



Title	再生コンクリートの現状と問題点
Author(s)	森吉, 昭博
Citation	月刊建築仕上技術, 50(596), 54-58
Issue Date	2025-03-14
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/94282
Type	journal article
File Information	moriyoshi_50_596_p54.pdf



再生コンクリートの現状と問題点

北海道大学名誉教授 森吉 昭博

1. 再生コンクリートの有機物汚染

再生コンクリートの骨材の表面が高度に摩砕された骨材およびモルタルの1部でも、コンクリート構造物だったときに、大気中の極微量な有機物、フタル酸エステル化合物(Phthalates: Ps, $C_6H_4(COOR_1)_2$, R_1 : Alkyl基)やウインドウオシヤ液(Sodium Polyoxyethylene Nonylphenol Ether Sulfate: SPNES, Nonylphenol: NPs)を自身の呼吸作用でこれらの有害有機物をコンクリート構造物中に吸収するか、または市販の元のセメント中にこれらの極微量の有害有機物をこれらの内部に含んでいる。NPsはSPNESの1部が分解した物質である。

その他に、コンクリートは添加剤として有機物であるAE減水剤(0.24%: 陰イオン界面活性剤)がコンクリートに添加されると、このAir Entraind(AE)減水剤はコンクリートの硬化中に多量の「水分」をAE減水剤の内部に吸収し、硬化後にコンクリート構造物中のこの「水分」が経過時間と共に徐々に抜けていき、これが原因でコンクリート構造物に様々な損傷が発生する。

本研究はこのような「極微量の有害有機物(Ps, NPs, AE減水剤、融雪剤)を含んだ再生コンクリートを使用すると、この「極微量の有機物」がコンクリート構造物に与える影響が問題になると思われた。このため、本研究は骨材中および骨材を被覆しているセメントの粉末中に存在する極微量の有機物のPs, NPs, AE減水剤および融雪剤がセメントコンクリート構造物に与える影響について検討した。

2. コンクリート中の極微量の有機物(AE減水剤, Ps, NPs, 有機系融雪剤)の性質

コンクリートの混合時にAE減水剤がコンクリートに添加されると、コンクリートの打設は容易となる。しかし、このAE減水剤を使用して打設されたコンクリート

を「リサイクル」するとき、リサイクルされるコンクリートの骨材やAE減水剤(陰イオン系界面活性剤)がコンクリートに対する影響についてはほとんど論じられていない。本研究はこの点について述べている。

AE減水剤はセメントそのものには付着せず、AE減水剤はコンクリート中のモルタル中で単独の細かい球状物質(直径: 0.3mm)となり、AE減水剤はモルタル中で分散状態となっているだけでなく、骨材やモルタルの挙動にも影響を与えている。コンクリート構造物は打設中にAE減水剤はその内部に多量の「水分」を吸って、硬化したコンクリート構造物はその水分等によってコンクリート構造物は硬化直後(打設30日後)には全体に約5%程度膨張している。

従って、硬化し膨張したコンクリート構造物(AE減水剤:Pozzolite No.70, 0.25%)に対して、このコンクリート舗装(滑走路)の表面にコンクリート用の有機物系の融雪剤(Docusate Sodium, 0.5%: ソジューム・ジ(2-エチルヘキシル)サルフォサシネート: $C_{20}H_{37}O_7SNa$ (陰イオン系界面活性剤)、第2リン酸カリウム, 1%: K_2HPO_4 , 1, 2, -グリコール, 88%, 水: 9.5%の4種の混合液)を散布すると、コンクリート構造物(AE減水剤: Pozzolite 70, 0.24%)はこの融雪剤によりさらにこの融雪剤が原因で主に骨材やモルタルが「膨張」する。このため、打設1年後にこのコンクリート製の滑走路の表面にこの混合液の融雪剤を冬季に散布すると、融雪剤の散布後約1時間で極めて多くの表面にあった碎石(4-5万個)が音を立てて、コンクリートの表面から飛び出した(骨材のポップアウト現象)。これはAE減水剤等で膨張したコンクリートにさらに骨材やセメントをさらに膨張させる有機物(融雪剤)をコンクリートの表面に散布したためである。

