

報告 乾湿繰り返し環境下にある海上部コンクリート構造物の劣化に関する考察

大川 宗男*1・栗原 敏広*2・坂本 佳也*3

要旨: 瀬戸中央自動車道の海上部に位置する南備讃瀬戸大橋 7A アンカレイジ南面オーバーハング部において、ポップアウトが確認された。このポップアウトの原因特定にあたり、標準調査及び詳細調査を実施した。その結果、アンカレイジ構造体の特徴及び乾湿繰り返しを受けやすい環境が、海水中の塩化物イオン、アルカリ金属イオン、硫酸イオンを浸透・濃縮させ、石こうやハライトの生成やアルカリシリカ反応に影響を及ぼしていることを確認した。この結果から、ポップアウトの原因は海水による化学的侵食+アルカリシリカ反応+乾湿繰り返しの複合劣化と判断した。

キーワード: ポップアウト, 複合劣化, 化学的侵食, アルカリシリカ反応

1. はじめに

瀬戸中央自動車道における最大の海上構造物である南備讃瀬戸大橋 7A アンカレイジは、橋軸方向 76m, 橋軸直角方向 55m, 海面上の高さ 72.7m の高さをもつ。また、躯体は北面が下部に向かって張り出すように傾斜しているのに対し、南面は下部から約 20m 上部に向かって海上部に張り出すオーバーハング (以下, OH) 構造となっている。

この南面 OH 部において、セメントペーストの剥離による骨材の露出や骨材の剥離等のポップアウトが確認され、これは他面では見られない特異な現象であった。このポップアウトの進行に伴い、構造物の耐久性の低下が懸念されるため、その対策を講じるにあたり、ポップアウトの原因を特定する必要がある。そこで、南面 OH 部と他面の違いに着目し、標準調査及び詳細調査を実施した。本報告では、その調査結果及びポップアウトの原因について報告する。

2. 南備讃瀬戸大橋 7A アンカレイジの状況

南備讃瀬戸大橋 7A アンカレイジは海上部に位置しているとともに、年間を通じて西南西の風が卓越していることから、西面及び南面では特に海水中の飛来塩分等が供給されやすい環境にある。また、西面は雨天時に上部から下部に向かって一様に雨水が流れることで、表面に付着した飛来塩分等が洗い流される。しかし、南面では OH 部の上部から流れてきた雨水が OH 部には流れず、大部分が海面に流れ落ちるため、OH 部では飛来塩分等が洗い流されにくい。これは平成 20 年度に実施した西面・南面 OH 基部での全塩化物イオン濃度試験結果より、塩

化物イオン濃度が西面の表層付近で約 1.5kg/m³ であるのに対し、南面 OH 部の表層付近では約 22.3kg/m³ という結果からも明らかである。

また、現地は海上部に位置していることから周囲に障害物がなく、特に南面は日射の影響を受けやすいことを合わせると、南面 OH 部は他面に比べ、乾湿繰り返し環境にあると推測される。この OH 部において、セメントペーストの剥離による骨材の露出、骨材が薄皮状に剥離、骨材の脱落といったポップアウトが確認された。

このポップアウトが生じる原因を特定するにあたり、標準調査として資料調査及び現況調査を実施した。そして、その結果をもとに日本コンクリート工学協会の指針¹⁾を参考にして、標準調査に基づくひび割れの原因推定を行った。さらに、標準調査結果から推定した原因について、詳細調査を実施した。

3. 標準調査結果

標準調査として、建設時の設計図書類による資料調査及び目視による現況調査を実施した。

3.1 資料調査結果

建設時の設計図書類から、コンクリートの材料として、セメントには高炉セメント B 種、細骨材には細砂と粗砂の混合砂、粗骨材には主に流紋岩 (岡山県笠岡市神島産) と花崗岩 (香川県仲多度郡満濃町産) を使用している。このうち、骨材に使用している流紋岩はアルカリシリカ反応 (以下, ASR) 原因物質である火山ガラス、クリストバライトやトリディマイトを多く含んでいることから、潜在的に ASR による劣化の可能性がある。しかし、建設時にセメント-骨材の潜在的アルカリ反応試験として、

*1 本州四国連絡高速道路 (株) 坂出管理センター 橋梁維持第一課長 (正会員)

