

PC構造物の点検・診断と維持補修技術の歩みと展望

森元 峯夫*

1. ま え が き

PC技術が1928年に実用化されて、70年が経過している。その間、フランス、ドイツ等のヨーロッパを中心として、PC構造物はあらゆる分野に応用されてきた。1960年代のフランスを中心とした原子炉用PC压力容器の設計・施工で、PC構造物は、部材厚5m以上にも及び、気密で、高温・高圧下での極めて厳しい条件においても、放射能漏れもなく、長期に使用されている。また、1962年～1963年にかけて開発されたプレキャストセグメント工法は、世界のビッグプロジェクトの主流をなして、いずれも40年近い実用化を経ている。その間、プレキャストセグメント工法の橋梁が2橋、さらにアメリカでも1橋が落橋している。いずれもPCケーブルのグラウト不良と使用材料の品質に工夫が不足していた。すなわち、PCケーブル周辺のアルカリ環境の不良であった。最も優れた建設技術の一つとしてPC構造物は、長年メンテナンスのことはあまり考えられていなかったのが実情である。コンクリートは鋼ほどには劣化しないと長年言われてきた。しかし、20年ほど前から国の内外でにわかにPC構造物の劣化の問題が取り上げられてきた。

本稿は、20年以前の状況から今日までのこの分野の技術の変遷を概観して、将来展望を述べたものである。

2. PC構造物の診断とリハビリテーションの幕開け

2.1 第8回FIPコンgresでLeonhardt教授の基調講演と日本構造診断技術協会

1982年スウェーデンのストックホルムで第8回FIPコンgresが開催された。このときのFIP会長は、筆者がフランス再留学時にPC構造物の設計と理論（とくに限界状態設計法と大規模構造物への応用）を教わったENPC（フランス国立建設大学院大学）のLacroix教授であったが、ドイツ・Leonhardt教授（1999年12月逝去）が基調講演で、「私が今日高齢になったのと同じように、私が若い頃から設計し建設指導してきた数多くの構造物、とくにPC構造物が私同様、年をとって老朽化してきた。人間と同様に弾性波や超音波

を基本とする手法で診断して、適切にリハビリテーションしなければならない。新設技術の分かる技術者こそがこの問題に取り組んで、構造物の長寿命化を図らなければならない。私のこれからの仕事は、この構造物のリハビリテーションです」と言われ、筆者は感銘とともに心を打たれたものであった。早速Lacroix教授と面談し、ご支援いただくことを約束して、4年後「日本構造診断技術協会」を発足させた。それまで行われていた勘と熟練技術を中心としたものから「ハイテク技術」、とくに非破壊検査法を基本としたハイテク技術や機器を用いての診断を、コンクリート構造物と鋼橋の床版の分野で始めた。

2.2 フランスやドイツを中心とする診断と補修・補強の取組み

フランスとドイツ、オーストリアを訪問して、融雪剤によるPC構造物の劣化や、グラウトの不良などによるシース、PCケーブルの腐食とコンクリートのひび割れの関係など、耐荷力劣化の問題とポリマーをベースとした補修の実態調査等を数回にわたり実施して、日本構造診断技術協会は技術研究の方向づけなどを行ってきた。

フランスのLCPC（土木中央研究所）によるPCケーブルのグラウト空隙を調査するスコルピオンIIなどの応用・実用化等も調査した。これは、 γ 線によるコンクリートの透過撮影技術で、グラウト不充填部分を撮影するものであるが、結局 γ 線の取扱い技術と実施許可資格等のほか、コスト面での不都合からこの試みは中止されていた。

フランスは、非破壊検査と補修・補強についての指針の作成をかなり早い時期に行った。

フランスのSETRAでは、橋梁の点検を、日常点検・1年点検・3年点検・6年点検に区分して、診断の評価を3年点検以上ではIQOA（Image de la qualité des ouvrage d'art：橋梁の品質診断）システムで評価し、その後の定期点検と補修・補強の基本としている¹⁾。

