

インフラメンテナンス：熱分析とコンクリート

Thermal Analysis for Infrastructure Maintenance (Concrete)

宮林延良

Nobuyoshi MIYABAYASHI

電子科学株式会社

〒180-0013 東京都武蔵野市西久保 1-3-12 Tel:0422-55-1011

E-mail : miya@escoltd.co.jp

1. はじめに

2012 年の国土交通白書によると、管轄下の社会資本ストックの新設・更新・維持管理に充てられる予算は、年間 8 兆円程度が予想されています。2016 年の更新・維持管理費は 5 兆円弱が予想されており、まだ新設の余裕があります。2035 年以降には更新・維持管理費だけで 8 兆円を超えて増え続け、新設ができず、更新・維持管理も選択せざるを得ない時代が続きます。2055 年で 2.5 兆円の予算不足が推測されています。

現代社会でコンクリートと言えば、ほとんどが鉄筋コンクリートです。コンクリートは圧縮には強いのですが、引っ張りに弱く、鉄筋で補強しています。この鉄筋は被膜で覆われているため錆びず、皮膜はコンクリートがアルカリ性であることから破壊されません。最強の組合せなのですが外敵がいます。大気中の二酸化炭素と塩です。二酸化炭素はコンクリート中に残っている水分にわずかながら溶け、コンクリート中の水酸化カルシウムと反応して炭酸カルシウムにしてしまいます。水酸化カルシウムは、コンクリート中で微量ながら溶けてアルカリ性を呈していますが、これが徐々に中和されていきます。鉄筋のところまで中和されてしまうと、鉄筋の皮膜が消失し、鉄筋が錆びはじめます。同様に塩(塩水状態)も、コンクリートと接触するとコンクリートの内部に侵入し、塩化物イオンが鉄筋の皮膜を侵し、鉄筋が錆びはじめます。鉄筋が錆びると、体積が増え、コンクリートを内部から膨張させます。引っ張りには弱いコンクリートですから、なかの鉄筋が錆びるとひとたまりもなく、コンクリート片の落下につながります。これらを中性化と塩害と呼びます。中性化は大気中の二酸化炭素が原因ですが、塩害は洗浄不足の海砂の使用や融雪剤(NaCl)の使用が原因です。

コンクリートそのものが破壊されていくこともあります。コンクリート中に溶け込んでいる Na イオンと K イオン(先天的なものや後天的なものがある)が、骨材と呼ばれる砂や砂利中の非晶質 SiO_2 と反応して、骨材をシリカゲル状にしてしまう病気です。下水などには硫化物が多く含まれ、それが細菌の影響で硫酸となってコンクリートを溶かしてしまうことがあります(元々コンクリートに含まれている硫化物は無関係)。

前述の 4 つでコンクリートの病気のほとんどを占めています。調査会社の方の弁では、このような場所は日本中に無数に存在しているとのこと。今、走行している道路橋が崩落したらと想像すると怖くて走れません。日本の橋梁(2m 以上)70 万橋のうち、68%を市町村が管理をしていて、点検の予算もないのが実情です。トンネルも日本には 1 万本あります。どちらも 2033 年には、橋は 2/3 が、トンネルは半分以上が 50 年を経過して、劣化問題を無視できる状況ではなくなります。

2. 試料採取

現場のコンクリートにドリル(直径 1cm~2cm)で穿孔して、その排出粉を採取して試料とします。表面から 1cm、1cm~2cm、... と深さ方向に、最初の鉄筋の深さまで分取していきます。ただ 1か所の穿孔では、採取試料にばらつきが出やすいため、数か所から採取します。そんなに穴をあけてコンクリートは大丈夫なの？と感じますが、JISに決められている方法だと直径 10cm 奥行 20cm のコアを抜きますので、比較するとずいぶんダメージは小さいです。

