

鉄道一般
車両
施設
電気
運転・輸送
防災
環境
人間科学
浮上式鉄道

コンクリートの膨張原因を探る

コンクリートは、使用材料や配合、施工方法や使用環境などのさまざまな要因によってひび割れが生じることがあります。構造物の性能低下につながるひび割れを防ぐためには、その原因に応じた対策を行うことが重要ですが、中には原因が十分に解明されていないものや、複数の要因が影響して生じるものもあります。そのひとつに、建設から年月をかけてコンクリートが過度に膨張することによってひび割れが生じる現象があります。ここでは、このようなコンクリートの膨張の概要や影響する要因を紹介します。



山崎 由紀
Yuki Yamazaki
材料技術研究部
コンクリート材料研究室
研究員



鶴田 孝司
Koji Tsuruta
材料技術研究部
コンクリート材料研究室
主任研究員



上原 元樹
Motoki Uehara
材料技術研究部
コンクリート材料研究室長

はじめに

鉄道では、橋りょうや高架橋、トンネルなどで幅広くコンクリートが用いられています(図1)。これらのコンクリート構造物は長期にわたって健全に使われるものが多い一方で、構造物の性能に影響するコンクリートのひび割れや、内部の鉄筋の腐食などの劣化が生じるものもあります。建設した構造物を建て替えることは難しく、劣化の予防や補修などによって構造物の性能を維持していくためには、コンクリートの劣化の要因やメカニズムを把握することが重要です。

コンクリートはセメント・水・骨材

(砂・石)からできており、セメントと水との化学反応(水和反応)によって固まります。また、固まった後のコンクリートにおいても、構造物が建設された全国各地の多種多様な環境の中で日々、化学反応が生じています。この反応がコンクリートの劣化につながることがありますが、使用された材料や配合、施工方法などのさまざまな影響を受けるため、原因やメカニズムが十分に解明されていない劣化もあります。ここでは、建設から年月をかけてコンクリートが膨張し、ひび割れが生じる現象について紹介します。



図1 コンクリート構造物の例

コンクリートが膨張する原因

コンクリートは乾燥によって収縮したり、温度変化や化学反応によって膨張や収縮が生じたりします。一般的に、構造物の設計では、乾燥や水和反応により時間の経過とともにコンクリートが収縮することなどが考慮されています。一方、設計時に想定していなかった過度な収縮や膨張が生じて、構造物にひび割れなどが生じる場合があります。ここでは、設計で想定していない膨張の原因となるコンクリート内部の化学反応について説明します。

アルカリシリカ反応

最初に、コンクリートの膨張原因として知られている、アルカリシリカ反応（アルカリ骨材反応）について紹介します（図2）。固まった硬いコンクリートであっても、その中には微細な空隙があり、そこに含まれる水にはセメントなどに含まれるアルカリ成分が溶けています。コンクリートに使用された骨材によっては、アルカリ成分が溶けた水と反応し、膨張性のゲルを生じ、これが吸水膨張することでコンクリートにひび割れが生じる場合があります。アルカリシリカ反応に対しては、骨材を評価してアルカリ反応性の低い骨材を使用したり、セメント中のアルカリ量を制御したり、あるいはアルカ

☞ エトリンガイト

エトリンガイトは電子顕微鏡で観察すると針のような形状をしています。コンクリート中でエトリンガイトが生成することで、コンクリートが膨張することがあります。

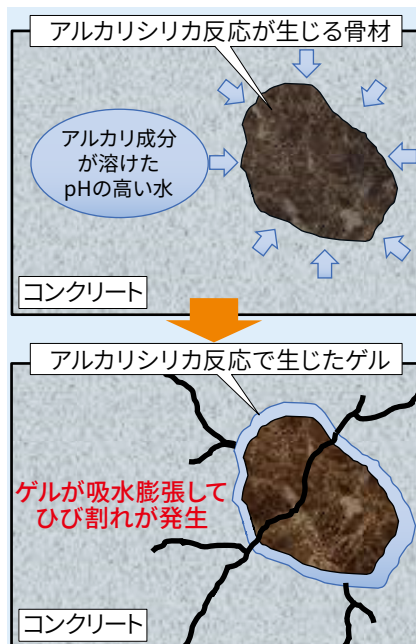
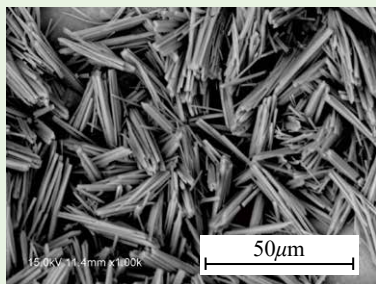


