

[38] 蛇紋岩骨材に起因するコンクリートのポップアウトについて

蛇紋岩骨材に起因するコンクリートのポップアウトについて

正会員 ○ 和泉 意登志 (竹中工務店技術研究所)
 同 高 英雄 (同上)
 篠崎 征夫 (同上)
 奥野 亨 (竹中工務店東京支店)

1. まえがき

これまでに発生したコンクリートのポップアウトの原因は、骨材中に夾雑したドロマイトクリンカーの水和、アルカリ骨材反応または凍結等の膨張圧によるものがほとんどであった^{1),2)}。しかしながら、コンクリート用骨材として用いた蛇紋岩砕石中に混入していた風化変質鉱物の風化膨張が原因であるという、これまでに例のなかった事例が報告³⁾されている。コンクリートの骨材として使用した砕石が原因でポップアウトが発生したことは、これまでの原因とは本質的に異なるものであり、単にコンクリート表面のみの問題にとどまらず、コンクリートの耐久性および今後増大の一途を辿る砕石の品質基準をも含んだ問題を残している。

本報告は、蛇紋岩によるポップアウトの原因を究明すること並びにコンクリートに及ぼす影響を検討することを目的として行なってきた一連の実験結果をまとめたものである。

2. ポップアウト発生状況の観察

ポップアウトの発生状況を図-1および写真-1に示す。ポップアウトは、コンクリート表面から0~10mmの深さの表層部に発生しており、コンクリートを円錐型に押し出している。押し出されたコンクリート円錐型の底面は、3~40mmの直径を持った円形に近い形をしている。押し出されたはく離片を除去すると、すべての場合に共通して凹部中央に黄褐色砂状物の存在が認められ、この物質に接して蛇紋岩砕石が存在する。黄褐色砂状物は蛇紋岩砕石の一部であり、この物質に接して木片状の黄色物が蛇紋岩砕石に付着していた。

ポップアウトは、コンクリート打放し仕上げまたはコンクリート面に直にペンキ塗りもしくはリシン吹付けのような通気性のある仕上げ面のみ発生し、モルタル仕上げ等の場合には発生していない。

3. 鉱物化学的検討

3.1 黄褐色砂状物の分析

ポップアウトの凹部に存在する黄褐色砂状物の化学分析を、セメント協会標準試験方法CAJSI-12-1971「けい酸質原料の化学分析法」によって行ない、またX線ディフラクトメーターを用いて粉末X線回折試験により鉱物組成の同定を行なった。

表-1に示した化学分析試験結果から、当該物質はSiO₂・MgOおよびFe₂O₃が主成分である化合物であることが明らかとなった。また表-2に示したX線回折同定結果から、最強ピークの化合物は1960年代に新しく発見された化合物であるCoalingite [Mg₁₀Fe₂³⁺CO₃(OH)₂₄·2H₂O]⁴⁾と呼ばれる化合物と考えられ、その他の物質として蛇紋岩(Anti-

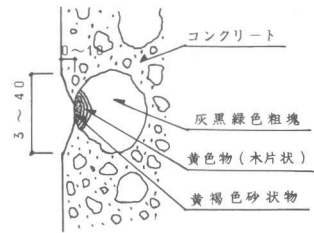


図-1 ポップアウトの発生状況

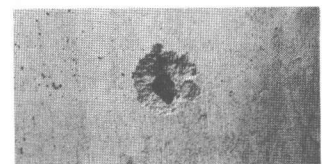


写真-1 ポップアウト発生状況

表-1 化学分析試験結果

成分	igloss	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Total
重量比(%)	10.9	53.4	tr	27.6	tr	27.5	99.4
モル比	3.5	3.2	—	1.0	—	4.0	—

表-2 X線回折同定結果

同定鉱物	Antigorite	Coalingite	Magnetite
強度	+++	+++	++

+++強度の強いピークが認められる
 ++ピークが明らかに認められる

gorite) および磁鉄鉱 (Magnetite) の存在が認められた。

3.2 鉱物相変化追跡試験

Coalingiteは、Bruciteが酸化・炭酸化して生成されるという説がある(図-2参照)。今回発生したポップアウトの凹部中央に存在していたCoalingiteがBruciteの変質物であるかどうかを検討するために、当該蛇紋岩碎石の産地から種々の岩石を採取し、これを資料として濃度約100%の炭酸ガス雰囲気中による強制炭酸化を行ない、岩石の変化を観察する一方、鉱物相の変化をX線回折試験により追跡した。

