



Title	最近の世界の土木構造物が短寿命化している原因とその対策
Author(s)	森吉, 昭博
Citation	月刊建築仕上技術, 49(584), 30-33
Issue Date	2024-03
Doc URL	http://hdl.handle.net/2115/91329
Type	article
File Information	Moriyoshi_49_584_p30.pdf



[Instructions for use](#)

最近の世界の土木構造物が短寿命化している原因とその対策

北海道大学名誉教授 森吉 昭博

私は30年以上に亘り、コンクリート構造物やアスファルト舗装の耐久性の研究をしています。2002年にアスファルト舗装およびセメントコンクリート橋のコンクリート床版が大気中の極微量な有機物であるフタル酸エステル化合物(Phthalates : Ps)やウインドウオシヤ液(Sodium Polyoxyethylene Nonylphenyl Ether Sulfate (SPNES))によりこれらの構造物が劣化および砂利化することを見つめました。これは「石油学会誌、Moriyoshi A. Journal of the Japan Petroleum Institute, 45(2), 2002,84- 88」で始めて発表して以来、その後この関係の論文を「月刊建築仕上技術」や「PLOS ONE, 16(5), 2021, e6249761」等で10編程度発表しました。これらの研究から、世界中で市販されているセメントは極微量ですが前者のフタル酸エステル化合物のPsですでに汚染されていることを見つめました(市販のセメント中のPsの汚染の含有量: 約200 μ g/10gのセメント)。私はこの汚染の化合物(Ps)はセメントキルン中の1450 $^{\circ}$ Cの高温の加熱過程でも未燃焼のまま極微量ですが、Psとしてセメント中に残り、市販のセメント中にもこのPsがセメント中に残っており、このPsと大気中の極微量の有害有機物を内部に吸収した物質が一緒になり、これらがコンクリート構造物の劣化および砂利化をさらに進行させていることを見つめました。

本研究はセメントコンクリート構造物やアスファルト舗装がPsおよびSPNESにより劣化や砂利化する原因と現在の市販のセメントとAE減水剤を使ったコンクリート構造物の短寿命化の原因や対策について述べています。

極微量のPsが入った市販のセメントに水を加えてセメントを掻き混ぜると、混合時にPsは瞬時にセメント中のカルシウム成分と化学反応をして、水溶性および難溶性の2種のフタル酸カルシウムを生成し、この過程で後に示す2-Ethyl-1-Hexanol(2E1H)等の不快な臭いのアルコールが発生します。コンクリート構造物は自身の呼吸作用で1日1回、吸気と排気を行っています。この呼吸作用でコンクリート構造物中の2種のフタル酸のカルシウム塩はコンクリートの外部に「溶出」し、これにより「白や黒のまだら模様」がコンクリートの表面や底部に発生します。この「まだら模様」となる「白や黒の

物質」は大気中の黒いアスファルト屑、タイヤ屑およびディーゼル排煙やSPNESが原因です。この黒い物質内にはフタル酸エステル化合物(Ps)が含まれており、大気中にはウインドウオシヤ液(SPNES)も含まれています。これらの「白や黒の物質」はPM2.5の中にも含まれています。Psはセメントに対して極微量の0.0012%含まれているだけでもコンクリート中のカルシウム成分を瞬時にカルシウム塩に変化させて劣化や砂利化を引き起こします。この0.0012%の極微量のPsによるコンクリート構造物の劣化や砂利化による損傷の程度は、極微量にもかかわらず、コンクリート構造物中のAE減水剤(0.25%)やリン酸化合物(0.12%)がコンクリートに対する損傷と全く同じ程度の損傷(劣化や砂利化)を引き起こしています。

これらの2種の物質(PsやSPNES)は細かくて、眼には見えません。しかし、Psは赤外線ヒータを室内に2-3か月保管し、その後このヒータに通電すると、セラミック製の赤外線ヒータの表面からは以下に示す「不快な臭いのアルコール」が放散されます。これは大気中のPsがガラスの表面に付着し、このヒータの通電時にセラミックの表面温度が高くなると、Ps中のDEHP(Di-2-Ethyl Hexyl)Phthalate)やDBP(Di-n-Butyl-Phthalate)がこのヒータの熱で化学分解し、2-Ethyl-1-Hexanol(2E1H: アルコール)やButanol(Butyl alcohol: アルコール)の不快な臭いが放散されたものです。