図2 アルカリシリカ反応のイメージ

リシリカ反応を起こしにくくする材料をセメントとともに用いて膨張を抑制する方法があります。

エトリンガイトの遅延生成

その他のコンクリートの膨張原因として、エトリンガイトの遅延生成（Delayed Ettringite Formation, 以下DEF）とよばれる現象があります。セメントの水和反応によって生じるエトリンガイト（☞参照）という物質が膨張の原因となります。ただし、エトリンガイトは必ずしもコンクリートの膨張を引き起こすものではなく、膨張が生じていないコンクリートでも見られる物質です。

一方、製造過程で加熱したり、セメントの水和反応によって熱が生じたりすることで高い温度を受けたコンクリートは、エトリンガイトによって過度の膨張を生じる場合があります。これは、エトリンガイトには高い温度を受けたコンクリート中で分解する性質があり、一度分解したエトリンガイトが年月をかけてもう一度生成（遅延生成）するためといわれています。しかし、どのようなメカニズムでコンクリートが膨張するのか十分にはわかっ



図3 コンクリート構造物のひび割れ事例

ていません。これまでの研究では、膨張しやすい条件での検討が多く、実構造物の環境とは異なる条件も含まれているため、実構造物で膨張が生じる条件についても検討する必要があります。また、コンクリート構造物では、上記の異なる2つの膨張原因が複合してひび割れが生じた可能性のある事例がみられます（図3）。現在のところ、それぞれの原因が膨張やひび割れに対してどの程度影響したかを明確に判定する方法はわかっていませんが、2つの原因が複合することで膨張が促進される場合があることがわかってきました。

次に、DEFによる膨張について説明し、続いて上記の2つの膨張原因が複合して生じる条件や実構造物の環境条件を考慮した膨張試験について研究内容を紹介します。

DEFによる膨張メカニズム

コンクリートの膨張に関する研究では、さまざまな条件で作製したコンクリートやモルタル（セメント・水・砂から成り、石を含まない）の試験体の長さ変化率（膨張率）を計測して、どのような条件で膨張が生じるのか検討

