

論文 シース内の滞留水の量が軸方向ひび割れ発生限界に与える影響

横飛 翔太*1・西 弘*2・近藤 拓也*3・横井 克則*4

要旨： 本論文ではシース内に滞留した水の量と軸方向に発生するひび割れ幅の関係を検討するため、シース内の水量を試験要因として、ポストテンション方式 PC を模擬した供試体を作製し凍結融解試験を実施した。コンクリート断面積に対する水の断面積が 6.5%以下ではひび割れが生じないのに対して、それ以上の水の面積になるとひび割れ幅が増加する傾向を示した。また本試験条件では、ひび割れ発生原因は水の凍結による膨張圧が支配的である可能性が高いが、コンクリート断面積の増加とともに温度勾配の影響が大きくなる可能性も示した。

キーワード： 軸方向ひび割れ, ひび割れ幅, 水量, 凍結, 凍結膨張圧

1. はじめに

近年、コンクリート構造物の維持管理が重要視される中で、橋梁点検等において様々なひび割れが確認されている。ポストテンション方式の PC 構造物(以下、「ポステン PC」という)では、PC 構造物特有のひび割れとして PC 桁側面や下面に軸方向に生じるものがある。このひび割れは、過大プレストレスやグラウトの高注入圧によるコンクリートへの膨張圧の発生、グラウト充填不良箇所に侵入した水の凍結膨張圧、そして塩化物イオンによるシースや鋼材の腐食膨張圧等が原因として考えられる¹⁾²⁾。しかし、ポステン PC はコンクリート内にグラウトとシースが存在するため、ひび割れが発生する力学的メカニズムについて不明な点が多い。そのため、劣化要因や劣化機構を明確にすることが困難な場合がある。ポステン PC の建設が始まった直後に建設された構造物では、グラウト材料や施工方法、施工機器などに関する技術水準の未熟さ等によるグラウト充填不良が生じた事例が確認されている³⁾。グラウト充填不良が生じると、シース内に空隙が生じることとなり、寒冷地等ではその空隙部にコンクリート外部から侵入した水が滞留し凍結する恐れがある。佐々木ら⁴⁾の報告では、この滞留した水の凍結膨張圧によりひび割れが発生したと考察している。しかしこれらに関しては実験的検討が少なく、滞留水の凍結と軸方向ひび割れの関係性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のみではなく、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⁵⁾。しかし、実構造物ではシース内の空隙径が異なると想定されるため、構造物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。

そのため本研究では、シース径の変化と鋼棒の配置によりコンクリート断面積に対する水の断面積の割合を変化させ、凍結融解環境下に設置し、これによる温度とひび割れ、そしてひび割れの関係について検討を行った。この結果を踏まえ、軸方向ひび割れが発生する条件について検討を行った。

2. 実験内容

2.1 実験要因

実験要因を表-1 に示す。シース内の滞留水量が軸方向ひび割れの発生限界へ与える影響を検討するため、コンクリート断面積に対する水断面積の割合をパラメータとした。シース径は3種類とし、各シース径につき PC 鋼棒の配置有無によりコンクリート断面積に対する水断面積の割合(以下、「水面積率」という)を調整した。また、シース内は水で完全に充填した。シース径が 40mm を Type1, シース径が 30mm を Type2, シース径が 20mm を

表-1 実験要因

タイプ	シース径 (mm)	水面積率 (%)	鋼棒
Type1-a	40	12.6	無
Type1-b		8.9	あり
Type2-a	30	7.1	無
Type2-b		5.1	あり
Type3-a	20	3.1	無
Type3-b		2.0	あり

*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 取締役副社長 博士 (工) (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

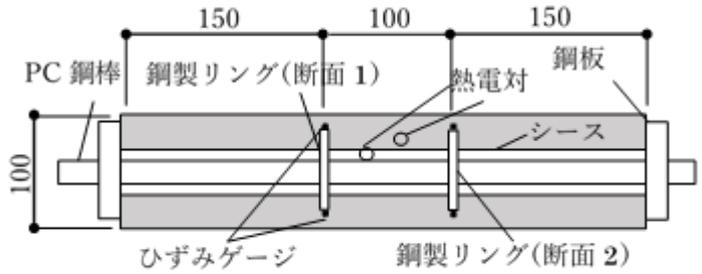


図-1 供試体概要図(図中単位: mm)

