報告　東北地区の高架橋における凍害の実態と耐凍害性に関する分析

三浦　秀一朗[*1]・築嶋　大輔[*1]・廣田　元嗣[*1]・菅原　寛文[*2]

要旨：コンクリート構造物の耐久性を損なう劣化のひとつに凍害があり，JR 東日本においても，東北地区で多くの発生報告がある。凍害による変状は，旅客公衆等への被害や部材の断面欠損の進行度合いによっては構造物の性能低下につながるため，効果的な補修と予防対策が維持管理上の課題となっている。建設時に AE コンクリートを使用した構造物でも凍害が生じている現状から，実構造物からコアを採取し，気泡の連行状況や耐久性に関する分析を行った。結果，全体的に空気量は少なく気泡間隔係数は大きい傾向を確認した。また，変状の有無に関わらず，耐久性指数と空気量に相関は見られない結果となった。

キーワード：凍害，空気量，気泡間隔係数，耐久性指数

1. はじめに

コンクリート構造物の耐久性を損なう劣化のひとつに凍害がある。JR 東日本においても，東北地区において多くの発生報告がある。凍害には，表層部の層状剥離（スケーリング）やポップアウトといった変状があり，これらの変状は，コンクリート片の剥落による旅客公衆等への被害や部材の断面欠損の進行度合いによっては構造物の性能低下につながるため，効果的な補修と予防対策が維持管理上の課題となっている。

コンクリートの耐凍害性を向上させるためには，毛細管空隙中における自由水の凍結膨張圧を緩和する対策が有効となるため，現在では，AE 剤や AE 減水剤の使用によりコンクリート中に独立した多数の微細な空気泡（エントレインドエア）を一様に分布させた AE コンクリートの使用が一般的となっている。AE 剤は 1947 年頃に米国から紹介され，鉄道では，1950 年に初めて国鉄信濃川発電所のダム堤体で使用された記録が残っている [2)]。このように，以前からコンクリートの耐凍害性の向上については，AE コンクリートの使用等によって図られてきているが，寒冷地等のコンクリート構造物では凍害の発生を制御できていないのが現状である。そこで，硬化コンクリート中の空気の状況と劣化発生の関係を明らかにするため，複数の実構造物から採取したコア試料による気泡の連行状況や耐久性に関する実態調査をおこなった。

本稿では，コンクリート鉄道構造物における凍害の実態と調査から得られた知見について報告する。

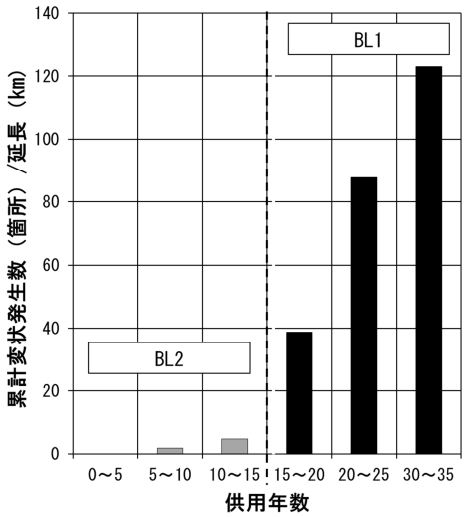
2. 東北地区の高架橋における凍害の実態

2.1 凍害発生状況の推移

東北地区の新幹線高架橋（以下，高架橋）に対して供用開始から実施している定期検査の記録から，凍害と思われる変状に着目して整理した結果を**図－1** に示す。図の縦軸は，橋りょう 1 km当たりに発生している変状箇所数を示しており，横軸は構造物の供用年数を示している。図中の BL1，BL2 の区分を**表－1** に示す。なお，1982 年から供用開始している BL1 に関する調査記録は，調査記録がデータベース化された供用開始から 15 年以降の変状数を示している。**図－1** は，凍害と思われる変状の発生が年々増加傾向にあることを示している。凍害は，コンクリート中の水分の凍結融解作用の繰返しによって生じるため経年により劣化が増加するものと考えられるが，比較的新しい 2002 年以降に供用を開始している BL2 でも，供用開始 6 年頃から凍害と思われる変状が生じ始めている。構造物には全て AE コンクリートが使用されて

