

屋上防水コンクリートの劣化原因分析

吉 田 清 司

第一工業大学 自然環境工学科

食品工場の屋上防水コンクリート劣化原因について調査した。調査の結果、以下の原因が考えられた。化学的分析の観点からは、食品製造原料の糖分によるコンクリートへの浸食作用が主要因であると考えられた。また、物理的試験の結果、屋上コンクリートという環境条件から、夏期における乾燥繰り返し作用および冬期における凍結融解作用によって劣化が助長されたものと考えられた。

MICROBIOLOGICAL AND CHEMICAL ANALYSES OF DETERIORATED WATERPROOF CONSTRUCTION ROOF CONCRETE

Seiji YOSHIDA

Abstract

Deterioration cause of waterproof construction roof concrete was investigated in food factory. It was thought that the main cause was the result that the sugar of food production raw materials acted on concrete. In addition, it was thought that deterioration was promoted from the result of the physical examination as for the deterioration of the concrete by dry repetition action in the summer and action to freeze thaw in the winter season.

Key Words : *Deterioration of concrete, Elution of calcium, Sugar, Microorganism, chemical analysis*

1. はじめに

某食品工場の屋上防水押さえコンクリート表面が剥離するという現象が発生し、その原因について化学的に調査した。当工場は竣工後、約 8 年経過しており、アイスクャンデーの製造原料として砂糖、牛乳、ヒマシ油、香料、塩化カルシウムが使用されている。現場の事前調査では、①コンクリート部分が変色のない箇所と変色、および剥離している部分が認められる。②変色している箇所が排気口（ルーフファン）周辺に多い。③剥離していない表面に、黄変した模様が認められる。④ひび割れ部の一部から水和成分と考えられるものが析出している。⑤表面部分が凸状に膨れている箇所が見受けられる。などの目視観察が行われている。これらの現象を踏まえ、剥離原因の検討にあたっては、コンクリートの一般的な物理性状試験はもちろんであるが、食品工場などで時々問題となる生物化学的作用によるコンクリートの劣化についても調査



Fig.1 屋上に設置された排気塔

することが必要であると思われ、今回、生物化学的な分析を行ったので報告する。

2 調査方法

2-1 排気の分析

コンクリートを劣化させる原因物質に関する調査としては、Concrete Technology, vol.1, Properties of Materials, D.F.Orchard の調査結果が有り、それによると 167 種に上る化学物質が記載されている。

今回の分析では、工場内部から排出されるであろうと思われる使用原料が特定されているので、分析項目として、全糖、全窒素、塩素、COD(Chemical Oxygen Demand)、を測定した。全糖はブドウ糖量として換算した。全窒素の測定は乳製品有無の推定のために行った。乳製品はタンパク質を含み、窒素を構成成分としている。塩素の測定は NaCl, CaCl₂ 有無の推定のために行った。COD の測定はトータル的な有機物質量の把握のために行った。コンクリートの剥離、変色部分は排気口付近が多いということで、もし、屋上のコンクリートに有害な物質が飛来侵入するとすれば、この排気口からの影響が大きいのではないかと考えられた。そこで、この排気口から排出される化学物質の分析を試みた。

