

論文 積雪寒冷地におけるプレキャスト壁高欄に生じたピーリングの発生原因と対策

折田 現太*1・小山田 哲也*2・平間 昭信*3・石黒 広倫*4

要旨：積雪寒冷地の橋梁に設置された PCa 高欄にピーリングの発生が確認された。筆者らは、ピーリングが発生した原因を硬化コンクリートの空気量不足、過度な締固め、養生不足であると試験結果より判断した。そこで、コンクリートの配合、締固め、および養生方法を含めた製造方法の改善を試みたところ、現地橋梁に新たに設置した PCa 高欄ではピーリングの防止は出来なかったが、抑制効果があることを確認した。また、シラン系含浸材を適用することで、ピーリングの更なる抑制を検討した結果、メーカーが指定する標準使用量を塗布することで 40 サイクルまでピーリングがほとんど発生しないことを確認した。

キーワード：ピーリング、積雪寒冷地、プレキャスト、シラン系含浸材、二酸化

1. はじめに

近年、経年劣化による損傷が確認された橋梁の床版取替工事が各地で行われている。2022年12月に竣工した積雪寒冷地における床版架け替え工事では、翌年の2023年2月に、床版の両端に設置されるプレキャスト壁高欄（以降、PCa高欄と称す）の上面および側面に、**写真-1**に示すような表層におけるモルタルの剥離現象を確認した。

筆者らは、PCa高欄に生じた表面損傷の発生原因の推定および対策を講じるため、従来のコンクリートの配合および製造方法で作製したPCa高欄における硬化コンクリートの物性を評価し、コンクリートの配合ならびに製造方法を改善した。しかし、対策を施した2023年12月に竣工のPCa高欄においても、2024年3月に昨年同様の表面損傷が確認された。そこで、シラン系含浸材の含浸塗布を適用し、コンクリートに水分を供給させないことで表面損傷の抑制効果を期待し、室内実験にて検証した。本論文は、表面損傷の原因を究明するとともに、コンクリートの配合、製造方法など、一連の対策に関する検証結果を取りまとめたものである。

2. 表面損傷の発生状況

当該橋梁は、凍害区分²⁾に該当する積雪寒冷地域に建



A) 高欄設置状況

B) 高欄天端状況

写真-1 PCa高欄に生じた剥離現象

設されている。施工完了から表面損傷が発見されるまでの間の気温の変動幅は-10~10°Cの範囲にあり、雨あるいは雪によるPCa高欄への水分の供給があったことから、当該PCa高欄は凍結融解作用を受けたと考えられる。また、融雪剤を47回散布しているため、塩化物の影響により通常の水が凍結するよりも大きな収縮がコンクリート表面に生じ²⁾、表面損傷を助長した可能性がある。

目視観察により、問題となる表面損傷は粗骨材に接する表層モルタル部分が大半を占めていた。粗骨材は碎石を用いており、ポップアウトのように粗骨材が凍結膨張した痕跡は見られず健全な状態であった。剥離したモルタルの長径は10mm程度が多く見られ、モルタルの厚さは1mm程度以下であった。

発生原因は凍結融解による表面損傷、いわゆるスケーリングと推定されるが、一般的なスケーリングと比較して表層のモルタルが広範に損傷していない特徴を有する。この現象について、氏原らによれば、スケーリングと異なるピーリングと呼称³⁾しており、本論文においても以後、ピーリングと称す。本論文では、コンクリートの凍結融解抵抗性に着目して検討することとした。

3. ピーリングが発生したコンクリートの諸元

3.1 2022年12月に竣工したPCa高欄の概要

(1) コンクリートの配合

PCa高欄は鉄筋ならびに打込み金物、埋設管を有し、コンクリートのスランプフローを土木学会の締固めを必要とする高流動コンクリートのタイプ¹⁾に相当する配合を採用した。コンクリートの使用材料を表-1に、ピーリングが生じた配合（以降、従来配合と称す）を表-2に示す。結合材は膨張材を含む、セメントと高炉スラグ微粉

