

[9] PC斜張橋の最近の進歩

正会員 藤井 学 (京都大学工学部)

1. まえがき

コンクリート橋の長大化を目指す新しい形式として、近年最も注目を集めているものにPC斜張橋がある。PC斜張橋は力学的にも極めて合理的で、経済性や美観の面からも優れている。PC斜張橋で最大のスパンのものは、道路橋では1983年完成のスペインのBarrios de Luna橋(中央スパン440m)、道路・鉄道併用橋としては西ドイツのMain II橋(148.2m)が1972年に完成している。アメリカ、さらに中国などの諸外国におけるPC斜張橋は、その大半がここ数十年間に建設されており、近年その採用が急増している。¹⁾²⁾

一方、我が国では、PC桁橋についてはスパンからみてもすでに世界的な水準にあるが、PC斜張橋については道路橋として1988年に竣工した新丹波大橋(スパン110m)、鉄道橋では小本川橋(1979年、85m)が最大であって、諸外国に比べて本格的な発展が非常に遅れている(図-1)。

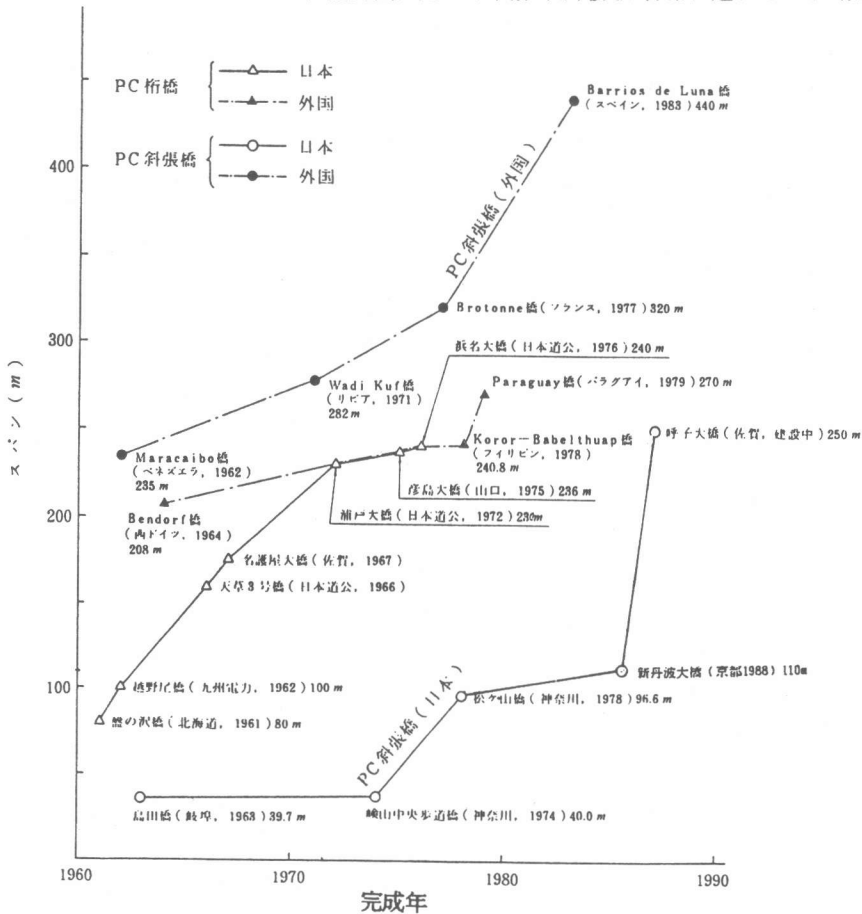


図-1 内外のPC桁橋およびPC斜張橋の最大スパンの推移

この主な理由として次の諸点が指摘されている²⁾。

- 1) PC斜張橋の設計は、設計パラメータが多く設計・施工が複雑で、初心者には理解が得にくい。
- 2) PC斜張橋に関する示方書が十分整備されていない。
- 3) 経済性に対する評価が十分定まっていない。

1)については、PC斜張橋の設計は、構造形式が多用であるから複雑である。しかし、それは設計者の創意・工夫を反映させうる利点でもある。2), 3)については、設計・施工上の技術的問題の整理, 他形式との経済比較等を行なっていく中で逐次解決されていくであろう。