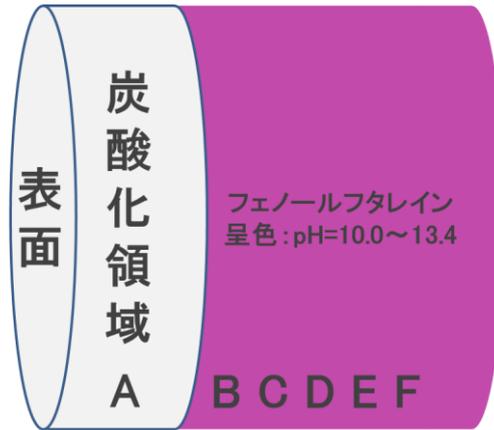
下の写真は、実験体から試料を採取したあとの穿孔痕です。少し数が多いですが、昇温脱離分析以外のテスト用にも採取したためです。下にある少し大きな円が、コア抜きをして補修した痕です。



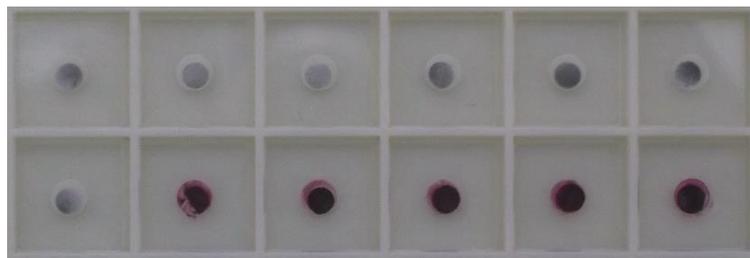
コンクリート構造物へのダメージを考えると、数が多くてもドリルの方がコアより優しい作業になります。

3. 中性化診断

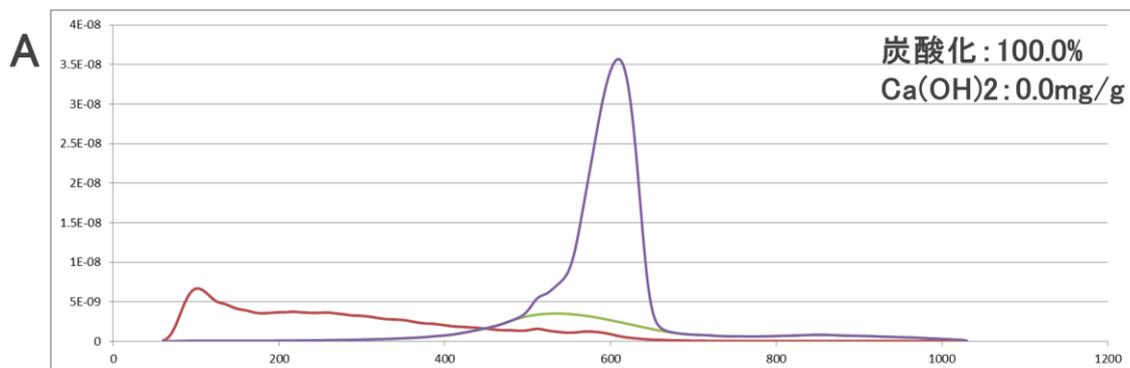
大気中の二酸化炭素の影響で、鉄筋周りのコンクリート中の水酸化カルシウムが完全に炭酸カルシウムに置換してしまうとトラブルが発生し始めます。ドリルで採取した粉体でも、抜き取ったコアでもフェノールフタレインを噴霧して呈色領域を調べます。鉄筋周りが赤くなれば OK との判断です。次の図は、コアにフェノールフタレインを噴霧したときのイメージ図です。大気に接触している表面側は、中性化しており呈色しません。(水酸化カルシウムが炭酸化することで中性化します。炭酸化＝中性化)



