HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	コンクリート構造物およびアスファルト舗装等の極微量有機物による損傷（後編）
Author(s)	森吉，昭博
Citation	月刊建築仕上技術，48(565)，40-52
Issue Date	2022-08-15
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/86568
Type	journal article
File Information	moriyoshi_Aug_F.pdf

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

コンクリート構造物および アスファルト舗装等の 極微量有機物による損傷（後編）

北海道大学名誉教授　森吉 昭博

目　次

（前編）
1．コンクリート構造物の砂利化現象との出会い
2．車両のウインドシールドウオッシャ液（SPNES）
3．黒い汚染物質
（中編）
4．アスファルト舗装とウインドウオッシャ液（SPNES）との関係
5．アスファルト舗装の高温時の亀裂
6．フタル酸エステル化合物
7．コンクリート中のリン酸化合物
（後編）
8．樹木の有機物汚染
9．コンクリートの砂利化現象
10. 砂利化の原因
11. コンクリートのミキサー車およびバイブレータと砂利化
12. 砂層の液状化防止（泡の制御方法）
13. 今後の展望
14. まとめ

※前編は６月号、中編は７月号に掲載

８．樹木の有機物汚染

大気中に様々な極微量の有機物が浮遊しているため、樹木もこれらの有機物を吸収し、樹木の立ち枯れの原因になっていると予想された。幸いなことに北海道大学の校内には100年以上前から育っているエルム（楡）の大木が多数存在する。たまたま、そのうちの１本が立ち枯れの状態となり、倒壊の危険に晒されたので伐採された。この機会に大学にお願いし、このエルムの樹木（胸高直径：約1.5m）を頂いた。年輪の数え方は農学部の先生に教わり、これから2002年と1860年（江戸時代）の年輪の試料を採取した。これについてソックスレー抽出機とN－ヘキサンで有機物を抽出し、^{1}H NMRとガスクロマトグラフフ質量分析（Gas Chromatography－Mass Spectrometry：GC－MS）を行い、樹木中の有機物について検討した。この結果、両者の年輪の中にウインドウオッシャ液（Sodium Polyoxyethylene Nonylphenyl Ether Sulfate（SPNES）とフタル酸化合物（Di－n－（2-Ethyl－Hexyl）Phthalate（DEHP），Di－n－Butyl Phthalate（DBP））が検出され、江戸時代の年輪（1860年）からもフタル酸化合物が検出された。このエルムの立ち枯れ現象は大気中のフタル酸化合物とSPNESによって生じた可能性が高いと思われた。約60年前に発明されたフタル酸化合物が、江戸時代の年輪から検出されたことは、フタル酸化合物は年輪中で移動することを示している。しかし、検出されたストロンチュームは中国が核実験をした年の年輪から正確に特定されたため、ストロンチュームは年輪の中で移動しないことが確認された。

現在住宅用の木材で汚染木材なるものが出回っている。この汚染木材中のフタル酸化合物は木材に加工されると外部に漏れだし、空気中の湿気と一緒になるとフタル酸化合物のDEHP（Di－n－(2-ethylhexyl) phthalate）が分解した2-ethyl－1-hexanol（2E1H）の嫌な匂いを発散していると推定された。

そこで大気汚染中の有機物を特定するため以下の実験を行った。

北大の工学部も札幌市のこの広大な北海道大学の学内の１部にあるため、６階建てのビルの屋上でHigh Volume Samplerなる機械で大気中の有機物（Suspended particulate matter：SPM）を採取し、微量の有機物を調べた。この試料と年輪から得られた試料を比べるため、我々が開発した新しい分析法でエルムの樹木（2000年）の年輪中の以下の３種類の有機物の比率を分子量200-600の物質について計算した（Moriyoshi A., SAE technical paper series, 2002-01-0653,2002-1-6）。その結果、

大気汚染中でフタル酸エステル化合物を含んでいる、この年輪中のディーゼル排煙：アスファルト：タイヤの各有機物の比率はそれぞれ56%，36%，９%となった。北大の学内およびその周辺地域には工場はほとんど存在しないため、この値はほぼ妥当ではないかと思われた。

９．コンクリートの砂利化現象

コンクリートの砂利化現象(鉄筋コンクリートが鉄筋、砕石や砂だけになること)は主にコンクリート橋のコンクリートスラブに穴が開いた時発見されることが多い。

コンクリートの砂利化が発生すると、セメントは「うどん粉の粉」と同じ大きさ(直径：0.05㎜)の白い、粉末状物質になる。また鉄筋の周りのコンクリートはすっかり溶出し、鉄筋の周りは空洞になり、何も付着していない状態になる。しかし、一般にコンクリート橋の上部にはアスファルト舗装(通常２層で７㎝)が施工されているため、この現象を直接見ることができない。現在コンクリートの砂利化の有無について、アスファルト舗装の表面から検知する方法はまだ開発されていない。このため、コンクリートスラブに穴が開いて、初めてコンクリートスラブが砂利化していることに気が付くことが多い。

2001年９月11日に米国のニューヨークで発生した航空機による世界貿易センタビルの倒壊時に、このビルの周囲２－３㎢に亘り厚さ10㎝程度のコンクリートの白い、細かい粉塵(平均直径：0.05㎜)がほぼ均等に降り積もった。現在でも米国ではコンクリートが細かく、白い紛体となった原因は、航空機がビルへの衝突前にテロリストが予めビルの内部に高性能爆弾を仕掛けてあったと信じる人が多い。この紛体の化学成分やその割合はすでにウエブ上で公開されている。一方、北海道にあるコンクリート施工後３か月の滑走路の舗装表面に雪を溶かす融雪剤(１，２－グリコール(88%)，第２リン酸カリウム(K_2HPO_4：１%)，ソディウム－ジ(２－エチルヘキシル)サルフォサクシネート(Docusate sodium，$C_{20}H_{37}O_7SNa$：0.5%)，水(9.5%))を散布したところ、４－５時間後に合計50000個におよぶ多量の砕石(骨材)がコンクリート舗装の表面から一斉に飛び出した。またこのコンクリートの全側面(厚さ：30㎝)はフェノールフタレン液の塗布でほぼ中性化していた。また砕石が飛び出した箇所の底部のモルタル部の跡には「うどん粉の粉」のような白い物質が観測された。このコンクリートはすでに劣化していたため、これを細かく砕いた粉末の化学成分と世界貿易センタビルで飛散したコンクリートの細かい粉塵の化学成分(８種類)間の相関係数を調べた。この解析は劣化するとコンクリートの化学成分はほぼ似たようになるという仮定で行った。これらの分析結果を使って、世界貿易センタビルの倒壊後飛散した15か所から採取した、細かいコンクリートの粉塵中の各化学成分の最小値、平均値および最大値と北海道のコンクリートの劣化した物質の化学成分との相関係数を求めた。

表１　世界貿易センタビルの粉塵と北海道の劣化したコンクリート滑走路の粉末の化学成分との相関係数

	世界貿易センタビルの粉末（N＝19）			劣化したコンクリート滑走路
略称	最小値	最大値	平均値	損傷部
SiO_2	11.4	26.3	14.8	33.4
CaO	9.58	26.01	18.36	31.4
MgO	1.79	6.94	2.88	2.8
SO_3	0.87	5.77	3.11	1
Fe_2O_3	0.55	4.13	1.63	5.66
Al_2O_3	2.27	4.13	2.9	8.35
Na_2O	0.12	1.16	0.57	1.03
K_20	0.28	0.69	0.5	0.57
相関係数	0.987	0.972	0.9671	0.9617

屋外、屋内、桁塗り（N＝10）

表１は滑走路の劣化したコンクリートの粉末試料(化学成分：８種類)と世界貿易センタビルの最大値、最小値および平均値の粉末試料(化学成分：８種類)との相関係数を示している。