硬化したコンクリートの力学挙動を調べるためコンクリートの引張試験の応力~ひずみ曲線の形状について検討した。すると、コンクリートは弾塑性を示すのではなく、 100×10^{-6} のひずみでコンクリートは亀裂が発生

する。この現象を確認するため、AE減水剤を使用した室内で作成したコンクリートと打設後1年が経過したコンクリート舗装(滑走路)から採取したコンクリート試料(両者: AE減水剤使用、 $2.5 \times 2.5 \times 10\text{cm}$)の「引張試験: ひずみ制御: $\pm 1\mu$ 」を行うと、両者の2つの試料は共に 100×10^{-6} のひずみ付近で「応力とひずみとの関係」は直線部から曲がり始める。これはこのひずみ(100×10^{-6})で、コンクリート試料は細かい亀裂が発生していることを示している。この引張試験の応力-ひずみ曲線の形状は一見弾塑性を示すように見えるが、実は(100×10^{-6})のひずみ付近で細かい亀裂が試料の内部に発生していることを示している。これを証明するため、このひずみ量がこのひずみ量を「若干」超えたとき、この試料を引張試験の装置から取り外し、マイクロフォーカスCTスキャナー(CT)装置でこの試料の内部の亀裂の状況を撮像した。この結果、この試料中の「いくつかの骨材」の周りに細かい亀裂(CT画像で骨材の周りに黒い線)が発生していた。その後、この同じ試料を使って再度「引張試験」を行うと、このコンクリート試料の強度は異常に小さくなっていた。この強度が小さくなる現象は引張試験中にコンクリートに細かい亀裂が発生してもコンクリート試料はまだ「破断」していなかったものの、試料の内部ではすでに細かい亀裂が発生していたと思われた(Tomoto T., Construction and Building Materials, 25(1), 267-281, 2011)。

この滑走路用のコンクリート舗装は施工後1年しか経過していないにも拘らず、融雪剤により冬季に骨材がポップアウトし、飛び出した元の骨材の「穴」の下側の窪みにはコンクリートの「砂利化した白い粉末」が沢山見られた。

これよりAE減水剤を含む界面活性剤はコンクリート構造物の中でその量は極微量ではあるものの、コンクリートの強度低下および航空機のエンジンがこのポップアウトした碎石を吸収することもあるため極めて危険な物質といえる。

AE減水剤の界面活性剤の他に以下の物質も極めて極少量でもコンクリート構造物に亀裂等の様々な損傷を発生させている。

世界中の市販のセメントには極微量のフタル酸エステル化合物($\text{Ps: } \text{C}_6\text{H}_4(\text{COOR})_2$; R_1 : alkyl基)が含まれている(セメント10g当たりでPsの量は $119\mu\text{g}$)。このフタル酸エステル化合物(Ps)はセメント製造時にプラスチック廃棄物や排タイヤがセメント製造時(高温のロー

