

## 技術展望

# コンクリートの活用による橋梁技術の展開

DEVELOPMENT OF BRIDGE TECHNOLOGY BY APPLYING HIGH QUALITY CONCRETE

池田尚治

Shoji IKEDA

正会員 工博 横浜国立大学工学部教授 建設学科土木工学教室  
(〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-5)

*Key Words* : prestressed concrete, precast segment,  
hybrid construction, infrastructure  
structural performance

## 1. はじめに

工学的な立場から橋梁のような特定の技術に関する展望を行おうとする場合、その分野における本質的な価値観を描くことが必要と思われる。即ち、橋梁は主要な社会基盤施設を形成するものであるから社会基盤施設の将来の発展および変転の方向の支配については人類の歴史的事実に立脚した価値観の変動が大きな影響力を持つことを認識すべきなのである。必要は発明の母と言われるように価値ある社会基盤施設に対しては多くの技術開発が期待できるが、一方、環境問題や情報技術の急速な発展によって橋梁のようなハードな社会基盤施設に対する価値観が変動すれば必然的にその技術的発展は影響を受けることとなる。したがって、橋梁技術の今後の展開を考える場合、できるだけ妥当に将来の社会基盤施設の状況とその社会的価値を評価しておくことがまず必要と思われる。

現在までの橋梁技術の展開を見れば長支間化、経済性の追及、高性能化等が中心でありその目指す方向は明確であった。しかしながら橋梁の供給があるレベルに達したと思われる現在、橋梁に対する要望の中に環境問題、財務問題などが顕在化してきている。また、交通路としての橋梁の需要は交通量の増大に起因してきたが、人や物の移動から情報の移動へと移りつつある今日、今後の社会基盤施設における橋梁の役割を明らかにしておくことが重要と思われる。

現代は人工物の時代と言われている。橋梁はその代表的な人工物のひとつである。人間と人工物が自然の内に存在しお互いに影響を及ぼしあっている。人工物である都市はほとんどの場合、自然発生的に成長し、そこに橋梁の需要が生じた。その橋梁の建設の過程と建設後の存

在とが自然や人間に何らかの負の影響を与えることも生じてきた。このような状況の中で橋梁の技術的展開を求めようとすれば決して明るい発想は生じ得ない。何故ならこの状況は受身の状況だからである。そこで現代が人工物の時代であることを明確に認識し、能動的に人工物を構築するようにすれば自然環境とも積極的に調和することが可能となり持続可能な社会を形成することができるものと思われる。橋梁は人工物の中でも極めてインパクトの大きい施設であるので自然の中、即ち、植生や水圏の中に橋梁を如何に配置するかを考えることが必要である。このような発想は決して空想的なものではなく、首都の移転や新都市の建設あるいは都市間の高速道路の新設の場合に必須のことである。

橋梁を建設する素材は古くは木材や石材であったがやがて鉄材から鋼材、そしてコンクリートや鋼コンクリート複合材や鋼コンクリート複合構造が登場している。鋼とコンクリートは大量生産が可能であるので現代の人工物の構築には最も適した材料として用いられてきたが、この状況は今後も続くものと考えられる。

ここでは21世紀を目前にしてコンクリートの活用による橋梁技術の展開について、上に述べたようなやや大上段から思考するスタンスで私見を述べてみたい。

## 2. コンクリート橋技術の現状

鉄筋コンクリート橋はフランス人ジョセフ・モニエ (Joseph Monier) が1875年にスパン15mの鉄筋コンクリートアーチ橋を建設したことから始まる。南フランスには全長275mの石造三層アーチ橋 (ガール川の水道橋) が約2000年前に造られて現存しており、また、英国には支間100mの錬鉄製の吊材を持つ吊橋 (コンウェイ

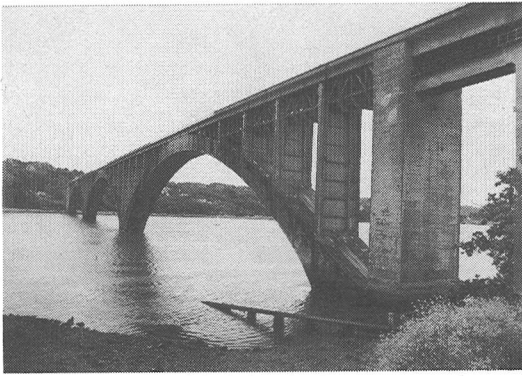


写真-1 プルガステル橋

橋)が1826年に建設され現存していて、これらに比べればコンクリート橋の歴史は極めて新しいと言える。現存する古い大型鉄筋コンクリート構造物としては、フランス西部のプレストに架けられたプルガステル(Plougastel)橋がフレシネー(Freyssinet)によって1930年に完成し現在も歩行者専用橋として用いられている(写真-1)。この橋は支間186mが3連ある長大コンクリートアーチ橋であり、現在で考えても画期的な設計・施工によって建設されたものである<sup>1)</sup>。1928年にはフレシネーがプレストレストコンクリートに関する特許を取得し、これ以来コンクリート橋の分野は急速に発展し今日に至っている。約2000年前のローマ時代のアーチ橋が何故今日まで残っているかといえば、アーチ橋のリブには全断面に常に圧縮力が作用しているの、例え欠陥が生じてもひびわれが断面内を伝播することがないので極めて耐久的なのである。フレシネーは恐らくアーチ橋のこの特徴を認識してプレストレストコンクリートの技術開発に成功したものと思われる。

鉄筋コンクリートに関しては、鉄筋の高強度化に伴い小支間の鉄筋コンクリートラーメン高架橋や鉄筋コンクリート橋脚および鉄筋コンクリートフーチング等として多用されているが、鉄筋に高い引張応力を許すとコンクリートに過大なひびわれが発生して好ましくないの、中径間以上の橋梁にはアーチを除きほとんど用いられないようになった。ただし、橋梁の上部構造には床版を除いてあまり用いられなくとも上述のように下部構造や基礎構造には鉄筋コンクリートは極めて多用されていることに注意しなければならない。これらにおける技術的な特徴の例としては直径51mmの太径鉄筋の普及、降伏強度が685MPaの高強度鉄筋の登場、高流動コンクリートによるマス鉄筋コンクリートの施工、水中不分離コンクリートの登場、などがある。

