

我が国における PC 技術の発展 の経緯と当面の課題

尾 坂 芳 夫



Yoshio OSAKA
東北大学工学部土木工学科教授

1. はじめに

鉄筋コンクリートの着想は、よく知られているように 1855 年のパリ万国博覧会に出品された J.L. Lambot の小船にその緒がみられる。当時は、一たんその発明が行われると、多くの実家家が競って各種の構造物に工夫をこらし、無数の特許がとられた。しかし、鉄筋で補強されたモルタルの植木鉢やコンクリートのスラブなどには、ひびわれが生じて、その美観が害されるだけでなく、鉄筋が錆びて使用上に不都合が生ずる場合もあったのであろう。そのため、鉄筋コンクリートがいつでも十分満足な構造材料であったというわけではなく、鉄筋コンクリートの研究・開発が進む一方で、はやくからコンクリートにひびわれが生じないようにする工夫が多くの人々によってなされている。

1886 年にはすでに、P.H. Jackson がコンクリート床版に鋼材を用いてあらかじめ圧縮応力を与えておき、ひびわれができないようにする試みを行い、1888 年には、W. Doehring が、プレキャストコンクリート板を鋼線で締めて一体とし、構造物を造る試みを行っている。これらは、Lambot や I. Monnier が鉄筋コンクリートの着想を得てからわずか 30 年ほど後のことであって、当時は鉄筋コンクリート構造について Koenen, Wayss, Bauschinger 等による理論的研究が盛んにすすめられていた時代である。

Koenen は、一方でプレストレスの研究を進めており、コンクリート梁に普通硬鋼を用いて与えた圧縮応力が長時間が経過すると消失し、プレストレスの効果が失われることを実験によって確認している (1907 年)。

Freyssinet は、鉄筋コンクリートアーチ橋の支保工を取りはずした際にアーチ軸におこる圧縮力を人工的に作用させる試みを行い (1906 年)、2, 3 年後には試験用アーチ橋の支点間に張った高強度鋼線に、ほぼ 3 000 ton の引張力を導入している。Dill は、コンクリートに圧縮応力を与えるために高強度の鋼材を用いた (1925 年)。これらの多くの試みがなされたにもかかわらず、長い間プレストレスコンクリートが開発・実用化されるに至らなかったのは、当時はコンクリートの乾燥収縮とクリープ、鋼材のリラクセーションなどに関する実験的知見が不十分であったこと、緊張した鋼材をコンクリートに確実に定着する装置の開発が不十分であったこと、などによるものと思われる。1928 年にいたり、高強度のコンクリートと高強度の鋼材とを用いることによって、初めて Freyssinet が、今日のプレストレスコンクリートの開発・実用化に成功し、さらに彼は 1939 年に、非常に高い引張応力を与えられた鋼材をコンクリート体に

定着する簡単な装置と、鋼材の緊張を容易に行うことができるジャッキとを考案した。今日のプレストレストコンクリートの発達には、Freyssinet によるところがきわめて大きい。

以下に我が国における PC 技術の発展の経緯を眺めながら私見を述べ、今後の技術的努力と反省の糧としたい。

2. 我が国の PC 技術の発展の経緯

我が国にプレストレストコンクリートが初めて紹介されたのは、昭和 14 年であった、といわれている。その時期は、Freyssinet が定着具とジャッキの特許を取得した頃であったから、ヨーロッパにおける PC 技術の誕生期にそう遅れてはいない。しかし、本格的な研究がなされるようになったのは第 2 次大戦後で、文献による情報が得られるようになってからである。1948 年に、鉄道軌道のまくらぎにプレストレストコンクリートを応用する研究が、外国の研究にならってとりあげられ、試作のプレストレストコンクリートまくらぎが敷設された。当初は、プレテンション方式に用いる PC 鋼線を錆びさせて用いるか否かという、今日にしてみれば些細な問題が、研究者にとって重大な研究課題であったようである。

