

鉄筋コンクリート構造物の劣化と診断

鉄筋コンクリート構造物は、強度・コストの面から理想的な建材とされ、高度経済成長期に圧倒的にその数を伸ばした。空港、港湾、高速道路、高層ビル、大型の構造物が次々に建設され、その寿命は60年とも、100年とも言われていた。ところが、鉄筋コンクリートに絡んで予期せぬ事故が相次ぎ、「早期劣化」が主たる犯人とされている。この異常な「早期劣化」はどうして起こるのか、「劣化」を見破る方法はあるのかを探っていこう。

相次ぐコンクリート構造物の事故

百年近く経過してもビクともしない鉄筋コンクリート構造物がある。例えば、京都市の東に流れる琵琶湖第一疎水路に架けられたメラン式弧形桁橋は1903年の完成だが今だに健在である。東京御茶ノ水にある聖橋も1927年の完成で、神田川に端正な姿を映している。当然のことながら、鉄筋コンクリート構造物にも寿命がある。建設業界ではその寿命を65年程度と考えているという。

1999年6月27日、山陽新幹線福岡トンネル内で約200kgのコンクリート塊が落下した。走行中の「ひかり351号」を直撃し、屋根とパンタグラフを破壊した。JR西日本では急遽、トンネルの総点検を実施し、8月には「安全宣言」を出した。ところが、10月に入って同じ山陽新幹線の北九州トンネル内で再び約226kgの落下したコンクリート塊が発見された。この事態に驚いたJR西日本では広島～博多間で夜間の新幹線を運休し、全トンネル124本を対象に打音検査（ハンマーでコンクリートの表面を叩いて、音から異常を察知する検査法）を実施した。その結果、約4万箇所て異常を発見し、なかでも

剥落の可能性のあった約1万箇所のコンクリートを叩き落した。もしそのまま放置していたらと想像すると、背筋が寒くなる調査結果だった。この山陽新幹線トンネル事故によりコンクリート構造物の耐久性の問題がクローズアップされた。

振り返ってみれば、ここ数十年というものの、団地の壁が異常なひび割れや剥離を起こしたり、高速道路高架橋のコンクリート橋脚の一部が崩落したり、相次いで全国から鉄筋コンクリート構造物の異常やトラブルが報告されている。

施工後、10年から20年で剥離や崩落が起こるという事態は、明らかに異常である。事故が起きている鉄筋コンクリート構造物は、塩化物の総量規制が導入された1986年以前の高度経済成長期に建造されたものが大半を占めるという。この時期は、コンクリート需要の大幅な伸びにともない、それまでの河川砂石に加えて海砂や碎石などの骨材の多様化、またセメント製造方法の変更にもともなうアルカリ成分の多いセメントの使用、さらに突貫工事に伴う施工などにも問題があったとされている。この高度経済成長期に建設された鉄筋コンクリート構造物では、早期劣化現象の進行に十分留意が必要と思われる。

今、構造物の状況をきちんと把握できる劣化診断技術が必要である。まず、劣化症状やその発生のメカニズムを取り上げる。

損施工不良箇所から
高架駅からコンクリート片

輸省 3 社
JR 1 年、JR 下の歩道に

「安全神話」揺らぐ新幹線

コンクリ崩落計

運輸省



実際にコンクリートの剥落があった高架橋の橋脚

鉄筋コンクリート構造物の劣化原因

先の山陽新幹線トンネル事故で報道されたのが「コールドジョイント」である。本来、完全に一体であるべきコンクリート構造物の中に、何らかの原因で一体化していない部分が生じたとき、その不連続面を「コールドジョイント」と呼ぶ。例えば、コンクリートを流し込む場合、連続してコンクリートを流し込めず、先に流し込んだコンクリートが固まった後継ぎ足した場合、その部分が一体化しないとコールドジョイントとなる。山陽新幹線建設では、トンネル側壁部分と天井のアーチ部分を分けて工事せざるを得なかった。このため、必然的にコールドジョイントが形成され易い状況があったと思われる。もし、コールドジョイントができてしまうと、強度が落ちる上に割れなどが発生すると空気中の二酸化炭素や水の浸透により劣化し易くなる。先の山陽新幹線トンネルの点検では、確認されただけで93本のトンネルからこのコールドジョイントが見つかっているという。劣化の進行により、より強度が低下したコールドジョイント部分に、新幹線の走行時の振動と空気圧変動といった物理的要因が重なることによって先の剥落事故が起こったと推測されている。