*1 飛島建設（株） 技術研究所研究開発グループ第三研究室 副主任 修士（工学）（正会員）

*2 岩手大学 理工学部システム創成工学科 教授 博士（工学）（正会員）

*3 飛島建設（株） 土木本部土木技術部 チーフエンジニア（正会員）

*4 東日本高速道路（株） 東北支社管理事業部構造設計チーム（非会員）

末の質量比が1:1の高炉セメントB種相当、粗骨材の最大寸法は20mm、スランブフローの目標値は425mm±75mm、水結合材比は30%である。また、空気連行剤は一般のコンクリートで多く用いられている主成分がアルキルエーテル系陰イオンの界面活性剤を使用した。硬化コンクリートの物性を評価するために作製したPCa高欄のスランブフローは372mm×365mm、空気量は4.2%であり、管理基準値を満足するコンクリートであった。

(2) 製造方法

PCa 高欄の製作概要を図-1 に示す。打込みはコンクリートバケットを用い、2層に分けて行った。なお、PCa 高欄の道路側に面する側面は、ハンチ部および傾斜があるため、エントラップトエアを排出しやすいように、PCa 高欄の天端が打込みの底面となっている。

使用したコンクリートは粉体量が 500kg/m³ と多く、粘性が高いため、φ=28mm の内部振動機を 1 層あたり 300mm 間隔で約 50 秒/箇所の締固めを実施し、型枠の背面に 2 箇所設置している 200Hz の型枠振動機を約 4 分 30 秒稼働した。打込み完了後の養生方法は図-2 に示すように、PCa 高欄を 2 時間程度静置し、1 時間かけて 40°C まで昇温させ、40°C で 4 時間の蒸気養生を行った。その後、降温させ、打込みの翌日に PCa 高欄の底部を洗い出し、目粗し処理を実施した。さらに、打込み完了後から 2 日目には、ひび割れを低減する効果があるとされる低級アルコールのアルキレンオキシド付加物を主成分とした養生剤を PCa 高欄全体に塗布し、出荷までは気中養生とした。

3.2 硬化コンクリートの品質

(1) 空気量および気泡間隔係数

コンクリート硬化後、PCa高欄の天端から、φ=100mm のコア供試体を採取し、ASTM C 547 従って表層、表層から 5mm、および 20mm の断面でリニアトラバース法による気泡分布の測定を行った。従来配合の PCa 高欄は、図-3 に示すように、いずれの深さの断面においてもコンクリート空気量は 3% に満たず、特に表層では空気量 0.3% とほとんど空気が存在しない結果となった。これは、製作時には型枠の底面であること、型枠振動機の稼働時間が非常に長く締固めが過多であったことが要因であり、型枠底面の空気が保持出来ていなかったと考えられる。また、気泡間隔係数はコンクリート表層で約 650μm、表層から 5mm、10mm の断面では約 300μm であった。この

ことから、硬化後のコンクリートの空気量および気泡間隔係数は、いずれの深さにおいても耐凍害性を有するものではなかった²⁾。

(2) 骨材分布

PCa 高欄天端から採取したコアについて、天端から 5mm の位置で粗骨材面積率を求めた結果は 52.8% であり、径の大きい粗骨材が目立つ状態であった。これは、高欄の天端が打込み時では型枠底面となっており、振動締固めの過多が要因となり、骨材上面の薄いモルタル層が剥がれるピーリング現象の発生頻度を増加させる一因になると考えられる。

表-1 PCa 高欄コンクリートの使用材料

種類	記号	物理的性質など
セメント	C	普通ポルトランドセメント、密度 3.16g/cm ³
混和材	BFS	高炉スラグ微粉末 4000、密度 2.89g/cm ³ 、比表面積 4590 cm ² /g
	Ex	石灰系膨張材、密度 3.17g/cm ³
細骨材	S	埼玉県熊谷産洗砂、表乾密度 2.62g/cm ³ 、吸水率 1.61%
粗骨材	G	埼玉県秩父産 2005 砕石、表乾密度 2.68g/cm ³ 、吸水率 0.84%
混和剤	SP	高性能減水剤 (主成分：ポリカルボン酸エーテル系化合物)
	AE1	空気連行剤 (主成分：アルキルエーテル系陰イオン界面活性剤)
	AE2	空気連行剤 (主成分：変形アルキルカルボン酸化合物系陰イオン界面活性剤)

