

# 寒冷地で温度勾配が生じたコンクリート構造物における劣化現象

鶴田 孝司\* 上原 元樹\* 松田 芳範\*\* 三浦 秀一朗\*\*

## Study on Cracks in Concrete Structures in Cold Climates with Temperature Gradient

Koji TSURUTA Motoki UEHARA Yoshinori MATSUDA Syuichiro MIURA

The investigation of the cores collected from the reinforced concrete structures with cracks on the lower surface and in the inner part of the structures in the cold climates showed that the collected concrete cores had low air content and low freeze/thaw resistance. The deterioration mechanism of the concrete in the freezing and thawing environment was examined with a rectangular parallelepiped specimen of concrete, in which the moisture was supplied to the upper surface and the rebars were inserted into the lower part. The results showed that the cracks were caused by a synergistic effect due to the expansion strain caused by the freeze-thaw action and the strain due to the temperature gradient of the upper and lower surfaces of the specimen.

キーワード：凍害，鉄筋コンクリート，水平ひび割れ，空気量，気泡間隔係数

### 1. はじめに

コンクリート構造物の劣化現象の1つである凍害は、寒冷地においてコンクリート中の含水率が一定以上の状態で外気温度や日射による凍結融解作用の繰り返しを受けることにより、コンクリート表面から次第に劣化する現象である。このため、凍害によりコンクリートには、一般的にポップアウトやスケーリングといった表層部の層状はく離が生じることが多いとされている。

しかしながら、寒冷地では、スケーリング等の表層部の劣化が顕著に表れていない場合でも、例えばスラブ下面にひび割れが生じている鉄筋コンクリート構造物から採取したコアを調べた結果、水平方向に卓越したひび割れ（以下、水平ひび割れ）がコンクリート内部に認められた（図1）。また、スラブの下面に貫通していると思われるひび割れと、エフロレッセンスが確認された（図2）。なお、このコアが採取された構造物では、アルカリシリカ反応等のコンクリート内部にひび割れが生じる他の劣化要因は確認されなかった。

本研究では、上記のような構造物における、一般的な凍害の変状とは異なる劣化のメカニズムや要因を明らかにし、その劣化対策を検討することを目的とする。このために、まず上記のひび割れが確認された箇所とその近傍にある鉄筋コンクリート構造物から採取されたコアの物理的性状を調べた。また、実構造物に生じているひび割れ状況の再現試験として、鉄筋コンクリート供試体による凍結融解試験を行った。本論文ではその結果を示す。