タリキルン: 1450°C)に燃え残った極微量の有機物(Ps)である。この微量なPsはコンクリートが打設されると、セメント中のカルシウム成分と瞬時に化学反応し、コンクリートは水溶性のフタル酸カルシウム($\text{C}_6\text{H}_4(\text{COO})_2\text{Ca}$)と2-エチル-1-ヘキサノール(2E1H: アルコール)に変化する。このため、コンクリート中の水溶性のカルシウム成分($\text{C}_6\text{H}_4(\text{COO})_2\text{Ca}$)はPsによりコンクリート構造物の脱カルシウム化をもたらす、コンクリート構造物中のカルシウム成分は自身の呼吸作用(外気温の変化)で外部に流出する。さらに、セメントコンクリート中のAE減水剤は自身の呼吸作用で「大気中のPsおよびNPs」を選択してコンクリート構造物の内部に吸収し、吸着する。これらの物質によってコンクリートの内部の脱カルシウム化はさらに進んでいる。AE減水剤を使った硬化直後のコンクリート構造物は若干約5%程度膨張する。このとき、AE減水剤を使って打設されたコンクリート中のAE減水剤が抱えて居た「水分」は経過時間と共に亀裂部から乾燥収縮により外部に徐々に放出される。この水分の放出の過程で、コンクリート構造物は全体に徐々にコンクリートが収縮し、この収縮作用によってコンクリートの表面に横亀裂、碎石の崩落、局所的なコンクリートの崩落等が発生する。コンクリート構造物はAE減水剤を使用すると、コンクリートは硬化時にコンクリートは若干膨張する(膨張率: 約5%)。この膨張時にコンクリートのひずみは許容のひずみ(100×10^{-6})を超えているため、コンクリート構造物には「亀裂」が発生していると思われる。このため、膨張し、硬化したコンクリート中の水分が時間経過と共に徐々に外部に抜け出ると、その亀裂が発生したコンクリート構造物は乾燥により次第に収縮する。この時、コンクリート構造物の表面に亀裂、碎石の崩落、局所的なコンクリート破片の崩落が発生していると思われる。これらの損傷の原因の詳細は以下に示す。

この過程でコンクリート中の水溶性のフタル酸カルシウム($\text{C}_6\text{H}_4(\text{COO})_2\text{Ca}$)は硬化したコンクリート構造物の自身の呼吸作用でこの物質をコンクリート構造物の外に吐き出す。この吐き出したカルシウム成分には「水溶性のもの」と「難溶性のもの」がある。この2つの物質はセメントの種類に関係なく、発生し、陰イオン界面活性剤の水溶液のもとでは通常の蒸留水によるカルシウム成分の流出より、この2つの物質はコンクリートの外に大量に流出する。これより、コンクリートにAE減水剤(陰イオン界面活性剤)を添加すると、そのコンクリート中

のカルシウム成分がコンクリート構造物から大きく流出することを意味している。

また、世界中の市販のセメント中にはアルミン酸三カルシウム($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$)、鉄アルミン酸四カルシウム($4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$)の化学成分を有していて、その化学成分中にアルミニウム(AL)が含まれている。このアルミニウム(AL)はPsおよびNP_sと化学反応し、瞬時に水素ガスを発生し、この水素ガスのため、コンクリート構造物は膨張する。このとき、コンクリート中にAE減水剤が含まれていれば、コンクリートはAE減水剤が水を吸収するため、コンクリートはさらに膨張する(月刊建築仕上技術、48(565)、2022- 8、40- 52、2022)。

打設後30年間経過した札幌の定山溪のコンクリートダム(AE減水剤:Pozzolith70、Pozzolith No.202のシーカコントロール202 AER)の表面から採取したコンクリートのモルタルの「欠片」についてマイクロフォーカスCTスキャナー(CT)を使ってこのコンクリート欠片の内部のAE減水剤の挙動を調べるため、モルタル試料中の3次元の亀裂解析を行った。このコンクリートは2種の陰イオン系界面活性剤であるAE減水剤(Pozzolith No.8の通常のAE減水剤とPozzolith No.202のシーカコントロール202 AERのAE減水剤)が使用されていた。CTの解析から2種のAE減水剤の直径はコンクリート中で前者では0.3mm、後者では0.05mmの球状の黒い物質が観察されており、それぞれのAE減水剤の内部には一段と局部的に黒くなった「空洞」とこれより若干薄黒い、「水分」の多い「非晶質」の物質が見られた。この細かい黒い「空洞」は直径0.01mm程度であり、AE減水剤の中で数多くのこの黒い空洞が発生していた。この黒い空洞の周りには幅0.01mm、長さ0.05mm程度の「白いシリカ状物質：砂利化」が観察された。これはAE減水剤中でセメントコンクリート構造物がAE減水剤中ですでに「砂利化」していることを示している。これより、セメントコンクリートの砂利化現象はAE減水剤中から発生し、セメントコンクリート構造物の「空洞化：空隙」はAE減水剤の内部から発生していると思われる。