一方アスファルト舗装では降雨直後に走行車両があれば、水たまりに大量の黒い水と細かい白い泡が大量に発生します(図1参照)。

この白い泡は、走行車両から放出されたウインドウオシヤ液のSPNES中の陰イオン界面活性剤(洗剤)が、この水中に溶けて走行車両のタイヤの回転によってアスファルト舗装が「押し洗い」の状態となって発生したものになります。水中の白い泡の中の細かい「黒い物質」や「黒い水」は、浸透性の良いSPNES(洗剤)がアスファルト舗装中の有機物であるアスファルト成分を溶解したアスファルトです。SPNESもコンクリート構造物やアスファルト舗装の劣化や砂利化にも関係しています。このため、アスファルト舗装もSPNESで簡単に砂利化し、SPNESは湿気と一緒にアスファルト混合物の内部に浸透し、砂



図1 降雨直後の走行車両のタイヤ付近に発生したアスファルト舗装表面の黒い水と大量の白い泡とその泡の中の細かい黒い物質

利化するとアスファルト混合物の含水比が2%以上と大きくなります。Psはタイヤ屑、アスファルト屑、およびディーゼル排煙に含まれており、またSPNESは車両走行のある地球上のすべて箇所で大気に走行車両から放散されています。このため、地球はこれらの2種の物質(Ps, SPNES)でひどく汚染されています。これらの2つの物質は極微量で極微小(粒子の大きさは $2.5\mu\text{m}$ 以下)の環境ホルモンであり、かつ内分泌かく乱物質でもあるため、これらは植物や動物中の細胞の動きに至るまで様々な影響を及ぼしています。特にコンクリート橋の床版の寿命に著しい影響を与えています。

北海道の北に位置する稚内のコンクリート製の海門橋(竣工:1952年、解体:1981年、供用:29年:AE減水剤使用、この付近の $\text{PM}_{2.5}$: $6\mu\text{g}/\text{m}^3$)の30cmの厚さのコンクリートの床版が表面から底部まで砂利化し、コンクリート床版はわずかに29年でボロボロになり、この橋は施工後29年で車両通行が極めて危険な状態(寿命)となったため解体されました。しかし帯広にあった旧十勝大橋(葛西橋:AE減水剤不使用、コンクリートの床版厚さ30cm)はセメントが硅石、粘土および石灰岩の3種類の材料だけで作られ、Psが含まれる有害な廃プラスチック、廃タイヤおよびリン酸化合物を含む肉骨粉、AE減水剤等が、セメントの製造やコンクリート構造物の施工時に使われていませんでした。このため、この旧十勝大橋のコンクリート橋(この付近の $\text{PM}_{2.5}$ の濃度: $16\mu\text{g}/\text{m}^3$)はこの橋が都市計画で無用となった年までの供用46年後でも以下に示すようにこのコンクリート床版の砂利化

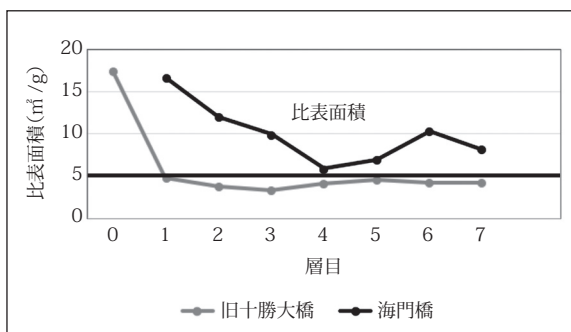


図2 旧十勝大橋と海門橋のコンクリート床版の深さ方向の比表面積(横軸の0:均しコンクリート、赤の横線: $5\text{m}^2/\text{g}$)

や劣化は発生していませんでした。

この2つの橋の寿命を砂利化した床版の損傷の程度(寿命)について以下のように検討しました。この2つの橋(海門橋、旧十勝大橋)で砂利化したコンクリートの比表面積が $5\text{m}^2/\text{g}$ を超えて砂利化したコンクリート床版の厚さを供用年数で除した床版の「砂利化速度」は、海門橋、旧十勝大橋でそれぞれ $1\text{cm}/\text{年}$ ($30\text{cm}/29\text{年}$)、 $0\text{cm}/\text{年}$ ($0\text{cm}/46\text{年}$)となりました(図2参照)。図2の横軸はコンクリート床版(厚さ:30cm)を1層の厚さを2.5cmとして切断し、床版の表面から切断された層の数を示します。

