

論文 場所打ちコンクリート構造物におけるエトリングaitの遅延生成に関する検討

鶴田 孝司^{*1}・上田 洋^{*2}・上原 元樹^{*3}・笠 裕一郎^{*4}

要旨：ひび割れを生じた場所打ちコンクリート構造物の劣化原因として、エトリングaitの遅延生成およびアルカリシリカ反応について検討を行った。その結果、セメントペースト中に針状結晶や蟹肉状の生成物が多数確認され、その組成がエトリングaitと類似していたことから、この構造物ではエトリングaitの遅延生成が生じた可能性があると考えられる。またアルカリシリカ反応は生じていたものの、劣化の主要原因ではないと考えられることがわかった。

キーワード：場所打ちコンクリート, DEF, エトリングait, 硫酸塩, 電子顕微鏡, ASR

1. はじめに

コンクリートの劣化現象の1つであるエトリングaitの遅延生成 (Delayed Ettringite Formation: 以下 DEF) とは、硬化後数年を経たコンクリートの内部組織全体に生じる膨張ひび割れであり、ひび割れ部分に大量のエトリングaitが二次生成していることから、DEF と呼ばれている¹⁾。

この DEF に関連したコンクリート劣化の最初の事例は、1970 年代後半のドイツで報告されており、高温養生したプレストレスのまくらぎにおいて製造後数年で発生しているのが確認された²⁾。また、まくらぎ以外の事例として、高温養生されたプレキャストの橋りょうや舗装、パネルなどが報告されている³⁾。場所打ちコンクリートに発生した事例としては、イギリスにおいて単位セメント量が 450kg/m^3 以上と多いマスコンクリートの例⁴⁾がある。このコンクリートでは、内部温度がセメントの水和発熱によって養生中に 85°C 以上へ上昇したことが原因であると考えられている。

一方、日本国内においては、蒸気養生を行ったコンクリート製品における事例として、緑石ブロックや道路の側溝などで DEF による劣化が 2000 年以降に報告されている^{1)・5)}。これに対して、日本国内における場所打ちコンクリートでは、現在のところ DEF による劣化事例は報告されていない。

本研究では、場所打ちコンクリート構造物における劣化事例について各種調査を実施し、DEF による劣化の可能性について検討を行うとともに、他の劣化原因として懸念されたアルカリシリカ反応 (以下 ASR) についても検討を行った。

2. コンクリート構造物の調査

2.1 構造物の諸元

本研究にて調査した構造物は、屋外暴露環境下に置かれているコンクリート構造物であり、対象となる部位の寸法は縦 4000mm ×横 1200mm ×高さ 9500mm 程度の鉄筋コンクリートである。コンクリートの配合は単位セメント量 421kg/m^3 、水セメント比 39%であり早強セメントが使用されている。コンクリートは3回に分けて打込まれており、下端から高さ 2500mm までを第1リフト、高さ 2500mm ～ 5500mm を第2リフト、高さ 5500mm ～ 9500mm を第3リフトと記す。コンクリート打込み時の外気温は記録されていないが、近傍の気象庁のデータから第1リフトで 3°C 程度、第2および第3リフトで 10°C 程度と推定される。また、コンクリートの打込みおよび養生時に保温の措置が取られていたかについてはわかっていない。なお、当該構造物は外部から硫酸イオンが供給される環境下には置かれていなかった。また、当該構造物は定期的に点検が実施されており、構造物および第三者に対する安全性は確保されている。

2.2 構造物の劣化状況

本調査は、当該構造物が建設されてから 10 年程度経過した時点で実施した。当該構造物の劣化状況を図-1, 2 に示す。図-1 に示すように、構造物の第1リフトにおいて、側面 (9500mm × 1200mm の面) に網目状のひび割れが確認されるほか、図-2 に示すように、正面 (4000mm × 9500mm の面) に亀甲状のひび割れが確認され、これらのひび割れには水分が出入りしているように見受けられた。なお第2リフトおよび第3リフトには顕著なひび割れは確認されなかった。

当該構造物のひび割れは、コンクリート内部からの膨

*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) 主任研究員 修士 (理学) (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) 主任研究員 GL 博士 (工学) (正会員)

*3 (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) 主任研究員 博士 (工学) (正会員)