世界貿易センタビルで飛散した粉末試料と北海道の滑走路で砕石が飛び出して、砕石の跡の粉末試料および市販の日本の普通ポルトランドセメントのペーストが硬化した粉末試料との相関係数はそれぞれ0.88, 0.91だった。

この結果からコンクリートの劣化した試料および日本の砂利化したモルタル試料の粉末試料の化学成分は米国、日本を問わず、ほぼ同じと思われた。また、この結果は世界貿易センタビルのコンクリートがすでに劣化して、砂利化していたことを示唆している。

次にこの砂利化現象をさらに検討するため、北海道にあった古いコンクリート橋のコンクリートスラブ等の損傷とスラブ中の有機物の分布や有機物の量の面から検討した。２つの北海道の古い橋(「海門橋」竣工：1952年，試料採取:1981年，供用数:29年)と比較的新しい橋(「旧十勝大橋」竣工：1934年，試料採取：1980年，供用年数：46年)のコンクリート床版(各スラブ厚さ：30㎝)に

ついて直径10㎝のコアを採取した。これらをさらに厚さ2.5㎝の７層の試料(2.5×10㎝)に切って、この薄い試料について砂利化現象に対する各種試験を行った。２つの橋は共にコンクリートスラブ(床版)の上に厚さ５㎝のアスファルト舗装が施工されていた。旧十勝大橋では同じコンクリートで作成された橋脚の水中部、および高欄部のコンクリートも採取場所によるコンクリートの損傷の違いを検討するため採取した。水中の橋脚はこの橋の上流側に下水処理場があり、ここから絶えずフタル酸エステル化合物やSPNES等の有機物を含んだ水(白い泡が多数見られた)が十勝川に直接排出されていた。この水のコンクリート(橋脚)への影響も調べるため、旧十勝大橋のコンクリートの橋脚の水中の試料も採取した。この旧十勝大橋の下流側には「千代田堰堤」があり、その近くには産卵のために海から遡上してきた「鮭」を捕獲する大規模な「捕獲場」がある。

この２つのコンクリート橋のコンクリートスラブは以下のような特徴がある。稚内の海門橋は当時セメント製造時にまだ廃棄物を素材として利用していない。しかし、北海道の北の端で冬季が著しく過酷な稚内にコンクリート橋を建設したため、凍結に強いとされたAE減水剤(Pozzolith No.8)を使用した。しかし、試料採取時の海門橋のコンクリート全体がボロボロになっていたため、危険な橋とされ、1981年に橋は撤去された。

一方、旧十勝大橋のコンクリートスラブは当時新進気鋭の北海道大学の工学部土木工学科の横道英雄教授が指導し、鉄筋の矢筈鍛接等を含め先進的な工法および厳しいコンクリートの品質管理で施工している。コンクリートのセメントには廃棄物の素材は一切使用していない。またこのコンクリートは帯広の十勝川を跨ぐ寒い箇所にも拘らず、AE減水剤も使用していない。このコンクリートは「浅野セメント」(普通ポルトランドセメント)を330㎏／㎥使用し、水／セメントが52%で、スランプは8-13㎝、砂は559㎏／㎥、砂利は1305㎏／㎥だった。このコンクリートの圧縮強度は７日で100㎏／㎠、28日で240㎏／㎠、90日で340㎏／㎠で、28日の引張強度は22㎏／㎠だった。鉄筋は最大長さ25m、直径44㎜の丸鋼を使用し、鉄筋の接続は「矢筈鍛接」とした。コンクリートは以下のように品質管理を徹底した。冬季施工中(外気温：－4.8～－15℃)は、ヒータの入った防寒小屋を設置し、コンクリートの温度はいつも５℃以上にした。コンクリート打設時に米国の振動転圧機(Viker No.15, 1／2HP, 振動数8000回／分)を使用した。複数の振動転圧機の間隔は30㎝とし、振動は30秒／１回、ブリージングや泡は除去し、型枠表面に生じた泡は手で掻きとった。すでに打設し硬化を始めたコンクリートの内部を攪拌しないために、そのコンクリートの内部までバイブレータは挿入しなかった。先に打設したコンクリートの表面のレイタンスはタービンポンプの噴射で除去し、モルタルをその上に塗布し、その上にコンクリートを打設した。(横道英雄、土木学会誌、29(2), 1943、20-44)。

大気中に多量に浮遊している有害有機物のうちフタル酸エステルおよびSPNESの量は、その地域の交通量に比例している。そこで２つの橋の付近の交通量を調べると海門橋では8700台／日であるのに対して、旧十勝大橋では14000台／日と、ほぼ倍の交通量だった。２つの橋のコンクリートは大気中の湿気と極微量の有機物を自身の呼吸作用(大気の変動と共にコンクリートが呼吸しているような動作をする)により、コンクリートの内部に吸収した。大気中の有害な有機物汚染(コンクリートの有害有機物)の排出源はアスファルト、タイヤ屑、SPNESおよびディーゼル排煙である。この排出源は世界共通のため、大気汚染は地球規模になっている。

次にこの２つのコンクリートスラブの損傷の診断ができるように、この２つの古いコンクリート橋のスラブから採取した直径10㎝のコアから厚さ2.5㎝に切断された７等分の試料を使って以下の実験を行った。

実施した試験は以下のとおりである。旧十勝大橋の橋脚のコアは水中にあった橋脚の側面から奥に向かってコア試料(直径10㎝)を採取した。高欄の下部の基礎コンクリート(高さ：36㎝, 奥行き：30㎝)のコアは同じ箇所の基礎コンクリートの上、下の２カ所で側面から試料(直径10㎝)を採取した。

採取したコア(直径：10㎝)はすべて厚さ2.5㎝の試料に薄く切断した試料について圧劣試験(2.5×10㎝)を実施し、圧劣強度を求めた。その後、この各試料を細かくハンマーで砕き、これを篩にかけ、0.074㎜以下の粉末試料(ほぼ20g)の試料を採取した。この試料に対して、クロロフォルムとソックスレー抽出器を使って、粉末試料から有機物(約5g)を抽出した。

各種実験は以下のように実施した。

抽出した粉末試料中のカルシウム量のBMC(ｇ)量(Bone Mineral Content)はHologic QDR－4500を使って測定し、有機物量はソックスレー抽出の前後の重量を使って測定した。このとき、この抽出した粉末の試

料に対して、BET法(Shimadzu－Micromeritics Gemini 2370)を使ってこの試料の比表面積を測定した(Tomoto T., Canadian Journal of Civil Engineering, 35(7), 744－750,(2008))。

これらの結果を使って、２つのコンクリート橋のコンクリートスラブ中の深さ方向の有機物分布を調べた。様々な因子のうち、まず、試料中の有機物の分布と砂利化の関係を検討した。

この実験の目的は砂利化に関する要因の因子を見つけることである。コンクリートスラブ中の有機物の量はコンクリート構造物の砂利化に対して全く評価できなかった。このため、コンクリートの砂利化現象が確認できる試験方法(因子の特定)の開発が長い間望まれていた。

図１は北海道の２つの橋のコンクリートスラブの層(７層)毎の有機物分布を示す。

この結果から、有機物はコンクリートスラブの深さに比例し若干多くなっていた。

コンクリートの砂利化はコンクリートのスラブの表面から始まる。

よって、スラブ中の有機物量はコンクリートの砂利化に直接関係がない。これより、海門橋のコンクリート中の有機物量は深さに関係なく、旧十勝大橋のそれよりコンクリートスラブ全体に多かった。また、海門橋では２層目より１層目の方の有機物が多いが、旧十勝大橋では１層目も２層目もほぼ同じ有機物量である。これは後で述べるが、海門橋ではAE減水剤を混入しているため、コンクリートのスラブの表層近くで、大気中の有害有機物を多く吸っているためと推測された。

この有機物が多い原因は海門橋ではコンクリートに吸湿性、および吸着性の高いAE減水剤(Pozzolith No.8)を使ったため、大気中の有害有機物をコンクリートの内部に大気中の湿気と一緒に吸収してコンクリート中の有機物量が多くなったためである。

