

コンクリート構造物の耐久性診断技術 —現状と課題—

Durability Diagnosis of Concrete Structures
— Present Status of Diagnosis Technology and Problem —

小林 一 輔*
Kazusuke KOBAYASHI

アルカリ骨材反応や鉄筋の塩分腐食はコンクリート構造物の寿命を著しく縮める一種の病気であるが、その症状が外部に現れるのは相当に病状が進行してからであり、その時点に何らかの対策を講じようとしても手遅れとなる。“コンクリート構造物の耐久性診断”とは、外見上は全く健全な状態の時点において、寿命を、要因を宿しているか否かを診断し、破局を未然に防止しようとするものである。

1. は し が き

鉄筋の塩分腐食やアルカリ骨材反応などに起因するコンクリート構造物の早期劣化が、わが国においても全国的な規模で発生していることが明らかにされたのは数年前のことであった。コンクリート構造物は元来 70 年から 100 年の供用に耐えるのが正常な姿であるが、素材の品質に欠陥があったり、設計どおりの施工が行われなかった場合に劣化は急速に進行し、早ければわずか 10 年で補修不能に近い状態になることが実証されたのである。

この問題はマスコミによって“コンクリートの耐久性神話の崩壊”などと報道され、コンクリートそのものの信頼性に疑問を投げかけることになった。しかし、コンクリート構造物の早期劣化問題が表面化して以来の経過を振りかえてみると、この“コンクリートの耐久性神話の崩壊”という言葉ほど多くの人々にコンクリートの耐久性に関して誤った概念を与え、または一部の人々に悪用された言葉はないように思われ、誤った概念とは、“コンクリートの耐久性がすぐれているというのは実は作り話であって、本来はひびわれなどが生じやすい耐久性の劣るものであった”ということであり、この論法を押し進めると、鉄筋コンクリートの建物が建築後 10 年そこそこで建て替えを要するほど劣化してもそれはあくまでも“通常劣化”であって“異常な早期劣化”ではないことになる。このような誤った概念を極めて巧妙な方法で意図的かつ組織的に一般化しようとする試みが行われているのが建築の分野である。

コンクリート構造物が 10 年や 20 年で外観に異状が認められるまでに劣化するのは、構造物がその製造の時点において何らかの欠陥を内蔵しているからである。たと

えば許容量をこえる塩化物を含む海砂や混和剤、アルカリ量の多いセメント、反応性珪物を多量に含む骨材、孔隙の多いセメント硬化体組織、施工不良による空洞、かぶり不足などである。

このような欠陥を有するコンクリート構造物が増加した原因については、すでにその背景にまで踏み込んだ指摘が行われているが¹⁾、これらを除去する具体策についての検討も関連学協会、行政官庁および関連業界において活発に進められている。すでにこれらを盛り込んだ学会規準の制定や JIS の改正が行われ、関係省庁の通達なども出されている。規準の制定や通達のみでコンクリート構造物の欠陥が本当に除去されるのかという疑問は残るにしても、これから新しくつくられるコンクリート構造物の耐久性がかなり正常なレベルに近づくことは間違いないところであろう。

そこで問題になるのは高度成長時代を頂点として過去十数年間²⁾にわたり建造された大量のコンクリート構造物の体質である。この間につくられたコンクリート構造物は前記の欠陥を程度の差こそあれ、内蔵している可能性が高いからである。

コンクリート構造物がその内部欠陥によって早期劣化を生ずる場合、外部から何らかの変状が認められる時期は特別の場合を除き、10 年から 15 年程度の場合が多いが、問題はこの時点において劣化はもはや手がつけられない状態にまで進行していることである。すなわち、応急的な補修を行っても劣化の進行を阻止することは不可能である。このことはこれまでの国内におけるアルカリ骨材反応によって劣化したコンクリート構造物の補修状況をみれば一目瞭然である。いつかは補修を繰り返し、莫大な維持費を投入して延命を図るか、とりこわして新しく作り替えるかの決断を迫られる日が来るのである。

*東京大学生産技術研究所 第 5 部

この問題は橋梁などの公共構造物の場合はまだしも、分譲マンションなどの個人財産の場合には深刻である。

ここで重要になってくるのがコンクリート構造物の耐久性診断である。すなわち、外観上は何の変状も生じていない時点においてコンクリート構造物にどのような欠陥が存在するかをチェックし、その結果に基づいて耐久性の予測を行うとともに、構造物の保全に関して最も適切な処置を講じようとするものである。

このようなコンクリート構造物の耐久性診断の技術や予測の手法はいまだ確立されていないが、その重要性にかんがみ、筆者の研究室では化学、金属、地質鉱物などの関連領域の研究者の協力のもと、昭和 61 年度より認められた特別設備費による各種設備を利用して上記診断技術や予測手法を開発する研究を進めている。