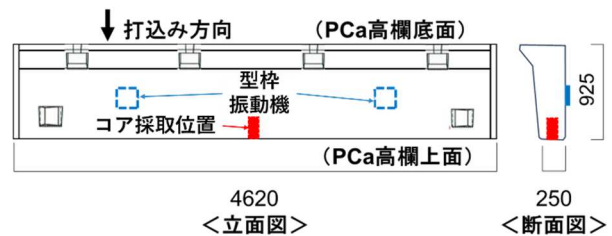


図-1 PCa 高欄の製作概要およびコア供試体採取位置

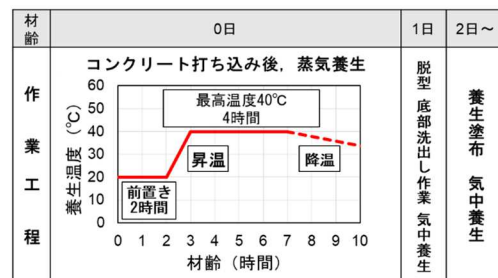


図-2 養生方法

表-2 PCa 壁高欄におけるコンクリートの従来配合

名称	スランブフロー (mm)	空気量 (%)	水結合材比 W/B (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量 (kg/m ³)								実測スランブフロー (mm)	実測空気量 (%)
					W	C	BFS	Ex	S	G	SP	AE1		
従来配合	425±75	45±1.5	30.0	57.0	150	240	240	20	956	740	5.25	0.055	372×365	4.2

(3) 表層品質

PCa 高欄の天端における表層の緻密性を確認するため、PCa 高欄の天端から $\phi=100\text{mm}$ のコア供試体を採取した。評価は、蛍光エポキシ樹脂真空含浸法⁵⁾によって、コンクリート表層からの蛍光エポキシ樹脂の含浸深さを顕微鏡にて目視観察により行った。図-4 に示すように、最大 0.2mm 程度のひび割れが認められ、PCa 高欄天端から 6mm 程度までの蛍光エポキシ樹脂の含浸が確認された。早期に気中養生としたことで、コンクリート表層の水和が十分ではなく、乾燥によって表層部に微細なひび割れが発生し、弱点となった可能性がある。

4. ピーリング対策の立案・検証

4.1 対策の立案

(1) 配合の変更

原因推定の検討の中で、硬化したコンクリート表層部の空気量を測定した結果、耐凍害性を有する結果とならなかったことは、型枠振動機による締固めの過多によって、型枠面に接しているコンクリートの空気泡保持できなかったことが原因と考えられた。そのため、締固めを必要とする高流動コンクリートのタイプ2⁴⁾を採用し、型枠振動機を使用しないコンクリートの配合とすることで、硬化体に適切な空気泡を保持させることとした。改善したPCa高欄配合（以降、改善配合と称する）を表-3に示す。使用材料は、空気連行剤以外は同様とし、空気連行剤は空気量の低下が大きいスラグなどを用いる場合に有効とされる主成分が変形アルキルカルボン酸化合物系陰イオンの界面活性剤を適用した。

(2) 製造方法の変更

コンクリートの打込みは、従来の製造方法と同様にコンクリートバケットを用い、型枠内に2層に分けてコンクリートを打ち込み、各層では内部振動機（ $\phi=40\text{mm}$ ）を用いて、1箇所あたり5秒程度の振動締固めを実施した。また、打込み後の養生は、材齢初期での十分な水分の供給が必要であると考えられたことから、養生方法を変更することとした。コンクリート打込み後の蒸気養生から底部洗出し作業までは、従来と同様の方法で養生を実施し、洗出し作業後は湿潤状態を確保するため養生シートでPCa高欄を覆い、更に水分の逸散を防ぐためにブルーシートで覆うこととした。なお、養生シートの水分がなくならないよう水分を供給し、コンクリートの湿潤

状態が常に保たれるよう養生期間を7日間とした。その後、出荷までは気中に存置した。

4.2 対策効果の検証

(1) 空気量および気泡間隔係数

改善した製造方法で作製したPCa壁高欄の空気量および気泡間隔係数は、従来の製造方法と同様に作製したPCa高欄の天端から、 $\phi=100\text{mm}$ のコア供試体を採取し、ASTM C 547に従って測定した。測定結果を図-5に示す。PCa高欄天端部である表層の空気量は2.1%であるが、5mm以深では空気量が3%以上であることを確認した。また、気泡間隔係数は、表層も含めていずれの測定位置とも $200\mu\text{m}$ 以下となり、コンクリート内部においても耐凍害性に有効な空気が導入できたと考えられる結果となった。