表－1　BL1 と BL2 の区分

区分	供用開始年度	駅間	調査延長
BL1	1982年	上野～盛岡	330km（那須塩原～盛岡）
BL2	2002年	盛岡～八戸	90km



図－1　凍害による劣化損傷の推移

*1 東日本旅客鉄道（株）　構造技術センター　（正会員）
*2 東日本旅客鉄道（株）　盛岡支社　設備部工事課　（正会員）

おり，一般的には凍害対策が採られた構造物であるといえるが,供用後短い期間の構造物にも凍害が生じている。

2.2 建設時の標準配合

表－2 は，BL1 および BL2 における建設当時の標準配合である。1982 年から供用している BL1 について，関東地区と東北地区を比較すると, PC 桁の中埋めコンクリートを除いて，空気量の範囲は関東地区の 4.0±1.0%から東北地区の 4.5±1.0%に割増しされているほか，W/C も低減するなど地域による環境条件が考慮されている。しかし，2002 年から供用している BL2 では， 1993 年の JIS A 5308（レディーミクストコンクリート）改訂に伴い，空気量の範囲は 4.5±1.5%に統一されたため，より環境の厳しい北方への延伸にも関わらず，受入れ検査時の空気量の下限値が 3.0%となり，BL1 の関東地区と同等になっている。

3. 調査・分析の項目と方法

3.1 調査・分析項目

調査は，構造物の状態確認を行うために，現地における外観調査と，コンクリートコア試料による分析を行うこととした。**表－3** に調査・分析項目を示す。

(1) 現地調査およびコア試料の採取

今回の現地調査では，**表－1** に示す BL1，BL2 に対して外観調査を実施した。外観調査では，目視を主体とした調査を行い，コア採取箇所を選定した。調査した構造物の標準断面を**図－2** に示す。

3.2 調査方法

(1) 空気量，気泡間隔係数

採取されたコアから試料を切り出し，ASTM C 457 に準じて，リニアトラバース法によりコンクリートの空気量および気泡間隔係数を測定した。測定は，コアの端部を除く範囲（深さ 50mm 程度以深）を輪切りにし，表裏 2 つの面について，ラインスキャンにてライン長の合計が約 2600mm となるように測定した。

(2) 耐久性指数

採取されたコアを用いて, JIS A 1148 の A 法に準じて，コンクリートの凍結融解抵抗性試験を行い，耐久性指数を算出した。

4. 現地調査

4.1 外観調査とコア採取位置の選定

外観調査は, BL1 および BL2 の中で発生変状数が多い箇所を中心に行った。全体としてスラブ上面（**図－3**）や防音壁（図－4）にスケーリング，ひび割れおよび剥離の変状が確認された。

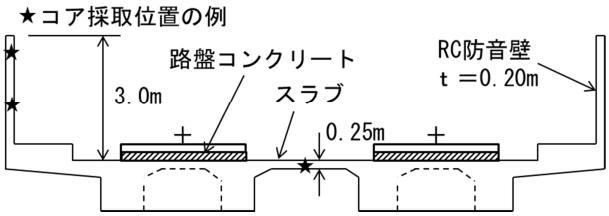
調査した高架橋には健全な箇所と凍害が生じている箇所があるため，それぞれからコアを採取した。

表－2　建設時の標準配合表（抜粋）[3)]

供用開始年度	地区	種別	設計基準強度 (N/mm2)	空気量の範囲 (%)	W/C (%)
1982 (BL1)	関東	ラーメン高架橋	27	4.0±1.0	53
		RCT桁	24		53
		防音壁	24		58
		PC桁中埋め	30		53
	東北	ラーメン高架橋	27	4.5±1.0	51
		RCT桁	24		53
		防音壁	24		53
		PC桁中埋め	30	4.0±1.0	47
2002 (BL2)	東北	ラーメン高架橋	24	4.5±1.5	53
		RCT桁	24		53
		防音壁	24		53
		PC桁中埋め	30		53