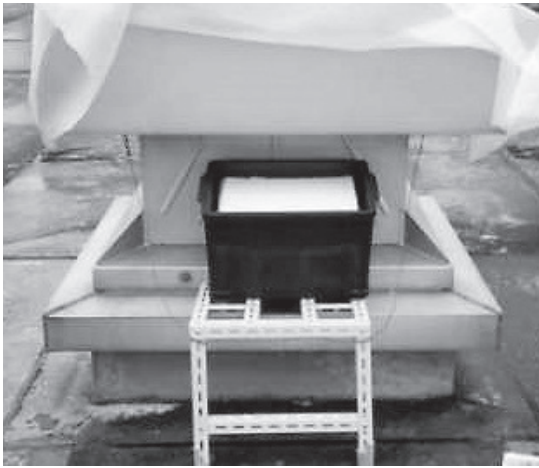


Fig.2 排気捕集装置

排気口は、工場 2 階および 3 階屋上に多数配置されており、全ての排気口について分析を行うのが理想的である。しかし、これらの排気口から常時排気が行われているとは限らないため、調査にあたっては調査期間中稼働する排気口を工場側から指示してもらい、その内の 2 階排気塔 3 ヶ所について、排気捕集装置を設置した。排気塔の位置および排気捕集装置の概観を Fig.1~2 に示す。装置は排気物質を捕集するために、33cm×46cm×30cm のプラスチック容器内に、30cm×40cm のろ紙を底面から 27cm 上にセットした。ろ紙を常時湿った状態に保つために、容器に水道水を満たし、ろ紙を容器底面まで垂らした。容器内の水は蒸発するため 7~10 日毎に補給した。捕集 62 日後、3 ヶ所のろ紙を回収し、まとめて細かく裁断し、2 l の水に分散攪拌して、水に可溶性成分の分析を行った。また、ろ紙に捕集された物質がろ紙を通して容器内の水に溶出することも考えられたので、分析にあたっては、容器内の水についても分析し、ろ紙捕集分と合算して表示した。分析項目として、全糖、全窒素、塩素、COD を測定した。全糖は

ブドウ糖量として換算した。全窒素の測定は、乳製品有無の推定のために行った。乳製品はタンパク質を含み、窒素を構成成分として含有している。塩素の測定は、NaCl、CaCl₂ 有無の推定のために行った。COD 測定は、トータル的な有機物質量の把握のために行った。

2-2 劣化および未劣化コンクリートの分析

コンクリート中に劣化に影響を及ぼすとされる原因物質がどの程度含まれているのかを、2 階および 3 階部分の剥離コンクリート、2 階部分の未劣化コンクリートおよび一般のコンクリートを使用して分析した。

劣化コンクリートについては、2 階および 3 階部分の剥離状態のコンクリート片を、未劣化コンクリートについては、2 階ひさし部の雨掛かりの少ない場所をコアボーリングした試料の上部 1 cm の部分を 2 mm 以下に粉碎して分析した。分析は、全糖、全窒素、塩素に加え、エーテル抽出物質、強熱減量、pH の項目について行った。エーテルは抽出物質は油分、強熱減量は固体の有機物量を示す。

2-3 糖、カゼインおよび牛乳のコンクリートへの浸透

コンクリートが劣化原因物質によって劣化すると仮定した場合、これらがコンクリートに影響を与える順序として、最初にコンクリート表面にこれら物質が付着し、さらにコンクリートの間隙に侵入して全体に影響が広がることが予想できる。そこで、糖液と牛乳および乳製品成分であるカゼイン溶液を用いてコンクリートへの浸透実験を試みた。

試験方法は、コアボーリングした直径 8mm 高さ 60mm の未劣化コンクリートを半割にし、両底面を除く側面を液が浸透しないように樹脂でコーティングして液が底面から上面に向かって浸透する方法を取った。Fig.3~4 に浸透試験の様子を示す。使用した糖液は蔗糖を水道水に溶解し、5、20、50%液として調製した。また、牛乳は 200ml あたりタンパク質 6.8g、糖質 9.5g、脂質 8.0g、ナトリウム 91mg、カルシウム 227mg のものを使用した。カゼインについては、水道水で 0.5%に調製した。静置してから 2 ヶ月後、試料を取り出し、上部 1 cm の部分を 2 mm 以下に粉碎し、その粉末について全糖および全窒素を分析した。

2-4 糖およびカゼインによる Ca²⁺の溶出試験

コンクリートの劣化原因の一つとしてコンクリート中の Ca イオンの溶出が考えられる。そこで、糖溶液がコンクリートの Ca イオン溶出に影響を

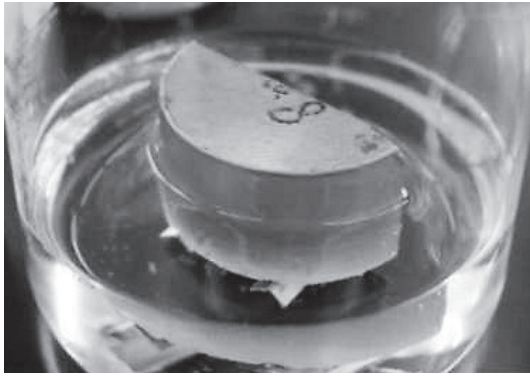


Fig.3 半割試験体の浸透試験状況



Fig.4 糖、カゼインおよび牛乳の浸透試験状況

及ぼすかどうかについて検討した。試験は、糖（0、5、20、50%）およびカゼイン（0.5%）溶液を調製し、溶液 1500ml 中にコアボーリングしたコンクリート試料を半割りにしたものを浸漬し、2 ヶ月後に溶液の Ca イオン濃度を測定した。Fig.5 に糖およびカゼイン溶液によるコンクリートからの Ca イオン溶出試験の様子を示す。

