

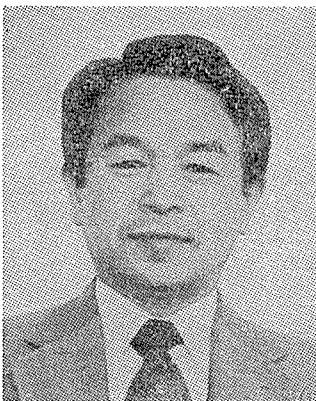
特集

PC構造物の耐久性 とメンテナンス

PC 構造物の耐久性と メンテナンスについて

—PC 橋のロジスティクス考—

岩 松 幸 雄



Sachio IWAMATSU
建設省北陸技術事務所長，工博

1. はじめに

ロジスティクス (logistics) とは目標、計画、実行を支援するための諸資源の要求、設計、供給、維持に関するマネジメントおよび技術的活動の技法と科学である (1966年設立の米国ロジスティクス学会の定義による)。また、ロジスティクスの実務とは製品/システムあるいは設備の誕生、購入、維持保全から退役するまでの効率的で、かつ経済的ライフサイクルに関して、総合的計画と実施を行うことであり、その実をあげるためには科学的分析手法を活用すべしともある。そしてロジスティクスが重視していることは、設備など諸資源のライフサイクルコスト (life-cycle cost) であり、ライフサイクルコストとは設備が供用期間に要する各種の費用の総合計のことである。

さて、いきなり“ロジスティクス”などと耳馴れない言葉を持ち出したのは、われわれが PC 構造物の耐久性ないしはメンテナンスのことについて論ずる場合の基本をここに置くべしと思慮したことによる。供用期間については昭和 45 年度、建設省の委託に基づいて日本道路協会に設けられた道路橋技術基準調査特別委員会が作成した道路技術基準 (案) の 1-4、設計供用年数の項に「橋の設計供用年数は 50 年を目標とする。ただし交換、補修が容易な部材、構造の一部についてはこの限りでない」とあるように、土木構造物のほとんどは世代・体制を越えて機能すべく計画、設計し、施工し、管理すべきものであろうとことは論を待たない。つまり、われわれの技術的諸活動の成果である土木構造物にはライフサイクル (それが物理的にしろ、社会的それにしろ) があることを考慮すべきであらうし、もし土木構造物のすべてが永久構造物であるとすれば、地球全体を造物主に逆らって改造もしない限り、われわれの後輩は失職の憂目をみなければならぬであらう。

ところで鋼構造物は、錆のためにメンテナンスが大変なことはよく知られているところである。他方、セメントコンクリート (以下コンクリートという) 構造物はメンテナンスフリーと言われてきたが、一部のコンクリートダム表面崩壊や海岸近くの PC 橋のあるものは先述の設計供用年数のはるか手前で何らかの手当をしなければならぬものもあることが明らかになってきた。

そこで本稿では PC 構造物の耐久性およびメンテナンスに関する設問として

- ① 耐久性を増すために、またライフサイクルをまっとうさせるために、われわれが行う計画、設計、施工、管理運営段階で何をなすべきか
- ② 既設橋の耐久性、ライフサイクルの延伸について

て、どういう手だてがあるのかを設定し、それを先述のロジスティクスの観点から包括的に考察することが……などと当初は最上段に振りかぶってみたが、とても筆者などの力量に及ばざるところと悟った次第である。特に①の設問の調査・計画から管理・運営までのわれわれの技術活動は連動があると言いはし難く、ワン・バイ・ワンの形で処理されているのが現状であり、PC 構造物関連のみならず、この種の問題は未だ研究段階にあると言えよう。また、②については管内に塩害による補修対象橋をかかえ、その技術的支援をすべき責任者として、仮説に基づく若干の検証実験によって“塩害対策施工指針集”も提案したが、これとても次善の策の域を出ないものと言えよう。いずれにしろ問題提起に終わることになるであろうことをあらかじめお断り申し上げたい。

2. PC 橋の塩害の実態

PC 橋の塩害が卓越して顕在化しているのは、地域的には北海道から本州の日本海側および沖縄全島で、場所は海岸スプラッシュゾーンから 200~300 m 範囲の所で、橋種は PC 桁橋で、中桁のうちでも特に海側から 2 番目の桁下縁といえそうである。それらの中には、すでに PC 鋼材の破断の状態まで至って、単なる補修でなく、アウトケーブルで桁の補強まで行ったものまである。もっとも PC 鋼材まで塩害が進んでいるのは、現在のところ建設省直轄管理の橋では 10 橋ぐらいのことである。また、塩害の傾向は、太平洋側の地域にも散見されるようになっている。