2. コンクリート構造物の耐久性を損なう諸要因

コンクリート構造物の早期劣化をひきおこす原因を大別すると、1)アルカリ骨材反応や海砂による鉄筋の塩分腐食に代表されるような使用材料の品質に起因するもの、2)海水飛沫や空気中の二酸化炭素などのような外部からの腐食因子の拡散・浸透に起因するもの、3)過大な交通

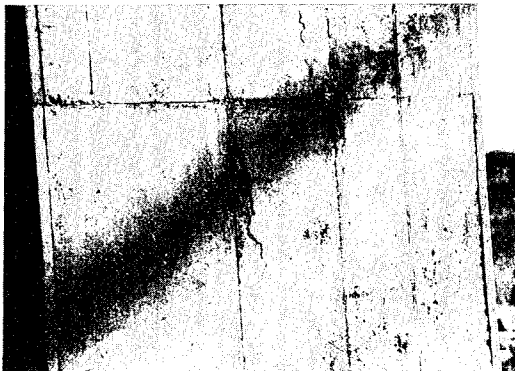


写真-1 アルカリ骨材反応と海砂による鉄筋の塩分腐食の二重苦に悩む山陽新幹線の高架橋

荷重のくり返しによるもの、となる。耐久性を無視した設計と施工不良によって生じた構造的な欠陥は上記の諸要因による早期劣化を加速させる。

実際に早期劣化をひきおこしているコンクリート構造物を調べてみると、以上の諸要因が単独で作用しているケースは少なく、2つまたは3つの要因がかかわる複合劣化をおこしていることが多い。

たとえば1)の要因のみに限定した場合でも、アルカリ骨材反応によるコンクリートの劣化と海砂の使用による鉄筋の塩分腐食が同時に進行している例は西日本を中心として多くみられるが、1)または2)と設計・施工不良の組み合わせの例は枚挙にいとまがないほど多い。

3. 使用材料の品質が関係する早期劣化

3.1 骨材が関係する早期劣化

図-1に示すような反応物質を含む岩石を骨材とした場合にアルカリ骨材反応を生ずる恐れがあることはよく知られている。また、アルカリ骨材反応以外の化学的・物理的作用によってコンクリート構造物に早期劣化を生じさせる鉱物のうち、主なものを示すと以下のとおりである。

- 含鉄ブルーサイト： $(Mg_{10}Fe_2^{2+})(OH)_{24}$
- ローモンタイト： $CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 4S_2O_2 \cdot 4H_2O$
- モンモリロナイト： $[E_{0.33}](Al^{5/3}Mg^{1/3})[Si_4]O_{10}(OH)_2 \cdot NH_2O$
- パイライト： FeS_2

わが国でアルカリ骨材反応をおこしている岩石は安山岩、チャート、珪化作用の進んだ粘板岩や砂岩、シリカ質石灰岩などが多いが、ドロマイト質石灰岩中のドロマイトに起因するいわゆるアルカリ炭酸塩反応による劣化

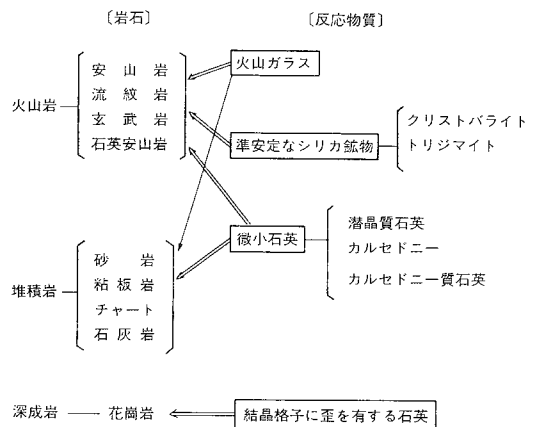


図-1 アルカリシリカ反応に関与する反応物質とこれらを含む主要な岩石

事例はまだ報告されていない。

アルカリ骨材反応以外の機構によってコンクリートに早期劣化させる鉱物として注目を要するのは、粘土鉱物の1種であるモンモリロナイトである。モンモリロナイトは風化作用や熱水変質作用を受けた各種の火山岩や堆積岩中に存在するので、これが骨材として用いられる岩石中に含まれている可能性は比較的高い。モンモリロナイトが骨材中に存在すると、乾湿のくり返しにともなってモンモリロナイトが膨張・収縮するので、コンクリート

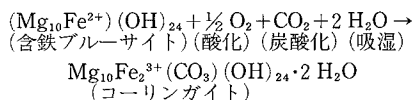


写真-2 関西の橋梁に発生したポップアウト現象

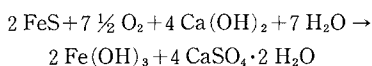
トに有害な膨張・収縮の体積変化を起こさせるのみならず、夏期にはポップアウト現象、冬期には凍結融解作用によってコンクリートの劣化を促進することが指摘されている²⁾。モンモリロナイトによるコンクリート構造物の劣化事例は最近、わが国においても報告されている³⁾。