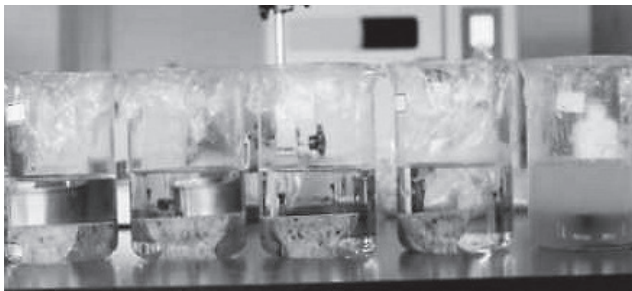


Fig.5 糖、カゼインの浸透試験状況

2-5 嫌気性バクテリアの分析

糖などの有機物質と嫌気性バクテリアがコンクリートの間隙に侵入し、嫌気性発酵が起こると酸性物質が生成され、コンクリート劣化の遠因になることも考えられるので、嫌気性バクテリアの分析を行った。試験は剥離劣化コンクリートを 2 mm 以下に粉碎したものを滅菌水に分散し、普通寒天培地に塗布して 30℃ の嫌気ジャーで培養した (Fig.6)。

3 結果

3-1 排気口から得られた化学物質の分析



Fig.6 嫌気ジャーによる嫌気性菌の培養

Table 1 排気口捕集物質の分析結果

| 分析項目 | 分析値 |
|---------------|-------|
| 全糖 | 5.4g |
| 全窒素 | 1.8g |
| 塩素 | 17.7g |
| COD から求めた有機物質 | 7.6g |

排気口から得られた化学物質の分析結果を Table 1 に示す。結果から分析項目物質は全てについて検出され、これらの物質がコンクリートに付着し、コンクリートに何らかの悪影響を及ぼしたことが示唆された。分析値は排気塔 3 ヶ所の合計として表示した。すなわち、一つの排気塔からは東西南北 4 口から分流排気され、排気面積は $80 \times 24 \times 4 = 7,680 \text{ cm}^2$ となり、さらに捕集装置を 3 ヶ所の排気塔に設置したので、分析結果はこれら 3 ヶ所の排気塔 ($7680 \times 3 = 23,040 \text{ cm}^2$) から排出されたものとして表示した。Fig.7 に排気捕集後のろ紙表面を示した。

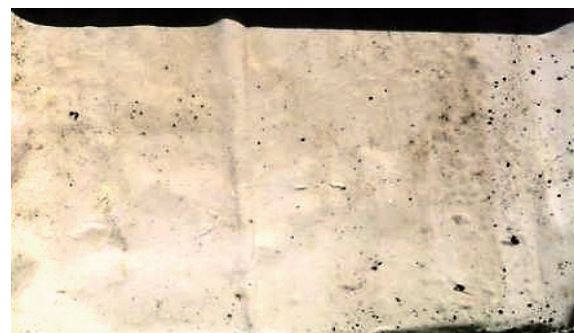


Fig.7 排気口から排出された物質を捕集したろ紙表面の状況

3-2 劣化および未劣化コンクリートの分析

分析結果は Table 2 に示すとおりである。全糖については乾燥粉末当たり 0.04~0.08% の糖成分が検出された。全糖として検出されるものについて

ては、糖分の他に木片等のセルロースなども含まれる。未劣化コンクリートと劣化コンクリートを比較すると、劣化コンクリートに含まれる糖分が若干減少している。また、フレッシュなコンクリートに含まれる全糖は 0.06%程度であり、分析した数値を持って糖がコンクリートに影響を与えたとは考えづらい。全窒素については、未劣化コンクリートでは検出限界であったが、劣化部のコンクリートでは検出された。このことは工場内から製品原料物質が排気口から排出されていることを示唆するものである。エーテル抽出物質および塩素については検出限界以下で検出されなかった。強熱減量については、2階剥離コンクリートのものが若干大きい値となった。pH については剥離部分の値が 11.1、未劣化部の値が 12 であり、剥離部についてはセメントの中性化が進んでいると思われた。なお、表中空白部については測定を行わなかった。