コンクリート上部構造に関しては橋梁の形式や工法によって技術的特徴が異なるので、ここではプレキャストセグメント工法、PC斜張橋、エクストラドーズド橋、複



写真-2 マルヌ5橋のひとつのエスプリー橋

合構造、およびアーチ橋、などについて述べる。

### (1) プレキャストセグメント工法

プレキャストセグメント工法はコンクリート桁を橋軸に沿って断面方向に輪切り状に区分けしてヤードで個々に製作し、これらを架橋位置に運搬配置して一体化する工法のことである。このようにすることにより現場での大量のコンクリート打ちによる品質の低下の恐れを避けることができる。この工法を最初に大々的に採用したのは第2次世界大戦直後にフランスのパリ郊外のマルヌ川にフレシネーによって架橋された橋梁であると思われる。この橋梁は写真-2に示すように大変スレンダーで美しく、また、画期的な工法を採用して大戦後の困難な時期に建設された<sup>2)</sup>。橋梁は全く同一寸法のもので5橋建設され、これらの名称はマルヌ川の上流側からUssy, Changis, Esbly, Trilbardou, およびAnnetである。

この5橋は1947年から1951年にかけて建設されたものでアーチ支間74m、アーチライズ4.96m、幅員8.4mの超偏平アーチ橋である。主桁(アーチリブ)は6本のプレキャストコンクリート桁から成るが、各主桁はそれぞれ32個のプレキャストセグメントから成る。セグメントの長さは約2m、質量1.8~3.8tonであり、5橋全体でのセグメント数は960個である。セグメントの製作は工場で行い、まず上下フランジを製作してからあらかじめ両フランジにアンカーされたせん断補強用PC鋼材をウェブ用の鋼製型枠を用いて緊張しておきコンクリートを打込んだ。フランジおよびウェブはそれぞれ1.5時間および1.0時間の蒸気養生が与えられた後に脱型された。ウェブには約4MPaの鉛直プレストレスがこれによって与えられた。また、ウェブにはこれ以外に鉛直鉄筋は配置されていない。

セグメントは架橋地点近くの組立てヤードに運搬されてからあらかじめ橋梁の形状となるように配置されたブロックの上で2本の主桁を組合せた状態になるようにユニット化された。セグメントの接合目地は20mmのモ

ルタルジョイントである。2本の主桁に関しては6ユニットに分割されており、その内訳は両端2体の三角形スプリング部、5セグメントから成る中間部ユニットが2体、10セグメントから成る中央ユニットが2体の合計6ユニットである。各ユニットは引き寄せ鋼材により接合、仮緊張された。河川を利用してこのユニットを台船で運び、ケーブルクレーンを用いて架設された。架設に際しては橋台にアンカーされたケーブルで仮固定しながら両端のスプリング部、中間部、中央部の各ユニットの順に張出し架設された。アバットメントと傾斜脚の間にはフラットジャッキと鉄筋コンクリート製楔とを併用してアーチ軸力と支間中央部の曲げモーメントが調整された。なお、橋軸方向にはPC鋼材が配置できるようにあらかじめ溝が設けられており、PC鋼材緊張後には高品質のコンクリートで橋面を50mm厚さに被覆した。これは舗装も兼ねている。

この橋梁は架設後約50年を経過しているが現在でも高欄を含めて全く健全である。また、マッチキャスト方式でないにもかかわらず極めて出来形がよく、どこに目地があるかわからないほど一体的な構造となっているのは驚くばかりである。現在、プレキャストセグメント工法は先端的な技術として世界各地で盛んに用いられているが、その原点としこのフレシネーのマルヌ5橋を改めて評価することは意義深いことと思われる。なお、フレシネーはこの形式の橋梁をいきなりここで設計施工したのではなく同じマルヌ川にこれより数年前に支間55mのルザンシー（Luzancy）橋を架け実績を得ている。

その後フランスではプレキャストセグメント橋としてオレロン島橋をはじめ多くの橋梁が架けられてきた。高強度接着剤であるエポキシ樹脂をプレキャストセグメントの接合に用いるようになって一層この形式の橋梁が世界各地で用いられるようになったのである。我が国では首都高速道路2号線の日黒架道橋や岡山県の神島大橋が架けられたが、経済的な優位性が必ずしも発揮できなかった。一方、米国ではフロリダ半島とキーウエストとを結ぶ自動車道の橋梁として1980年に完成しロングキー（Long Key）橋や1982年に完成したセブンマイル橋などが大々的にプレキャストセグメント工法によって建設され大きな反響を呼んだ。ただし、この2橋ではセグメントの接合は空目地であってエポキシ樹脂は用いられなかった。これらはショートラインマッチキャスト工法と呼ばれるセグメント製作方式が採り入れられ、また、PCケーブルをコンクリート箱断面の中空部分に配置する外ケーブル方式の採用と相まってこの形式の橋梁の普及発展の嚆矢となるものであった。これらのプロジェクトの設計者はフレシネーを師としたジャン・ミュラー（Jean Muller）である。フランスではこの影響を受

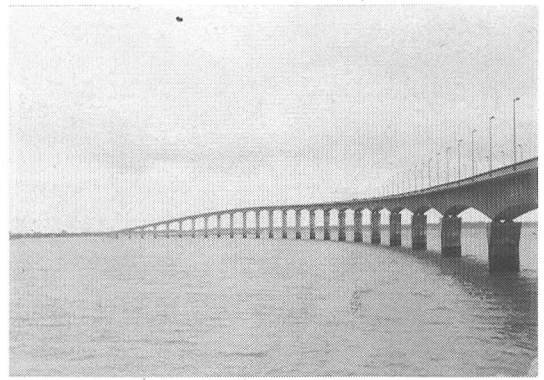


写真-3 レ島橋

けレ島（Ré Island）橋の建設に際し、全長3kmの橋梁を支間110mの長大支間を24連らねてわずか18カ月間でプレキャストセグメント工法のショートラインマッチキャスト方式によって1988年に完成させた（写真-3）。

ここで、ショートラインマッチキャスト方式とはセグメント製作時に製作台のスペースを2個分のみとし、隣接する1個の既製セグメントのみを基準として新しいセグメントを製作し、これが完成後に隣りに移動し、これを基準として次のセグメントを製作し、以下これを繰返えす方式であって、この場合、既製セグメントの端面を型枠として隣りの新しいセグメントのコンクリートを打込むことにより両者は架設時に完全に一体となるので、これをマッチキャストと呼びこの手法が採り入れられる。ショートラインの場合には精度よくセグメントを製作しない限り現地での橋梁の架設は困難となるが、製作台のスペースは大幅に減少することができる。一方、より確実な方法として橋梁の支間全長を製作ヤードに設置して順次マッチキャスト方式によってセグメントを製作する方式を、ロングラインマッチキャスト方式と呼び、ショートライン方式が登場するまではこの方式が主流であった。

