展 望

耐食コンクリートについて

小林 一 輔*

1. は し が き

この数年来、わが国では鉄筋の塩分腐食やアルカリ骨材反応などによるコンクリート構造物の早期劣化が各地で集中的に発生している。このような状況は程度の差こそあれ、海外でも生じていることが一昨年の秋に英国の経済雑誌である“*The Economist*”誌の Science and Technology 欄に1頁にわたってとりあげられているので、その概要を以下に紹介する。

鉄筋コンクリートは約110年前にフランスのモニエールが植木鉢用に発明して以来、安価で施工が容易であるのみならず、その寿命が半永久的であると信じられてきたため、今日のように目ざましく普及した。しかし、最近になって鉄筋の腐食とコンクリートのひび割れによって劣化する構造物が増大するに及んで、建設業者は鉄筋コンクリートに対する信頼の念を失いつつあり、またこれまで愛用してきたこの材料が大きな悩みの種になりはしないかと恐れている。

鉄筋コンクリート構造物の補修費はかなり高価である。

たとえば、カナダの道路庁では向こう5年間に、損傷した橋梁の補修費として500億カナダドル(約9兆3,800億円)の支出を余儀なくされるであろうといわれており、アメリカ、英国、西ドイツでも事情は似たりよったりである。建設業者はショックを受け、落胆している…。

すなわち、メンテナンスフリーと考えられたきた「コンクリートの耐久性神話」の崩壊ということであろう。

近年のコンクリート構造物がこのような脆弱になった理由に関して、直接的には鉄筋の塩分腐食やアルカリ骨材反応による劣化をあげることができるが、その背景としては、骨材資源の涸渇やセメントの製造方法の変化、コンクリート構造物の施工における極度の分業化などがあり、これらの状況はいずれもコンクリートの品質を基本的に低下させているのである。しかも、以上の状況が

改善される見通しは非常に少ないとみられている。

このことは、多少なりとも腐食性の環境にコンクリート構造物をつくる場合には積極的な防食を考慮する必要があることを意味するものである。

本文では以上のような観点に立って、コンクリートの耐食性を改善する手法として、材料複合化による方法を取りあげ、実用化の可能性と問題点について述べることにする。

2. 複合化による耐食コンクリートの製造

2.1 コンクリートの組織と劣化

図1はコンクリートの構成を示したものであり、図2は構成要素の大きさを表わしたものである。これらの図から、コンクリートは全体の容積の約70%を占める骨材とこれらを結合して一体化する役割を果たしているセメント硬化体から成っている。さて、ここで注目を要するのはセメント硬化体にかんがりの空隙部分が存在することである。すなわち、セメント粒子間の毛管空隙、ゲル粒子間のゲル空隙およびその他の空隙(混合や成形の過程で混入した気泡、界面活性剤によって意図的に導入した空隙など)であるが、問題になるのは毛管空隙である。図3はこの毛管空隙の細孔径分布を示したものであるが、そのコンクリート中に占める全容積は約10%であって、硬化コンクリート中において連続相を形成する。したがって、この毛管空隙を通じて塩分の浸透(図4)、酸素の拡散(図5)、炭酸ガスの侵入などが行なわれ、さらに種々のイオンを含む溶液の移動により場合によってはコンクリートの表層付近では溶質部分の濃縮現象によってコンクリートの劣化を促進させることになる(図6)。

2.2 耐食コンクリート製造の手法

以上のようなコンクリートの劣化機構を前提とした場合、コンクリートに耐食性を与える方法として、コンクリート表面を緻密な被膜によって被覆する方法がまず考えられる。合成高分子系材料によるコーティングがその代表的なものであろう。しかし、この方法には致命的な欠陥がある。それは、処理に多額の費用を要することと、被覆によってその機能を発揮している期間が短いこ

* Kazusuke KOBAYASHI: 東京大学生産技術研究所
(106 東京都港区六本木 7-22-1)