図2より2つの橋の上面の層の比表面積は海門橋の第1層(2.5cm)で $17\text{m}^2/\text{g}$ となり、旧十勝大橋のコンクリート床版の上の均しコンクリート層(横軸の表示0:厚さ4cm)の比表面積は $17.5\text{m}^2/\text{g}$ となりました。

このように2つの橋のコンクリート床版の砂利化速度が異なる原因は、AE減水剤をコンクリート構造物に使用した場合、コンクリート構造物の内部の「連続した亀裂幅:細い連続空隙」が海門橋のコンクリート床版では旧十勝大橋のそれより2-20倍とかなり広がったため、コンクリート構造物の寿命はこの砂利化速度に関係していると思われました。

この2つのコンクリート橋の砂利化の原因についてさらに検討するため、北大博物館が実施した2種のコンクリートモルタル試料(小樽の広井博士が作成した「120年のモルタル試料」と現在のセメントとAE減水剤を使ったモルタル試料「現在のモルタル試料」)の3次元亀裂解析結果を参考にしました。その理由は旧十勝大橋で使ったセメントは石灰岩、硅石および粘土のみで作られ、AE減水剤が使われていなかったこと、一方海門橋のコンクリートはセメント製造時に廃プラスチック、廃タイヤ等のPsが含まれていたことと、ここではAE減水剤が使われていました。このため、この海門橋のコンクリートは現在のセメントと同じように廃棄物がセメントの1部と

して利用して製造され、AE減水剤もコンクリート施工時に使われていました。

北大博物館に所蔵されている2つのモルタル試料(120年のモルタル試料と現在のAE減水剤を使ったモルタル試料)に対する3次元亀裂解析結果の中で以下のことが記述されています。

120年モルタル試料は連続した幅の狭い亀裂幅の0.05mm~0.1mmの亀裂が試料全体の亀裂幅の69%であるのに対して、現在のモルタル試料(打設後30日)の0.138~0.27mmの連続した幅の広い亀裂幅は試料全体の亀裂幅の97.8%を占めています。これより現在のAE減水剤を用いたモルタル試料の亀裂幅は0.138mm~0.27mmの連続した幅広い領域で広い亀裂幅(連続した広い空隙)となり、120年モルタルの試料よりも一段と亀裂幅が広がっていました。

このため、この現在のAE減水剤を使用したモルタル試料はコンクリートの打設後30日でも亀裂幅(空隙)がかなり連続した広い亀裂幅となるため、大気中の極微量の細かい有害な有機物を構造物の内部にコンクリート自身の呼吸作用で取り込んでいたと思われます。

この2つのモルタル試料(120年モルタル試料と現在のモルタル試料)の連続亀裂の幅や亀裂の長さ(連続した細かい空隙)はコンクリートの砂利化(寿命)に関係していると思われます。このことは以下の博物館の説明(海門橋と旧十勝大橋の砂利化速度の説明)と全く同じ結果が示され、AE減水剤を使用した海門橋のコンクリート床版が120年モルタル試料より砂利化しやすいことを説明していると思います。

詳しいことは北大博物館所蔵の展示物用の説明の以下の文章を参考にして下さい：[\(https://www.museum.hokudai.ac.jp/hiro/hiro-detail-spn/\)](https://www.museum.hokudai.ac.jp/hiro/hiro-detail-spn/)

これより、セメントが粘土、珪石、石灰岩の3つの材料で作られ、かつAE減水剤を使わないコンクリート構造物(小樽の120年モルタル試料作成と同じような「旧十勝大橋型のコンクリート」)は「長期耐久性」に著しく優れているコンクリートといえます。