*2 本州四国連絡高速道路 (株) 坂出管理センター 所長

*3 本州四国連絡高速道路 (株) 坂出管理センター 橋梁維持第一課

モルタルバー法及び化学法を実施しているが、その際には無害の判定となっている。

次に、南備讃瀬戸大橋 7A アンカレイジの示方配合を表-1 に示す。なお、配合はセメント供給会社及び骨材産地により異なり、主として表-1 に示す 3 種類の配合を使用している。表-1 のように、南備讃瀬戸大橋 7A アンカレイジはコンクリートポンプによる高所打設に配慮して、水セメント比が 55.3% もしくは 57.1% と高くなっている。これに対し、コンクリート標準示方書（設計編）では、海水等による化学的侵食に対する抵抗性を確保するための最大水セメント比は、SO₄ として 0.2% 以上の硫酸塩を含む土や水に接する場合は 50% 以下²⁾ となっている。よって、南備讃瀬戸大橋 7A アンカレイジのコンクリートは水セメント比の点で、海水等による化学的侵食に対する抵抗性が低い配合となっている。

3.2 現況調査結果

現況調査は OH 部基部からの目視及び OH 部に沿うように設置した足場上からの目視により実施した。その調査結果を図-1、調査で確認された変状を写真-1 に示す。図-1 及び写真-1 より、OH 部での変状は高さ毎で異なり、変状のタイプとして 3 種類に分類される。まず、OH 部下段ではセメントペーストの剥離による骨材の露出や脱落等のポップアウト（写真-1 (a)）や骨材の薄皮状の剥離といった骨材自体の劣化が見られた。また、中段では、ポップアウトの他に、塗膜の剥がれのようなコンクリートの表層剥離が見られた。（写真-1 (b)）一方で、上段では中段から下段で見られたポップアウトは見られず、ASR の特徴である亀甲状のひび割れが見られた。（写真-1 (c)）しかし、他面では南面 OH 部で確認された変状は見られず、健全な状態であった。

表-1 南備讃瀬戸大橋 7A コンクリートの示方配合

配合種別	粗骨材の最大寸法 (mm)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量 (kg/m ³)							セメント供給会社	骨材産地	
				水 W	セメント C	細骨材 S		粗骨材 G					混和剤 A
						細	粗	G1 (40-25)	G2 (25-13)	G3 (13-05)			
F-2	40	55.3	38.2	155	280	280	421	464	348	348	0.7	A社	C
F-3	40	55.3	38.2	155	280	315	386	472	355	355	0.7	A社	D
F-4	40	57.1	38.2	160	280	313	383	470	352	352	0.7	B社	D

