

コンクリートのポップアウトのはなし

ポップアウトとは、少々聞き馴れない言葉かもしれませんが、これはコンクリートの表面が内部に含まれていた骨材の膨張に起因して、低い円錐状～かさぶた状に剝離する現象です（図1）。

通常、拘束力の強い高強度のコンクリートの自由面（表面）に、骨材の膨張圧が作用して発生するもので、構造物のほか、各種二次製品にも発生例が知られています。

ポップアウト部分の直径は、骨材の粒径に応じて、数mm程度のものから、10cmを越えるものまで様々ですが、多くの場合、すり鉢状にえぐられたコンクリート本体の中央部分と、そこから剝離、落下した円錐形のコンクリート片の頂点には、原因となった骨材が附着しています。これをポップアウト核と称します。

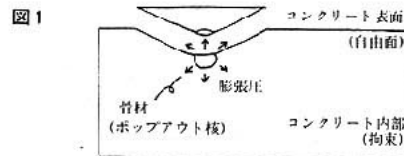
従って、原因物質の種類を調べるには、この両方の試料を採集してポップアウト核の薄片を作成し、偏光顕微鏡観察を行うか、X線回折分析を実施して、骨材の岩石種や鉱物組成等を検討します。

ポップアウトには、以下に述べるようにコンクリート表面の流水、通気、乾湿繰り返し等の環境変化によって、骨材自身がセメントとは無関係に風化、変質し、膨張を引き起こす種類のもの、セメントと骨材との間で行われるアルカリ骨材反応に付随して発生するものがあります。

ポップアウト自体はコンクリートの表層部分に限って発生する現象ですので、これがコンクリート全体の機械的性質に及ぼす影響は大したことがないのですが、何分にも製品の表面があばた状となり美観を損なうので、早々に補修されます。一般には、ポップアウトの核となっている骨材の摘出と、表面の窪みのモルタルによる埋め戻しが行われているようです。

原因物質の種類によって、次のようなものが知られています。代表例の写真を掲げまし

たので、先ずは特徴をご覧下さい。いずれも当方の研究室で、診断が可能です。



ポップアウトのモデル図（断面）
コンクリートの表面付近にある膨張性の骨材を中心に、円錐状にポップアウトが発生する

1) アルカリ骨材反応によるもの

オパール

オパールは、アルカリ骨材反応を起こすシリカ鉱物のなかでは非晶質で最も反応性が高く、ポップアウト発生までの時期が1～2カ月と短いのが特徴です（写真1）。しばしば、白色のアルカリシリカゲルの浸出を伴います。オパールと言っても、通常は宝石になるようなものではなく、変質した岩石の割れ目を充たして産する、白色で蛋白状の光沢をもった重合度の高いシリカゲルのことです。

わが国では、コンクリート用骨材の砂の中に、オパールを含んだ火山岩や凝灰岩、珪質頁岩、等が少量混入していることがあり、これが偶然ポップアウトを引き起こした事例がありますが、北欧やカリフォルニアでは、オパール質頁岩やチャート、フリントがコンクリート構造物に大規模な劣化被害を招いたことが知られています。

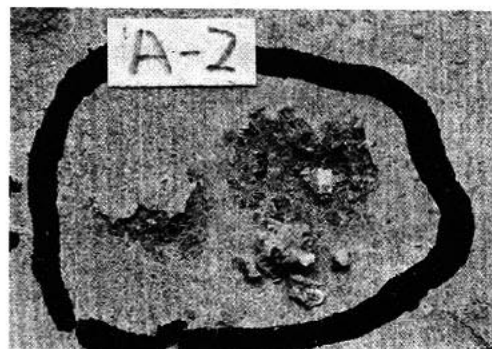


写真1 オパールによるポップアウト
中央の白色の核がオパール：直径1cm

火山ガラス

火山ガラスには、安山岩や流紋岩の石基部分に産するもののほか、黒曜石、軽石、等のように岩石全体がガラス化したために単独で産するものまで種々の形態があり、これらはいずれもアルカリ溶液との反応性が認められています。なかでも流紋岩質ガラス(黒曜石)の加水した産物である真珠岩は、特に反応性の高いことが知られており、これが使用骨材中に偶然混入していたことにより、コンクリートのポップアウトに至った事例が知られています(写真2)。

劣化部分には、白色のアルカリシリカゲルを生成することが特徴です。ガラスは天然、人造を問わず、オパールと同様に非晶質の物質なので、X線回折分析では検出不可能で、薄片の偏光顕微鏡観察によって存在を確認します。