図1 硬化コンクリートの構成¹⁾ 図2 硬化コンクリートにおける構成成分の大きさ¹⁾ 図3 硬化セメントペーストの細孔径分布²⁾ (普通ポルトランドセメント, $W/C=0.5$) 図5 水で飽和されるコンクリートを通しての酸素の拡散⁴⁾ 図4 供試体中における Cl^- の分布³⁾

図6 通常の柱・梁などの部材におけるコンクリート表面からの塩分濃度の変化

とである。現在、このようなコーティングによって、防食効果が保証される期間は2～3年程度、長くて5年程度と考えられている。コーティングにはもう一つ厄介な問題がある。それは、コーティングの効果が失われて補

修を行なう場合に、表面処理に大変な手間を要することである。

コンクリートに耐食性を与えるもう一つの方法は、コンクリートに空隙の連続相が存在することを利用して、これに有機質材料を含浸固化させてコンクリート表層部分に水、酸素、塩素イオンなどに対する遮蔽層を形成させようというものである。この方法は現時点において必ずしも実用化の段階に達しているとはいえないが、耐食コンクリートの製造方法として十分検討に値する方法である。

コンクリートに耐食性を付与する第3の方法としては、コンクリートの練りまぜのさいにあらかじめ有機質材料を添加しておき、これによって硬化後に毛管空隙を閉塞しようとするもので、合成樹脂系のエマルジョンやラテックスを用いる方法と球状のエステルワックス粉末を用いる方法がある。

2.3 有機質材料の含浸による耐食コンクリート

この方法は筆者が約20年前に最初に試みたもので、エポキシ樹脂をコンクリート表層に約1mm程度含浸させることによって、その耐食性を飛躍的に改善できることを確かめている⁵⁾。その後、アメリカではMMAのような低粘度のビニール系化合物をコンクリートの全断面⁶⁾に含浸させることにより、耐食性のみならず強度も著しく増大させるような、“ポリマー含浸コンクリート”の開発を大々的に進めた。当初の開発目標は多段フラッシュ法による海水淡水化装置用蒸発缶体への適用であったが、これが不要になったため、適用対象を凍結防止剤によって塩害を受けるおそれのある道路橋の鉄筋コンクリートスラブに変更して実用化研究を進めた。しかしコストが非常に高くなること、作業中に引火爆発のおそれがあることなどから研究は中断状態となっている。しかし、最近になって常温で含浸処理を行なうことを建前として、現場における施工性を考慮した各種のコンクリート用含浸材がアメリカや西ドイツなどで製品化されるようになり、一方、わが国においても最近のコンクリート構造物の劣化状況を反映して種々の含浸材が開発されている。これらの含浸材を大別すると、エポキシ樹脂系、ポリウレタン樹脂系、アクリル樹脂系などの反応性樹脂系のもの、シリコン樹脂系および亜麻仁油系のものとなる。一般に反応樹脂系のものを含浸させた場合には腐食因子の遮蔽効果の持続性が優れ、亜麻仁油系やシリコン

樹脂系のものは、一時的な効果しか期待できないといわれている。

さて、ある限定された期間にせよ、上記のような有機質材料の含浸によって効果をあげるためには、コンクリートの表層部分にこれらの含浸材が十分に浸透することが必要である。そのためには、コンクリート表層部分の毛管空隙中の水分が除去されていること、含浸材がこの毛管空隙中に大気圧下で容易に浸透しうるような低い粘度を有していることが必要である。エポキシ樹脂でも、低分子量のものは幅が0.1mm程度のひび割れに注入しうるような低粘度のものがあるが、セメント硬化体の毛管空隙の直径は、 $1\mu\text{m}$ 以下のオーダーである。このような空隙に、大気圧下でしかも常温で容易に含浸することが可能な含浸材の粘度はおそらく水と同程度のものでなければならない。前述のような一連の含浸材は、そのままではこのように低い粘度にすることがむずかしいので、各種の溶剤によって希釈して粘度を低下させているのである。ところが、この溶剤のほとんどのものは非反応性（すなわち、揮発性）であるため、含浸後間もなく大気中に消散してしまうのである。そこで問題になるのが含浸材中に占める有効成分と溶剤の比率である。含浸材の種類によっても異なるが、商品化されているものは有効成分が5%程度から30%程度までのものが多い。