### 2. コンクリート構造物の空気量測定

#### 2.1 測定概要

本測定に用いたコンクリートコアを採取した構造物の詳細は、菅原ら<sup>1)</sup>や三浦ら<sup>2)</sup>により既に報告されている。

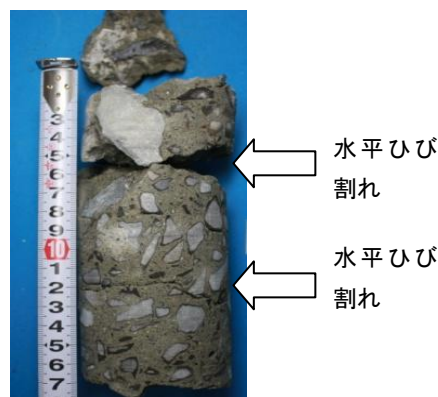


図1 水平ひび割れが確認されたコア

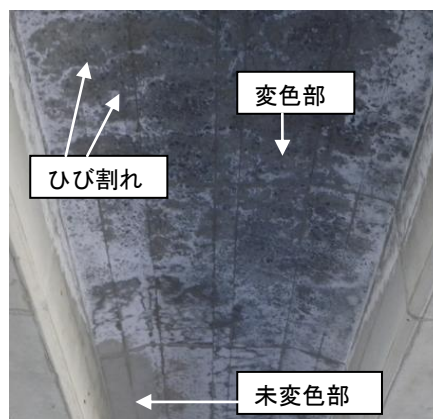


図2 スラブ下面にひび割れおよび変色が確認された構造物

\* 材料技術研究部 コンクリート材料研究室

\*\* 東日本旅客鉄道株式会社

表1 気泡間隔係数および空気量測定結果

供用開始年数	橋りょう名	種別	対象部位	区分	気泡全数 (個)	空気泡トラバース全長 (mm)	ペースト空気比	空気量 (%)	気泡間隔係数 (μm)
1982	A	RCT 桁	スラブ	未変色	340	99.4	6.265	3.8	374
		防音壁	防音壁	未変色	314	57.6	10.811	2.2	300
	B	RCT 桁	スラブ	未変色	597	157.3	3.917	6.1	258
		RCT 桁	スラブ	未変色	574	136.9	4.505	5.3	263
	C	RCT 桁	スラブ	変色	82	19.9	31.619	0.7	650
		PC 桁中埋め	スラブ	未変色	398	82.6	7.475	3.2	289
	D	防音壁	防音壁	未変色	269	52.1	11.848	2.0	331
		PC 桁中埋め	スラブ	変色	407	73.6	8.461	2.8	266
	E	防音壁	防音壁	未変色	459	87.3	7.052	3.4	258
		RCT 桁	スラブ	未変色	337	99.5	6.203	3.8	377
	F	RCT 桁	スラブ	未変色	371	72.3	8.613	2.8	287
		RCT 桁	スラブ	変色	112	45.3	13.619	1.7	735
	G	RCT 桁	スラブ	未変色	188	44.6	13.857	1.7	434
		RCT 桁	スラブ	変色	252	61.3	10.041	2.4	386
		防音壁	防音壁	未変色	145	23.6	26.040	0.9	391
		防音壁	防音壁	変色	154	27.7	22.355	1.1	405
	H	ラーメン高架橋	スラブ	未変色	186	77.4	7.979	3.0	596
		ラーメン高架橋	スラブ	変色	155	52.5	11.731	2.0	576
		防音壁	防音壁 (上部)	未変色	158	44.3	13.939	1.7	515
		防音壁	防音壁 (上部)	変色	87	40.6	15.190	1.6	890
防音壁		防音壁 (下部)	未変色	152	37.3	16.571	1.4	486	
I	防音壁	防音壁 (下部)	変色	95	31.4	19.584	1.2	703	
	ラーメン高架橋	スラブ	未変色	290	57.3	10.868	2.2	325	
2002	J	防音壁	防音壁	未変色	371	68.3	9.118	2.6	280
		ラーメン高架橋	スラブ	未変色	196	49.3	12.538	1.9	441
	K	防音壁	防音壁	未変色	255	58.3	10.579	2.2	372
		PC 箱桁	スラブ	未変色	430	97.7	6.302	3.8	292
	L	防音壁	防音壁	変色	77	21.0	29.255	0.8	688
		ラーメン高架橋	スラブ	未変色	205	51.3	12.139	2.0	428
		防音壁	防音壁	未変色	219	99.4	6.265	1.3	311

ここでは採取されたコンクリートコアの気泡間隔係数および空気量の測定手法およびその結果について述べる。コアを採取した構造物は、図2に示すような、ひび割れや変色が確認された箇所（以下、変色部）と、その近傍のひび割れや変色がない箇所（以下、未変色部）があり、12箇所から30本のコアを用いた。なお、これらの構造物が建設された当時のレディミクストコンクリートにおける空気量の規定値は、いずれも現在のJIS A 5308「レディミクストコンクリート」における普通コンクリートの規定値（4.5% ± 1.5%）とほぼ同等であった。

測定は、硬化コンクリートの気泡間隔係数および空気量の2項目について行った。これらの測定に用いた試料は、各コンクリートコアの表面からおよそ5cm程度の深さより内側にあたる部分とし、厚さ約25mmの試料を各2体作製し、計4面にて測定を行った。測定は、ASTM C457-98「顕微鏡による硬化コンクリートの気泡システムによるパラメータと空気量の測定方法」によるリニアトラバース法に準拠した。線トラバース長（今回の試験では2601.8mm）を横切る気泡個数および気泡径をカウントし、気泡間隔係数および空気量を、式(1)～(4)に示すリニアトラバース法による計算式（ASTM C457-98 準拠）で算出した。

$$\begin{aligned} \text{空気量 (\%)} : A \\ A = T_a \times 100 / T_t \quad (1) \\ \text{比表面積 (mm}^2\text{/mm}^3) : a \end{aligned}$$

$$a = 4N / T_a \quad (2)$$

気泡間隔係数 (μm) :  $\bar{L}$   
ペースト空気比  $p/A$  が 4.342 未満の場合

$$\bar{L} = T_p / 4N \quad (3)$$

ペースト空気比が 4.342 以上の場合

$$\bar{L} = \frac{3}{a} \left[ 1.4 \left( 1 + \frac{p}{A} \right)^{1/3} - 1 \right] \quad (4)$$