実験結果の中で特筆すべき現象は、Brucite[Mg(OH)₂]鉱物のX線回折ピーク強度が養生前に比較して減少しており、新たなX線回折ピークとしてMgCO₃・3H₂Oや問題としていたCoalingiteと同類の含水炭酸塩鉱物であるSjögrenite[Mg₆Fe₂³⁺CO₃(OH)₁₆・4H₂O]が認められた。この現象は、Bruciteが酸化・炭酸化して含水炭酸塩鉱物に変質するという説⁴⁾とはよく一致する。Coalingiteの生成が確認出来なかったのは環境条件の相違によるものであろう。

4. ポップアウトの再現実験

4.1 実験概要

当該蛇紋岩碎石による実験室でのポップアウトの再現とポップアウトの発生に及ぼす外的要因の影響を明らかにする目的で、各種コンクリート供試体を製作し、ポップアウトの発生を観察した。コンクリートは、表-3に示すように、粗骨材、水セメント比およびアルカリ濃度を因子として組合わせた12種類であり、それぞれφ5×10cmの円柱供試体を24本とφ10×20cmの円柱供試体を4本製作し、材令4週まで20℃水中養生を行なった。4週以後は表-4に示す4種類の環境条件下に、各調合についてφ5×10cm供試体を6本とφ10×20cm供試体を1本それぞれ静置した。測定は、静置後2週間間隔で各供試体の表面においてポップアウトの発生の有無を観察した。

4.2 実験結果および考察

供試体の中で1つでもポップアウトの発生が観察された時点をポップアウトの発生材令として表-4に示す。蛇紋岩Y(表面にCoalingiteが生成している)を用いた供試体はいずれの調合においてもポップアウトが発生したが、その他の骨材を用いた場合には全く認められなかった。ポップアウトは材令26週において環境条件Ⅱで最初に発生し、続いてその他の環境条件において発生が認められた。ポップアウトの発生材令は、環境条件によって大きく影響を及ぼされ、炭酸ガス濃度が高い程早く、また一般大気中においては湿度60%の場合が80%の場合より早かった。コンクリート強度およびアルカリ濃度による影響は認められなかった。蛇紋岩Yを用いた調合以外のコンクリートについては以後においても全くポップアウトの発生は認められなかった。

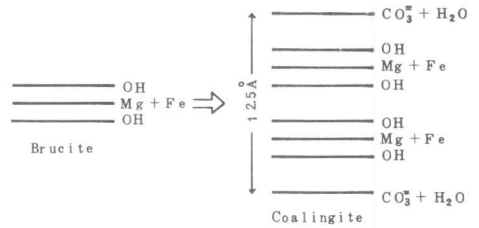


図-2 Coalingiteの生成

表-3 コンクリート調合の組合せ

因子	水準	1	2	3
A:粗骨材		硬質砂岩	蛇紋岩X ¹⁾	蛇紋岩Y ²⁾
B:水セメント比(%)		6.7	8.6	—
C:アルカリ濃度(%) ³⁾		0.56	1.12	—

- 1) 使用実績があり、問題が主じなかった骨材
- 2) コーリンジャイトが生成している原石を破砕した骨材
- 3) コンクリート中のNa₂O当量換算

表-4 環境条件

記号	CO ₂ 濃度(%)	温度(℃)	相対湿度(%)
I	1.0	3.0	6.0
II	1.0	3.0	6.0
III	0.03	2.0	6.0
IV	0.03	2.0	6.0

表-5 ポップアウト発生材令(週)

環境	W/C(%)		Na ₂ O(%)	
	6.7	8.6	0.56	1.12
I	2.8	2.8	2.8	2.8
II	2.6	2.6	2.6	2.6
III	4.0	4.0	4.0	4.0
IV	6.0	6.0	7.4	4.0