3. PC 橋の塩害の原因

コンクリートは、その水和作用の初期の段階では必要以上の水があつて毛細管空隙を形成して放出し、数十時間経過後からは逆にその毛細管空隙から空中の水分を吸収して水和作用を継続させている節がある（浸透性塗料の実験およびこの仮説の検証のための二、三の実験より）。コンクリートの水和生成物である水酸化カルシウムやセメント中の遊離石灰は、海水に対して可溶性であることはもちろん、雨水に対してもその傾向があり、先述の毛細管空隙を通じて溶出してコンクリートの中酸化現象が生じる。コンクリートの中性化は、コンクリート中の鋼材の錆を増幅することにもなる。本節ではコンクリートおよびその中の鋼材の塩害の理論については割愛し、末尾の参考文献に譲って、PC 橋の塩害の原因について以下に記述する。

3.1 プレストレストコンクリート部材の耐久性に関する問題点

プレストレストコンクリート部材が劣化する原因としては、次の事項が考えられる。

- ① 海洋における各種作用によるコンクリートの劣化
- ② PC 鋼材の腐食
- ③ スターラップ、スペーサーなどの鉄筋の腐食
- ④ 定着体の損傷

上記の劣化を生じさせるコンクリート部材自身に関連する要因としては、

- ① コンクリート使用材料（練混ぜ水、混和材料、骨材表面、養生水に含まれる塩分や硫化物）
- ② 不十分なセメント量
- ③ セメントの品質（ C_3A の量）
- ④ 不適切な設計（断面、鉄筋量等）
- ⑤ 不十分なかぶり
- ⑥ 不十分な養生
- ⑦ ひび割れ
- ⑧ 不十分なグラウト
- ⑨ 不十分な定着体の防護

などが考えられる。上記の項目の中で⑧および⑨は、プレストレストコンクリート部材に特有な項目である。ひび割れの発生原因は多種多様であるが、ひび割れと耐久性の問題の取扱いは、鉄筋コンクリートとプレストレストコンクリートでは相違する。すなわち後者では、一般には設計上ひび割れは発生しない。しかし、海洋環境下では、構造物に作用する波力の大きさあるいは波力分布に関しては不明な事項が多く、設計時に想定した値を上まわる波力が作用することも考えられる。このような過大な外力は設計に関連するものではあるが、一方ではひび割れの発生および閉合による残留ひび割れと PC 鋼材の腐食の問題も検討する必要がある。

また、プレストレストコンクリートの耐海水性は、その応力の導入方式により観点が相違する事項も多い。プレテンション方式では、PC 鋼材そのものの腐食防止を検討する必要があるが、ポストテンション方式ではグラウト、定着体の防護などにも配慮が必要である。プレキャストブロックをプレストレスで一体化する構造物では、接合部の適切な処置を考えねばならない。

PC 鋼材の腐食要因で鉄筋コンクリートと異なるものとしては、応力腐食がある。応力腐食は腐食作用と静的応力とが同時に働いたときに起こる現象であり、延性的な破壊と異なり急激に破断する。

純金属は、どのような激しい環境においても応力腐食は発生しない。すなわち不純物や合金元素が応力腐食発生の一要因である。

プレストレストコンクリート中の PC 鋼材では、

- ① PC 鋼材の結晶組織

② 高い応力

③ 腐食を促進させる化学物質の存在

等の要因が応力腐食発生要因となる。

3.2 環境条件

海水は化学的作用に加えて、コンクリートの細孔に入った塩の結晶化による圧力も、コンクリートを破壊する原因となるであろう。結晶化は水の蒸発点において生じるので、この種の侵食は水面より上部のコンクリート中で生じる。しかしながらその塩の溶液は、毛細管作用によりコンクリート中を上昇するので、その侵食は水がコンクリート中を浸透できる場合にのみ生じるといえる。したがってコンクリートの不透性は、この場合においても最も重要な特性である。

