



Title	砂利化したコンクリート構造物の表面の損傷（前編）
Author(s)	森吉, 昭博
Citation	月刊建築仕上技術, 48(574), 92-98
Issue Date	2023-05
Doc URL	http://hdl.handle.net/2115/89353
Type	article
File Information	moriyoshi_May_2023.pdf



[Instructions for use](#)

砂利化したコンクリート構造物の表面の損傷（前編）

北海道大学名誉教授 森吉 昭博

目次

（前編）

1. まえがき
2. コンクリートの砂利化の間接的な評価方法およびまだら模様の原因
3. アスファルト舗装の砂利化、プリスタリング現象および表層の剥離の原因
4. アスファルト舗装、コンクリート構造物の砂利化発生のメカニズムおよび横断亀裂、局所的な剥離・崩落の原因
5. コンクリート橋のコンクリート床版の様々な損傷とその原因

（中編）

6. コンクリートおよび砕石の脱カルシウム

7. 札幌の定山溪ダムコンクリートの表面の様々な損傷とその原因

8. コンクリート構造物の収縮亀裂の原因

（後編）

9. アスファルト舗装およびコンクリート構造物の横断亀裂

10. アスファルト舗装の低温亀裂時の外気温低下下の温度低下の温度収縮による横断亀裂とコンクリート構造物のAE減水剤を使用したコンクリートの含水率低下に伴う収縮による横断亀裂

11. AE減水剤を使用したコンクリートダム表面のまだら模様

12. まとめ

※中編は6月号、後編は7月号に掲載予定

1. まえがき

コンクリートの砂利化現象はコンクリート構造物の内部が非常に細かく白い粉末状となり、コンクリートが砕石と鉄筋だけとなる現象である。この現象はコンクリート構造物の内部から発生するといわれていて、その原因は不明である。日本のコンクリート橋では通常コンクリート床版の上部にアスファルト舗装を1層または2層で4-10cmの厚さで施工している。このため、このコンクリート床版の砂利化現象はコンクリート橋の表面から直接観察することはできない。その上、このコンクリート橋の床版の砂利化現象の原因や発生のメカニズムも不明である。またコンクリート構造物に砂利化現象が発生すると、後で述べるように、鉄筋の周りのコンクリートが消失し、鉄筋の周りは空洞となり、鉄筋も著しく腐食していた。このコンクリートの空洞化と鉄筋の著しい腐食の原因も不明である。このため、このようなコンクリートの状態は「鉄筋コンクリート構造物」ではなく、一部が「鉄骨構造物：鉄筋だけで車両荷重を支えている」になっていると思われる。しかし、コンクリート構造物の本来の荷重設計は鉄筋とコンクリートが一体となった荷重設計となっているため、この鉄筋の周りが空洞化し、鉄筋

が著しく腐食したコンクリート構造物は砂利化によって荷重に対する許容応力が小さくなり、極めて危険な状態になっていると思われる。

2. コンクリートの砂利化の間接的な評価方法およびまだら模様の原因

本研究は2つのコンクリート橋のコンクリート床版（ベルギーの床版で一部が砂利化したコンクリート橋と日本の床版で全く砂利化していないコンクリート橋）を用いて、この2つの橋の「コンクリート床版の底面の表面の損傷」の比較からコンクリート床版内部に発生した砂利化の損傷が外部から推定できるのではないかと考え、検討したものである。この結果、コンクリート橋の床版の砂利化現象はコンクリートの内部で発生したとき、コンクリート橋の床版の底面の表面が「白または灰色」の遊離石灰晶出跡でコンクリートが「まだら」になった損傷（まだら模様）と「黒いアスファルト」のシミやコンクリートの床版や桁の横断亀裂、コンクリートの砕石の一部の崩落などの「様々なコンクリートの損傷」がコンクリート床版の底面で既に生じていることを本研究によって見つけた。また、このまだら模様や様々なコンクリー

トの損傷は古いコンクリート構造物でAE減水剤を使用していない構造物では発生していない。

しかし、市販される世界中のセメントにはコンクリートに有害なフタル酸エステル化合物およびリン酸化合物や金属アルミが極微量であるもの含まれており、これらもコンクリートの劣化に関係している。本研究では、セメントコンクリートが硬化後に大気中の有害有機物(フタル酸エステル化合物、ウインドウオッシュ液)とAE減水剤により劣化し、砂利化することについて主に述べる。