昭和 23 年 (1948 年)、プレストレストコンクリートが鉄道線路のまくらぎとして初めて実用化され、その後 3 年たって、石川県七尾市にスパン 3.82m のプレテンション桁の長生橋が建設された。この分野の実験的な研究が始められたのは第 2 次大戦後であることや、戦後の経済の疲弊、食べるのがやっという最悪の食糧事情などを考えると、わずか数年でここまでこぎつけたのは、関係者の努力のたまものであったと思う。しかし一方、当時諸外国ではどうであっただろうか。プレストレストコンクリートに関する研究論文は 19 世紀末から発表され始めているが、1920 年頃からは水槽、建築物の柱、コンクリートアーチなどへの適用例が少なからず報告されている。昭和 5 年 (1930 年) 頃にはすでに橋梁やダムにも適用され始めており、この頃からは、研究論文の数も急に増えている。ちなみに、我が国でプレストレストコンクリートが初めてまくらぎに用いられた昭和 23 年 (1948 年) の発表論文だけをみても、基礎問題のほか、PC まくらぎ、橋梁、サイロ、塔、岸壁、パイプ、ドーム等々、またプレキャスト方式、場所打ち方式など枚挙にいとまがない。こうしてみると、我が国の PC 技術の出発は、欧米諸国に比べ非常に立ち遅れていたことを痛感せざるを得ない。

我が国のポストテンション方式の橋梁としての最初の

ものは、福井県の東十郷橋である、と聞いている。この橋梁はスパン 7m 程度のものであったが、その後昭和 29 年 (1954 年) になって、スパン 30m の第 1 大戸川橋梁 (鉄道橋) とスパン 40.7m の福島県上松川橋梁 (道路橋) が、ようやくにして建設された。フランスのコバニコフが計算した第 1 大戸川橋梁の計算書を見ると、供用時の PC 鋼材の許容応力度が示されておらず、大変驚いたことを記憶している。当時の PC 技術の導入にはフランスなど外国技術者の指導をうけたことは当然であったであろう。

当時の鉄筋コンクリート技術がどうであったかを、あわせて眺めるとおもしろい。鉄筋コンクリート橋の最初のもものは、明治 36 年 (1903 年) に建設された神戸市内若狭橋 (スパン 3.65m) である、と聞いている。大正の中頃 (1920 年代) になって鉄筋コンクリート橋が一般的に建設されるようになり、昭和 4 年 (1929 年) にスパン 40m 前後の連続アーチ式の万代橋 (新潟市)、昭和 16 年 (1941 年) には、スパン 41m の十勝大橋 (帯広市) が完成している。ラーメン式の橋梁や高架橋も、昭和の初め (1925 年) 頃から建設され、数年にして今日のビームスラブ式ラーメン構造の骨組が完成している。このように見ると、PC 技術の我が国における黎明期には、RC 技術はその古典的な姿で十分に咀嚼され、すでに人口に膾炙していたといえる。このような技術事情の中で我が国にはプレストレスの着想が殆んど全くあらわれ出ななかったのは、また、芽はあったかもしれないが、それが育てられなかったのは、なぜだったのだろうか。

我が国の PC 工法、とくに定着具の開発は、このような事情の中でかなり遅れてスタートしている。私がフランスに留学した昭和 38 年頃、パリーの大学都市の日本館で見た日本の新聞で MDC 工法 (川鉄 KK) が開発されたことを知った。当時、私はこれに大変期待を抱いたものであった。帰国後、いくつかの現場でその施工に関係した。また、その後開発されたフープコーン工法 (日本鋼弦コンクリート KK) は雌コーンのリングテンションと雄コーンのコンプレッションとで PC 鋼線と小さいくさびとがつくるリングを固定する構造である。昭和 40 年頃、日米セミナーでたまたま来日したカリフォルニア大学の Bresler 教授がこの工法に大変興味を示していた。この工法では、コーンが大変小型のものとなっている。安部ストランド工法 (安部工業所) は昭和 30 年頃にすでに開発されたようで、ストランドをばらばらにしてソケット内に挿入し、これに亜鉛を鑄込んで定着する。この開発は、我が国としては、非常に早い時期であった、と思う。OBC 工法 (オリエンタルコンクリート