(2) 骨材分布

PCa高欄天端から採取したコア供試体の骨材分布について、天端から5mmの位置で粗骨材量を比較した結果を、従来の製造方法で作製した結果とともに表-4に示す。従来の製造方法は粗骨材面積率が52.8%であり、径の大きい粗骨材が密集し、振動過多による骨材沈降が見られる。一方、改善した製造方法では、粗骨材面積率が23.8%と粗骨材面積率が小さくなっている。

上記の結果から、薄いペースト層を形成する粗骨材の数がPCa天端に少なくなったため、ピーリングを抑制する効果が高くなると推察される。

(3) 表面品質

湿潤養生期間を延長した結果、図-6に示すように、

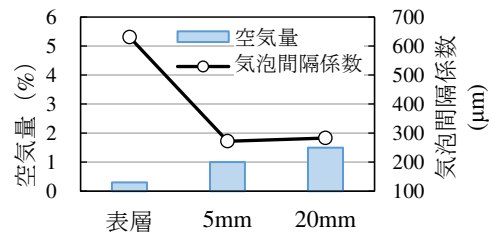


図-3 従来のPCa高欄の空気量および気泡間隔係数

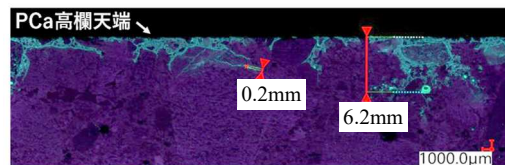


図-4 従来の製造におけるPCa高欄表層の外観観察
採取した試験体の表層に最大 0.1mm 程度のひび割れが

表-3 PCa高欄におけるコンクリートの改善配合

名称	スランブフロー (mm)	空気量 (%)	水結合材比 W/B (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量 (kg/m ³)								実測スランブフロー (mm)	実測空気量 (%)
					W	C	BFS	Ex	S	G	SP	AE2		
改善配合	550±75	4.5±1.5	30.0	57.0	165	265	265	20	828	783	4.54	0.0605	598×584	6.0

確認されたが、同図から見受けられるように、コンクリート表層から蛍光エポキシ樹脂の含浸が大幅に抑制されている。このことから、湿潤養生を確実に行うことでコンクリートの表層が緻密化し、微細ひび割れ、および水分浸透の抑制に有効と判断される。

4.3 現地での効果検証

現地橋梁にて、改善した製造方法のピーリング抑制効果を検証するため、定性的な評価であるが、表-5 に示すような目視観察による評価基準を設定した。なお、この評価基準は、高欄1基あたりの天端(面積:0.58~1.14m²)ならびに側壁(面積:2.11~4.25m²)をそれぞれ評価対象としている。評価対象面に対して、ピーリングの発生がないものを「0」、ピーリングが評価面に数個程度みられるものを「1」、評価面に10~50個程度みられるものを「2」、評価「2」以上のものを「3」とした。

次に、従来の製造方法および改善後の製造方法におけるPCa高欄のピーリング発生状況を図-7、図-8に示す。なお、評価対象は、従来の製造方法および改善後の製造方法ともに、現地橋梁の路肩側に設置された28基のPCa高欄とした。

製造方法を改善したPCa高欄の天端の評価は、「3」、「1」の数は同数であったが、評価「2」は3基分減少し、「0」が3基増える結果となった。側壁に関しては、評価「2」が1基分減少し、「0」が2基分増える結果となった。

以上の結果より、製造方法の改善によってピーリングの発生数の低減は認められたものの、ピーリングの発生は防止できなかった。上記の結果を受け、PCa高欄の製造方法と配合の改善に加え、シラン系含浸材を塗布することによって、外部からの水分を遮断することがピーリングの対策として有効であると考え、室内実験にて抑制効果を検討した。