一般に常時海水中にある構造体部分では、コンクリート内の鋼材の腐食は極めて少なく、無視することができる。これは、腐食反応に関与する酸素の海水での溶存量が少ないことに起因する。腐食の最も激しい箇所は、満潮面より上の飛沫帯と考えられる。この部分では、コンクリートへの酸素の拡散が十分なこと、海水がコンクリートを毛細管作用によって上昇し、あるいは波しぶきによって塩分が供給され、水分が蒸発して海水中塩分が濃縮する傾向にあることなど腐食環境が整いやすい。また寒冷地では、飽水状態の硬化コンクリートの温度が低下すると、セメントペーストの毛細管空隙中の水は、岩石の毛細管における凍結と同様に凍結し、コンクリートの膨張をひき起こす。再び凍結すれば、凍結融解の繰返しによる累積効果によって、さらに大きな膨張が生じる。

3.3 施工条件

(1) プレテンション方式

プレテンション方式によるプレストレストコンクリート部材では、PC 鋼材の腐食を防止するための適切なかぶりを定めることが重要である。一般に鉄筋コンクリートでは、かぶりが小さければ、ひび割れの分散性が高まり、ひび割れ幅は小さくなる。しかし、小さなかぶりすると塩分浸透による鋼材腐食の危険性がある。プレストレストコンクリートにおいても、かぶりが小さいときには同様であって、構造物の所要の耐用年数と共に環境条件等を総合勘案した最適なかぶりを検討することが必要であろう。

(2) ポストテンション方式

定着体の防護が不十分であると、定着体の腐食、さらには PC 鋼材の腐食をうながす。定着体の防護からは、コンクリート部材端部に定着体を埋め込み、PC 鋼材を定着させる内部定着方式が外部定着方式よりも跡埋めが少なく、適切な方式と思われる。しかしこの方式では、応力導入やグラウトなどの施工面での難しさがある。施

工上からは、外部定着方式が望ましいが、定着体の腐食に対する防護、施工性の両者を勘案した定着方式の開発が望まれる。

4. PC 橋の塩害対策

4.1 実橋の診断とその判定基準の設定

対策作業に先だって、当該橋梁の実態を調査し、その損傷の程度を判定することが必要である。そこで、その調査方法と調査成果に基づく損傷度の判定基準の設定が求められるところである。現在は、試行的に 6 ランクぐらいに損傷度を分類し、それに従って対策の工法、工程、表面処理（塗装）等を対応させている。

4.2 応急的または短期的対策

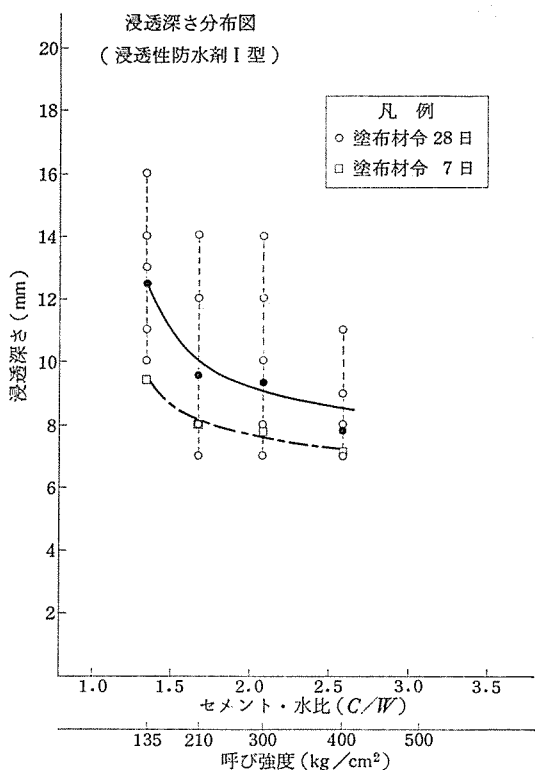
本節で述べる対策は、すでに施工された橋を対象とする。

(1) 塩害が顕在化している場合

架設後約 10 年以上の時間が経過し、錆汁が外見し得る程度以上の損傷を対象とする。したがって、すでに顕在化した塩害を受けているものについては、当初の機能を有していないことが考えられるため、注入工法、パテ工法、鋼板接着工法およびプレストレスト導入工法により既設橋に生じた損傷を直し、もとの機能を回復させる対策となる。この場合、北陸地方で一般的に行われる工程は、①損傷部分およびその周囲のはつりおよびブラスト、②はつり部分の鋼材の錆止め、③断面修復およびブラスト、④全面塗装、といったものである。そしてこの場合の問題は、どこまで、どういう形にはつれるか、断面修復にどんな材料を用いたらよいか、そしてどういう塗装系のものなら安く、そして長持ちするのかである。