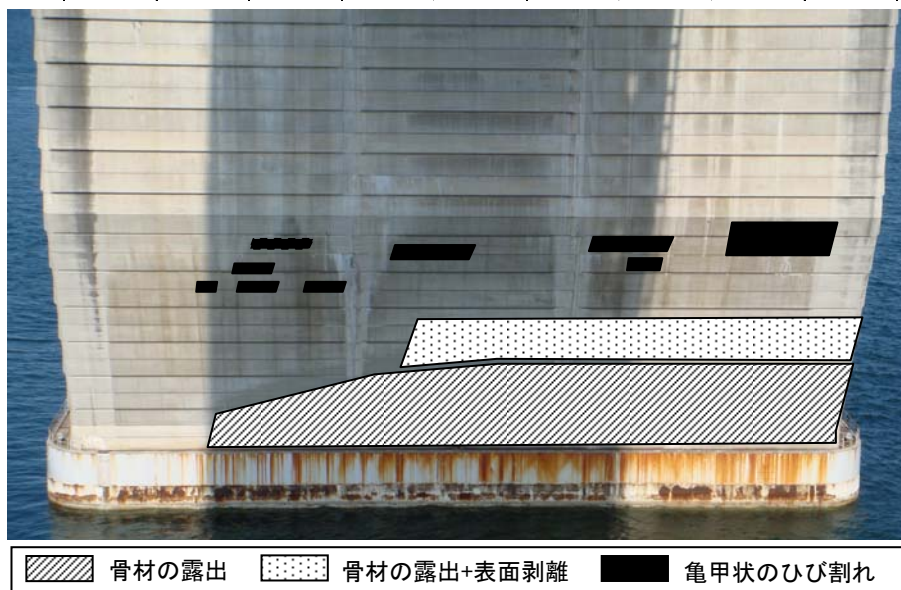


図-1 南面 OH 部 現況調査結果



(a) 骨材の露出



(b) 表面剥離



(c) 亀甲状のひび割れ

写真-1 現況調査結果から確認された変状

3.3 標準調査に基づくひび割れの原因推定

3.1及び3.2の結果をもとに、日本コンクリート工学協会の指針¹⁾により標準調査に基づくひび割れの原因推定を行った。その結果、ひび割れの発生原因として、反応性骨材（アルカリ骨材反応）（A6）、酸・塩類の化学作用（C6）の可能性が高いと推定した。

酸・塩類の化学作用はポップアウトが海水の成分が洗い流されず残留しやすいOH部で発生していることから、海水による化学作用に着目した。そして、EPMA分析（面分析）により元素別の濃度分布を確認することで評価した。また、現地は海上部に位置していることから、塩化物イオンの浸透も予測されるため、全塩化物イオン濃度試験についても実施した。

4. 詳細調査結果

4.1 調査方法

標準調査から推定された劣化原因である反応性骨材（アルカリ骨材反応）（A6）及び酸・塩類の化学作用（C6）を対象に、詳細調査を実施した。詳細調査は図-2で示す位置で採取した試料を用いて、表-2に示す項目について実施した。反応性骨材（アルカリ骨材反応）については、試料から白色のアルカリシリカゲルが確認されなかったことから、鉱物学的評価として粉末X線回折及び化学法、残存膨張量試験として促進膨張試験を実施した。

表-2 詳細調査

試験項目	試験数	試験方法
EPMA分析	3	JSCE-G 574-2005
粉末X線回折	1	
化学法	1	JIS A 1145
促進膨張試験	6	JCI-DD2
全塩化物イオン濃度試験	13	JIS A 1154