山陽新幹線では、1996年3月に尼崎市内の高架橋床版から、1998年5月に山口県熊毛町付近でコンクリート塊が落下した。先にも述べたが全国から鉄筋コンクリート構造物の異常やトラブルが報告されている。このような鉄筋コンクリート構造物の耐久性の問題は、コンクリート材料や工法・施工などが密接に絡み合う化学的或いは電気化学的な現象に起因する。この劣化の原因として考えられているのが中性化、塩害及びアルカリ骨材反応である。

中性化

本来、コンクリートは強アルカリ性である。コンクリートの

アルカリ環境下では、鉄筋の表面に極薄い不動態皮膜と呼ばれる酸化膜（ $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ）ができる。この膜が鉄筋を守って錆の発生を抑えている。

しかし、コンクリートはその構成成分である $\text{Ca}(\text{OH})_2$ と空気中の CO_2 との間で反応し、 CaCO_3 を生成する。この炭酸化により、コンクリートは次第にアルカリ性から中性に変化する。この現象を「中性化」という。

この中性化は、本来どのコンクリート構造物にも起こる現象である。良質なコンクリートでは中性化は50年に10mm程度の速度で進む。中性化してもコンクリートの強度に変化は起きない。しかし、中性化が鉄筋の位置まで進行すると、鉄筋を守っていた不動態皮膜が破壊され、多数のピットが形成され、鉄筋が錆び始める。中性化にともなう錆は鉄筋に対して約2.5倍の体積となる。その膨張による圧力がコンクリートにひび割れを発生させる。鉄筋の錆が進むと表層部のコンクリートは剥離、落下する。

通常、鉄筋表面までのコンクリートの厚さ(かぶり)は20mm以上あるので、そこまで中性化が進むのに100年以上かかり、計算上は経済的耐用年数内に鉄筋が腐食することはない。しかし、何らかの原因によりかぶりの薄い構造物や低強度の低品質のコンクリートの場合はこの限りではない。例えば、工事現場で生コンクリートを扱いやすくするために過剰の水を加えたり、コンクリートを打ち込むときに十分に締め固められていなかったりした低品質コンクリートでは、空隙が増加し、中性化の進行は早くなる。こういった事例では20年から30年後には中性化が鉄筋に到達し、コンクリートのひび割れ、剥離が始まってしまうのだ。

塩害

コンクリートの中に約0.02mol/lの限界値以上の塩素イオンが存在すると、中性化していないコンクリート環境下でも鉄筋表面の不動態皮膜が破壊され、鉄筋の腐食をまねく。これを「塩害」と呼ぶ。

例えば海岸に隣接したり、凍結防止剤が使用される道路などの場合には、構造物の完成後に外からの塩素イオンの浸入があらかじめ予想できるので、かぶりを厚くしたりするなどの対策を立てることが可能だ。

問題となるのはコンクリートの中に最初から塩素イオンが含まれる場合である。コンクリートの骨材に使う砂は川砂が最も優れている。しかし、大きな川が少ない西日本では入手が困難であり、海砂が多く使われる。このときに十分に洗浄されずに使用されると塩害の原因となる。山陽新幹線建設には多量の海砂が使われている。

塩素イオンの存在による塩害は、基本的には中性化とは無関係に電気化学反応により水と酸素が存在すれば発生する。

Column

コンクリートの耐久性

コンクリートはセメント、水、細骨材（川砂、海砂）、粗骨材（砂利、碎石）、さらに打設地の環境に応じて混和剤（AE剤、減水剤）や混和材（フライアッシュ、高炉スラグ）を練り混ぜて作られる。素材配合時には、コンクリートの強度・耐久性、そして施工時の作業性（ワーカビリティ）が留意される。コンクリートの強度を高めるためには水セメント比*を低くすることが有効である。しかし、いずれもコンクリートの流動性を低下させ、作業性を悪化させる。作業性を高めようと打設時に必要以上に加水すると、コンクリート強度の低下のみならず、固化後の空隙増加の原因となる。

