HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	コンクリートの砂利化および熱応力試験を含めた引張試験法（前編）
Author(s)	森吉，昭博
Citation	月刊建築仕上技術，49(580)，92-96
Issue Date	2023-11
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/90691
Type	journal article
File Information	Moriyoshi_49_580_p92.pdf

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

コンクリートの砂利化および熱応力試験を含めた引張試験法（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．コンクリートの損傷
3．大気中からコンクリートに浸透した有害な極微量の有機物
4．セメント内部の有機物
5．セメントの添加剤
6．セメントとしての接着材について
（後編）
7．コンクリート試料の引張試験
8．コンクリート試料の熱応力試験
9．セメントコンクリートの評価方法について
10．コンクリートの施工

※後編は12月号に掲載予定

1．まえがき

セメントコンクリートは、アルカリに強く、酸には弱いとされ、コンクリートの有機物劣化と言えば炭酸ガスによる劣化が昔から注目されている。この炭酸ガスによる劣化は20年でコンクリートの深さで５㎜程度とされているが、道路トンネルのコンクリート側壁では30年で20㎝以上の中性化が観測され、さらにこのコンクリートの深部まで破損（亀裂や砂利化）が進行していた。しかし、今まではコンクリートの損傷は炭酸ガス、凍結融解、アルカリ骨材反応の３つによる原因によるものが大きいとされ、これ以外はほとんど注目されていなかった。筆者はこのような大きな損傷の原因はコンクリートが市販のセメント中および外部の大気汚染中の極微量の有害有機物により劣化（砂利化、静かな破壊）することを見逃していたためと考えている。

アメリカ土木学会でもこのような大気中の極微量の有害有機物によるコンクリートの劣化はほとんど指摘されていないため、世界中でコンクリートの主な損傷はこの炭酸ガスによる劣化であるという結論になっていた。

昔のコンクリートは耐久性があり、壊れづらく、かつ損傷も少なく、長寿命と言われているが、現在のコンクリートは環境変化もあるが、耐久性に欠け、劣化しやすく、壊しやすいと言われている。しかし、このような昔のコンクリートの長寿命の原因は30－40年前から一切特定されておらず、今までのコンクリートの研究は昔の損傷と同じ現象（損傷）が研究対象となっていた。

2．コンクリートの損傷

現在世界中のコンクリートの損傷形態には剥離、亀裂、砂利化（コンクリートが小麦粉のような白く細かい物質に変化する）、中性化等の様々な損傷が見られている。

このうち、砂利化とコンクリート構造物の表面近くに現れる層状剥離現象は現在世界でも最も重要な研究課題の１つとされ、研究者がこの原因究明を行っているが、未だ原因究明には至っていない。しかし、これらのコンクリートの損傷は50年以上前のセメントコンクリート構造物ではほとんど見られなかった現象である。これらの現象（砂利化および表面剥離）は近年、まれに問題となっている局部的なコンクリート片や砕石の落下現象とも関係していると思われた。

これらの現象（砂利化および砕石の剥落）はウインドウオッシャー液の品質が世界中で規定された1985年から急激に欧州では増加し、特にコンクリート床版で砂利化がこの頃から急激に多く生じているためこの原因究明は緊急の課題であった。ベルギーでは以下の文献でこれらの原因がナトリウム系の融雪剤であるとしている。しかし、トンネル、ダム、舗装でも砂利化が生じていることから、この現象は融雪剤と関係はないと思われた。また、ベルギーの床版の砂利化現象の解析ではSO_4―イオンが異常に多く検出されているがこれが解析時に全く無視され、融雪剤中にSO_4―イオンが全く入っていないものの、これが砂利化の原因と結論づけている（Bulletin Des Laboratories Des Ponts ET Chaussees, 232, Ref,