コンクリート中にAE減水剤が入っていると大気中の湿気や極微量の有機物をAE減水剤が吸収し易く、かつその吸収速度が極めて速く、AE減水剤を使ったコンクリートは劣化が早いことを私はたまたま見つけた(Tomoto, Building and Environment, 44,2000－2005,(2009))。このため、AE減水剤の入ったコンクリートスラブは大気中の湿気や有機物を吸着・吸収しやすいため、湿気と一緒に極微量の有害有機物も大気中から一緒にスラブ中に取り込むため、コンクリートは劣化しやすく、砂利化も早かったと推察された。

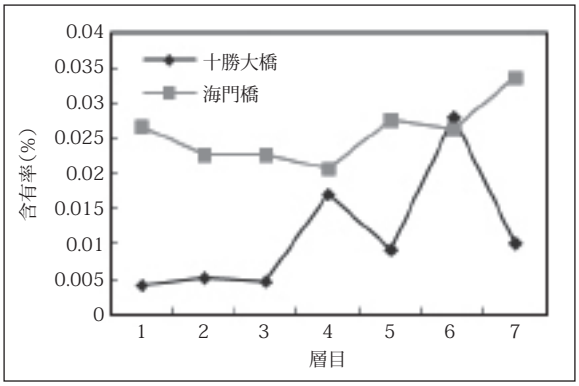

図１　２つのコンクリート橋のスラブの深さ方向の有機物含有量(%)

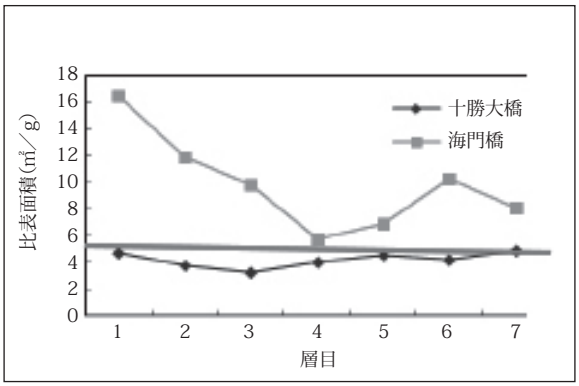

図２　２つのコンクリートスラブ中の深さ方向の比表面積

一方、圧劣強度は深さ方向で若干増加傾向にあったが、表面と底部の値の相対値に明確な差(30%)はなかった。BMCは深さ方向に若干増える傾向にあったものの、BMCの最小値と最大値の差は10%程度の差だった。このため、表面とピーク時のBMCの値から、BMCの値もまた砂利化の指標ではないと思われた。

図２は２つの橋のスラブから得られ、クロロフォルムとソックスレー抽出器で有機物を抽出後、BET法で試料の比表面積を測定した結果を示す。

図２に示すように比表面積では最大値(17㎡／g)と最小値(6㎡／g)の比は35%(海門橋)となっていた。海門橋はスラブ全体が中央部(４層目および５層目)でも砂利化していた。また、海門橋では１層目から３層目まで(深さ10㎝)の比表面積が旧十勝大橋と比べると異常に大きい。

この図２より、砂利化はコンクリートスラブの表層から始まり(砂利化は１層目で多く発生する)、その後底部でも発生する。しかし、旧十勝大橋ではほとんどコンク

リートスラブが劣化していないため(フェノールフタレン塗布でコンクリート床版の表面の劣化深さは平均値で14㎜／46年)、このフェノールフタレン塗布による劣化深さと砂利化を示す比表面積とは関係がない。しかし、旧十勝大橋は厚さ５㎝のアスファルト層の下に、厚さ５㎝の均しコンクリートがあった。コンクリートスラブの上部に打設した厚さ５㎝の均しコンクリートの比表面積は17.4㎡／gだったので、均しコンクリートは極めて速く砂利化したと推察された。この２つのコンクリートスラブの比表面積の値から、比表面積の値が砂利化と密接に関係していれば、海門橋の比表面積の値やその変化から、AE減水剤を使用した海門橋のコンクリートスラブ(供用29年)は深さ10㎝程度(３層目まで)までだけでなく、６層目まで大気中の有害有機物が浸透し、砂利化したと思われた。これよりAE減水剤を混入したコンクリートは表面近くだけでなく深部(６層目目)まで有害な有機物を吸収し、大気汚染物質が原因で砂利化したことになる。

一方、AE減水剤を使用していない旧十勝大橋のコンクリートスラブは大気中の有害物質をほとんど吸収していないため、46年の供用にも拘わらず、極めて健全(スラブ表面の14㎜の劣化のみ)であった。

以上の結果より、図２に示すように砂利化の「基準値」は２つの橋の比表面積の値から、図中に横線で示した約５㎡／gと思われた。

大気中の有害有機物のうちフタル酸エステルおよびSPNESの量は、その地域の交通量に比例している。そこで２つの橋の交通量を調べると先に述べたように海門橋では8700台／日であるのに対して、旧十勝大橋では14000台／日のほぼ倍の交通量であった。従って海門橋の有機物が多いのは吸収性、および吸着性の高いAE減水剤を使ったためである。経年数は海門橋の29年、旧十勝大橋は46年であるため、海門橋のコンクリートの寿命が極端に短かったのは、AE剤の使用で砂利化が早く進んだためと推察された。

図１と図２と比べると　有機物量と砂利化(比表面積)現象は互いに比例関係にはない。しかし、有機物はコンクリートスラブの底部、橋脚の深部にも多く溜まっているが、砂利化は底部で多く発生しないことから、コンクリートの砂利化の指標は有機物量よりも比表面積が適切と思われた。また、水中の橋脚のコンクリートも深部ほど有機物の量が多いことから、水中のコンクリートも大気に晒されるコンクリートと同じように水温変化と共に「呼吸」してコンクリートの内部に有機物が浸透したと思われた。このようにコンクリートの「部材」毎に有機物の量が異なるのは、これらの「部材」の表面温度および深部温度が異なるため、「呼吸」の程度が異なったためと推察された。

さらにこれらのコンクリートスラブ中の有機物を調べるため、２つのコンクリートスラブの１～７層の試料について、^{1}H　NMR試験を実施した。これより、旧十勝大橋の１－２層目(2.5-5㎝)までのNMRのスペクトルではアスファルトのピークを示す「0.9, 1.2, 1.5ppm」しか検出されなかった。また旧十勝大橋のコンクリートスラブの表面ではフタル酸エステルやウインドウオッシャのピークも１－２層目(2.5-5㎝)でほとんど検出されなかった。しかし、旧十勝大橋のコンクリートスラブのこれより深い箇所(深さ５㎝以下：３層目～７層目)では、フタル酸エステルやウインドウオッシャのピークが明確に微量ながら検出されたので、旧十勝大橋のコンクリートスラブには、大気中の有害物質が微量ながら浸透したと推測された。旧十勝大橋では大気中の有害有機物はコンクリートの表面近くでコンクリートにトラップされなかったため、フタル酸化合物やウインドウオッシャ(SPNES)は検出されなかった。この結果から、AE減水剤をコンクリートに使わなければ、大気中からこの有害物質は吸収されてもコンクリートの表面近くではほとんどコンクリートに付着(吸着)しないため、コンクリートスラブの表面近くでも劣化が少ない。このため、旧十勝大橋のようなコンクリートを使用すると、大気の有害物質に対してもコンクリートは極めて抵抗力が大きく、かつ、極めて劣化しにくい。そのようなコンクリートが古い時代にすでに築造されていたといえる。この旧十勝大橋の超耐久性の良いコンクリートの要因は、呼吸しているコンクリートが大気中の有害物質をコンクリートの内部で簡単に吸収や吸着していないためと考えられた。

