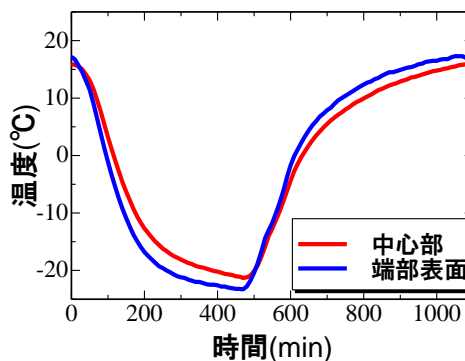


図-6 供試体の温度変化

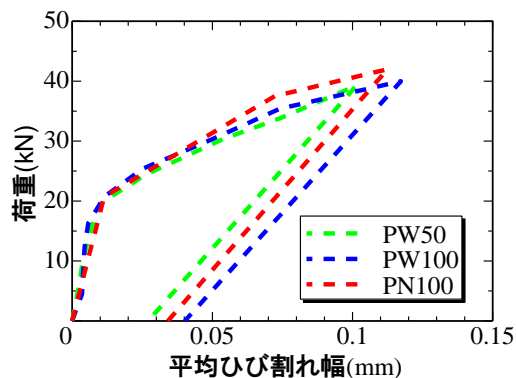


図-7 荷重と平均ひび割れ幅との関係

### 2.3 一軸引張試験概要

一軸引張試験の荷重方法は、水平に設置した供試体に引張力を加えるものである。まず、図-3のように荷重フレームを設置して、供試体から突出した鉄筋の両端をカプラーでロッドに接続する。一端のロッドは荷重フレームに固定し、他端はセンターホールジャッキを使って引張力を加えた。また、摩擦を断つために供試体と荷重フレームの床面との間にはローラーを設置した。荷重中は鉄筋のひずみの計測とひび割れ幅の計測を行なった。ひび割れ幅の測定は、供試体の表面に100mm間隔でコンタクトチップを貼り付け、コンタクトゲージにより行った。

### 2.4 ひび割れの導入方法

供試体 PW50, PW100, PN100, PS100 には、凍結融解試験前に2.3に示した方法によりひび割れが導入されている。図-7に事前引張を行なった供試体の荷重と平均ひび割れ幅の関係を示す。各供試体とも、20kN前後でひび割れが発生し、引張剛性が下がるが、その後も荷重を上げ40kNで除荷した。このとき、ひび割れ本数は各供試体とも4本であった。また、平均ひび割れ幅は約0.1mmで除荷後の残留平均ひび割れ幅は約0.03mmであった。また、剛性低下点をひび割れ発生荷重と考えると、供試体 PW50, PW100, PN100, PS100 の引張強度は、およそ  $2.1\text{N/mm}^2$  であった。

## 3. 実験結果と考察

### 3.1 凍結融解試験後の外観性状

図-8として凍結融解試験後の各供試体の写真を示す。

50サイクルかけた供試体では、表面にポップアウトが見られ、表面上の劣化が見られる。また、ひび割れを導入したものとはそうでないものとは違いが見られない。

100サイクルかけた供試体では、表面にスケーリングが見られ、劣化が顕著である。また、ひび割れを導入した供試体 PW100 には、大きな断面欠損が見られる。これは、ひび割れが存在することにより、供試体内部からも劣化が進行したためだと考えられる。なお、水を与えなかった供試体 N100 と PN100 には表面上大きな変化は見られなかった。

### 3.2 引張試験後のひび割れ性状

図-9に凍結融解試験前にひび割れを導入していない供試体の引張試験後のひび割れ図を示す。ひび割れ性状に大きな差異は見られない。なお、平均ひび割れ間隔は、供試体 N0, W50, W100, N100 の順に、16.1, 18.1, 15.2, 22.5cm であった。