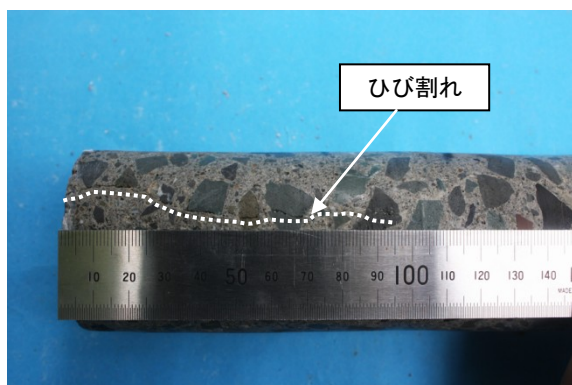
*4 (公財) 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 (コンクリート構造) 副主任研究員 (正会員)



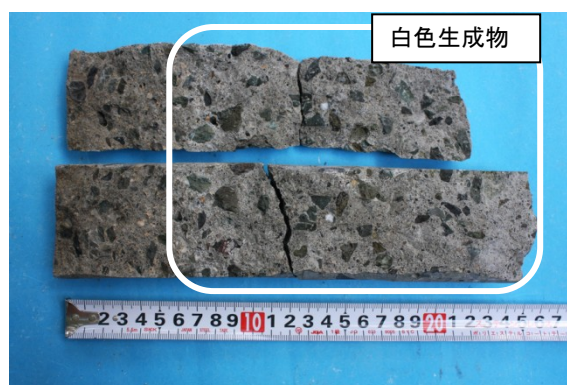
図－１ 構造物の劣化状況



図－２ 構造物の劣化状況



図－３ 構造物から採取したコアの外観



図－４ 構造物から採取したコアの割裂面

張により生じたと推測し、現地の状況や環境条件なども踏まえて ASR と DEF について検討することとし、コンクリートコアを採取して各種分析を実施した。

3. コンクリートの各種分析・解析

3.1 分析・解析内容

当該構造物からコンクリートコアを採取し、その外観観察を行った後に各種分析を実施した。分析内容は電子顕微鏡による生成物の観察およびエネルギー分散型 X 線分析（以下 EDS）による組成分析と粉末 X 線回折による生成物の同定、使用骨材の評価、蛍光 X 線装置を用いたセメント分の組成分析および促進膨張試験である。また場所打ちコンクリートの内部温度がセメントの水和発熱によって養生中に上昇した可能性が考えられるため、コンクリート打込み時の温度解析により内部温度の推定を行った。

電子顕微鏡観察には熱電子銃型走査電子顕微鏡を用い、加速電圧 15kV、試料雰囲気低真空(30Pa)の条件に

て、骨材周辺やセメントペースト相の生成物の状況を確認した。EDS による組成分析は、標準試料を用いない半定量による手法を用いた。粉末 X 線回折による生成物の同定は、採取した試料をすりつぶし、X 線回折装置を用いて分析した。使用骨材の評価は、骨材の試験成績書による化学法の結果の調査および偏光顕微鏡観察を行った。偏光顕微鏡観察はコンクリートコアから薄片(25mm×30mm)を作製し、ASR を引き起こす可能性のある反応性鉱物の有無について確認した。蛍光 X 線装置は波長分散型蛍光 X 線分析装置を使用し、立松ら⁶⁾による蛍光 X 線法にてセメント分の各元素の含有量を酸化物量として推定した。促進膨張試験は JCI-DD2 に準拠した温度 20℃ 相対湿度 95%以上の環境下で 28 日養生後、温度 40℃ 相対湿度 95%以上の環境下で 161 日間養生するものと、温度 20℃ の水中にて 617 日間養生する 2 種類の試験を各 4 本のコアを用いて実施した。温度解析については、三次元有限要素法による解析ソフト (ASTEAMACS Ver.8) により、2.1 節に記載した諸条件を用いて構造物のモデル

