

特集

P C 建 築

# コンクリート系構造物の耐久性

## —耐久性の基本は何か—

六車 熙\*

### 1. ま え が き

コンクリート系構造物の劣化は鉄筋またはPC鋼材の発錆、腐食に負うところが多い。かつては、コンクリートの中性化が構造物の耐久性を決める重要な要素であった。すなわち、コンクリートの中性化が進行すると鉄筋またはPC鋼材が錆びやすくなり、鉄筋発錆による容積膨張が起こって被覆コンクリートを割り裂き、構造物は健全性を失う。とくにPC鋼材は錆が発生しやすく、かつ発錆による断面欠損が起こると破断する可能性があり、構造物の崩壊に繋がる恐れがある。かつて、コンクリート系構造物の実用耐用年数（補修を行わないで使用可能な年数）は、建築物では少なくとも60年、橋梁では120年、海洋構造物では30年～60年と言われていた。それが、1960年代には折からの建設ブームに乗って施工の省エネルギー化、高スピード化が図られ、その結果、コンクリート系構造物は予想をはるかに超える早さで劣化するというゆゆしい事態を招いた。1970年代には建築物床スラブのひび割れ、たわみ障害が多発し、耐用年数が10年どころか5年ももたない構造物さえ現れ、コンクリート系構造物の急激な劣化が社会問題化したことは記憶に新しい。また、1970年代後半から1980年代にかけてアルカリ骨材反応によるひび割れが続発し、さらには、塩分のコンクリート中への浸透や海砂の使用による鉄筋やPC鋼材の塩害が多発するなど、コンクリート系構造物の耐久性についての社会の信頼はますます低下の一途を辿った。昨年6月には新幹線福岡トンネルアーチ部の覆工コンクリートの一部が長さ約2m、幅約20cm、深さ約65cmにわたって剥離、折から走行中のひかり号の屋根部分を直撃するという人身事故にも繋がりがかねない事故が発生し、またもや弱いコンクリート、問題のコンクリートと社会の批判を浴びるに至った。コンクリート構造物は満身創痍であり、耐久性に富む本来の姿に早急に戻らなければ、コンクリートは構造材料としての地位さえ追われかねない状況にあると言えよう。本稿ではそのための拠り所となるコンクリートの耐久性の基本につき、筆者の日頃の思いを述べて

みたい。

### 2. 耐久性向上の基本はコンクリートにある

かつて、コンクリートの耐久性劣化の要因は中性化であった。しかし、近年はこれに加えて塩分のコンクリート中への浸透による鉄筋の早期発錆、すなわち塩害が世界各地で続発し、塩害による構造物の耐久性劣化は国際的問題となっている。わが国では、1982年に行われた海岸部にあるコンクリート橋の調査結果によると、920橋中196橋に塩害またはその兆候が発見されている<sup>1)</sup>。さらに、今日では骨材資源の枯渇に伴い、海砂の使用が塩害問題を大きくしていることは周知である。中近東では海砂に加えて海水を練混ぜ水に使用したことが、塩害を加速している。ペルシャ湾岸の168カ所での調査結果によると、健全であった構造物は調査全構造物の26%に過ぎなかったという<sup>2)</sup>。アメリカ、カナダでは寒冷地における冬季の道路交通確保のために凍結防止用塩化カルシウムが多量に使用されるが、これが橋梁デッキ床版や駐車場建物に著しい塩害をもたらし、1980年代には被害構造物数は20万棟以上、損害額としては200億米ドルに達したと報告されている<sup>2), 3)</sup>。

図-1は、炭酸ガス、塩素イオン、水、酸素などの鉄筋やPC鋼材の腐食を誘発する要因の、外部環境からコンクリート内への浸透を示す模式図である。コンクリート内部には大小さまざまな空隙と毛細管が存在し、これら要因は空隙と毛細管で構成されたネットワークを通してコンクリート外面から内部に浸透する。このうち炭酸ガスはコンクリート中のアルカリ成分と反応してコンクリートを中性化する。塩素イオンは直接鉄筋表面に到達して鉄筋発錆（塩害）の原因となる。ただし、鉄筋は塩分だけでは腐食することはない。そこに酸素が存在してはじめて発錆するのである。塩分は水分に溶解して塩素イオンとなり、湿気または水に運ばれてコンクリート中に浸透する。また、酸素も同