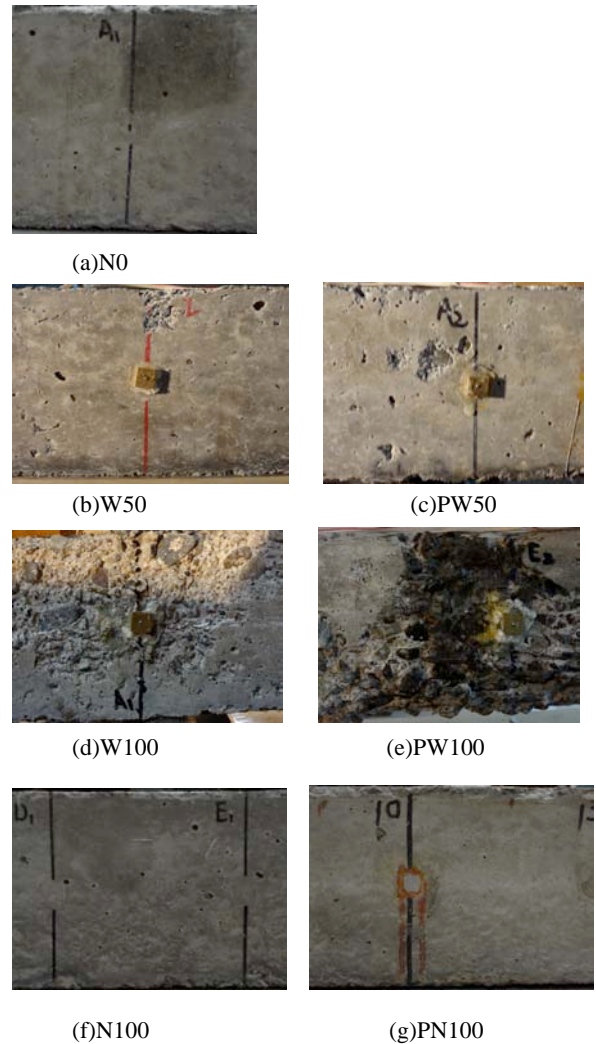


図-8 凍結融解試験後の外観

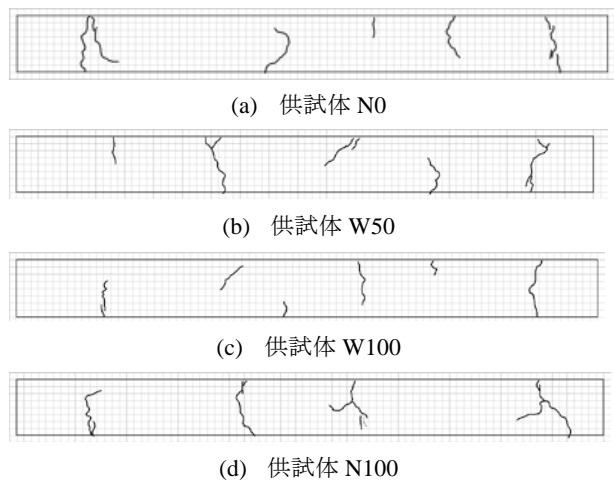


図-9 ひび割れ性状

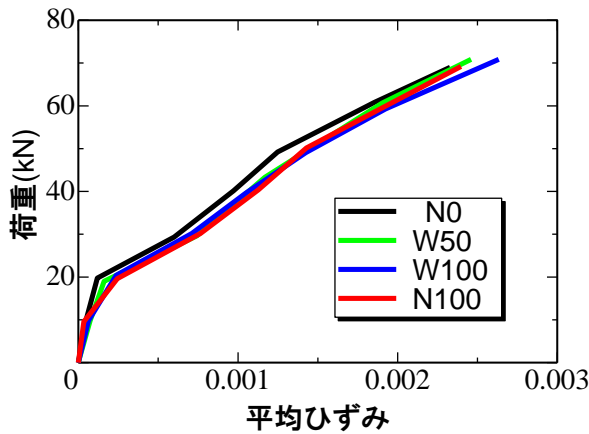


図-10 荷重と平均ひずみとの関係（ひび割れなし）

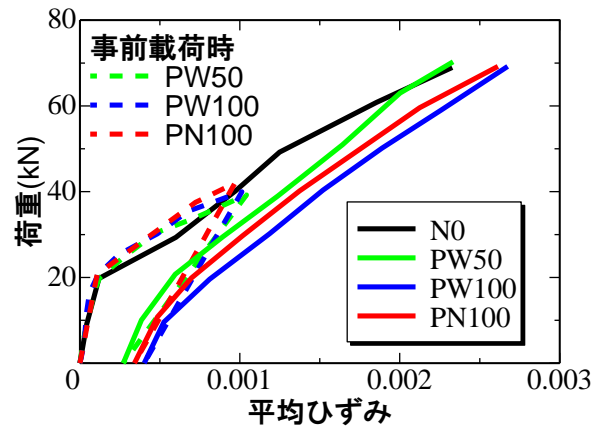


図-11 荷重と平均ひずみとの関係（ひび割れあり）

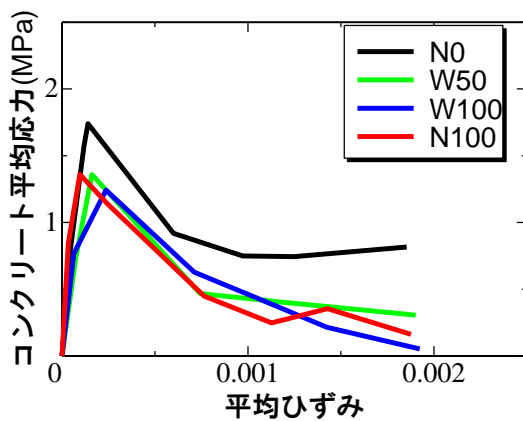


図-12 テンションスティフニング曲線（ひび割れなし）

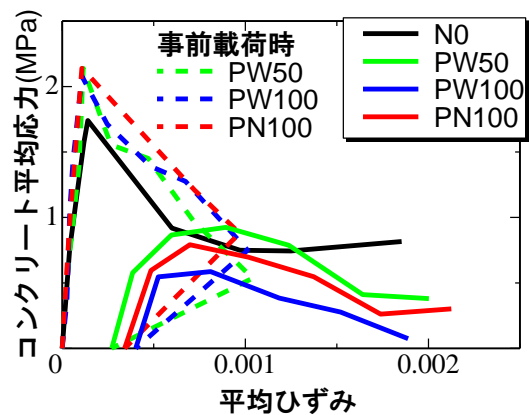


図-13 テンションスティフニング曲線（ひび割れあり）

### 3.3 荷重-平均ひずみ関係

図-10 に事前引張を行なわなかった供試体の荷重と平均ひずみとの関係を、図-11 に事前引張を行なった供試体の荷重と平均ひずみとの関係を示す。なお、図-11 では、ひび割れ導入時の荷重-平均ひずみ関係を破線で示し、ひび割れ導入時の除荷時の平均ひずみから、引張試験により得られた荷重-平均ひずみ曲線を描いたものである。

まず図-10 に着目する。供試体 N0 は、約 20kN でひび割れが発生し剛性が低下した。その後、ひび割れの数を増やしながら、ひずみが大きくなり、約 70kN で鉄筋が降伏した。剛性低下点をひび割れ発生荷重と考えると引張強度は  $1.7\text{N/mm}^2$  であった。先に、ひび割れの導入を行った供試体の引張強度が  $2.1\text{N/mm}^2$  であることを述べた。これら供試体は、打設後 38 日に試験を行ったが、供試体 N0 は、実験室に 60 日間置いた後に引張試験を行っており、乾燥収縮の影響を受けていたために引張強度が若干低下したものと考えられる。供試体 W50 は、約 10kN で剛性低下がおこっている。すなわち、引張強度が  $1.36\text{N/mm}^2$  であり、供試体 N0 より約 20% 低下している。すなわち、凍結融解作用の影響が表れたものと考えられる。凍結融解サイクル数が 100 回である、供試体 W100