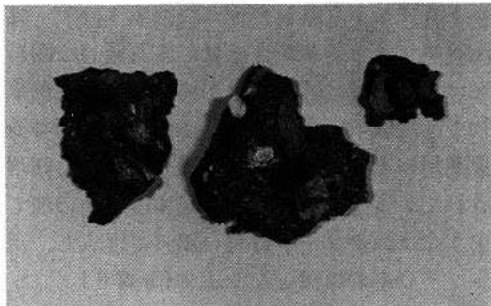


写真2 火山ガラスのポップアウトによる、コンクリートの破片 中央の淡色の核が真珠岩：最大径3cm

2) 乾湿の繰り返しに伴う、体積変化によるもの ローモンタイト

ローモンタイトは沸石の一種で、和名では濁沸石と呼ばれています。これは、乾湿の変化に伴って可逆的に結晶水の一部を放出し、同時に体積も収縮して(約1.5%)レオンハルダイトという沸石に変化するという面白い性質をもっています。吸水すると2時間程度でまたもとのローモンタイトに戻りますが、その際に同量の体積膨張が起こり、また結晶の形状(結晶格子の寸法やへきかい角)も伴って変化しますので、何度もこのような環境変化を繰り返しているうちに、結晶は次第にへきかい面に沿って白濁粉状化し、これを含有するコンクリートの表面にポップアウトを引

き起こします(写真3)。

アメリカでは、これを大量に含んでいたコンクリートが崩壊したという報告例もあります。わが国では、中世代の輝緑凝灰岩や砂岩、新生代の緑色凝灰岩に含まれることがあり、構造物や二次製品に劣化の被害例が知られています。

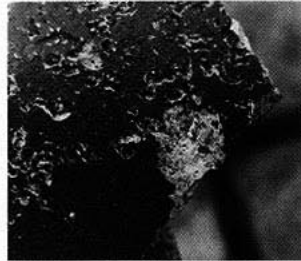


写真3 ローモンタイトによるポップアウト
直径1cm

スメクタイト

スメクタイトは、モンモリロナイト、サポナイト等の、特定の層状の結晶構造を有する粘土鉱物の総称で、著しい膨潤性があります。結晶格子の層間距離は、基本的に乾燥状態で14~15オングストローム(10⁻⁸cm)程度ですが、この分子層の間隙や、微細な結晶粒子の間に水分子を取り込む性質が顕著で、その際に数倍~数10%もの体積変化が急激に起こります。このため、スメクタイトを多量に含有する骨材は、乾湿の影響を受けると粉化、崩壊しやすいことがよく知られています。

通常はこのような岩石は、骨材の安定性試験や洗い試験で流出分が多く不合格となることから、予め試験により排除することができます。わが国では、中程度の変質作用を受けた火山岩や、続成作用を受けた砂泥質の堆積岩中に、しばしば見受けられます。

3) 炭酸化によるもの

コーリングイト

コーリングイトは、蛇紋岩に含まれる褐色の鱗片状結晶で、マグネシウムと三価の鉄を特徴的に含む、層状の含水炭酸塩鉱物です。これは蛇紋岩中に含まれる、二価の鉄を固溶したブルーサイト(天然の水酸化マグネシウム)が、地表付近において風化変質を蒙る過程で酸化、炭酸化を受けて生成するものです。骨材単独の室内放置では、1年ほどでコーリ

ンガイトが生成すると言われています。

コーリンガイトが生成した蛇紋岩は、もとの暗緑色から褐色の粉末状に変質するのが特徴です。一方、このような蛇紋岩がコンクリート中に含まれていた場合には、コンクリート表面の炭酸化に伴って、コーリンガイトが表層付近の骨材中に徐々に生成していき、その際に体積膨張を伴いますので、コンクリートはポップアウトを起こします(写真4)。通常、ポップアウトの発生までに数年かかることが知られています。

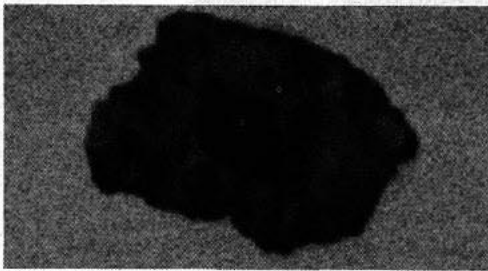


写真4 コーリンガイトのポップアウトによる、コンクリートの破片 中央の核は、変質した蛇紋岩：直径5cm

4) 酸化、加水分解によるもの

黄鉄鉱

黄鉄鉱は硫化鉄の一種で、塊状のものは黄金色に輝くので、大変目につきやすい鉱物です。地表での雨水や酸素の影響により風化、変質を受けやすく、酸化、加水分解、等の作用によって、赤鉄鉱、褐鉄鉱、水酸化鉄ゲル、等に容易に変化し、褐色に錆びていきます。その際に硫酸分を遊離しますので、黄鉄鉱を多量に含む岩盤、土壌からの浸透水は強酸性となります。黄鉄鉱は、黒色粘板岩、石炭、鉄鉱石、熱水変質を受けた火山岩など、様々な岩石に含まれています。