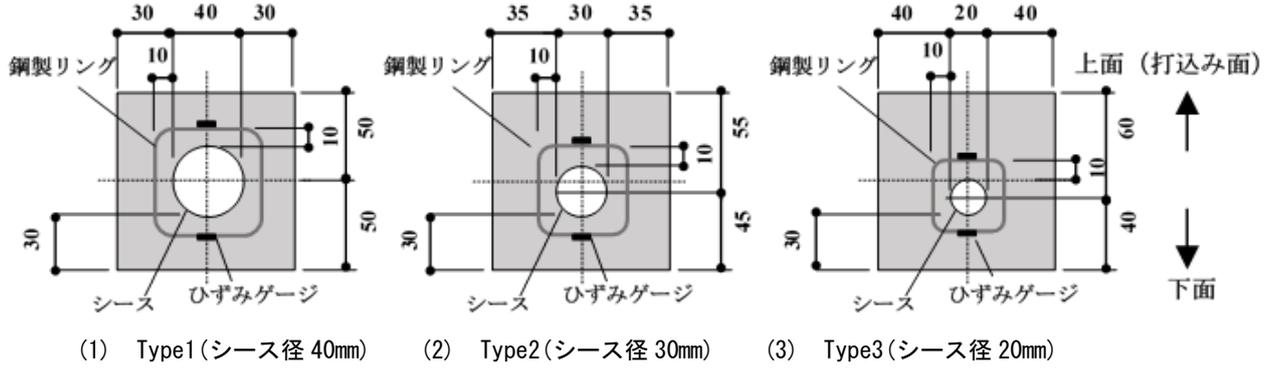


図-2 供試体断面図(図中単位: mm)

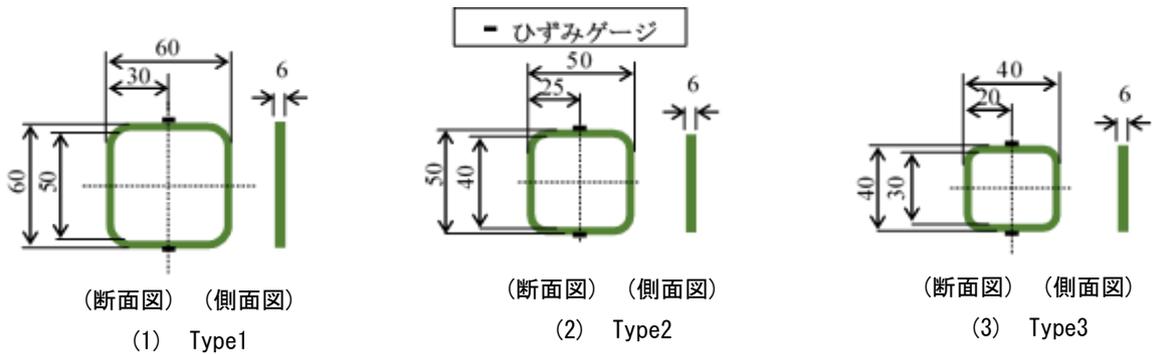


図-3 鋼製リング詳細図(図中単位: mm)

Type3とした。

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年代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 $8.0 \pm 2.5\text{cm}$ 、目標空気量を $4.5 \pm 1.5\%$ 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、供試体断面図を図-2および鋼製リングの詳細図を図-3に示す。供試体は $100\text{mm} \times 100\text{mm} \times 400\text{mm}$ の角柱供試体を用いた。ポステン PC を模擬するため、供試体断面内にシースを配置し、bシリーズにはPC鋼棒を配置した。なお、このPC鋼棒には緊

張力は導入していない。シースの最小かぶりは下面で30mmに統一した。実構造物においては、最小かぶり面からの1方向のみから温度の影響を受けると考えられるが、本試験は基礎的な性状を確認するため、本形状の供試体を用いた。

コンクリートに作用する応力を測定するため、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)を上下辺に貼付した鋼製リングを、シース周辺に配置した。鋼製リ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。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。

供試体は打込み後1日から材齢7日まで湿潤養生を行

った。材齢 28 日以降、順次試験を開始した。

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 5 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、あらかじめ室内温度を 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、温度管理を行った。温度とひずみの計測は 10 分間隔で行った。各サイクル終了時、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。また 5 サイクル終了後、供試体を中央で切断し、内部のひび割れ性状を確認した。