我が国ではほとんどの場合がロングライン方式であったが、日本道路公団が第2東名神高速道路の建設を行うことを決定するに及んでショートライン方式が目されることとなり、まず四国の松山自動車道の重信高架橋建設に全面的にこの方式が採用され、延長約2kmの高架橋に749個のプレキャストセグメントと内外ケーブル併用のPC連続ラーメン橋が1997年に完成した。ここで得た技術的成果を用いてさらに規模の大きな第2名神高速道路の弥富高架橋、鍋田高架橋、が建設中である（写真-4）。これらの実績を踏まえて世界最大級の質量約400トンのプレキャストセグメントを用いる第2名神高速道路の木曾三川橋が現在建設中であり世界的に注目を集めている。これに関しては後で再び述べる。

大型プレキャストセグメントを用いた橋梁の例として

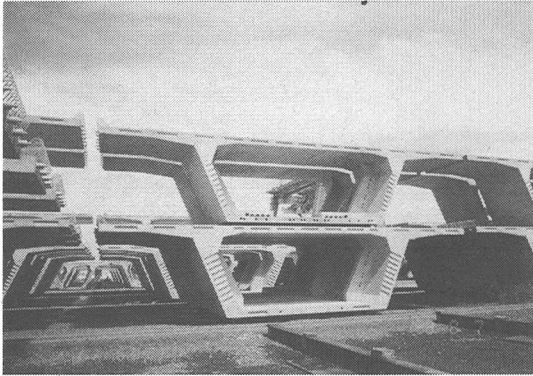


写真-4 弥富高架橋のプレキャストセグメント



写真-6 スカルンズンド橋

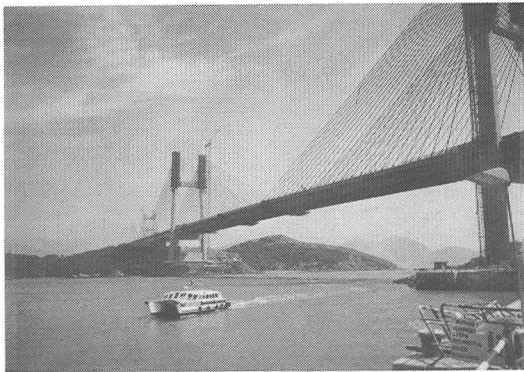


写真-5 カプスイモン橋

はイギリスの第2セパン橋の両側径間部分や鋼コンクリート複合斜張橋である香港のカプスイモン橋（写真-5）などがあり、いずれもセグメントの質量は300トン以上である。

このように超大型のプレキャストセグメントが用いられるのは水上運搬が可能な場合に限られる。さらに大型のプレキャスト方式としては橋梁上部工を大分割してヤードで製作しながら一体化し、これを8000トン級のフローティングクレーンによって運搬架設したデンマークのグレートベルト西橋がある。これを一層大規模にして完成させたのがカナダのプリンスエドワード島橋であって、支間250mのPC橋を43径間この方式で建設し、1997年に完成させた。このような大規模なプレキャスト化は複合構造に用いられ、現在建設中のデンマーク・スウェーデン連絡道路であるエレスンド（Öresund）橋では、スペインで鋼トラス式二層橋のユニットに上下コンクリート床版が構築された後に海上輸送によってスウェーデンの架橋地点のヤードに運搬されている。このプロジェクトの完成は2000年である。

以上に述べたようにコンクリート橋のプレキャスト化は、プレキャストセグメントあるいはプレキャストユニットの運搬が容易であることと、工事の規模が大きい

場合に有利な工法と言える。

プレキャスト工法の最大の特徴は、現場での基礎工事や下部工事と平行してプレキャストセグメントを製作できるため、現場打ちコンクリート施工の場合と比べて大幅に工期が短縮できることである。また、コンクリートの品質や部材の寸法管理も行いやすいので、良好な品質の橋梁を建設することが可能である。現場打ちの場合と比較してプレキャストセグメントの接合部では鉄筋が連続しておらず、シアーキーとPCケーブルのみによって一体化されているため接合部が弱点になると思われるが、エポキシ樹脂を用いた場合には樹脂の接着強度はコンクリートの引張強度の10倍程度であるため、接合面自身にひびわれが発生することはない。せん断力によってウェブに発生する斜めひびわれも接合面をそのまま斜めに横切って進展することが実験によっても確かめられており、力学的な安全性の上で問題が生ずることはないはずである。しかしながら、内ケーブルをグラウトによって防錆しようとする場合には、グラウトの注入が不十分であると耐久上の欠陥が発生する場合もあるので、特に空目地の場合には注意することが必要である。

プレキャスト方式の場合、断面要素の一部例えばウェブのみをプレキャスト化し現場打ちとの併用方法を用いることも施工の合理化になる場合のあることに留意しなければならない。鋼製のトラス材や波形鋼板ウェブを用いたり、鋼製やプレキャストコンクリート製のストラットを用いることも施工の合理化に合致するものである。

なお、現場において一区画ずつ橋軸方向に順次コンクリートを打込む場合にもこの区画の部分をセグメントと呼ぶので、単にセグメントと言えば現場打ちの場合を含む用語として用いられることに注意する必要がある。

## (2) PC斜張橋、エクストラロードズ橋

現在、PC斜張橋として世界最長支間のものはノルウェイのトロンハイム郊外にあるスカルンズンド（Skarnsund）橋である。写真-6に示すようにこの橋梁の支

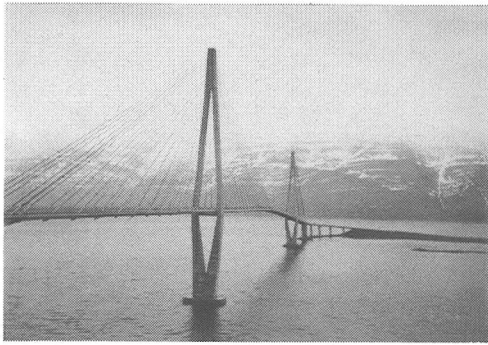


写真-7 ヘルゲランド橋

間は530mであって、断面は2室の三角形断面である。斜材は2面吊りで直径52~83mmのロックドコイルである。1991年に完成し、その後のクリープ変形等が観測され、設計時に想定した値とほぼ同じ値が得られている。