ト KK) は、PC 鋼より線を鋼製のコーンと特殊な形をしたくさびとで固定する。あらかじめ鋼線の切りそろえを行う必要がないなどの利点をもっている。また、OSP-A 工法 (同) は、PC 鋼線端を冷間でハンマ状に製頭し定着する。定着具は種々の組合せで 9 タイプが利用できる。SM 工法 (住友電気工業) は、くさび型グリップを用いストランドを 1 本ずつ緊張・固定する工法で、専用のジャッキを用い、迅速に作業を行うことができるようである。スリーストランド工法 (国際コンクリート KK) は、PC 鋼より線 3 本を 1 ケーブルとして、三角錐台状のコーンを用い、くさび作用で定着する。

以上のほかに、おそらく多くの人々によって種々の定着具が工夫されていることと思われる。しかし、残念ながら、我が国で開発された PC 工法の多くは、それぞれに長短があり、今日あまり広く利用されていないように思われる。これは、前にも述べたように、PC 技術のスタートが欧米に比べて非常に遅れたことに大きい原因があると思うが、一方、外国技術の導入にあまりに熱心であることにも無関係ではない。これは、フランスやドイツが、お互いに相手国の工法を殆んど使いたがらないように見えることと、きわめて対照的である。我が国の行き方は、先進諸国のレベルに追いつくまでは効果的であったであろうが、少なくともそのレベルに達した後は役に立たないことは明らかである。そのうえ、後で述べるように、今後の国際情勢と我が国の建設事情を考えると、等閑に付するわけにいかない問題である。

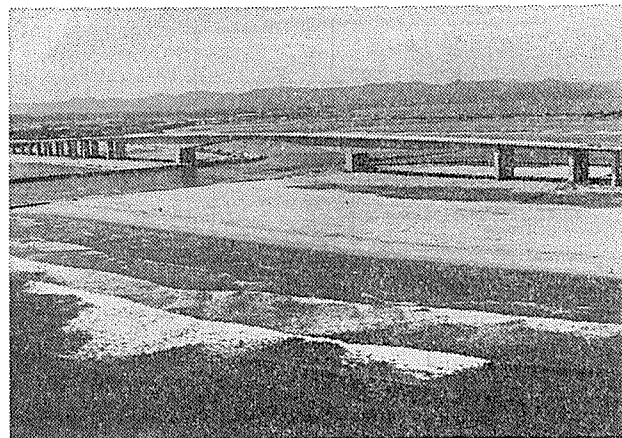
3. 設計と施工の技術

3.1 スパンの長大化と関連問題

我が国における PC は、適用技術の面では顕著な発展を示している。とくに PC 橋は、年々スパンが長大化し、また特殊な構造のものが積極的に建設されてきている。

スパンの長大化の歴史を眺めると、肱谷橋 (昭 35 年、最大スパン 66 m)、盤の沢橋 (昭 36 年、最大スパン 80 m) など、また、昭 37 年には、すでにスパン 100 m の越尾橋が建設されている。さらにスパンの長大化へ大きく踏み出した橋は、やはり天草 3 号橋 (160 m) と 4 号橋 (146 m) であろう。これらの橋梁が完成したのは、昭和 40 年であったが、その後、名護屋大橋 (中央スパン 176 m) が昭和 42 年に完成し、当時、ドイツのベンドルフ橋 (中央スパン 208 m) について、世界第 2 位の長大スパンを誇った。ヨーロッパでは耐震設計上の配慮が不必要であることを考えると、地震国である我が国で、このような長大スパンのコンクリート橋を建造するには技術的に多くの困難を克服する必要があり、価値の

高いものである、とすることができる。しかし、さらに数年後には、この記録は簡単に書き換えられた。昭和 47 年には、最大スパン 230 m の浦戸大橋が、さらに昭和 50 年には 236 m の彦島大橋が、さらに昭和 52 年には 240 m の浜名大橋が、それぞれ完成している。

