

論文 シース内の滞留水の凍結による軸方向ひび割れ発生メカニズムに関する一考察

横飛 翔太*1・西 弘*2・近藤 拓也*3・横井 克則*4

要旨：シース内が空隙、もしくは水で充填された供試体を作製し、 -5°C 条件に24時間設置後、 20°C まで温度を回復させた。供試体内部に熱電対、ひずみゲージを設置し、シース内の滞留水の凍結が軸方向ひび割れに与える影響について検討した。その結果、シース内が空隙の供試体ではひび割れは発生しなかったことに対して、シース内を水で充填した供試体については、シース内の水量が多いものについて軸方向ひび割れが生じた。この結果と熱電対やひずみゲージの挙動を踏まえて、ひび割れ発生メカニズムについて検討を行った。

キーワード：シース内滞留水、凍結、潜熱、ひび割れ

1. はじめに

我が国におけるポストテンション方式 PC 橋（以下、ポステン PC と称す）は、1953 年完成の十郷橋や 1954 年完成の第一大戸川橋梁の建設以来、約 60 年が経過し、全国において数多く建設されている¹⁾。そして過去に建設された PC 橋においては老朽化に伴う損傷や劣化が散見されている。特にポステン PC では、シース内のグラウト充填不良による PC 鋼材の腐食や破断が問題となっている。グラウトは PC 鋼材とコンクリートの一体化や PC 鋼材の腐食からの保護が目的であり、その性能を十分に発揮するためには、グラウトがシース内に適切に充填されている必要がある。しかし、ポステン PC が導入された当時のポステン PC においては、グラウトの重要性に関する認識が低く、グラウト材料や施工方法、施工装置などに関する技術水準が現在に比べて未熟であった。その結果、グラウトの充填不良が生じ、それを起因とした不具合が近年顕在化している²⁾。グラウトの充填不良による構造物の劣化の一つとして、軸方向に生じるひび割れがある。このひび割れは、ポステン PC がコンクリート内に鋼製シースや PC 鋼材などを有していることで、様々な理由により生じると考えられる。そのため、目視のみではひび割れの発生原因を推定することが困難である場合が多い。ひび割れの発生原因が分からなければ、適切な処置が構造物に施せないため、ひび割れの発生原因とそのメカニズムを整理することは、維持管理や耐久性の観点から有益であると考えられる。

ひび割れの発生原因の一つとしてグラウトの充填不良箇所に滞留した水の凍結膨張圧が挙げられる。北海道では軸方向ひび割れが昭和 30 年代初期に架設された PC 橋において竣工後間もなく散見され、調査の結果、そのよ

うな可能性が指摘された²⁾。また、このひび割れが本州や九州でも散見されるようになったため、ひび割れ原因が寒冷地特有のものではなく、他にあると指摘され、シース内滞留水の凍結以外のひび割れ発生原因について様々な検討がされるようになった³⁾。しかし、シース内の滞留水の凍結に関するひび割れ発生メカニズムには不明な点が多い。筆者らは実験より、滞留水の凍結膨張圧ではなく凍結時の潜熱によるコンクリート表面と内部の温度差がひび割れの発生原因であると考察した⁴⁾。しかし、実構造物ではシース径が異なるため、断面に対する水量が構造物によって変化することが考えられる。そのため本実験では、シース径の変化により断面に対する水の割合を変化させ、その影響を検討することにより潜熱とひび割れの関係性を明白にすることを目的とした。

2. 実験内容

2.1 実験要因

実験条件を表-1 に示す。シース内の滞留水の凍結による軸方向ひび割れへの影響を検討するため、シース内の状況は空隙のみと水で充填する 2 種類とした。シース径は水の量がコンクリートに与える影響を検討するため、