ノルウェイには北極圏に近い場所に支間425mのヘルゲランド橋が1991年にPC斜張橋として完成しており、人口わずか500万人程度の国にこのような大支間の橋梁がコンクリートによって建設され、社会基盤施設が着々と整備されていることにもっと留意する必要があると思われる(写真-7)。

フランスには1977年に完成した支間320mのプロトヌ橋や1994年に完成した支間400mのイロアーズ橋があり、後者は一面吊りのPC斜張橋として世界最大支間を誇るものである。スペインには1983年に完成した支間440mのバリオスルナ(Barrios Luna)橋や1991年に完成した支間324mのガディアナ川(Guadiana River)橋がある。これらはいずれも往復4車線の本格的な道路橋であり、翻って我が国の斜張橋を見た場合、最大支間長のPC斜張橋は九州の伊唐大橋であってその支間は260mであり、世界最長のスカルズンド橋の半分以下の支間である。支間の大きな橋のみが価値がある訳でないことは当然のことであるが、現在は国際競争の時代であり国内における長大支間の橋梁の設計施工実績が海外でのプロジェクトの獲得にも影響する場合もある。また、長大支間の橋梁の建設はその分だけ社会基盤施設が整備される証拠となるものとも考えられる。インドネシアでも独自に支間350mのPC斜張橋であるバタム・トントン橋を建設しており、世界各国が橋梁への社会資本投資を行っていることを認識しなければならない。

さて、PC斜張橋にプレキャストセグメント方式を採用すると工期を大幅に短縮することができる。広島県に建設された大芝大橋は中央支間長210mの海上橋であり、断面は桁高1mのエッジガーダー形式である。桁の

製作には3セグメントを直列に配置しながら製作するショートラインマッチキャスト方式が採用された。通常ショートラインでは2個のセグメントを製作台上に並べるのに対し、ここでは3個を並べ高さを調整しながら製作キャンバーの精度を向上させたことは特筆すべきことと思われる<sup>3)</sup>。同様なことが佐賀県に建設中の天建寺橋のプレキャストセグメントの製作に用いられたことは興味深い。天建寺橋は筑後川を横架する支間219mのPC斜張橋で、2面吊りの3室箱断面を持つものである。ここでは6個のセグメントを直列に並べて順次製作するもので、製作誤差を減少できるとともにロングラインに比べて製作ライン長を大幅に短かくすることができる。そこでこの方式はセミショートラインと命名された<sup>4)</sup>。

米国ではプレキャストセグメントを全面的に用いた大支間のPC斜張橋として1987年に完成した主径間長366mのサンシャインスカイウェイ橋や、1995年に完成したチェサピーク・デラウェア運河橋(主径間長230m)などがある。この2橋はいずれも一面吊りである。

エクストラロード橋は外見的にPC斜張橋と類似であるが、構造概念的には異なるものである。即ち、この形式はPC連続桁構造の支点上のPCケーブルを断面の上側に突出させてプレストレス力の偏心量と上向きの勾配とを大きくし、曲げモーメントとせん断力とに有利に働かせようとするものである。当然PCケーブルの位置を保持するためにタワー状のストラットが支点位置での桁上に必要となる。したがって、この場合のPCケーブルは偏心量の大きな外ケーブルと同じであり最近では大偏心プレストレス構造とも言われるようになってきた。PCケーブルにはこのような状態では振幅の大きな応力が発生しにくいので、PCケーブルの引張力に対する安全率を通常の桁内に配置されたPCケーブルの場合と同じにすることができる。PC斜張橋の場合には一般に吊り材としての高い安全率が適用されるので、PCケーブルに関してはエクストラロード形式の方が経済的に有利となる。この形式はフランスのマティバ教授(Prof. Mathivat)の発案によるものであるが、最初に本格的な橋梁として実現したのは1993年に完成した日本道路公団の小田原ブルーウェイ橋である。なお類似の橋梁としてスイスのガンター橋がクリスチャン・メン教授(Prof. Menn)の設計によって1980年に完成している。エクストラロード橋はPC斜張橋の場合と比べて塔の高さを大幅に小さくできるので塔や斜材による空間の占有率が少なく軽快である。ただし、その分析高が大きくなる。我が国では支間が100mから200mの長大支間の橋梁にこのタイプのもが多く登場してきた事実は単に経済的な有利性のみならず、景観的にもエクストラロード橋が好まれていることを物語っているとさえ言う。前述の木曾三川橋は支間が約270mの多径間連続のエクストラ





写真-8 木曽三川橋の完成予想パース (日本道路公団)