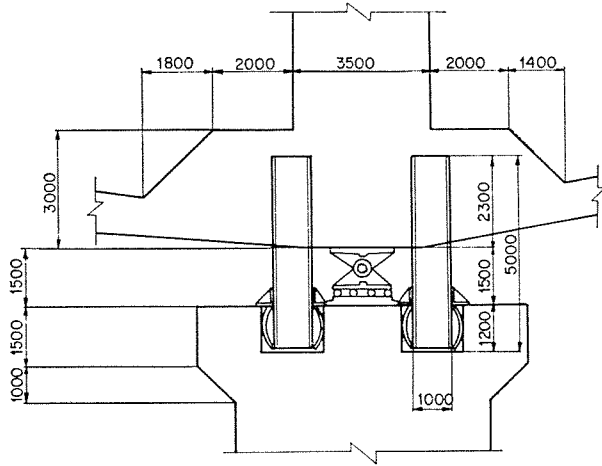


写真—1 浜名大橋

同じ問題を鉄道橋で眺めると、そのスパン長は、道路橋よりも 100 m ほど短い。というよりも、鉄道橋の最大スパンは、道路橋スパンの大略 1/2 で、東北新幹線阿武隈川橋梁の 105 m のほか上越新幹線の吾妻川橋梁と太田川橋梁の 110 m にすぎない。これは、設計活荷重が道路橋のそれに比して非常に大きいことによるものと思われるが、鉄道橋では、道路橋で採用されている中央スパンの中央部にヒンジを設ける構造を採用できないことも大きい原因となっている。また、鉄道線路を建設するルートで、それ以上の長大スパンの橋を建造する必要のある地点が現に存在しないことも事実である。長大スパンのコンクリート橋を建造する際の重要な問題点の一つは、耐震性の検証である。従来、多くの場合、コンクリート橋の動的応答の計算には、質点バネ系の弾性モデルが用いられてきた。しかし、計算結果は、しばしば非常に大きい断面力が得られ、そのままを計算に用いると、経済的に不適當となるだけでなく、構造寸法が実際的でなくなる場合が少なくない。これは、コンクリートのひびわれ発生や塑性化が応答計算の中に適切に考慮されないままに結論を出すわけにはいかないが、今日なお、長大スパンのコンクリート橋について信頼できる弾塑性応答解析の結果を得るために利用できるデータに欠けている、と言わざるを得ない。

長大スパンのコンクリート鉄道橋では、耐震的な支承を伝統的な型で設計することは殆んど不可能である。長大コンクリート橋に支承を避けた中央ヒンジの構造を採用できないことも鉄道橋の特徴である。それで、橋脚が負担する地震荷重を軽減するために、橋桁と橋脚とを弾

塑性的に結合する構造を本格的に採用した初期のものとして瀬田川橋梁をあげることができる。この構造は、その後、次第に改善され、今日では、上記の阿武隈川橋梁、その他、大スパンのコンクリート橋には殆んど、常に採用されている（図一）。

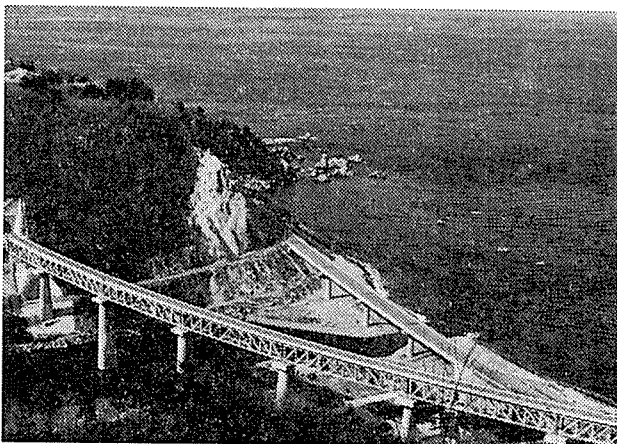


図一 長大コンクリート鉄道橋に用いられる支承の構造

言うまでもなく、コンクリート橋の大きい欠点は、その重量が大きいことである。そのため、スパンの長大化をはかるには、コンクリートの軽量化がどこまで可能か、一方コンクリートの高強度化がどこまで可能か、が技術上の問題点である。筆者らも、この二面作戦で検討を進めてきたが、高性能減水剤の発明によって、後者の方法が非常に大きく進展した。