表-1 実験条件

| タイプ | シース径 (mm) | 水の充填度 (%) |
|----------|-----------|-----------|
| Type 1-1 | $\phi 40$ | 0 |
| Type 1-2 | $\phi 40$ | 100 |
| Type 2-1 | $\phi 20$ | 0 |
| Type 2-2 | $\phi 20$ | 100 |
| Type 3-1 | $\phi 30$ | 0 |
| Type 3-2 | $\phi 30$ | 100 |

*1 高知工業高等専門学校 専攻科建設工学専攻 (学生会員)

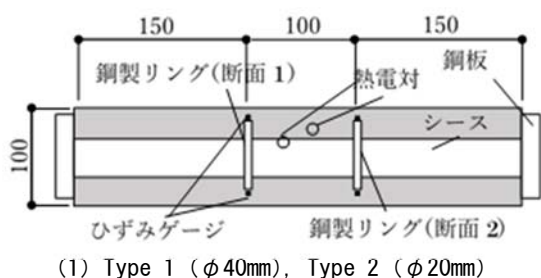
*2 (株) CORE 技術研究所 専務取締役 (正会員)

*3 高知工業高等専門学校 ソーシャルデザイン工学科准教授 博士 (工) (正会員)

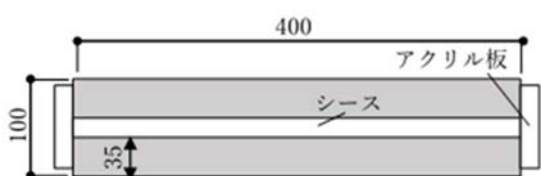
*4 高知工業高等専門学校 ソーシャルデザイン工学科教授 博士 (工) (正会員)

表-2 配合表

| W/C (%) | 単位量 (kg/m ³) | | | | Ad (cc/m ³) |
|---------|--------------------------|-----|-----|-----|-------------------------|
| | W | C | S | G | |
| 40 | 170 | 425 | 728 | 911 | 768 |

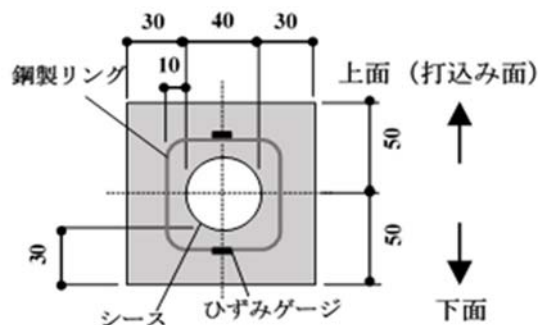


(1) Type 1 (φ40mm), Type 2 (φ20mm)

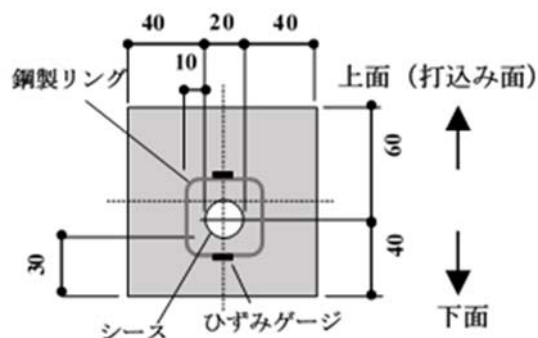


(2) Type 3 (φ30mm)

図-1 供試体概要 (図中単位: mm)



(1) Type 1 (φ40mm)



(2) Type 2 (φ20mm)

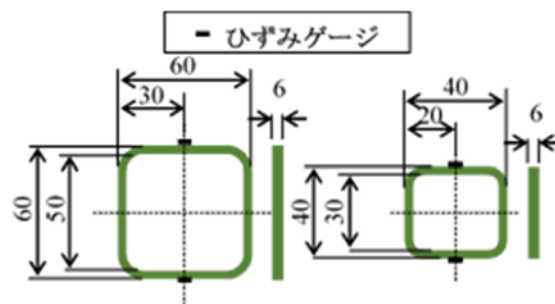
図-2 供試体断面図 (図中単位: mm)