しかし、AE減水剤を使ったコンクリート構造物でAE減水剤以外のセメントモルタル部ではこのような「黒い空隙：劣化」がほとんど見られなかった。このコンクリートの砂利化現象を調べるため、劣化したコンクリートのコア(直径10cm)を採取し、この試料を各深さ毎(5cm)に切断し、碎石以外のモルタル部分を0.074mmの篩で篩い、この0.074mm以下のこの粉末試料について比表面積

(m^2/g)を測定した。測定装置は島津製作所のBET method(Shimadzu Micromeritics Gemini 2370)を使用した。この結果から、比表面積が $5 \text{ m}^2/\text{g}$ 以上であれば、そのコンクリート試料は砂利化していた。これは砂利化したコンクリートのモルタル部は「白いシリカ状物質：砂利化」に変化していることを示している。

この定山溪ダムのコンクリートは30年経過してもAE減水剤はコンクリート中でまだ健在でAE減水剤の内部に「水」を含んだ「非晶質」の物質が存在することを示していた。コンクリートのCTの撮影結果で「薄黒い物質」として撮像されるのは「水」の多い「非晶質」物質がコンクリート構造物のAE減水剤中に生成されていることを示している。

コンクリート表面に見られる骨材やセメントモルタルから溶出したカルシウム成分の水溶性物質はコンクリートの表面で白い物質や黒い物質および鼠色の物質となって見られる。水溶性の白い物質はコンクリートの外部に流出し、この白い水溶性物質は雨水で消えてしまう。しかし難溶性のカルシウム成分で黒や鼠色の物質はコンクリートから流出すると、これが乾燥すると黒や鼠色の物質となり、コンクリートの表面で固化する。このような現象(鼠色および黒い色の現象)がコンクリートの表面で見られるとコンクリートの内部ではカルシウム成分が次第に少なくなってコンクリートの内部は空洞化している(張り子のコンクリート)。硬化したコンクリートのこのような空洞化現象は自身の呼吸作用で生じ、この空洞化現象(30cm厚さのコンクリート床版は底部まで砂利化する)は約30年の経過で生じるため、このような状態のコンクリートを再生コンクリート用の骨材として利用すると以下のような理由で極めて危険である。この硬化したコンクリート中に取り込まれていたPsはコンクリート中のカルシウムと化学反応し、フタル酸カルシウム($\text{C}_6\text{H}_4(\text{COO})_2\text{Ca}$)に瞬時に変化するが、この物質は大気中の炭酸ガスを吸ってフタル酸(昇華性、($\text{C}_6\text{H}_4(\text{COOH})_2$))に変化し、フタル酸の1部が大気中に放散する(昇華する)。しかし 多くのフタル酸カルシウム($\text{C}_6\text{H}_4(\text{COO})_2\text{Ca}$)は大気中の炭酸ガスを吸って、セメントコンクリートの構造物の内部で再度フタル酸エステル(Ps)に戻り、再度コンクリート中のカルシウム成分を脱カルシウム化する。この現象はコンクリート中のカルシウム成分が無くなるまでこの化学反応は繰り返えられる。また外部に抜けだしたフタル酸($\text{C}_6\text{H}_4(\text{COOH})_2$)の1部は昇華により大気中に放散する。この大気中のフタル酸は再度コン

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内部に取り込まれて再度コンクリートの脱カルシウム化(フタル酸カルシウム)の生成に寄与する。