沸石類の1種であるローモンタイトは安山岩中の角閃石、輝石あるいは長石を交代したり、砂岩中の膠結物を交代して存在するほか、岩石の種類を選ばずこれらの割れ目を充填して脈状に生成する。骨材中にローモンタイトが存在すると乾湿のくり返しによってこれが粉化して骨材が崩壊し、コンクリートは表層部から崩壊が進行することになる。ローモンタイトはまた乾湿のくり返しにともなって体積変化するのでコンクリートにポップアウト現象を生じたり、またこれが10%以上も存在すると凍結融解作用によって劣化が著しく促進される²⁾。わが国でもすでに2、3の劣化事例が発生している³⁾。

含鉄ブルーサイトを含有する蛇紋岩質骨材は以下のような反応によってコーリングサイトを生成し、その過程で体積膨張をとまうのでコンクリートにポップアウトやひびわれを発生させる。



これによる劣化事例もすでにわが国で発生している⁴⁾。pyriteに代表される硫化鉄もコンクリート中で次のような反応によって石こうを生成し、またこれがセメント中のC₃Aと反応してエトリンジャイト(C₃A·3CaSO₄·32H₂O)を形成するのでコンクリートは膨張し、ポップアウトを生じさせるといわれているが、まだ



具体例は報告されていない。

以上で述べてきたような鉱物のみがコンクリートに劣化を生じさせるわけではない。今後の調査が進展するに

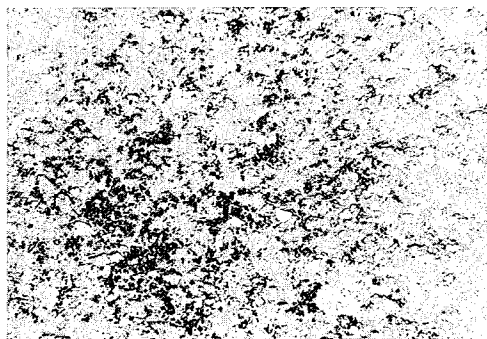


写真-3 ローモンタイトによる表層劣化を生じている埼玉県のある分譲住宅の屋根板

表-1 市販のある減水剤中における塩化カルシウム量(%) (砂の絶乾重量に対する重量百分率)

項	目	普通型減水剤		早強型減水剤	
		CaCl ₂ ·2H ₂ O として	NaCl 換算	CaCl ₂ ·2H ₂ O として	NaCl 換算
I	海砂問題が厳しくなってから以降	0.06	0.05	0.18	0.14
II	海砂問題が厳しくなる以前	0.2	0.16	0.5	0.4
III	海砂中の塩分に対する学会の規制値 (NaCl)	土木学会 RC 示方書 0.1%、日本建築学会建築工事仕様書 0.04%			