ここでは、PC斜張橋の設計・施工上の基本事項を概説し、最近の技術動向について述べる。

2. 橋梁構成と特徴比較

2.1 主桁のスパン割り

計画に当たってまず問題となるのがスパン割りである。その決定に際しては、架設地点の諸条件を十分把握し、施工法、経済性、美観性等を総合的に勘案する必要がある。一般には、架設地点の地形や地質、水深等によって決まることが多い。

斜張橋のスパン割りとしては、次の2つの基本タイプがある。

- 1) 2スパンの対称形と非対称形タイプ
- 2) 3スパンタイプ

既存橋の調査結果¹⁾によると、2スパンタイプでは、橋長(L)に対する長スパン(C)の比、C/Lの値は、0.5~0.65で、3スパンタイプでは、ほとんどのものが0.5~0.6の間にある。

2.2 主桁の構造形式

PC斜張橋の代表的な主桁の構造形式を図-2¹⁾に示す。地盤の良否、杓耐力、地震力の下部工への伝達、走行性等を考え、斜材および塔を含めた全体構造系で総合的な観点から決定する⁴⁾。なお、文献1)には、耐震性、機能性、施工性等の面からこれらの形式の特徴比較が示されている。

2.3 主桁の断面形状および桁高

主桁の断面形状には、ホロー、I形、箱形などがある。耐風安定性、ねじり剛性、主桁から斜張ケーブルへの力の伝達、ケーブル定着部の構造などを考慮して決定する。

桁高については、PC斜張橋の場合、一般の桁橋にみられるような橋高/最大スパン(H/L)について一定の関係を見出すことは困難である。これは、ケー

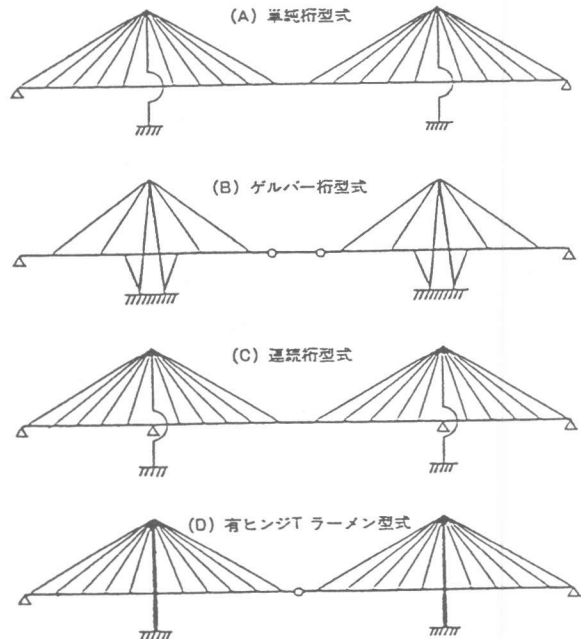


図-2 主桁の構造形式

ブルの吊り間隔、吊り角度などによって桁高は大きく変化するからである。従来の実績からみても、 $H/L = 1/40 \sim 1/180$ の間にばらついている。道路橋で主桁の形状を箱断面とし、ケーブルをマルチ方式で配置する場合の3スパンPC斜張橋では、 H/L の標準を $1/80 \sim 1/100$ としてよいとの提案もある⁴⁾。

2.4 ケーブルの配置

ケーブルの配置形状は、図-3に示すように、ラジアル型、ファン型、ハーブ型などが考えられる。一般に斜張ケーブルを塔頂に集めた方が主桁を支持する効率がよくなり、したがって力学的には斜張ケーブルを塔頂に集中定着したラジアル型が最も有効であり、次いでファン型、ハーブ型の順で有効である。しかしながら、斜張ケーブルの本数が増えるとラジアル型の場合は、塔頂にケーブルが集中して定着されるために特別な定着装置を必要とし、塔頂部が多少大きくなる。また、美観性、施工性、経済性等も十分考慮して定める必要がある。

ケーブルの面数は、1面と2面とがある。独立柱を用いて1面吊りとした場合には美観的には簡潔で優れているが、偏載荷に対しては主桁の剛性で抵抗する必要がある。2面吊りでは、斜方向からみた場合、ケーブルが交錯し、複雑な印象を与えるきらいがある。

ケーブルの配置角度は一般に最小角度 $20^\circ \sim 30^\circ$ の範囲にある。塔の高さが高くなると配置角度が大きくなり、ケーブルを効率的に利用することができるが、耐震上の問題もあり、実施例では最小角度の上限値は 40° 程度となっている。

ケーブル本数についてみると、初期の斜張橋はいずれもケーブル本数が少ない。最近の傾向としては、多数のケーブルを用いた、いわゆるマルチケーブル方式が多く採用されている(図-4)。その理由として次の諸点が指摘されている²⁾。