有機質材料の含浸によってコンクリートに耐食性を付与する方法のメリットは腐食因子遮蔽層をコンクリート面の外部ではなく、内部に形成させるため、これが全面的に脱落するようなおそれがほとんどないことである。

しかし、現段階では、屋外の構造物のコンクリート表層の毛管空隙を含浸によって確実に充填できるような工法が開発されていないために、このような手法がはたしてコンクリートに耐食性を付与するのに効果があるか否かを判断することはむずかしい。

有機質材料によるコンクリートの表層含浸が耐食コンクリートを得るための有力な手法となるためには次のような課題を解決することが必要である。

- 1) 屋外のコンクリート構造物に対して、その表層に一樣な遮蔽層を確実にかつ迅速に形成させるような方法を開発すること、
- 2) 上記のような遮蔽層が形成されたか否かを簡単に検査する方法を開発すること、
- 3) 含浸によって形成された遮蔽層の防食効果と耐久性が確認されること、
- 4) コンクリートの変形追随性をできる限り低下させないこと。

*1 片側から含浸可能な厚さは5cmであるので10cmの断面が限度である。

2.4 コンクリート自体に耐食機能を与える方法

代表的なものとして内部封かんコンクリート (internally sealed concrete), または別名ワックスビーズ混入コンクリートがある。このコンクリートは、通常のコンクリートの細骨材のごく一部分を、同量のワックスビーズによって置き換えたものである。ワックスビーズは、東ドイツ産の褐炭より抽出された天然産のエステルワックス (Montan Wax と呼ばれている) 25% と、パラフィン 75% から成る直径 0.8~1.6 mm の球状の粒子である。

このワックスビーズは、撥水性でしかも熱によって容易に流動し、コンクリートとの親和性が高いので、非常に小さい毛管や空隙に浸透する。パラフィンは融点と粘性を低下させてワックスの移動を容易にし、またこのようにしてシールされたコンクリートの化学的侵食に対する抵抗性を高める役割を果たしている。

このワックスビーズは、通常のコンクリートと同様なミキサによる練りまぜを通じて一様にコンクリート中に分散させることが可能である。このようにして製造されたコンクリートは、硬化後、加熱処理によって毛管空隙から成る網状組織 (図7(a)) のシーリングを行なう。すなわち、加熱によってワックスビーズが溶融し、溶融したワックスが毛管に流入して (図7(b)), 固化するとき、これらをシールするのである (図7(c))。以上のような作用によって毛管空隙の網状組織は不連続となり、閉鎖された系となるので、水分や塩素イオンの侵入を阻止することができる。コンクリートの表層をシール (5 cm まで) するのに要する最低の加熱温度は、85°C から 100°C である。屋外で所定の時間、このような温度を保持する実用的な方法としては、一種の電気毛布の使用が推奨されている。この方法は、1976 年に初めてアメリカとカナダにおいて道路橋の鉄筋コンクリートスラブに適用されたが、加熱に要する電力消費が大きいために、その後はあまり発展していない。しかし、このような発想による防食方法は、ワックスビーズ以外の封かん材を考えることにより、復活する可能性が大きい。

3. 耐食性のパネルを永久型わくとして使用する方法

コンクリート部材の最外層を、腐食因子の遮蔽性と靱性の優れた材料によって置き換えることにより、内部の鋼材の防食を図ろうとするものである。その方法は、以上のような機能を有するパネルを製作し、これを型わくのせき板として使用すると同時に、部材の最外層を構成させる一種の永久型わく工法によるものである。このよ