コンクリート構造物にAE減水剤を使用すると、AE減水剤には吸湿性及び吸着性があるため、大気中の有害有機物(フタル酸エステル化合物およびウインドウオッシュ液)が、次第に構造物の内部に吸収・吸着される。このため、コンクリートの呼吸作用により時間と共にコンクリート構造物中に有害有機物が増え、これによってコンクリートの劣化や砂利化が促されており、コンクリート構造物のコンクリートの表面でこのまだら模様や様々な損傷が発生していると思われる。このとき、コンクリート構造物およびアスファルト舗装でも中の細かい湿気と一緒に大気中の極微量のウインドウオッシュ液中の化学成分(有機物)が両構造物の中で毎日の呼吸作用によりアスファルト舗装中の有機物であるアスファルトを瞬時に溶解し、細かい黒い湿気となっている。この陰イオン系の界面活性剤のウインドウオッシュ液を含む夏季の細かい高温の湿気で溶解されて黒くなったこの細かい湿気は、自身の呼吸作用(吸収)によりアスファルト舗装や防水層を貫通してコンクリート橋の下部にあるコンクリート床版の奥深くまで浸透し、コンクリート中のカルシウム成分の脱カルシウム化を進めながら大気中から吸収された極微量のフタル酸エステル化合物(これらは世界中の大気中のアスファルト屑、タイヤ屑、ディーゼル排煙に含まれるコンクリートに有害なフタル酸化合物の有機物(DBP, DEHP, DOPが含まれている: DBP(Di-n-butyl phthalate), DEHP(Di-(2-ethylhexyl phthalate), DOP(Di-octyl phthalate))も高温の湿気と共にコンクリート構造物の内部に取り込まれる。フタル酸エステル化合物やリン酸化合物はコンクリート中のカルシウム成分と化学反応し、コンクリート構造物の脱カルシウム化を促している。このため、コンクリート構造物の脱カルシウム化はこれらの2種類の極微量の有害有機物(ウインドウオッシュ液およびフタル酸エステル化合物: 以下これを有害有機物と呼ぶ)が構

造物の奥まで毎日の呼吸作用で吸収と排出を繰り返すため、コンクリート構造物はコンクリートの底部まで急速に脱カルシウム化が進み、コンクリートの砂利化が進展する。この脱カルシウム化のため、コンクリート構造物の表面または底面に「まだら模様」や亀裂等の様々な損傷(横断亀裂、局所的なコンクリートの剥離や剥落)が徐々に発生する。

本研究はコンクリート床版のこれらの有害有機物によるコンクリートの砂利化を含む様々な損傷が次第に進行する原因に付いても検討した。

3. アスファルト舗装の砂利化、ブリスタリング現象および表層の剥離の原因

アスファルト舗装の砂利化現象はウインドウオッシュ液により発生するが、この砂利化現象と関係したアスファルト混合物の表層の剥離やアスファルト混合物の表層のブリスタリング現象(表層が直径30cm、高さ3cm程度に夏季に局所的に膨れ上がる)がアスファルト舗装の表面近くに発生する。この原因について以下に述べる。

アスファルト舗装も自身の毎日の呼吸作用で大気中の極微量のウインドウオッシュ液と夏季の高温の細かい湿気を内部に次第に取り込む。これにより、アスファルト舗装中の黒い有機物であるアスファルト成分はウインドウオッシュ液の陰イオン界面活性剤(Sodium Polyoxyethylene Nonylphenyl Ether Sulfate(SPNE))で瞬時に溶解し、アスファルト舗装の砂利化現象(アスファルト舗装の内部の黒いアスファルト成分が次第に消失し、石粉、砂、碎石だけとなる)が発生する。このとき、アスファルト混合物層を接着している、陽イオン系の界面活性剤で作られたタックコート(アスファルト乳剤: 表層と基層の間のアスファルト系の接着剤)およびプライムコート(アスファルト乳剤: アスファルト安定処理層と砂利路盤の間のアスファルト系の接着剤)もこの陰イオン系界面活性剤(ウインドウオッシュ液)によって、これらの陽イオン系界面活性剤が次第に分解、溶解し、消失する。アスファルト舗装は粘弾性体のため温度に極めて敏感であり、夏季の暑い季節に表層および基層のアスファルト混合物は柔らかくなり、変形しやすくなる。このため、夏季に発生する局所的なブリスタリング現象(アスファルト混合物の表層(4cm)の局所的な膨れ: 直径30-40cm、