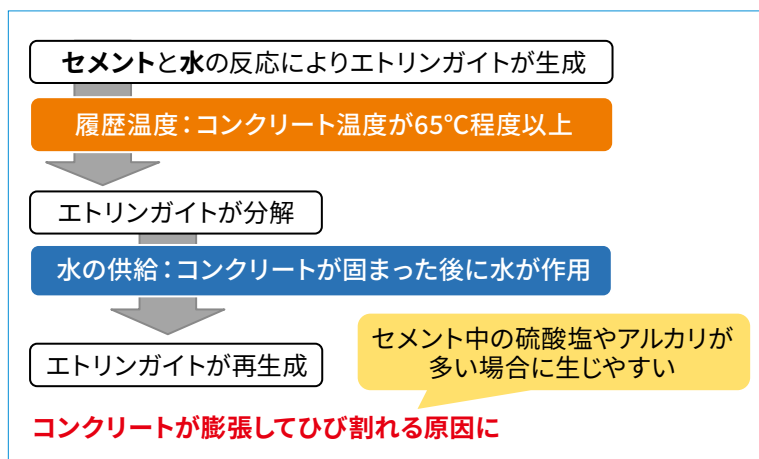


図4 DEFの発生条件

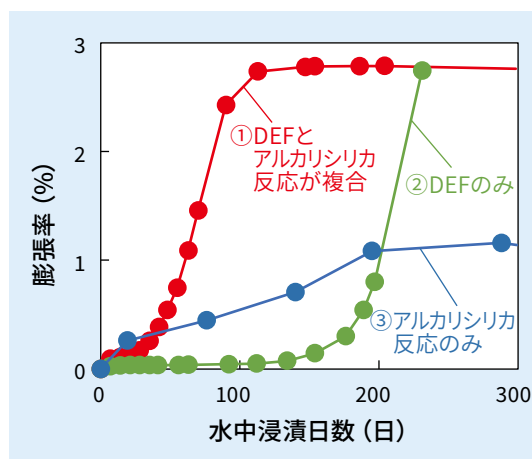


図6 DEFの膨張に対するアルカリシリカ反応の影響

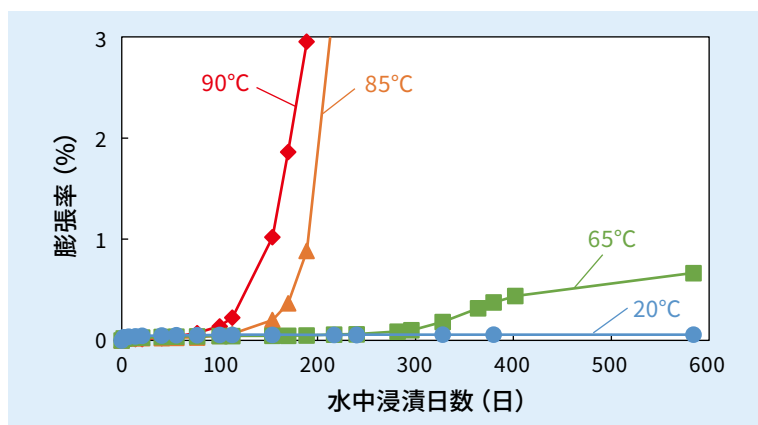


図5 DEFの膨張に与える履歴温度の影響

されています。セメントの水和反応によって生じるコンクリートの温度は、条件によって異なりますが、80～90℃以上になることもあります。DEFによる膨張は、コンクリートが受けた温度（履歴温度）が高いことに加えて、セメントに含まれるアルカリや硫酸塩（☞参照）成分が多い場合や、固まった後のコンクリートが水に浸されるような環境で生じやすいもの

と考えられています（図4）¹⁾。セメントの種類によって膨張の生じやすさは異なりますが、膨張を防止するにはセメントの種類や含まれるアルカリ量・硫酸塩量に応じて、コンクリートが受ける最高温度を65～80℃以下に制御する方法が提案されています¹⁾。図5は、セメントの水和熱などによってコンクリートが高温になることを考慮して、セメントが固まる過程で、異なる

最高温度で加熱したモルタル試験体の膨張率の推移を示しています。前述のとおりDEFが生じやすいと考えられている水中に浸漬する条件で、膨張が生じる履歴温度を調べたところ、65℃以上の履歴温度がある場合に、エトリンガイトの増加による膨張が生じました。一方、材料や配合が同じモルタルであっても、膨張率はエトリンガイトの増加量に関係がないことが既往の研究でわかっています²⁾。したがって、コンクリート中のエトリンガイトの量から膨張の原因を判断することはできず、ひび割れが生じた原因を評価することが困難な要因となっています。

2つの原因が複合して生じる条件での膨張試験

コンクリート構造物において、DEFとアルカリシリカ反応が複合して生じている可能性があることから、2つの膨張原因が複合することによってコンクリートがどのように膨張するのかを調べてみました。図6は、①2つの膨張原因が複合、②DEFのみ、③アルカリシリカ反応のみ、が生じる条件で作製したモルタル供試体の膨張率の例を示しています。水中に浸漬する条件で測定したこれらの膨張率を比較する

☞ 硫酸塩

セメントには水と反応した直後に硬化（急結）する成分が含まれています。コンクリート構造物は、工場で混ぜ合わせたコンクリートを、アジテータ車（ミキサー車）で練り混ぜながら建設現場まで運び、型枠に流し込んで造られます。コンクリートが運搬途中や建設現場での作業中に固まらないようにするため、一般的なセメントには硫酸塩である石膏が添加されています。石膏の反応によってセメントの反応が抑制され、コンクリートの急結を防ぐことができます。