φ40mm, 30mm, 20mmの3種類とした。Type 1をシース径φ40mmとし、シース内が空隙をType 1-1, 水充填をType 1-2とした。Type 2をシース径φ20mmとし、シース内が空隙をType 2-1, 水充填をType 2-2とした。Type 3をシース径φ30mmとし、シース内が空隙をType 3-1, 水充填をType 3-2とした。Type 1とType 2はシースの最小かぶりを30mmとした。Type 3は外観変状のみを研究することを目的に作成した。そのためシースを断面中央に配置したことから、最小かぶりを35mmとした。また、供試体内のひずみを測定するために、Type 1, 2では、鋼製リングを配置した。Type 3は鋼製シースのみ配置した。

2.2 供試体概要

本実験で使用した供試体のコンクリートは、1970年に建設されたポステンPCの配合を参考にして水セメント比を40%とした。コンクリートの配合表を表-2に示す。セメントは早強ポルトランドセメントを使用し、混和剤としてAE減水剤を使用した。目標スランプ値を8.0±2.5cm, 目標空気量を4.5±1.5%とし、混和剤を使用して調整した。なお、後述する鋼製リングとシースのあきが小さいため、粗骨材の最小寸法は10mmとした。

供試体概要を図-1に示す。供試体は100mm×100mm×400mmの角柱供試体とした。ポステンPCを模擬するため、断面にシースを配置した。コンクリートに作用する応力を測定するため、Type 1とType 2の供試体内部には、防水処理を施したひずみゲージ(ゲージ長: 5.3mm)を貼付した鋼製リングをシース周辺に配置した。鋼製リ



(1) Type 1

(2) Type 2

図-3 鋼製リング詳細図 (図中単位: mm)

ングは供試体の両端部から150mm位置に配置し、2つの鋼製リングの間隔は100mmとした。鋼製リングはSS400(厚さ6mm)の鋼板をリング状に切り抜いたものを使用した。供試体断面図を図-2に示し、鋼製リングの詳細図を図-3に示す。

また、熱電対をシース内とシース外側のコンクリート内に設置し、供試体内の温度を測定した。

2.3 実験方法

実験は凍結時間24時間、融解時間24時間を1サイクルとした凍結融解実験を、市販の冷凍庫を使用して1サイクル行った。凍結温度は-5℃に設定した。融解時は冷凍庫から供試体を取り出し、室内温度を20℃一定に設定した部屋に静置した。熱電対を冷凍庫内と室内に設置して温度管理を行った。ひずみと温度の測定は、共に10分