このような岩石が骨材としてコンクリート中に含まれると、数カ月程度で表層付近のものから褐色の錆汁が浸出し始め、さらに黄鉄鉱の含有量が高い場合や粒径が大きい場合には、錆の発生に伴う膨張作用のためにポップアウトも発生します(写真5)。

これらの事例は、構造物、二次製品など、種々のコンクリートに認められます。一般に黄鉄鉱はセメント中のカルシウムと反応して、二次的に石膏やエトリンガイトを生成する恐

れがあるため、これによりコンクリートが膨張破壊する可能性も指摘されていますが、わが国ではこのような例は知られていません。北欧では、近縁の磁硫鉄鉱を含む頁岩を骨材に使用したトンネルに、エトリンガイト生成による被害例が知られています。



写真5 黄鉄鉱によるポップアウトと、褐色の錆汁の流下 直径9cm

5) 水和反応によるもの

ドロマイトクリンカー

ドロマイトクリンカーは、生石灰(CaO)とマグネシア(MgO)を主体とする人工焼成物で、焼成の度合に応じて、製鉄所の炉材や農業用の土壌改良材、肥料等として広く利用されています。レンガ状を呈する褐色の塊で、ときにコンクリート骨材に誤って混入し、ポップアウトの原因となります(写真6)。

これは生石灰やマグネシアの水和により、コンクリート中で過度の膨張が起こるためです。クリンカーの褐色の原因は、鉄の化合物のフェライトを含むことによりますが、黄鉄鉱の場合のように錆汁は伴いません。ポップアウトは2~3ヶ月で発生するものがあるこ

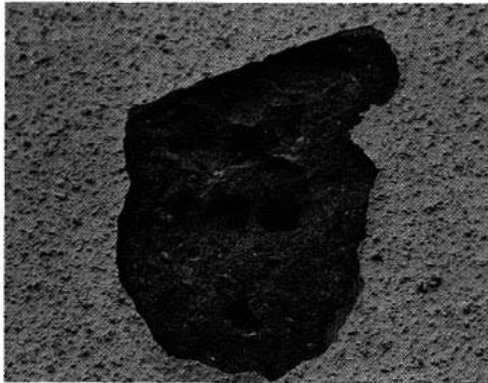


写真6 ドロマイトクリンカーによるポップアウト 中央の褐色の核がクリンカー：直径9cm

とから、先ずは水和反応の早い生石灰の方から反応、消費されるものと思われます。しかしながら、長期的には反応の遅いマグネシアも膨張反応に与りますので、このようなポップアウトの事例を見掛けたら、すぐにコンクリートより核の部分を摘出し、放置をしないことが肝要です。構造物や二次製品に、被害例があります。

6)凍結融解時の、体積変化によるもの(参考) 各種岩石

これは、コンクリートの表層部分に含まれている骨材周辺の水が、凍結融解に伴って体積変化を起こすために発生するものです。ポップアウトの形状は、通常のポップアウトに近い円錐形のものから、偏平でスケーリング状を呈するものまで様々あります(写真7)。

一般には、ポップアウトは吸水量の高い頁岩、泥岩、凝灰岩、特にスメクタイト含有量の高い骨材に多いとされていますが、現地の気象条件やコンクリートの敷設条件によっては骨材の種類を問わず認められます。また、冬期に打設したコンクリートや、野外で浅く

冠水していた部分にも、しばしば認められます。二次製品の場合は、製造時に振動をかけすぎたり、AE連行気泡量の少ない、密実なコンクリートに多いようです。

凍結融解によるポップアウトは、室内試験によって再現することができますが、打設時の条件やポップアウトの産状、状況、等をよく検討し、骨材部分を含むコンクリート組織の顕微鏡観察を行えば、そのような手間のかかる試験をしなくても十分に原因を判定することができます。

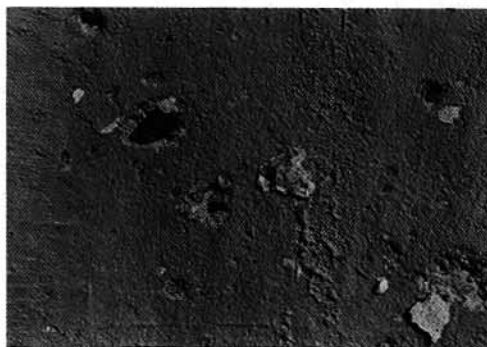


写真7 凍結融解によるポップアウト 最大径4cm