を作成し、調査によりひび割れが確認された当該構造物の第1リフトにおけるコンクリート打込み後の内部温度の履歴を推定した。なお、コンクリートの打込み時の温度はマスコンクリートのひび割れ制御指針改正調査委員会報告書⁷⁾にならない外気温に5℃を加えた値とし、養生条件は打設時期が冬季であることを考慮し、打込み後2日目までは保温養生（熱伝達率 2.0W/m²℃）を、さらに5日目までは型枠による養生（打継面：熱伝達率 5.0W/m²℃、型枠面：熱伝達率 8.0W/m²℃）を行い、あとは外気に露出した（熱伝達率 14.0W/m²℃）と仮定した。

3.2 分析結果

(1) コンクリートコアの採取および外観観察

コンクリートコアの採取は、当該構造物のひび割れを含む箇所およびひび割れの生じていない箇所から採取した。ひび割れから採取したコアの外観を図-3, 4に示す。図-3に示すようにひび割れは表面から約100mmの深さまで生じており、図-4に示すようにひび割れに沿ってコアを割裂した面（以下割裂面）に白色生成物が多量に確認された。また、当該構造物の別の箇所においても同様

のひび割れが生じており、ひび割れ箇所から採取されたコアの割裂面からは同様の白色生成物が確認された。

(2) 電子顕微鏡による観察

(1)で採取したひび割れを含む箇所のコンクリートコアを用いて、生成物を確認するために電子顕微鏡観察による観察および生成物のEDSによる組成分析を実施した。観察した箇所は、割裂面およびコンクリートコアをコンクリートカッターにて切断した試料を用いた切断面である。

電子顕微鏡による観察結果を図-5, 6および図8~12に示す。割裂面の白色生成物を観察した結果、図-5に示すように結晶が多数生成しているのが確認され、この結晶は拡大すると図-6に示すように針状結晶であった。この白色生成物を欠き取り、粉末X線回折にて化合物を同定した結果、図-7に示すようにエトリンガイトが確認された。なお図-7の石英と長石類は骨材から、水酸化カルシウムはセメント分から混入したと考えられる。またEDSによる組成分析結果でもS, Al, Caが確認され、その組成比もエトリンガイトと類似していた。このことから、こ

