論文 寒冷地で温度勾配が生じた構造物におけるひび割れに関する検討

鶴田 孝司^{*1}·上原 元樹^{*2}·松田 芳範^{*3}·三浦秀一朗^{*4}

要旨:寒冷地においてコンクリート下部に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 アを調べた結果,空気量が低く,耐凍害性の低いコンクリートであることが確認された。また,上面に水分 を供給し,下面を鉄筋で拘束したコンクリート供試体による凍結融解試験を行った結果,凍結融解作用によ る膨張ひずみと供試体上下面の温度勾配によるひずみの相乗効果により,スケーリングが進行する前にコン クリート内部および下部に水平ひび割れが生じることが確認された。またこのひび割れは,コンクリートの 空気量が小さい供試体のみに生じることがわかった。

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,膨張に起因し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生じ る劣化現象としては,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、寒冷地において、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、構造物の上下面に水平 なコンクリート内部のひび割れ(以下,水平ひび割れ) が確認されたものがあった(図—1)。また、構造物の下 面に貫通していると思われるひび割れと、水分が供給さ れたと考えられる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。

上記のような構造物の,一般的な凍害の変状とは異な る劣化に対して,そのメカニズムや要因を明らかにし, 将来的にはその劣化対策を検討するために,本論文では, 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。

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¹⁾や三浦ら²⁾により既に報告されている ため、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、



図-1 水平ひび割れが確認されたコア



図-2 下面にひび割れおよ びエフロが確認された構造物

*1 (公財)鉄道総合技術研究所 材料技術研究部 コンクリート材料 理修(正会員)
*2 (公財)鉄道総合技術研究所 材料技術研究部 コンクリート材料室長 工博(正会員)
*3 東日本旅客鉄道株式会社 構造技術センター マイスター 工博(正会員)
*4 東日本旅客鉄道株式会社 構造技術センター 工修(正会員)

供用 開始 年数	橋り よう 名	種別	対象 部位	区分	トラバ ース全 長(mm)	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	А	RCT 桁	スラブ	健全	2601.8	340	99.4	6.265	3.8	374
		防音壁	防音壁	健全	2601.8	314	57.6	10.811	2.2	300
	В	RCT 桁	スラブ	健全	2601.8	597	157.3	3.917	6.1	258
		RCT 桁	スラブ	健全	2601.8	574	136.9	4.505	5.3	263
		RCT 桁	スラブ	劣化	2601.8	82	19.9	31.619	0.7	650
	С	PC 桁中埋め	スラブ	健全	2601.8	398	82.6	7.475	3.2	289
		防音壁	防音壁	健全	2601.8	269	52.1	11.848	2.0	331
	D	PC 桁中埋め	スラブ	劣化	2601.8	407	73.6	8.461	2.8	266
		防音壁	防音壁	健全	2601.8	459	87.3	7.052	3.4	258
	Е	RCT 桁	スラブ	健全	2601.8	337	99.5	6.203	3.8	377
	F	RCT 桁	スラブ	健全	2601.8	371	72.3	8.613	2.8	287
		RCT 桁	スラブ	劣化	2601.8	112	45.3	13.619	1.7	735
	G	RCT 桁	スラブ	健全	2601.8	188	44.6	13.857	1.7	434
		RCT 桁	スラブ	劣化	2601.8	252	61.3	10.041	2.4	386
		防音壁	防音壁	健全	2601.8	145	23.6	26.040	0.9	391
		防音壁	防音壁	劣化	2601.8	154	27.7	22.355	1.1	405
	Н	ラーメン高架橋	スラブ	健全	2601.8	186	77.4	7.979	3.0	596
		ラーメン高架橋	スラブ	劣化	2601.8	155	52.5	11.731	2.0	576
		防音壁	防音壁(上部)	健全	2601.8	158	44.3	13.939	1.7	515
		防音壁	防音壁(上部)	劣化	2601.8	87	40.6	15.190	1.6	890
		防音壁	防音壁(下部)	健全	2601.8	152	37.3	16.571	1.4	486
		防音壁	防音壁(下部)	劣化	2601.8	95	31.4	19.584	1.2	703
	Ι	ラーメン高架橋	スラブ	健全	2601.8	290	57.3	10.868	2.2	325
		防音壁	防音壁	健全	2601.8	371	68.3	9.118	2.6	280
2002	J	ラーメン高架橋	スラブ	健全	2601.8	196	49.3	12.538	1.9	441
		防音壁	防音壁	健全	2601.8	255	58.3	10.579	2.2	372
	К	PC 箱桁	スラブ	健全	2601.8	430	97.7	6.302	3.8	292
		防音壁	防音壁	劣化	2601.8	77	21.0	29.255	0.8	688
	L	ラーメン高架橋	スラブ	健全	2601.8	205	51.3	12.139	2.0	428
		防音靡	防妾庭	健全	2601.8	219	99.4	6 265	13	311