3.2 いくつかの特徴的な構造

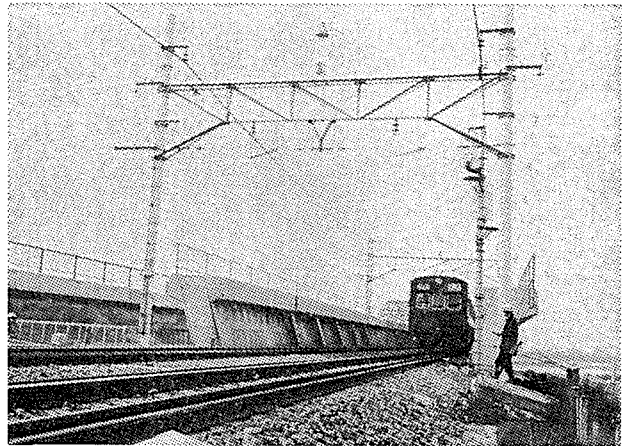
超高強度コンクリートの開発は、構造的な側面にも大きい影響を与えた。その代表的なものの一つとして、コンクリートトラス橋の建設をあげることができる。太田名部橋梁は最初のトラス橋である。そのほかに、この形式の橋梁としては、岩鼻架道橋、安家川橋梁（写真一2）、槇木沢橋梁などが建設されたが、いずれも構造上にも施



写真一2 安家川橋梁

工上にも未解決の問題点が残されており、残念ながら、未だ完成された構造方式とは言いがたい。今後の一層の研究・開発を期待したいところである。

PC 鉄道橋として特徴的なものとして、下路形式の橋梁をあげることができる。歴史的な視点からこの形式の橋梁の代表的なものとして、東北本線荒川橋梁（写真一3）をあげることができる。この橋梁の主桁高さは、構



写真一3 荒川橋梁

造設計の限界状態をより詳細に検討することによって、幾分低くすることができたのではないかと考えている。

PC 斜張橋としては、小本川橋梁（鉄道橋）、松ヶ山橋（道路橋）などが建設されている。この形式の代表的な橋梁としては、フランスの Brotonne 橋があるが、これらを比較するとき、この形式の可能性の徹底した追求をさらに推し進めることを期待したい。それが、未知の新しい可能性を開くことにつながる、と考えるからである。

3.3 施工技術

コンクリートに混和剤を加え、もともとスランプの小さいコンクリートを流動化して用いる研究が進められ、一部、実際に応用されている。これは、コンクリートの高強度化、したがって PC の構造的開発に根幹的な影響をもつ技術であるかから、徹底した研究・開発がぜひ進められなければならない。

PC 構造をプレキャスト化しようとする努力は、かなり早くから行われてきた。この工法は、各種のものが試みられ、それぞれにその長短、技術的可能性などが、一応、明らかにされている、と考えてよいと思う。この工法が大幅に進展しない理由の一つとして、設計荷重時に数 kg/cm^2 程度の圧縮応力を残すように設計する方針をとっていることが考えられる。この方針は、必ずしも正当ではなく、より厳密な検討を急ぐべきである、と考えている。

首都高速道路5号線の高島平高架橋は我が国で初めて
の大型移動支保工によって建設された。近年、この種の
大型移動支保工は、各種のものが技術導入され、実用さ
れている。写真-4 は、最初の施工例である（月夜野大

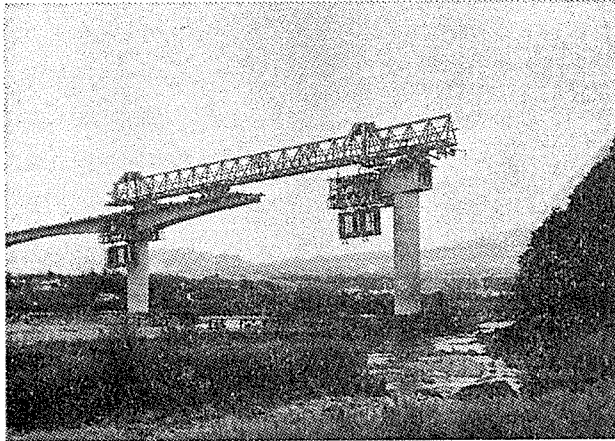


写真-4 月夜野大橋

橋)。また、最近、長大コンクリート連続桁の施工法と
して、古くから鋼桁に用いられてきた押し出し工法が効果
をあげている。幌萌大橋は、おそらく我が国でこの工法
により建造された最初の連続桁である。この工法が重量
の大きいコンクリート桁に用いられたのは、摩擦抵抗が
非常に小さいテフロン板などの特性をうまく利用できた
からであるが、この工法も、技術の主要部分は外国から
導入されたものである。