IQOAによれば、構造形式（コンクリート、鋼、石積み、など）ごとに統計的な資料によって定義した規定に従い、外観点検を3年に1回の割合で実施し、損傷の度合がClass 1～Class 3にランク分けされている。その結果は、補修・補強予算の設定にも用いられる。このシステムは1994年以来実施されていて、Class 1～Class 3は表-1に示す分類によっている。

また、点検診断の標準パターンを具体的に絵（図-1）で示したきめ細かなマニュアルによって、通常点検・定期点検の実施を容易にしている。とくに、通常点検・定期点検が、後述するリモートセンシング・モニタリングシステムを有効利用するうえでの初期段階で極めて重要かつ不可欠のものであるから、このマニュアル化とシステム化がたい



* Mineo MORIMOTO

日本構造診断技術協会
会長 工博

へん有効に生かされている。

一方ドイツの場合は、地方の管理事務所単位で数十橋/年くらいで、6年ごとの総点検と3年ごとの補足定期点検を行っているようで、これらは、たとえば DIN 1076 (道路に関する構造物の点検と診断) を基本として実施されている²⁾。

以上のように、フランスやドイツ等と日本では、構造物の建設時期の歴史的違いから点検・診断と補修・補強の実

施においても20年～30年程度の差があると思われる。

わが国でも、建設省土木研究所と日本構造物診断技術協会との長年にわたるコンクリート構造物の診断技術に関する共同研究などで点検マニュアルとその基本が作られていて、実績とともに改善されてきている^{3), 4)}。

PC橋の補修・補強技術は、「より適確な診断と評価に基づいた、より適切な補修材料と施工法の選択が基本である」から、通常点検のほか定期点検とその後の非破壊検査法による診断、さらには後述のリモートセンシング・モニタリングシステムなどによって、早期に損傷を発見し、その原因分析と劣化程度の評価を行ったうえで、適切な使用材料と工法の選定が極めて重要である。

3. PC構造物の劣化原因と診断

PC構造物の物性劣化は、基本的にコンクリートそのものの劣化とこれに起因する鋼材の腐食による体積膨張からのコンクリートのひび割れの複合からなる。

コンクリートの劣化は、以下のものが挙げられる。

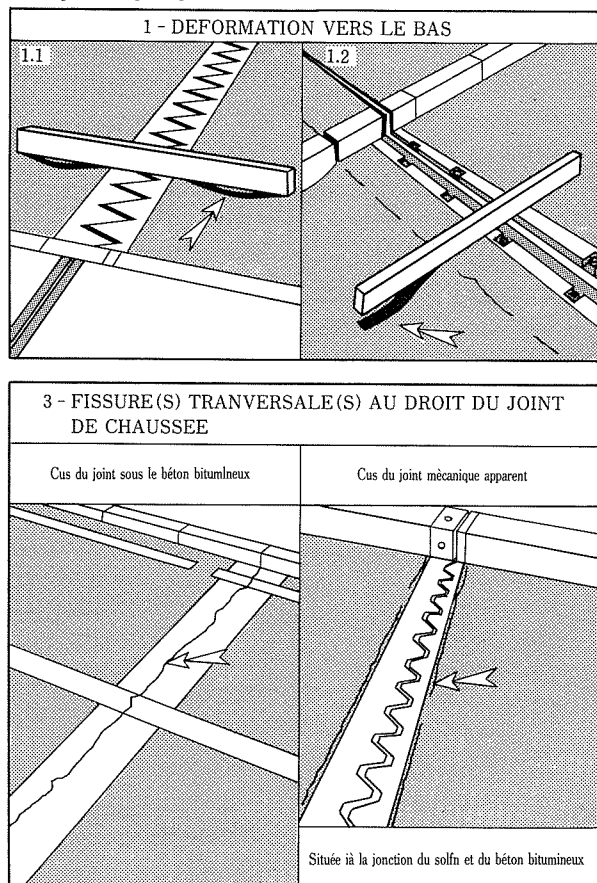
3.1 塩 害

- ① 海水飛沫、融雪剤による飛沫などの塩化物が作用したために起こるコンクリート構造物の劣化 (写真・1, 2)