断面修復にはプレパックスドコンクリートによるほかに、この場合、①過去の施工では旧コンクリートとの間に空隙の生じた形跡のあること、また、②断面修復のエポキシ樹脂の付着性等の耐久性に疑問なしとしないなどから、室内実験等によって得た結論を現場で検証することになっている。①については損傷部分のはつりで凹部をつくらないようにすると共に、断面修復時のモルタル注入時のエア抜きパイプの数を必要充分にすると共にパイプを長く高くして時間をかけて注入すること。②については鋼材の防錆工を施したのち、はつり面に浸透性塗料（設計強度 400 kg/cm² のコンクリートで 10 mm 近く浸透し、透水 0 に近いもの）を塗布し、旧コンクリートと絶縁したのち、付着性の期待できるポリマーコンクリートによって断面修復を行うことも検討している。また断面修復後の塗装時期は、修復に使用した材料が所定の強度になってからが望ましい。

北陸技術事務所では PC 橋塩害対策に関する一連の試



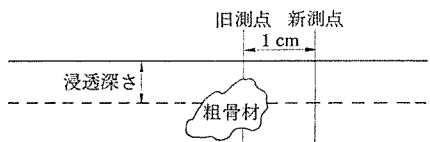
浸透性試験

浸透性防水剤 I 型 (標準用)

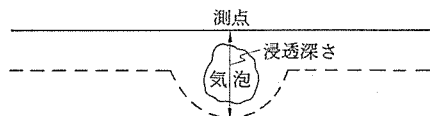
コンクリート 配合名	塗布材令 7 日 (mm)				塗布材令 28 日 (mm)			
	測定値		平均		測定値		平均	
135-8-20	12	12	10	9.4	14	14	16	12.5
	11	8	7		11	15	10	
	7	9	10		11	10	11	
210-8-20	8	6	9	8.0	7	7	8	9.5
	7	7	7		7	12	14	
	13	7	8		12	8	8	
300-8-20	11	6	6	7.8	—	14	7	9.3
	8	6	11		7	8	12	
	6	9	7		7	10	10	
400-8-20	7	8	10	7.2	7	9	11	7.8
	6	7	6		7	8	7	
	5	7	7		7	7	7	

備 考

1) 計測中の測点に粗骨材があった場合は、1cm横を計測。



2) 測点に気泡があり、値の大きい場合は、そのまま測定値とした。



コンクリート浸透性防水剤 I 型の浸透性試験データ

験としての「断面欠損部補修工法に関する調査試験」および「コンクリート浸透性塗料に関する調査試験」によって得た若干の知見や、これまでの各地のこの種の作業実績等を参考に、近く地建管内で行われる補修工事の施工指針とでも呼ぶべきものを、次のような目次で、地建道路部や関係工事事務所の支援のもとに整理中である。

1. 概 説
 - 1.1 適用範囲 (応急的または短期的対策)
 - 1.2 対策手順
2. 事前調査
 - 2.1 目 的
 - 2.2 調査手順
 - 2.3 外観調査
 - 2.4 内部調査
3. 素地調整
 - 3.1 目 的
 - 3.2 対象範囲の設定
 - 3.3 素地調整作業の留意事項
4. 断面の修復
 - 4.1 目 的
 - 4.2 施工手順
 - 4.3 防錆・防水処理
 - 4.4 プレパックドコンクリートによる修復
 - 4.5 パテ材による修復
 - 4.6 注入による修復
5. 塗 装
 - 5.1 目 的
 - 5.2 コンクリート塗装
 - 5.2.1 被塗装体としてのコンクリートの特性
 - 5.2.2 コンクリート用塗料の要件
 - 5.3 塗装の設計
 - 5.3.1 設計上の留意事項
 - 5.3.2 塗装仕様
 - 5.4 塗装作業
 - 5.4.1 作業上の留意事項
 - 5.4.2 塗 装 法
6. 施工管理
 - 6.1 素地調整
 - 6.2 断面修復
 - 6.3 塗 装

(2) 塩害が潜在化している場合

架設後5年以内ぐらいで、外見上は何ら損傷が見受けられないが、環境条件等勘案すれば何らかの対策が必要な場合を対象とする。このように未だ塩害の認められないものについては、コンクリートの劣化および鋼材の腐食の発生や進行を防ぐ対策となる。また、この場合の代表的な工程は、①全面ブラストまたは洗浄、②全面塗装、である。この場合の塗料は浸透性で吹付け塗布が可能なが望ましい。吹付け可能な塗料であれば、自動化することによって足場が不用になり、作業環境の劣悪さも気にならない。筆者らは、この作業の路面からのマ