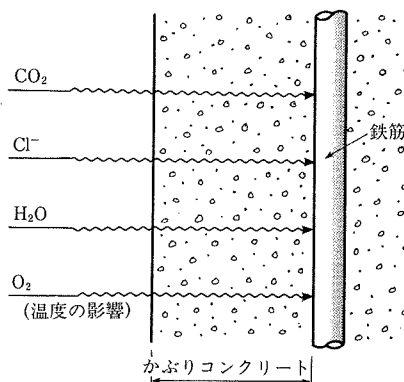
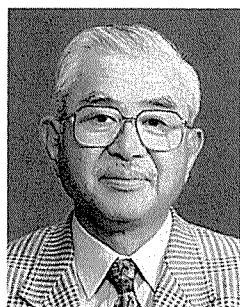


図-1 耐久性阻害要因の外部からの浸透



\* Hiroshi MUGURUMA

本協会名誉会員  
京都大学 名誉教授

様に水の中に溶解してコンクリート中に浸透する。したがって、コンクリート中に連続した空隙-毛細管ネットワークが多く存在すると、これら鉄筋発錆要因の浸透が早くなって塩害が早期に起こるのである。さらに、このようなコンクリートは中性化速度も速く、かつ中性化した部分は塩素イオンの浸透阻止に無力(すなわち、中性化部分はコンクリートがなくなったのと同じ)であるために、塩害を著しく促進する。したがって、耐久性を改善する基本は、コンクリート内部の連続した空隙-毛細管ネットワークを可能な限り少なくすること、すなわち、可能な限り密実なコンクリートを使用することにある。

密実なコンクリートを得る基本は水セメント比の低減にある。図-2は水セメント比とセメント硬化体の構成成分との関係を示したものである<sup>4)</sup>。セメントが完全に水和するのに必要な水セメント比(理論水セメント比)は25%であり、それ以上の水はセメント中に余剰水(遊離水)として残って水隙を作る。水セメント比40%までの余剰水はゲル吸着水となるが、それ以上の余剰水はキャピラリー水となり、ブリーディングの原因となる。ブリーディングが起るとコンクリート内部には水道ができ、これが毛細管ネットワークを作って耐久性を著しく阻害するのである。とくに、余剰水が多ければ多いほどコンクリート中への炭酸ガスや塩分の浸透速度が速くなり、耐久性は等比級数的に減少するが、わが国では、このような事実を目を向けないまま、水セメント比が40%をはるかに超えるコンクリートを恒常的に使用し続けてきた結果、コンクリートの早期劣化があちこちで発生し、社会問題にもなったのである。筆者は水セメント比40%以下のコンクリートこそ真のコンクリートであり、40%以上のものは工学で教えるコンクリートではないと断言してはばからない。すなわち、耐久性向上の基本はコンクリートそのものを密実にするにあり、コンクリートこそ鉄筋やPC鋼材の腐食を防止するためのまたとない防錆材であることを認識していただきたい。

また、最近ではコンクリートの締固めや湿潤養生がほとんど行われなくなっているが、これらを行わない限りコンクリート中の毛細管は太く、かつ多くなって、外部からの耐久性阻害要因の浸透が容易となる<sup>2)</sup>。この事実は案外見逃されていることが多い。締固めや湿潤養生の重要性についても十分認識していただきたい。

なお、参考までにBrowneの作成した塩分に対する鉄筋コンクリート構造物の耐久性設計図表を図-3の実線に示す<sup>2)</sup>。この図は、塩害を受けやすい地帯に建設された種々の圧縮強度をもつ40以上の実構造物の、コンクリート中の塩分含有量を詳細に調査した結果にFick理論を適用し、鉄筋のかぶり厚さとその位置での塩分浸透量がセメントに対する重量比で0.4%になる材齢との関係を計算したものである。0.4%という塩分浸透量の値は、鉄筋表面の不動態皮膜が破壊されて鉄筋が錆びはじめる限界塩分量であって、構造物のリハビリを行う目安となるものである。この図から分かるように、わが国で使用されている30 MPa以下のコンクリートは、塩害に対していかに無力であるかが理解できよう。なお、図中の点線は、Klopfnerの作成した中性化対