表－3　調査・分析項目

現地調査	
外観調査	外観の状況
採取したコアによる分析	
気泡の連行状況	空気量，気泡間隔係数
耐凍害性	耐久性指数



図－2　標準断面

図－3　スラブ上面のスケーリング

図－4　防音壁天端のスケーリング

4.2 コア採取

表－4 に示すように BL1 から 9 高架橋，BL2 から 3 高架橋の全 12 高架橋から，コンクリートコアを採取した。コアは，コンクリートの気泡の連行状況および耐久性指数を確認するためにスラブ上面と防音壁から 2 本のコア（φ60mm）を採取した。

コアの採取位置は，**図－2** に示すように，スラブについては中央付近から採取した。スラブの劣化部については，**図－5** に示すように凍害部から 0.3m 程度離れた位置から採取した。防音壁の劣化部については，スケーリングの影響を直接受けていない箇所として，防音壁天端から 0.3m 程度の位置から採取した。防音壁の健全部についても，同様に天端から 0.3m 程度の位置から採取した。

コア採取には湿式のコアドリルマシンを使用し，コアはスラブと防音壁から 30 箇所 2 本ずつの計 60 本を採取した。採取後は直ちにラップフィルムで封かんし，試験室に運搬した。

図－5　コア採取状況（スラブ）

図－6　コア採取状況（防音壁）

表－4　コア採取一覧

供用開始年度	橋りょう名	種別	対象部位	区分	空気量 (%)	気泡間隔係数 (μm)	耐久性指数
1982 (BL1)	A	RCT桁	スラブ	健全	3.8	374	45
		防音壁	防音壁	健全	2.2	300	46
	B	RCT桁	スラブ	健全	6.1	258	39
		RCT桁	スラブ	健全	5.3	263	39
		RCT桁	スラブ	劣化	0.7	650	－
	C	PC桁中埋め	スラブ	健全	3.2	289	33
		防音壁	防音壁	健全	2.0	331	8
	D	PC桁中埋め	スラブ	劣化	2.8	266	14
		防音壁	防音壁	健全	3.4	258	8
	E	RCT桁	スラブ	健全	3.8	377	15
	F	RCT桁	スラブ	健全	2.8	287	14
		RCT桁	スラブ	劣化	1.7	735	11
	G	RCT桁	スラブ	健全	1.7	434	9
		RCT桁	スラブ	劣化	2.4	386	8
		防音壁	防音壁	健全	0.9	391	8
		防音壁	防音壁	劣化	1.1	405	7
	H	ラーメン高架橋	スラブ	健全	3.0	596	14
		ラーメン高架橋	スラブ	劣化	2.0	576	17
		防音壁	防音壁（上部）	健全	1.7	515	－
		防音壁	防音壁（上部）	劣化	1.6	890	11
		防音壁	防音壁（下部）	健全	1.4	486	－
		防音壁	防音壁（下部）	劣化	1.2	703	8
	I	ラーメン高架橋	スラブ	健全	2.2	325	4
		防音壁	防音壁	健全	2.6	280	4
2002 (BL2)	J	ラーメン高架橋	スラブ	健全	1.9	441	13
		防音壁	防音壁	健全	2.2	372	12
	K	PC箱桁	スラブ	健全	3.8	292	38
		防音壁	防音壁	劣化	0.8	688	19
	L	ラーメン高架橋	スラブ	健全	2.0	428	54
		防音壁	防音壁	健全	1.3	311	16