4.2 EPMA分析

EPMA分析（面分析）で求めた深さ方向の SO_4^{2-} の濃度

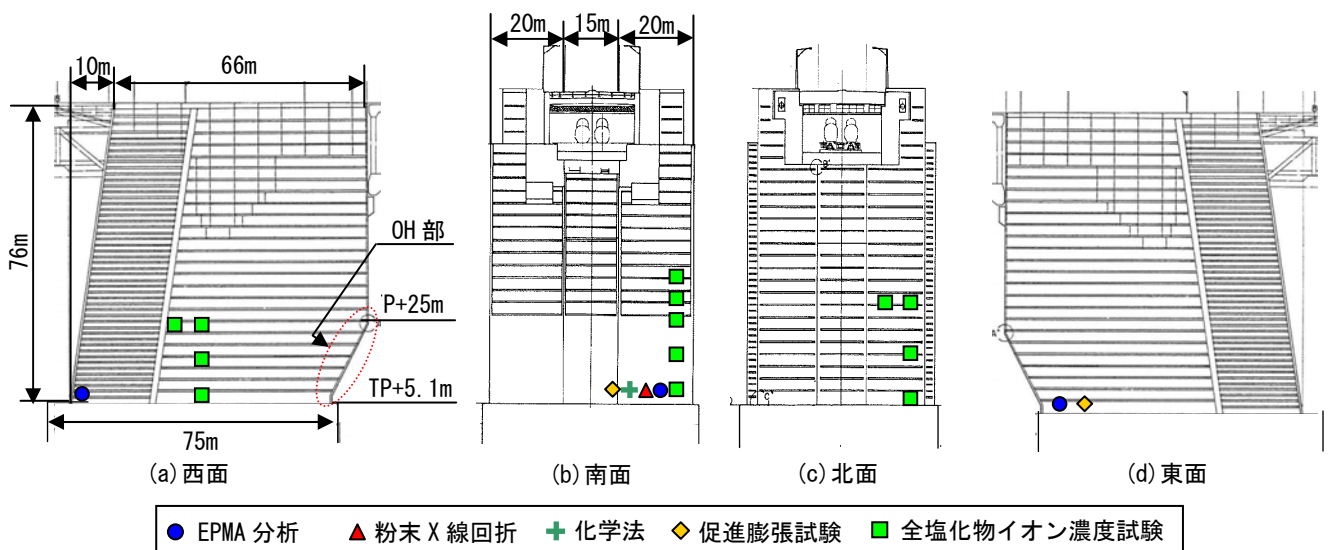


図-2 試料採取位置（南備讃瀬戸大橋7Aアンカレイジ）

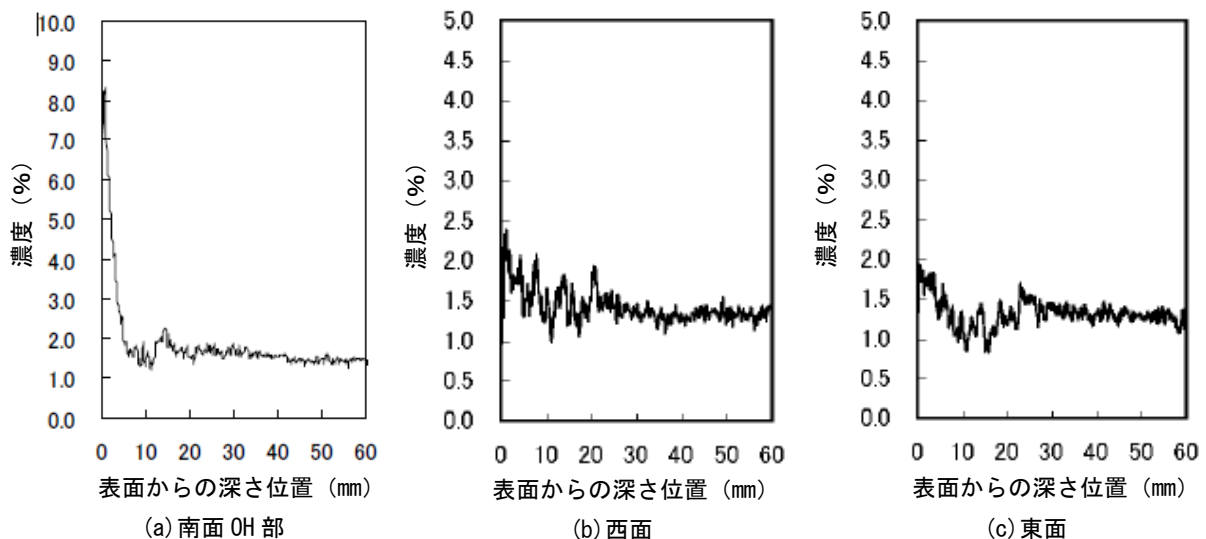


図-3 セメントペースト部のEPMA分析結果（ SO_4^{2-} ）

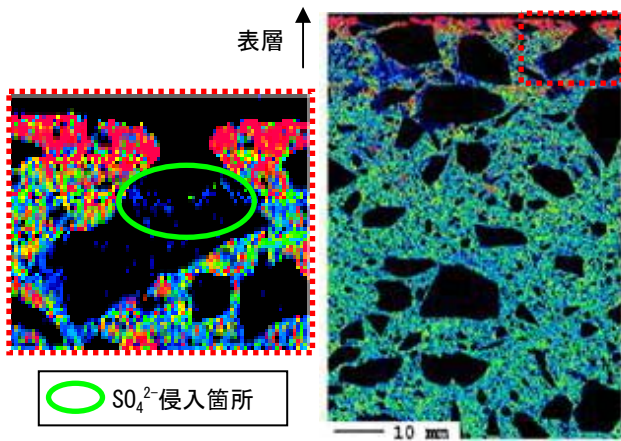


図-4 EPMA 分析結果
(SO₄²⁻の骨材内部への侵入：南面 OH 部)

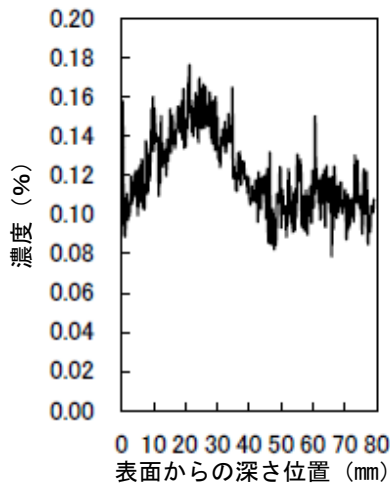


図-5 EPMA 分析結果 (Na⁺：南面 OH 部)