3. 実験結果および考察

3.1 外観性状

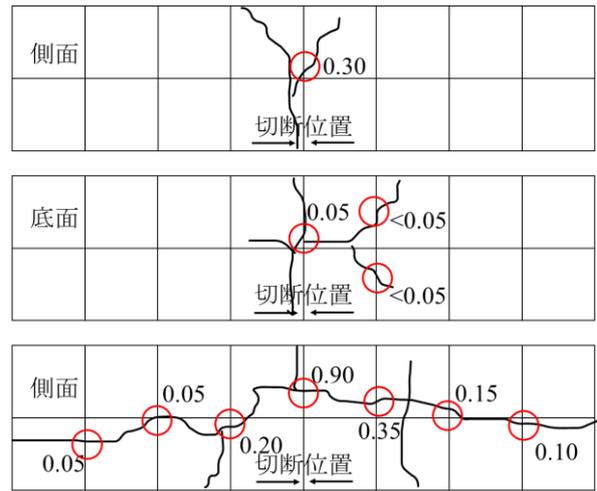
1 サイクル終了時のひび割れ発生状況を図-4 に示す。なお、図はひび割れ発生面のみ示した。ひび割れ幅がクラックスケールの測定精度以下では、「<0.05」と記載した。

実験終了後の供試体の外観において、Type1-a(シース径 40mm、鋼材無)と Type1-b(シース径 40mm、鋼材あり)および、Type2-a(シース径 30mm、鋼材無)でひび割れが確認できた。ひび割れが発生した 3 供試体については 1 サイクル終了時にひび割れが発生した。ひび割れは、Type1-a と Type1-b では打込み面(上面)を除く 3 面で発生し、Type2-a では底面に発生した。ひび割れが発生した供試体では、いずれの供試体にお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⁶⁾は鋼製シースが腐食した際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。

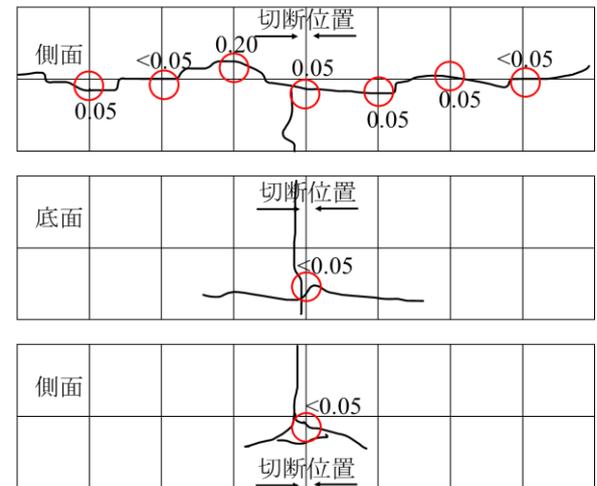
測定終了後の軸方向ひび割れに関して、平均ひび割れ幅および最大ひび割れ幅を表-3 に示す。なお平均ひび割れ幅は、50mm 毎にメッシュ線を引き、ひび割れとメッシュ線が交わる箇所のひび割れ幅を測定し、ひび割れ

表-3 軸方向ひび割れ幅

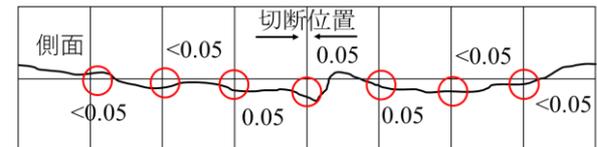
タイプ	平均ひび割れ幅 (mm)	最大ひび割れ幅 (mm)
Type1-a	0.26	0.90
Type1-b	0.06	0.20
Type2-a	0.02	0.05
Type2-b	0.00	0.00
Type3-a	0.00	0.00
Type3-b	0.00	0.00



(1) Type 1-a(シース径 40mm, 鋼材無)



(2) Type 1-b(シース径 40mm, 鋼材あり)



(3) Type 2-a(シース径 30mm, 鋼材無)

図-4 ひび割れ図(ひび割れ発生面のみ、
図中数字はひび割れ幅(図中単位: mm))