5. 室内凍結融解試験での追加対策の検討

5.1 試験概要

(1) 試験体諸元および実験水準

試験体の寸法を275mm×180mm、高さ80mmとし、コンクリートの配合および、製造方法は改善した配合ならびに製造方法と同様として製作した。

試験水準を表-6に示す。含浸材の種類は2種類で種類A、Bともにシラン系含浸材であり、含浸材の塗布時期をピーリング発生前およびピーリング発生後の2水準

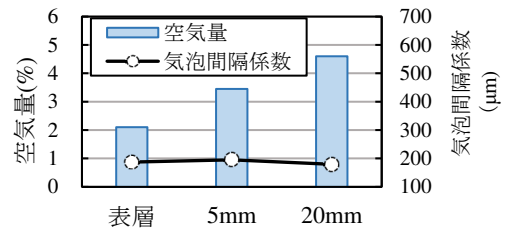


図-5 深さ方向の空気量と気泡間隔係数

表-4 骨材面積率の比較

項目	従来の製造方法	改善した製造方法
外観		
粗骨材面積率	52.8%	23.2%

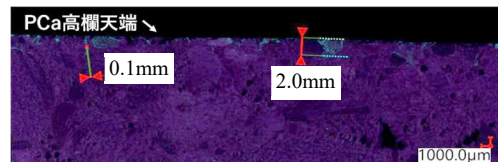


図-6 改善した製造におけるPCa高欄表層の外観観察

表-5 目視観察によるピーリングの定性的評価(拡大)

ピーリング発生状況	0	1	2	3
評価				

高欄長さ(m)	3.50	4.62	4.62	4.62	4.62	4.62	2.31	4.62	4.64	4.64	4.64	4.64	4.64	4.64	4.64	4.64	4.66	2.31	4.66	4.66	4.66	4.66	4.66	4.66	3.54	
天端	2	1	1	2	1	1	1	3	1	1	1	1	2	1	3	1	2	1	2	1	1	1	1	1	1	2
側壁	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	2	1	1

※高欄の断面寸法は図-1と同様

図-7 従来の製造方法におけるPCa高欄のピーリング発生状況

高欄長さ(m)	3.50	4.62	4.62	4.62	4.62	4.62	2.31	4.62	4.64	4.64	4.64	4.64	4.64	4.64	4.66	4.64	4.66	2.31	4.66	4.66	4.66	4.66	4.66	4.66	3.54	
天端	1	3	1	3	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	2	2	2	1	1	1	1	1	1	0
側壁	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	0	1	0	1	1	1	1	1	1

※高欄の断面寸法は図-1と同様

図-8 改善した製造方法におけるPCa高欄のピーリング発生状況

とした。なお、ピーリング発生後に実施した試験体へのシラン系含浸材塗布は、凍結融解6サイクル後、試験体を20℃、60%の恒温恒湿室で14日間乾燥させ、高周波容量式の測定方法である表面含水率計で測定したコンクリート表面の含水率が6%以下を確認してから行った。

塗布量については、シラン系含浸材の種類ごとにメーカーの標準使用量および標準使用量の半分とし、試験水準を計9水準とした。標準使用量の半分を実験水準とした理由は、標準使用量の含浸深さは4~7mmであり、ピーリング現象は粗骨材の上面1mm以下のモルタル層が剥がれることから、標準使用量の半分で効果を期待するとともに、経済性に有利になると考えたためである。

(2) 凍結融解試験

凍結融解試験の方法は、ASTM C 672を参考とし、恒温恒湿槽内で凍結融解試験を実施した。凍結融解のサイクルは、最低凍結温度を-18℃で凍結時間を17時間、最高融解温度を+23℃で融解時間を7時間とし、50サイクルまで5サイクルごとのコンクリート表面のピーリング発生状況を定点撮影した。また、湛水させる水溶液は現地橋梁の環境下に近づけるため、融雪剤の主成分であるCaCl₂の濃度3%溶液²⁾とした。

(3) 評価方法

ピーリングによるコンクリート表面損傷の評価は、撮影画像の解析にて実施した。表-7に示すように、オリジナルの画像を画像処理ソフトで読み込み、ピーリングが生じている箇所の輪郭をトレース後、黒色(R:0, G:0, B:0)で範囲内を塗りつぶし、ピーリングの発生個所とそれ以外で二値化の処理を実施した。二値化した画像はオープンソースの画像解析ソフトウェアImageJ⁹⁾を利用し、ピーリングの発生個数および面積率を算出することで実施した。撮影時は試験体に設けた基準点に200mm×150mmの枠を設置し、撮影距離を一定にして撮影した。なお、カメラは1200万画素のものをを用い、1ピクセルあたり0.05mmの解像度となるようにした。