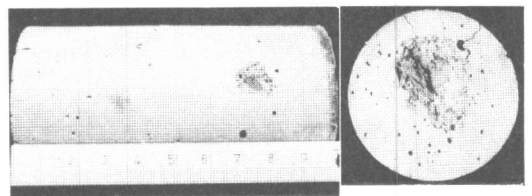


写真-2 ポップアウトの再現

5. ポップアウト発生の力学的メカニズムに関する実験

5.1 実験概要

蛇紋岩碎石の風化膨張によってポップアウトが発生したが、これらの現象は既に報告されているドロマイトクリンカーの水和，アルカリ骨材反応または凍結等と同様に、内部に発生した圧力によるものである。これらポップアウトの発生を防止するためには、ポップアウトの力学的メカニズムを明らかにする必要があるが、これまで研究された例は少ない。このため、ポップアウトの再発防止および補修対策の基礎的資料を得る目的で、ポップアウトを機械的に発生させ、ポップアウト発生圧力を検討した。実験は、図-3、写真-3に示す装置を用いて油圧ジャッキにより、外径32mmのなす型シリコンゴム中の油を加圧し、ゴムの埋込み深さdとモルタルの引張強度 σ_t をパラメータとして、ポップアウト発生圧力を測定した。実験に用いたモルタルの割合は、C:S:W=1:2:0.47および1:3:0.60の2種類であり、それぞれ試験材令を変化させることにより引張強度を10~30 kg/cm²の範囲に変化させた。またゴムの埋込み深さは、2~32 mmの範囲で変化させた。

5.2 実験結果および考察

ポップアウトの発生圧力pと埋込み深さdの関係を、図-4および図-5に示す。それぞれ試験材令ごとに回帰式を求めると、ほぼ原点近くを通り、相関係数がすべて0.98以上である直線となる。直線の勾配はそれぞれ異なるが、モルタルの引張強度が大きくなるに従って大きくなる。そこで、ポップアウト発生圧力pをモルタルの引張強度 σ_t で除して無次元化した値 p/σ_t と、埋込み深さdをゴムの外径で除して無次元化した値 d/ℓ の関係を図-6に示し、回帰式を以下に示す。

$$p/\sigma_t = 11.95d/\ell - 0.005 \quad (r = 0.979) \quad (1)$$

(1)式はほぼ原点近くを通る直線であり、 p/σ_t と d/ℓ は非常によい比例関係にあり、既往の文献とも一致する。

骨材を球体と想定し、コンクリートを弾性体と仮定すると、骨材の膨張量 $\Delta V/V$ が判明すれば、内圧力 p' が次式により求められる。

$$p' = \frac{\Delta V/V \times E}{[(1-\nu) \frac{n^3+2}{2n^3-1} + \nu]} \quad (2)$$

ここに、E:弾性係数 D:ポアソン比

$$n = (2d + \ell) / \ell$$

実験により得られた回帰式(2)式に、 ℓ 、 σ_t 、E、 ν を仮定して代入すると、図-7に示すような直線と曲線が得られる。両者の交点におけるdの値 d_1 を求めることにより、ポップアウトが発生しない最小埋込み深さが求められる。しかしながら、実際の場合は膨張する物質が球体ではなく、コンクリートも弾性体ではないこと等を考慮する必要がある。

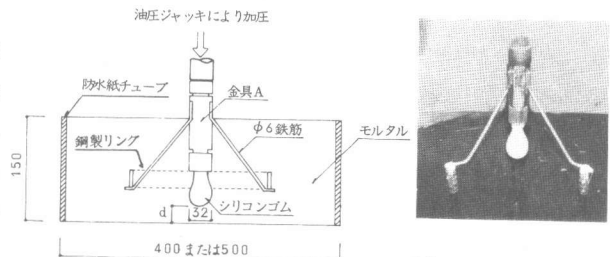


図-3 試験装置

写真-3 埋込み器具

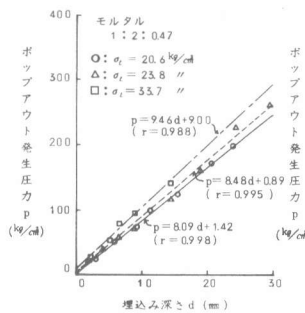


図-4 pとdの関係

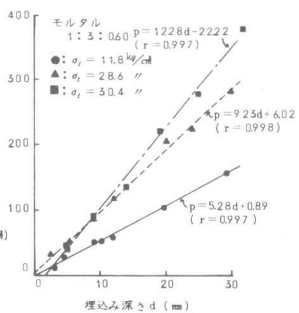


図-5 pとdの関係

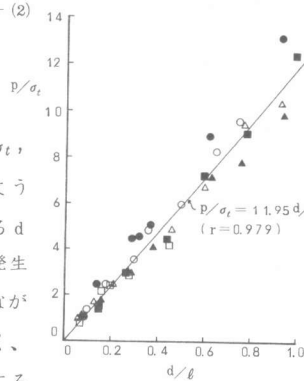


図-6 p/σtとd/ℓの関係

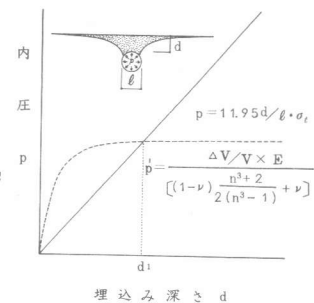


図-7 ポップアウトの生じない埋込み深さ

6. コンクリートの力学性状に関する実験

6.1 実験概要

ポップアウトの原因となった蛇紋岩砕石を用いたコンクリートの長期力学性状を検討する目的で、表-6に示した3種類のコンクリートについて、20℃水中養生および屋外暴露における圧縮強度、静弾性係数および引張強度と材令の関係を求めた。