5. コアの分析

(1) 空気量

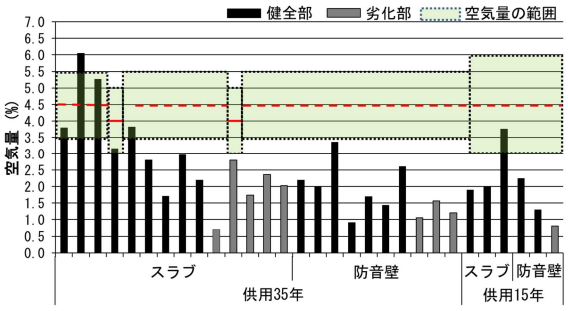
採取コアから測定した空気量を**表－4** および**図－7** に示す。硬化コンクリートの空気量は，スラブが 0.7～6.1%，防音壁が 0.8～3.8%であった。特に，供用 15 年の防音壁では，供用開始 6 年頃から凍害が生じた箇所において，空気量が 0.8%という低い値が測定された。今回採取したコンクリートコアのフレッシュ時の空気量については不明であるが，コアから測定された空気量は，健全部，凍害部に関わらず，標準配合にある空気量の範囲以下の試料が多く存在しており，受入れ検査時と硬化後の空気量は異なる計測方法ではあるものの，受入れ検査時から硬化までの間に空気量が減少する傾向があることが示唆されたまた，標準配合の空気量範囲内にある試料については，凍害箇所はなかった。**図－8** に測定した 30 箇所の空気量の分布状況を示す。健全部は，平均空気量 2.7%を中心に分布しているのに対し，凍害部は平均空気量 1.6%で分布しており健全部よりも空気量が少ない結果となった。

(2) 気泡間隔係数

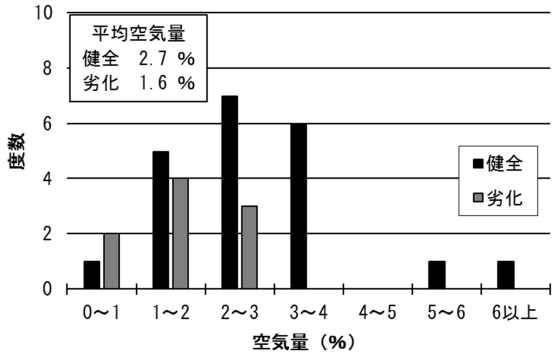
気泡間隔係数の測定結果を**図－9** に示す。気泡間隔係数は耐凍害性を評価する 1 つの指標であり，気泡間隔係数が小さいほど，耐凍害性が向上するとされており，一般に，気泡間隔係数が 250μm 以下であれば，優れた耐凍害性が期待できるとされている [5)]。測定された気泡間隔係数は，スラブが 258μm～735μm，防音壁が 258μm～890μm であった。スラブおよび防音壁ともに劣化部で気泡間隔係数が大きくなる傾向が見られるが，健全部においても 250μm 以上の気泡間隔係数となっており，本試験では耐凍害性に優れると言われる範囲にある試料は見られない結果となった。また，気泡間隔係数の分布状況を**図－10** に示す。健全部の気泡間隔係数は小さく，凍害部の気泡間隔係数は大きい傾向にあることがわかる。

(3) 空気量と気泡間隔係数の関係

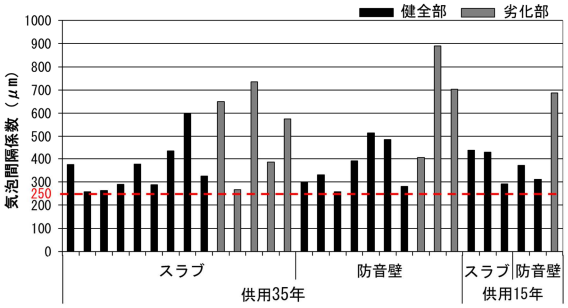
空気量と気泡間隔係数との関係を**図－11** に示す。図より，コンクリート中の気泡間隔係数が小さくなるほど空気量が多くなる傾向が見られ，凍害箇所の割合が低下することが確認された。空気量が 3.0%程度確保されている試料には凍害箇所は含まれていない。次に，硬化コンクリート中の空気量のうち，特に耐凍害性に効果があるとされる AE 剤により連行された気泡径 250μm 以下の空気量と気泡間隔係数との関係を**図－12** に示す。測定結果から，全ての試料において AE 剤により連行されたと考えられる気泡径 250μm 以下の空気量が存在していることが確認されるとともに，気泡径 250μm 以下の空気量が 0.5%を超えると凍害箇所の割合が小さくなり，1.4%程度以上連行されている試料には，凍害箇所は含まれていない。**図－13** に各試料に含まれる空気量のうち気泡径