高さ3 cm)は、アスファルト舗装のタックコート(表層と基層の間の接着剤)の陽イオン系のアスファルト乳剤が、この過程における陰イオン系界面活性剤(ウインドウオッシャ)により溶解し、消失する。このとき、アスファルト混合物の2層目の基層の透水係数が小さければ(10-7cm/sec以下)、この湿気は基層の下部に浸透できなくなり、この湿気は有害な水分となりアスファルト舗装の表層と基層が分離した界面に水として貯留される。この貯留された水は夏季の高温(表層温度:50°C以上)で、表層と基層の界面で蒸発して大量の水蒸気に変化し、この水蒸気の水蒸気圧が大きくなることで次第に膨張し、この水蒸気圧が表層と基層が剥離した界面から粘弾性体であるアスファルト混合物の表層を徐々に持ち上げるによりプリスタリング現象(局所的なアスファルト混合物の膨れ)が発生すると思われる。このため、このプリスタリング現象が発生した表層の下部ではタックコート(表層と基層の接着剤)がなくなっており、この部分には水や白い石灰石粉が見られる。この「白い石灰石粉」はアスファルト混合物中のアスファルト成分が溶出したため、アスファルト混合物中の石灰石粉がこの剥離した界面に露出したものである。

アスファルト舗装のアスファルト混合物(表層)の高温時の剥離現象は、タックコートおよびプライムコートがすべてウインドウオッシャ液で次第に分解・溶解され、その後、表層と基層の界面が局所的に分離(剥離)した状態でアスファルト舗装の表面に夏季に走行車両のタイヤの剪断力がかかると、夏季の高温で柔らかくなったアスファルト混合物層は簡単に側方向に局部移動して、アスファルト舗装の表層が局所的に剥離し、この表層は細かく破壊する。これがアスファルト混合物の表層の剥離現象である。

アスファルト舗装の砂利化は大気中のウインドウオッシャ液がアスファルトの呼吸作用時にアスファルト舗装中の石粉、碎石および砂の接着剤でかつ、有機物であるアスファルトを溶解し、溶出するために発生するが、このアスファルト舗装の砂利化が発生すると、アスファルト舗装中の黒いアスファルト成分は次第に消失し、アスファルト舗装中には白い石粉、碎石および砂しか残っていない舗装となる。

これより、アスファルト舗装の砂利化、プリスタリング現象および表層の剥離現象の原因は、大気中から次第に吸収されたウインドウオッシャ液によって発生していると思われる。

4. アスファルト舗装、コンクリート構造物の砂利化発生メカニズムおよび横断亀裂、局所的な剥離・崩落の原因

コンクリートの砂利化現象は、コンクリート構造物の自身の呼吸作用でコンクリート構造物の表面から発生し、以下のようなメカニズムでコンクリートの奥深くまで次第に進行する。

コンクリート構造物は内部に局所的に冷えやすい鉄筋を多数内蔵している。大気中の極微量の有害有機物を含む細かく暖かい湿気はコンクリート構造物に呼吸作用で内部に吸収されると、この湿気は相対的に低温となっているコンクリート中の鉄筋の表面で瞬時に冷やされて、コンクリートを溶解する有害有機物を含む水滴となる。このため、この有害な水滴で鉄筋の周りのコンクリートは脱カルシウムをして次第に溶解し、溶出する。これによって鉄筋の周りのコンクリートが小麦粉のようになり消失するため、鉄筋の周りには空洞となる。この過程でコンクリートが有害有機物によって溶解して残った物質は以下のような小麦粉のような細かい白い物質となる。有害有機物で鉄筋の周りのコンクリートがすべて溶出し、鉄筋が裸になると、有害な水滴(ウインドウオッシャ液:陰イオン系界面活性剤)により鉄筋は短期間で腐食する。市販の長さ10cmの丸くぎをウインドウオッシャ液の陰イオン系界面活性剤(SPNEs:0.5%)の水溶液に浸漬すると、1週間で釘の全表面に錆びと思われる茶色いゲル状物質が発生した。しかし、蒸留水の1週間の浸漬では丸くぎは全く錆びなかった。このウインドウオッシャ液(SPNEs)でコンクリートが溶解し、溶出する現象によりコンクリートは砂利化し、丸裸となった鉄筋は陰イオン系界面活性剤(SPNEs)で経年変化とともに、鉄筋は腐食によって次第に痩せると思われた(鉄筋の痩せ)。この現象は後で述べるベルギーのコンクリート橋のコンクリート床版の一部が砂利化し、鉄筋の周りが空洞化して、鉄筋がかなり腐食していた現象と符合している。また水素を発生する金属アルミを含む都市焼却灰、フライアッシュやAE減水剤、フタル酸エステル化合物がコンクリート中のカルシウム成分と化学反応すると、水素ガスが発生する。この水素ガスは鉄筋の脆性破壊の原因となり、鉄筋の破断ひずみが半減するため、鉄筋はほとんど伸びないで簡単に破断する。コンクリート舗装の版の連結部(横目地部)に設置し、床版目地部の荷重を互いに連結さ