設計上の利点として、①桁高を低くできる、②スパンの適用範囲が広い、③柔構造であるが、システムダ

ンピング効果により耐震、耐風性の向上が期待できる、④ケーブルの定着装置が小型となり、定着部の補強構造が単純化される、⑤主桁は軸圧縮が卓越するので、コンクリートの圧縮に強いという利点を生かし、より経済的な設計が可能となる。

施工上の利点として、①主桁の架設に際し、仮ケーブルや仮支保柱を必要としない。②桁高が低く軽量なため、長大スパンでもプレキャストブロック工法による架設が可能である、③斜張ケーブルが小型のため、緊張作業が容易である、④斜張ケーブルの取り替えが容易である。

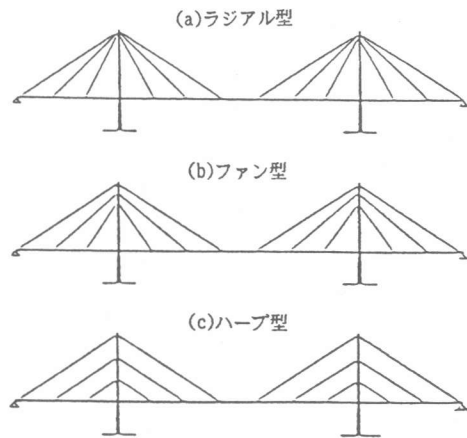


図-3 ケーブルの配置形式

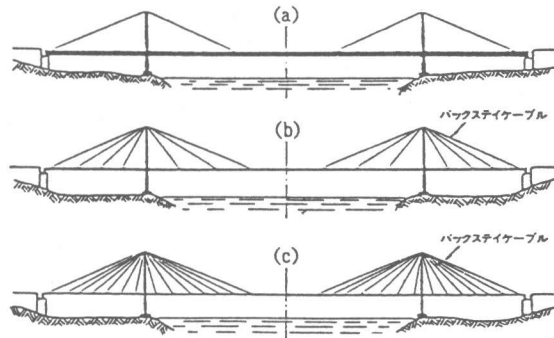


図-4 マルチケーブルへの変遷

2.5 塔の形状

斜張ケーブル配置と共に塔形状は橋の美観に最も影響を与える要素である。設計上、塔形状の決定に大きく関連する要素としては、幅員、塔、桁、橋脚の結合方法、斜張ケーブルの形状、ケーブル面数等であり、従来いろいろな塔形状が考えられている（図-5）。各形式の特徴を挙げると次のようである¹⁾。

1) 独立1本柱：施工性がよく経済的であるが、橋軸直角方向の剛性が劣るため、歩道橋および地震の少ない地域で採用されている。

2) 独立2本柱：独立1本柱に比べて経済性に劣り、また軸直角方向の剛性も他の形式より劣るため、あまり採用されていない。

3) 門型：橋軸直角方向の剛性が最も高く、耐震、耐風上優れた形式であるため、道路橋ではスパンの大小にかかわらず、最もよく採用されている。

4) H型：門型とほぼ同様と考えられる。形が単純なことから中程度のスパンの橋によく用いられる傾向がある³⁾。

5) A型：この型では交差2面ケーブルがほとんどである。近年、比較的長スパンに採用される傾向にある。

以上は塔の正面形状について述べたが、側面形状については過去の実績からみると直立しているものがほとんどである。ただ側径間長が非常に小さい場合に塔を傾斜させている例がいくつかある。

最大スパン L と塔高 h との比の値についての調査結果¹⁾によると、平均的に $L/h=4.6$ で、長大スパンの橋ほどこの値に近づいている。ケーブル形状に関しては、塔高はハープ型>ファン型>ラジアル型の順になる傾向がある。

2.6 塔、主桁、橋脚の結合方法

従来の実施例によると、代表的な結合方法は5つのタイプに分類される（図-6）¹⁾。

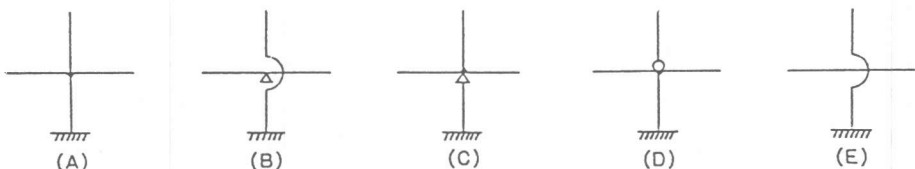


図-6 塔・主桁・橋脚の結合方法

これらのうちのどのタイプを採用するかは、斜張橋の構造特性を決めるものであるから、主桁断面、ケーブル形状、塔形状、耐震性、耐風性、温度の影響、経済性、施工性および美観性等、総合的観点から検討を行い決定しなければならない。