$T_a$  : 空気泡トラバース全長 (mm)  
 $T_t$  : トラバース全長 (mm)  
 $N$  : 全トラバースにより横切られる気泡の全数 (個)  
 $T_p$  : ペーストの合計トラバース長 (mm)  
 $p$  : ペースト量 (%)

ただし、試料の配合が不明であったため、土木学会編 昭和49年制定コンクリート標準示方書解説（昭和52年版）を参考として、水セメント比(W/C)=60%（単位水量  $W=155\text{kg/m}^3$ ，単位セメント量  $C=259\text{kg/m}^3$ ），ペースト量は23.7%として暫定的に算出した。

## 2.2 測定結果および考察

コンクリートコアの気泡間隔係数および空気量の測定結果を表1に、気泡間隔係数と空気量の関係を図3に示す。今回調査したコンクリートコアの範囲内では、気泡間隔係数はいずれも250μmを上回っていた。気泡間隔係数の目安として、250μm以下であれば耐凍害性があ

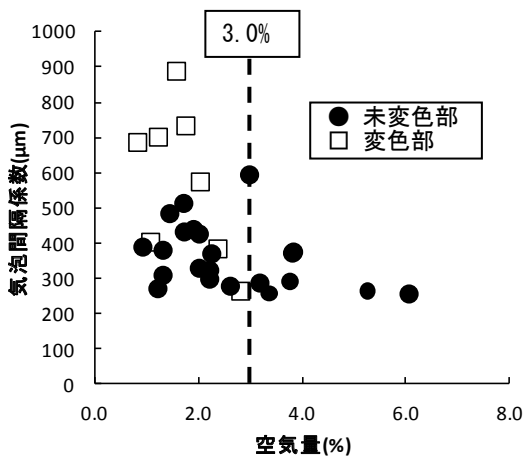


図3 空気量と気泡間隔係数の関係

るとされる<sup>3)</sup>ことから、今回調査したコアはいずれも耐凍害性が高いとはいえないことがわかった。また未変色部と変色部との違いについては、変色部に気泡間隔係数が大きいものがより多く含まれることがわかった。

また空気量については、JIS A 5308における普通コンクリートの規定値の下限である3.0%を下回っているコアが全体の4分の3程度確認され、最も小さい空気量では、0.7%のものも確認された。また、変色部の空気量が比較的小さい傾向にあるが、未変色部にも空気量の小さいものが多く含まれていることがわかった。

このことから、今回調査した範囲内における鉄筋コンクリート構造物の耐凍害性は高いとはいえず、空気量についてもJIS A 5308における普通コンクリートの規定値の下限を下回っているものが数多く確認された。また、表面が変色をしていなくても、必ずしもコンクリートの空気量が大きいわけではなく、耐凍害性が高いとはいえないことがわかった。

なお本試験により測定された空気量と練混ぜ時の空気量との関係については、練混ぜ時の空気量が不明なため比較はできない。しかし、レディミクストコンクリートにおけるフレッシュコンクリートの空気量と硬化コンクリートの空気量を比較した既往の研究では、練り混ぜ時の空気量と硬化コンクリートの空気量とは一致せず、硬化後では3%程度空気量が低下したのも確認されてい

表2 供試体の配合

W/C (%)	S/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				Ad (Cx%)
		W	C	S	G	
55	45	177	321	779	978	0.008
	47			857	991	0
65	47		272	833	965	0.007
	49			913	975	0

※ S/a…細骨材率 S…単位細骨材量  
G…単位粗骨材量 Ad…混和剤量

る<sup>4)</sup>。このことから、本試験における硬化コンクリートの空気量は、練り混ぜ時の空気量が規格の範囲内に収まっていたとしても起こり得ると推定される。

### 3. 鉄筋コンクリート供試体による凍結融解試験

#### 3.1 試験概要

前章の結果から、当該箇所は空気量の低いコンクリートが打設されており、耐凍害性の低いコンクリートとなっていることが確認された。ここで本調査箇所のうち、特にスケーリング等の表層部の劣化が顕著ではないにも関わらず、膨張によるものと考えられるスラブ下面のひび割れは、極端に寒冷ではなく、冬季に0℃をはさんで気温が上下する地域に多く確認された。このような地域で冬季にコンクリート構造物の上面に積雪がある場合、夜間には積雪による影響で上面が0℃付近になるのに対して、下面は外気温近い氷点下になることが想定される。また昼間は、上面が0℃近傍なのに対して、下面は0℃