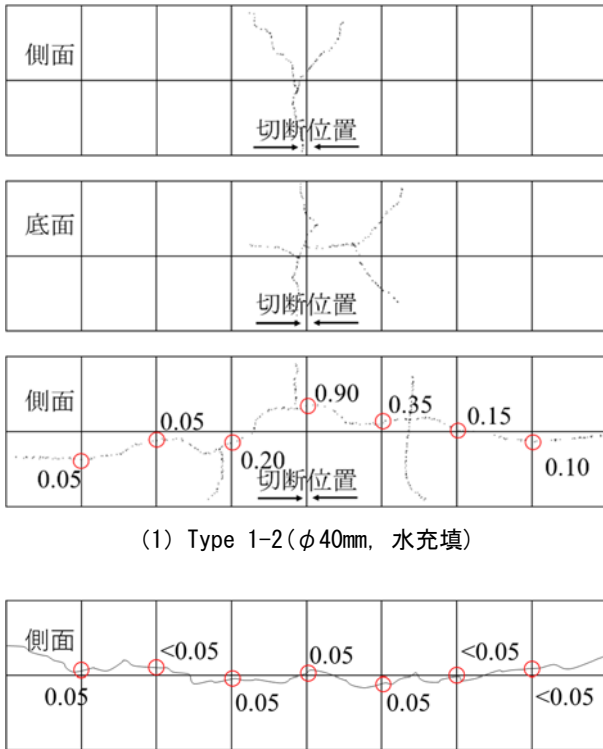


図-3 ひび割れ図（ひび割れ発生面のみ、
図中数字はひび割れ幅）

間隔で行った。実験終了後、供試体表面のひび割れ幅をクラックスケール（精度：0.05mm）で測定した。

3. 実験結果

3.1 外観性状

実験終了後の供試体の外観において、ひび割れが確認できたのは Type 1-2（φ40mm，水充填）と Type 3-2（φ30mm，水充填）であった。ひび割れは、Type 1-2 では打込み面（上面）を除く 3 面で発生し、Type 3-2 では片側側面の 1 面で発生した。供試体を 50mm 毎にメッシュを切り、クラックスケール（精度：0.05mm）でひび割れ幅を測定した。そのひび割れ図を図-3 に示す。なお、図はひび割れ発生面のみ作成した。ひび割れ幅がクラックスケールの精度以下の箇所は図中に<math><0.05</math> と示した。また、測定終了後の平均および最大ひび割れ幅を表-3 に示す。なお平均ひび割れ幅は、供試体軸方向 50mm ごとにメッシュ線を引き、その位置におけるひび割れ幅を測定し、ひび割れ幅の合計を測定箇所で割ったものとした。ひび割れ幅 0.05mm 未満については、測定値を 0.00mm とし、測定箇所数に含めた。最大ひび割れ幅および平均ひび割れ幅ともに、Type 1-2 が大きい。このことから、シース径の違いによる水量の差がひび割れ幅に影響を与えらる。

ひび割れが発生した供試体では、いずれの供試体にお

表-3 ひび割れ幅

| | 平均ひび割れ幅 (mm) | 最大ひび割れ幅 (mm) |
|----------|-----------------|-----------------|
| Type 1-1 | 0.00 | 0.00 |
| Type 1-2 | 0.26 | 0.90 |
| Type 2-1 | 0.00 | 0.00 |
| Type 2-2 | 0.00 | 0.00 |
| Type 3-1 | 0.00 | 0.00 |
| Type 3-2 | 0.03 | 0.05 |

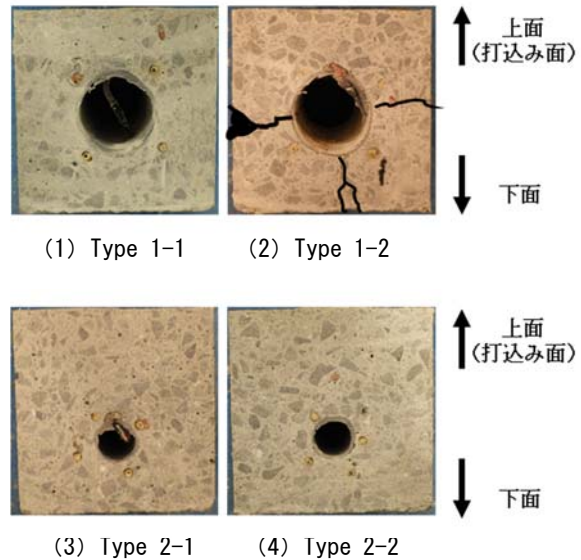
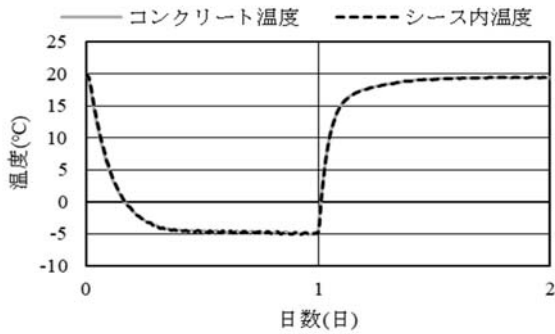