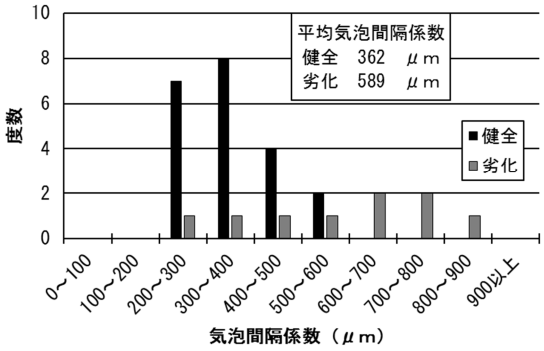
図－7　空気量測定結果



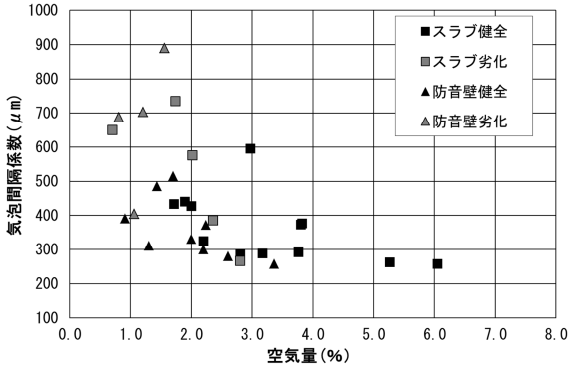
図－8　劣化と空気量の分布



図－9　気泡間隔係数測定結果



図－10　劣化と気泡間隔係数の分布



図－11　空気量と気泡間隔係数の関係

250μm 以下の気泡の割合を示す。空気量が 0.8%と低い値であった BL2 の劣化箇所の試料は，気泡径 250μm 以下の気泡がほとんど含まれていないことが確認された。BL1 では，気泡径 250μm 以下の気泡が少ない箇所に，劣化が多く生じていることが確認された。

(4) 耐久性指数

耐久性指数の測定結果と空気量との関係を**図－14**，耐久性指数の測定結果と気泡径 250μm 以下の空気量との関係を**図－15** に示す。測定された耐久性指数は 4～54 であった。耐久性指数が 30 以上であった試料は全て健全部であったが，変状の有無や空気の気泡径に関わらず，空気量との相関は見られなかった。一般に，耐久性指数は 60 を超えると耐凍害性があると言われている。今回の測定結果は，既存の状態での評価であり，供用開始後に自然環境下で凍結融解作用が生じた影響を考慮すると，60 を閾値として評価することはできないが，結果として 60 を超えるものはなかった。

6. まとめと今後の展開

今回，東北地区の新幹線高架橋について，凍害の実態に関する調査を行い，以下のことを確認した。

(1) 硬化コンクリートの空気量は，標準配合よりも低いものが多く，受入れ検査時から硬化までの間に空気量が減少する傾向があることが示唆された。また，気泡間隔係数はいずれも 250μm 以上となっており，耐凍害性に優れていると言われている 250μm 以下のものは確認されなかった。

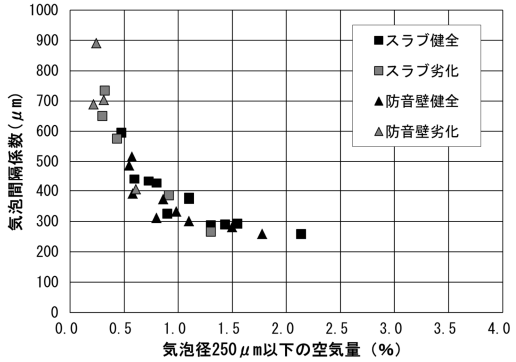
(2) 気泡間隔係数が小さいほど空気量が多く，凍害の発生箇所が低下することが確認された。

(3) 気泡間隔係数が小さいほど気泡径 250μm 以下の細かい気泡が多くなる。また，細かい気泡が多いほど凍害箇所の試料の割合は小さくなり，それが 1.4%程度以上含まれる試料には凍害箇所が含まれておらず，細かい気泡が多いほど耐凍害性が高くなっている。