4368,75-85(2001)。

3．大気中からコンクリートに浸透した有害な極微量の有機物

筆者は30年以上前から自動車で使用されているウインドウオッシャー液中の陰イオン系の界面活性剤がコンクリートの砂利化現象に関与していると考え、様々な実験、調査、解析を行ってきた。その結果、これは1985年に自動車に使用するウインドウオッシャー液(Sodium Polyoxyethylene Nonylphenyl Ether Sulfate(SPNES)が世界基準として制定されて以降、この砂利化現象が急激に増えていることから筆者はSPNESがコンクリートの砂利化の主な原因と考えていた。このSPNESは自動車のウインドガラスに付着した油膜を除去し、安全な視界を確保するために世界中で規定された。しかし、この素材はガラスそのものを若干溶かすだけでなく、塗料、プラスチック、アスファルト、コンクリートまで損傷することが分かってきた。この素材はポリオキシエチレンノニルフェノールエーテル硫酸ナトリウム(Sodium Polyoxyethylene Nonylphenyl Ether Sulfate(SPNES)が主成分の強力な陰イオン系界面活性剤の洗剤の一種であり、これは環境ホルモンでもあるため、ロシアでは空中に散布してはいけないとされている。またSPNESは極めて化学的に安定しているため、舗装上に落下しても生分解性が悪いためなかなか分解しない。またアスファルト舗装はアスファルトが有機物であるため、SPNESは極めて簡単に、かつ短時間にアスファルト分を溶解する。台所洗剤を直接アスファルト舗装の表面に撒くと、瞬時に黒いアスファルトが溶け出し、かつ舗装の内部まですぐ浸透する。このため、雨降り直後ではアスファルト舗装の表面で見られる「黒い水中に白い泡」が多くみられる。これはSPNESがアスファルト分を溶解し、洗剤と同じように雨降り直後にSPNESを含む水が動的なタイヤの回転でアスファルト舗装中のアスファルト成分が洗濯されたように溶け出し、舗装の表面のSPNESを含む水に白い泡が多数発生する。この現象は水分が全くなくなっても雨が降ればまたこの現象が発生することから、この物質は生分解性が極めて悪いことがわかる。この成分は世界中で50ppm程度の濃度でもアスファルト舗装の表面に雨降り直後に白く、細かい、多量の泡が発生している。

日本では雨水は下水道処理場でバクテリア処理を全くしないで直接川に放流しているため、雨水や家庭の下水管から流れ出る洗剤を含む廃水も下水道処理施設ではバクテリア処理が不可能のため、分解しないでそのまま川に放流されている。下水処理場で排出された排水が白い泡だらけとなっているのはこの洗剤のためである。この現象は北海道の十勝地方で現在でも鮭を採取している十勝川の千代田堰堤付近の水はきれいな水にみえるものの、この川の中から洗剤の成分が多量に検出されていた。そしてこの洗剤を含む川の水が水中のコンクリートの橋脚の損傷にも関与していた。

高速道路等では降雨直後のアスファルト舗装上の水は路面排水として、ほとんど路肩の雨水桝に処理しないままで直接排出している。この雨水枡から流れた水は、直接道路側面の土壌の表面に流されている。このため、この土壌の表面水はアスファルト成分と洗剤を含むため、黒い水となっている。

このSPNESは一旦車両からアスファルト舗装上に落下すると、SPNESは乾湿を問わず、車両走行の風圧やタイヤの回転で空中に舞い上がり、大気の空中高くまで飛ばされている。この時のSPNESの粒子の大きさはミクロンオーダーであることから、この粉塵の沈降する速度は１時間に１㎝程度の極めて遅い速度となり、このSPNESの粉塵はなかなか沈降しない。都市の上空の空気が薄黒く澱んでいるのはこのような黒い有機物(アスファルト屑、タイヤ屑およびディーゼル排煙)が原因と思われる。

阪神大震災で被災したポートライナー（高架橋)は高さが８ｍあり、かつこの高架のコンクリート構造物の側面の表面は全面タイルで覆われていたが、このタイル内部のコンクリートからもこのSPNESが検出され、かつコンクリートは劣化して砂利化していた。