元来、コンクリートにはセメントの水和反応に必要な水量以上の水が含まれている。これが自己乾燥などにより多数の空隙となり、コンクリートは多孔質な材料となる。空隙には打設時に混入した空気泡、充填不良箇所など施工に関するものも含まれる。空隙はひび割れなどの劣化原因となるので、コンクリートの耐久性はこの空隙に左右されると言っても過言ではない。コンクリートの空隙、ひび割れを完全になくすことは、

現在の技術では不可能とされているが、少なくとも加水など異常な劣化につながる人為的な要因を除くことはできる。

*水セメント比：単位水量／単位セメント量



コンクリート組織内部の空隙

すなわち、内部の鉄筋にも起こるのだ。さらに、中性化は塩素イオンの存在と密接に関係し、塩害を誘発、加速させる。

塩害による鉄筋の錆は、マグネタイトが主体であり中性化の錆と比較して膨張比率が低い。さらに、コンクリート内部という環境で酸素や水の供給に制約があるため、局所的に鉄筋に形成されたアノードとカソード間の電位差が非常に高くなり、腐食が深部に向かって加速度的に進む。このため、塩害を受けた鉄筋が著しい断面欠損を起こし危険な状態にあっても、コンクリート表面のひび割れは少なく、外からは分かりにくいという特徴を持つ。

アルカリ骨材反応

コンクリート中のアルカリ水溶液と骨材中のシリカ成分が反応することで溶解する現象を「アルカリ骨材反応」という。アルカリシリカ反応で生成されるアルカリシリカゲルは水を吸収して膨張し、コンクリート自体を変形、ひび割れを起こす。コンクリート内部に大量の水分を含んでいる場合は手の施しようがなく、「コンクリートのがん」と呼ばれるゆえんである。

この反応を引き起こす主な要因は、1) アルカリ溶液に解け易い非晶質シリカ（結晶質シリカと比較して10倍以上溶解する）が多く含まれる骨材の使用、2) 過剰なアルカリ成分を含むセメントの使用、3) 塩分を含んだ骨材使用などで、それら要因の複合が原因として挙げられる。

高度経済成長期以後のコンクリート需要の大幅な伸びは、膨大な骨材量を必要とした。このため、骨材供給源も多様化し、非晶質シリカなどアルカリ反応性鉱物が少なからず含まれた。このような骨材を使用したコンクリートにおいて、アルカ

リ骨材反応を引き起こさせたのが、過剰なアルカリ成分を含むセメントであり、塩分を含む骨材の使用である。

1960年代から70年代にかけて「乾式方法」と呼ばれる新しいセメントの製造方法が世界中に普及した。熱効率が高く、公害が少ないという一見理想的な方法だったが、結果的にアルカリ成分の高いセメントを生産することとなった。さらに、塩分はコンクリート内のアルカリ性を高める作用をし、これらが複合してアルカリ骨材反応を増やす結果となった。現在ではコンクリート中のアルカリや塩分の総量が規制されているが、規制以前に作られた構造物については内部に劣化原因があり、近年の構造物の異常な早期劣化の大きな原因となっている。

鉄筋コンクリート構造物の劣化診断技術

このように劣化にはさまざまな原因があるが、的確な対策をとるためには、構造物の劣化の種類や劣化状況を正確に把握する技術が求められている。

鉄筋コンクリート構造物の劣化状況を把握する一般的な方法に「目視検査」と「打音検査」がある。「目視検査」は文字通り外観から構造物の劣化現象を見つける方法であり、全ての調査はここから始まる。コンクリート表面に現れた亀裂の数、深さから劣化程度を推定するものである。「打音検査」はハンマーでコンクリートを叩き、叩いた際に発する音が正常部の「カンカン」という澄んだ音に対し、「ボコボコ」という異なった音を発すると、そこが劣化の進んでいる部分と判定する方法である。現在、どちらの方法も実用面から最も信頼できる診断法とされているが、人間の目と耳による感覚検査作業の