と N100 は、さらに最初に剛性が低下する荷重が小さくなっている。また、それ以降も供試体 W50, W100, N100 は、供試体 N0 よりも、同じ平均ひずみに対する荷重が小さくなっている。ただし、凍結融解を行った供試体 W50, W100, N100 の全体的な挙動は、概ね一致している。

次に図-11 に着目する。平均ひずみが 0.001 以上の範囲を比較すると、供試体 PW50, PN100 は、供試体 N0 より若干荷重が低下し、供試体 PW100 はさらに低下していることが明らかである。凍結融解による影響が顕著に現れている。

### 3.4 テンションスティフニング曲線

ここでコンクリートの平均応力と平均ひずみとの関係（テンションスティフニング曲線）について考察する。コンクリートの平均応力は、作用荷重から求めた鉄筋コンクリートとしての平均応力から鉄筋の平均応力を差し引くことで求めた（式(1)）。

$$\bar{\sigma}_C = \bar{\sigma}_{RC} - \bar{\sigma}_S \quad (1)$$

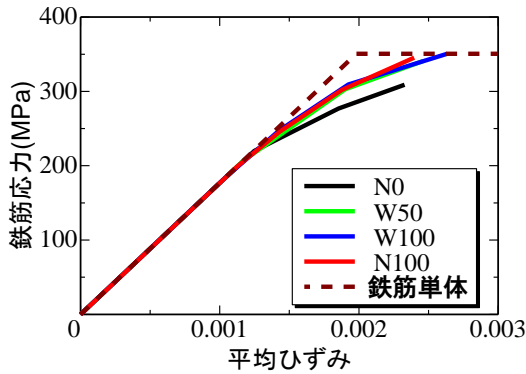


図-14 鉄筋の平均応力(ひび割れ無し)

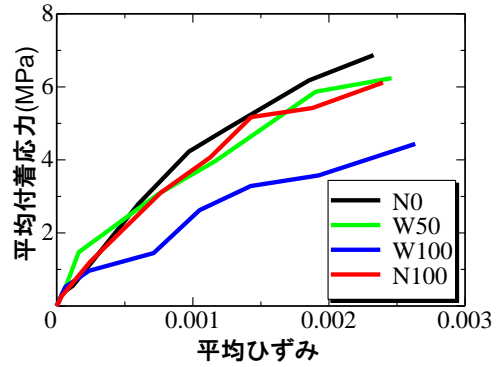


図-15 平均付着応力と平均ひずみとの関係  
(ひび割れなし)

ここで、 $\overline{\sigma_c}$  : コンクリート平均応、 $\overline{\sigma_{RC}}$  : 鉄筋コンクリートの平均応力、 $\overline{\sigma_s}$  : 鉄筋の平均応力、である。

図-12 にひび割れを導入しなかった供試体のテンションステイフニング曲線を示す。供試体 W50, W100, N100 は、供試体 N0 に比べ平均応力が低下している。その低下の程度は、水を供給し 50 回の凍結融解を与えた場合 (W50)、水を供給せずに 100 回の凍結融解を与えた場合 (N100)、水を供給し 100 回の凍結融解を与えた場合 (W100) の順に大きくなっている。温度変化だけを与えた供試体 N100 においても、平均付着応力の低下が見られることは特筆に値する。

図-13 にひび割れ導入後に凍結融解試験を行った供試体のテンションステイフニング曲線を示す。これは、ひび割れ導入時の関係を破線で示し、ひび割れ導入時の除荷時の平均ひずみから、引張試験により得られたテンションステイフニング曲線を連続的に描いたものである。凍結融解を受けることにより、水を供給しなかった供試体 PN100 も含め、平均応力が低下していることが明らかである。特に、水を供給し 100 回の凍結融解を作用させた供試体 PW100 の低下が著しく、ひび割れが存在することによる影響が大きいものと考えられる。