２つの橋のコンクリートスラブ中の有機物量について再度検討すると、以下のようであった。

大気中から吸収したフタル酸エステルはコンクリートのカルシウム成分と反応し、フタル酸カルシウム(水溶性)となった物質や水溶性のSPNESは浸透性が良いため、コンクリートの深部まで浸透し「部材」で異なっていた。そのため、海門橋の７層目の有機物は0.034%と深部に多かった。この有機物は旧十勝大橋のコンクリートスラブ中の有機物量(表面(１層目)：0.015%，深部(６層目)：0.027%)と同じように深部に集中していた。し

かし、旧十勝大橋のコンクリートスラブより水中のコンクリートの橋脚に多くの有機物が含まれていた(表面：0.023%，２層目：0.04%)。これはこの川の上流の下水処理場から排出される有害有機物が水中でかなり多かったことを示している。一方旧十勝大橋の「部材」の高欄部の有機物量は上部の表面で0.037%，下部の表面で0.027%であった。これらの結果より、コンクリートの有機物量は同じ橋でも「部材」の異なる高欄部、橋脚部、コンクリートスラブですべて異なっていたため、同じ橋のコンクリートでも劣化や砂利化がすべて場所によって異なっていることを示している。一方、十勝川の水温は５月に約10℃から７月のピーク時の約25℃を経て、９月にはまた約10℃に戻る。(近藤忠三、地学雑誌、62(1), 687,13-21,(1953))。橋脚のコンクリートの表面温度が深部よりも高い場合、水中の有機物がコンクリートの内部に浸透すると考えられた。橋脚はこのような状態が１年に１回の温度変化(呼吸)となるが、大気に晒されるコンクリート橋の各「部材」は夏季には毎日１回(午後12時～24時)大気汚染物をコンクリートの内部に吸収している。この吸収回数がすべてコンクリートの呼吸作用(有機物の吸収量)に関係すると仮定すると、水中の構造物は大気に晒される「部材」の温度変化の回数のほぼ1／10となる。しかし、旧十勝大橋のコンクリートの橋脚部の深部の有機物量が0.04%であり、床版のスラブの深部(30㎝の深さ)では0.029%となって橋脚部の有機物が若干多くなっている。これより旧十勝大橋近辺の水中のコンクリートに有害な有機物の濃度は大気中のそれより、異常に多いことを示している。

10. 砂利化の原因

コンクリート構造物は構造物自身も１日の外気温の変化に応じて、呼吸をしているかのように空中の湿気や有害物質を内部に吸収したり、排出したりする(１日に各１回ずつ、外気温の変動に伴い、吸収と排出(午前０～午後12時)の繰り返し作用をする。これを私は「コンクリートの呼吸」と呼んでいる)。

コンクリート橋がこの呼吸作用で外気の湿気を吸収する量を調べるため、１次元非定常透湿試験を以下のように実施した。

夏季の高温多湿の名古屋の気象条件で、新設のコンクリート橋(AE減水剤使用)から採取した直径10㎝のコア試料(アスファルト舗装とコンクリートスラブの付いたコア試料：アスファルト層２層の７㎝、切断した下層のスラブ厚：５㎝)の表面にSPNES(ウインドウオッシャ液)を1.6g載せ、１日(24時間の夏季条件)で、大気中と同じ相対湿気と温度を24時間の繰り返し行う環境条件(３倍速度で24時間を８時間に短縮した加速試験)で１次元透湿試験を46回繰り返した(これは夏季の環境条件を２週間続けたことに相当する)。この透湿試験(46回)で湿気は約20g吸収していた。１回(１日：８時間)の湿気吸収量は約2gで、繰り返し回数とともにこの湿気の重さが増加した。これより、コンクリート構造物は「呼吸作用」で極微量な有害物質(SPNES：1.6g)により、46回の「24時間を８時間に短縮し加速した繰り返し透湿試験」を室内で実施すると、切断したコンクリートスラブの厚さ５㎝がすべて劣化した。この劣化したコンクリート中にSPNESの成分が含まれていることは^{1}H NMR試験を使って確認した(Sasaki I, J. of the Japan Petroleum Institute，49(6)，315-320,(2006))。夏季は外気温が高く、かつ相対湿度も大きいため、春、秋よりも多くの有機物を空中からコンクリートは吸収していた。この吸収作用は夏季と同じ一定温度(最高温度)、一定湿度(最高湿度)の中にコンクリートを晒しても、コンクリートは、ほとんど湿気や有機物を吸収しないことも実験室で確認した。

AE減水剤を混入した硬化した粉末のセメントペースト試料の外部からのDEHPの吸収の程度を調べるため以下の実験を行った。

二重チェンバー法でフレッシュなセメントにAE減水剤(Pozzolith No.70，セメント×0.25%)を添加し、硬化したセメントペーストの粉末試料は極めて短時間にこの試料の上部に乗せた0.4gのDEHPに対して、相対湿度50%の新鮮な湿気を450ml／分吹きかけると、瞬時にDEHPは加水分解し、2-ethyl-hexyl-phthalate(2E1H)ガスがAE減水剤の入っている試料では早く、かつ長期間(92時間)に亘って、多くのガスが発生した。これはAE減水剤を含んだ試料は大気中の有害有機物を短期間にかつ多量に吸収して、コンクリートは劣化しやすいことを示している(Tomoto T. Building and Environment，44,2000-2005,(2009))。

アスファルト舗装は砂利化すると舗装内部に大気空中の極微量の有機物と湿気が一緒に内部に吸収され、それが含水量１-３%の水として舗装の内部に溜まる。アスファルト舗装は150℃の高温で施工されるため、施工直後のアスファルト混合物の含水量は0.5%以下であ

る。このため、このアスファルト混合物中の含水量はアスファルト舗装の砂利化と関係がある。それはこの水の中に大気中に浮遊している陰イオン系のウインドウオッシャが湿気と一緒に含まれており、これがアスファルト舗装中のアスファルトを溶解し、下部層に溶出するためである。このため、アスファルト舗装の砂利化のメカニズムはコンクリートの砂利化のそれとは異なる。従って、アスファルト舗装の砂利化はウインドウオッシャ液で、一方コンクリートの砂利化はAE減水剤、フタル酸化合物、リン酸化合物によって生じる。

このようなアスファルト舗装やコンクリート構造物の砂利化をもたらす有害有機物は走行車両のある地域の大気中に浮遊している物質の中から検出され、その化学成分は砂利化したアスファルト舗装およびコンクリート構造物中で検出された化学成分と同じであった。

これより、大気汚染(アスファルト、タイヤ屑、ディーゼル排煙、およびウインドウオッシャ液)は世界中に広がっていることを示している。

2000年７月２日午後３時20分(夏季)に旧名古屋空港のアスファルト舗装の滑走路(2740×45m)で大規模な表層剥離(長さ８m，幅４m，厚さ５㎝)が飛行機の走行直後に突然発生した。この剥離位置は飛行機が滑走路に出て、フルブレーキをかけて、これからエンジンを全開にして出発する箇所(アスファルト滑走路の端)で起こった。しかもこのような滑走路の表層剥離はこの空港では２度目である。これは飛行機のタイヤによる舗装表面の夏季の暑いときに発生するせん断破壊で生じたと思われた。このためこの滑走路は全面通行止めとなった。

早速、大規模な委員会が出来て、滑走路に多数生じていたブリスタリング(直径30㎝，高さ4㎝の表層の膨れ現象)やこの剥離現象等の解明をするために、様々な箇所から直径10㎝のコア試料をドライ状態(水を使わない方法)で多数のアスファルト舗装のコア試料(直径10㎝、深さ30㎝)を採取した。このとき、コア採取をしたとき、ブリスタリングが発生した下面(基層の上部)に多量の水が溜まっており、ブリスタリングの発生箇所では以下に示すプライムコートが完全に消失していた。このため、この水が発生した原因とブリスタリングの原因、表層の剥離現象の解明を行った。