表-1 IQOAによる判定

Class	診 断
1	健全な状態
2	主構造部分は健全で、他の付属部分の損傷あり －付属設備 (舗装、高欄、ジョイント etc) －保護設備 (舗装、防水、石積み etc)
3	いわゆる構造部材の損傷
Class	評 価
1	健全で補修・補強が不要
2-S	利用者の安全性が問題となる状態で対策必要
2-E	短い期間のうちにClass3に移行する状態で、対策・補修の必要あり
3-U	構造自体の損傷が短期間で重大な状態に進展する－至急要工事

1 Procès-verbaux de visite : Joints de chaussée
Inspection report : pavement joints



2 Procès-verbaux de visits : ponts en maçonnerie
Inspection report : masonry bridges

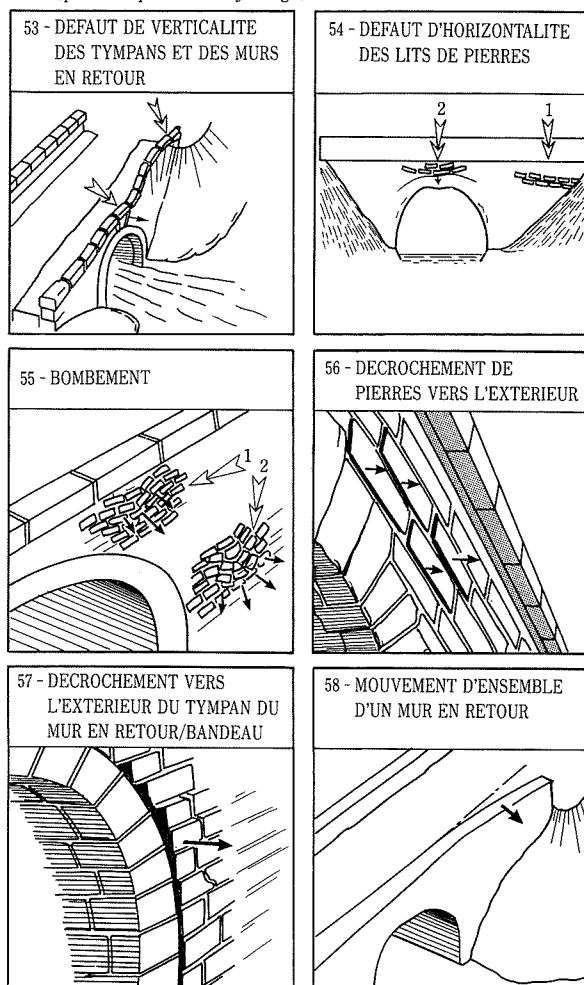


図-1 IQOAによる点検診断の標準パターン例



写真-1 海水飛沫による塩害状況

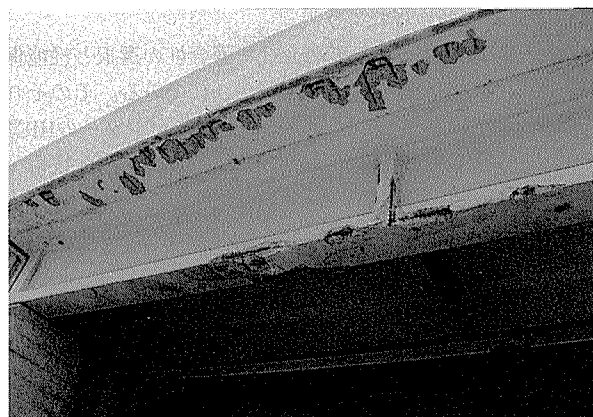


写真-2 融雪剤飛沫による塩害状況

写真-3 海砂使用PC桁のPC内ケーブル沿いのひび割れ発生状況 (含有塩分量Cl制限値 1.2kg/m^3 に対し 35kg/m^3 (補強後の外ケーブル))