写真1 阪神高速3号神戸線 圧接部の破断

せる「タイバー」という鉄筋は、目地部に大気中の有害物質を含む雨水が浸透し底部が空洞(水素ぜい化)となるため、走行車両の荷重によるせん断が作用し、簡単に破断する。

以下に示す写真1は阪神高速道路5号線が倒壊した橋脚の圧接した鉄筋の一部が「伸びもなく」破断した様子を示す。AE減水剤で水素ぜい化した鉄筋の伸び(破断ひずみ:15%)はかなり小さく、これは水素ぜい化していない鉄筋の伸び(破断ひずみ:30%のほぼ半分の値:高強度鋼:SCM435,引張強度はほぼ同じ)となる。この事例ではこの地震で橋脚は15%以上ひずんで破壊したことになる。

この橋脚のコンクリートにはAE減水剤が使用されていた。この橋脚は阪神淡路大震災時に高速道路の5号線が一部倒壊し、橋脚部の鉄筋が写真のように剥き出し部分となった部分を示している。この橋脚は鉄筋の破壊状況から地震時に何回か地震で左右に大きく揺すられたため、鉄筋がかなり伸びた状態(規格値の16%以上)だったと推定された。

この橋脚部もコンクリート構造物が一部砂利化し、小麦粉のような白い細かい粉末となっていた。

このため、コンクリートの内部で小麦粉の粉のようにコンクリートが小さく白い粒子(直径:0.02mm以下)になった現象が発生していれば、そのとき初めてコンクリートが既に砂利化していることに気が付くとされてい

る。しかし、本研究はこのコンクリート構造部の内部で砂利化現象が発生すると、このときコンクリート構造物の表面または底面に以下に示すように様々な形の損傷(まだら模様や様々な損傷)で現れることを新たに発見した。

図1および図2はコンクリート橋のコンクリートの床版の底部の表面の画像を示す。図1はベルギーのコンクリート床版の一部が砂利化したコンクリート床版の底面の表面でうすい灰色の遊離石灰晶出跡によって生じたまだら模様、また黒いアスファルトのシミおよび亀裂等の様々な損傷が生じた床版の底面の表面画像を示す。このベルギーのコンクリート床版では鉄筋の周りの空洞化および裸になった鉄筋に著しい腐食が見られた。

図2は比較的交通量が少ない、北海道の帯広市にあった旧十勝大橋(長さ:369m,幅:18m,竣工:1934年,試料採取:1980年,供用47年)のコンクリート床版の底面の表面画像を示す。この旧十勝大橋の床版作成で使ったセメントは粘土、石灰岩、珪石の3種類の材料だけで製造された。このコンクリートにはAE減水剤が使用されていないため、このコンクリート床版の底面の表面にはまだら模様およびコンクリートの亀裂等の損傷は発生していなかった。この旧十勝大橋の床版(厚さ:30cm)のコンクリートを直径10cmのコアとして採取し、このコアから深さ方向に厚さ3cmの円形試料(7層系)として採取した。この厚さ3cmの円形試料はすべて細か



図1 ベルギーのコンクリート床版 (Phillipe DEMARS, 2001, Bulletin Des Laboratories Des Pontes ET Chaussées, 232, Ref.4368, 75-85)



図2 旧十勝大橋のコンクリートの床版 (画像提供：北海道開発局)

く砕いて(0.074mm以下)、この粉末試料に対して、比表面積はBET method (Shimadzu - Micrometrics Gemini 2370) を使って求めた。この比表面積は粉末試料の粉末の粒子の直径に逆比例していると思われた。