雪国では除雪のため、路肩にアスファルト舗装上の雪は積み上げられている。この堆積した雪は春先になると雪の黒さが目立つようになっている。この黒い素材は溶解した大気中の黒いアスファルトと摩耗したタイヤ、ディーゼル排煙が原因である。筆者はこれらの極微量の物質はセメントコンクリートの内部に自らの呼吸作用により取り込まれ、内部のコンクリートはこれにより劣化や砂利化を起こしていることを見つけた。

このような大気中の極微量の有害有機物は外部の温度変化と共に、コンクリートは呼吸作用でこの物質をコンクリートの内部に取り込み、コンクリートの「外力のない静かな破壊：亀裂や砂利化」の原因になっている。

4．セメント内部の有機物

筆者は劣化したコンクリート、新設のコンクリート、市販のセメントを使ったセメントペースト等について種々の有機物解析を行ったところ、コンクリートから以下で示すような有機物が各種検出された。特に有害なのは有機物で「エステル結合している物質」はコンクリートの強アルカリ中に浸透するとこれが加水分解する。この加水分解を通じてエステル化合物はコンクリート中のカルシウム分と反応し、水溶性および難溶性のカルシウム塩として外部に溶出し、または沈殿することが実験より確認された。これはカルシウム塩であれば沈殿するものと思っていた考えとはかなり異なっていた。

このコンクリートに有害な有機化合物には以下のようなフタル酸エステル化合物、エステル系炭化水素、アミン系炭化水素などが含まれていた。

劣化したコンクリートから検出された有機物

1．フタル酸エステル化合物、

DBP：Di－n－butyl phthalate（タイヤ、ディーゼル排煙）

DEHP：Di－2（ethylhexyl）phthalate（タイヤ、ディーゼル排煙）

DOP：Di－octyl phthalate（タイヤ）

TMPDIB：2,2,4－trimethyl－1,3－pentanediol di－isobutylate

2．アミン系炭化水素

R_1CONH_2　R_1：alkyl moiety（$C_{15}H_{29}$，$C_{15}H_{31}$，$C_{17}H_{33}$，$C_{17}H_{35}$）

$C_{15}H_{31}$，$C_{17}H_{33}$，$C_{17}H_{35}$（タイヤ、ディーゼル排煙）

$C_{17}H_{33}$、$C_{17}H_{35}$（アスファルト）

3．パラフィン

$C_{18}H_{38}$（タイヤ、ディーゼル排煙）

$C_{16}H_{34}$，$C_{17}H_{36}$，$C_{22}H_{46}$，$C_{42}H_{86}$（アスファルト）

4．ポリオキシ－エチレン－ノニルフェニルエ―テル硫酸ナトリウム（洗剤、ウインドウオッシャー、陰イオン系界面活性剤）

大気中から検出された有機物

1．フタル酸エステル化合物、

DBP：Di－n－butyl phthalate（タイヤ、ディーゼル排煙）

DEHP：Di－2(ethylhexyl) phthalate（タイヤ、ディーゼル排煙）

DOP：Di－octyl phthalate（タイヤ）

2．アミン系炭化水素

R_1CONH_2，　R_1：alkyl moiety（$C_{15}H_{31}$，$C_{17}H_{33}$，$C_{17}H_{35}$）

$C_{15}H_{31}$，$C_{17}H_{33}$，$C_{17}H_{35}$（タイヤ、ディーゼル排煙、アスファルト）

3．パラフィン

$C_{18}H_{38}$（タイヤ、ディーゼル排煙）

4．ポリオキシ・エチレン・ノニール・フェニル・エーテル硫酸ナトリウム（SPNES）

市販の新品のセメントペーストから検出された有機物（セメント添加剤なし）

1．Di－ethylene glycol（強酸化剤）
2．1－hexadecanol（アルコール）
3．Ethyl Palmitate（エステル）
4．Ethyl Stearate（エステル）
5．Ethyl Oleate（エステル）
6．Di－2－ethylhexyl phthalate（DEHP、エステル）
7．Hydrocarbon（炭化水素）