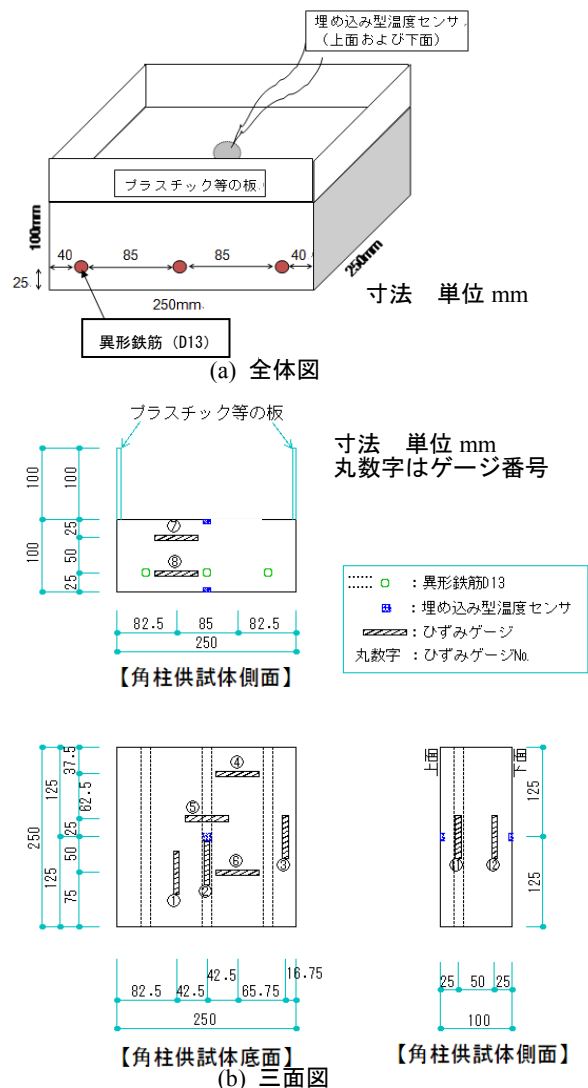


図4 作製供試体の概要

特集：材料技術

以上に上昇すると考えられる。これらの状態が繰り返されることにより、コンクリート内部にひずみが蓄積し、ひび割れが生じる可能性を想定し、試験を行った。

3.2 試験内容

本試験にて作製した供試体の配合を表2に、形状や各センサーの配置を図4に示す。供試体に用いたコンクリートの水セメント比は55%と65%の2種類、目標空気量は5.0%と1.5%の2種類とした。供試体に用いたセメントは普通ポルトランドセメントであり、細骨材は陸砂、粗骨材は砕石を用いた。また供試体は、打設後直ちにラップで包んだ封緘養生と、打設後温度20℃、相対湿度60%の環境下に静置した気中養生の2種類とした。なお、空気量及び気泡間隔係数は、この状態で材齢28日まで静置した供試体について測定した。供試体には鉄筋による拘束を模擬するため、下面に近い箇所に3本の異型鉄筋(D13)を配筋している。また、上下面の温度履歴を測定するために、上下面のそれぞれ中央付近に埋め込み型温度センサーを設置した。さらに、供試体のひずみ量を測定するために、側面に4箇所(上側2箇所、下側2箇所)および下面に6箇所のひずみゲージをそれぞれ貼り付けた。

作製した供試体について、上面に積雪し、それが融解することの繰り返しをイメージし、上面からの一面に水分を供給(ASTM C 672「凍結防止剤の影響を受けるコンクリート表面のスケーリング抵抗性に関する標準試験方法」と同様の水分供給方法)した状態で、凍結融解試験を実施した。凍結融解のサイクルは、当初JIS A 1148「コンクリートの凍結融解試験方法」のサイクルに準じて、試験槽内温度および温度保持時間を、+10℃(80min.)と-20℃(120min.)の繰り返しで行っていたが、上面に供給した水分が凍結したまま融解しなかった。このため、試験槽内温度および温度保持時間の調整を行い、最終的に+10℃(260min.)と-20℃(240min.)の繰り返しとして、上面の水