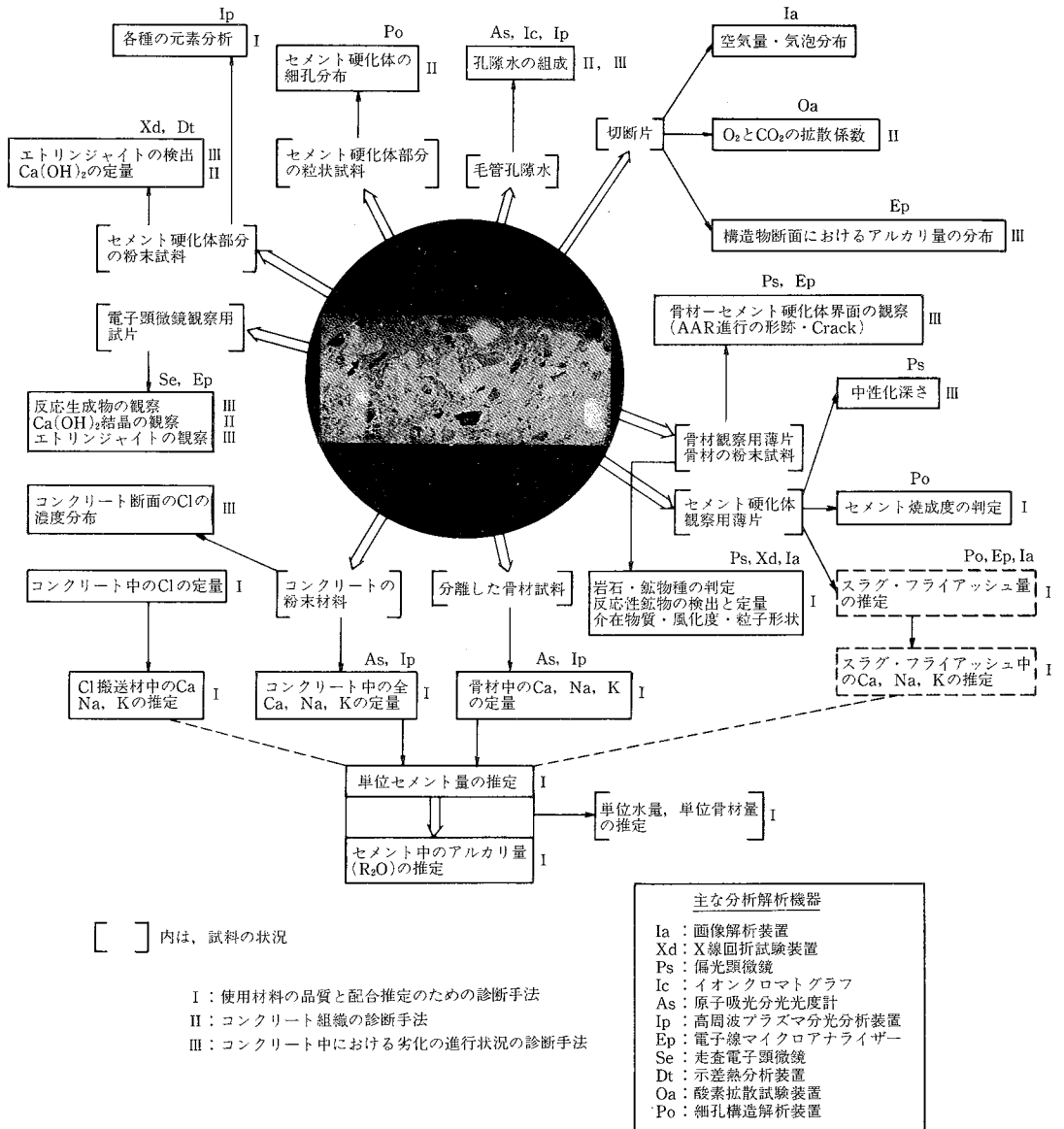


図-2 コンクリート構造物から採取したコアによる耐久性診断の手法

従ってさらに新しい有害鉱物が明らかにされる可能性がある。海砂のように塩化物を含む骨材の使用は鉄筋を腐食させるばかりではなく、アルカリ骨材反応も促進する。

3.2 セメントならびに混和材料が関係する早期劣化

セメントが関係する早期劣化の中で最も一般的なものはアルカリ量の多いセメントによるものであろう。アルカリ分の多いセメントの使用はただ単にアルカリ骨材反応をひきおこすのみでなく、強度の低下を招いたり⁵⁾⁶⁾、異常凝結を生じたり⁷⁾、硬化後に硫酸塩膨張をおこす⁸⁾。

さらに異常凝結は練り混ぜ水の過剰添加などを誘発して低品質のコンクリートをつくる原因にもなる⁹⁾。

混合粉碎方式によって製造された高炉セメントは一般にクリンカーのみが過粉碎されるのでこれを用いたコンクリートの水和熱が高くなり、大断面の構造物では温度応力によるひびわれを発生させるトラブルを生じやすい。

3.3 混和剤が関係する劣化要因

この30年来、減水作用を有するコンクリート混和剤はごく一般的に使用されてきたが、この数年前までは凝結

遅延を防止する目的でかなり多量の塩化カルシウムを添加したものが比較的多く使用されてきた。表-1はその量が除塩を全く行わない海砂を用いた場合に匹敵する場合もあったことを裏付けている。より極端なケースとしては寒中工事にさいしてセメント重量の2%もの塩化カルシウムが使用されたこともある。このような塩化物の導入が鉄筋などのコンクリート中の鋼材の腐食を促進することは論をまたない。

減水剤, AE 剤, AE 減水剤, 高性能減水剤 (流動化剤), 防せい剤, 急結剤などの混和剤の多くは有機スルホン酸やカルボン酸等の金属塩であり, 塩を構成する主体はアルカリ金属である。すなわち, これらはコンクリート中のアルカリを増してアルカリ骨材反応が発生する条件下ではこれを促進するように作用する。

4. 耐久性診断の手法と課題

4.1 耐久性診断に必要な条件

すでに述べたように, コンクリート構造物の耐久性診断は, その外観に何らかの変状が認められるような時点になってから行うものではない。見たところ全く健全な状態のときに実施してこそ耐久性診断の意義がある。

すべてのコンクリート構造物について耐久性診断が必要であるということではない。診断を要するのは高度成長期以降この1, 2年前までにつくられたコンクリート構造物である。

耐久性の診断にあたっては図-2に示すように構造物からコンクリート片を切り取って試料とし, これに種々

の処理を加えて分析や測定を行って耐久性に関する情報を引き出す場合と, 図-3に示すように各種の非破壊試験の手法を駆馳してコンクリート内部の状態を探る場合の2本立てで行われる。

前者は使用材料の品質に起因する劣化の可能性および外部からの腐食因子の拡散・浸透に起因する劣化の可能性を診断する場合に適用され, 後者は設計や施工不良に基づく欠陥の検出やくり返し荷重による疲労寿命の推定に利用される。人間ドックの検査では, 前者が尿や血液を採取してこれを分析する手法に相当し, 後者が聴診器による診断とかレントゲン検査に対応する。