Table 2 劣化および未劣化コンクリートの分析

| 分析項目 | 2F 剥離部 | 3F 剥離部 | 2F 未劣化部 | 市販コンクリート |
|-------------|---------|---------|---------|----------|
| 全糖(%) | 0.05 | 0.04 | 0.08 | 0.06 |
| 全窒素(%) | 0.06 | 0.03 | 0.1 以下 | |
| エーテル抽出物質(%) | 0.05 以下 | 0.05 以下 | | |
| 塩素(%) | 0.1 以下 | 0.1 以下 | | |
| 強熱減量(%) | 12.8 | 8.7 | 8.7 | |
| pH | 11.1 | 11.1 | 12.0 | |

3-3 糖、カゼインおよび牛乳によるコンクリートへの浸透

糖およびミルクのコンクリートへの浸透試験の結果を Table 3 に示す。糖液については 5～50%濃度に至るまでコンクリートの間隙を浸透することが認められた。一方、牛乳およびカゼインについては検出限界以下となり、タンパク質の浸透は認められなかった。

Table 3 試験片上面 1cm 部分の浸透物質含有量

| 浸透物質 | 全糖 (%) | 全窒素 (%) |
|-----------|--------|---------|
| 糖液 5% | 1.3 | |
| 糖液 10% | 1.63 | |
| 糖液 50% | 1.09 | |
| カゼイン 0.5% | | 0.02%以下 |
| 牛乳 | | 0.02%以下 |

3-4 糖およびカゼインによる Ca イオンの溶出

糖およびカゼインによる Ca イオンの溶出試験結果を Fig.8 に示す。糖溶液については糖を含まない水道水のみが 2.7ppm でコンクリート塊からほとんど Ca イオンの溶出が認められなかつ

た。これに対して、糖溶液中ではコンクリート塊から Ca イオンの溶出が非常に大きくなることが認められた。また、カゼイン溶液の中においても Ca イオンの溶出が大きくなることが認められた。

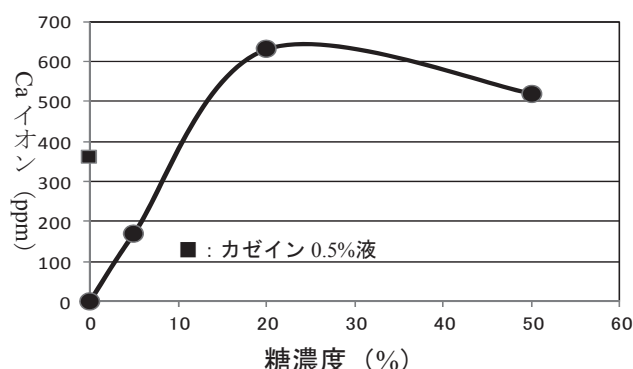


Fig.8 糖濃度と溶出 Ca イオンとの関係

3-5 嫌気性バクテリアの検出

試料を普通寒天培地に塗布培養し、25 日後、シャーレに生育したコロニー数をカウントした結果、劣化コンクリート 1g 当たり 2×10^4 個のバクテリアが検出された(Fig.9)。赤点はコロニー計数の跡を示す。また、培養シャーレにリトマス試験紙を置くと酸性を示し、pH はおよそ 4～5 を示した(Fig.10)。



Fig.9 嫌気性細菌の検出

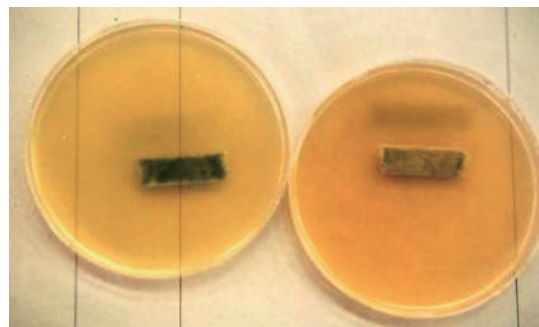


Fig.10 培養後シャーレのリトマス pH 試験
(左：使用前の無菌シャーレ、リトマス紙は中性。
右：嫌気培養後のシャーレのリトマス紙は酸性を示す黄橙色を示した。)

4 考察

4-1 屋上排気口からの排出物質の調査

筆者は実験開始前、分析項目を決めるために工場関係者から、工場で使用されているおおよその製品原料のヒアリングを行った。分析項目はヒアリングを基に決められたものであるが、当初、果たして排気口から分析項目に該当する物質が検出されるのかどうか半信半疑であった。しかし、分析の結果は Table.1 に示すとおりである。絶対量は別にして排気口からコンクリートを劣化させるとみられる糖分や塩化カルシウムに起因すると思われる塩素が検出された。ただ、これらの物質が検出されたからといって、直ちに今回の劣化がこれらの物質によるものであるとの解釈は出来ない。これらの物質が直接劣化の原因となるためには、コンクリートに及ぼす量、水溶液濃度、接触時間、温度など解明する問題は少なくない。しかし、問題は Fig.7 に示す捕集後のろ紙が示すように、今回の調査によって、問題とされる物質が排気口から排出されているという事実である。