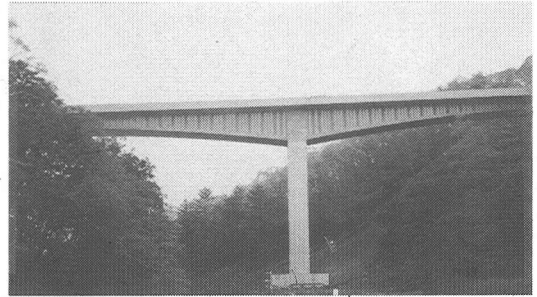


写真-10 本谷橋

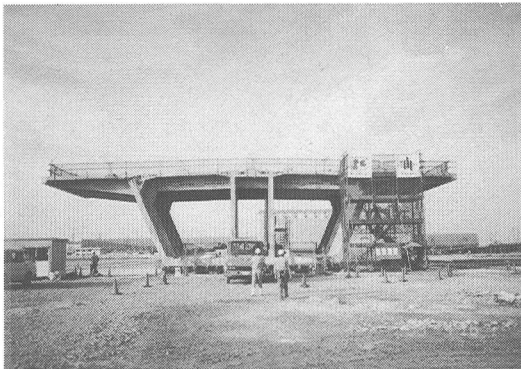


写真-9 木曽三川橋の実大試作プレキャストセグメント

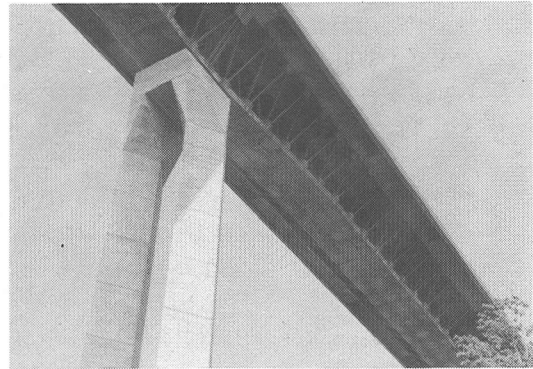


写真-11 ブロネ橋

ドーズド橋であるが支間中央部分の約 100m は鋼桁で構成された複合形式である (写真-8, 写真-9)。

### (3) 複合形式の橋梁

鋼とコンクリートとの複合形式の橋梁としては従来は鋼成桁橋がその中心であったが、この形式は鋼構造側からの複合に関するアプローチであったと言える。一方、最近ではコンクリート側からの複合に関するアプローチが極めて盛んであり、ウェブに波形鋼板や鋼トラス材を用いた複合 PC 橋が登場してきた。この種の構造では橋軸方向のプレストレス力によって鋼ウェブとコンクリートフランジとの一体性が良好に確保されたことと外ケーブルの活用によって PC ケーブルの配置が容易に行えること、などの理由により急速に複合橋梁として注目を集めるようになってきた。波形鋼板ウェブはせん断力に対して補剛材を必要とせず、また、プレストレスに対してはアコーディオン効果によって全く抵抗しないので複合 PC 構造として極めて有利である。コンクリートフランジとの接合に関しては、著者の提案による接合棒鋼と貫通横鉄筋とを用いた直接埋込み方式が受入れられ、日本道路公団の東海北陸自動車道の本谷橋 (ラーメン構造で支間は 44m+97.2m+56m) が建設された<sup>5)</sup> (写真-

10)。今後はプレキャストセグメント工法への波形鋼板ウェブの適用が期待される。

ウェブに鋼トラス材を用いる橋梁ではフランスで最近完成したブロネ橋が注目されている (写真-11)。ブロネ橋 (Boulonnais 橋) はブローニュ地方の A16 高速道路の高架橋で Echinghen 橋 (橋長 1 288m, 最大支間長 110m), Herquelingue 橋 (橋長 259m, 最大支間長 77m) および Quehen 橋 (橋長 474m, 最大支間長 77m) の 3 橋から成っている。いずれもプレキャストセグメントによるものでセグメントの長さは 4m, 幅は 19.24m でその総数は 524 個である。鋼製のトラス斜材は鋼管の端板に異形鉄筋をねじ止めし、これをコンクリートフランジに埋込んで定着することによりフランジに連結されている。このような複合 PC トラス橋は桁高が大きいにもかかわらず、ウェブの透明感があり景観的に極めて優れたデザインである。なお、この橋梁の特徴としては鋼トラス材をコンクリートフランジに埋込むことによりセグメント同志の接合は単にコンクリートフランジのみの接合となるので施工が容易なことである。現在我が国でも日本道路公団静岡建設局や高知県の四万十川架橋においてこの形式の橋梁の設計が進められているが、鋼斜材の接合方法に関しては独特の工夫がなされており、現場打

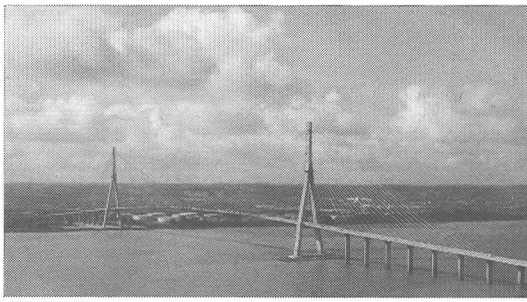


写真-12 ノルマンディ橋

ちコンクリートのもとで斜材同志を直接連結させて応力を伝達する方式が検討されている。

一方、橋軸方向に関してその一部を鋼断面とし、他をコンクリート断面とする複合橋梁もある。その代表的なものはフランスのセーヌ河の河口近くに架るノルマンディ橋である(写真-12)。ノルマンディ橋は全長2141mでその中央支間856mのうち、624mが鋼床版箱断面構造でその他はコンクリート断面である。このような構造とすることにより支間中央部の軽量化を鋼桁の採用によって図るとともに、他の部分をコンクリート構造とすることにより全体の経済性が高められている。また、主塔の斜材定着部位は鋼構造であり、その剛性を確保するために鋼柱の周囲にプレキャストコンクリートのセグメントが取り付けられている。したがって主塔も複合構造と言える。鋼桁部分とコンクリート桁部分の単位m当りの質量はそれぞれ橋面工を含めて13tonおよび45tonであり、鋼桁の軽量化を活用して中央支間の長大化が実現されたのである。当初の設計では鋼桁部分が752mであったが、経済性を追及した結果コンクリート部分をより長くする方が有利となり変更がなされた。ノルマンディ橋は我が国の本四架橋の多々羅大橋が完成するまで世界一の斜張橋の支間を誇るものである。

著者は複合構造の有用性を評価する項目として表-1に示す複合効果の分類について提案してきた。また、複合方法の分類に関しても表-2に示すように分類したが、鋼とコンクリートとの複合にはプレストレスの果す役割が極めて大きいものと考えられる<sup>6)</sup>。即ち、波形鋼板ウェブを直接コンクリートフランジに埋込んで複合させる方式は、プレストレスが橋軸方向に導入されていることが必須のことなのである。また、複合トラスPC構造ではPCケーブルの曲げ上げによるせん断耐荷機構により引張力を受ける斜材の応力が軽減されることとなり有利である。

表-1 複合効果の分類

No.	分類	備考
1	長所の組合せによる補完	強度、剛性、じん性、耐久性、耐火性
2	合成作用	断面二次モーメント
3	鋼部材の架設への適用	支保工、架設工
4	鋼部材の架設と軀体への適用	支保工と軀体要素
5	急速施工	工期の条件
6	重量の低減、重量のつりあい	コンクリートと鋼との置換え
7	高品質化	じん性、拘束効果
8	補修、補強	劣化の回復、耐震補強

表-2 複合方法の分類

複合面	複合方法	機構	備考
部材軸方向に沿った面	シア-コネクター	ずれ止め	スタットジベル等
	鋼面の突起	ずれ止め	異形加工、横構等
	付着	界面の結合	セメントの硬化
	接着	接着剤	エポキシ樹脂
部材端面	摩擦	プレストレス	PC鋼材の緊張
	摩擦、圧着	プレストレス	PC鋼材の緊張
	接着	接着剤	エポキシ樹脂
	シア-コネクター	ずれ止め	鉛直ずれに対処