図-4 切断面（ひび割れは黒線で加筆）

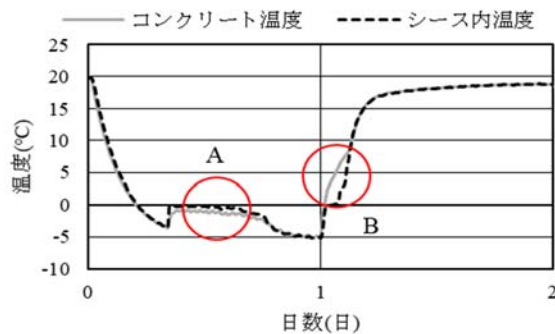
いても軸方向ひび割れが卓越していることが確認できる。鈴木ら⁵⁾は鋼製シースを電食した時に発生するひび割れが軸方向に卓越したひび割れになることを実験的に示しているが、本実験でも同様の傾向が得られた。そのため今回の現象も内部が膨張することにより、コンクリート表面にひび割れが生じたものと考えられる。また、Type 1-2 では軸直角方向のひび割れが確認できる。これはシース周辺に設置した鋼製リングの弾性係数が大きいため、シース周辺に生じた膨張圧を拘束し応力状況を複雑にした可能性があると考えられる。ひび割れが発生した Type 1-2 と Type 3-2 でシースかぶりも異なるため、一意的な考察は出来ないが、今後はかぶりの影響も含めて考察する必要がある。

3.2 内部ひび割れ

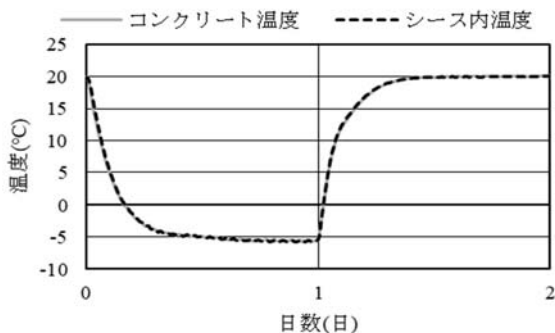
凍結融解実験終了後、供試体内部の状況を確認するために、Type 1（φ40mm）と Type 2（φ20mm）の供試体を、端部から 200mm 位置でコンクリートカッターを用いて切断した。切断位置を図-3 中に示す。各供試体の 200mm 位置における切断面の写真を図-4 に示す。ひび



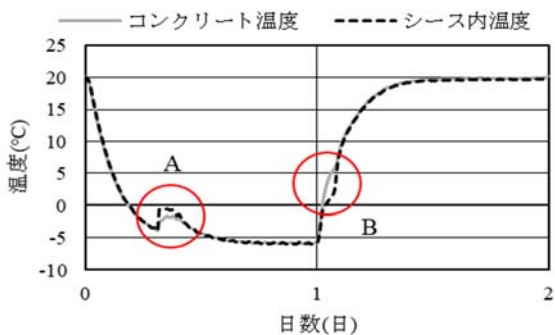
(1) Type 1-1 (φ40mm, 空隙)



(2) Type 1-2 (φ40mm, 水充填)

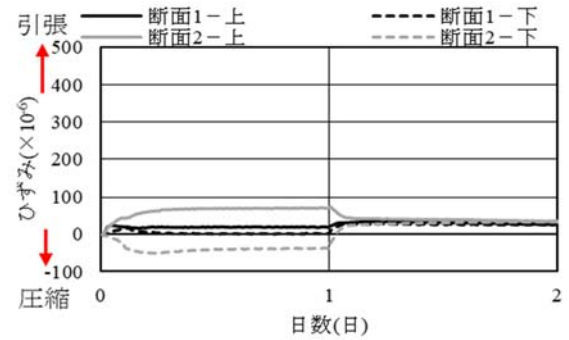


(3) Type 2-1 (φ20mm, 空隙)