6.2 実験結果および考察

材令4週の値をそれぞれ100とした指数と材令の関係を図-8に示す。ポップアウトは調査Cのコンクリートで屋外暴露の供試体のみに材令1年程度で発生し、水中養生では材令2.5年においても全く発生しない。

当該蛇紋岩砕石を使用したコンクリート(調査C)は、20℃水中においては、圧縮強度、静弾性係数および引張強度が材令とともに低下することはない。屋外暴露においては、圧縮強度の低下は見られないが、静弾性係数および引張強度が若干低下する傾向にある。

これらのことより、当該蛇紋岩砕石を用いたコンクリートは、蛇紋岩が酸化・炭酸化という一種の風化現象を生じる環境に存在すればポップアウトが発生し、長期強度の低下が生じるが、酸素・炭酸ガスをしや断出来ればポップアウトが発生せず、強度的にも問題がないことがわかった。

7. 結論

特殊な蛇紋岩砕石の使用により発生したポップアウトは、蛇紋岩中に局所的に存在する鉄分高含有のBruciteが酸化・炭酸化によりCoalingiteに変質する過程に生ずる膨張に起因したものと判断される。当該蛇紋岩砕石コンクリートは、大気をしや断する方法によってポップアウトの発生および力学特性の低下を完全に防止することが出来る。コンクリート用骨材として使用した砕石が原因で発生したポップアウトは、今後ますます増大する新しい砕石の使用に際し、鉱物化学的な検討を十分に行なう必要があることを示唆している。

[参考文献]

- 1) 狩野：コンクリート技術事典，オーム社，昭和43年4月
- 2) Bache, H.H. & Isen, J.C. : Model Determination of Concrete Resistance to Popout Formation, June 1968
- 3) 森野：コンクリート骨材のポップアウトに関する研究，土木学会年次講演会概要集，昭和53年9月
- 4) Mumpton, F.A., Jaffe, H.W. & Thompson, C.S. : Coalingite, A New Mineral from the New Idria Serpentinite, Fresno and San Benito Counties, California. The American Mineralogist Vol. 50, 1965

表-6 コンクリートの調査

調査	粗骨材	目標スランプ (cm)	目標空気量 (%)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単 位 量 (kg/m ³)				
						C	W	S	G	admix
A	硬質砂岩	21	4	65	42	290	189	747	1044	0.102
B	蛇紋岩 ¹⁾					290	189	747	1142	0.102
C	蛇紋岩 ²⁾					290	189	747	1142	0.102

1) 製品となった蛇紋岩砕石，2) Coalingiteが生成した砕石を1)に10%混入

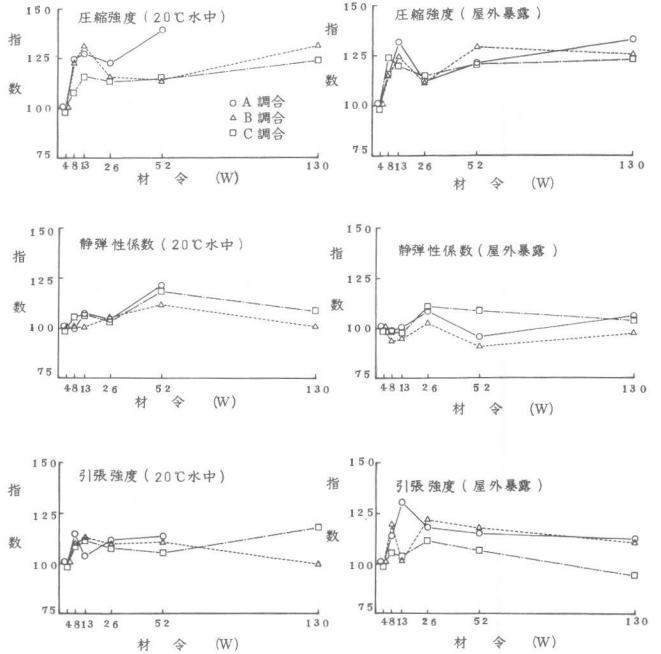


図-8 コンクリートの長期力学性状