分布を図-3 に示す。図-3 より東西面に比べて、南面 OH 部では表面付近で明瞭な濃度のピークが見られた。また、濃度のピーク値についても、東西面が約 2.0% であるのに対し、南面 OH 部では約 8.0% と高濃度である。これは南面 OH 部がその形状により、コンクリート表面から侵入した海水中の SO₄²⁻が雨水により洗い流されることなく、内部方向に浸透・濃縮したものと考えられる。

さらに、図-4 より、南面 OH 部では表層付近の骨材内部に SO₄²⁻が侵入していることが確認された。これらの結果から、南面 OH 部では東西面に比べ、セメントペーストだけでなく、施工当初から欠陥がある骨材の内部にも海水中の SO₄²⁻が多く供給されていると考えられる。

また、図-5 に EPMA 分析 (面分析) で求めた南面 OH 部での深さ方向の Na⁺の濃度分布を示す。図-5 より、表面から 20~30mm の深さで Na⁺濃度のピークが見られる。これは SO₄²⁻と同様に、海水中の Na⁺がコンクリート内部に浸透・濃縮したものと考えられる。よって、コンクリート内部に Na⁺に代表されるアルカリ金属イオンが供給されることで、ASR が発生した可能性が考えられる。

4.3 粉末 X 線回折

粉末 X 線回折の結果を表-3 に示す。粉末 X 線回折は採取した試料を表面からの深さ 0~1cm の劣化部 (ポッ

プアウト発生箇所) と表面からの深さ 10~11cm の健全部に付けたセメントペースト、骨材及び表面付近の劣化した骨材周囲の白色生成物を対象に実施した。表-3 より、セメントペースト及び骨材周囲の白色生成物では石こう (CaSO₄・2H₂O) が確認された。この結果と図-3 で南面 OH 部の表層付近で SO₄²⁻が高濃度であることを考慮すると、海水に含まれる SO₄²⁻がコンクリート内部に供給されることで生成されたと推測される。

さらに、セメントペーストの劣化部で確認されたハライト (NaCl) は通常緻密なコンクリートであれば、表面から侵入した海水は Na⁺と Cl⁻に分かれて拡散する³⁾。しかし、劣化部のようなポップアウトにより劣化した多孔質なコンクリートでは NaCl のまま内部に侵入し、それが乾湿繰り返し作用を受けることによって結晶化し析出したと推測される。この NaCl の結晶化に伴う膨張圧によって、セメントペーストや骨材が劣化し、写真-1 (a) のような骨材の露出や骨材の表層剥離といった現象が発生したと考えられる。

表-3 粉末 X 線回折結果

対象		同定された物質
セメントペースト	劣化部 (表層)	カルサイト (CaCO ₃)、パテライト (CaCO ₃)、石こう (CaSO ₄ ・2H ₂ O)、ハライト (NaCl)、石英、長石、雲母
	健全部 (内部)	カルサイト (CaCO ₃)、石こう (CaSO ₄ ・2H ₂ O)、水酸化カルシウム (Ca(OH) ₂)、モノサルフェート (3CaO・Al ₂ O ₃ ・CaSO ₄ ・12H ₂ O)、石英、長石、雲母
骨材	劣化部 (表層)	石英、長石、雲母
	健全部 (内部)	石英、長石、雲母
白色生成物		石こう (CaSO ₄ ・2H ₂ O)、石英、長石、雲母

4.4 化学法

化学法の結果を図-6 に示す。試験から得られた溶解シリカ量は 34mmol/L、アルカリ濃度減少量は 37mmol/L であることから、使用した骨材は「無害」という判定が得られた。しかし、図-6 のように結果は「無害」・「無害でない」という判定ラインの近傍に位置していることから、ASR の可能性を否定できない結果が得られた。