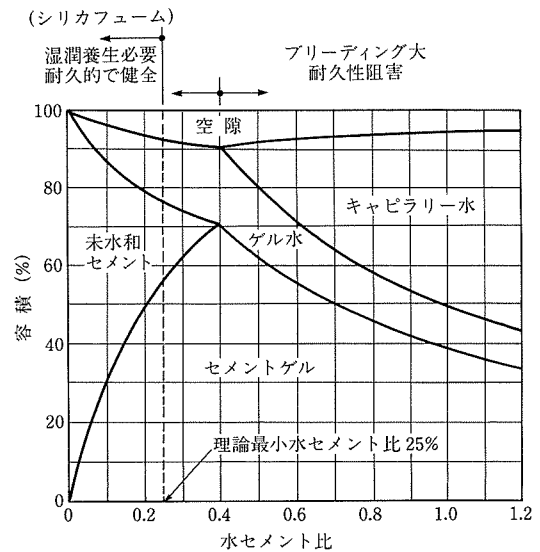


図-2 種々の水セメント比におけるセメント硬化体中の個々の成分の容積百分率(水和度100%)

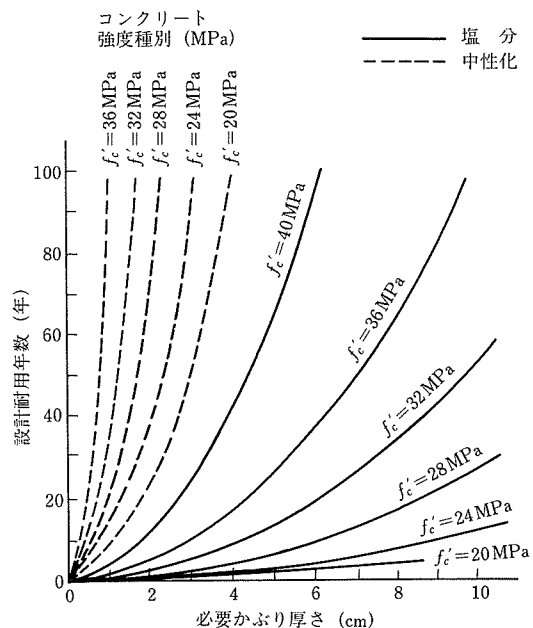


図-3 耐久使用限界設計図表 (Browne およびKlopfnerによる)

する同様の設計図表を参考までに示したもので<sup>2), 5)</sup>、中性化と塩害との複合作用を受ける場合の鉄筋の必要かぶり厚さは、点線から求めた中性化深さを実線の塩分に対する必要かぶり厚さに加算して求める。

### 3. PC鋼材の防食の重要性

#### 3.1 プレテンション部材におけるPC鋼材防食

PC鋼材には応力腐食という厄介な問題がある。腐食によってPC鋼材が破断すると、プレストレストコンクリート(以下、PCと略記)構造物は崩壊の危険に曝される。コンクリート中では電解質の存在、酸素の影響、不純物によるポルトランドセメントの不活性性の破壊、腐食性化学物質の浸透などのいずれかの条件が存在するとき、または、これら要因の複合作用によりPC鋼材の腐食が起こる。PC構造物

は高強度で密実なコンクリートによってPC鋼材が完全に覆われており、かつ常時使用状態ではひび割れ皆無またはひび割れ幅が制御されているので、一般には腐食問題が起こるような条件下には置かれていないと言える。しかしながら、実際の構造物では、種々の原因によるPC鋼材の腐食や腐食の結果によると思われる破断が起きた例が比較的多く報告されている。

ポストテンション部材とは異なり、プレテンション部材ではPC鋼材が高強度、高密度コンクリートの中に直接打ち込まれるので、PC鋼材の防食の点では有利である。ただし、プレテンション部材と言えども泣き所はある。すなわち、プレテンション部材に慣用されているPCストランドは芯線と側線との間に僅かではあるが空隙が存在し、コンクリート打設時に側線間の接触部の僅かな隙間から内部空隙にコンクリート中の水分が流入することがあること、さらには、材端部のPCストランド切断面はそのままでは防錆上無防備の状態であって、水分が内部空隙に浸透しやすいことから、芯線と側線との間の僅かな空隙内部に錆が発生することがあるのである。とくに、材端部のストランド切断面については十分な防錆処理を行う必要がある。