コンクリートの砂利化発生の限界値(比表面積の最低の限界値)は後で述べる北海道の稚内の海門橋のコンクリートの床版が全面的に砂利化していたため、この橋と旧十勝大橋の各深さ方向の比表面積を使ってコンクリートの砂利化発生の比表面積の基準値を求めた。(森吉、月刊建築仕上技術、Vol.48, No.565, 2022-8, 40-52, 8月号)。この旧十勝大橋もコンクリート床版の上にアスファルト舗装が施工されていた。

この「砂利化発生の比表面積の最低の限度値」は帯広にあった旧十勝大橋と稚内にあった海門橋のコンクリート床版(厚さ: 30cm)の深さ方向の2つの解析結果から得られた。この2つの橋(旧十勝大橋と海門橋)のコンクリート床版から直径10cmのコアを採取し、これを厚さ3cmの7個の円形試料に切断し、この試料について圧劣試験を実施した。その後、これらの試料はハンマーで砕いて0.074mm以下の粉末試料として、この粉末試料に対して深さ方向の比表面積を測定した。

本研究は、この2つのコンクリートの橋の床版に対する試験からコンクリートの砂利化発生の最低の比表面積の限界値や鉄筋の周りのコンクリートの消失現象(鉄筋の周りの空洞化)について考察した。

コンクリートの砂利化発生の比表面積の最低の限界値の設定法はすでに報告(森吉、月刊建築仕上技術、Vol.48, No.565, 2022-8, 40-52, 8月号)しているため、ここでは鉄筋の周りの空洞化および裸になった鉄筋の腐食について述べる。上で述べた深さ方向の粉末のコンクリート試料から得られた比表面積(m^2/g)はコンクリートの砂利化と密接な関係にあり、この値が大きいほど、コンクリートは砂利化(粉末化)していることを示している。このため、すべての深さの試料がすでに砂利化していた北海道の稚内の海門橋のコンクリート床版の内部の劣化状況(砂利化)に注目した。海門橋のコンクリート床版(1952年竣工、試料採取: 1981年、供用: 29年、厚さ: 30cm)の砂利化はコンクリート床版の表面ほどその発生がひどく、床版のほぼ真中の深さ15cmまでは表面ほど砂利化が進んでいた(表面近くで最大値の比表面積: $17.4 \text{ m}^2/\text{g}$)。しかし、深さが15cmより深い箇所でもすべて砂利化発生の限界値の $5 \text{ m}^2/\text{g}$ を著しく超えていた。しか

し、旧十勝大橋のコンクリート床版の比表面積は床版の深さに関係なくほぼ $5\text{ m}^2/\text{g}$ 以下のほぼ一定値であった。これより、海門橋の床版のコンクリートの砂利化はコンクリート床版の内部でほぼ全面的に発生していたと思われるが、この現象はコンクリート床版の深さ15cmまでの砂利化は表面ほど特に顕著であった。これは海門橋のコンクリート床版のコンクリートではAE減水剤を使っていたため、大気中のコンクリートに有害な物質(フタル酸エステル化合物およびウインドウオシヤ液)を吸収しやすくなり、劣化して砂利化しやすかったと思われる。

これより海門橋のコンクリート床版内部の比表面積の値より、鉄筋の周りの一部のコンクリートは砂利化によってセメントペーストが消失し、比表面積が大きくなり、鉄筋の周りが空洞化し「鉄骨構造」になっていたことを示していると思われる。

このため、海門橋のコンクリート床版は砂利化により、走行車両の荷重は主に鉄筋だけで受け持ち(鉄骨構造)、鉄筋が著しく腐食し、経年変化と共に鉄筋が痩せていたため、走行荷重によるコンクリート橋の床版のたわみは竣工時のたわみより次第に大きくなり、これに伴い、大気中の有害有機物による損傷(亀裂)が床版の底部まで次第に進行したと思われる。このコンクリートの細かい亀裂の部分から大気から吸収されたコンクリートに有害な有機物は浸透しやすくなり、これらの有機物はコンクリートの脱カルシウム化を進めるため、海門橋は砂利化によりコンクリート床版の寿命が急激に短くなったと思われる。