新品のセメントペースト（日鉄普通セメント）から検出された有機物（セメント添加剤あり：Pozzolith No.70，陰イオン系界面活性剤、リグニンスルホン酸のポリオール－トリエタノール－アミン複合体）

1．Di－ethylene glycol（強酸化剤）
2．1－hexadecanol（アルコール）
3．Ethyl Palmitate（エステル）
4．Ethyl Stearate（エステル）
5．Ethyl Oleate（エステル）
6．Di－2－ethylhexyl phthalate（DEHP、エステル）
7．Hydrocarbon（炭化水素）

以上の化学分析では有機物はクロロフォルムとソックルレー抽出器で抽出している。しかし、リン酸エステル化合物はこのクロロフォルムに溶解しない。このため、リン酸エステル化合物はセメントコンクリートに極微量でも有害物質であるが、ここでは一切検出されていない。

コンクリートは打設した直後にアンモニアガスが発生し、これが２－３年継続するため、油絵の絵具がこの期間アンモニアガスで溶解するため、油絵が室内で飾れな

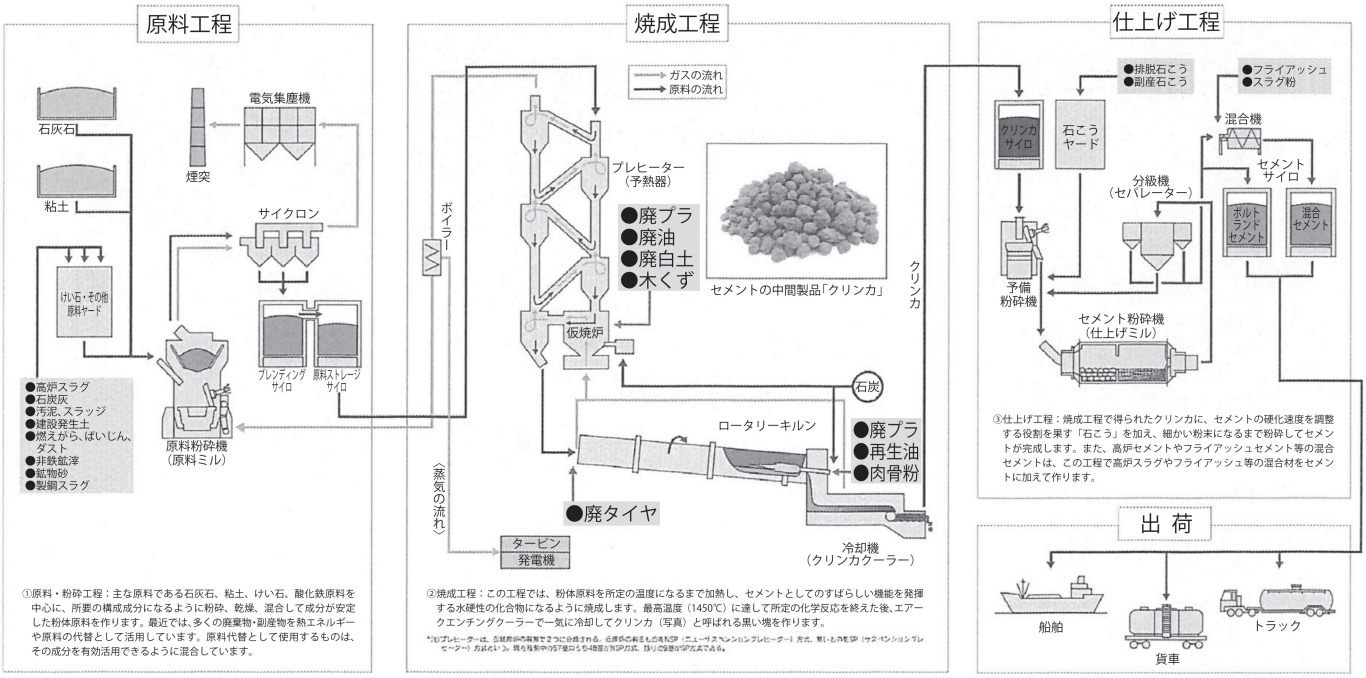

図１　セメントの一連の製造工程（一般社団法法人セメント協会提供）

このセメントの一連の製造工程で廃プラスチックス、廃タイヤ、肉骨粉等が「焼成工程」でエネルギーおよびセメント材料の１部として利用されている。

いことが分かっている。この原因が一般には骨材中の成分とされているが、セメントの製造時にすでにアンモニアのような成分が混入しているため、このような現象が生じている。また、この化学反応は脱カルシウム化や砂利化にも寄与している。

フタル酸エステル化合物(Phthalates：Ps)はアスファルト層、タイヤ層、ディーゼル排煙にも含まれるが，これは世界中の製造直後の市販のセメントにも含まれている。このPsは軟化剤として極めて優秀な物質である。しかし、セメント製造時のセメントキルンは廃プラスチックスを1450℃の高温で処理しているが、これは極微量であるが未燃焼のまま残っている。