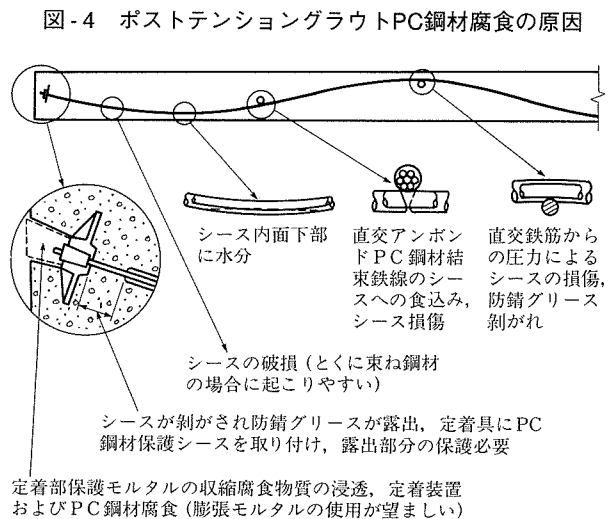
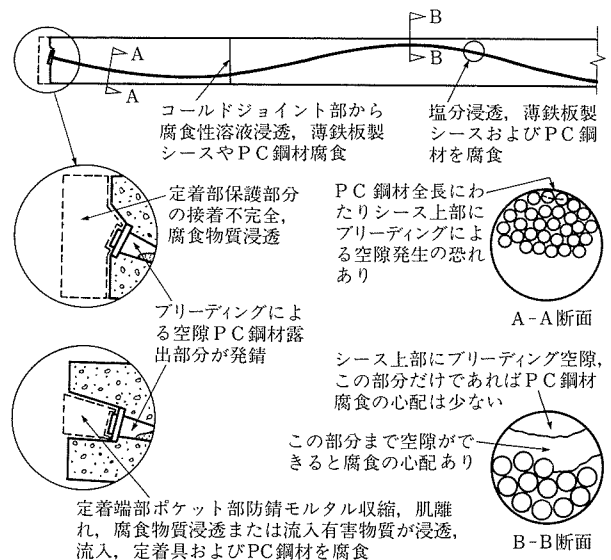
なお、最近では鉄筋コンクリート構造物に海砂使用による塩害が多発しているが、PC鋼材のような塩分に対して敏感な鋼材を使用するPC構造物では、海砂の使用は禁物である。このことは、単にプレテンション部材ばかりでなく、ポストテンション部材でも同様である。

### 3.2 ポストテンション部材におけるPC鋼材防食

どちらかと言うとポストテンション部材では、プレテンション部材よりもPC鋼材防錆に神経を使う必要がある。それは、構造上PC鋼材を裸のまま最良の防錆材であるコンクリート中に打ち込まれず、シースやあと施工のグラウトを介して防錆されるからである。Schupackらは、ポストテンションPC鋼材の耐久性に関する調査<sup>6)</sup>、PC鋼材グラウトに関する研究<sup>7)</sup>、Treat Islandにおける20本のポストテンションPC梁の海水曝露試験結果<sup>8)</sup>、<sup>9)</sup>、70例以上のPCタンクの鋼材腐食調査結果<sup>10)</sup>、50例以上の種々のPC構造物調査結果<sup>3)</sup>に基づいて、現場で実際に起こっている鋼材腐食の原因および腐食防止の具体的方法について論じている。図-4、5は、これらの調査結果をまとめて、実際のPC構造物に起こったポストテンショングラウトPC鋼材、および、表面にグリースなどの防錆材を塗布したポリエチレンオーバーシース付きアンボンドPC鋼材の腐食破断箇所をその原因とともに図示したものである<sup>11)</sup>、<sup>12)</sup>。図中に記載した施工の不備の1つまたは複数の組合せが、思わざるPC鋼材腐食の原因となっている。図-4に示したように、ポストテンショングラウトPC鋼材の腐食破断の多くは、グラウト忘れまたは不完全なグラウト施工によるものが多い。とくに注意を喚起しておきたいのは、防錆処理が不完全なPC鋼材定着部からの腐食性有害物質を含む水分などの浸透である。時にはグラウト上部の空隙を通して水分が浸透し、全長にわたってPC鋼材が腐食した例もある。すなわち、PC鋼材腐食の完全防止には、水密性に富むコンクリートの使用、常時使用状態におけるPC部材のひび割れ発生、または、有害なひび

割れ開口の起こらない適切な構造物の設計、PC鋼材に対する十分なかぶり厚さの確保などのほかに、グラウトの完全施工と定着端部の完全防錆に留意することが大切である。近年は高スピードのグラウト施工によるシース内部のグラウト不完全充填に対する反省から、完全充填を目指したグラウト材料の開発や施工方法の改善が図られつつあり<sup>13)~16)</sup>、PC鋼材防錆の実が上がること必定と期待される。