5.2 試験結果

凍結融解試験を実施した結果、ピーリング現象が確認された試験体は、骨材上面の1mm程度以下のモルタル層のみが剥離し、広範にモルタル層が損傷していないことから、現地橋梁と同様のピーリング現象を再現すること

ができた。

試験結果を図-9から図-13に示す。図-9に示すベースは、サイクル数が増加するごとにピーリングの発生個数および面積率が増加する傾向を示した。図-10、図-11に示すピーリングが発生する前にシラン系含浸材を塗布したBPシリーズは、含浸材A、含浸材Bともに標準使用量を塗布することで凍結融解の40サイクルまでピーリングの発生面積率がほぼ0%であり、抑制する効果が認められたが、40サイクル以降は微増傾向であった。また、標準使用量の半分の塗布した水準では、含浸材A、含浸材Bともに、20サイクルまではピーリングが発生せず、25サイクル以降にピーリングが増加し始めたが、含浸材Aの増加傾向が顕著であった。図-12、図-13に示すピーリング発生後に含浸材を塗布したAPシリーズは、BPシリーズと同様の傾向であり、含浸材A、含浸材Bともに標準使用量を塗布することで、ピーリングの発生を抑制する効果が確認された。



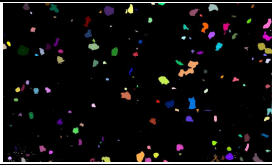
一方、含浸材Aを標準使用量の半分の塗布した場合は、塗布後もピーリングが微増する傾向が見られ、含浸材Bを標準使用量の半分の塗布した場合は、25サイクルまではピーリングが微増し、その後50サイクルまでは、ピーリングの増加が顕著となる結果となった。

試験終了後に含浸材の浸透深さを測定した結果、含浸材Aの標準使用量では3mm程度、標準使用量の半分では1.5mm程度であり、ピーリングで剥離した1mm程度以下のモルタル層を超えて浸透していることを確認した。なお、含浸材の浸透深さがメーカーの資料に表記された含浸深さより小さいのは、使用したコンクリートの水セメント比が30%と小さく、コンクリート表層が緻密である

表-6 実験要因および水準

試験体名	含浸材種類	塗布時期	塗布量(g/m ³)	
ベース	—	—	—	
BP-A350	A	ピーリング発生前	標準使用量	350
BP-A175			標準使用量/2	175
AP-A350		ピーリング発生後	標準使用量	350
AP-A175			標準使用量/2	175
BP-B300	B	ピーリング発生前	標準使用量	300
BP-B150			標準使用量/2	150
AP-B300		ピーリング発生後	標準使用量	300
AP-B150			標準使用量/2	150