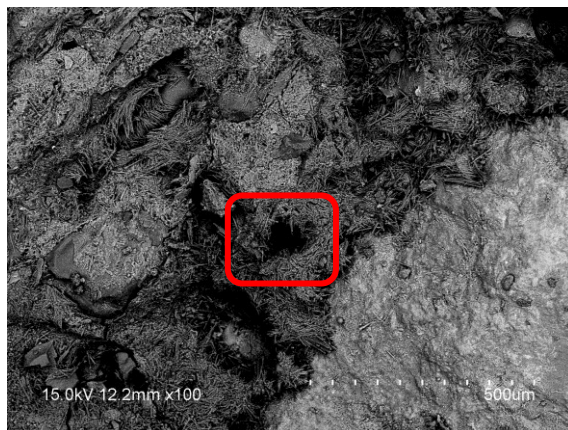


図-5 割裂面の観察結果（その1）



図-6 図-5 赤線部の拡大写真

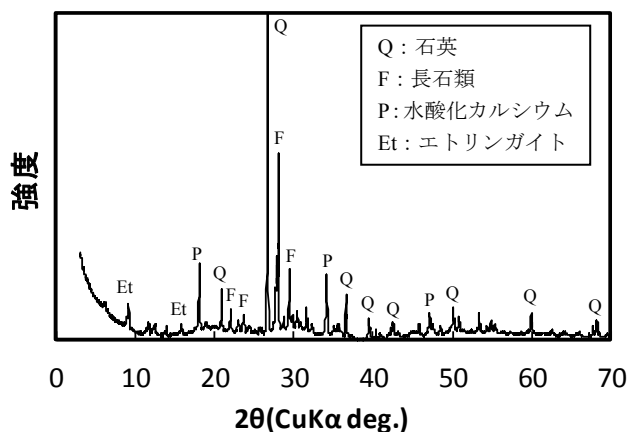


図-7 白色生成物の粉末X線回折結果

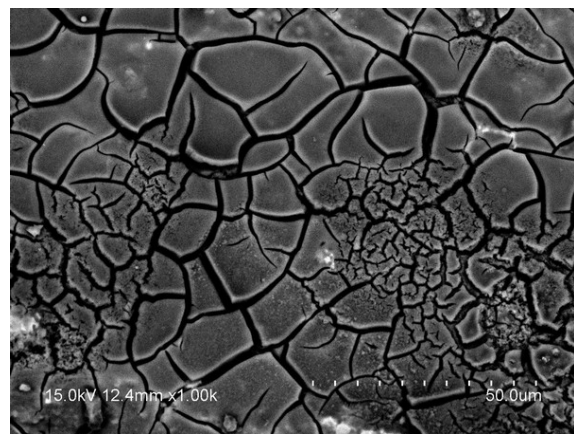
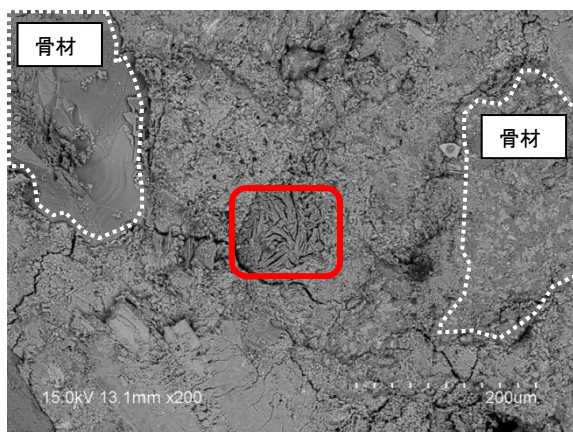
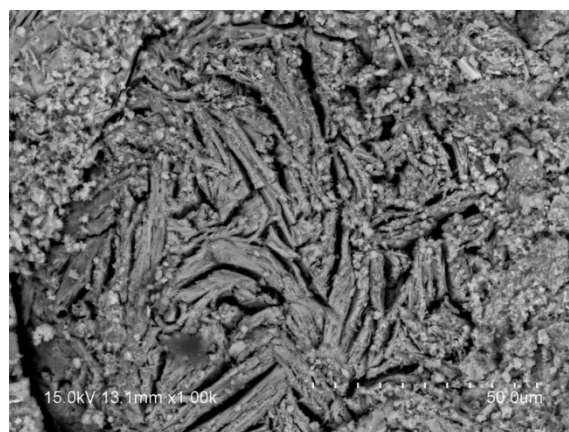


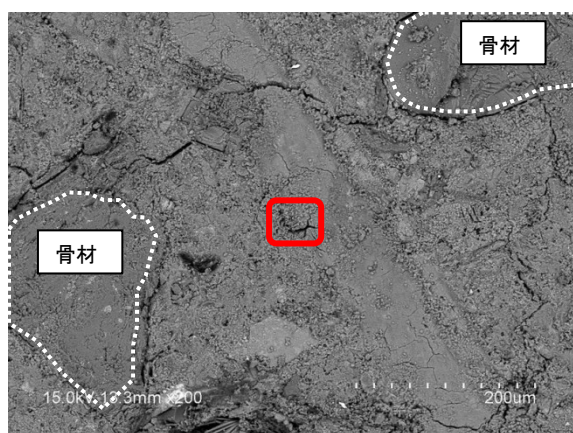
図-8 割裂面の観察結果（その2）



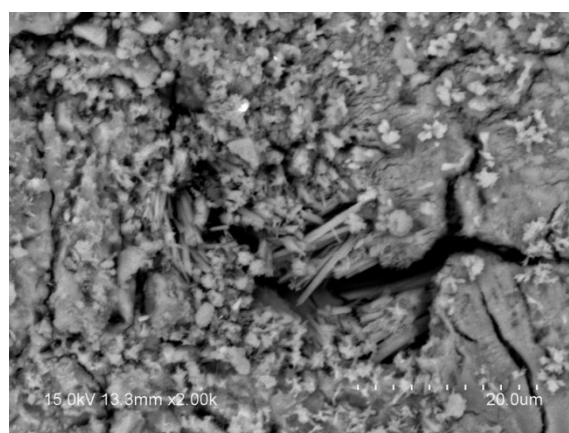
図－ 9 切断面の観察結果（その 1）



図－ 1 0 図－ 9 赤線部の拡大写真



図－ 1 1 切断面の観察結果（その 2）



図－ 1 2 図－ 1 1 赤線部の拡大写真

の白色生成物は主にエトリンガイトであると考えられる。また割裂面には図-8 に示すようにゼリー状のゲルが確認されたが、骨材とセメントペーストとの界面に点在している程度であった。このゲルの EDS による組成分析結果では、Si を主体とし Na および K を相当量含むことから、アルカリシリカゲルであると推定される。