図7 ワックスビーズによる毛管空隙のシーリング⁶⁾

うな機能を有するパネルの構成としては、コンクリートとの一体性を良好にし、さらに耐候性や外観の観点から、セメント系材料がベースになり、これに靱性を付与するために繊維質材料が使用される。現在、筆者の研究室で検討を進めているものは、セメント系材料として腐食因子の遮蔽性の優れたポリマーセメントモルタルを使用し、繊維質材料として網目状の連続繊維を積層状態で配置して強化するものである。

このようなパネルを永久型わくとして用いる防食工法の利点としては、次の諸点があげられる。

① コンクリートの最外層を防食性の優れた材料によ

図 8 ポリプロピレン繊維補強セメントの鉄筋コンクリート橋床版の永久型わくへの利用⁷⁾

って置き換えているので、海洋飛沫帯のようなきびしい腐食環境下でも鉄筋のかぶり厚さを増す必要がない。

② 表面に欠陥のないコンクリート部材を容易に製造することができる。

③ 繊維質材料によって強化されたセメント系複合材のパネルを用いているので、変形追随性や耐摩耗性が優

れており、コーティングや含浸の場合に問題となるひび割れの発生や表面劣化の心配がまったくない。

なお、図 8 は英国における適用例を示したものである。このような防食工法は省力化とメンテナンスの両面からみて大変合理的であり、今後わが国でも採用される可能性が高いと思われるが、実用化のキーポイントは、パネルの量産化によるコストの低減にかかっている。

参 考 文 献

- 1) 小林一輔：生産研究，26，12（1974），511-517.
- 2) C.L. Page：Cem. Concr. Res.，11，3（1981），395-406.
- 3) 武若耕司：コンクリート工学，No. 83，10-2（1983）.
- 4) J.B. Verbeck：ACI，SP 49-3（1975），27-38.
- 5) J. Murata & K. Kobayashi：Proc. RILEM Symp.（1967）.
- 6) T. Sealy：Concrete，13，8（1979），26-27.
- 7) K.D. Raithby, et al.：Int. J. Cem. Compos.，3，4（1981），237-246.

解 説

黒鉛粒子分散鑄造合金の製造法と性質

諏訪 正輝*，小室 勝博**

1. 緒 言

最近の工業機械の進歩に伴い、金属材料に対する性能向上の要求はますます高まってきている。しかし、従来技術の延長線上の金属では限界があり、したがってその短所を補うために他の材料との複合化が試みられる傾向が強く現われてきている。

複合化は材料強度の向上が目的で、分散強化あるいは繊維強化型複合材料の開発研究が多く行なわれた。最近ではさらに金属中に粒子分散させることで耐摩耗性や防振性などに優れた特性を期待できることから、粒子分散合金の研究が増えてきている。粒子を分散させる方法としては粉末冶金法が多用されているが、この方法には工

程数が多い、原料粉が高価、大型品には不適などの欠点がある。一方、分散粒子間隙に金属溶湯を圧入したり、溶湯中に粒子を投入するといった方式の研究も最近行なわれるようになってきた。これは、粉末冶金技術に頼らずに非鉄合金鑄物中に遊離黒鉛を分散させたいという夢を INCO 社が 1960 年代後半に果たしたことが大きな契機になったもののようである。これ以後しだいに黒鉛粒子を合金溶湯中に分散する研究が盛んになってきている。黒鉛分散合金鑄物は、黒鉛鑄鉄や青銅に似た摺動特性をもち、しかもダイキャストが可能であることから新市場が期待されている。とくに軽摩耐摩耗性ダイキャスト用複合材料として、自動車エンジン用や工業機器部品としての新市場があるものと予想される。また黒鉛分散は他の粒子分散に共通する技術でもと思われるので、ここでは国内外の黒鉛分散複合鑄造合金の研究開発状況と今後の課題について概観する。

* Masateru SUWA, ** Katsuhiko KOMURO：(株)日立製作所日立研究所 第 5 部 (317 日立市幸町 3-1-1)