ため時間と経費がかかる。その上、診断士の経験に頼る部分
 が大きいと、個人によって誤差が生じやすいという課題がある。

こうしたことを解決し、正確に劣化を診断するために様々な
 研究が進められてきた。次に、構造物の一部を採取して分析
 する破壊検査(コア採取診断)と構造物をそのままの状態
 で診断する非破壊検査について見てみよう。

破壊検査

破壊検査は構造物から円柱状に試料をくりぬき、劣化の原
 因や進行を分析、診断する方法である。

小林一輔教授(現：千葉工業大学)は電子線マイクロアナ
 ライザー(Electron Probe Micro Analyzer：EPMA)により、コ
 ンクリートの試料の面分析に成功し、元素分布を画像として
 とらえた。すなわち、この装置を使用することで、塩素、硫黄、
 炭素、ナトリウム、カリウムなど劣化に関係する元素の分布が
 わかる。また塩素が骨材に使用された海砂に含まれていたもの
 なのか、外部から入りこんだのか、橋脚や床版の鉄筋に塩素が及
 んでいるのかも判断可能となった。

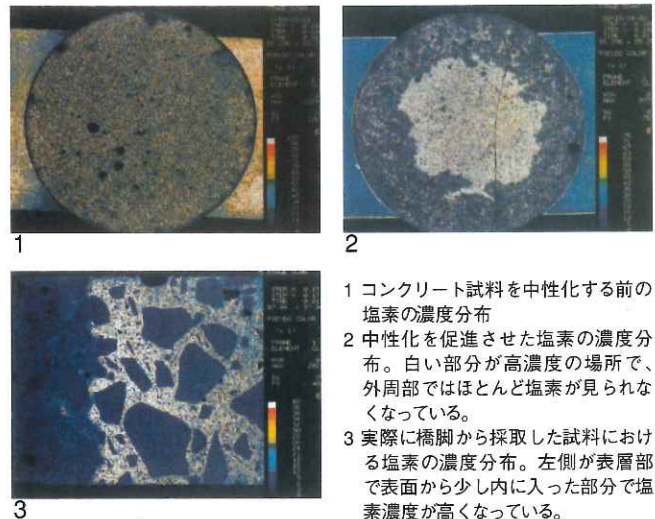
こうした分析値を得ることにより、従来予測もしなかったこ
 とも明らかになってきた。中でも炭酸化により元素が移動する
 というのは、画期的な発見であったという。炭酸化は、前にも
 触れたように中性化によって鉄筋の腐食に関与するだけでなく、
 内部に存在していた塩素などの腐食因子をイオンに解離
 し、その移動に関与することも判明した。

これまででは、劣化のメカニズムは分かっても現実にはこの橋は
 大丈夫か、どの程度の劣化が起こっているかについてはほとん
 ど調べようがなかった。しかし、コンクリート試料断面の劣化
 に関係する元素分布を得ることにより、コンクリート構造物の
 中で何が起きているのか理解できるようになったのである。

非破壊検査

非破壊検査の試験方法は数多くあるが、新しい試験法の開
 発も盛んに行われている。

従来、橋脚、床版などの目視検査では、検査対象に接近
 するため足場を組み、0.2mm程度の亀裂の一つ一つをチョー
 クでなぞり、カメラで撮影するなどして最終的に全体の亀裂図
 を作りあげた。これを過去のデータと照らし合わせ、亀裂の数
 の増加や進展の方向などから劣化状況を分析、診断していた。
 最近、500万画素のデジタルカメラとパソコンを組み合わせた
 画像診断支援システムが開発された。高精度のデジタルカメラ
 で撮影した画像から容易に損傷図が作成でき、大幅に検査効
 率を高めた。さらに、高解像赤外線カメラを組み合わせたシス
 テムは、コンクリート内部の状況によって生じる温度差から表
 層の剥離、材料劣化、漏水などの状況を複合的に判断可能
 としている。