表—1 気泡間隔係数および空気量測定結果

ひび割れが確認された(以下,劣化部)箇所と,その近 傍のひび割れがない箇所(以下,健全部)であり,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JISA5308「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を用い、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、下記に示すリニア トラバース法による計算式により算出した。

空気量(%):
$$\overline{A}$$

 $A = T_a \times 100 / T_t$ (1)
比表面積(mm²/mm³): a
 $a = 4N / T_a$ (2)
気泡間隔係数(μ m): \overline{L}
ペースト空気比が 4.342 未満の場合

$$\overline{L} = T_p / 4N \tag{3}$$

ペースト空気比が 4.342 以上の場合

$$\overline{L} = \frac{3}{a} \left[1.4 \left(1 + \frac{p}{A} \right)^{1/3} - 1 \right]$$
(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, W/C=60%(W=155kg/m³, C=259kg/m³), 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 るとされる³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。また健全部 と劣化部との違いについては、劣化部に気泡間隔係数が



大きいものが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程度確認された。最も小さい空気 量では,0.8%のものも確認された。また,健全部と劣化 部の違いについては,劣化部の空気量が比較的小さい傾 向にあるものの,健全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ことがわ かった。また、表面の状態が健全であっても、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 リートの空気量と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ものも確認されて いる⁴⁾。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ものと推定される。

表—2 供試体の配合

W/C	S/a		Ad				
(%)	(%)	W	С	S	G	(Cx%)	
55	45		321	779	978	0.008	
55	47	177		857	991	0	
05	47	177	272	833	965	0.007	
CO	49			913	975	0	



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

以上の結果から、当該箇所において空気量の低いコン 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 で、特にスケーリング等の表層部の劣化が顕著ではない ものの膨張に起因したと考えられる構造物下面のひび割 れが多く生じていた箇所では、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 に積雪が生じた場合、夜間ではコンクリート上面が積雪 による影響で 0℃付近になるのに対して、下面では外気 温近い氷点下になることが想定される。また昼間では、 上面が 0℃近傍なのに対して、下面は 0℃以上に上昇する ものと考えられる。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、実構造物に ひび割れが生じる可能性を考え、以下の試験を行った。

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。また打設した供試体は、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。

上記で作製した供試体について、構造物の上面に積雪 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.)の繰返しにす ることにより、上面の水分が凍結と融解を繰り返すよう になった。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



作製したコンクリートの空気量および気泡間隔係数を

(1) コンクリートの空気量および気泡間隔係数



(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



図—5 に示す。空気量はほぼ目標通りの値を示し,目標 空気量 5%で 4.5~5.4%,目標空気量 1.5%で 0.7~1.7%で あった。また気泡間隔係数は,空気量と反比例の傾向で あり,目標空気量 5%で 205~224µm,目標空気量 1.5% で 604~1106µm であり,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 250µm 以下を満足した。 また封緘養生と気中養生とでは,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。

(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。水 セメント比や養生条件の違いによらず,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が確認され、一部の供 試体には隅角部の欠損も確認された。また、下面にも鉄 筋方向のひび割れおよびエフロが確認された。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、 その程度は顕著ではなく、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。

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、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, 供試体上面に生じたスケーリング片をかき集め,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相関がな く、表面の性状が関与していることがわかった。

(3) 供試体の上下面の温度履歴

作製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℃ ~7℃、下面が-9℃~7℃であり、特に凍結条件下において 上面と下面に 9℃程度の温度差が生じることがわかった。

(4) 供試体のひずみ量

作製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)のひずみ量が増大し,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 み量が増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、下面が最も小さくなることがわかった。 さらに、ひずみ量の振幅が増大し始めた、すなわちひび 割れが生じ始めたと推定される時期についても、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 サイクルを超えたあたりで初めて振幅が増大しているこ とがわかった。

また、ひずみ量の供試体間での比較の例として、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。

空気量の少ないコンクリートでは吸水による凍結融解 作用により,空気量の多いコンクリートと比較して膨張 ひずみが生じやすい。また,本試験では水分が供給され る供試体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る。これらひ





ずみの相乗効果と、供試体下面に配置された鉄筋による 拘束により、内部ひずみの蓄積が早まることから、スケ ーリングが進展する前にコンクリート内部および下部に ひび割れが生じたものと推察される。しかしながら、ス ケーリングの進展と内部ひずみの蓄積との関係について 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,空気量が高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



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 250µm 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) 鉄筋コンクリート供試体による一面から水分を供給 した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 れとは相関がなく,表面の性状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に生じるひび割れは、 凍結融解作用による膨張ひずみと上下面の温度勾配によ るひずみとの相乗効果によりものと推測される。

参考文献

- 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
- 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
- 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