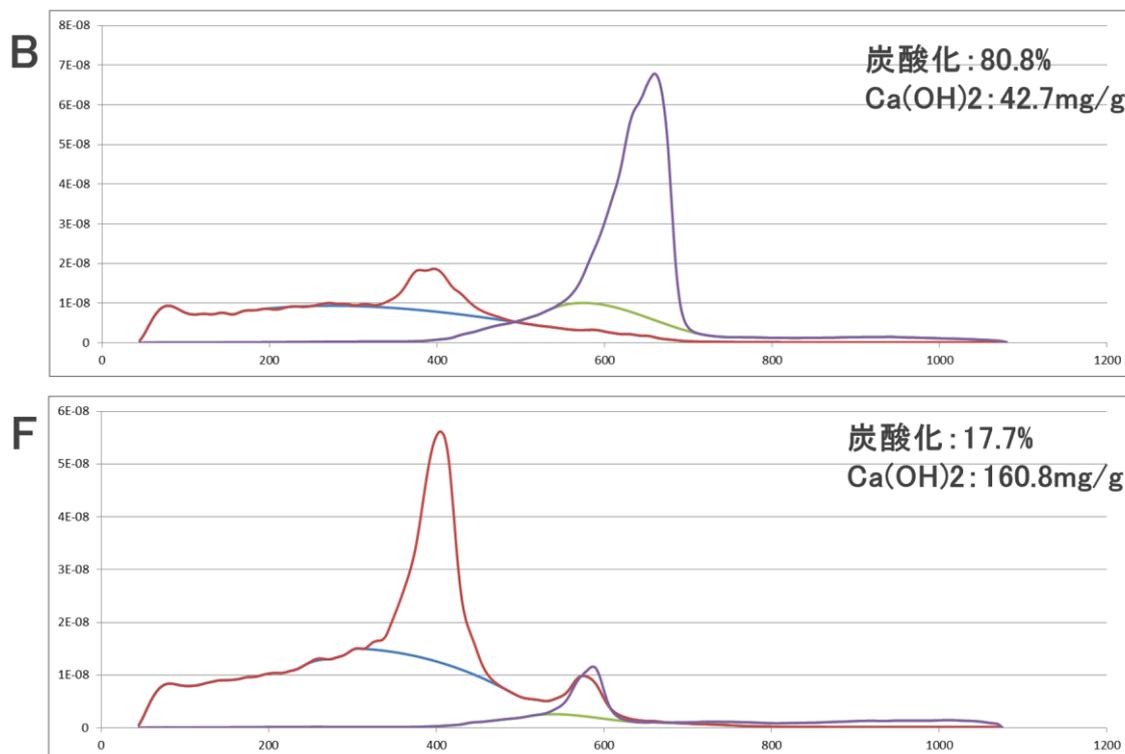
下の写真の上段は採取したドリル粉を成型したもの、下段は同じものにフェノールフタレインを滴下したものです。コンクリート最表面から 5mm 間隔で採取したときのデータです。最表面以外は



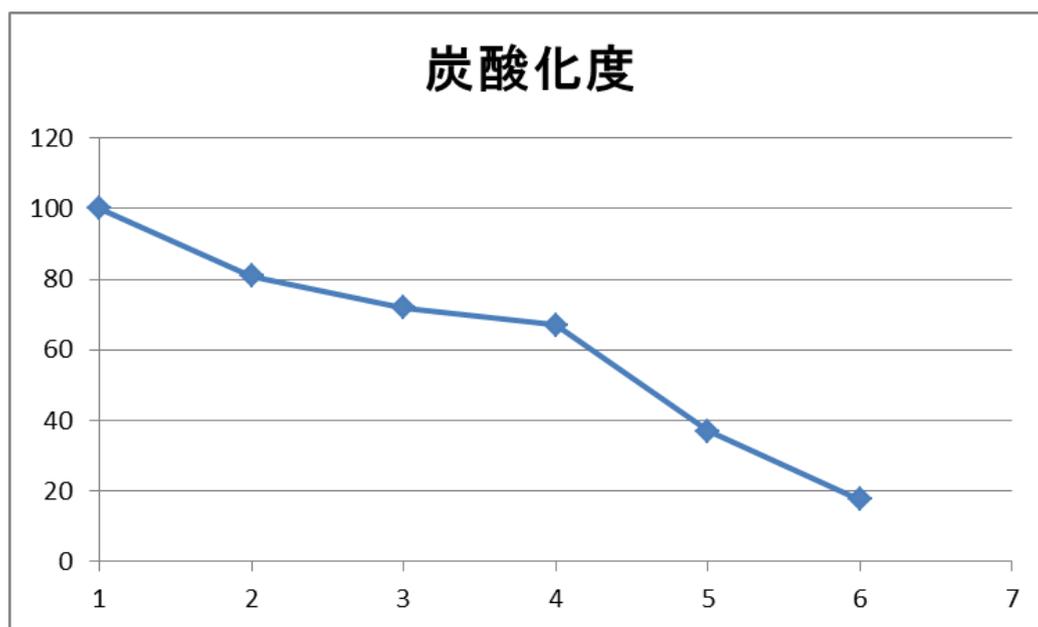
呈色・未呈色の境界で、いきなり炭酸カルシウムに置き換わっているわけでもなく、フェノールフタレインの呈色領域でも炭酸化は徐々に進行しています。この進行度合いを把握すれば、鉄筋周りが何時中性化されるのかを予測することができます。昇温脱離分析をすると、進行度合いを明確にすることができます。表面から 0-5mm : A、5-10mm : B、25-30mm : F のデータを示します。400°C 近辺の信号が水酸化カルシウムの熱分解による水の信号です。A では完全に炭酸化が進んで水の信号が存在しません。一方 600°C 近辺に炭酸カルシウムの熱分解による二酸化炭素の大きな信号が存在します。