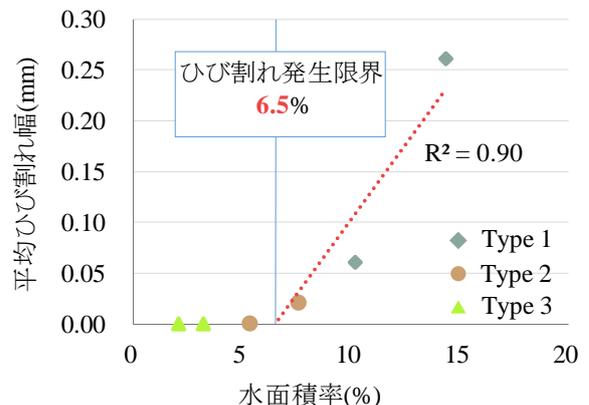


図-5 水面積率と平均ひび割れ幅の関係

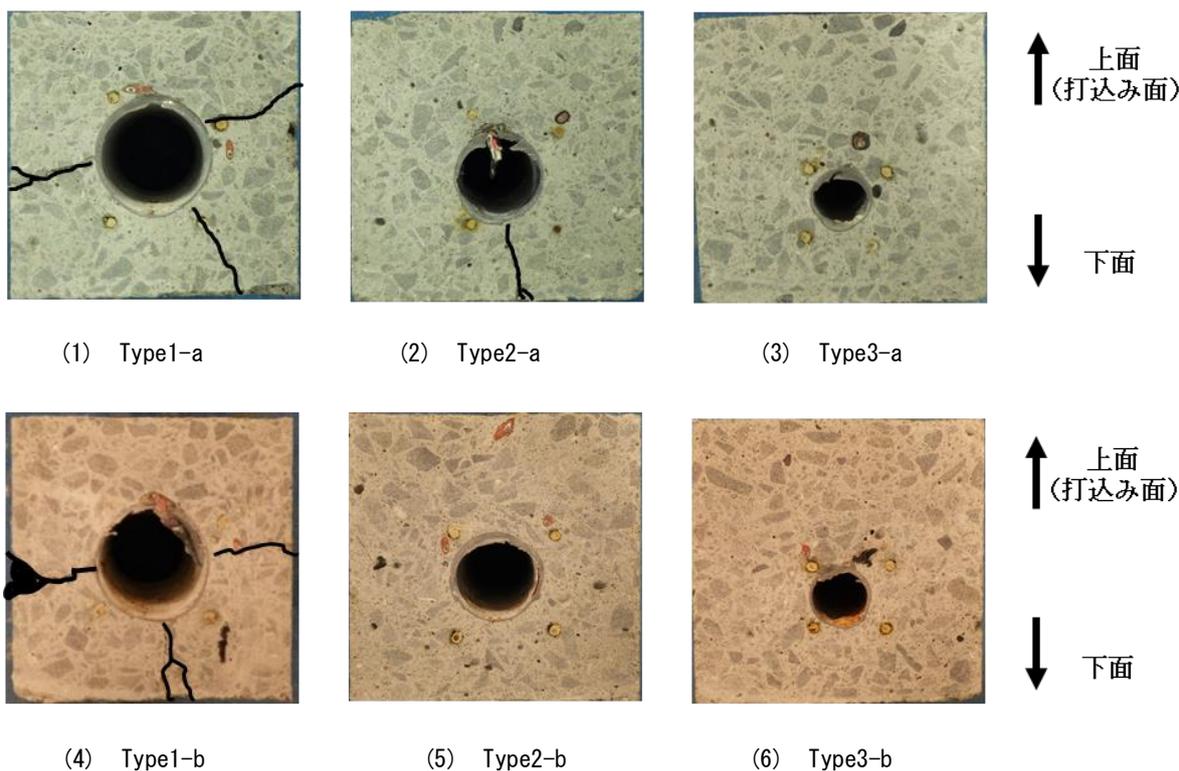


図-6 切断面(ひび割れは黒線で加筆)