3. 極微量の有害有機物による コンクリートの亀裂

市販の世界中のセメント中にはセメント製造時に廃プラスチック、排タイヤおよび肉骨粉が高温のロータリーキルンで燃え残ったPsやリン酸化化合物が含まれている。これらのセメントは水と混合すると瞬時にPsと化学反応し、嫌な臭いがする2-エチル-1-ヘキサノール(2 E1H:アルコール)が発生し、この物質によりコンクリートは若干膨張する。

このコンクリート構造物の膨張量は約5%程度と大きい為、コンクリートは打設時にすでにこの膨張によってコンクリートの内部に亀裂が発生する(月刊建築仕上技術、48(565), 2022-8, 40-52, 2022)。この膨張現象はAE減水剤を使用したモルタル試料でも確認されている。このようなPsまたはAE減水剤を含んだモルタル試料に対して、試料の打設後1か月にマイクロフォーカスCTスキャナー(CT)を使って試料中(2×2×2 cm)の3次元状態のモルタル試料の「内部の亀裂」の状態を調べた(PLOS ONE, 16(5), 2021, e0249761)。この解析結果より、フタル酸エステル化合物(Ps)やAE減水剤を使った「コンクリート」では試料の内部に亀裂幅が0.2mmの亀裂が沢山見られた。亀裂幅について市販の日鉄普通セメントを使ったモルタル試料(日鉄試料: 打設後30日)と廣井勇教授が作成した120年前の小樽のモルタル試料(120年試料)についてCTを使って「内部の亀裂分布」を比較した。これより、120年試料では亀裂幅の細かい0.05~0.2mmが亀裂全体の99.9%、亀裂幅の大きな0.25mm以上のものが亀裂全体の0.66%であるのに対して、日鉄試料では亀裂幅の細かい0.138mm未満のものは亀裂全体の67.6%で、亀裂幅の大きい0.276~0.552mmが亀裂全体の32%であった(月刊建築仕上技術、50(593), 2-96, 2024-12-13)。これより市販のセメントを使ったモルタル試料(日鉄試料)は内部に補修が必要な0.2mm以上の亀裂が打設30日ですでに多く発生していたことを示している。

コンクリート構造物の表面で亀裂幅が0.2mmとなる亀裂が見られると、そのコンクリート構造物は「補修の必要」があるとされている。このような亀裂が発生するの

はPsおよびAE減水剤を使った「コンクリートの内部」でも見られた。またPsやNPs, およびAE減水剤はこれらの物質の内部のアシル基(R-O-R)やエステル結合(R-CO-R)を持っているため、これらがセメント中の化学成分(C-S-H: 3Ca・2SiO₂・3H₂O)と化学反応し。メタン、水素ガス、酸素等のガスを生成する。

これらのガスによりコンクリート構造物は膨張し、これらが抜けた後、硬化したコンクリート構造物は徐々に収縮し、コンクリート構造物には横亀裂、碎石の崩落、コンクリートの碎片の落下等の減少が発生していると思われる。

4. 再生コンクリート

現在コンクリートの建設リサイクル法(JIS A 5022, JIS A 5023, JIS A 6204)では以下の3つの素材がコンクリートのリサイクル骨材等で規制されている。コンクリート廃材を高度な摩砕処理をした骨材(再生コンクリート骨材H)、破砕、摩耗等の処理を行った以下の再生コンクリートHとLの中間の骨材(再生コンクリート骨材M)、破砕しただけの骨材(再生コンクリート骨材L)の3種の素材である。このコンクリートのリサイクルの法律はコンクリート廃材中の骨材およびモルタルは有機物で全く傷傷していないこととこれらの有機物は無害という大きな前提に立っている。

しかし、どの骨材でも若干吸水性があり、かつ有機物も吸収するため、コンクリート構造物の骨材の内部にAE減水剤、PsおよびNPsも吸収している(Tomoto T, Construction and Building Materials, 25(1), 267-281, 2011)。さらに、コンクリートのモルタル中だけでなく再生骨材(旧骨材)にも大気中のPs, NPs, AE減水剤を含んでいる。先に述べた様にコンクリートは極めて極少量の有機物(Ps, NPs, AE減水剤, リン化合物)でもコンクリートはこれらの有機物によって脱カルシウム化が進行する。

