

## ポップアウト現象

pop-out

### 1. 用語の説明

コンクリートの表面部分が、コンクリート内部の膨張圧により、部分的に飛び出すように剥がれてくる現象をポップアウトという。ポップアウトは、凍結融解作用、反応性骨材、鉄筋の錆などが原因となって発生する。

### 2. メカニズム

#### 凍結融解作用によるポップアウト

凍結融解作用による劣化は、コンクリート中の水分が凍結する際の膨張圧およびそれに伴う水の移動圧によって生ずる。また、こうした凍結時の膨張圧だけでなく、凍結融解時の膨張・収縮が、骨材とセメントペースト、コンクリートの表層部と内層部など、部分的に異なることによって生ずる。

一般に、コンクリートは凍結によって膨張変形するが、その凍結が融解した場合でも、塑性変形と組織の破壊により変形が原形まで復元しないため、コンクリート内部に膨張が残留する。膨張が残留すると吸水が大きくなり、新たな水の供給があると、次の凍結融解作用によってさらに大きな残留膨張を生ずる。凍結融解の繰返しにより積み重ねられた残留膨張の圧力が原因となって、ポップアウトやひび割れなどの損傷が生ずる。

骨材中に粘土塊があり、コンクリートミキサ内では崩壊しない程度の強さがあれば、硬化コンクリート中に塊状で存在し、この塊が表面近くにあると、凍結融解または乾湿繰り返し作用を受けポップアウトを生ずる原因となる。

#### 反応性骨材によるポップアウト

骨材の材質そのものが不良な場合に生ずる劣化は、コンクリートの施工後、かなり材齢が経過した後に生ずることが多い。骨材の材質に原因がある場合として、アルカリ骨材反応と不良骨材の混入によるポップアウト現象がある。

アルカリ骨材反応は、骨材そのものがコンクリート中のアルカリ成分と反応して、その際の体積膨張によりコンクリートを劣化させる現象である。この反応を起こす有害な骨材としては、安山岩、凝灰岩、石英安山岩、石英粗面岩、たんぱく岩、けい酸質苦土質石灰岩、隠微晶質流紋岩およびこれらの鉱物を含む岩石がある。また、骨材の一部に水と反応する骨材、あるいは人工の不良物が混入していると、それらの反応または作用による体積膨張により、コンクリート表面に部分的な剥離現象を生ずる。

酸化物は有害なシリカ鉱物を除けば、CaO、MgO、FeO が問題となる。CaO は水和して  $\text{Ca(OH)}_2$  となり膨張するが、天然骨材に存在することはない。しかし、焼成軽量骨材や転炉スラグには含まれるので注意が必要である。MgO も水和して  $\text{Mg(OH)}_2$  となり膨張するが、天然骨材に含まれることはほとんどなく、ドロマイトクリンカーや煉瓦屑の混入によってポップアウトを生ずる。FeO はスラグ類に存在しており、FeO を含有する粘土鉱物が酸化されやすいことにより、膨張してポップアウトを生ずる。

硫化物鉱物は、硫化鉄鉱、白鉄鉱、磁硫鉄鉱として骨材中に存在する。これらの鉱物が空気に接触すると、酸化して硫酸を生成すると同時に、セメント中の石灰と反応して石膏となる。石膏とセメントのアルミン酸石灰塩との反応により、エトリ

ンガイトを生成し、コンクリートは膨張する。また、石膏は、無水石膏または2水石膏として天然骨材中に、無水石膏として軽量骨材中に存在する。これらの石膏からもエトリンガイトが生成され、膨張の原因となる。石膏だけでなく、明バン石および鉄明バン石を含む骨材もエトリンガイトを生成するので注意が必要である。

### 鉄筋の発錆によるポップアウト

コンクリート中に埋込まれた鉄筋が錆びないのは、コンクリートが強アルカリ性を有しているためである。しかし、コンクリートが炭酸ガスなどの作用により中性化すると、鉄筋が腐食しやすくなる。特に、中性化したコンクリート中に炭酸が生ずると鉄筋の腐食は急速に進むといわれている。鉄筋がある程度腐食すると、錆の進行に伴う体積膨張により、かぶりコンクリート部に、鉄筋に沿ったひび割れやポップアウトが発生する。これらの現象が生ずると、鉄筋の腐食が急速に進行し、建造物の耐久性を損なう恐れがある。

### 3 . 対策

凍結融解や乾湿の繰返し作用によるポップアウトは、適切なA/Eコンクリートを用いることにより、ほとんど抑制することができる。しかし、粘土塊や軟石が多く含まれる骨材を使用していると、A/Eコンクリートを用いた場合でも、ポップアウトを生ずる危険性が高くなる。こうした骨材を用いたコンクリートで、ポップアウト現象を生じた悪い前例がある場合には、骨材を変更するのがよい。

アルカリ骨材反応に起因するポップアウトは、反応性のある骨材を使用しないこと、あるいはアルカリ骨材反応の抑制対策を講ずることによって、ほとんど抑制することができる。しかし、骨材に含有された酸化物あるいは硫化物、珪物との反応による膨張により、ポップアウトを生じた悪い前例のある反応性骨材を使用している場合には、骨材を良質のものに変更するのがよい。また、製品工場などで、混練時に石膏を添加したり、種石などの目的で特殊な骨材を用いている場合には、特に注意が必要である。

反応性の珪物が含まれる骨材や反応性のある添加材を用いる場合には、その使用実績を重視し、ポップアウトなどの悪い前例がないものを選定して用いなければならない。反応性のある骨材や低品質の骨材が、わずかに含有されている骨材を使用した場合には、それらの骨材が比較的表層部にある部分にのみポップアウトが発生し、その位置にある骨材より原因となる珪物が限定できるので、その珪物が含まれていない骨材に変更する必要がある。

鉄筋の発生によるポップアウトは、水セメント比の小さい、密実なコンクリートを用いて、かぶり厚さを大きくすることにより、ほとんど抑制することができる。

### 4 . 補修

一般に、ポップアウトはコンクリート表層部の部分的な破損であり、構造上の大きな問題とならない場合が多い。しかし、ポップアウトは美観を損なうため、モルタル（反応が継続して新たなポップアウトの発生が予測される場合には樹脂モルタル）などで充填するのがよい。

一方、アルカリ骨材反応や鉄筋の発錆などに起因して、膨張が長期に渡って継続し、破損が大きくなる場合には、ポップアウトの進行により耐久性が損なわれる。こうしたポップアウトでは、大規模な補修が必要となるので、ポップアウトを生じないように事前に抑制対策を講ずる必要がある。