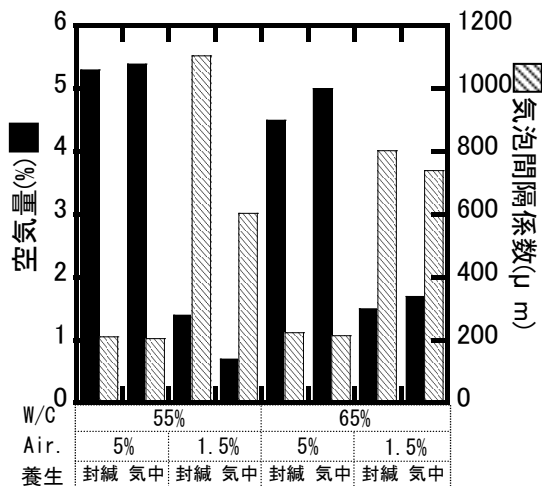


図5 コンクリートの空気量および気泡間隔係数 (Air…目標空気量)



(1) 空気量 1.5%側面 (W/C=55%, 封緘養生)



(2) 空気量 1.5%隅角部 (W/C=55%, 気中養生)



(3) 空気量 1.5%下面 (W/C=55%, 封緘養生)



(4) 空気量 1.5%上面 (W/C=55%, 気中養生)



(5) 空気量 5%上面 (W/C=55%, 気中養生)

図6 300 サイクル終了後の供試体の外観

分が凍結と融解を繰り返すようにした。凍結融解試験は、上記の最終的な繰返しサイクルを300サイクル実施した。

### 3.3 試験結果および考察

#### 3.3.1 コンクリートの空気量および気泡間隔係数

作製したコンクリートの空気量および気泡間隔係数を図5に示す。空気量については、目標空気量5%に対して4.5～5.4%、目標空気量1.5%に対して0.7～1.7%であった。また気泡間隔係数は、目標空気量5%で205～224 $\mu\text{m}$ 、目標空気量1.5%で604～1106 $\mu\text{m}$ となり、目標空気量5%の気泡間隔係数は、前述の耐凍害性の目安である250 $\mu\text{m}$ 以下を満足した。また封緘養生と気中養生で、空気量および気泡間隔係数に大きな差は確認されなかった。

#### 3.3.2 供試体の外観

300サイクル終了後の供試体の外観を図6に示す。空気量1.5%の供試体と、空気量5%の供試体では、外観に顕著な違いが確認された。

空気量1.5%では、水セメント比や養生方法に関わらず、側面に水平ひび割れおよびエフロッセンスが確認され(図6(1))、一部の供試体には隅角部の欠損も確認された(図6(2))。また下面にも鉄筋方向のひび割れおよびエフロッセンスが確認された(図6(3))。上面にはスケーリングによる表層部の層状はく離が確認されたが、上面の一部から半分程度の面積において、ごく表層がはく離した程度であった(図6(4))。

これらのことから、空気量が小さいコンクリートでは、表層部にスケーリングが顕著に表れていない場合でも、コンクリート内部に水平ひび割れが生じ、下面にも鉄筋方向にひび割れが生じることがわかった。

一方、空気量5%では、上面の一部にスケーリングによる表層部の層状はく離が確認されたが(図6(5))、ひび割れは側面、下面ともに確認されなかった。

300サイクル終了後に、供試体上面に生じたスケーリング量の比較を図7に示す。スケーリング量の測定は、供試

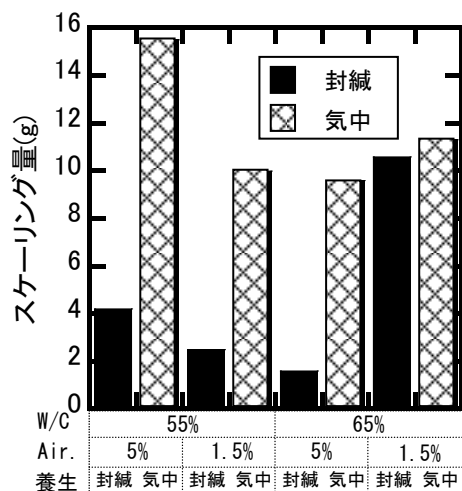


図7 供試体上面に生じたスケーリングの量

体上面に生じたスケーリング片をかき取って収集し、その重量により測定した。スケーリング量は、空気量や水セメント比にはよらず、気中養生の方が封緘養生より多い傾向があることがわかった。このことから、スケーリングの程度は、温度勾配により生じるひび割れとは異なり、養生条件による表面の緻密さが関与していることがわかった。