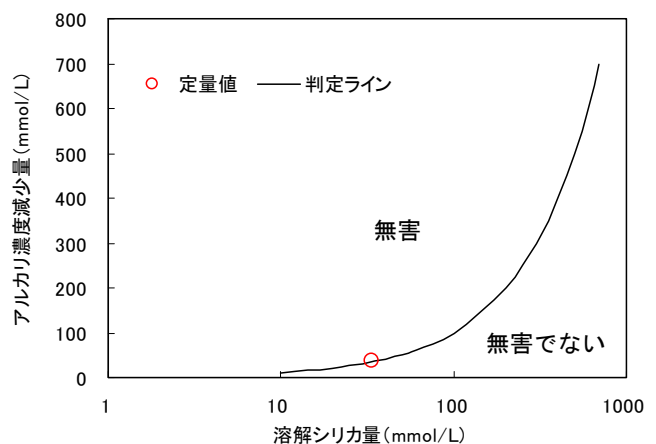


図-6 化学法結果

4.5 促進膨張試験

促進膨張試験結果を図-7に示す。なお、試験は通常13週時点の膨張率により評価⁴⁾するが、今回は長期の挙動を確認するため長期間実施した。図-7より、養生57週時点での膨張率は南面最大0.031%、東面最大0.040%で、有害とされる0.05%以下⁴⁾であり、膨張率は大きくない。しかし、東面・南面ともに緩やかな膨張傾向にあり、さらに膨張率は南面に比べ、東面の方が大きい。以上のことから、現在ポップアウトが発生している南面OH部での将来における新たな変状発現のみならず、現在は劣化が顕在化していない東面においても将来の環境条件の変化次第では劣化する可能性を否定できない結果が得られた。

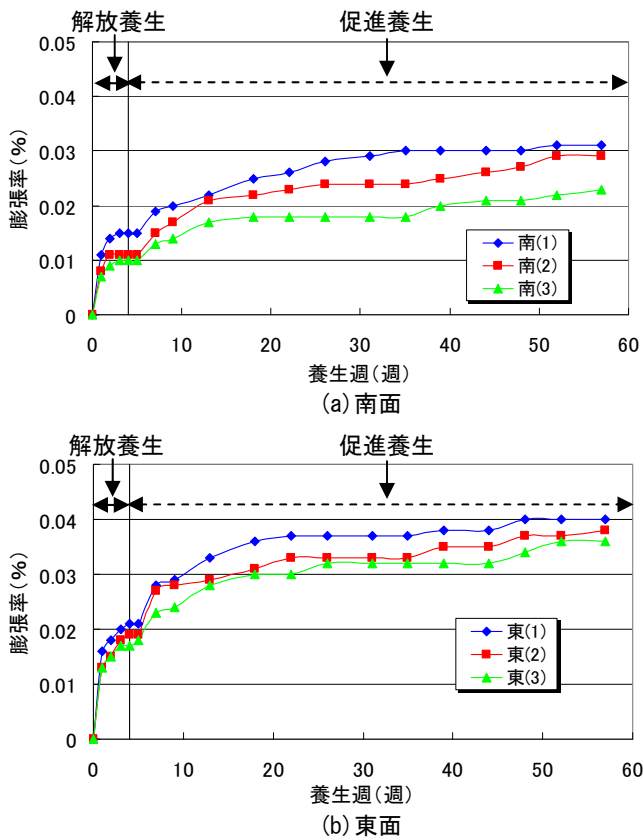


図-7 促進膨張試験結果

4.6 全塩化物イオン濃度試験

全塩化物イオン濃度試験結果を図-8に示す。図-8より、北面・西面では深さ方向の塩化物イオン濃度はどの位置でも同程度であり、高さ方向についてもあまり変化がない。一方で、南面では表面から50mmまでの塩化物イオン濃度が高いが、それ以深では塩化物イオンが浸透していない。さらに、南面OH部とその上部の垂直部との境界高さ (TP+25m) では、南面OH部の塩化物イオン濃度が非常に高い結果となっている。この結果とEPMA分析結果 (図-3) から南面OH部は他面に比べ、海水に含まれる飛来塩分等がコンクリート表面付近に多く浸

透・濃縮していると考えられる。ただし、表面での塩化物イオン濃度の最も高い南面OH部基部についても、表面から90mmの位置で塩化物イオン濃度が 0.28kg/m^3 であることから、鉄筋位置 (表面から100mm位置)での塩化物イオン濃度が腐食発生限界塩化物イオン濃度である 1.2kg/m^3 に達している可能性は少ないと考えられる。よって、塩化物イオンの供給に伴う鉄筋腐食により、ポップアウトが発生した可能性は少ないと考えられる。