この物質の人体への影響の研究はかなり進んでいるものの、社会施設である、アスファルト舗装やコンクリート構造物への影響はほとんど手付かずの状態である。日本のタイヤ使用量だけで年間１億本のタイヤを使用し、その摩耗の影響については全く触れられていない。タイヤ屑、ディーゼル排煙、アスファルト屑の粉じんの中にはこの有機物(Ps)があり、これが空気中(大気中)に拡散しているため、特に車両交通のある箇所ではその汚染が酷く、これは地球規模の汚染源となっている。

空中に放出されたフタル酸エステル化合物(Ps)はコンクリート自身が木材のような呼吸作用で内部に取り込み、これがコンクリートの脱カルシウム化に大きく貢献している。10年以上前に解体された帯広の葛西橋(46年供用、旧十勝大橋)のコンクリートのゲルバー橋では床版厚さが30㎝あり、かつその上にアスファルト層が２層で８㎝あったにもかかわらず、コンクリート床版の内部では表面から10㎝程度までこのような有害有機物が検出され、Psがこのコンクリートの劣化に関係していた。ここではコアを採取し、これを深さ毎に2.5㎝の厚さに切り取り、コンクリートの圧裂試験を行い、試験後にこれを0.07㎜以下の細かい寸法に粉砕し、有機物の量、比表面積、カルシウム分を軟Ｘ線で調査した。圧裂試験の結果は深部ほど強度が大きく(損傷が少ない)、比表面積は表面近くが最大となり(損傷が大きい)、カルシウム量は深部ほど多いことなどから、この床版の表面近くのコンクリートは洗剤等の影響で虫食い状態(比表面積が大きい)となり、ポーラスなコンクリートになっていると思われる。しかし、同じサンプルを通常の圧縮試験で行うとある程度以上の圧縮強度を持っているため試料は健全であると判定されている。一方北海道の稚内にあった古いコンクリート橋の海門橋(26年間供用)ではAE減水剤を使用したため、施工後26年でコンクリートの床版が(厚さ：30㎝)ボロボロになり、安全性が問題となったため、この橋は解体された。そのコンクリート床版(厚

さ：30㎝)のコア(直径10㎝)を厚さ３㎝毎に切断し、この試料を0.07㎜に砕き、これにBets法で試料の深さ方向(３㎝刻み)の試料の比表面積を求めた。これより、コンクリート床版は深さに関係なく砂利化の限界値の５㎡／g以上となり、特に表面近くでは15㎡／gであった。しかしAE減水剤およびセメントに粘土、硅石、石灰岩以外が使われていなかった旧十勝大橋では床版の厚さ方向の比表面積はすべて５㎡／g以下の性状で砂利化は見られなかった。