#### 3.3.3 供試体の上下面の温度履歴

供試体の上面と下面の温度履歴を図8に示す。試験条件が安定してからの供試体の温度は上面が0 $^{\circ}\text{C}$ ～7 $^{\circ}\text{C}$ 、下面が-9 $^{\circ}\text{C}$ ～7 $^{\circ}\text{C}$ であり、特に凍結時において上面と下面に9 $^{\circ}\text{C}$ 程度の温度差が生じることがわかった。

#### 3.3.4 供試体のひずみ量

供試体のひずみ量の履歴の一例を図9に示す。供試体のひずみが増加する箇所として、一番初めに、水分が供給されている上面に近い側面上側(図4のゲージ番号11)のひずみ量が増加する。その後、側面下側(図4のゲージ番号12)のひずみ量が增大し、最後に水分供給面から最も遠い下面(図4のゲージ番号4)のひずみ量が增大することがわかった。

ひずみ量の最大値は、側面上側が最も大きく、次に側面下側であり、下面が最も小さかった。さらに、ひずみ量の振幅が急激に増大した時期は、側面上側、側面下側が比較的早期であるのに対して、下面は250サイクルを超える付近から振幅が増大していることがわかった。

また、供試体間でのひずみ量の比較の例として、図10に供試体側面のひずみ量の最大値を示す。空気量1.5%はいずれも空気量5%に比べて大きなひずみ量を示している。また、ひずみ量の振幅についても空気量5%の供試体は1.5%に比べて小さかった。

本試験において、空気量の少ない供試体にてスケーリング等が極端に進行しない状況で、コンクリート内部および下部にひび割れが生じる原因を以下に推察する。

本試験では水分に接している上面と直接外気に触れる下面で温度勾配が生じるため、コンクリート内部にひずみが生じ、コンクリート内部に微細なひび割れが生じる。

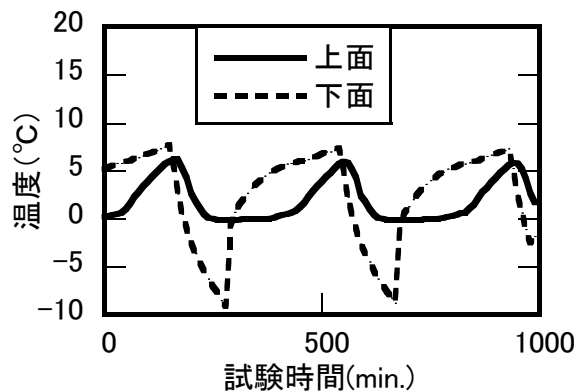
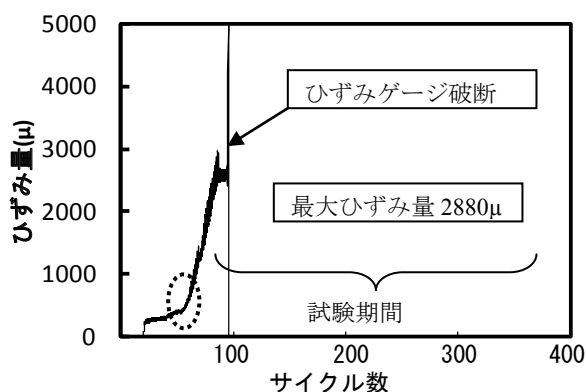
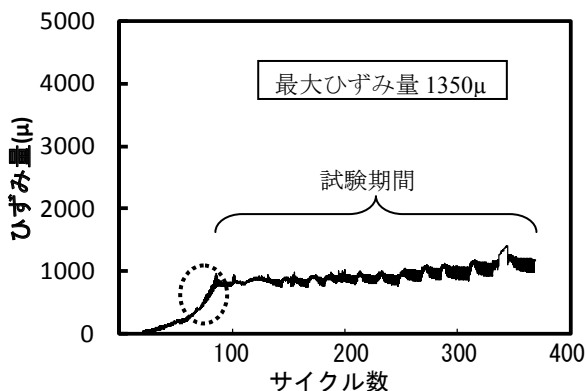