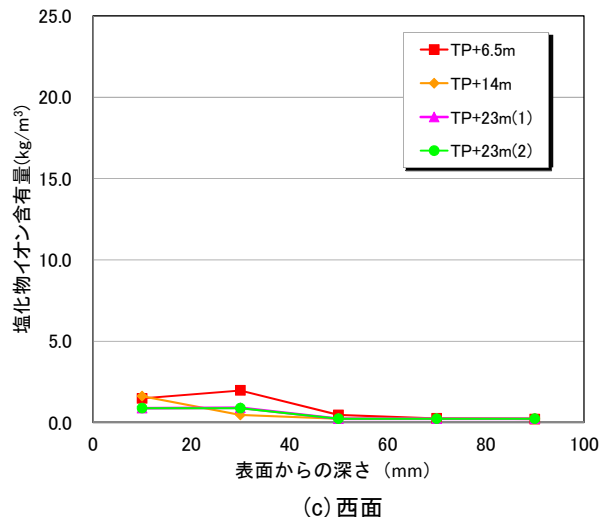
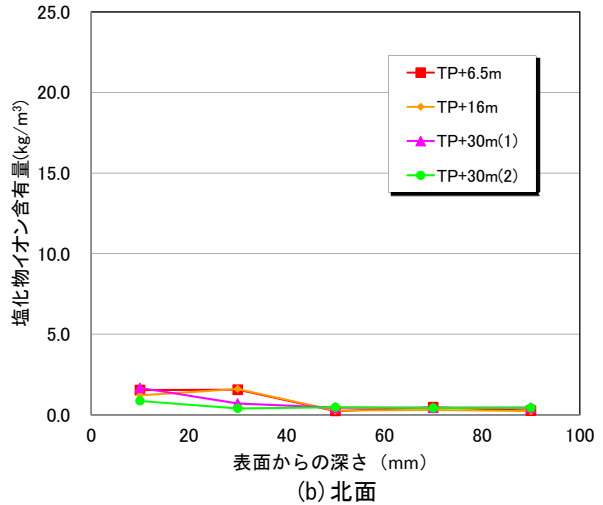
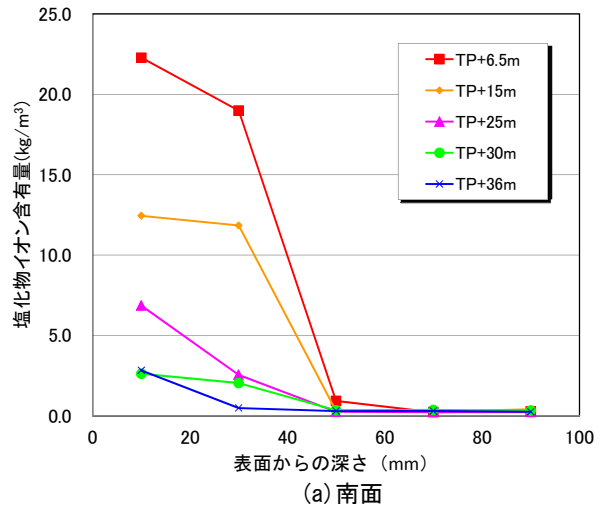


図-8 全塩化物イオン濃度試験結果

5. 劣化原因の推定

標準調査及び詳細調査結果より、劣化原因として海水による侵食や ASR による劣化が複合的に作用しているものと推測される。そこで、海水中に含まれる SO_4^{2-} の影響、環境条件、ASR の観点から劣化原因の推定を行う。

5.1 SO_4^{2-} によるコンクリートの劣化

海水中の SO_4^{2-} がコンクリートに与える影響は、各種規格において規定されており、影響を及ぼす SO_4^{2-} 濃度は数 100～数 1000mg/L 単位⁵⁾とされている。これに対し、海水中の SO_4^{2-} 濃度が 2300mg/L 程度であることから、海水中の SO_4^{2-} によりコンクリートが劣化した可能性が考えられる。

5.2 SO_4^{2-} による骨材の劣化

EPMA 分析結果より、セメントペーストだけでなく、骨材中への SO_4^{2-} の侵入が確認された。よって、海水中の SO_4^{2-} が侵入することにより、エトリンガイトや石こうが生成され、その生成に伴う膨張圧によって骨材自体が劣化した可能性が考えられる。