フェーノールフタレインで呈色した領域Bでも、水の信号はほとんどなくなりかけています。炭酸化があまり進んでいない領域Fと比べるとよくわかります。



炭酸化の度合いを奥行方向にプロットしたのが、次のグラフです。このグラフから、鉄筋付近が 100%炭酸化してしまう時を計算して寿命予測します。



4. 塩害

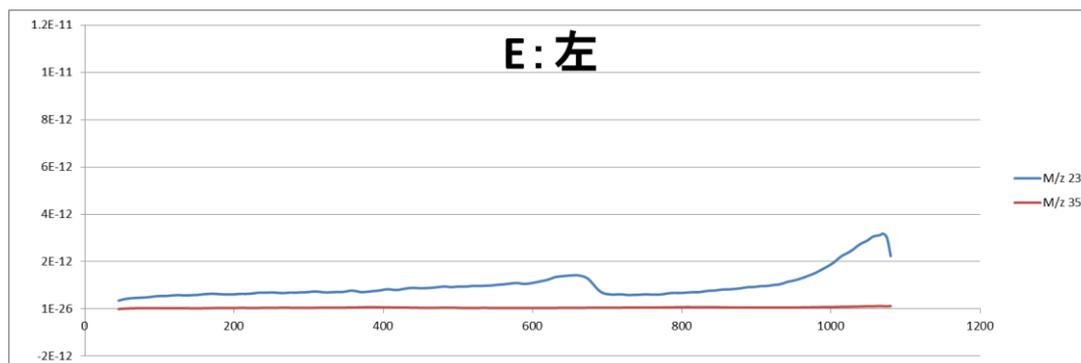
塩害は、塩化物イオンによって引き起こされます。したがって NaCl だけでなく、 CaCl_2 などによっても引き起こされますが、主には NaCl が問題になります。海で採取した砂を洗浄せずに用いたとき（山陽新幹線のトンネル崩落）、海風に含まれる塩分が絶え間なく供給されているとき、融雪剤を用いたときは NaCl が主因です。融雪剤も価格の点で NaCl が使われることがほとんどだそうです。