- ② コンクリート中の鋼材の急速な腐食と、これに起因する体積膨張によるひび割れ (写真-3)

3.2 中 性 化

二酸化炭素 CO_2 の侵入によりコンクリートのアルカリ環境が中性化することで内部の鋼材の腐食が進み、鋼材の体積膨張によって生じるコンクリートのひび割れ。このひび割れによってさらに CO_2 、あるいは酸性雨や塩分等の侵入が加速されて鋼材腐食・体積膨張・コンクリートのひび割れのサイクルが助長される。

3.3 凍 害

コンクリート表面の激しいスケーリング劣化として現れ

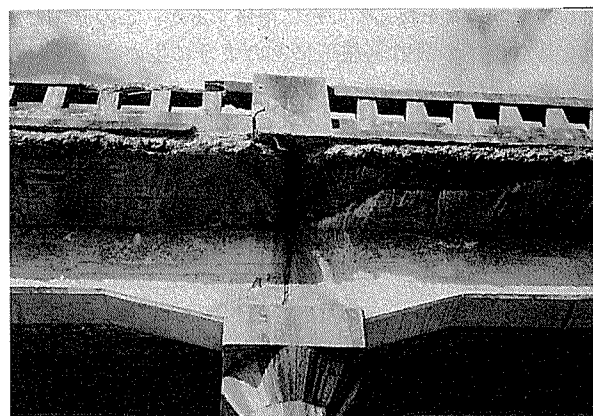


写真-4 塩化物によるコンクリート表面の激しいスケーリング劣化(凍害)



写真-5 塩害によるPCケーブル沿いのひび割れと錆発生状況 (ポストテンションT形桁)

る(写真-4)。

3.4 施工不良によるもの

コンクリートの品質が問題視されているが、PC構造物では、骨材の偏平度や砂の塩分含有量の検査などで一般のコンクリート構造物の品質とは異なり、管理が厳しくなされている。とくに早期にプレストレスを導入するため、強度とプレストレスによる弾性たわみなどの点から品質の管理がなされているが、施工時の施工不良が時折見られて、これが耐久性劣化の誘因となっている。

- ① 鉄筋位置とかぶりの確保：鉄筋のかぶりの不十分さ、コンクリート表面に近い位置での鉄筋の錆び
- ② コンクリート打設時のコンクリート締固めの不十分さと鉄筋やシースの下面の空隙とブリーディング残留
- ③ 金属スペーサー等の処置の不十分さからコンクリート表面近くの鋼材の露出と錆の発生、体積膨張、ひび割れ発生へと加速
- ④ 鋼製シースの腐食

など、施工不良からの耐久性劣化が考えられる(写真-5)⁵⁾。

3.5 PCケーブルのグラウト問題と劣化

前述のように、フランスでも以前LCPCがグラウトの空隙調査を既設橋梁について γ 線を使用した技術で調査を行い診断した。その結果、空隙周辺のシースの腐食や体積膨張、これによるコンクリート表面までのひび割れの発生、このひび割れが水道や空気道となつての鋼材腐食促進の繰