幅の合計を測定箇所を除いたものとした。また、ひび割れ幅の測定箇所は図-4 中に丸で囲んだ。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ともに水面積率が大きいほど増加する傾向を示した。このことから、シース内の水量がひび割れ幅に影響を与えられ。水面積率と平均ひび割れ幅の関係を図-5 に示す。ひび割れが発生した供試体については平均ひび割れ幅と水面積率が比例関係を示した。また、Type2-a を含めひび割れが発生しなかった 4 体の水面積率とひび割れ幅の寄与率は 0.90 であった。この回帰直線の傾きと切片より求められるひび割れ発生限界の水面積率は約 6.5% であった。そのため実構造物においては断面の大きさとシース径が分かれば、滞留水の凍結によるひび割れ発生リスクが検討できると考えられる。また、シース内の滞留水の凍結により発生したと考えられる軸方向ひび割れの場合、断面の大きさが分かればひび割れ幅を測定することにより、おおよその空隙量が推定できる可能性がある。しかし、本実験はシースの最小かぶりがあり、実構造物ではシースかぶりが変化するため、かぶりの変化がこれらの結果に与える影響を検討する必要がある。

また、5 サイクル終了後も 1 サイクル目で発生したひび割れ幅には変化が見られなかった。そのため、滞留水

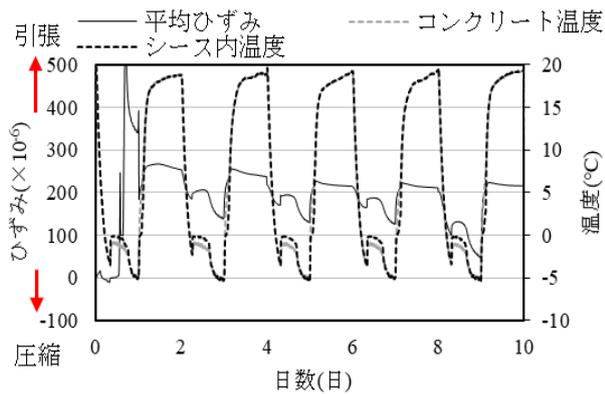
の凍結による軸方向ひび割れは一度の凍結で生じる可能性がある。

3.2 内部ひび割れ

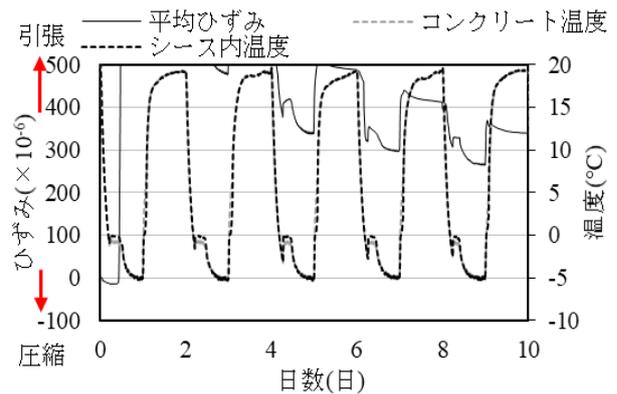
各供試体の端部から 200mm 位置における 5 サイクル終了時に切断した切断面の写真を図-6 に示す。なお、切断位置は図-4 中に示し、ひび割れは黒線で加筆した。断面内に発生したひび割れは Type1-a(シース径 40mm, 鋼棒無), Type1-b(シース径 40mm, 鋼棒あり), および Type2-a(シース径 30mm, 鋼棒無)で確認できた。これは図-4 で示した外観性状と同じ傾向であった。

シースのかぶりを C 、シース径を D とした場合、各タイプの C/D は Type1 が 0.75, Type2 が 1.00, Type3 が 1.50 である。本実験でひび割れが発生した供試体は $0.5 \leq C/D < 1.5$ の範囲であり、また、ひび割れが発生した供試体は、いずれもシースを中心とした放射状のひび割れが確認できた。 $C/D=1.5$ では供試体へのひび割れは確認できなかった。滞留水の凍結によるひび割れ性状と C/D の関係は、Browne⁷⁾が示す鉄筋腐食によるそれと類似した結果を示した。また、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⁸⁾。今回の結果も放射状のひび割れが生じたため、滞留水の凍結によるひび割れは膨張圧に起因している可能性があると考えられる。