防錆材を塗布したポリエチレンオーバーシース付きアンボンドPC鋼材そのものの腐食は、鋼材表面が一様に防錆材で覆われている限り発生しないとするのは当然である。ただし、図-5に示したように結束線によるオーバーシースの潰れによる防錆材塗布厚の減少、防錆材の不完全塗布、シースの破れによる防錆材の流失などがあると、アンボンドPC鋼材と言えども腐食破断が発生する<sup>11)</sup>、<sup>12)</sup>。とくに、コストダウンを目的として肉厚の薄いオーバーシースを使用すると、施工時にシース破損を起こす原因となる。米国では肉厚0.6mmのオーバーシースを使用したため、建物建設後4年~10年でPC鋼材の腐食破断事故を起こした例がいくつか報告されている。また、潤滑グリースそのものは防錆力がほとんどなく、また防湿性もあまりよくない。これ



に耐食材を混ぜて特別に調整した耐食性グリース (Anti-Corrosive Grease) を使用しなければならない。耐食性グリースは高価であり、コストダウンを目指すメーカーがこれを使用したがることも、米国でのアンボンドPC鋼材の腐食破断の原因の一つと言われている。さらに、オーバーシースそのものは防錆効果をもつが、材質としては耐水性に富む高密度ポリエチレンまたはポリプロピレンが推奨され、これによって防錆グリースの耐食性を補完することが大切である。なお、ポストテンション部材における薄鉄板製シースについても、コンクリート打設時に水密性不足に伴う水分の流入の心配があり、やかましく言えば高密度ポリエチレンまたはポリプロピレンシースの使用が望まれる。

なお、ポストテンションPC部材の材端定着部の完全密閉は、PC鋼材の防錆にとっても、また万一PC鋼材が破断した場合の飛出し防止のためにも、たいへん重要である。図-6は、参考までに、Schupackの提唱する定着部の理想的な防錆処理法を示したものである<sup>11), 12)</sup>。この方法はグラウトPC鋼材ばかりでなくアンボンドPC鋼材定着部にも必要である。

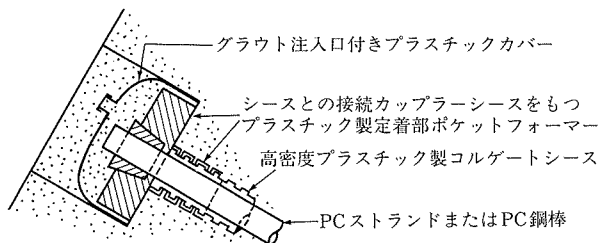


図-6 定着部の防錆方法 (M. Schupack の提案)

#### 4. 樹脂によるPC鋼材防錆

米国では1960年代から冬季における道路凍結防止材の多用による高速道路のコンクリート系橋梁デッキ床版の塩害が激しくなった。そのためコンクリートだけでは鉄筋の防錆がおぼつかなくなり、国家標準局 (National Bureau of Standards—現在の National Institute of Standard Technology) において樹脂防錆被膜の利用に関する研究が開始された。エポキシ樹脂を含む種々の有機防錆被膜につき、化学薬品に対する抵抗性、耐久性、被膜の鉄筋との一体性、コンクリートと被覆鉄筋との付着性、防錆力などの評価が行われ、鉄筋被覆に適する4種類のエポキシ粉末を選定、1970年代初めには被覆厚さ0.128 mm～0.229 mmのエポキシ被覆鉄筋を標準化した<sup>17)</sup>。その後1970年代末までの間に17州においてエポキシ被覆鉄筋の橋梁デッキ床版への使用が標準工法として採用され、他の9州においては試験的に使用されるに至っている。1987年には41州においてオーバーレイなしに使用される橋梁デッキ床版にエポキシ被覆鉄筋が使用されている。しかし、1988年に至って、建設後5年～7年しか経過していないフロリダ半島南端のサンゴ島群 (Florida Keys) を連絡する海上橋 (Long Key Bridge) の基礎部材、橋脚、クロスタイなどでエポキシ被覆鉄筋の発錆劣化による被害が発生し、その後数年の間にその他の主要橋梁4橋にも同様の被害が発見されている<sup>18)</sup>。