4-2 劣化および未劣化コンクリートの化学分析

剥離劣化部分のコンクリートに原因となる物質の痕跡がないかどうかを未劣化部分のコンクリートとともに分析を試みた。結果は Table 2 に示すとおりである。2F 未劣化コンクリートに比べ、劣化部分に含まれる糖含量が若干少ない結果となっている。糖含量の比較を行う前に、コンクリートの中に糖成分が検出されることは一般的なのかどうかを調べるために、市販コンクリートブロックを購入して分析してみた。その結果、0.06%の糖を含んでいることが分かった。また未劣化部分のコンクリートに含まれる糖含量は 0.08%であった。このことから、フェノール硫酸法で分析したコンクリートには、一般に 0.06%程度の糖分が検出されることが分かった。したがって、剥離劣化部分のコンクリートに含まれる糖量 0.04~0.05 は多いのか少ないのかと言う比較はあまり意味のないように思われる。強いて 0.08%より小さい値となった理由を上げるとすれば、未劣化部分のコンクリート試料は雨水の影響をほとんど受けない部分であり、剥離劣化部分のコンクリートは雨水の影響を強く受ける部分である。したがって、雨水の影響を受けたコンクリートは糖分が洗い流されたと解釈することができる。また、前述の排気口から検出された糖との関係で、もう少し量的に検出されても良いのではないかと指摘される向きもあると思われる。排気口から検出される糖量にもよるが、糖分はバクテリアによって容易に分解・資化される物質であることを考慮すれば、痕跡程度として検出されても不思議ではない。全窒素の

分析については、試料となる剥離劣化部分のコンクリートには空気中からの不純物質とみられるものが肉眼でも確認でき、それらの影響を受けて、2F および 3F の剥離部コンクリートに含まれる量が多かったものと思われる。エーテル抽出物質および塩素については、いずれも検出限界以下であった。

4-3 糖およびカゼインのコンクリートへの浸透

コンクリートはポーラスな固体であることは言うまでもない。本試験を行う意味については、それほど重要性は無いものの、糖やタンパク質の溶液が現場のコンクリート中に浸透していくものなのかどうか調べた。結果は Table 3 に示すとおりである。この結果から、糖液については、50%濃度まで十分コンクリートに浸透することが知れた。一方、カゼインおよび牛乳についてはコンクリートへの浸透は起こらなかった。タンパク質は水中でコロイド状態になるため、コンクリートの間隙を通過しにくいのではないかとと思われる。

4-4 糖およびカゼインによる Ca イオンの溶出

コンクリートの糖害による詳細なメカニズムについてはよく分かっていないが、クライノローゲル著浜田稔訳「コンクリート総覧」によると、Table 4 に示すように、セメントが糖によって溶解し、特にカルシウム溶解度の高いことが記述されている。今回の糖液による Ca イオン溶出実験では、濃度を 5、20、50%の 3 水準に設定して行ったが、水道水による溶出値 2.7ppm に比較して、いずれの濃度でも硬化コンクリートから大量のカルシウム溶出が認められ、糖液がコンクリートの劣化に及ぼす影響の大きいことが分かった。したがって、糖液の存在はコンクリートが劣化する大きな原因となる。先に述べたように、屋上排気口からは糖成分の排出が認められており、この成分が雨水に溶解され、コンクリートに侵入したとすると、コンクリートからカルシウムが溶出し、コンクリートの劣化が起こっても不思議ではない。室内実験から今回のコンクリート劣化現象が糖に依るものであると断定するには、実際の環境状況を再現しなければ分からないことであるが、糖成分が今回の劣化原因の一つに挙げられる可能性は否定できない。

Table 4 10%糖溶液に対する溶解

| 化学組成 | 溶解(%) | 化学組成 | 溶解(%) |
|--------------------------------|-------|------------------------------------|-------|
| SiO ₂ | 3.33 | CaO | 16.5 |
| Al ₂ O ₃ | 1.00 | MgO | 0.32 |
| FeO ₃ | 2.40 | K ₂ O,Na ₂ O | 0.85 |