返しメカニズムを捉えていかに補修するか、この原因と誘因を新設橋梁の設計・施工にどのように生かすかを整理し、改善策が実施されてきた(図-2)。

具体的な対策は、ノンブリーディンググラウトと真空グラウトの実施であり、塩害の考えられる環境でのプラスチックシースの応用などである⁶⁾。

真空グラウトに関しては、目下TGVを中心として、フランス国鉄はすべての鉄道橋のPC橋に真空グラウトで施工す

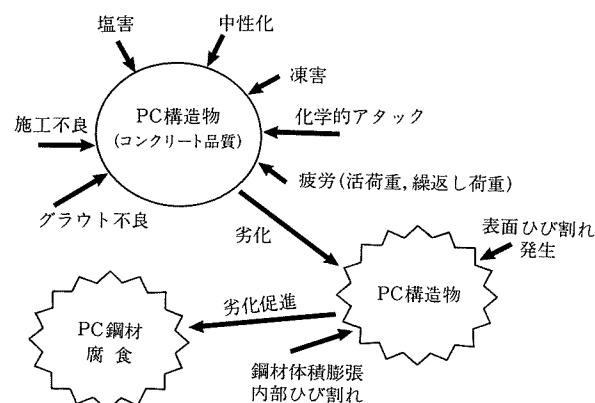


図-2 PC構造物の物性、耐力劣化の進展モデル

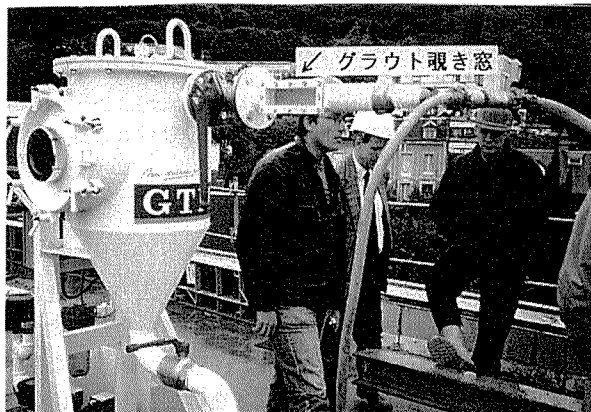


写真-6 真空ポンプの分岐装置

ることを義務づけている(写真-6)。これは、道路橋に比べて活荷重による応力変動割合が大きく、また制動荷重が大きいために、PC鋼材の腐食のほか、コンクリートとの付着が極めて重要なためである。

以上、PC構造物の物性劣化の原因と誘因について概観した。わが国でも通常点検・定期点検・異常時点検を実施して、詳細点検を非破壊検査手法で行い、補修の必要性の判定を行っている。このとき、点検結果に基づく損傷度判定標準を建設省土木研究所の「橋梁点検要領(案)」⁷⁾ではⅠ～Ⅳ分類で行い、補修工法の選定がなされている。

4. PC構造物の補修・補強

前述の劣化要因に基づいた補修・補強工法は、一般に表-2のようにまとめられよう⁹⁾。

これらは、それぞれの専門会社で適合性の選択と性能保証を含めて、技術開発と実用化がなされている。そのそれぞれについては、たとえば財道路保全技術センターのHP登録や、日本橋梁診断技術協会の会員会社の工法・技術・資料等により検索できる。