4.2 アルカリ骨材反応をおこす可能性の診断

a) 概要

コンクリート構造物の耐久性を損なう最も厄介な要因はアルカリ骨材反応と鉄筋の腐食である。診断の対象とするコンクリート構造物がアルカリ骨材反応をおこす可能性があるか否かを調べるためには, 先づボーリングによってコアを採取し²⁾, これから薄片を作製して偏光顕微鏡観察により, 反応性珪物の有無を調べる。

もし, 問題になるような量の反応性珪物が骨材中に存在することが判明した場合には, コンクリート中に含まれているアルカリの分析を行うことになる。このさいに塩化物の分析も同時に行う必要がある。さて, アルカリ分が多く含まれていることが明らかになった場合には, 水の存在下においてアルカリ骨材反応が進行する条件がそろっていることになるので, すでに反応がはじまっているかどうかを偏光顕微鏡や分析電顕によって調べる。

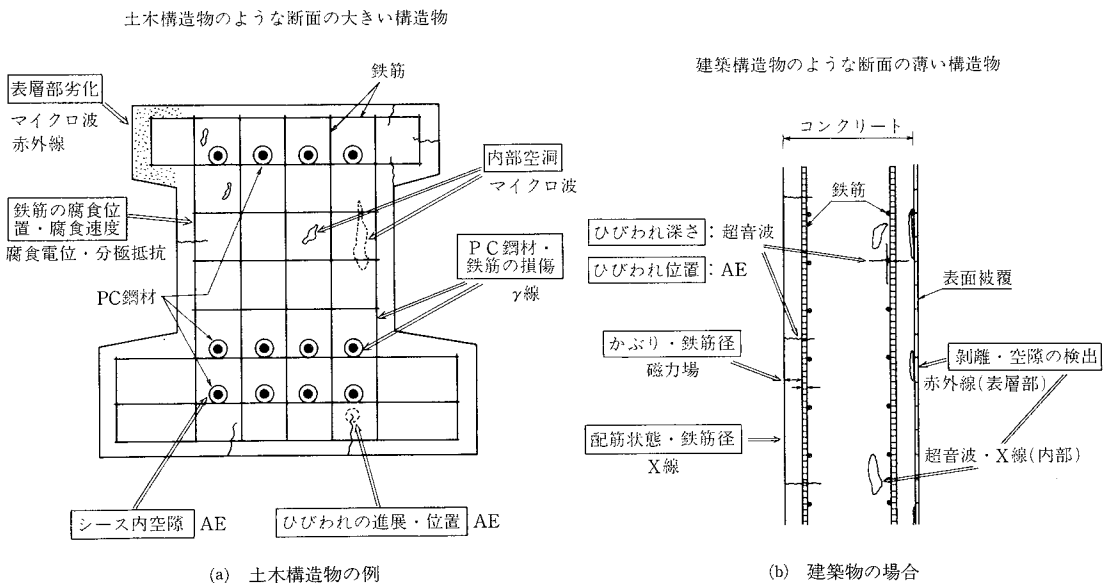


図-3 非破壊的手法によるコンクリート構造物の診断

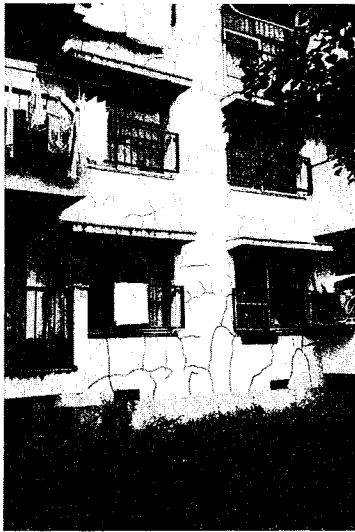


写真-4 アルカリ骨材反応によって発生したひびわれ
(補修したあとの状態)

さらに、構造物がおかれている環境（すなわち、水や塩分の供給など）、コンクリートの空気量、強度、ヤング率などを調べて今後の劣化の進行を予測するとともに、必要な対策を講ずることになる。しかし、以上のような診断手法はまだ開発中のものであって以下に示すような課題が残されている。

b) 骨材中の岩石・鉱物（反応物質）の判定

骨材がどのような岩石・鉱物から構成されているかを調べる唯一の方法が偏光顕微鏡による観察であることは万人の認めるところであるが、現実に偏光顕微鏡を用いて岩石・鉱物の適確な判定ができる専門家は極めて少ない。アルカリ骨材反応をおこす反応物質を判定できる専門家はさらに限定される。このような事情は海外でも同様である。これまでに、海外におけるアルカリ骨材反応を取り扱った研究報告の数は膨大なものであるが、反応性鉱物やその岩石中における存在形態を取り扱ったものはほとんど見当たらない。1940年に世界に先駆けてアルカリ骨材反応によるコンクリートの劣化現象をつきとめた米国が、50年近くを経過した今日においてなお有効な対策を見いだすことができない原因の一つはこの辺にあるものと考えられる。