これらの予期せざるエポキシ被覆鉄筋における早期の塩

害発生を受けて、米国各州でその原因の早急な究明が行われ、エポキシ被膜の鉄筋表面からの肌離れが起きると錆が発生しやすくなること、肌離れ部分の鉄筋の腐食は裸鉄筋の場合と同様の過程で進行すること、エポキシ樹脂被覆加工時に発生する被膜欠如部分 (Holiday) の量は可能な限り少なくすることが肝要であることを明らかにした<sup>17), 19), 20)</sup>。これらの研究結果を受けて、米国標準局は1989年にエポキシ被覆厚さ規定値を0.127 mm～0.3 mmに、さらに、1992年には0.175 mm～0.3 mmに改めている。

PC鋼材のエポキシ樹脂被覆防錆は1984年にPCストランドについて行われ、実用化されたのが最初である<sup>21)</sup>。PC鋼材はすでに前項で述べたように、腐食しやすい性質をもち、かつ腐食がPC鋼材の破断に繋がると構造物の崩壊にも繋がりがねないものであるために、一般には表面被覆厚さを大きくする必要がある。PCストランドに対するエポキシ被覆厚さは0.63 mm～0.89 mmである<sup>12), 21), 22)</sup>。エポキシ樹脂は表面被覆の際に被膜欠如部分 (Holiday) ができやすいことも、被膜厚さを厚くしなければならない理由の一つのようである。そのために裸ストランドに使用される定着具は、エポキシ被覆ストランドにはそのまま使用できず、特別な定着具が必要である。

近年は、外表面の被膜加工ばかりでなく、ストランドの芯線と側線との間の内部空間にも熱可塑性樹脂を充填した、内外完全防錆被覆ストランドが開発され、その普及が注目されている<sup>23)</sup>。

樹脂被覆防錆PCストランドの使用は、エポキシ被覆鉄筋と比べるとはかばかしくない。その理由としては、

- ① PC鋼材は高強度で密実なコンクリートで十分防錆されており、コストの高い樹脂防錆ストランドを使用する必要性が一般には理解されていないこと
- ② PC鋼材のかぶり厚さは一般に鉄筋コンクリート部材と比較して大きく、コンクリートによる防錆効果が大きいこと
- ③ ポストテンション部材ではポリプロピレンシースの利用により、これがコンクリートの防錆機能を補完する二重防錆の役割を果たすものと理解されていること
- ④ 防錆表面の平滑度が大き裸PCストランドと比べてコンクリートまたはグラウトモルタルとの付着性が著しく劣ること

などが挙げられる<sup>22)</sup>。しかし、外ケーブル工法には防錆の完全を期すために樹脂防錆ストランドの使用が適しており、また、腐食環境条件が厳しくなることが予測される将来においては、PC部材についても、コンクリートによる一次防錆と鋼材樹脂被覆による二次防錆の二重防食の必要性が要求される時代が到来すること必定と判断され、徐々にではあるが、今後の需要が増大するものと期待される。

#### 5. 結 言

本報は、コンクリート系構造物の耐久性向上の基本はどこにあるかを筆者なりに述べたもので、要点を記載すると以下のとおりである。

- ① 耐久性向上の基本の第一はコンクリートにある。耐

久性阻害物質の外部からの浸透を阻止できる水セメント比40%以下の高強度、高密度コンクリートの使用が必須である。

- ② ポストテンション部材ではいくら密実なコンクリートを使用しても、グラウト（アンボンドPC鋼材では防錆材）、シーズ、定着端など、思わぬところにPC鋼材発錆原因となる落とし穴がある。
- ③ 樹脂被覆をしたからといって、被膜の肌離れ、加工時の被膜欠如部分（Holiday）の存在がPC鋼材発錆の原因となることがある。樹脂だから防錆は完全と勘違いしてはならない。

これらを総合してとくに記しておきたいことは、耐久性向上には上記①のコンクリートを密実にする、次いで上記②、③などの措置を行うこと、そして、これらを併せ行って二重または三重のバリアを構築し、PC鋼材防錆の完全を期すことである。上記①～③の1つを実施すれば他の措置は行わなくてもよいとする考えは、耐久性向上には禁物と心得ていただきたい。