3.4 独自の技術の開発へ

きわめて地道な技術努力の例として、鉄道線路下を横
断する道路の建造に、最近開発された工法がある。この
工法は、軌道の下に PC 桁を圧入し、永久構造を直接、
簡単に建造するもので、小規模ながら PC の新しい適用
分野を切り開いている、といつてよい（写真-5）。今
後、PC の新分野として大きく期待されているものに、
海岸構造物、LPG・LNG などのエネルギーの備蓄設

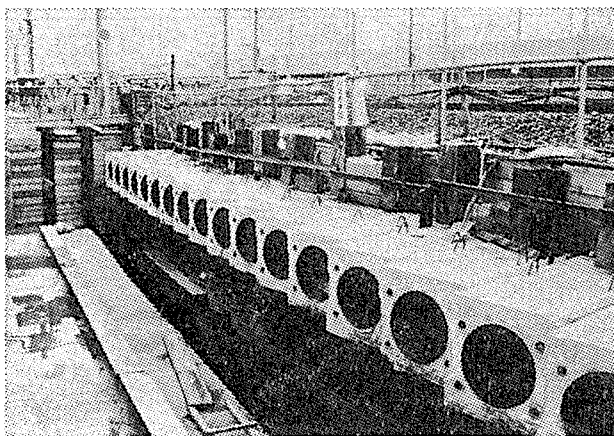


写真-5

備、PCPV などがあるが、関係者の努力によって、こ
の方面への拡大を積極的にはかっていくべきである。

プレストレストコンクリート構造物の建設の中で、ス
パンの長大化や適用構造の拡大は、一般的により重要な
構造物への適用ということの意味しており、一般には、
簡単な構造や短小スパンの橋には現われない各種の技術
的問題を処理する必要を伴っている。したがって、それ
はそれ自体で技術の進歩を示しており、技術者の願いで
あり喜びである。しかし、単にスパン長さを誇るに止ま
らず、この建設の歴史の中で、どのような学問・技術の
問題が我々自身の手で解決されてきたであろうか、を厳
格にみつめておくことが、つぎの項で述べるように、真
の意味の技術の進歩のために不可欠である。

4. 国際活動への参加

我が国の PC 技術を概観すると、当初のプレテン方式
の時期は比較的短く、間もなくポストテンション方式の
時代に入っている。同時に各種の PC 工法が導入され、
その着想のおもしろさと適用の広さ、可能性の大きさに
驚き、もっぱらこれらの“新技術”の“実用化”に努力
が向けられたように思われる。鉄筋コンクリートにあら
かじめ圧縮応力を導入しようという努力が、鉄筋コンク
リート自体の技術の黎明期にすでに開始されているヨー
ロッパでは、技術に対する基本的な態度が我が国と非常
に違うように思われる。我が国では、プレストレストコ
ンクリートが初めて紹介されてから相当長期間にわた
り、プレストレストコンクリートはそれまでの体系化さ
れた鉄筋コンクリートとは全く異質の構造であるかのよ
うな認識が、しらすらすのうちに深く浸透していた。
これは、多くの人々が PC 技術を特殊な先端技術・学問
として欧米から学ぶ、という態度を持っていたことに関
係があろう。最近、ヨーロッパ国際コンクリート委員
会 (CEB) や国際プレストレストコンクリート連合 (FIP)
において、プレストレストコンクリートをプレストレス
の程度に応じて、いわゆる RC からフルプレストレス
の PC まで分類して、統一的に取り扱おうとしている。
この考えは筆者も数年前に CEB の活動報告の中で
紹介したが、この着想は、ヨーロッパでは非常に古い時
代からあったもののように思う。例えば Koennen が、
鉄筋コンクリート梁の構造を、コンクリートで圧縮を、
鉄筋で引張りをうけるように組み合わせるのが有利である
と考えついた頃に、プレストレスの導入を試み失敗して
いることを思えば、鉄筋による補強とプレストレスによ
る補強とは、彼らの中で、むしろ共存していた着想であ
ったといつてよい。