4-5 嫌気性バクテリアの分析

コンクリートの劣化原因物質の中には、酢酸、ギ酸、タンニン酸、フミン酸、乳酸などの有機酸が挙げられる。嫌気性の細菌は有機物質を嫌気発酵させ有機酸を生成する。コンクリートの中がどの程度の嫌気性状態にあるのか定かではないが、仮に嫌気性状態にある環境であれば、嫌気性細菌と有機物質の存在下で有機酸の生成することが可能である。現場の劣化コンクリートに嫌気性細菌が存在するのか検討した結果、嫌気性細菌の存在が確認され、培養後の培地の pH は酸性を示し、酸性物質の生成されたことを伺わせた。

5 コンクリート劣化原因の結論

今回のコンクリート劣化原因を化学的分析および他の物理試験の結果と総合して判断すると、以下ようになる。

1) コンクリートへの浸透試験の結果から、糖分は糖濃度 5、20 および 50%のいずれの濃度でもコンクリートから大量の Ca 溶出を促進する作用のあることが認められ、糖液がコンクリートの劣化に及ぼす影響の大きいことが判明した。

2) 中性化試験、化学組成分析、浸透性試験および溶出試験の結果から、糖分がコンクリート中に浸透してセメント水和物から Ca を溶出させ、水和組成そのものをポーラスにする現象が認められた。

3) 化学組成調査結果によると、2階劣化部および3階劣化部には、表面約 1~2mm に炭酸化による CaCO_3 の含有が少量または僅かに認められるものの、全ての深さ位置でセメント水和物が認められる。しかし、2階健全部に比べて Ca 量が全般に少なく、セメント水和物が減少しており、表層になるほどその傾向が大きく、何らかの原因によってセメント水和物が分解して Ca が溶出した可能性がある。

4) 嫌気性細菌の分析によって、その存在が確認され、実験シャーレ内に有機酸と思われる酸性物質の生成が認められた。

5) 糖液による乾燥繰り返し試験の結果によると、糖分の浸食作用は高温下で顕著になり、濃度 5%の糖液噴霧および高温 (60℃) 乾燥による、コンクリート表面にひび割れが発生・進展し、セメント水和物の溶出が認められた。

6) 凍結融解試験から、繰り返しサイクルの増加とともに、通常コンクリートと同様にコンクリー

ト表面のセメントペーストあるいはモルタルが剥離するスケーリング現象が認められた。

7) 屋上防水押えコンクリートの設計基準強度は 18N/mm^2 であるが、2階健全部、2階劣化部および3階劣化部のコア強度は、バラつきが見られるものの、特に問題はないと考えられる。

8) 中性化深さ試験は、2階健全部が 15.6mm であるのに対して、2階劣化部および3階劣化部は 0.13mm であり、建築学会指針による推定値約 9.3mm よりあまりにも小さく、一般条件下では起り得ない。劣化部の中性化深さが小さくなった理由としては、屋上防水押えコンクリートが比較的湿潤状態にあることや、セメント水和物が分解して Ca イオンの遊離とともに水酸基イオンが溶出して劣化部表面の pH が高くなったためと考えられる。

9) 煎餅状の剥離個所が多いという現象については、次のように考えられる。コンクリートは、一般に上面ほど品質が低下しており、この上面の脆弱なモルタル層とその下層の比較的密実なコンクリート層が言わば、二層構造になっていたのではないかと推定される。これによって、糖分などの浸食性物質がこの上面のひび割れなどの弱点部から侵入し、2層の境界面近傍に回り込み、周辺の水和組織を劣化させ、最終的に剥離現象を生じやすくしたためと考えられる。したがって、屋上防水押えコンクリートの剥離現象は、各種劣化要因の複合により起こったものと考えられるが、その中でも糖分による浸食作用が主要因であると考えられる。さらに、屋上コンクリートという環境条件から、夏期における乾燥繰り返し作用および冬期における凍結融解作用によって劣化が助長されたと考えられる。

6 おわりに

今回、食品工場建屋の屋上部コンクリートの劣化剥離現象を探るために、調査を行った。調査は、本報告の他に、圧縮強度、中性化深さ、単位容積質量などのコンクリートの品質調査やセメントの水和物、コンクリート組織観察および反応性骨材などの化学組成調査、さらに乾湿繰り返し試験、凍結融解試験等も実施し、総合的に行われた。一般のコンクリート構造物では、ありえないことであるが、今回のように、食品原料、特に糖分を取り扱う工場建設では、室内換気の排出吹出しをコンクリート表面に直接吹き出す方法は注意が必要である。