これらの補強工法の実例を示せば、写真-7～9のようである。

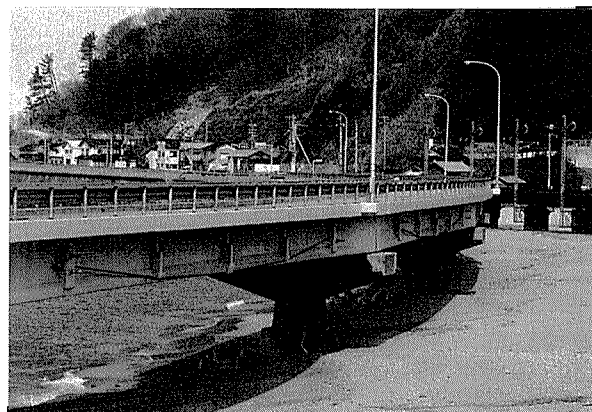


写真-7 PC外ケーブルによるT形桁の補強

表-2 劣化要因と補修

劣化要因	補 修 方 針	補修と補強工
塩 害	・ 侵入したCl ⁻¹ の除去 ・ 補修後のCl ⁻¹ , 水分, 酸素の侵入の抑制 ・ 鉄筋の電位制御	・ 断面修復工 ・ 表面保護工 ・ ひび割れ注入工 ・ 陽極材料, 電源装置
中 性 化	・ 中性化したコンクリートの除去 ・ 補修後のCO ₂ , 水分の侵入抑制	・ 断面修復工 ・ 表面保護工 ・ ひび割れ注入工
凍 害	・ 劣化したコンクリートの除去 ・ 補修後の水分侵入抑制 ・ コンクリートの凍結融解抵抗性の向上	・ 断面修復工 ・ 表面保護工 ・ ひび割れ注入工
化学的コンクリート腐食	・ 劣化したコンクリートの除去 ・ 有害化学物質の侵入抑制	・ 断面修復工 ・ 表面保護工 ・ ひび割れ注入工
疲労(物性劣化と耐力劣化に繰返し疲労の負荷)	・ 軽微な場合には, ひび割れ進展の抑制 ・ ほとんど断面修復と補強に該当	・ 断面修復工 ・ 鋼材防錆工 ・ 表面保護工 ・ PC外ケーブル主体の補強工 ・ ひび割れ注入工
グラウト不良と腐食	・ 劣化, ひび割れ部位コンクリート除去 ・ 鋼材(シース, PC鋼材)の防錆処理, 酸素侵入抑制	・ 断面修復工 ・ 防錆工 ・ 表面保護工 ・ 外ケーブルによる補強工

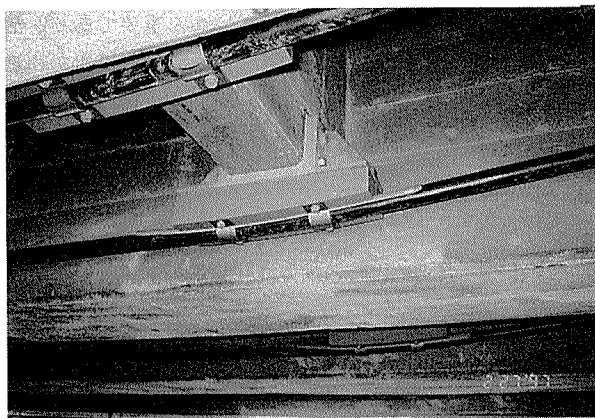


写真-8 外ケーブルによるT形橋の補強（横桁サドル部）



写真-9 外ケーブルによるRC橋脚枕梁の補強

5. 今後の診断システムの展望と耐久性向上

PC構造物の物性・耐力劣化とその診断、とくに補修と補強をどの時点で行うかの判定は、膨大な既設構造物、とくにPC橋の維持・補修・補強とサービスビリティ確保のための予算対策と、実施機関の人的組織構築のうえで極めて重要なプロセスである。筆者は次のことが必要かつ重要であると考えている。

5.1 人材の育成と資格による実務分担

PC構造物の点検・診断や耐久性・耐力の評価能力は、コンクリートおよびPC鋼材の物性に明るく、構造特性や施工法の知識経験が豊富で、非破壊検査法とその適合性をも熟知した技術者で、各種劣化機構の評価ができる高度の理論性と、実践体験の豊富な博士クラスの人材と、これを補佐する人材、さらにはフランスのIQOA システム的な点検とその成果をまとめられるシステムに組み入れられた初級技術者、これら3段階の人材の育成と資格によって実務のプロセスを分担するシステムの構築が重要である。

5.2 通常点検・定期点検・詳細点検(非破壊検査併用)とAE技術によるリモートセンシング・モニタリングマネージメント法の連動システムによる診断

PC構造物は、前述の劣化要因が起因して、使用中に耐力劣化が生じることがあり得る。イギリスの2橋とアメリカの1橋の突然の橋梁崩壊は、ほとんどグラウト不備が主因であったが、このことと他の要因との複合で耐力劣化が生