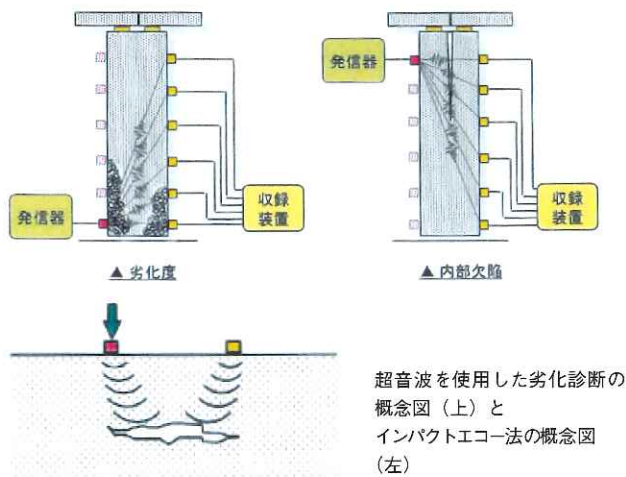
1 コンクリート試料を中性化する前の
 塩素の濃度分布
 2 中性化を促進させた塩素の濃度分
 布。白い部分が高濃度の場所で、
 外周部ではほとんど塩素が見られな
 くなっている。
 3 実際に橋脚から採取した試料におけ
 る塩素の濃度分布。左側が表層部
 で表面から少し内に入った部分で塩
 素濃度が高くなっている。



デジタルカメラを使用した画像診断システム例。赤い部分が0.2mm以上のひび、
 青い部分がそれ以下のひびである。

また、音波を利用することで、視覚ではとらえ難い劣化やひ
 び割れの進行状況を推定するシステムも開発されている。これ
 は構造物の外側に三種類の音響センサーを取り付け、それぞ
 れの波形や周波数、伝搬時間などを分析するという複合型試
 験システムである。一つ目は「超音波法」で、健全部を通過
 した場合とひび割れ部を通過した場合とで超音波の伝搬速度
 と波形が異なることを利用し、表面ひび割れの深さを測定する
 もの。二つ目が「アコースティック・エミッション(AE：部
 材のきずそのものが発生する弾性波)法」である。AEを収録、
 解析することにより、ひび割れの種類(引張型、せん断型)、
 劣化度の識別を行うものである。三つ目が「インパクトエコー
 法」である。超音波より減衰が少ない衝撃弾性波を構造物に
 入力することにより、超音波では検出できない内部欠陥の位
 置、大きさを把握するものである。これら3種類のデータを総
 合的に解析することにより、ひび割れの位置、大きさ、深さ、
 進行状況などを解析するもので、シンガポールの淡水化プラ
 ントで大規模な実証実験が始められている。

他にも打音検査の代替機として、ハンマーモジュールとセン
 サーモジュールを装備した診断テストも実用化されている。ス
 ティックの先に設けた診断テストをコンクリート表面にあて、
 ハンマーで叩いた音の違いをセンサーが検知する。20cmの深
 部まで剥離検出ができ、検査結果の個人差、周囲の騒音によ
 る影響など打音検査の欠点をカバーできるという。



以上のように、多くの非破壊検査法が開発されており、いづれもひび割れの位置、大きさ、進行状況などの状態を知るのに有効である。しかし、破壊試験の補助的役割の域を脱していない。今後の研究は、チャープパルス圧縮技術など信号処理による診断精度のアップや劣化状況の把握に向け、研究開発が進められて行くであろう。