PC 技術について後でスタートした我が国は、欧米の

後塵を拝してきたが、より基本的な、より総合的な、影響の大きい独自の技術ノウハウや発明・特許などを開発していくことが今日の我々の課題ではなからうか。それが、先進国の仲間入りをしようとするためのライセンスである。

最近、情報技術のすばらしい進歩がなされ、世界のどの地域の技術開発も克明に情報を得ることができる。誰がどんなことに興味をもって研究しているか、どの分野の研究がどこまで進んでいるか、など非常によくわかるようになってきている。あわせて、高い生活水準を維持しつづけるために世界経済の利害が密接に絡み合ってきている。この時期に我が国では、国内の社会施設建設の峠を越えようとしており、やがては、より本格的に国際社会の中に活動の場を求めなければならないようになる。海外の工事では、欧米諸国と、いろいろな意味で技術競争を余儀なくされているが、そこでは工事契約の慣行の違いや言葉の問題で、大きいハンディキャップを背負わされている。さらにそのうえ、聞くところによると、最近海外の建設工事に韓国、台湾の人々が進出してきている。この動きは今後ますます盛んになるであろうし、我が国の建設界は厳しい影響を受けることになると考えられる。戦後、ヨーロッパ各国が自国の社会施設の再建・整備の見通しがたった頃、海外へ技術進出したように、我々にその順番が自然にまわってくる、と単純に期待するわけにはいかないのである。ここで我々は国際的な建設技術競争の中で活動の場を獲得していくために、関係者のコンセンサスを得ながら、あらゆる準備を進めていかなければならない。

その一つは設計・施工基準の問題である。現在、CEBやFIPなど、コンクリート構造の設計・施工に関する国際基準の確立をはかるべく活動が盛んであり、事実、

国際的なコンセンサスが得られつつある。設計や施工の基準や考え方の違いが海外における建設工事の活動に支障となると聞いているが、我が国のPC設計・施工基準を国際基準と調和した内容・形式・表現でつくっていくことが当面の急務である。最近、我が国の設計・施工基準を我々自身の独創性に基づいて立案すべきである、との主張が盛んである。勿論、私も異存のあろうはずはないが、独自の知見があるならば、これを国際基準へ直接反映させていくのが、むしろ上で述べた方向への近道である、と私は考えている。

海外の開発途上にある国々は、長い間、政治的にも文化的にも欧米諸国の影響を受けてきている。事実、留学生も優れた人達の多くは、我が国に来ることを希望するよりも欧米を選ぶ。それが帰国後の技術活動に有利であるからである、と聞いている。従来から、我が国は開発途上国との技術協力の進め方が誠にへたである。この技術協力は、目前の利益に直接つながってないように見えても、これを幅広く進めていくために、我々PC技術者もその立場から積極的に参加することが、今後はぜひ必要であろう。東南アジア諸国の中学・高校の教科書に、戦時中の日本人をどのように取り扱っているかをみても、この問題は容易ではない、と考えられるのである。

5. おわりに

以上、我が国のPC技術について最近考えている事項を述べた。依頼を受けた本稿の性質上、基礎的研究の分野における諸問題については、とくにふれなかったが、PC構造の弾塑性挙動と設計方法の問題や、ポリマーコンクリート、鋼繊維補強コンクリート、など興味ある重要な問題は少なくない。十分に意を尽すことができなかつた面が多いが、お許しを頂きたい。

◀刊行物案内▶

穴あきPC板設計施工指針・同解説

体 裁：B5判 128頁 ビニール製の表紙で現場持ち歩きに便利
 定 価：1800円（会員特価：1600円） 送 料：450円
 内 容：1. 総則 2. 材料および許容応力度 3. 部材の設計 4. 構造設計
 5. 接合部の設計 6. 施工（含取付・補修等）

お申込みは代金を添えて、（社）プレストレストコンクリート技術協会へ