じ得る。

フランスのLCPCが中心となって開発、実用化されたCASC音響モニタリングシステム (Controle acoustique et surveillance des câbles) は、もともと、Tancarville吊橋 (1959年完成) の主ケーブル補修・補強のために開発された技術であるが、PC橋のPCケーブルの破断予測システムとしても初期段階の実用化がなされている (図-3~5)。

この技術をさらに性能アップし、実施例を増やしなが

5.3 既設構造物対策と新設PC構造物の耐久性向上

既設構造物のサービスビリティ向上と安全と安心を保証するための対応を概観した。

これらの既設構造物の点検・診断や補修・補強の実践から得られた諸々の教訓を新設構造物に反映させて、耐久性

ACTION STRATEGY

Count the broken wires during a given period of time

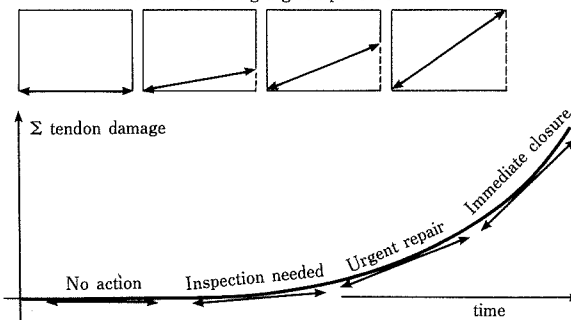


図-3 点検、診断とCASC法との連動性

CORROSION PROBLEMS IN PC BRIDGES

HOW TO DETECT CORROSION BUILD-UP EXISTING BRIDGES?

- VISUALLY (STAIN, CRACKS, COVER SPALLING etc...)
- X RAYS ETC...
- SONIC DETECTION

- Microcracks due to steel swelling
- Breaking wire
- Breaking strand
- Breaking tendon
- Breaking bridge

図-4 PC橋の腐食探知の履歴

AUTOMATIC ALARM AND TELEDIAGNOSTIC

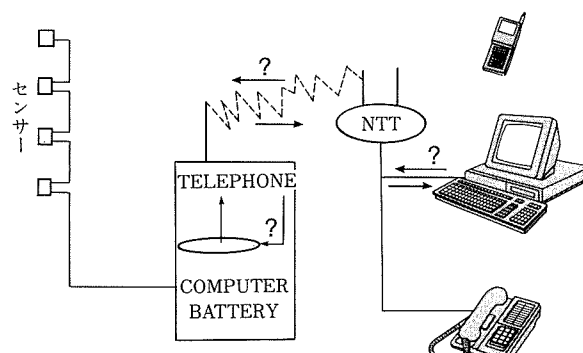


図-5 電話によるリモートセンシング・モニタリングシステム概念図

の向上を図らなければならない。新設構造物の耐久性向上は、LCCミニマムと性能(コスト、品質、適合性)の裏付けが必要である。とくに使用材料の最少化ばかりでなく、ソフト技術の高度化による施工法の合理性(省力化、工期短縮)から得られる建設コストのミニマム化と、品質向上が重要な視点と思われる。

耐久性向上の要素は以下のように要約される。

(1) 使用材料

① コンクリート

- 骨材(偏平でないもの)、水セメント比、HPCの使用
- 使用するセメント種類の選別

② 型 枠

- セメントペーストが漏れないこと
- コンクリート表面の水と気泡への対応
- 変形しないこと

③ 鋼 材

- 鉄筋、シース、PC鋼材に関するアルカリ環境の厳しい地域での防錆対策(プラスチックシースの使用等)

④ スペーサー

- 塩害などの厳しい環境では、金属製のスペーサーの使用を避けること

(2) 設 計

- 極端に薄い部材厚を避ける(応力度のみでなく、施工性と乾燥収縮による表面ひび割れ考慮)こと
- 鋼製方杖等と床版、腹部等との取合い
- 表面積の少ない箱桁・中空床版などによって、露出面積を少なくすること
- プレキャストセグメントの目地部シースの、耐水性処置の明記
- 外ケーブルと内ケーブルの併用による、内ケーブルの水平配置
- 塩害・中性化対策としての十分な鉄筋のかぶり
- コンクリート打設のしやすい鉄筋配置、PCケーブル配置