ブリスタリングは大気中の湿気がアスファルト舗装中に自身の呼吸作用で浸透し、アスファルト層の底部で湿気が冷やされて水になったと仮定した。この現象を解明するため、この空港でブリスタリングが発生した箇所および全く発生していない箇所の表層および基層の透気試験を行い、これより、表層の透気係数が10^{-7}㎝／秒以下の箇所になったとき、多数のブリスタリングが発生することを見つけた。ブリスタリングが発生する箇所は飛行機のタイヤが常に走行する箇所で、かつ高温時にタイヤの繰り返し走行を受け、アスファルト舗装が繰り返しこね返しを受け、圧密される箇所であるため、アスファルト舗装の表層用混合物の透気係数が極めて小さくなっていることが原因である。

アスファルト舗装にブリスタリングが発生した基層の下部に水が大量に溜まる原因を調べるため、上と同じような箇所で表層、基層が一体となった試料を採取し、これに１次元非定常透湿試験を名古屋の夏季の気象条件で実施した。これより、表層の透水係数が10^{-7}㎝／秒以下となる箇所では、この試験で多量の水分が溜まることを見つけた。

さらに、アスファルト舗装の基層の下部のタックコートの消失原因を調べるため、直径10㎝、深さ30㎝のコアを採取した。この試料を2.5㎝厚に切断し、各層についてクロロフォルムとソックスレー抽出器で有機物を抽出し、これについて^{1}H NMR試験を行った。その結果、すべての層からアスファルトを溶融する「陰イオン系の界面活性剤」のウインドウオッシャ液の化学成分が検出された。このため、アスファルト舗装で表層と基層の間に存在したタックコート(陽イオン系乳剤：表層と基層の接着剤)やアスファルト層と路盤の間のプライムコート(陽イオン系乳剤)のアスファルト乳剤もこの陰イオン系のウインドウオッシャ液で完全に中性化して溶解し、アスファルト舗装のアスファルト成分は下層に溶出(砂利化現象)したと推測された。このため、アスファルト舗装の表層の表面剥離は表層と基層の間のタックコートがウインドウオッシャにより広い面積で完全に溶解し、すでに界面が剥離していたため高温でタイヤのせん断により滑って剥離したと推測された。

一連の現象から様々なアスファルト舗装の損傷現象(ブリスタリング、表層剥離、プライムコートの消失、砂利化)はすべてウインドウオッシャが原因である。アスファルト舗装は高温で飛行機のタイヤにより圧密化され、透水係数が小さくなり、呼吸ができなくなったのがこれらの損傷の原因である(Sasaki, J. of the Japan Petroleum Institute, 49(2), 57-64,(2006))。

一方市販のセメント中から極微量のフタル酸化合物、リン酸化合物が検出され、AE減水剤や界面活性剤の入っ

た融雪剤もこれらと共にコンクリートの劣化、砂利化や亀裂に著しい影響を与えていることも見つけた。これらの影響を調べるため、現代の市販の普通ポルトランドセメントを使ったモルタル試料(AE減水剤なし)と120年前に作られた小樽のモルタル試料(120年モルタル：広井勇博士の空中保管試料)の各モルタル試料の内部の劣化や亀裂状態についてマイクロフォーカスCTスキャナーを使って検討した。２つの試料は現代の市販されている普通ポルトランドセメントを使ったモルタル試料(20×20×20㎜，W／C＝50%)は打設30日後の試料で、一方120年モルタル試料は室内の空気中で120年間保管されていた試料(幅4.5㎝，長さ８㎝，厚さ2.3㎝，W／C＝44%)である。前者はセメント材料として廃棄物(都市下水の焼却灰)や廃プラスチック、廃タイヤが使用されており、後者ではセメントは粘土、珪石、石灰岩だけで製造されたセメントである。これらの試料についてマイクロフォーカスCTスキャナーを使ってモルタル試料の内部の劣化を調べると、劣化の程度を示すDD値(Degree of deterioration：２次元のCT画像でセメント中の化学物質が劣化して非晶質化し、CT画像で薄黒くなった部分の割合を計算した値)は前者で８%，後者は1.8%であった。また特殊な亀裂解析用のソフトウエアで３次元のCT画像を使って試料中の亀裂(亀裂幅：0.2㎜以上)の長さを亀裂幅毎に解析した。コンクリートで補修が必要と言われている亀裂幅の0.2㎜以上の亀裂の長さを比較すると前者は後者の4000倍であった。なお、市販のセメント中にフタル酸化合物が含まれていた割合は0.0012%、リン酸化合物は0.12%、AE減水剤は0.24%である。しかし３者の有機物の単独で求めたDD値は共に同じオーダーのDD値となっていた。これよりフタル酸化合物は極めて微量でもコンクリートの劣化や亀裂に、特に亀裂や砂利化に著しい影響を与えることが分かった。セメントの世界中の品質規格でこのような極微量の有機物を規制する国は一切存在しない。

これより空中の極微量な有害物質が構造物自身の呼吸作用によって、コンクリート構造物やアスファルト舗装がさらに短期間で損傷を受けることも納得できると思われた。

また、様々な国で市販されているセメントからも同じような有害物質(2E1Hのガス)が検出されたため、これは廃棄物がセメントの製造に使われ、DEHPで「汚染」されたセメントが世界中に広がって、その「劣化しやすいセメント」をコンクリートに使用していることを示している。このセメント中のDEHPの汚染状況を確認するには、市販のセメントに水を混合すると、フタル酸化合物の加水分解の成分である嫌な匂い(2-ethyl-1-Hexanol：2E1H)が瞬時に放散された。この現象は市販のセメントがすでにDEHPで汚染されていることを、私は実験中に偶然見つけた。

11. コンクリートのミキサー車およびバイブレータと砂利化

コンクリートは通常ミキサー車で現場まで30分以上かけて運ばれる。コンクリートは30分の間に次第に硬化すると一般に言われているが、コンクリートが硬化するまでの時間を正確に測定した研究者はいない。旧十勝大橋を作った横道英雄教授は昭和16年にすでにAE減水剤を使わなくても、普通ポルトランドセメントを使った条件で、振動転圧機でコンクリートを転圧するとき、すでに打設したコンクリート層の中までバイブレータの先端部を挿入しないように現地で指導していた(横道英雄、土木学会誌、29(2)，1943、20-44)。このため旧十勝大橋のコンクリートの施工ではこの振動締固めの行為を先に打設したコンクリート中で禁止している。この理由はコンクリートを平面的に層状に打設する場合、同じ現場でもすでに打設したコンクリートはすでに硬化が始まっていて、このバイブレータの転圧によりコンクリートがこの硬化を攪乱していることを横道教授は約80年前にすでに知っていたと思われた。

筆者は室内において市販の普通ポルトランドセメントでモルタル試料(２×２×２㎝)を作成し、打設後１日でマイクロフォーカスCTスキャナーを使ってモルタルの内部を撮影した。この結果、打設後１日ですでにモルタルの内部に多数の亀裂や劣化が発生していたことから、モルタルは打設直後に硬化している可能性が強いと思われた。しかし、現状はコンクリートをミキサー車に乗せ、コンクリートをミキサーの羽根でかき混ぜながら、現場に運んでいる。これはコンクリートの一部がすでに内部で**表２**に示すフタル酸化合物がコンクリート中のカルシウム成分との化学反応(極微量でもフタル酸化合物は難水溶性のため、極めて長時間の間に亘って生じる化学反応)をしているため、ミキサー車はこの化学変化を繰り返し、コンクリートの硬化を壊しながらコンクリートを現場まで運んでいることになる。これが正しければ、ミキサー車で運んだコンクリートは化学変化したコンク