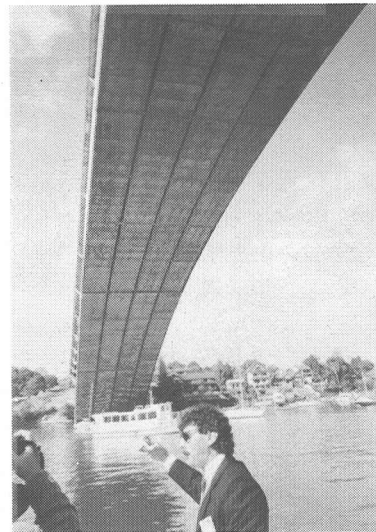


写真-13 グラデスビル橋

#### (4) アーチ橋

アーチ橋はコンクリート橋の主要な構造形式のひとつであり、近年支間が200mを越える長大橋に適用されるようになってきた。古くはアーチ橋の施工は全支保工方式が主流であったが近年は張出し架設やピロンによる吊り出し施工、あるいは鉛直にアーチリブを構築してこれを廻転して閉合するロウリング工法などが用いられるようになってきた。また、支間中央部に鋼アーチリブを架

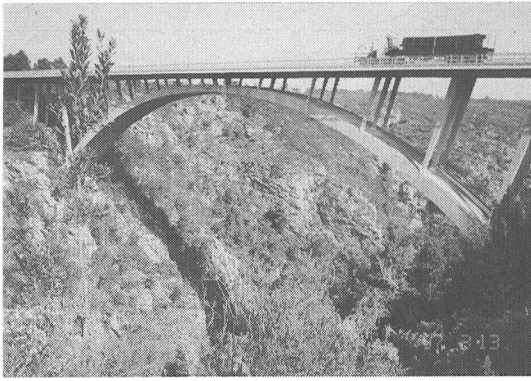


写真-14 ストームスリバー橋



写真-16 ゴーリツリバー橋



写真-15 ブルークランス橋

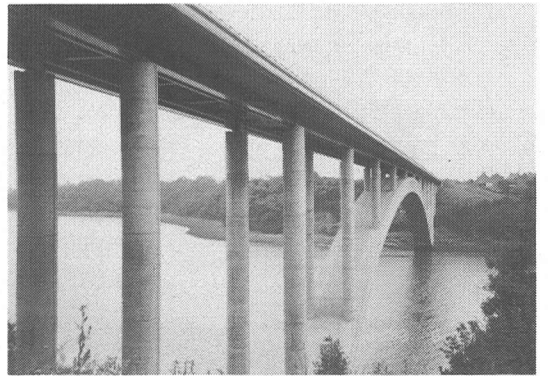


写真-17 シャトーブリアン橋

設材に用いるメラン工法や鋼管アーチをまず架設して、その断面内にコンクリートを打込んでアーチリブの剛性を高めた後にそれをさらにコンクリートで巻立てる合成巻立て工法などの複合形式のものなどがある。また、アーチリブ上の上部桁を鋼桁にする複合構造のものもある。

コンクリートアーチ橋として最大支間のものはユーゴスラビアのセント・マルコ橋でその支間は390mであったが1997年に中国で支間425mの万泉揚子江橋が完成した。

特徴のあるアーチ橋としてはシドニーのParamatta河に架かる世界第3の支間のグラデスビル橋 (Gladesville 橋、支間305m) でアーチリブはプレキャストセグメントであり、全支保工方式によって架設された。また、アーチリブ上の柱と上部桁はプレキャストPC構造である。アーチリブは独立の4箱断面で橋軸方向に108個ずつのセグメントで構成されており、架設は全支保工によって順次施工された。この橋梁は1964年に完成した(写真-13)。

アーチ支間は100mであるが、1954年に完成した南アフリカ共和国のガーデンルートのストームスリバー橋 (Storms River 橋) はイタリアのRiccardo Morandi氏

の設計によるものであり、架設方法にはロウリング工法が用いられた(写真-14)。恐らく世界最初のロウリング工法の適用と思われる。同ルートには支間272mのブルークランス橋や支間170mのゴーリツリバー橋などもある(写真-15、写真-16)。

フランスのランスにあるシャトーブリアン橋は橋長424m、支間261mの複合アーチ橋である。この橋梁の特徴はスプリングから60m離れた位置に仮支柱を建て、その位置にピロンを建てて斜張橋のように張出し架設を行ってアーチリブを構築したことである。また、上部桁は鋼板桁を押し出し工法によって架設した。この橋梁は1990年に完成した(写真-17)。

我が国では日本道路公団の別府明ばん橋や佐渡島の城趾橋などが特色あるコンクリートアーチ橋であるが、現在では第二東名高速道路が富士川を横架する位置に支間265mの複合アーチ橋が建設されることとなった。

### 3. 耐震設計について

地震による構造的な被災は、地盤の振動と構造物の振動特性とが一致するときに大きく現れる。この場合、構造物が損傷してくると固有周期が増大するので、これと



表-3 設計塑性率

	一般	重要度 A	重要度 B
プレート境界型	3.0	2.5	2.0
直下型	6.0	5.0	4.0

地震動の卓越周期とが一致しないようにすることが肝要である。また、免震支承の採用や隣接構造物との衝突を回避することも重要である。鉄筋コンクリート柱の鉛直方向にプレストレスを導入して地震時の安全性と地震後の供用性を大幅に向上させることも可能であるので、耐震設計に際しては積極的に耐震性を向上させるべく検討することが重要である<sup>7)</sup>。

橋脚の軸方向にプレストレスを導入すれば地震時の復元性を確保しながら共振現象を回避できるので、今後はこの種の橋脚の採用を望みたい。これに関しての手法は現在鋭意検討が進められている。また、高強度鉄筋の採用や新素材などによるせん断補強も有効である。

兵庫県南部地震による阪神地域の橋梁の地震による被災は、設計で想定した地震力を大幅に越える地震動によって橋脚がせん断破壊したこと、あるいは鉄筋の段落とし部の悪影響に誘発されてせん断破壊したことが主因であることに留意しつつ、反省点や教訓を充分に生かして今後の耐震技術を発展させることが肝要と思われる。