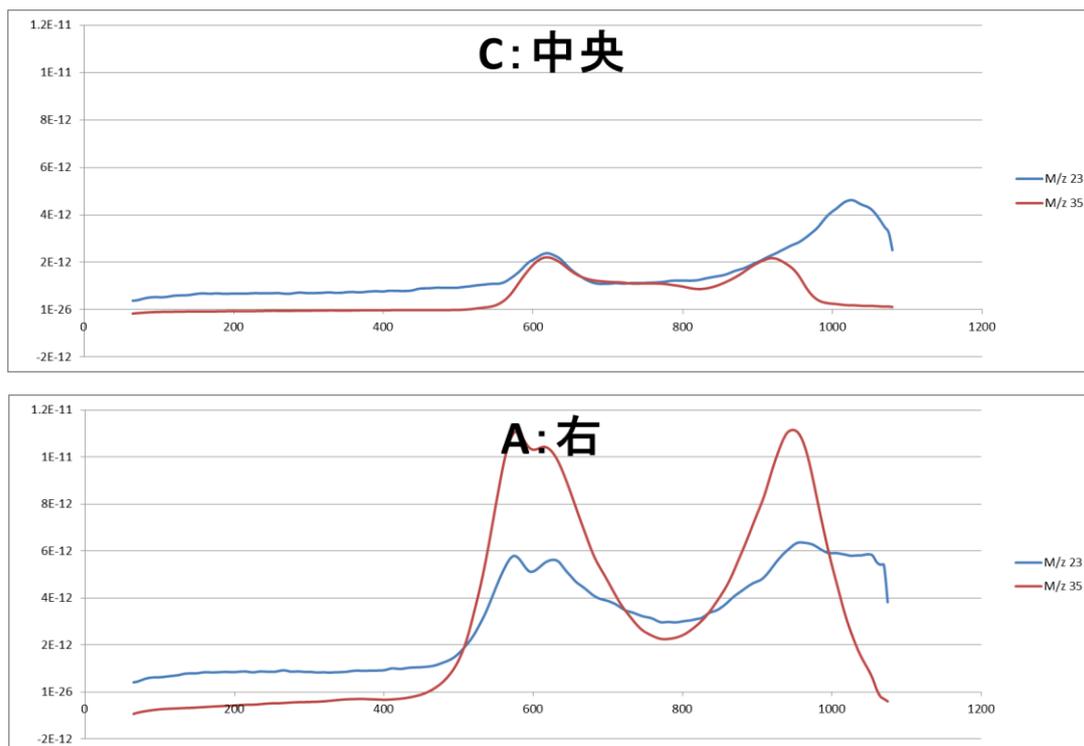
現在の現場では、採取したコアやドリル粉に硝酸銀溶液を噴霧して黒く呈色するかを調べます。そしてさらに詳しく調べるために、コアやドリル粉を硝酸に溶解して、溶液の条件を調整したのち硝酸銀溶液で電位差滴定します。酸で溶解すると、塩化物イオン以外の塩化物も溶液中に塩化物イオンとして溶け出してしまい、コンクリート中に存在していた塩化物イオンではなく総塩素量を測ることになってしまいます。それでは使えないので、コンクリート中の総塩素濃度が 1.2kg/m^3 （約 2.3t）以上存在したら、「鉄筋が錆びはじめるかな」という経験則でインフラの劣化を診断しています??。

次の写真の下段は、研究用セメントに NaCl を加えて疑似的塩害を発生させたコンクリートのドリル粉に硝酸銀溶液を滴下したデータです。左から右に向けて加える NaCl の量を増やしています。問題は NaCl 未添加の一番左でも、硝酸銀滴下によって呈色していることです。この情報で採取試料をフィルタリングすると、すべてが通過してしまい、全試料を電位差滴定するはめになります。



以下に昇温脱離分析の結果を示します。左、中央、右の試料の測定データです。Na と Cl の信号を表示しています。各グラフの低温側（左側）で、下にある曲線が Cl の信号です。添加量を反映したデータになっています。





JIS 法の電位差滴定を行えば、同様に完全定量が可能です。ただ結果を得るまでの時間が掛かります。昇温脱離分析の可能性は、コンクリート中の塩化物イオンとそれ以外の塩素を分離して測定できることです。塩素の左側の信号が NaCl の脱離温度と一致しており、これがコンクリート中では塩化物イオンとして存在している塩素と考えられます。現在検証実験中ですが、それが正しければ 1.2Kg/m³ という経験則を用いなくても診断できることとなります。1.2Kg/m³ 以下でも錆びたり、それ以上でも錆びなかったりする事実があるにもかかわらず、対応策が検討されていませんか???