コンクリートコアの切断面を観察した結果、図-9, 10 に示すようにセメントペースト中に蟹肉状の生成物が多数確認された。また図-11, 12 に示すように、セメントペースト中に針状結晶があり、その周囲に図-10 と同様の蟹肉状の生成物が確認された。これらの結晶の EDS による組成分析結果では S, Al, Ca が確認され、その組成比も

エトリンガイトと類似していた。このことから、針状結晶および蟹肉状の生成物は、エトリンガイトまたはこれに類した物質であると考えられる。なお蟹肉状の生成物は、エトリンガイトの生成途中の段階であると考えられる。

(3) 使用骨材の評価

骨材の試験成績書によると、表-1 に示すように当該構造物の使用骨材は細骨材が川砂・山砂・砕砂の混合であり、粗骨材は碎石であった。またいずれの骨材も化学法の結果は無害であった。偏光顕微鏡にて観察を行った結果、細骨材は石英を主体としたものであり、ASR を引き起こす可能性のある反応性珪物は細骨材中の微小石英で

表－ 1 使用骨材の化学法結果（配合表より）

骨材種	細骨材			粗骨材
	川砂	山砂	砕砂	
混合率	50%	20%	30%	—
Sc	64	38	11	11
Rc	95	104	65	65
判定結果	無害	無害	無害	無害

表－ 2 セメント分の組成分析結果

	分析結果		JIS R 5210
Na ₂ O	0.13%		—
K ₂ O	0.29%		—
R ₂ O	0.32%		0.60%以下
SO ₃	2.49%		3.5%以下

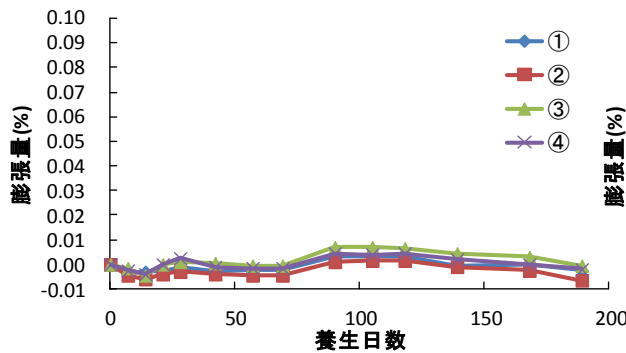


図-1 3 温度 40℃, 相対湿度 95%以上
における促進膨張試験結果

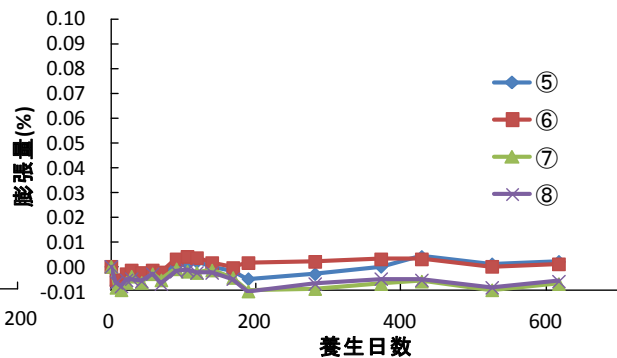


図-1 4 温度 20℃, 水中における
促進膨張試験結果

あるが、その量がわずかであった。また粗骨材は玄武岩が一部変質した岩石が主体であり、ASRを引き起こす可能性のある反応性珪物は確認されなかった。

(4) 蛍光 X 線を用いたセメント分の組成分析

表-2 に当該構造物のセメント分の組成分析結果を示す。アルカリ総量は 0.32%であり、JIS R 5210「ポルトランドセメント」における早強ポルトランドセメント（低アルカリ型）の規定値である 0.6%より低く、ASR を引き起こしやすい環境とはいえないことがわかった。また SO_3 の量も 2.49%と JIS R 5210 の早強ポルトランドセメントの規定値である 3.5%より低い値であることがわかった。