劣化診断後の対策

ここに紹介した劣化診断技術は構造物の健康診断のようなものである。当然のことながら、患部の発見が主な仕事であって、それによって健康が保障されるわけではない。しかしいくつかの検査手段によって、構造物の目に見えない劣化が把握できるようになった意味は大きい。早期に症状を把握することで、有効な対策が立てられる。対策例として、症状が軽く鉄筋が腐食するに至っていない場合には、鉄筋コンクリート外部からの塩分、水分などの侵入を防ぐために、コンクリート表面を樹脂でコーティングしたり、ひび割れ部に直接樹脂を注入するといった処置が施される。中性化や塩害で内部の鉄筋の腐食が進んでいる場合は、鉄筋周辺部までのコンクリートを取り除き、現れた鉄筋をブラストして錆びを落とす。取り除いたコンクリートの替わりには、良質なコンクリートあるいはポリマーコンクリートなどの補修材を使用する。さらに鉄筋自体をエポキシ樹脂等で被覆すれば、補修効果は大きい。鉄筋の断面欠損が激しい場合は、新しい鉄筋を欠損部に沿わせ補強したり、欠損部と完全に交換する方法もある。アルカリ骨材反応などで既に内部劣化がかなり進んでいるものは、コンクリートの打ち直し、あるいは建て直しまで視野に入れなければならない。しかし、最近では、アルカリ骨材反応抑制材の開発や電気分解で塩分をコンクリート表面に集めて取り除く方法も研究がすすんでいる。こうした補修などで事故を未然に防ぐことができ

Column

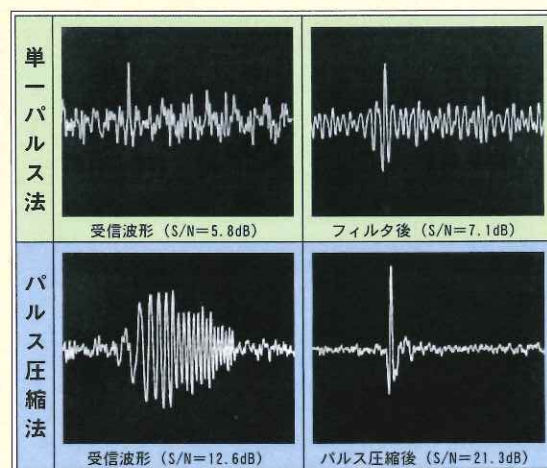
チャープパルス圧縮技術

超音波探傷の課題の一つとしてS/N比(信号対雑音比=Signal/Noise)の向上がある。超音波探傷の場合、ランダムに発生するノイズは避けることができず、これが検出能の限界を決めていた。

そこで開発されたのがチャープパルス圧縮技術である。これは従来送信信号として用いられていた単一パルス波に代わり、鳥の鳴き声のように周波数が変わっていく数サイクルのパルス波(チャープ波)を用い、エコー受信時に送信信号との相関を演算してパルス幅を圧縮する信号処理方式である。長いパルス幅の送信信号を用いることにより送信パワーを高め、受信時の相関処理によりノイズを抑圧した結果、S/N比を3~10倍と飛躍的に向上させることに成功した。

これにより探傷の精度、自動化率アップが可能となり、厚板、レールの内部探傷、溶接管の溶接部の探傷に広く導入されつつある。

将来的には、外来電気ノイズが低減できる特徴を活かして、コンクリート構造物などの劣化診断にも応用される可能性があるという。



るばかりでなく、併せて補修効果のほどをフォローすることもでき、建築基準の見直しを検討する際の基礎データも収集できる。

鉄筋コンクリート構造物が作られるようになって百年以上が経つ。これまでに、特に高度経済成長期以降膨大な鉄筋コンクリート構造物が建設されてきた。今、主に日本の高度経済成長期に建設された鉄筋コンクリート構造物が早期劣化の問題を抱え、維持・補修に大きな関心がもたれるようになった。コンクリート構造物の劣化診断技術は時代の要請を受けて、さらなる進歩が期待される。

参考文献

- 「コンクリートが危ない」 小林一輔(岩波新書)
- 「コンクリートのはなし」 大成建設技術開発部(日本実業出版社)
- 「コンクリート構造物の非破壊検査」 小林一輔、魚本健人ら(森北出版)

取材協力・写真提供

- 千葉工業大学小林一輔教授、(社)日本非破壊検査協会、三菱電機(株)、三菱重工業(株)、三菱重工工事(株)、(株)ニコン技術工房、(株)太平洋コンサルタント、NKK