5. コンクリート橋のコンクリート床版の様々な損傷とその原因

図1のベルギーのコンクリート床版の底面のコンクリートの表面で直径20-40mmの碎石の一部が地上に剥がれ落ち、また広範囲の「うすい灰色」の遊離石灰晶出跡(図1の上部の径間の床版底面の画像に見られる「2カ所の大きなうすい灰色のまだら模様」：黒いシミの左側)、床版および桁のコンクリートの横断亀裂や床版の底部にアスファルトの黒いシミも見られた。このうすい灰色は大気中の有害有機物によりコンクリート床版および碎石中のカルシウム成分が白く溶出し、これにコンクリート床版の上部のアスファルト舗装中の黒いアスファルト成分の一部が有害有機物により溶出した黒い物質が混ざりあって、このような、くすんだ(うすい)灰色になったと

思われる。

ベルギーのこの橋のコンクリート床版の上のアスファルト舗装を剥がすと、コンクリート床版中の鉄筋の周りは空洞化し、鉄筋の著しい腐食が見られた。コンクリート床版の底面の表面の黒いシミは後で述べるコンクリート床版の上に施工したアスファルト舗装中のアスファルトが大気中のウインドウオシヤ液の陰イオン系界面活性剤で黒い有機物のアスファルトが夏季の高温でアスファルト乳剤化し(アスファルト舗装は走行車両により内部の混合物が移動、回転するため、このせん断作用でアスファルトは陰イオン系界面活性剤によってアスファルトが乳剤化する)、この乳剤化した有害な陰イオン系のアスファルト乳剤の細かい粒子(アスファルト乳剤の粒子の直径：約 $1\text{ }\mu\text{m}$ 以下)およびウインドウオシヤ液がアスファルト舗装中のアスファルト混合物の接着剤であるタックコート(表層と基層の陽イオン系接着剤)およびアスファルト舗装の基層とコンクリート床版の接着層の陽イオン系のアスファルト乳剤も分解して、溶解し、コンクリートの底面に溶出したと思われる。

通常の土工に施工されたアスファルト舗装でも大気中の陰イオン系界面活性剤(ウインドウオシヤ液)はタックコート、およびプライムコート(アスファルト安定処理層と碎石路盤との陽イオン系接着層)、だけでなく、アスファルト舗装中のアスファルト成分も夏季の高温時に碎石が走行車両により次第に移動するため、溶解し、溶出する。さらにこれらの有害物質は、防水層も貫通し、コンクリート床版の奥深くまで呼吸作用で次第に浸透し、コンクリートの床版の底面の表面に黒く染み出る。図1のコンクリート床版の底面や桁に現れた横断亀裂の原因は後で述べる。

このコンクリート床版の底面やコンクリートの表面に現れた灰色や後で示す白い遊離石灰晶出跡の原因は以下のとおりである。大気中の極微量のフタル酸エステル化合物(この物質は大気中の極微量のアスファルト層、ディーゼル排煙、タイヤ屑に含まれている以下のコンクリートの有害有機物(DBP(Di-n-butyl phthalate), DBP(Di-(2-ethylhexyl phthalate), DOP(Di-octyl phthalate))がコンクリート構造物自身の毎日の環境変化に伴う「呼吸作用」で構造物の内部に大気中の高温の湿気と一緒に取り込まれ、これとコンクリート中のカルシウム成分が化学反応し、水溶性のフタル酸カルシウムとなる。このフタル酸カルシウムは後で述べる有害有機物であるウインドウオシヤ液で生じた水溶性のカルシウ