しかし、海門橋のようなコンクリート床版の砂利化はコンクリート構造物の内部の細かい連続した空隙を介して、自身の呼吸作用で内部に取り込み、これとコンクリート中のカルシウム成分がPsやSPNESで溶解し、これがカルシウム塩となってコンクリート構造物の外部に溶出するため、コンクリートの表面や底部の極1部を除いてコンクリート床版の内部は砂利化して空洞化して、「張りぼてのコンクリート」となっています。この張りぼてのコンクリートはこのコンクリート構造物をハンマーで叩くと鈍い音がします。

コンクリート構造物にAE減水剤を使用すると、AE減

水剤が大気中の極微量の有害物質を自身の呼吸作用で選択的に吸収、吸着し、そのためにコンクリート構造物の細かく連続した穴が沢山開いた箇所や、硬化時のAE減水剤使用によるコンクリート構造物の乾燥収縮による亀裂箇所から、この有害有機物がコンクリート構造物中に浸透し、これがコンクリート中のカルシウム成分とAE減水剤との化学反応を起こします。AE減水剤をコンクリートに用いた場合、この反応によ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底部まで細かい連続した穴が大量に存在するため、コンクリート構造物の深部まで急速に進行します。このため、AE減水剤を利用したコンクリート構造物の寿命はAE減水剤を使わないコンクリート構造物(床版)の寿命の約半分(約20年)以下となります。これは、コンクリート構造物にAE減水剤を利用すると、硬化時にコンクリート構造物中のAE剤を含んだ水分が経過時間と共に次第に空中に放散し、コンクリート構造物の体積はコンクリート中の水分の蒸発とともに次第に体積が収縮し、この収縮亀裂と内部の細かい連続した亀裂によりコンクリートは益々有害な大気中の物質を吸収し、コンクリートの収縮亀裂や局部的なコンクリートの剥落や碎石の落下も生じます(月刊建築仕上技術、Vol.48, No.575, 2023-6)。

この結果としてコンクリート構造物の中のカルシウム成分は自身の呼吸作用で外部に流出するため、コンクリートの内部には鉄筋、碎石および砂だけが残り、後は直径が0.05mmの小麦粉のような白く細かい粉末と空洞があるだけ(張りぼてのコンクリート:砂利化)となります。

しかし、このコンクリート構造物の砂利化現象について、構造物の外部から検査する方法は現在世界中にありません。一般にコンクリートの橋ではコンクリートの床版の上にアスファルト舗装(5~8cm)が施工されているため、このコンクリート構造物の砂利化の進展状態は今まで外部からは全く分かりませんでした。本研究ではコンクリート構造物でこの砂利化が発生すると溶け出したコンクリートのカルシウム塩によりコンクリート構造物の表面は「白や黒のまだら模様」が発生する(これはコンクリートの寿命が短くなることを意味している)ことを見つめました。

この「静かなコンクリートの破壊(砂利化)」は炭酸ガスによる劣化よりも速く、コンクリート構造物自身の呼吸作用で極めて短期間で、細かく、かつ連続した穴を通じてコンクリート構造物の深部まで発生します。この砂利化や劣化は大気中やセメント中の極微量のPsやSPNESと構造物自身の呼吸作用で発生するため、AE減水剤を使ったコンクリート構造物の寿命が短くなります。しかし、AE減水剤を使用していないと思われる古いコンクリートダム(黒部ダム(1963年)や奥只見ダム(1961年))

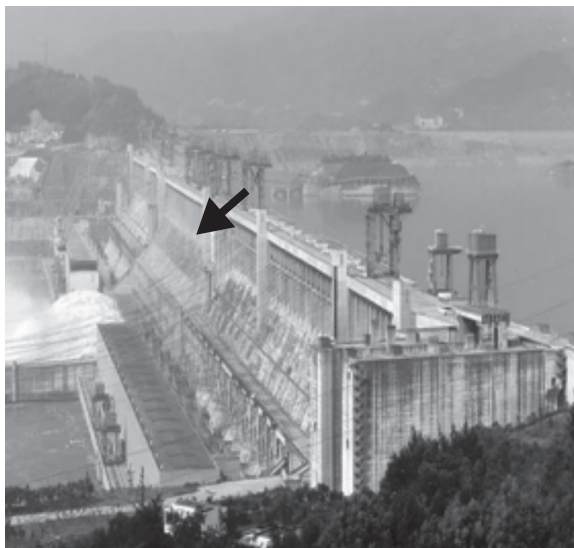


図3 三峡ダム(2017年、Wikipedia)