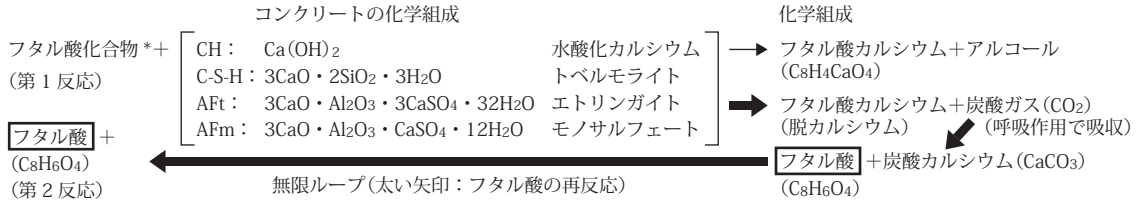

表 2　フタル酸化合物のカルシウムとの再反応

リートの化学組成物をミキサーで常に壊しているため、ミキサー車によるコンクリートの運搬はコンクリートの砂利化を早める原因になっていると思われた。すなわち、セメント中のフタル酸化合物(DEHP)は水溶解度が極めて小さく、かつ難水性(41μg／L)のため、ミキサー車の内部の羽根の回転と共にコンクリート中でフタル酸カルシウムを生成し、その後コンクリートが外部の炭酸ガスを吸収して、表２に示すフタル酸とカルシウムとの化学反応の「再反応」もを絶えず促していると思われた。

すなわち、コンクリートミキサー車は強制的にコンクリート中のDEHPとコンクリート中のカルシウム成分の化学反応(劣化や亀裂)を促していると思われた。その現象は以下のことで分かった。新設の硬化したセメントペーストを粉にし、10g採取し、この試料の上にDEHPを0.4g乗せ、外から新鮮な湿気(450ml／min，相対湿度50%)を上から吹きかけると、難水性のDEHPがセメントペーストで徐々に加水分解して2E1Hガスを多量に空中に放散する。その現象は極微量のDEHP(0.4g)でも92時間後でも24時間後と同じ量のガス(2E1H)が常時多数放散されていた(Tomoto T. Building and Environment, 44,2000- 2005,(2009))。これより、DEHPは難水性のため、極めて長時間に亘って、セメント中のカルシウム成分と化学反応してフタル酸カルシウム(脱カルシウム化)を生成していることを示している。フタル酸化合物の量は119μg／(10gのセメント)の極微量でもセメント中にあると瞬時に、かつ徐々に、この化学反応が起こる。これより、極微量の119μg／(10gのセメント)のフタル酸化合物(またはフタル酸)でもセメントと水の混合直後から長期間(92時間)に至るまで、セメント中のカルシウム成分と化学反応(脱カルシウム化)が絶えず起こっていると思われた。

またコンクリートの転圧作業は、昔は竹の棒で行っていた。コンクリートの内部は竹でつついてコンクリートを転圧していた。しかし、現在は棒状、または平板状の強力なパワーのバイブレータを使用している。棒状のバイブレータ付近で、AE減水剤を添加したコンクリートで40G、プレーンコンクリートでは12Gの加速度がコンクリートに掛かっている。このため、コンクリートはバイブレータで簡単に液状化をさせながら転圧できるとしている。さらに、コンクリートはバイブレータによる転圧中にすでに局部的な亀裂や劣化が生じていると推察された。旧十勝大橋で使ったバイブレータは1／2HPとパワーが小さかったが、現在のバイブレータの出力が強力すぎるのではないかと私は思っている。

このコンクリートのバイブレータによる転圧は地震で有名な砂地盤で現れる液状化現象と似ている。砂の液状化は砂の中の細かい空気と水が地震で揺すられて、砂が空気と一緒に一斉に地面の表面から水と一緒に吹き上がる。私はこの過程で砂層の細かい泡が上昇時の途中で次第に互いに連成し、細かい泡が次第に大きくなりながら液状化が進んで、最後にはこれが地表の表面から噴水のように噴き出していると捉えている。すなわち地震時の砂の液状化の発生は砂の内部の細かい空気(泡)が原因と考えている。基礎工事で潜函工法という、水面下の大きな箱の中で箱の内部に大きな圧力をかけて作業中の箱(潜函)内に水が浸透しないようにして、この箱の内部の土砂を掘り進む工法がある。この工法で建設した箇所は地震で砂の内部の細かい空気がすでに圧力により外に出ているため液状化は発生しないといわれている。振りかえってみれば、コンクリートのバイブレータによる転圧作業はこのコンクリートの液状化を起こし、コンクリートの内部で自由に動ける細かい泡をコンクリートの外に押し出していると思われる。しかし、AE減水剤をコンクリートに使用すると、コンクリート中でこのAE減水剤の小さな泡はバイブレータを掛けた時、互いに電気的に同じイオンに帯電している界面活性剤で作られた小さな泡に電気的に互いに反発し、細かい泡は互いに連成しないため、泡は大きくならない。従って、バイブレータを

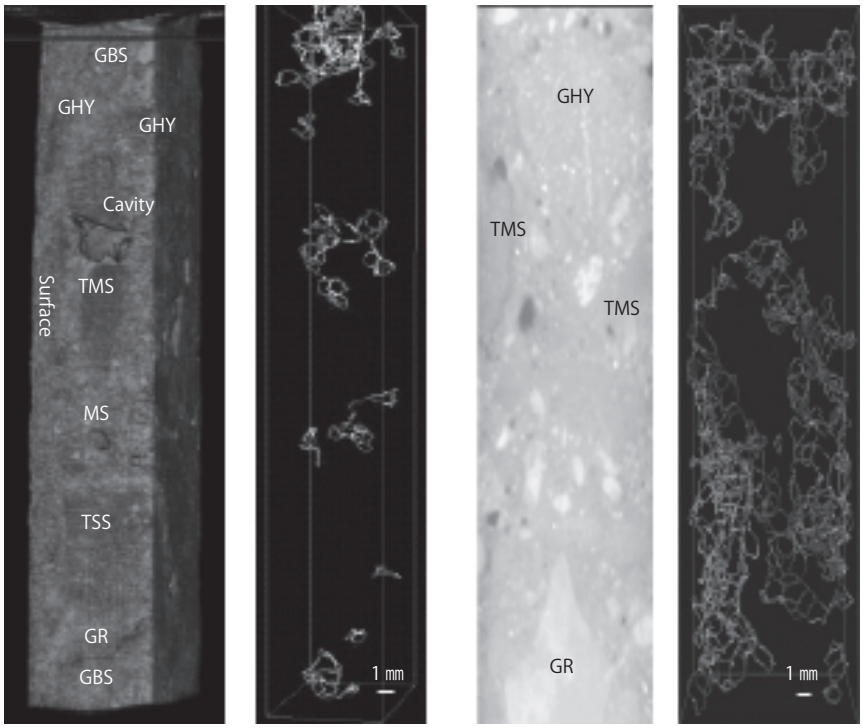

図３　１層目（A,B）と２層目（C,D）のコンクリート中の３次元の亀裂分布（Moriyoshi A. PLOS ONE, 16（5）,（2021））
GBS（basalt-turned greenstone: 玄武岩（緑色岩化））,GHY(basalt-turned hyaloclastite: ハイアロクラスタイト（緑色岩化））、TMS（transformed mudstone: 変性泥岩）, MS（mud stone: 泥岩）、TSS（transformed sand stone: 変性砂岩）， GR（granite stone: 花崗岩質類）、Cavity（表面の穴）

コンクリートに掛けているとき、自由に動ける細かい泡だけがバイブレータの力で液状化し、コンクリート表面から抜ける。その上、現代のバイブレータのパワーが非常に強い為、コンクリートは液状化を起こすときすでに材料の局部的な分離が発生していると推察された。特に平板の振動機、特にトロウエルではAE剤の比重が1.04-1.08と比較的大きいため、すべてのコンクリートの表面から2.5㎝以下の部分にAE減水剤が偏って、これがコンクリートの層状剥離や層状亀裂を引き起こしている。

この層状剥離や舗装の表面からの多量の砕石が飛び出した原因を調べるため、先の９．に述べたコンクリートの滑走路（厚さ：30㎝）で融雪剤を散布したコンクリート舗装から試料（幅５㎝，奥行き30㎝，厚さ30㎝）を採取した。この試料から2.5×2.5×8㎝の小さな試料を９層に亘って採取した。この小さな試料についてマイクロフォーカスCTスキャナー（CT）を使って、内部の亀裂、AE剤の分離、および砕石の飛び出しの原因について検討した。