5.3 乾湿繰り返しの影響

日射の影響を強く受ける南面 OH 部では、他面に比べ、乾湿繰り返しによりコンクリート中に侵入した SO_4^{2-} 等の海水中の成分が濃縮され、劣化が進行したと推測される。

5.4 ASR の影響

南備讃瀬戸大橋 7A アンカレイジには ASR 反応性骨材である流紋岩を使用しているが、高炉セメント B 種を使用しているため、一般的には ASR は発生しにくいと考えられる。しかし、その一方で海水中に含まれる Na^+ に代表されるアルカリ金属イオンが供給されることで ASR が発生した可能性が考えられる。

6. 結論

上記の結果から、南備讃瀬戸大橋 7A アンカレイジで確認されたポップアウトの原因は、海水による化学的侵食+ASR+乾湿繰り返しの複合劣化によるものと判断した。その劣化メカニズムを図-9 に示し、海水の浸透及び乾湿繰り返しによりポップアウトが発生する過程は次のとおりである。

- 1) 乾湿繰り返しを受ける環境で、 SO_4^{2-} 等の海水中の成分がコンクリート内部に浸透・濃縮する。
- 2) SO_4^{2-} の浸透・濃縮による石こうの生成や乾湿繰り返しによる NaCl の結晶化に伴う膨張圧が発生する。さらに、海水中の Na^+ の浸透によるアルカリシリカゲルの生成に伴う膨張圧が発生する。これらの膨張圧によって、表層付近の骨材を覆うセメントペーストの剥離及び骨材自身の劣化が発生する。

- 3) 2)によって露出した骨材が、2)の作用を繰り返し受けることで、骨材の脱落等のポップアウトが発生する。

このポップアウトに対し、発生因子である海水のコンクリート内部への侵入を抑制するために、現在ひび割れ補修及び表面被覆を順次施工している。

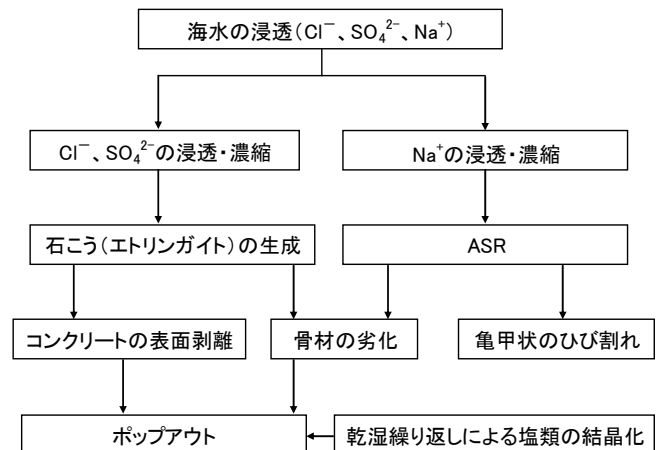


図-9 劣化メカニズム

また、今回の結果ではポップアウトは南面 OH 部でのみ発生している。この点から、海上構造物の箇所毎での乾湿繰り返しや雨水による洗い流しの有無といった環境条件の違いが、コンクリートの劣化に大きな影響を与えることを確認した。よって、今後海上部の大規模コンクリート構造物で、飛来塩分等海水が洗い流されず、乾湿繰り返しを受ける環境にあれば、今回と同様の現象が発生する可能性がある。そのため、点検等で状況を把握し、必要な対策を講じることが必要である。

参考文献

- 1) (社) 日本コンクリート工学協会：コンクリートのひび割れ調査、補修・補強指針-2009-、(社) 日本コンクリート工学協会、pp41-75、2008.9
- 2) (社) 土木学会：コンクリート標準示方書 (設計編) 2007、(社) 土木学会、pp73、2007.7
- 3) 野村昌弘、青山實伸、平俊勝、鳥居和之：北陸地方における道路構造物の ASR による損傷事例とその評価手法、コンクリート工学論文集、Vol.13、No.3、pp108-109、2002.9
- 4) (社) 日本コンクリート工学協会：作用機構を考慮したアルカリ骨材反応の抑制対策と診断研究報告会報告書、(社) 日本コンクリート工学協会、pp208、2008.9
- 5) (社) 土木学会：コンクリートの化学的侵食・溶脱に関する研究の現状、(社) 土木学会、pp124、2003.6