ジックアームまたはマジックハンドによるロボット化の可能性について検討中である。

4.3 根本的または長期的対策

本節で対象とする対策は、これから塩害を受けると予想される計画、設計中の橋である。

4.3.1 計画上の対策

計画上からは、①ルートを変更する、②飛沫帯を解消するために海岸工事を併用する、③桁断面をボックス形にする、などのほか①および②とも関係するが、④リダンダンシイ (redundancy) を考慮した計画とすることが肝要であろう。現在の塩害が顕在化している PC 橋の架設地先の環境は、非常時の代替路線が近くにないところが多く、また橋梁にライフサイクルを設定し、路線のライフサイクルコストを考慮すれば、計画に際して次期架替え時に備えた余裕を持った計画とすることが必要であろう。

4.3.2 設計上の対策

(1) 鋼材のかぶり

かぶりのコンクリートは、①腐食因子の鋼材表面への到着を遅らせる。②発生した腐食による膨張力に対して縦ひび割れの発生を抑える、などの役割を果たしている。

最小かぶりは、コンクリート内部にある組立て鉄筋等をも含めた全鋼材を対象とし、コンクリートの最小の被覆厚をとる。

(2) ひび割れ幅の制限

ひび割れは、①コンクリートの材料的性質に関するもの、②施工方法に関するもの、③使用・環境条件に関するもの、④構造や荷重作用に関するもの、など多様な原因によって発生する。一般に設計に対処しているひび割れは④であり、特に曲げひび割れが対象となっている。また、乾燥収縮、クリープ、温度変化などの体積変化に関連するもので、断面力計算に算定可能なものは荷重作用に含められる。

曲げひび割れの制限方法としては、

- ① 鉄筋の引張応力度に制限を設ける。
- ② 鉄筋の配筋方法を規制する。
- ③ 許容ひび割れ幅およびひび割れ幅計算式を示す。

などの方法が考えられる。

(3) 断面の変更

現在の PC 桁橋は、スパン中央ではウェブを細くし、ハカマ部分を大きくした形になっているが、コンクリートの品質管理および出来形管理、そして鋼材の配置管理等のことを考えれば、桁端と同じような、ズン胴型の断面にすることを考えるべきと思われる。

(4) 鉄筋使用量の制限

現在の PC 橋は、 100 kg/m^3 以上の鉄筋が使われているが、筆者が PC 橋を設計していた 30 年代当初頃は、その半分ぐらいであったと記憶している。鉄筋量を増すことは計算上は有理であっても、実際に施工する場合、コンクリートの材料分離の原因となりジャンカを生じることにもなる。PC 橋の塩害の引き金が鉄筋であることを勘案すれば、鉄筋量の問題も考慮の対象にすべきと思われる。

4.3.3 施工上の対策

(1) コンクリートの品質

コンクリートが内部の鋼材に対して十分な防食機能を有するためには、施工時のコンクリート中に有害量の腐食物質を含有せず、かぶりコンクリートに部分的な欠陥がなく均等質であり、完成後も腐食物質の浸透に対してこれを抑制する十分な水密性を有すること、そして中性化しないことが大切である。

上記の条件を満足するために、コンクリートの品質として、防食の区分、施工条件（気象、海象を含む）などに最も適した材料を選定し、配合を定めなければならないと共に、毛細管空隙を浸透性塗料等で塞いで外部との水や空気の交換を遮断する。凍結融解作用を受ける地域の海面下を除いた部材では、水セメント比や空気量に対する配慮が最も重要である。一方、温和な地域では、セメントの種類、水セメント比やセメント量などに慎重な配慮が望まれる。

(2) 施 工

施工環境の厳しい海洋での工事は、必要最小限とするのが原則であるが、大規模な海洋構造物では、部材の接合など海洋工事が必要となることが予想される。この場合、設計上考慮された基本的事項を忠実に満足させるためには、施工環境ばかりでなく、使用材料の入手と運搬方法、施工能力、労働条件などをあらかじめ調査・検討し、これに見合った作業手順による工程計画、労務計画、資機材調達計画、あるいは品質管理等の計画を作成し、これを遵守しなければならない。特に材料の貯蔵や運搬中に波しぶきや海水の侵入が起りやすく、材料が劣化しやすいので配慮が必要となる。また、厳しい条件下では、接合部は構造上はもとより防食上も最大の弱点となりやすく、飛沫帯や海中での部材接合は極力避けた方がよい。