大地震による外乱については、正確にこれを予測することは本来不可能であるので、設計に用いる地震動は戦略的に定めることが求められる。現在のところ、直下型の地震は局所的に大きな外乱を発生させるが、各地域にとってその発生の間隔は数百年から千年である。一方、プレート境界型の地震はその発生頻度が100年程度と言われ、また、その影響範囲は広大である。ただし、震源からある程度離れた地域が広大なのであって、この広い地域における外乱の強さは直下型地震のそれよりはる程度小さいと言える。ただし、影響範囲が広大であるのでこの地域での被災は、相当に限定されたものとするのが社会的に必要である。そこで、直下型地震による震源近傍での被災の程度とプレート境界型地震による広範な影響地域での被災の程度とを、分けて耐震設計を行うことが得策と考えられる。この場合、構造物の重要度を反映させて構造物の性能を妥当に確保することが必要と思われる。

既に土木学会コンクリート標準示方書では1986年版において性能規定型のフォーマットで耐震設計を定めたがこの考えをベースに直下型地震を含めた構造物の耐震性能を構造物の重要度ごとに定めるのがよいと思われる。

鉄筋コンクリート構造物は、一般に所要のせん断補強を行うことによって曲げ破壊先行型の終局状態とするこ

とが可能である。また、適切な配筋により降伏変位の6倍以上の交番外力に安定して耐えるようにすることは可能である。そこで、鉄筋コンクリート柱のじん性能が $6\delta y$  ( $\delta y$ :降伏変位)確保されるものとして、これをベースとして地震動の強さ、およびコンクリート構造物の重要度に対応した性能の分類を、設計塑性率を指標として表-3のように行うとよいと思われる。

鉛直方向にプレストレスを導入した柱についてもじん性の評価方法は上述の鉄筋コンクリート柱の場合と同様に行えることが現在明らかにされつつある<sup>8)</sup>。

塑性率が2.0の場合、被災は軽微な損傷以内であり、地震後の損傷は外見上ほとんど認められない。また、塑性率4.0に達しても地震後の供用性は確保できる。重要度Bの構造物はこのように設計することにより、地震後もその役割を果たすことができると思われる。重要度Aの構造物では重要度Bの場合に比して若干被災の程度が大きくなるが当座の供用には問題が生じないと思われる。一般の構造物の場合でも直下型に対して安全度は十分に確保できる。

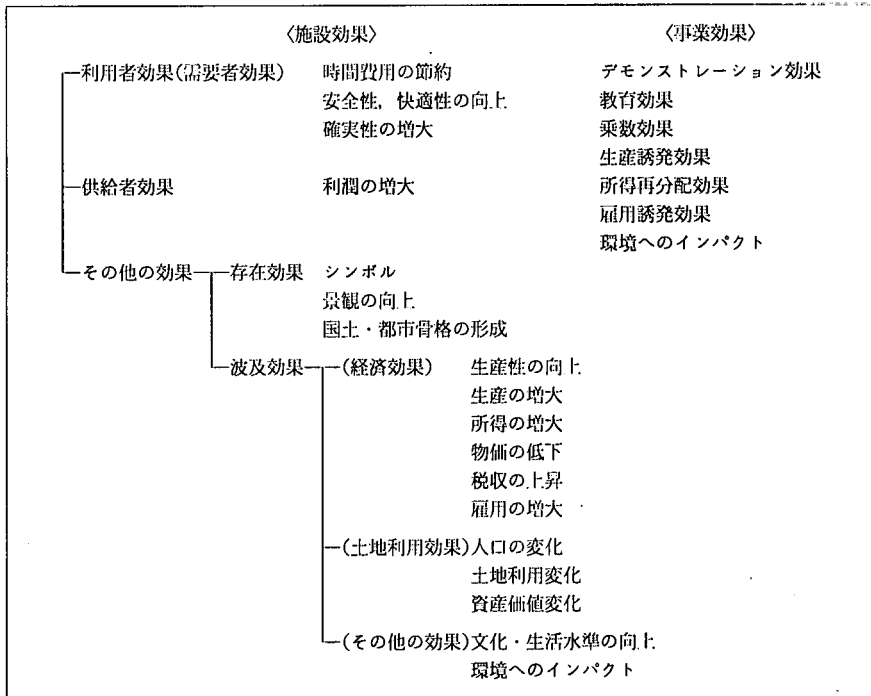
地震動のような未来に発生するであろう外乱のシナリオに対して構造物の所期の性能を発揮できるようにするには設計の体系を性能規定型にすることが大切であると思われる。

#### 4. 今後の展開

コンクリートの活用による橋梁技術について今後の展開を述べてみたい。まず、冒頭で述べた通り橋梁の技術開発を積極的に進めるには橋梁の持つ価値を適切に認識することが必要である。ここでは橋梁を、(a)河川を横断する場合、(b)都市内および近郊における連続高架橋、(c)海上に架かるもの、(d)山間部に連続して架かるもの、などを頭に描きながら考えたい。

橋梁は輸送路の主要構造物であるとともにその周辺における景観を形成する。橋梁を人工物としてその価値を評価しようとする場合、社会基盤施設であるが故にその影響をすべて計ることは極めて困難であり、例えば起債によってあるプロジェクトを建設し、完成後の通行料でその起債を賄うことができるかどうかでこれを評価する独立採算的な考えは単に直接的な利用者の便益のみが評価され、社会基盤施設としての社会全体の便益が評価されていない。ただし、社会全体の受ける便益は直接的に投資を償還するようなこととならないために定量的な評価が容易でなく、また、便益はプロジェクト完成後に時間とともに増大する。表-4に交通施設整備に伴う典型的な効果体系を示す。ここに含まれていない事項で重要なものは防災効果と土地利用の需要増による開発効果が考えられる。また、当然のことながら道路整備や新設によ

表-4 投資効果の体系<sup>(注)</sup>



(注) 土木工学ハンドブック(土木学会)による。

る投資の効果は直接的な利用者の負担額の大小によって極めて異なってくる。即ち非常に高い通行料を徴収することによって利用者にバリアを与えれば結果的に全体的な投資効果が大幅に下落することとなるので、通行料の決定には高度な判断が必要である。

大規模な橋梁を建設する場合、まず多額な資金の投資効果について検討することが第一であるので、橋梁の建設には建設費用を可能な限り低くすることが求められる。また、その上に建設後の維持管理に優れ、耐久的な構造物とすることが必要となる。設計施工の合理性および構造物の耐久性に対する要求は橋梁に期待される本質的な条件なのであり、橋梁建設の投資と深く結びついていることを橋梁技術者は強く認識しなければならない。