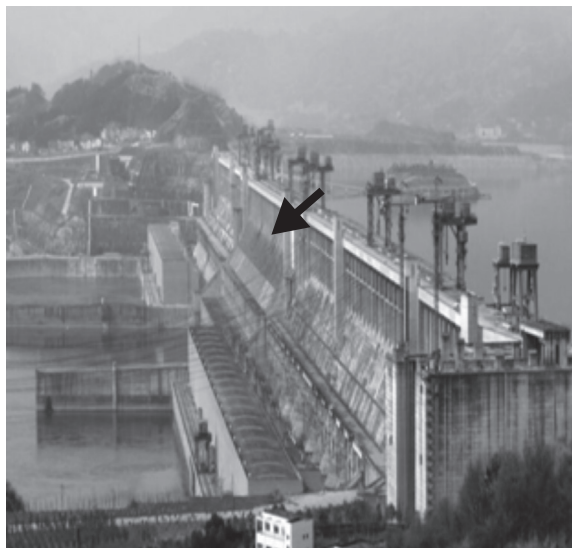


図4 三峡ダム(2021年、Wikipedia)

のコンクリートの表面にはこのような「白や黒のまだら模様」は発生していません。

2001年に起こった米国の世界貿易センタービルの倒壊では倒壊したビルの周辺の2-3kmに亘り、ビルの倒壊で降り積もったコンクリートの粉塵は平均で約10cmの厚さになりました。この粉塵の平均粒形は0.05mm(この直径は砂利化したコンクリートの細かい粒子の直径と同じです)でした。これよりこの世界貿易センタービルのコンクリートは倒壊する前にすでに砂利化していたと思われます。このため、倒壊したビルの鉄筋の周りのコンクリート構造物のカルシウム成分は外部に流出し、倒壊した鉄筋の周りにはコンクリートの破片が全く付着していませんでした。

現在世界中で寿命の議論的となっている中国の三峡ダム(1993年建設開始、2009年完成)のコンクリートダムの表面は、図3、4のWikipediaの画像で見ると、局部的に黒くなっています(矢印部分)。このようにコンクリートダムの表面が局部的に黒くなるのはコンクリート構造物にAE減水剤等が使われている証拠になります。しかも中国の三峡ダム近辺のダムに近い重慶ではPM2.5の濃度が最大で $120\mu\text{g}/\text{m}^3$ となっています。

Wikipediaが示した三峡ダムのコンクリートの表面の「まだら模様」は、1917年から2021年のわずか4年経過でも益々黒くなっています。

このようにまだら模様となった箇所はすでにコンクリート構造物の内部が砂利化して、コンクリートのカルシウム塩が構造物の外部に流出し、コンクリート構造物の内部に空洞が発生し、このコンクリートの表面ではコ

ンクリート構造物の乾燥収縮により横断亀裂や碎石の崩落が発生し、張りぼてのコンクリートになっていると思われる。

以上より、日本のように地震の多い国では、「セメントの製造法:廃棄物の利用方法」や「コンクリートの施工法:AE減水剤の使用」について至急に対策を施す必要があります。このため、今施工されて短寿命となっている「負の遺産」のコンクリート構造物及びアスファルト舗装に対して劣化した砂利化の深さを求める必要があります。そこで、コンクリートでは比表面積、アスファルト混合物層では含水比(多いほど砂利化が酷い)を測定し、これらの構造物の損傷の程度(寿命)を測定します。構造物の砂利化現象はコンクリート構造物では比表面積が $5\text{m}^2/\text{g}$ 以上の値となった場合、アスファルト混合物では2%以上の含水比になった場合、これらの構造物がすでに砂利化していると思われます(月刊建築仕上技術、Vol.48, No.565, 2022-8)。このため、これらの「砂利化層」は切削し、撤去し、新しいアスファルト層や「120年モルタル試料」で用いたようなコンクリートで打ち直す必要があります。これによって後世にこれらの「負の遺産の構造物」は残さないことになり、寿命が長く、かつ安全な構造物を作成することが可能となります。これを実施しなければこれらの構造物の補修費は毎年増え続け、ある日突然構造物が崩壊する可能性があると思われます。