図３のA, Bはコンクリート滑走路の表面から2.5㎝（１層目）までのCT画像を、C, Dはその下の深さ3−5.5㎝（２層目）におけるCT画像（左側が表面）を、それぞれ２次元の白黒の砕石画像と３次元のカラーの亀裂画像として示す。１層目の３次元の亀裂画像（A,B）では、２層目（C,D）のようにモルタル部での亀裂が全く存在しないで、砕石の周りにのみ亀裂が存在する。しかも２層目から９層目までの空隙率は14.2- 26.6%であり、この値は１層目の8.1%より異常に大きい。最大亀裂幅は１層目で1.44㎜であるのに対して、２－９層目の最大亀裂幅はすべて同じ1.2㎜であった。しかし、２層目以降ではすべて２層目とほぼ同じ密な亀裂状態であるため、コンクリート中のAE減水剤はバイブレータで分離し、２層目以下の部分に存在することを示す。

これより１層目は９．で述べた陰イオン系の融雪剤が浸透し、骨材が膨張して骨材の周りで亀裂が発生してい

ることを示している。このセメントにAE減水剤をモルタル試料に添加すると、試料は6.8%膨張する。この状態で融雪剤が散布されたため、さらに砕石の膨張圧が大きくなり、舗装の表面から砕石が飛び出したと予想された。

さらに、図３のC，Dにおいて２層目の上部（深さ３㎝）に複数の横亀裂が見られた。これは表面近くに現れる層状剥離（亀裂）を示している。

また、この滑走路で多くの砕石が融雪剤の散布直後に飛び出し、これが砕石の性質に依存していたため、古いコンクリートを全面撤去して、砕石として石灰岩（Lime stone：5-20㎜）と輝緑岩（Diabase：20-40㎜）で再舗装した。その結果、セメントと融雪剤は元のコンクリートと同じものを使用したが、砕石の飛び出しはなかった。これより、先のコンクリート舗装では、使用した融雪剤の散布による砕石の膨張が原因で砕石が表面から飛び出したと思われた。骨材を変えた後の舗装の表面では少量の砂利化が観察された（Moriyoshi A.PLOS ONE, 16(5), (2021)）。

さらに、AE減水剤は界面活性剤であるため、AE減水剤を含むものは形が細かい球状となり、このAE減水剤の球状の細かい泡の中で、コンクリート中のカルシウム成分がAE減水剤と化学反応し、以下のように砂利化の原因になっている。

AE減水剤の砂利化への影響を検討するため30年経過したダムのコンクリートのモルタル部を採取した。

図４は２種のAE減水剤をダムのコンクリートに使用し、約30年経過したときのモルタル部の２種の陰イオン系のAE減水剤の形をCTで測定した２次元の画像を示す。薄黒い大きな円は通常のAE減水剤、薄黒い小さな円は固いコンクリートを動きやすくする非常に細かい泡となる陰イオン系のAE減水剤である。この画像はCTスキャナーの「２次元画像」の画像である。

図４の黒い物質はAE減水剤による「非晶質物質」で、CT画像では水分が相対的に多く、低比重となったとき、薄黒く撮像される物質である。この細かい泡の中でコンクリートはすで劣化し、砂利化していることを示している。２種のAE減水剤は、大きな黒い円が陰イオン系のPozzolith No.8、小さな黒い円は陰イオン系の助剤のPozzolith No.202である。いずれも薄黒い円の内部で細かく白く見える物質はこの円の内部でコンクリートが砂利化（大きな黒い円の中で直径0.02㎜の細かい白い粒子が剥き出しになっている。これは、シリカ粒子と推測

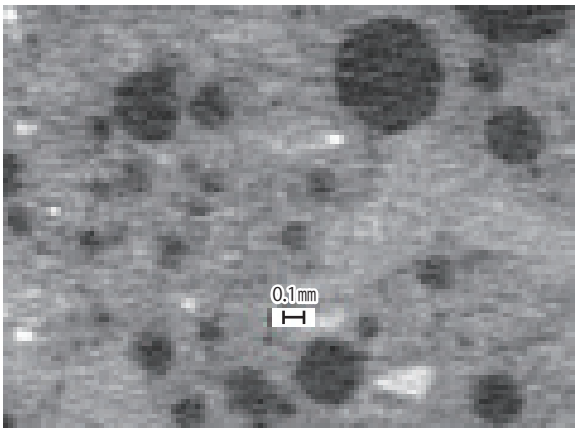

図４　ダムのコンクリートのモルタル部の２次元のCT画像
（約30年経過）

された）していることを示す。これよりコンクリートの砂利化はAE減水剤の細かい泡の中から始まっている。

AE減水剤は陰イオンに帯電している界面活性剤のため、コンクリートの内部で通常の泡のように自由に動かず、かつ合体する通常の泡と異なって互いに合体しないで常に互いに反発しながら、１個１個単体で独立してAE減水剤の泡として動いている。２次元のCT画像でフタル酸化合物の非晶質物質は「平面的」に分布しているが、AE減水剤は化学反応して球状の非晶質物質（図４の薄黒い「球状物質」の「独立物質」となっているため、コンクリート中では単位体積当たりのAE減水剤の影響が極めて大きくなる。このため、コンクリートの砂利化はAE減水剤の添加で急激に進行する。また強力なバイブレータの使用はコンクリート中のAE減水剤やフタル酸化合物の動きを活発にしていると思われるため、AE減水剤はコンクリートの有害物質との化学反応を促進し、コンクリートの砂利化を促していると推察された。

12. 砂層の液状化防止（泡の制御方法）

バイブレータによるコンクリートのブリージング（成分分離）を防ぐ方法を検討するため、室内の振動実験で砂層の液状化の実験装置を使って検討した。矩形の水槽（33.4×66.7×71.6㎝）の砂の中に市販の500ccのパイレックスガラス製の空洞の円形のビーカを埋め込んだ。ビーカの表面は砂層の表面と同じとした。ビーカの周りには砂（最大粒径2.36㎜，深さ50㎝）を投入し、砂に水を掛けながら転圧（含水比率：100%，転圧度：60%）し、この水槽全体を下部に設置した振動台を使って、1200

Gal(新潟地震のときの最大加速度)，10Hzのもとで振動実験(液状化実験)を行った。ガラス製のビーカの周りに網目10㎜のプラスチック製のネット(穴の直径10㎜、大きさ：20㎝)を水平に２段に設置したものも用意した(森吉、公営企業、43(3), 17-26,(2011))。実験の結果、ビーカの周りにネットを設置していないビーカは振動開始４秒後にビーカが砂層から飛び出し、ひっくり返った。しかし、ビーカの周りにネットを水平に２段に取り付けたビーカは30秒後も全く動かなかっただけでなく、液状化(砂の表面の上昇)も生じなかった。新潟の地震で被害を受けた現地の担当者の話では、新潟地震時にマンホールの周りに直径10㎜の砕石を投入したマンホールは砂層中にマンホールがあっても、地震時でもマンホールの周りの砂は液状化しないため、マンホールが浮上しなかったという。これはマンホールが浮き上がらない工法の開発の貴重なヒントだった。このヒントを使って実験室では砕石の代わりにプラスチックのネットで再現した。このようなネットによる液状化防止は砂層中の細かい泡が地震時の振動中に砂層の表面に向かって動くとき、砂層の空気の泡が数ミリ以下の場合は球体、これが互いに連成(合体)して大きくなった球状の泡は扁平な楕円状となり、回転しながらせん軌道上を浮上する。さらにこの泡が大きくなるとキノコ状となる。すなわち、10㎜のプラスチックのネットや10㎜の砕石はこれらの泡の形状や泡の流れを制御し、泡を「整流」しているため、液状化を防いでいると推察された(浅野康一、『物質移動の基礎と応用』 丸善、2004年、137)。