表-7 試験体名ベースの凍結融解50サイクル時における画像処理および画像解析の状況

		
A) オリジナル	B) ピーリング抽出	C) 二値化・画像解析

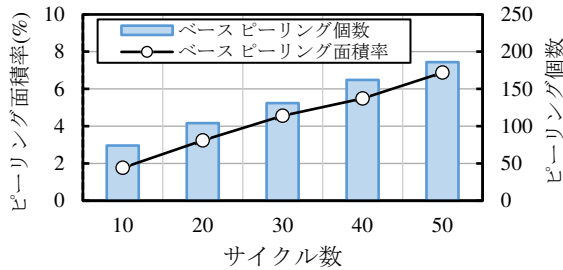


図-9 ベースのピーリング発生状況

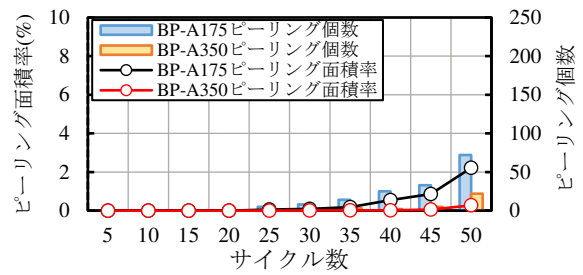


図-10 BP-Aシリーズのピーリング発生状況

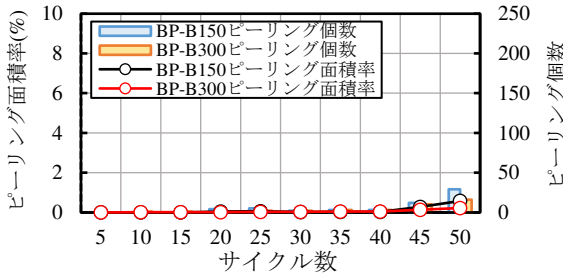


図-11 BP-Bシリーズのピーリング発生状況

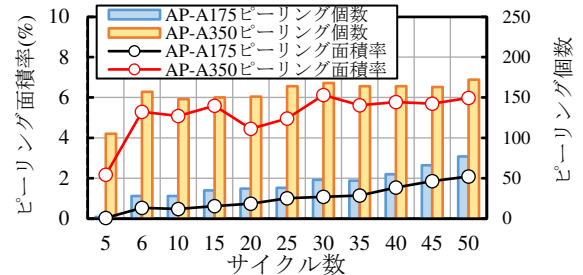


図-12 AP-Aシリーズのピーリング発生状況

ため、浸透深さが小さくなったと考えられる。

以上の試験結果より、ピーリングの剥離層よりも深い撥水層を有することでピーリングの発生を一定サイクル防止することが可能であると考えらえる。しかし、凍結融解に伴う膨張・収縮の繰り返しにより、サイクルを重ねるごとに微細なひび割れが発生・進展し、特に骨材上面の非常に薄い部分のモルタル層では、骨材上面とモルタル層の間に水分が入り込んで骨材とセメントペーストの付着が徐々に絶たれて、一定サイクル数経った後にピーリングが発生するものと推察される。

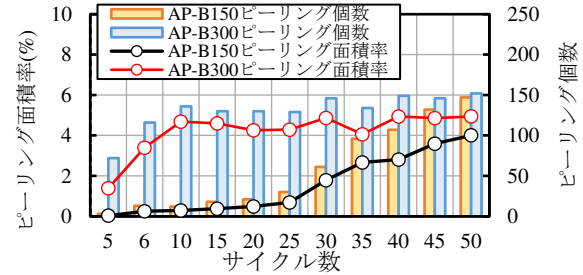


図-13 AP-Bシリーズのピーリング発生状況

をほとんど抑制することができることを確認した。

6. まとめ

本研究で対象としたPCa高欄に発生したピーリングの原因を明らかにして、その対策について検討した結果より得られた知見を以下に示す。

- 製造方法の特性から PCa 高欄の天端が打込み時の底面となっており、ピーリングが発生したコンクリート面の空気量不足、締固め過多による骨材沈降、ならびに養生不足によるコンクリート表層の水和が不十分であったことが、ピーリング発生の一要因であると推察し、コンクリート配合および製造方法の改善によって、発生原因の対策を実施した結果、ピーリングを防止することはできなかったが、発生数を抑制することは可能であった。
- PCa 高欄を現地橋梁にて一冬経過後に目視観察にて評価したところ、改善効果が認められ、ピーリングの発生原因推定の妥当性と対策の有効性を確認した。
- 室内実験により、現地橋梁での事象を再現することができた。その室内試験での検討では、シラン系含浸材を標準使用量塗布することで、ピーリングの発生

参考文献

- 国土交通省 東北地方整備局:東北地方における凍害対策に関する参考資料 (案), 2019.3
- 安中慎太郎:積雪寒冷地におけるコンクリートの劣化について, 寒地土木研究所月報 特集号 2018 年度
- 氏原安美ら:積雪寒冷地のプレキャスト高欄に生じた表面損傷の原因調査及び対策の実践的検討, 土木学会全国大会第 79 回年次講演会, V-814, 2024
- 公益社団法人 土木学会:コンクリートライブラリー 161 締固めを必要とする高流動コンクリートの配合設計・施工指針 (案), 2023.2
- 平間昭信:コンクリートの劣化診断技術 ー蛍光エポキシ樹脂真空含浸法による微細劣化現象の可視化, 未来材料, Vol.8, No.11,2008
- Rasband, W.S., ImageJ, U. S. National Institutes of Health, Bethesda, Maryland, USA, (<http://rsb.info.nih.gov/ij/>, 1997-2007.2)