(3) 施 工

① コンクリート

- 打設・締固めと、ブリーディング管理、養生と表面のひび割れ管理(品質向上の管理)

② グラウト

- プラスチックシースの応用、分割練混ぜ方法(SEC練り)などを用いたノンブリーディンググラウトの性能向上¹⁰⁾
- 真空グラウト応用などによる充填度の向上(PC鋼材周囲の十分なアルカリ環境の保証)

以上、PC構造物の耐久性向上について述べた。とくに、

床版横締めケーブルのグラウトはたいへん重要であり、活荷重による繰返し疲労に対し、コンクリートの付着が極めて重要であるとともに床版のひび割れや水の侵入などによる直接的な腐食に対する配慮が必要である。

6. む す び

PC構造物の点検・診断と維持補修技術の歩みと今後の展望についてその概略を述べた。

筆者は、40年間PC構造物の設計・研究・施工に携わり、10年以上点検と診断、さらに補修・補強の分野に関わってきた。いかに美しく、建設地域の環境と条件に適合した性能(コスト、品質、適合性)の高い経済合理性と構造合理性を満たした構造物を創るかということのほか、10年来、いかに耐久性の高いPC構造物を既設橋で、また新設橋で創り出すかを考えてきた。昨年来からトンネルのコンクリート崩落などが社会問題化している。品質・設計・施工の原点に戻り、開発される新しい技術を入念な検証のもと、透明性をもって積極的に応用しなければ、技術の付加価値化と建設産業の生産性優位が築けないとも思っている。

今後、PC構造物の点検・診断や補修・補強の市場規模と技術ニーズはますます増えるであろうが、この分野の成果を新設分野にフィードバックするシステム創りと、技術者が自信と誇りをもてる環境づくりが、何にも増して重要であると痛感している。来る2005年頃までに更なる技術の裏付けと、体制の充実がなされることを祈って結びとする。

参 考 文 献

- 1) Binet, Bois ほか: La maintenance des ponts routiers, Cas des routes nationales, Travaux, N° 719, 1996.4
- 2) DIN 1076, Ingenieurbauwerke im Zuge von Straßen und Wegen, Überwachung und Prüfung, 1999.11
- 3) 建設省土木研究所・日本構造物診断技術協会: 第一次共同研究, コンクリート構造物の健全度診断技術の開発に関する共同研究報告書, コンクリート構造物の非破壊検査マニュアル, 1994.7
- 4) 建設省土木研究所・日本構造物診断技術協会: 第二次共同研究, コンクリート構造物の健全度診断マニュアル(案), 1998.3
- 5) 神田: PC橋における塩害対策(の成果)について, セメント新聞, 2000.6.5
- 6) 徳良: PC橋の耐久性向上に対する取組みについて(委員会報告), プレストレストコンクリート, Vol.41, No.6, pp.56~68, 1999
- 7) 建設省土木研究所: 橋梁点検要領(案), 土研資料, 第2651号, 1988.7
- 8) 山本: 土木コンクリート構造物の耐久性, 維持, 向上等に関する提言(土木コンクリート構造物耐久性検討委員会提言), 建設マネジメント, 2000.5
- 9) 竹田, 増田, 土田, 堅川, 太田: コンクリート構造物の補修・補強技術, 特集・土木構造物の新・補修補強技術, 土木技術, Vol.55, No.8, pp.43~51, 2000.8
- 10) 辻, 宮崎 ほか: 分割練混ぜ方法による高粘性PCグラウトの練混ぜ効果, 第54回セメント技術大会講演要旨2000, p.102, 2000

【2000年8月22日受付】