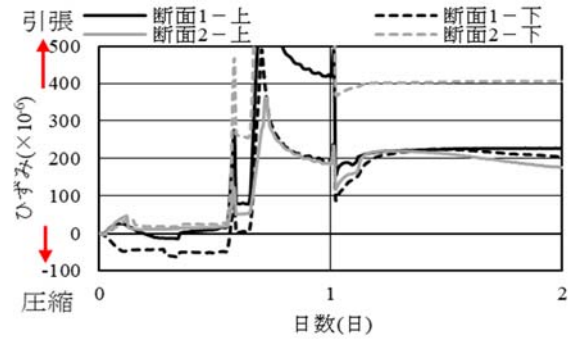


(4) Type 2-2 (φ20mm, 水充填)

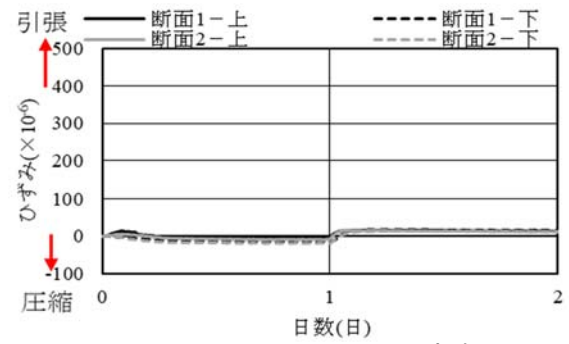
図-5 温度変化



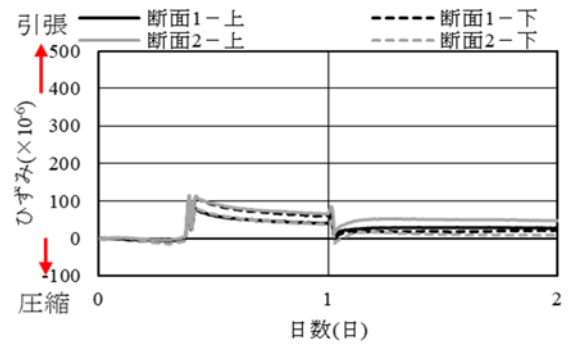
(1) Type 1-1 (φ40mm, 空隙)



(2) Type 1-2 (φ40mm, 水充填)



(3) Type 2-1 (φ20mm, 空隙)



(4) Type 2-2 (φ20mm, 水充填)

図-6 ひずみ変化

割れは Type 1-2 (φ40mm, 水充填) のみで見られた。また、ひび割れは、シースを中心にコンクリート内部から外部に向かってひび割れ幅が増加する放射状のひび割れが確認できる。近藤らはシース腐食の膨張圧により、コンクリート内に引張応力が生じ、放射状のひび割れが入る可能性があることを指摘している⁹⁾。今回の結果も放

射状のひび割れが生じたため、シースを中心とした膨張圧が作用しているものと考えられる。

3.3 温度変化

コンクリートとシース内に設置した熱電対で測定した温度変化を図-5 に示す。シース内が空隙である Type 1-1 と Type 2-1 は、シース内、コンクリート温度ともに設

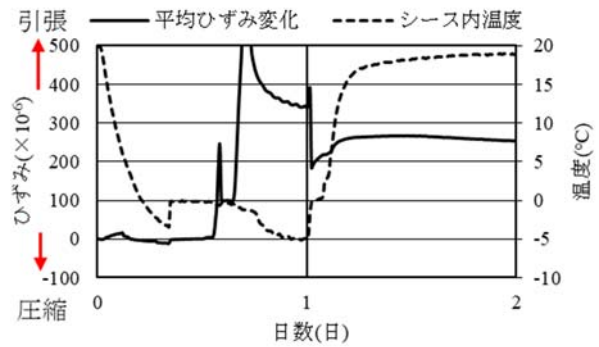
定温度の-5℃まで温度が下がり、24時間までその状況を維持している。シース内に水が充填されている Type 1-2 と Type 2-2 では、温度が 0℃以下になった際に（図中 A 点）、コンクリート内およびシース内温度が 0℃まで一度温度が上昇していることが確認できる。これはシース内の水が凍結する際に発生する潜熱によりシース内の温度が上昇したものと考えられる。また、凍結時の潜熱発生期間において、コンクリートの温度がシース内の温度よりわずかに低いことが確認できる。これはコンクリート表面が-5℃まで冷却されているが、内部は 0℃のまま保たれているため、供試体内に温度勾配が生じていることが考えられる。