3. 解析と設計

PC斜張橋の設計は、従来行なわれている設計手順に従うことはもちろんであるが、PC斜張橋特有の問題がある。図-7にPC斜張橋の解析・設計システムを示す。ここでは設計上特に問題となる事項について略述する。

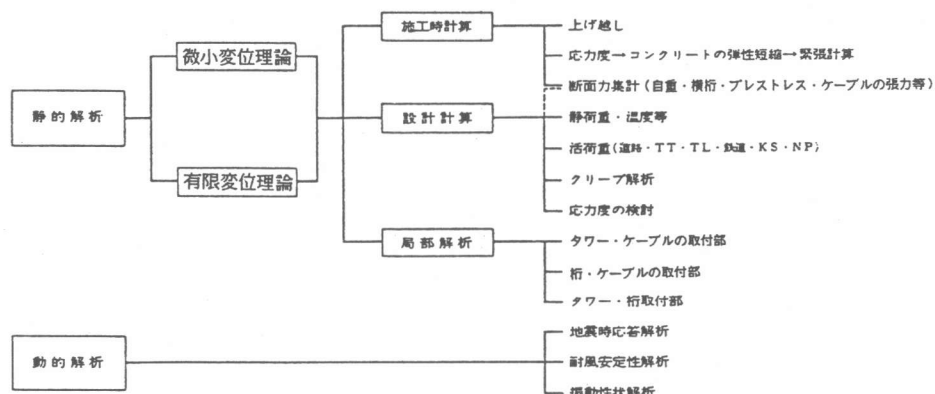


図-7 PC斜張橋の解析・設計システム

3.1 構造解析

斜張橋の構造解析には、微小変位理論あるいは有限変位理論が用いられる。斜張橋が示す非線形挙動としては、軸力と曲げモーメントを受ける桁および塔が示すものと、斜張ケーブルのサグによるものとの2種類ある。ケーブルのサグによるその非線形挙動の取り扱いについては、次の3つの方法がある。

- 1) ケーブルのサグを有限変位理論で解析的に解く方法
- 2) ケーブルのサグをヤング率換算で評価して解く方法 (Ernstの公式)
- 3) ケーブルのサグの影響を無視する方法

PC斜張橋上部工設計指針(案)⁴⁾では、「主桁の断面力の算出は、塔および斜材を含む全体構造系を平面骨組として、微小変位理論に基づいて行ってもよい。また、斜張ケーブルのサグの影響については、斜張ケーブルの弾性係数を低減する方法により、考慮するものとする」としている。ただし、塔断面の検討には有限変位理論を用いることを規定している。

3.2 コンクリートのクリープ・乾燥収縮の影響による不静定力

クリープおよび乾燥収縮はコンクリート系斜張橋における特有の問題であって、これらの影響の計算は施工方法との関連もあって十分な検討が必要である。

PC斜張橋のクリープ解析方法には、従来の桁橋に適用されていた応力法⁵⁾と、骨組み構造解

析に用いられている微小変位理論による変位法をクリープ解析用に応用した変位法^{9)・10)}とがある。P C斜張橋のような高次不静定の場合には後者が便利に用いられる。乾燥収縮による断面力の算出も同様に解析することができる。

なお、P C斜張橋の経済性に影響を与えるケーブル張力や主桁内プレストレスの決定法については、従来は試行錯誤的に行われていたが、近時これらの合理的決定法の究明に最適化手法の応用が試みられるようになった^{9)・12)}。

3.3 耐風安定性

P C斜張橋は吊橋や鋼斜張橋に比べて剛性が高く、死荷重が大きいので、耐風安定性は良好であるといわれている。しかし、桁の断面形状、桁高などによって耐風安定性に微妙な変化が生ずるため、単に理論解析だけでなく、風洞試験による実験的検討が必要である。我が国の実験例には、新丹波大橋¹³⁾、Eimeikan Bridge¹⁴⁾などがある。