アルカリ骨材反応をおこす反応物質としては、一般に火山岩中に最も多く含まれている火山ガラス、準安定なシリカ鉱物であるクリストパライトやトリジマイトなどの系統と、堆積岩中にしばしば含まれている潜晶質石英、カルセドニー（玉髓）、結晶格子にひずみを有する石英などの微晶石英の系統がある。前者の系統に関しては、クリストパライトをX線回折試験によって定量する方法

が開発されているが¹¹⁾、より一般的な火山ガラスの確認および定量方法に関してはいまだ手がつけられていない。

後者の微晶石英の判定は一般に前者に属する反応物質の判定よりも困難であると言われている。現在、わが国において発生しているアルカリ骨材反応は、前者の反応物質に起因するものがある特定の地域に集中しているのに対して、この微晶石英によるものは北海道から沖縄にいたる全国的な広がりをもっているため、これを偏光顕微鏡によって容易に判定できるようなガイドラインを早急につくる必要がある。現在、筆者が委員長をつとめている日本コンクリート工学協会の耐久性診断委員会では地質・鉱物の専門家を中心としてこれを取りまとめる作業を進めている。

そのほか、コンクリートに有害な鉱物としては3.1で述べたようにモンモリロナイトやローモンタイトなどがあるが、偏光顕微鏡によってまずこれを発見したのち、X線回折試験によって確認することになる。いずれにしても偏光顕微鏡による判定が先立つことになる。

c) セメント中のアルカリ量の推定

硬化コンクリートを試料として、使用されたセメント中のアルカリ量を推定する方法はまだ確立されていない。

しかし、骨材中に反応性鉱物が相当量存在することが確認された場合には、セメント中のアルカリ量を推定することが必要不可欠の課題となる。現在、筆者の研究室で検討を進めている方法は図-2に示したように、まず硬化コンクリートを粉砕してその中のCa、NaおよびKを分析によって求め、同時にコンクリートより分離した骨材について同様にCa、Na、およびKを求めて、コンクリート全体のCaに対して、骨材中のCaの補正を行い、単位セメント量を推定する。アルカリについても同様な補正を行ってセメント中のアルカリを R_2O (%)として推定しようとするものである。上記の方法で難しい点がいくつかある。その一つは細骨材中のCa、NaおよびKをどのようにして求めるかという点である。細骨材を硬化コンクリートより分離することは極めて困難であるので、分析によって上記の元素を定量することはできない。そこで、筆者らは光学的手法と画像解析を組み合わせてこれを求める方法を試みているが、この方法はかなり有望である。さて、セメント中のアルカリ量を推定しようとする上記の方法の中でもう一つの解決を要する問題点は海砂や混和剤を通じて導入されるアルカリの補正をどのようにして行うかという点である。海砂からのNaの推定方法としてはClの分析値より求める方法が考えられるが、Clは $CaCl_2$ として混和剤からも供給される可能性があるので事柄は簡単ではない。Naに関しては混和剤から供給される分をどのようにして推定することも問題となろう。海砂の使用の有無は偏光顕微鏡下で確認できる場合もあるので上記の問題点を解決する糸口

がないわけではない。

セメント中のアルカリ量を推定しようとする上記の方法の中で第三の解決を要する問題はスラグやフライアッシュ中のアルカリの補正である。このような補正を行うためにはまずスラグやフライアッシュが使用されているか否かを確認するとともにその混和率を推定する必要があるが、このような方法はまだ確立されていない。筆者の研究室では光学的な手法によって達成すべく検討を進めている。

硬化コンクリートの分析によって単位セメント量やセメント中のアルカリ量を推定しようとする場合、コアの採取個所に注意する必要があることはもちろんである。さらに、セメント硬化体組織より骨材内部に入り込んだアルカリ金属（とくにK）の影響（その逆の場合も考えられる）をどのように考慮するかも今後の課題である。

4.3 セメントの品質に起因する劣化をおこす可能性の診断

セメントの品質で最も注意を要するのは前節で述べたアルカリ量であるが、その推定方法は前節で述べたとおりである。とくに蒸気養生を行ったコンクリートの場合には問題をおこすことが多いので、セメント硬化体についてX線回折試験、走査電顕観察、示差熱分析などを通じてCa(OH)₂やエトリンジャイトを調べる必要がある。

また、セメント硬化体部分の偏光顕微鏡観察によってセメントの焼成条件を推定し、セメントの品質を判定する方法がある。これは未水和セメント粒子中におけるアリットとベリットの結晶の大きさ、色、複屈折率がセメントの焼成条件と密接な関係が存在することを利用するもので、わが国の小野博士によって開発された方法である。

4.4 鉄筋の腐食をひきおこす可能性の診断

a) 塩分による腐食

診断の対象とする構造物が外部から塩化物が侵入する可能性がない環境に設置されている場合でも、海砂や混和剤を介して塩化物が導入されることがある。塩化物の分析¹³⁾は全塩分と可溶性塩分の両方を実施することが必要である。鉄筋表面を活性化するのは可溶性塩分であるが、Friedel氏塩として固定されている塩分は必ずしも安定ではなく、CO₂や硫酸塩の存在によりこの塩は分解することが知られているからである。