Type 1-2 と Type 2-2 を比較すると、潜熱と考えられる温度上昇期間の長さに違いを確認できる。これはシース径の違いによる水量の差が凍結時間へ関係していると考えられる。水量が大きい程、水全体が氷への相変化に要する時間が長くなるためだと考えられる。

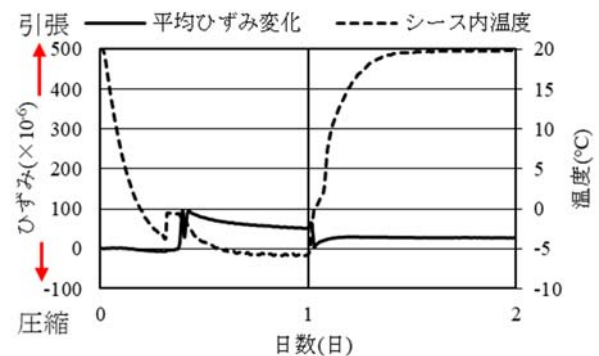
また Type 1-2 と Type 2-2 において、融解時の温度が 0℃を超える際に（図中 B 点）、シース内の温度がコンクリートの温度より遅れて上昇していることが確認できる。これも氷の融解熱によるものだと考えられる。そのため、融解時にも、供試体内には温度勾配が生じたものと考えられる。この現象は、シース近傍のコンクリート温度がコンクリート表面の温度より低かったためと考えられる。

3.4 ひずみ変化

実験期間中のひずみ変化を図-6 に示す。ひずみは供試体内の鋼製リングに貼付したひずみゲージより得た値である。Type 1-2 と Type 2-2 において凍結時に一定時間経過後、引張ひずみが生じていることが確認できる。Type 1-2 と Type 2-2 を比較すると、引張ひずみの大きさに差が生じていることが確認できる。これはシース内の水量が完全に凍結するまでの時間に起因していると考えられる。この時間が長い程、供試体内の温度勾配が生じている時間が長いことが考えられる。Type 1-2 では、コンクリートの温度勾配が発生している時間が長かったため、ひずみが急激に増加した時点でひび割れが起こったと考えられる。Type 2-2 では、発生した引張ひずみがひび割れ発生の目安である 200×10^{-6} 以下と小さいため、ひび割れが生じなかったと考えられる。融解時に Type 1-2 ではひずみが 0 に戻っていないが Type 2-2 ではひずみが 0 に戻っていることから、Type 1-2 はひび割れによる残留ひずみだと考えられる。図-4 においても Type 2-2 では供試体内部にひび割れは確認できなかった。よって、実構造物においては、シース内の滞留水量が大きい程、軸方向ひび割れが生じやすくなると考えられる。



(1) Type 1-2 (φ40mm, 水充填)



(2) Type 2-2 (φ20mm, 水充填)

図-7 温度ひずみ変化

4. ひび割れ発生メカニズムの考察

Type 1-2 (φ40mm, 水充填) および Type 2-2 (φ20mm, 水充填) について、温度変化とひずみ変化を同一のグラフに再掲したものを図-7 に示す。なお温度はシース内に設置した熱電対の測定値で、ひずみは図-6 で示した 4 箇所のひずみの平均値とした。

Type 1-2 では潜熱が発生している期間に著大な引張ひずみが発生していることが確認できる。図-5 では、コンクリート内の温度を計測するための熱電対はシース近傍に設置したため、コンクリート内とシース内の温度差は大きくない。潜熱発生時に、供試体内ではコンクリート表面の温度が低く、内部の温度が高くなる温度勾配が生じたものと考えられる。これは、シース近傍のコンクリートは潜熱により収縮しないが、シースから離れたコンクリートは温度が低下するため収縮するものと考えられる。これによりコンクリートに拘束が生じ、コンクリート表面に引張応力が発生し、ひび割れが発生したと考えられる。