(5) 促進膨張試験

図-13 にコンクリートコア 4 本を用いた温度 40℃、相対湿度 95%以上での 161 日間養生における促進膨張試験結果を、図-14 にコンクリートコア 4 本を用いた温度 20℃での水中での 617 日間養生による促進膨張試験結果を示す。いずれの養生方法においても、試験期間中における試料の膨張は確認されなかった。

(6) コンクリート内部の温度解析

図-15 にコンクリート内部の最大温度の分布図を、図-16 に第 1 リフトの温度履歴を示す。温度解析の結果、構造部の中心に近いほど最高温度が高く、第 1 リフトに

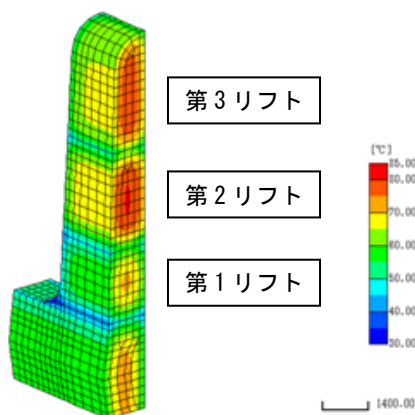


図-1 5 温度解析により得られた最大温度の分布

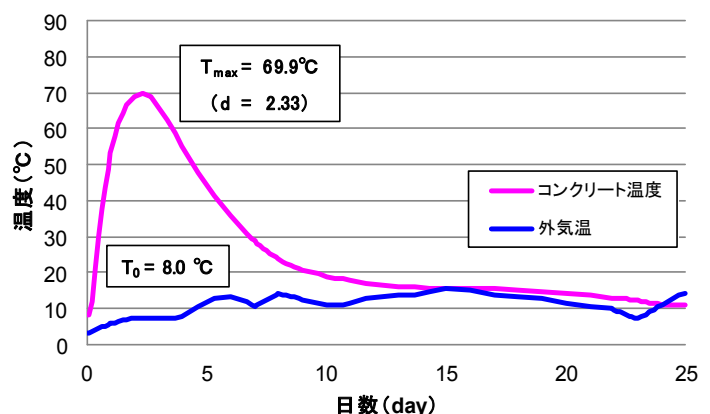


図-1 6 第 1 リフトの温度履歴

におけるコンクリート内部の最大温度は 69.9℃になった。

3.3 考察

前節の分析結果から当該構造物の劣化原因として ASR の可能性について検討を行うとともに、電子顕微鏡観察においてエトリンガイトが多量に確認されたことや、打込み時の内部温度の上昇が懸念されることから、硫酸塩による劣化、特に DEF について検討を行った。

(1) ASR に関する検討結果

ASR の可能性については、JCI-DD2 法に準拠した促進膨張試験の結果ほとんど膨張傾向を示さなかったことや、セメント中のアルカリ総量が JIS R 5210 早強ポルトランドセメントの規定値より低いことから、ASR による膨張が既に収束したか、ASR による膨張の程度が低い可能性が考えられる。電子顕微鏡観察の結果よりゼリー状のアルカリシリカゲルが確認されたことから、当該構造物では ASR は生じていたと考えられる。しかし、アルカリシリカゲルは点在している程度であることや、偏光顕微鏡観察の結果からアルカリシリカ反応性珪物の量はわずかであることから、当該構造物に生じた ASR による膨張の程度は低いと考えられる。

(2) DEF に関する検討結果

コンクリートコアに生じた多量の白色生成物がエトリンガイトであることから、当該構造物が DEF を生じてい

る可能性について検討した。電子顕微鏡による切断面の観察の結果から、図-9～12に示すようにセメントペースト中に針状結晶や蟹肉状の生成物が多数確認されたこと、EDSによる組成分析結果ではS,Al,Caが確認され、その組成比もエトリンガイトと類似していたことがわかった。すなわち、当該構造物のセメントペースト中にはエトリンガイトに近い組成の生成物が多数存在していることがわかった。これらセメントペースト中の針状結晶や蟹肉状の生成物は、観察された状況から判断して、セメントの水和反応の初期に生成するエトリンガイトとは異なり、周りのセメントペーストが硬化した後の自由空間が少ない箇所でも生成したと考えられる。このことから、当該構造物ではセメントペーストが硬化後に遅れてエトリンガイトに近い組成の結晶が生成した、つまりDEFが生じた可能性があると考えられる。