海岸のように外部から塩分の浸透が予想される環境に設置されているコンクリート構造物では表面から内部に向かっての塩分の濃度分布を調べることが重要である。

鉄筋の腐食は塩分の拡散・浸透による鋼表面の活性化が引金になるが、酸素の供給や水の存在なしには生じない。したがって、鉄筋を活性化させるに十分な塩分を含んでいることが明らかになった場合には、次節で示したように、コンクリートの多孔体として組織構造の診断を

併せて行う必要がある。この結果と環境ならびに4.6において触れたコンクリートの構造物欠陥（たとえばかぶり）などの診断結果を総合して、腐食傾向の予測を行うことになる。

b) 中性化による腐食

コンクリートの表面からの中性化深さは一般にフェノールフタレインのアルコール溶液を用いる呈色反応によって推定されているが、確実に炭酸塩化している部分を調べるには偏光顕微鏡観察が有効である。

4.5 コンクリートの組織構造の診断

以上の4.1~4.4に述べたような診断の結果、何らかの早期劣化をひきおこす可能性が高いと診断された場合には今後の劣化傾向を予測し、これに基づいて適切な対策を考えることになるが、劣化傾向を予測するためには、コンクリートの組織構造の診断が必要となる。

ここでいう組織構造とはコンクリート中に占めるセメント硬化体部分の容積比、セメント硬化体の空孔構造、水和生成物などを指す。さて、セメント硬化体部分の容積比は切断面の画像解析によって求めることができる。

セメント硬化体の空孔構造としてはまず界面活性剤（AE剤）によって導入された独立気泡の分布と空気量を調べることで、アルカリ骨材反応の進行による劣化予測に対して役に立つ。さらにポロシメータを用いて細孔径分布と全細孔量を調べることで、腐食因子の透過性に関連するセメント硬化体組織の緻密度の目安を得ることができる。コンクリート切断片を用いて酸素や二酸化炭素の拡散係数を求めることで、コンクリート組織としての腐食因子透過性を定量化できるので鋼材腐食の予測に有効である。

とくに水量の多いコンクリートが打設されたか否かは打設方向に対する粗骨材—モルタル界面の空隙を調べることで大略の判断ができるが、セメント水和物を走査電顕によって観察することにより、さらに有用な情報が得られる。

4.6 コンクリート構造物に内在するマクロな欠陥の検出

設計や施工が適切でなかったために構造物内部に大きい空洞が存在したり、PCケーブルを収納するシースに空隙が生じていることがあるが、このようなマクロな欠陥は各種の要因による早期劣化を促進させるのみならず動的荷重を受けた場合の耐力にも影響を及ぼす恐れがある。このような欠陥の検出は非破壊試験によらなければならない。図-3はこのように用いられる各種の手法を欠陥の種類別に示したものであるが、これらにはマイクロ波による内部空洞の検出のようにまだ研究途上にあるもの、γ線を用いる方法のように装置の製作に多大の費用を要するもの、マイクロ波や赤外線による表層変質部の検出のようにこれからの研究に期待するものなど

が含まれており、すべてが実用化の段階にあるわけではない。“原理的に欠陥の検出が可能であるということ”と、“実際の構造物に適用できるということ”の間のギャップをいかに埋めるかが、これらの非破壊の手法の課題である。

4.7 劣化が進行しているか否かの診断

a) 鉄筋の腐食に関する診断

鉄筋の腐食箇所は腐食電位⁽⁴⁾を測定し、等電位線を書いて調べる方法が現在のところ最も適切であり、適用例もあるが、構造物の規模、形状、断面などによって適用に限界があり、まだ診断技術として確立していない。腐食速度を分極抵抗の測定によって求めようとする試みは現在のところ実験室レベルにとどまっている。

b) アルカリ骨材反応による劣化の診断

外部にひびわれなどの変状が認められない状況下においてアルカリ骨材反応が進行中であるか否かをどのようにして確かめるかは今後の課題である。一応、偏光顕微鏡や電子線マイクロアナライザなどを用いて骨材—セメント硬化体界面の観察による微細構造の変化や Na, K, Ca, Si などの元素の分布を調べることが手法としては考えられるが、常にこのような手法が有効であるか否かは疑問であり、また、反応生成物を確認してその組成を分析するという直接的な方法も考えられるが、この手法はある種の反応性鉱物を含む岩石を用い、しかも反応が相当に進行した段階でなければ適用が難しい。いずれにせよ、この種の診断を行うためには、相当多くのシミュレーション実験を重ねることが必要である。孔隙水の成分を調べることは間接的な方法ではあるが、反応の進行を予測するのに役立つ可能性がある。