この作用と、3.2 で示した、シース内の凍結膨張圧がコンクリート内部に引張力の作用が複合的に作用して、ひび割れが発生するものと考えられる。

本論文の検討範囲では、それぞれの寄与程度については不明である。そのため今後は、供試体断面を変化させる、もしくはシース内水量を変化させた供試体を作製し、

主要因を特定する必要があると考える。また、維持管理実務への展開を図るため、検討の深度化が必要であると考えられる。

5. おわりに

本論文では、シース内滞留水の凍結により発生する軸方向ひび割れの発生原因を推定するため、角柱供試体内に径の異なるシースを配置し、さらにはその中に水充填、もしくは空隙条件とした供試体を作製し、ひび割れ発生原因について検討を行った。得られた結果を以下に示す。

- (1) -5℃環境下から取り出した後、供試体に軸方向ひび割れが発生した供試体では、大きなひび割れが生じていたのに対して、 $\phi 30\text{mm}$ ではひび割れ幅が小さくなり、 $\phi 20\text{mm}$ 供試体ではひび割れが確認できなかった。
- (2) シース内および近傍コンクリートに設置した熱電対による温度計測において、シース内空隙供試体では、-5℃環境下に設置直後から、コンクリート内部もすぐに-5℃を示した。一方で、シース内に水を充填した供試体では、0℃以下を示したのち、温度が0℃まで回復し、一定時間温度変化を示さなかった。その後、-5℃まで低下したが、シース径によりその時間は異なった。
- (3) 供試体内に設置したひずみゲージは、シース内空隙供試体では、実験期間中、値はほとんど変化しなかった。シース内に水を充填した供試体では、シース内温度が0℃一定を示す期間中に、引張ひずみが増加した。ただし、その値はシース径により異なった。
- (4) 凍結時、シース近傍のコンクリート温度よりコンクリート表面の温度が低くなる温度勾配が生じ、収縮ひずみの温度による拘束が引張ひずみを発生させたこと、およびシース内の水の凍結膨張圧との複合的な作用が、コンクリートにひび割れを発生させる

原因になったと考えられる。

謝辞

本研究は、(一財) 橋梁調査会「橋梁技術に関する研究開発助成」(研究代表者: 近藤拓也) の補助を受けて実施した。また、研究実施に際しては、岩手大学理工学部 大西弘志准教授に適切なお指導を賜った。ここに謝意を表す。

参考文献

- 1) 公益社団法人プレストレストコンクリート工学会：既設ポストテンション橋のPC鋼材調査および補修・補強指針、2016.9
- 2) 林正道：プレストレストコンクリート用グラウトに関する実験的研究、北海道開発局土木試験所報告第29号、1962.3
- 3) 公益社団法人プレストレストコンクリート工学会：PC構造物高耐久化ガイドライン PC技術規準シリーズ、2015.4
- 4) 横飛翔太，西弘，近藤拓也，横井克則，中谷明登：シース内滞留水の凍結によるひび割れ発生メカニズムの考察，第73回土木学会年次学術講演会講演概要集，Vol.73，No.5，785-786，2018.8
- 5) 鈴木佑典，近藤拓也，山本貴士，宮川豊章：PC部材中のシース腐食とコンクリート表面のひび割れに関する実験的検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.33，No.1，pp.1091-1096，2011.7
- 6) 近藤拓也，山本貴士，宮川豊章，鈴木佑典：鋼製シース腐食によるPCのひび割れ性状に関する一考察，土木学会論文集 E2(材料・コンクリート構造)，Vol.73，No.4，pp.348-362，2017.10
- 7) 土木学会：2017年制定コンクリート標準示方書〔設計編〕，2018.3