4.3.4 管理上の対策

管理上からは、損傷の早期発見に努め、初期のうちに補修を行う。また、維持の面からは定期的に洗浄することも有効と思われる。この場合の点検や洗浄は 4.2 の対策の項で述べた塗料吹付けロボットのマジックハンドのアタッチメントの交換で可能となるような検討も望まれ

よう。

5. おわりに

以上は、筆者にとっても焦眉の急である PC 橋の塩害を中心に記述したが、編集委員会から依頼された題名と内容が異なるものになった感なしとしないと共に、後掲の文献を参考にしたにもかかわらず、結果的には筆者の独断と偏見でまとめた部分もなしとしない。それでもあえてまとめたゆえんは、従来の“造る理論”から“管理運営の理論”へと一歩でも領域の拡大をと筆者なりに思慮したからでもある。

構造物が壊れるから仕事（それはリビルディング関連のみでなく、より明確なライフサイクルの設定のための調査研究も含めて）ができて良いではないか、というのは暴言だとしても、土木構造物が永久不変だという神話はこのあたりで崩すことが必要であろう。われわれの先輩がコンクリートのプロトタイプとした岩とても、例えば 30 年前にはテカテカと黒光りしていた桜島の溶岩がウェザリングには抗すべくもなく、今では直径 20 cm 近い松が生えている状態に変質している。他方、その対岸の鹿児島市には、時代的には長崎市のそれとは少し遅れるとしても、数百年近い供用期間のあるメイソンリー・アーチが巖として存在している。このことはわれわれがコンクリート構造物について考える場合、心すべき示唆を含んでいると言えよう。

“形あるものは滅する”という諺をもち出すまでもな

く、われわれの身のまわりの技術生産物すべてを、そのつもりで接し、使っている。国中を橋やトンネル、ダムだらけにするわけにいかないはずであり、さすれば土木構造物は壊れるし、修理も必要な他の技術生産品と同じだとしなければ、土木技術者はわが国ではそのうち不要となりかねない。つまり、他の分野の技術者の生産対象物が寿命があり、壊れるからこそ、次のイノベーションにつながるという思考を、われわれ土木技術者も通常の感覚とすべき時なのではなからうか。そして今こそ、ライフサイクルコストを考慮したメンテナンス技術、およびその思想について検討すべき時でもあろう。

先にお断り申し上げたように、問題提起に終始したようで、筆者自身じくじたるものなしとしないが、いずれにしるコンクリートが単に力学的特性のみでなく、他の面でも岩をものぐ特性をもったものにできることを期待して稿を閉じたい。

参 考 文 献

- 1) プレストレストコンクリート, Vol. 17, No. 1, 1975
- 2) コンクリート工学, Vol. 19, No. 3, 1981
- 3) セメントコンクリート, No. 421, 1982
- 4) ネビルのコンクリートの特性
- 5) 北陸技報, 第 9 号, 1982
- 6) 第 157 回コンクリート講演会テキスト, 1982
- 7) プレストレストコンクリート技術の現況 (新潟特別講演会テキスト), 1982
- 8) Encyclopedia of Association National Organizations of the U.S.

◀刊行物案内▶

プレストレストコンクリート構造物設計図集 (第 2 集)

本書は協会設立 20 周年行事の一環として、前回発行した設計図集の様式にならい編集した、その第 2 集です。協会誌第 10 巻より 21 巻に亘る巻末折込付図を主体とし、写真ならびに説明を付し、その他参考になる PC 構造物についてとりまとめた設計図集で、PC 技術者の座右に備え付けるべき格好の資料と考えます。

希望者は代金 (現金為替または郵便振替 東京 7-62774) を添え、下記宛お申し込みください。

体 裁 : B 4 判 224 頁

定 価 : 9,000 円 (会員特価 7,000 円) 送 料 : 1,000 円

内容 : PC 橋梁 (道路および鉄道) 74 件, PC 建築構造物 25 件, その他タンクおよび舗装等 10 件

申 込 先 : (社) プレストレストコンクリート技術協会

〒102 東京都千代田区麴町 1-10-15 (紀の国ヤビル) 電話 03 (261) 9151