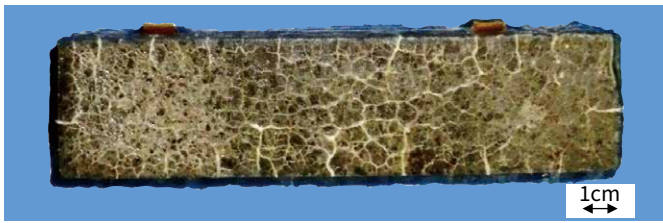


図7 2つの膨張原因が複合して生じた膨張ひび割れ



図9 高湿度の空气中でDEFのみによって生じた膨張ひび割れ

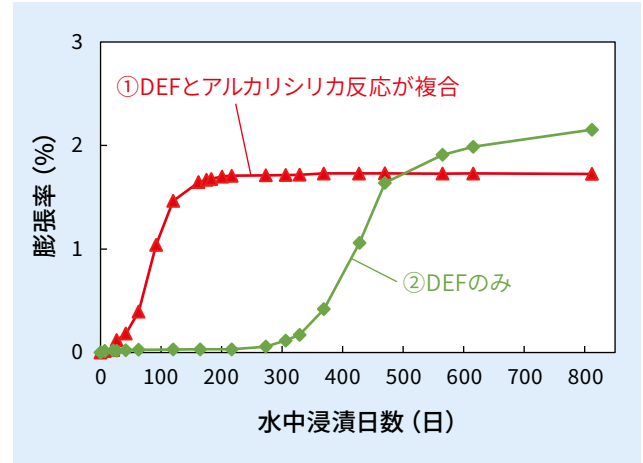


図8 硫酸塩量を減らした条件でのDEFによる膨張

と、①、②では、③に比べて膨張率が大きく、DEFによって大きな膨張が生じています。また、②に比べて、①では、短期間で大きな膨張が生じています。これは、アルカリシリカ反応が生じた場合には、DEFによる膨張が促進されて、より大きな膨張が早期に生じることを示しています。図7に示すように2つの膨張原因が複合して生じた場合には、多くの細かいひび割れが分散して生じる特徴がみられました。

2つの膨張原因が複合することで、膨張が促進される理由は、アルカリシリカ反応においてアルカリ成分を含んだゲルが生成されることに関連すると考えられます。このゲルが生成することによってコンクリート中の水に含まれるアルカリ量が減少し、pHは低下します。エトリンガイトはコンクリート中でpHが少し低くなると安定することがわかっており³⁾、DEFによる膨張はアルカリシリカ反応によってコンクリート中の水のpHが低下したことで生じやすくなったと考えられます。

実構造物の環境条件を考慮した膨張試験

一般に使用されるセメント中の硫酸塩量はJISにおいて上限値が規定され

ています。これまで紹介した試験結果は、多くの研究で実施されているようにDEFを促進させるため、この上限値を上回る量の硫酸塩を添加した条件での膨張挙動を示しています。図8に硫酸塩量が規格内となる条件での膨張挙動を示します。この場合にも、①2つの膨張原因が複合して生じる条件では、②DEFのみが生じる条件よりも大きな膨張が早期に生じています。また、図9は水中に浸漬せずに高湿度の空气中で保管した条件で、DEFのみが生じた試験体の様子を示しています。コンクリート構造物が建設されている環境条件により近い空气中においても、膨張によりひび割れが生じたことがわかります。

以上のことから、実構造物に近い環境条件でも、DEFによる膨張が生じることがわかりました。部材の断面が大きく、セメント量の多いコンクリート構造物などでは、セメントの水和熱によって履歴温度が高くなる場合があることから、DEFが生じる可能性を考慮した対応を検討していく必要があると考えられます。

おわりに

コンクリートの膨張原因であるエト

リンガイトの遅延生成(DEF)について、異なる膨張原因であるアルカリシリカ反応の影響や、実構造物の環境に近い条件での膨張について紹介しました。現在、コンクリートにDEFによる劣化が生じた場合にどのような補修を選定したらよいか、補修の効果などについて検討しています。一方、2つの膨張原因が、コンクリートの膨張やひび割れにどの程度影響したかを評価する方法については課題が残されています。コンクリート構造物をより長期的に使用していくために、今後もコンクリートの膨張原因を探る方法について、研究を進めていきます。RRR

文献

- 1) 日本コンクリート工学会：マスコンクリートのひび割れ制御指針 2016
- 2) 山崎由紀，鶴田孝司，上原元樹：種々の養生温度および水中浸漬条件におけるモルタルの成分変化がエトリンガイトの遅延生成に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.40，No.1，pp.639-644，2018
- 3) 平尾宙：硫酸塩劣化事例—エトリンガイトの遅延生成(DEF)に関する研究，コンクリート工学，Vol.44，No.7，pp.44-51，2006