### 3.5 鉄筋の平均応力

3.4 において、凍結融解作用により、コンクリート平均応力が低下することを示した。ここでは、鉄筋の平均応力にどのような影響が現れていたのかを説明する。

図-14 は、ひび割れを導入しなかった供試体の鉄筋の平均応力と平均ひずみとの関係を示す。供試体 N0 は平均ひずみがおおよそ 0.0015 で傾きが小さくなり始めている。一方、その他の供試体は、平均ひずみが 0.0015 以上の範囲で供試体 N0 よりも平均応力が大きくなり、より鉄筋単体に近い関係に応答を示している。凍結融解作用による付着劣化が、降伏の開始と降伏域の広がり方に影響を及ぼしている可能性がある。なお、本研究では、ひ

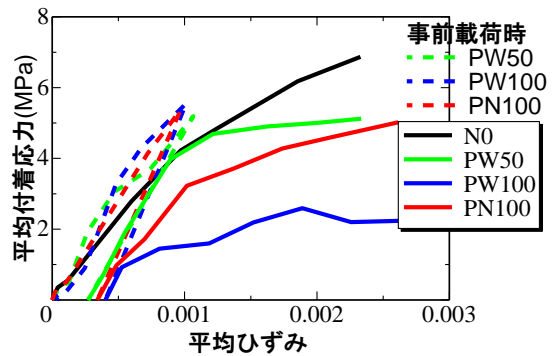


図-16 平均付着応力-平均ひずみ  
(ひび割れ有り)

ずみゲージを 100mm を間隔で貼付しているため、その明瞭な違いをひずみゲージ値から論ずることは難しい。

### 3.6 平均付着応力-平均ひずみ関係

図-15 と図-16 に、平均付着応力と平均ひずみとの関係を示す。図-15 に事前引張を行わなかった供試体、図-16 に事前引張を行った供試体を示し、図-16 の破線部はひび割れ導入時の平均付着応力と平均ひずみとの関係を示している。また、平均付着応力は、ひずみ分布の傾きから付着応力を式(2)より求め、各位置の付着応力を平均することにより算出した。

$$\tau = \frac{E_s D}{4} \frac{d\varepsilon}{dx} \quad (2)$$

ここで、 $\tau$  : 付着応力 (MPa)、 $E_s$  : 鉄筋の弾性係数 (MPa)、 $D$  : 鉄筋径 (mm) である。

図より、凍結融解を受けることにより平均付着応力が低下している。特に、供試体 W100, PW100, PN100 の

低下割合が大きい。すなわち、ひび割れは、凍結融解による付着劣化を促進させること、さらには、水を供給させない場合であっても、温度変化による付着劣化を引き起こす可能性があることが明らかとなった。

なお、付着が低下しているにもかかわらず、ひび割れ本数とひび割れ間隔がそれほど変わらなかったのは、凍結融解を受けることで引張強度も低下するためであると考えられる。

#### 4. 結論

本実験の範囲において以下のような結論を得た。

- (1) ひび割れが存在することで、凍結融解による鉄筋コンクリートの劣化が促進する。
- (2) 鉄筋コンクリートが凍結融解を受けることにより、コンクリートの引張強度、コンクリートの平均応力、平均付着応力が低下する。

- (3) 水を供給しない場合、すなわち、温度変化だけを与える場合であっても付着劣化が生ずる。
- (4) 凍結融解により付着劣化が起こるが、引張強度も低下するために、ひび割れ本数が減り、間隔が増加するとは限らない。

#### 参考文献

- 1) 三河智将, 佐藤靖彦, 凍結融解作用を受けた鉄筋コンクリートの付着劣化に関する実験的検討, 土木学会年次学術講演会講演概要集(CD-ROM), vol.65, V-434, 2010

#### 謝辞

本研究は科学技術総合推進費補助金「国際共同研究の推進コンクリート構造物の LCM 国際標準の確立 (代表: 上田多門 北海道大学教授) の助成を受けたものである。