これより、砂層の液状化は砂層内部の空気の細かい泡が地震時にお互いに連結しながら大きくなって、液状化が発生していると推察された。

これを参考にすると、AE減水剤の入ったコンクリートはバイブレータの振動でAE減水剤の細かい泡はコンクリートの表面に移動しようとするが、AE減水剤の比重が若干大きいことと、AE減水剤の細かい泡は電気的に互いに帯電しているため泡同士の連成(合体)がないため、泡は表面に至らず表面よりやや下に留まっていると推測された。これはコンクリートの内部で成分が分離していることを示している。このためバイブレータの使用はコンクリート内部の骨材の分離だけでなく、AE減水剤の分離ももたらしていると推測された。従ってAE減水剤の入ったコンクリートはバイブレータの使用で不均質なコンクリートになり、砂利化も一様に発生しない。この現象はＡＥ減水剤を使用したコンクリートの滑走路で図３の表面から深さ３㎝程度(１層目)までは砕石の周りに亀裂があるが、モルタル部での亀裂は一切みられず、その下のコンクリート(２層目～９層目)ではコンクリートの底部(深さ30㎝)までモルタル部の亀裂が同じように多数観測されたことと重なる。これよりバイブレータを使った工事でコンクリートにAE減水剤を使用すると、コンクリートの内部では成分が分離して、場所によって損傷の程度が異なった状態になっている(Moriyoshi A. PLOS ONE, 16(5), 2021)。

13. 今後の展望

このようにアスファルト舗装およびコンクリート構造物は短期間の自身の呼吸作用で大気中の極微量の有害有機物を内部に湿気と一緒に取り込み、劣化や亀裂、砂利化等を発生させている。しかし、市販のセメント中に存在するフタル酸エステル化合物、リン酸化合物、AE減水剤はコンクリート構造物の劣化や亀裂に影響を与えるだけでなく、融雪剤中の界面活性剤やSPNESもこれら２つの構造物(アスファルト舗装、コンクリート構造物)に深刻な損傷(砂利化)を生じさせ、これらの構造物の短寿命化にも繋がっている。

120年前に作成された小樽のモルタル試料のセメントは粘土、珪石、石灰岩だけで作られ、AE減水剤や廃棄物材料も一切使用していなかった。現在でもこれは健全なモルタル試料である。一方現代のセメントはセメント量の３－４割の様々な廃棄物(廃プラスチック、廃タイヤ、都市下水の焼却灰、肉骨粉)が使われている。また、肉骨粉中には有害なリン酸化合物、フライアッシュ中には金属アルミ(コンクリート中で水素を発生し、鉄筋の水素脆化に繋がっている)等が含まれている。このため、現代のセメント中のフタル酸化合物、リン酸化合物の有機物対策だけでなくAE減水剤(水素発生の可能性がある)や界面活性剤の使用も控えるべきである。これは図１，２から、AE減水剤はコンクリートの砂利化により、コンクリートの寿命に大きな影響を及ぼしていることが推察されるためである。また、コンクリートに使っている様々な添加剤、亀裂注入材、各種の補修材に界面活性剤が使用されると、これらは大気中のコンクリートに有害な物質と同じ物質であるため、AE減水剤と同じ損傷を呼吸によりコンクリートに生じさせ、コンクリートの短寿命化をもたらしていると推察された。

特に閉鎖空間となっているトンネルのライニングのコ

ンクリートは以上で述べた有機物の他に窒素酸化物も劣化に影響している。トンネルのコンクリートライニングはトンネル内を走行する車両で繰り返される風圧や温度変化(呼吸)のため、通常のコンクリートより著しく劣化しやすく、寿命も短い推定とされた。このため、施工30年のトンネルで約20㎝の深さの劣化(フェノールフタレン塗布)が観測されている。

このため、トンネルの内部のコンクリートのライニングの表面はステンレス鋼板で全面的に覆う必要があると私は思っている。

また、海の近くのコンクリート構造物は海水中の塩分の浸透対策もコンクリートの呼吸作用を考慮することが必要である。

さらに、現在行なわれているフェノールフタレン液塗布による損傷診断はpHだけの診断であるため、この手法は多少信頼性に欠ける。このため、この新しいCTスキャナーを利用した劣化と亀裂の２つを考慮した診断に変更すべきである。

コンクリートの損傷は今まで正確に劣化と亀裂が区別できなかったが、本研究を参考にして、損傷の深さや亀裂位置等を正確に評価し、コンクリートの補修時期、補修深さ、寿命等を決めるべきと思っている。

14. まとめ

土木構造物は極微量の有機物により亀裂、砂利化や劣化等を生じ、極めて短い寿命(負の遺産)になっている。これらの構造物で使用する材料の中のリン酸化合物、AE減水剤、フタル酸エステル、構造物の表面に散布する融雪剤(界面活性剤)、および大気汚染中の有害有機物(フタル酸エステル化合物、ウインドウオッシャ液(界面活性剤))などの中の多種の有機物がこの短い寿命に関係していた。従ってこれらの構造物の長寿命化を図るために、使用する素材の吟味だけでなく、使用する環境にも配慮する必要がある。大気汚染物質のように構造物に有害なアスファルト、タイヤ屑、ディーゼル排煙等から排出される、フタル酸エステル化合物、アミド化合物、炭化水素、ウインドウオッシャ液は適切な代替材料を早急に見つける必要がある。この大気汚染物質は大気中だけでなく、川や海の中にも含まれていた。また、フタル酸化合物やSPNESは枯死した樹木からも検出されていた。

一方、リン酸化合物はセメント製造時にリン酸化合物の入っている肉骨粉、都市下水の焼却灰、フライアッシュおよび都市廃棄物にも入っている。これらはコンクリートの亀裂や劣化を極微量でも短期間に生じさせている。またAE減水剤やフライアッシュ中の金属アルミはコンクリート中で水素ガスを発生するため、コンクリート中の鉄筋の水素脆化(鉄筋の破断ひずみが半分となる)が発生する。このため、これらの使用制限や代替材料の検討が必要である。しかし、１番重要なことは現在のセメントの製造でコストの低減、製造エネルギーの確保等のため、様々な素材が使われているが、セメントキルン中の1450℃の高温でも廃プラスチック、廃タイヤ等の未燃焼物質が極微量ではあるものの、フタル酸化合物として残っており、これがコンクリートの亀裂、砂利化および劣化に極めて大きな影響を与えていることである。

このため、アスファルト舗装やコンクリート構造物にリサイクル材を使用すると、これらの構造物の内部に自身の呼吸作用で、フタル酸エステルやウインドウオッシャがすでに多量に含まれている。これらの物質は生分解しづらいため、このリサイクル材を使ったアスファルト舗装およびコンクリート構造物は、リサイクル材中の有害物質の他に大気中の有害物質を再度吸収し、短期間に再度亀裂や砂利化が発生する。よって、これらのリサイクル材を利用することは極めて危険である。

また、極微量な有機物は大気汚染による局部気象、樹木の「立ち枯れ」、川や海の水質汚染まで影響が広がっているため、現在の土木構造物は極めて寿命が短く(負の遺産)なっている。従って、このままでは土木構造物の補修費用、打ち替え費用等がネズミ算式に増える可能性が高く、またこれが構造物の崩落等の事故につながると思われる。

このため私は「100年単位」でこれらの土木構造物の寿命を今考えるときであり、この構造物の「呼吸の考え」は日本独自の考えのため、ぜひ日本が土木構造物の築造で世界をリードしてこれらの構造物の長寿命化のための知恵を絞りだして欲しいと願っている。

このような知恵が出ると、短寿命化した「負の遺産」を高負荷で受け継ぐ若者にもこの「大きな夢」を持つことに繋がり、若者もインフラ設備の長寿命化に向って進むことができる。