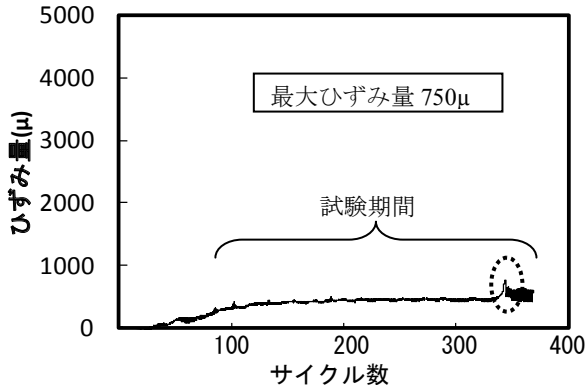
図8 作製供試体の温度履歴 (W/C=55%, Air.=5%, 封緘養生)



(1) 側面上側のひずみ量(ゲージ番号 11)



(2) 側面下側のひずみ量(ゲージ番号 12)



(3) 下面のひずみ量(ゲージ番号 4)

図9 供試体のひずみ量履歴の一例

(W/C=55%, Air.=1.5%, 封緘養生)

(点線囲みは振幅が急激に増大した時期)

このひび割れに水分が浸透すると、空気量の少ないコンクリートでは凍結融解作用による膨張ひずみが生じ、スケーリングが進展する前にコンクリート内部のひび割れが進展する。また、コンクリート下部のひび割れは、コンクリート内部のひび割れに比べて遅い時期に生じている。しかしながら、ひび割れの進展と内部ひずみの蓄積、鉄筋の拘束効果との関係については不明な点が多いため、その詳細については今後検討する必要がある。

一方、空気量が多い供試体については、エントレインドエアの効果により凍結融解作用による膨張圧が抑制さ

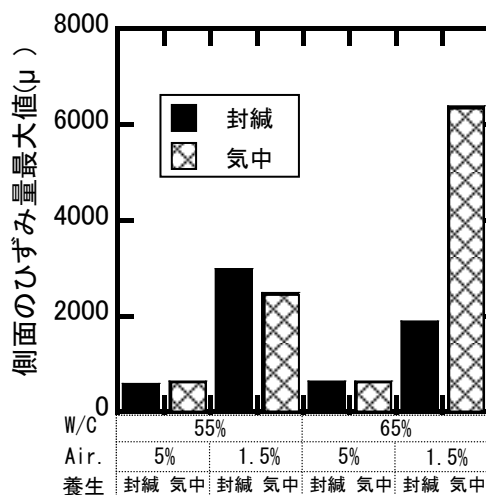


図10 供試体側面のひずみ量最大値

れるため、ひび割れが生じにくくなると考えられる。

#### 4. まとめ

- (1) 寒冷地においてコンクリート内部に水平ひび割れが生じていた鉄筋コンクリート構造物から採取されたコンクリートコアを分析した結果、コンクリートの気泡間隔係数が  $250\mu\text{m}$  より大きく、空気量が 3.0% 以下のものが多く確認された。
- (2) 一面から水分を供給した鉄筋コンクリート供試体による凍結融解試験の結果、空気量が 1.5% 程度の供試体では、構造物に生じていた水平ひび割れと同様のひび割れが確認され、下面にもひび割れが確認された。なお、スケーリングの程度は、寒暖の繰返しにより生じるひび割れとは異なり、養生条件による表面の緻密さが関与していることがわかった。
- (3) 空気量の少ない供試体にて、スケーリング等が極端に進行しない状況でコンクリート内部に生じるひび割れは、上下面の温度勾配によるひずみと凍結融解作用による膨張ひずみとの相乗効果によるものと推察される。

#### 文献

- 1) 菅原寛文, 廣田元嗣: 寒冷地における高架橋の劣化に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.2, pp.1219-1224, 2017
- 2) 三浦秀一朗, 高山充直: コンクリート鉄道構造物の凍害とその影響因子, セメント・コンクリート, No.850, pp.40-46, 2017.12
- 3) 長谷川寿夫ほか: コンクリート構造物の耐久性シリーズ・凍害, 技報堂出版, 1988
- 4) 袴田 豊: コンクリートの耐凍害性に及ぼす骨材の影響に関する研究, 岩手大学博士論文, 2008