c) くり返し荷重による疲労に関する診断

AE 計測により、鉄筋コンクリート梁の疲労による劣

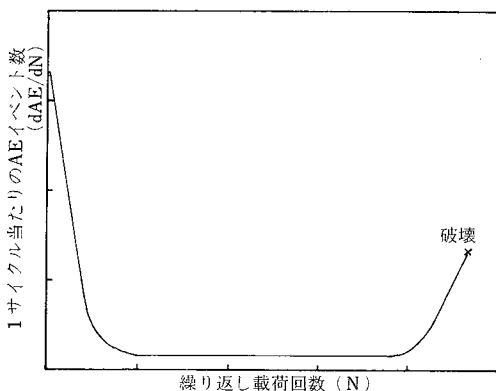


図-4 疲労荷重を受ける鉄筋コンクリート梁の理想化された繰返し載荷回数と1サイクル当たりのAEイベント数との関係

化度を判定しようとする試みが魚本によって提案されている⁽⁵⁾。これは定期的にAE計測を実施し、図-4に示すような繰返し回数と1サイクル当たりのAEイベント数との関係を求めることにより、破壊時期を推定しようとするものである。

5. む す び

本文を通覧すれば明らかなように、コンクリート構造物の耐久性診断技術は多様な診断手法を総合したものであり、現状では個々の診断手法の開発研究が進められている段階である。これらの研究と並行して、個々の手法を総合して診断技術として体系化を図るとともに劣化傾向を予測する手法を開発することが今後の課題となるが、この場合とくに留意を要するのは診断に要する費用である。

(1987年1月19日受理)

参 考 文 献

- 1) たとえば Economist 誌, 1983年10月15日号の Science and Technology 欄, Concrete buildings are Cracking up
小林一輔: コンクリート構造物の耐久性, コンクリート工学, Vol.23, No.2 (1985)
小林一輔: コンクリート構造物の早期劣化とセメントの品質, 土木学会論文集, 第354号/V-2 (1985)
- 2) 丸 章夫: 鉱物学的立場からみた骨材の品質, セメントコンクリート, No.415 (1981) 129~134
- 3) 小林・星野: アルカリ骨材反応によって早期劣化を生じた大規模集合住宅の調査研究 (II), 生産研究, Vol.38, No.7 (1986)
- 4) たとえば 森野奎二: コンクリート骨材のポップアウトに関する研究, 土木学会第33回年次学術講演会概要集, 第5部 (1978)
毛見虎雄, 中川宗夫: 骨材の安定性に関する一実験, 第3回コンクリート工学年次講演会論文集, (1981) 145~148
- 5) Kriner, R.W.: Preheaters and Product Performance, Mill Session Papers, M-204, Portland Cement Association, 18-21, 1977.9
- 6) Hogan, F.J.: The Effect of Alkalies on the Properties of Portland Cement, Task Group Report to ASTM C 01.32 on Alkalies, 1978.10
- 7) Frohnsdorff, G., Clifton, J.R. and Brown, P.W.: History and Status of Standards Relating to Alkalies in Hydraulic Cements in Cement Standards — Evolution and Trends, STP 663, ASTM Philadelphia, 1977
- 8) Jawed, I. and Skalny, J.: Alkalies in Cement: A Review, 1. Forms of Alkalies and Their Effect on Clinker Formation, Cement and Concrete Research, Vol.7, 719~730, 1977
- 9) 小林一輔: コンクリート構造物と鋼材の腐食・防食, コンクリート工学, Vol.19, No.3 (1981)
- 10) 小林一輔, 小倉盛衛: セメント中のアルカリ硫酸塩がコンクリートの諸性状に及ぼす影響, 土木学会論文集,

No.378/V-6 (1987)

- 11) 中野錦一ほか：粉末区線回折法を用いた反応性骨材の一判定方法，大阪セメント技報，No.52 (1985)
- 12) 日本コンクリート工学協会：コンクリート構造物の腐食・防食に関する試験方法・規準 (1987)
- 13) Page, C.L. et al., Diffusion of Chloride Ions in Hardened Cement Paste, Cement & Concrete Research, Vol.11, No.3, 1981
- 14) 小林一輔：非破壊的手法によるコンクリート部材中の鋼材腐食の早期判定と総合評価，昭和 60 年度科学研究費（一般研究 B）研究成果報告書，p.52
- 15) 魚本健人ほか：疲労荷重を受ける鉄筋コンクリート梁の AE 特性に関する研究，生産研究，Vol.38, No. 11 (1986)

注 1) 正確にはこの 2～3 年前までとするべきであろう。

注 2) 建物の場合には上塗りのモルタル部分にアルカリ骨材反応を生じているケースが意外に多い。建物躯体の耐久性に及ぼす影響は少ないが、ひびわれによって生ずるモルタル片によって人身事故をひきおこす可能性がある。モルタル部分も診断の対象にする必要がある。

注 3) 日本コンクリート工学協会の定めた分析方法¹²⁾がある。

注 4) 電位差を用いるほうが腐食電位の測定値に及ぼす数多くの影響要因を考慮する必要がないので今後はこの方法が用いられる可能性が高い。