大気中の主な有機物の排出源である、ディーゼル排煙、アスファルトおよびタイヤの有機物の寄与率を求めるため、北大工学部の屋上でSuspended Particulate Matter(空中浮遊粉塵)の試料を採取した。この試料で分子量が200−600の間にあるものの統計解析をすると、ディーゼル排煙55%、アスファルト36%、タイヤ９%となり、前２者で空気中の有機物の90%以上を占めていた。この統計解析は一般に行われているChemical Balance methodのような各成分の金属量で比較したものではないため、この分析はこれよりは信頼性があると思われる。

5．セメントの添加剤

セメントコンクリートには流動化剤を含め極めて多種の添加剤が使用されている。しかし、その添加剤は詳細に検討されずに使用されている。

たとえば、AE減水剤として有名な陰イオン系のリグニンスルホン酸ナトリウムはセメントコンクリートに添加すると、すぐ金属の錯塩を作る。この錯塩がセメントコンクリート中では、明らかにカルシウム、マグネシウム、アルミ等の成分と化学反応してこのような錯塩を形成していると考えられる。このようにAE減水剤が化学反応をしていることはセメント中これらの金属と化学反応するため、当然ながら、AE減水剤は脱カルシウム化にも寄与していると考えても不思議ではない。しかし、今まではセメントコンクリート中に各種添加剤が添加されても、圧縮強度があればそれで良いとする風潮があった。しかし、これはコンクリートの長寿命化や中性化等を考えた場合、必ずしも添加剤そのものが良いとはいえないと思われた。また、セメントの添加剤はエステル結合の物質が多い。これらはコンクリート中で大気中の極微量な有害物質を著しく吸収、吸着する。このため、先に述べたフタル酸エステル化合物(Ps)のような化学反応(脱カルシウム)がセメントコンクリート中で起こっていると考えられた。また、AE減水剤は打設直後に多量の水分を吸収、吸着する。この水分は時間の経過とともに次第に放出するため、コンクリートは次第に収縮する。このためこのコンクリートは時間経過とともに細かい収縮亀裂(引張り作用)が多数発生する。このため、セメントコンクリートはこの引張作用で破壊しているにも拘らず、圧縮強度が大きければよいという風潮は慎まなければならない。これはセメントコンクリートが発明されて約100年経過するが、セメントが砕石や砂の接着剤でありながら、この規格やAE減水剤等の各種添加剤の効用(特にコンクリートの正確な引張強度の測定)が十分研究されなかったため、世界中で、このようなコンクリートの収縮亀裂が骨材の剥離や砂利化等が起こったと思われる。

6．セメントとしての接着材について

セメントの品質はJISで規定されているが、ここでは接着材としての規格(引張強度)は存在しない。あくまでもセメントは圧縮強度が重視されているため、セメントは増量剤のように扱われている。このため、セメントペーストの接着力、引張の破壊ひずみも全く議論されておらず、すべて曲げ試験や圧縮試験で評価されている。

これらの試験は大まかな引張試験値を求めるには都合の良い試験であるが、圧縮試験で引張り試験の代用は難しい。特に曲げ試験や圧縮試験からコンクリートの正確な引張りの破壊ひずみを求めることは不可能である。

しかし、引張試験や熱応力試験ではコンクリート試料は特殊治具を使って、試料の両端を挟んで実験しても、コンクリート試料と治具の間の試験中のずれや試料の破壊が生じるため、正確な実験ができない。このため、コンクリート試料の両端に鋼製治具を以下に示すように接着剤で接着する方法を開発した。この開発には接着材の選定や溶媒のメタノールでコンクリート試料が損傷しないことが重要である。いろいろ試行錯誤の結果、接着強度が250kg／㎠となる石粉の入ったエポキシ系の接着剤が最適であることがわかり、これを使用した。この接着剤はコンクリートを金属と接着して引張り試験を行っても両端の鋼製の治具付近や接着層が破壊しないことが大変重要である。

このため、引張り試験や熱応力試験では試料の中心と油圧装置の中心を合わせ、かつ油圧制御装置の動きを細かく制御できる装置を使うことが非常に重要である。