参 考 文 献

- 1) 佐伯：コンクリート橋の塩害について、昭和58年度PC技術協会講習会テキスト、pp.117～123, 1984.1
- 2) Browne：Durability of Reinforced Concrete Structures, Proc. of the Pacific Concrete Conference, Auckland, New Zealand, Vol.3, pp.847～886, 1988.11
- 3) Peterson：Survey of Parking Structure Deterioration and Distress, Concrete International, Vol.2, No.3, pp.53～61, 1980.3
- 4) Czernin：Cement Chemistry and Physics for Civil Engineers, Bauverlag, Wiesbaden und Berlin, p.63, 1980
- 5) Klopfer：Carbonation of External Concrete and How to Combat it, Bautenschutz und Bausanierung, Jg.1, Ht.3, pp.86～97, 1987.5
- 6) Schupack：A Survey of the Durability Performance of Post-Tensioning Tendons, Journal of the ACI, Vol.75, No.10, pp.501～510, 1975.10
- 7) Schupack：Grouting Aid for Controlling the Separation of Water for Cement Grout for Grouting Vertical Tendons in Nuclear Concrete Pressure Vessels, Presented at the University of York, England, 1975.9
- 8) Schupack：The Behaviour of Twenty Post-Tensioned Test Beams Subjected to up 2 200 Cycles of Freezing and Thawing in the tidal Zone at Treat Island, Maine, ACI SP65, pp.133～152, 1980.8
- 9) O'Neill：Durability and Behaviour of Prestressed Concrete Beams, Report 4, Post-Tensioned Concrete Beams Investigation with Laboratory Test from June 1961 to September 1975, Technical Report No.6-570, Office of Chief of Engineers, U.S. Army, 1977.2
- 10) Schupack, Suarez：Corrosion Embrittlement Failures of Prestressing Systems in the United States, Presented at the FIP Symposium on Stress Corrosion of Prestressing Steel, Madrid, Spain, 1981.9
- 11) Schupack：Prevention of Failures Related to Corrosion of Post-Tensioning Tendon Systems in Concrete Structures, Proc. of the 9th FIP Congress, Stockholm, Sweden, Part 3, pp.110～117, 1982.6
- 12) Podolny, Jr.：Corrosion of Prestressing Steels and its Mitigation, PCI Journal, Vol.37, No.5, pp.34～55, 1992.9/10
- 13) Hope, Ip：Grout for Post-Tensioning Ducts, ACI Material Journal, Vol.85, No.4, pp.234～240, 1988.7/8
- 14) Schutt：Improvement of Performance of Grouts for Corrosion Protection of Post-Tensioning Tendons by Silica Fume Addition, Proc. of the 11th FIP Congress, Hamburg, Germany, Vol.2, Part 1, pp.70～73, 1990.6
- 15) 辻, 池田, 橋本, 浦野：高強度PCグラウトの製造に関する基礎研究, プレストレストコンクリート, Vol.36, No.3, pp.47～55, 1994.
- 16) 橋本, 辻, 杉山, 金井：高強度PCグラウトを用いたPC鋼より線の付着性状とPRCはりの曲げ性状, 第5回プレレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, pp.7～12, 1995.10
- 17) Pyc, Weyers, Sprinkel, Weyers, Mokarem, Dillard：Performance of Epoxy-Coated Reinforcing Steel, Concrete International, Vol.22, No.2, pp.57～62, 2000.2
- 18) Read：Need for Correct Specification and Quality Control, Concrete, Vol.23, No.8, pp.23～28, 1989.8
- 19) Samples, Ramirez：Field Investigations of Concrete Bridge Decks in Indiana, Part 1：New Construction and Initial Field Investigation of Existing Bridge decks, Concrete International, Vol.22, No.2, pp.53～56, 2000.2
- 20) Samples, Ramirez：Field Investigations of Concrete Bridge Decks in Indiana, Part 2：Detailed Investigation of Existing Decks, Concrete International, Vol.22, No.3, pp.59～63, 2000.3
- 21) Dorsten, Hunt, Preston：Epoxy Coated Seven-Wire Strand for Prestressed Concrete, PCI Journal, Vol.29, No.4, pp.120～129, 1984.7/8
- 22) Hampejs：Epoxy Coating of Prestressing Steel, FIP Notes, pp.4～10, 1989.1
- 23) Muguruma, Takeda, Tanno, Minami, Uchida：Innovative Corrosion Protection Prestressing Strand for Post-Tensioning, Proc. of the FIP Symposium on Post-Tensioned Concrete Structures, London, Vol.2, pp.687～694, 1996.9

【2000年5月25日受付】