さて、コンクリートは橋梁建設の中で基礎構造や下部構造において中心的な材料であり、また、上部構造についても多用されるようになってきた。しかしながら、現在広く用いられているレベルのコンクリートと言えどもその力学的性能がすべて解明されている訳ではない。また、その製造システムについても改善すべき点が色々あると思われる。今後技術開発がセメントや混和材料あるいは鋼材の分野で進み、これらと骨材とを複合させた新しいコンクリートが登場してくると思われるので、コンクリートを重要な人工物を形成する構造材料と考えてコンクリート構造物はその役割を果たせるようにしなければならない。

かつて、我が国にはアルカリ骨材反応は存在しないとされ、多くの教科書にそのように記述されていた。しかしながら昭和50年代に入って我が国におけるアルカリ骨材反応が顕在化し、その対応が後手に廻ったことがある。塩害の問題に関しては良質な細骨材の不足によって海砂が一部の地域で用いられ、これに含まれていた塩分が鉄筋などの鋼材を著しく錆びさせたことがある。また、海浜地帯のコンクリート橋梁には飛米塩分がコンクリート中に蓄積し、コンクリート中の鋼材を大きく腐食させた例も見られた。一方、英国においてはプレストレストコンクリート(PC)のグラウト不良による落橋事故が1985年発生し、その後の調査でポストテンション式のPC橋のグラウト不良の問題が明らかにされた結果、1992年から1996年の間、ポストテンション式PC橋の新設が禁止されるという事態が生じた。我が国でもPC橋のグラウト不良問題が一部で報告されその対応が図られてきた。以上のほか、鉄筋コンクリート床版の重交通や設計不備による劣化が顕在化し設計方法が大幅に改められた事実がある。また、コンクリートの乾燥収縮によるひびわれの発生や長年月経過後に生ずるクリープ変形の問題がある。ここで例示したコンクリートの不具合はその原因を十分に究明し根本的な解決を図ることが大切である。

現在コンクリートは我が国ではそのほとんどがレディミクストコンクリートとして日本工業規格(JIS)に規定

されたものが用いられ、一応の品質は保たれているが今後はこの供給方式が重要な人工物である橋梁の建設に今までと同じように続けられるべきか慎重に検討することが必要である。海外では大規模な橋梁工事のプロジェクトでは、コンクリート製造プラントをリースし、現場において厳格な製造管理のもとでコンクリートが供給されている。そこではコンクリートのクリープや乾燥収縮の試験まで行っているところが見られる。今後は性能規定型の設計施工が採用されるようになるので、現在のJISの規定によるレディミクストコンクリートではでき上がった構造物の性能保障をするには不十分と思われる。経済性の追及が市場の原理によって優先されれば構造物の長期的な性能を確保することは困難である。

今後のコンクリート橋の建設に用いるコンクリートは、上に述べた観点から可能な限り素性の明らかな素材によって構成され長期的なコンクリートの諸性質を保障できるように製造管理および施工されることが必要である。骨材に関しては岩種、鉱物、生成状況などを明記するとともに付着泥分の除去や品質の一定性が求められる。骨材自身の力学的諸性質も明らかにされているべきである。このようにすれば今後高強度コンクリートの合理的な活用への道が開けてゆくものと考えられる。

以上のような材料的信頼度の確保が行われた上で今後のコンクリート橋の技術的展開の項目を列挙してみれば次のようになるものと思われる。

- a) 設計時点での供用後の維持管理方法のプログラム化
- b) PC鋼材のグラウトの信頼度確保
- c) 鋼コンクリートの複合化
- d) 高強度コンクリートの圧縮靱性の付与
- e) 材料の組成と関連させたコンクリートのクリープの正確な評価
- f) 高強度鋼材の圧縮抵抗によるコンクリートのクリープの制御
- g) 技術開発によるコストの低減化
- h) 高強度材料の合理的活用
- i) 耐震性、耐久性を橋梁の機能性と位置付け、その評価
- j) 既往の橋梁に対する定量的評価とそのデータベース化による活用
- k) 新素材の活用
- l) プレストレスの耐震構造への適用

橋梁、特に道路橋や鉄道橋は人間社会の活動に直接的に大きく貢献することが統計資料によっても明らかであるので、その価値を適切に評価することが重要である。橋梁は大地を立体的に活用できるのであり見方を変えれば大地を創造することと同じと言える。人工物としての橋梁の建設を都市計画や地域計画の中心に据えて今後の

橋梁計画が立案されることを望みたい。我が国よりもはるかに経済規模の小さい国々で大きな橋梁プロジェクトが盛んに進められていることにもっと関心を持つことが必要である。

## 5. おわりに

コンクリートの活用による橋梁技術の展開について著者の限られた知見を述べた。今後の橋梁建設に際し、コンクリートの役割は一層大きくなると思われるので橋梁技術者は今まで以上にコンクリート技術に関心を持ち、その技術的発展を図ることが望まれる。

本文の執筆に当っては編集委員の竹内孝光氏より課題に関する御示唆を賜った。また、このような機会を与えていただいたことに対し、心から御礼を申し上げたい。

### 参考文献

- 1) Jose A. Fernandez Ordonez: Eugene Freyssinet, Bilingual Edition (現在 橋建設図書より日本語版出版準備中)
- 2) Komendant, A.E.: Prestressed Concrete Structures, McGraw-Hill Book Company, New York 1952.
- 3) 清水, 森光, 井出, 山本: 大芝大橋上部工の施工, 橋梁と基礎, pp. 2~9, 建設図書, 1998年2月号.
- 4) 井上, 久富, 上野, 藤岡, 沖野, 伊東: 天建寺橋の上部工の施工, 橋梁と基礎, pp. 2~9, 建設図書, 1998年12月号.
- 5) 水口, 芦塚, 古田, 大浦, 滝, 加藤: 本谷橋の設計と施工, 橋梁と基礎, pp. 2~10, 建設図書, 1998年9月号.
- 6) 池田尚治: 土木分野における複合構造の発展, コンクリート工学, pp. 3~8, 日本コンクリート工学協会, 1998. 10.
- 7) 池田尚治: 耐震技術の今後の展望, 橋梁と基礎, pp. 20~21, 建設図書, 1996年8月号.
- 8) 池田, 森, 吉岡: プレストレストコンクリート橋脚の耐震性に関する研究, プレストレストコンクリート, Vol. 40, No. 5, pp. 40~47, 1998年9月号.

(1999.2.10 受付)