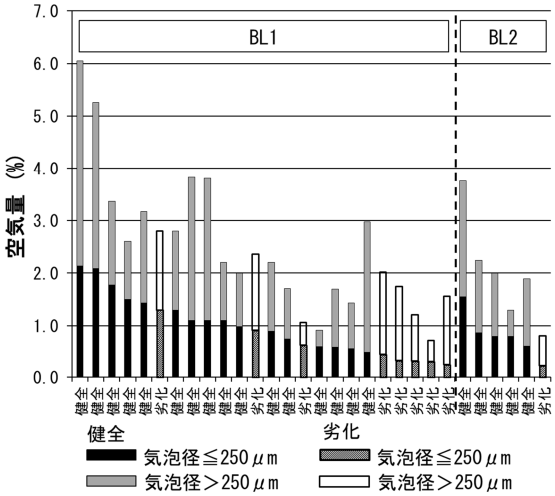
(4) 耐久性指数が 30 以上であった試料は全て健全部であったが，変状の有無や空気の気泡径に関わらず，空気量との相関は見られなかった。

今回の調査・分析からは，変状の有無に関わらず耐凍害性に優れているとされる気泡の連行状態にあったコンクリートは見られない結果となった。適切な空気量の確保が凍害の対策であるため，受入れ検査時に配合設計を満たしていたとすると，コンクリートの耐凍害性能が，施工中の空気の減少により低下してしまうことも影響していることが考えられる。

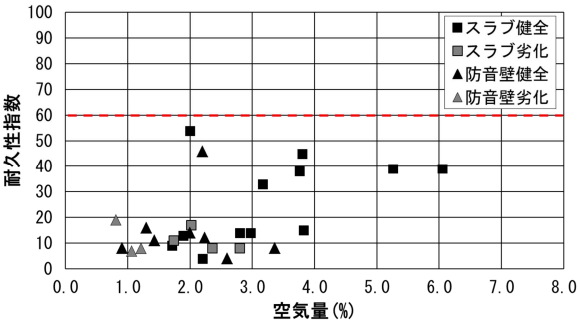
空気量を残すためには，あらかじめフレッシュ時の空



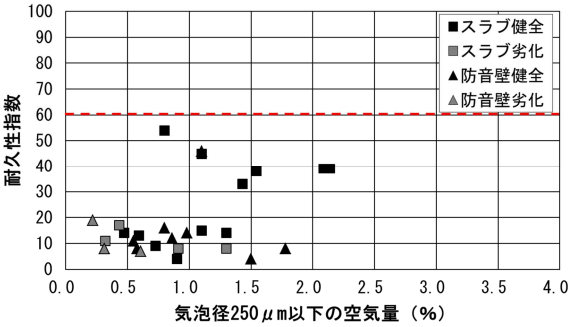
図－12　気泡径 250μm 以下の空気量と気泡間隔係数の関係



図－13　空気に含まれる気泡径 250μm 以下の気泡割合



図－14　耐久性指数と空気量の関係



図－15　耐久性指数と気泡径 250μm 以下の空気量の関係

気量を増す手段が考えられるが，施工時のどういう過程でどの程度空気量が減少するのか不明なため，今後検討していく。また，確実に空気を残すための手段として，中空微小球の活用が検討されている[6)]。本調査においても，細かい気泡が多いほど耐凍害性に優れている結果となっており，中空微小球の添加も有効な対策となることが考えられることから，これら新たな混和剤についても，検討を進めていく。

参考文献

1) （社）日本コンクリート工学協会：コンクリート便覧[第二版]，技報道出版，1996.2.
2) 日本鉄道公団盛岡支社：東北新幹線工事誌（盛岡・八戸間）他
3) 浜幸雄，松村光太郎，田畑雅幸，冨坂崇，鎌田映治：気象因子を考慮したコンクリートの凍害劣化予測，日本建築学会構造系論文集，1999
4) Powers , T.C The air requirement frost-resistance concrete.Proceedings of the Highway Research Board, 29，pp.184-211，1949
5) 水野浩平，林大介，橋本学，五十嵐和馬：実機ミキサにおけるコンクリート練混ぜ時の中空微小球の分散性に関する検討，コンクリート工学年次論文集，Vol39，No.1，2017
6) 菅原寛文，廣田元嗣：寒冷地における位置す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，Vol39，No.2，2017