ム塩と難溶性のフタル酸カルシウム塩とが一緒になり、これらがコンクリートの外部の底面の表面に溶出する。このコンクリート中の水溶性のフタル酸カルシウムは呼吸作用で大気中の炭酸ガスを吸収して、昇華性のあるフタル酸と白い炭酸カルシウム(CaCO_3)に変化する。このフタル酸はコンクリート中のカルシウム成分と化学反応し、再度フタル酸エステル化合物になり、再度これはコンクリート中のカルシウム成分と化学反応する。一方、炭酸カルシウム(CaCO_3)は後の石旬の項で述べるように石旬となる。(森吉、建築仕上技術、Vol.47, No.564, 24-32, 2022)。このため、この現象によりコンクリートの脱カルシウムはコンクリート中に極微量のフタル酸エステルの物質が存在する限り、この脱カルシウムの化学反応は繰り返し起こるため、コンクリートの脱カルシウム化が急激に進行する。この急激な化学反応により、経過時間とともにコンクリートの脱カルシウム化が次第に進行し、この水溶性のフタル酸カルシウムはコンクリート自身の呼吸作用(環境変化に伴いコンクリート中の有害有機物を含む湿気は吸収と排出の呼吸作用を毎日1回ずつ繰り返す)でコンクリートの外部に溶出する。このフタル酸カルシウムがコンクリートの外に溶出すると、石旬を生成する「白い物質の炭酸カルシウム」となる。一方、大気中の極微量のウインドウオッシュ液の成分もコンクリートの呼吸作用で構造物の内部に吸収され、これとコンクリートおよび砕石中のカルシウム成分が化学反応し、以下に示すようなカルシウム塩となる。このカルシウム塩で水溶性のものは難溶性のカルシウム成分および湿気と一緒にになり、これらもコンクリートの呼吸作用によって、コンクリートの底部の外部の表面に溶出する。このフタル酸カルシウムとウインドウオッシュ液がコンクリートのカルシウム成分と化学反応した2種類のカルシウム塩(水溶性カルシウム、難溶性カルシウム、これらの詳細は以下に示す)の物質は水溶性のフタル酸カルシウムおよびウインドウオッシュ液で溶出した黒いアスファルト成分(アスファルト乳剤)と共にコンクリートの底部の外部の表面に溶出する。この溶出した物質の粒子の大きさ(直径)は湿気と同じミクロンオーダーである。この細かい有害な粒子は常に細かい穴が開いているビニールシートもこの陰イオン系界面活性剤が湿気の表面張力をさらに低下させるため、コンクリートが大気から吸収した湿気が浸透しやすくなり、この物質は簡単に防水層のビニールを浸透する。この細かい物質はアスファルト舗装とコンクリート床版の間に挿入したビ

ニール製の防水層も簡単に貫通する。この現象のため、コンクリートおよび骨材中の脱カルシウム化をさせた物質は、アスファルトの黒いシミの物質と一緒にになり、コンクリートの床版の底面の表面にアスファルトの黒いシミや白またはうすい灰色のまだら模様として現れる。この脱カルシウムは界面活性剤であるAE減水剤がコンクリート中に含まれていれば、AE減水剤が毎日の呼吸作用の時に、大気中の有害有機物をコンクリート中に瞬時に吸収および吸着する。AE減水剤は吸着性と吸湿性に優れているため、AE減水剤を使用したコンクリートは大気中の有害有機物(フタル酸エステル化合物およびウインドウオッシュ液)をコンクリートの構造物が瞬時に吸収、吸着するため、コンクリート構造物の表面近くで有害有機物が多く吸着される。

コンクリートの脱カルシウム化はコンクリート構造物の表面から始まる。この脱カルシウム化により、コンクリートはセメントペーストが溶解、消失し、砕石と鉄筋だけとなるコンクリート構造物の砂利化現象が発生する。この現象が発生すると鉄筋の周りのコンクリートが溶解し、鉄筋の周りは空洞となる。その後外部から吸収された暖かく、細かい湿気および極微量の有害有機物が鉄筋の相対的に低い温度で冷やされて、有害な水滴となり、これが鉄筋の周りのコンクリートを早い段階で溶解し、溶出し、その後有害有機物(ウインドウオッシュ液)を含む水分で鉄筋が著しく腐食したと思われる。コンクリート橋の鉄筋の周りの空洞化はコンクリート床版の表面から始まり、次第に床版の奥へと進行する。コンクリート床版は砂利化により「鉄筋コンクリート構造」から「鉄骨構造」に変化し、鉄筋の腐食による「痩せ」も生じるため、車両走行時の活荷重による橋(コンクリート床版)のたわみが時間と共に次第に大きくなり、コンクリートのひずみもさらに大きくなるため、細かい多数の亀裂がコンクリートの床版の内部に発生したと思われる。この多数の亀裂を介してコンクリートの呼吸作用で大気中の有害有機物が広範囲なコンクリート床版にわたり、コンクリートの内部に吸収していると思われる。このためAE減水剤を使用したコンクリート橋ではコンクリートの脱カルシウム化がAE減水剤を使用していないコンクリート橋と比較して、脱カルシウム化が著しく早く進むため、コンクリート橋の寿命がこのコンクリートの砂利化によって著しく短くなっていると思われる。

(中編に続く)