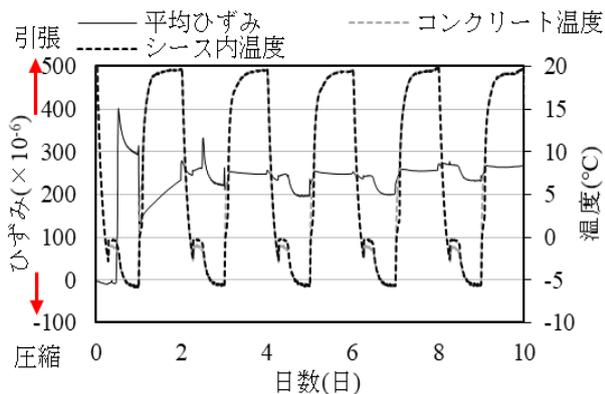
ひび割れ本数は Type1-a と Type1-b では 3 本であり、



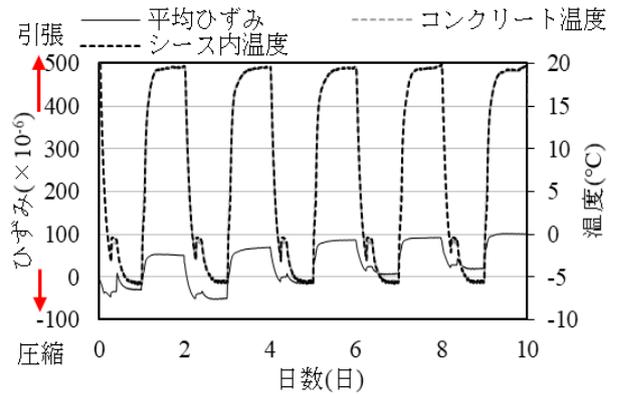
(1) Type1-a(シース径 40mm, 鋼材無)



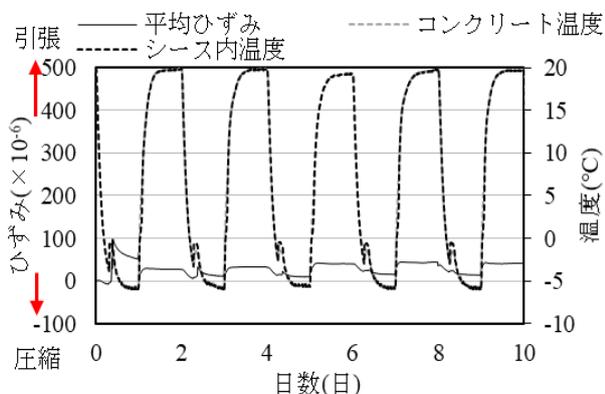
(2) Type1-b(シース径 40mm, 鋼材あり)



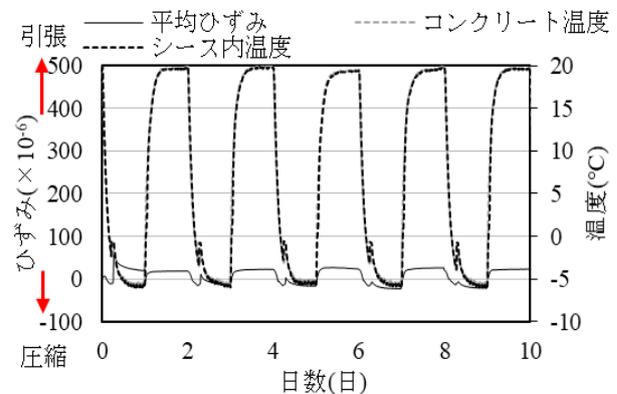
(3) Type2-a(シース径 30mm, 鋼材無)



(4) Type2-b(シース径 30mm, 鋼材あり)



(5) Type3-a(シース径 20mm, 鋼材無)



(6) Type3-b(シース径 20mm, 鋼材あり)

図-7 温度・ひずみ変化

Type2-a では 1 本であった。水面積率が大きいほどひび割れ本数が増える傾向を示した。このことより、シース内に滞留する水量が大きいほどひび割れが発生しやすいと考えられる。