また温度解析による結果から、第1リフトのコンクリート内部の最高温度が70℃近くと、海外におけるDEFの発生を抑制するためのコンクリートの最高温度として適用している例がある⁷⁾温度となった。この解析結果は、気温や保温養生などの仮定が入ることから、実際の構造物の内部温度を必ずしも示してはいないが、早強セメントを使用し、単位セメント量が高い配合で打ち込まれた、ある程度の体積を有する場所打ちコンクリートでは、内部温度が高くなることから、DEFが生じる環境に置かれた可能性が考えられる。なお、図-15ではひび割れが顕著でなかった第2リフトおよび第3リフトの方が、第1リフトに比べて最高温度が高くなっている。これは、温度解析においてすべてのリフトでの養生を2日間の保温養生と仮定したためと推測され、第2リフトおよび第3リフト打込み時の気温は10℃前後であったことから、実際には保温養生を行っていない可能性が考えられる。

なお、水中養生による促進膨張試験の結果、養生617日間で膨張傾向を示さなかったことから、羽原ら⁸⁾の実験によるコンクリート供試体を用いた水中養生によるDEFの促進膨張試験の結果とは一致しない。羽原らの実験では硫酸カリウムをSO₃量としてセメントの2%分を添加したコンクリート供試体を使用しているため、エトリンガイトの生成状況や促進試験における膨張率については、本研究とは異なる結果になると考えられる。また、DEFによる膨張が既に収束していた場合には水中養生による試験においても膨張傾向を示さない可能性があるほか、コンクリート内部の水分状態が影響した可能性もあり、これらの影響については今後さらなる検討が必要であると考えられる。

4. まとめ

本研究にて調査した場所打ちコンクリート構造物における各種分析および解析結果、および劣化原因としてのASRおよびDEFの可能性について検討した結果をまとめると以下の通りである。

- (1) 当該構造物の外観調査の結果、網目状や亀甲状のひび割れが確認されたことからASRが懸念されたが、分析の結果ASRは生じていたものの、劣化の主要原因ではないと考えられることがわかった。
- (2) コンクリートコアに生じた多量の白色生成物がエトリンガイトであることから、当該構造物がDEFを生じている可能性について検討した。その結果、セメントペースト中に針状結晶や蟹肉状の生成物が多数確認され、その組成がエトリンガイトと類似していたことから、当該構造物ではDEFが生じた可能性があると考えられる。

参考文献

- 1) 羽原俊祐, 小山田哲也, 谷村 充: エトリンガイトの遅延生成によるコンクリートの膨張劣化(日本における事例), 硫酸と工業, 平成24年6月, pp.61-69, 2012.6
- 2) Mielenz, R.C., Marusin, S.L., Hime, W.G., and Jugovic, Z.T.: Investigation of Prestressed Concrete Railway Tie Distress, Concrete International, Vol.17, No.12, pp.62-68, 1995
- 3) Hime, W.G., Delayed Ettringite Formation – a concern for precast concrete?, PCI Journal, Vol.41, pp.26-30, 1996
- 4) Hobbs, D.W.: Expansion and Cracking in Concrete Associated with Delayed Ettringite Formation, Ettringite – The Sometimes Host of Destruction, ACI SP-177, pp.159-181, 1997
- 5) 川端雄一郎, 松下博通: 高温蒸気養生を行ったコンクリートにおけるDEF膨張に関する検討, 土木学会論文集E2(材料・コンクリート構造), vol.67, No.4, pp.549-563, 2011
- 6) 立松英信, 高田潤: 蛍光X線法によるアルカリ量・塩素量の推定, 土木学会第45回年次学術講演会, pp.450-451, 1990
- 7) 日本コンクリート工学会編: マスコンクリートのひび割れ制御指針改定調査委員会報告書, 2014
- 8) 羽原俊祐, 福田峻也, 小山田哲也, 藤原忠司: コンクリートのDEFによる硫酸塩膨張の生起条件の検討, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.28, pp.743-748, 2006