従って、この建設リサイクル法に準じて廃材のコンクリートの骨材を「新しいコンクリート構造物」に使用すると、新しいコンクリート構造物の内部では「これらの極微量の有機物(Ps, NPs, AE減水剤, リン化合物, 融雪剤)」によって脱カルシウム化が進み、さらに自身の呼吸作用で、自身の内部に存在した有機物と大気中のこれらの有機物を選択的に吸収、吸着する。世界の市販のセメント中にはすでに極微量のPsおよびリン化合物が存

在しており、これらもコンクリートの劣化や亀裂等を引き起こしていると思われる。

このときの化学変化はフタル酸エステル化合物(Ps)がセメント中に極僅かでも存在すると、コンクリートのカルシウム成分がある限り、このコンクリートの化学反応(脱カルシウム化：フタル酸カルシウム($C_6H_4(COO)_2Ca$))は進行し、コンクリート中のカルシウム成分がコンクリート構造物の外部に溶出し、コンクリート構造物の内部は砂利化し、コンクリート構造物の内部が空洞となり、張り子のコンクリートとなり、コンクリート構造物には亀裂、碎石の剥離、白や黒い液体の溶出が発生する。コンクリートの表面にこのような現象(損傷：横亀裂、碎石の剥落、局所的なコンクリートの剥離、白や黒い液体)が見られると、そのコンクリート構造物はすでに内部が砂利化(コンクリートの内部が碎石と直径0.02mmのセメントの細かい白い粒子だけとなる現象)していることを示している。黒い液体はコンクリート床版の上に設置したアスファルト舗装の黒いアスファルトの成分がNPsによって溶解し、コンクリート床版の底面に発生したものである。この砂利化現象が構造物(30cm厚のコンクリート床版)の底部までの全面で発生するまでの期間は約30年程度である。しかし、AE減水剤を使用しないコンクリートの寿命は砂利化が発生しないため、同じ床版の厚さでも寿命は50年以上である(森吉昭博、月間建築仕上げ技術、49(584)、30-33,2024)。

5. 再生コンクリートについて提案

北海道の旧十勝大橋(葛西橋)はセメントに粘土、珪石、

石灰岩の3種だけで製造され、ここでは打設されたコンクリートにAE減水剤は使われていなかった。このため、建設後46年経過してもこのコンクリートの床版(30cm)や高欄、橋脚等はほとんど劣化(亀裂等)が見られず、かつこれらのコンクリート構造物の砂利化も発生せず、ほぼ健全であった。この橋ではコンクリート構造物の横亀裂、碎石の崩落、白や黒の液体の溶出が全く見られなかった。

これより、コンクリート構造物のリサイクルを行うには、このようなAE減水剤を使用していないコンクリートをリサイクルすることが望ましいと思われる。コンクリートの製造で粘土、石灰岩、珪石だけで製造された「セメント」を使ったコンクリート構造物のコンクリートを破碎してリサイクルして再度使用することが「長寿命のコンクリート」を築造するのに望ましいと思われる。これはAE減水剤を使用せず、かつセメントに粘土、珪石および石灰岩だけで製造されたセメントを使ったコンクリートのリサイクルであれば、Ps、NPs、リン化合物等によるコンクリート構造物への劣化の影響がほとんどないと思われるためである。

6. まとめ

コンクリート構造物をリサイクルするとき、コンクリート中の骨材やセメントモルタルが極微量の有害な物質(Ps, NPs, リン化合物、AE減水剤、融雪剤)が含まれていないことが、コンクリートの硬化後の様々な損傷を防ぎ、かつコンクリート構造物は長寿命化すると思われる。