3.3 温度・ひずみ変化

凍結融解実験 5 サイクルの温度とひずみ変化を図-7 に示す。温度はコンクリート温度とシース内の温度を示し、ひずみは 4 枚のひずみゲージの平均値とした。

全供試体を比較すると、水面積率が大きいほど凍結時に発生するひずみの絶対値が大きい傾向を示した。この

ことより、シース内に滞留する水量が大きいほどひずみ変化に与える影響が大きいことが考えられる。ひび割れが発生した Type1-a, Type1-b, および Type2-a では、1 サイクル目で一般的にひび割れが発生すると言われている 200×10^{-6} を超える引張ひずみが発生している⁹⁾。しかし 2 サイクル目以降、凍結時に発生する引張ひずみは 1 サイクル目より小さい。また、2 サイクル目以降のひずみ変化は 1 サイクル目のひずみ変化と異なる挙動を示している。これは 1 サイクル目でひび割れが生じたためと考えられる。

Type1-a, Type1-b, Type2-a の2サイクル目以降のひずみ変化と Type2-b, Type3-a, Type3-b の全サイクルのひずみ変化はほぼ同一の傾向を示した。それらのひずみ変化は温度変化と形状が似ていることが確認できる。温度が低下するとひずみは圧縮側へ、温度が上昇するとひずみは引張側へ推移している。温度変化は全供試体でほぼ同一の挙動を示したが、凍結時の潜熱発生期間の長さの違いが確認できる。潜熱の発生期間を表-4 に示す。ここで、潜熱の発生期間は、第1サイクル時の凍結時におけるシース内の温度上昇時から温度低下開始までの時間とした。水面積率が大きいほど潜熱の発生期間が長い。また、また、図-7 によると潜熱の発生期間においてコンクリート温度とシース内温度に僅かだが差が確認できる。潜熱発生期間以外ではコンクリート温度とシース内温度はほぼ一致しているが、潜熱発生期間ではコンクリート温度がシース内温度より低い。これはコンクリート表面が-5℃まで冷却されているが、シース近傍のコンクリートは潜熱の影響により 0℃を保つため、供試体内に温度勾配が生じていることが考えられる。この温度差より、潜熱の発生時、コンクリート表面は冷却により収縮するが、シース近傍のコンクリートは潜熱の影響により収縮しないため内部拘束となり、コンクリート表面に引張りひずみが生じることが考えられる。この現象と水の凍結膨張圧が複合的に作用しひび割れが発生した可能性がある。また、この温度差はコンクリート断面積に対する水面積率が大きい程大きくなる傾向がある。このため、水量が大きい程、潜熱の発生期間が長くなり、供試体内に発生する温度勾配の発生期間が長くなることが考えられる。

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。この寄与割合が変化すれば、図-5 で示したひび割れ発生限界水面積率が変化する可能性がある。そのため、コンクリート断面積とシース径を変化した供試体でさらなる検討を行う必要があると考えられる。

4. まとめ

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限界に与える影響を検討するため、角柱供試体内に径の異なるシースおよび鋼棒を配置し、シース内の空隙に水を充填した。その後、凍結融解実験を行った。得られた結果を以下に示す。

- (1) シース内の滞留水が凍結すると、一度の凍結で軸方向ひび割れが生じる可能性がある。
- (2) コンクリート断面積に対する水面積率が増加するほど、ひび割れ幅が増加する傾向を示した。この傾向は比例関係を示し、ひび割れ発生限界は約 6.5% となった。
- (3) コンクリート断面積に対する水面積率が増加する

表-4 潜熱発生期間（第1サイクル時）

タイプ	水面積率 (%)	潜熱発生期間 (h)
Type 1-a	12.6	10.0
Type 1-b	8.9	5.5
Type 2-a	7.1	3.8
Type 2-b	5.1	3.2
Type 3-a	3.1	2.3
Type 3-b	2.0	2.0

ほど供試体内部のひび割れ本数は増加した。

- (4) コンクリート断面積が大きくなると、膨張圧の他、温度勾配によるひび割れの可能性も示唆された。そのため、さらなる検討を必要とする結果を示した。

参考文献

- 1) 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
- 2) 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
- 3) 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 鋼材調査および補強指針，2016.9
- 4) 佐々木慎一，塚孝司：グラウト不良により劣化したPC 橋の調査と補修，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.18，pp.1089-1094，1996.6
- 5) 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，pp.785-786，2018.8
- 6) 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
- 7) Roger. D. Browne：Mechanisms of Corrosion of steel in Concrete in Relation to Design, Inspection, and Repair of Offshore and Coastal Structures, ACI SP65-11, (1965), pp.169-204.
- 8) 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
- 9) 土木学会：2017年制定コンクリート標準示方書〔設計編〕，2018.3