3.4 耐震安定性

地震時の断面力を算出する方法は、震度法や応答を考慮した修正震度法が簡便なためよく用いられているが、これらは最低次の振動モードで地震応答値が決定される構造物に対しては十分適用性がある。しかし、斜張橋の場合には高次のモードにおいても卓越した応答値¹⁵⁾が認められるため、固有周期の長いP C斜張橋の耐震設計においては、修正震度法による静的解析に加えて動的解析も併用した検討が必要である。我が国のP C斜張橋の動的解析例としては、豊後橋、錦岡3号橋、万博歩道橋等があり、応答解析はモーダル・アナリシス法で、スペクトルは土建スペクトルを用いているものが多い⁵⁾。

なお、従来地震応答解析に材料非線形性を考慮することはまれであったが、大規模地震時の照査ではひびわれによる部材剛性低下とこれによる応力再分配を考慮する必要があるとの観点から弾塑性地震応答解析手法の研究が実施されるようになった¹⁶⁾。また、従来は応力に対する検討が主流であったが、最近では、じん性設計、限界状態設計などの考えから、応答変位、じん性率等に着眼するようになり、コンクリート部材の耐震性改善策の研究も試みられている¹⁷⁾。

4. 材料

4.1 コンクリート

既存のP C斜張橋の実績調査¹⁾によると、一部自重軽減のため軽量コンクリートの使用例もあるが、一般には普通コンクリートが使用されている。設計基準強度についてみると、ほとんどのものが350~450kgf/cm²であり、通常のP C橋と同程度の強度を有するコンクリートが使用されている。塔部コンクリートとしては、主桁と同等もしくは50kgf/cm²程度小さいものが採用されている。

4.2 斜張ケーブル

ケーブル材としては、ロックドコイルロープ、平行線ケーブル(P.W.S)、各種P Cケーブル等がある。それぞれ特徴があり、疲労に対する安全性、防食問題、定着方法、施工性、経済性等を十分考慮して選択する必要がある。

斜張ケーブルの防食には、一般にはポリエチレンチューブ(PE管)が用いられる。このPE管にはカーボンブラックが2.5%添加されており、紫外線に強く十分な耐候性がある²⁰⁾。PE管は黒色であるため、美観上、PVC(塩化ビニール)やフッ化ビニール系の明るい色のテープを巻くことがある。

5. 架設工法

PC斜張橋の架設工法の選定に際しては、一般のPC桁橋のほかに、PC斜張橋特有の構造条件、すなわち、主桁の断面構成、塔の形状、ケーブルの配置形状等を総合的に判断して、これらの諸条件に適合し、かつ合理的、経済的な工法を選定する必要がある。次に従来の実施例の概要を述べる。

5.1 主桁の架設

通常のPC桁橋の架設と基本的には変わらない。一般的には、PC斜張橋の規模とスパンが小さい場合は支保式架設工法、大きい場合には張出し架設工法が採用されている^{18)・19)}。

5.2 塔の架設

PC斜張橋の塔は、一般にコンクリート構造が採用されている。これまで広く用いられてきた高橋脚や大煙突のような塔状構造物の架設工法と基本的には同じである。一般に、小規模な塔の場合には総足場型枠工法、大規模の場合には移動式型枠工法、中でもクライミングフォーム工法（ジャンピングフォーム工法）が多く採用されている¹⁸⁾。

5.3 斜張ケーブルの架設

斜張ケーブルはプレハブケーブルと現場作成ケーブルの2種に大別される。一般に、プレハブケーブルはケーブル本体をクレーンにより直接吊り込むか、ガイドワイヤやウィンチを用いて引き上げる方法で架設することが多い。一方、現場作成ケーブルでは、ガイドワイヤなどを用いて防護管をケーブル本体に先がけて架設した後にケーブル本体を挿入することが多い。しかし、ケーブルの架設工法は、ケーブル材料、防錆方法などと密接に関係しており、実際にはいろいろな方法が採用されている。^{1)・18)}

6. あとがき

PC斜張橋は力学的にきわめて合理的構造であり経済性にも優れていることから、諸外国においては鋼斜張橋の技術成果を吸収・消化しながら独自の発展過程をたどり、鋼斜張橋と競合する段階に達している。一方我が国においては、1963年PC斜張橋の第1号（島田橋、 $l=39.7\text{m}$ ）が誕生したものの、その後現在に至るまで、スパンが100m前後である。しかし、近時ようやくPC斜張橋に関する研究も進み、有利性の認識が急速に高まりスパン200mを越えるPC斜張橋建設が実施に移されて、本格的な発展期を迎えようとしている。

PC斜張橋の適用範囲をさらに拡大するのに検討が必要な項目を思いつくままに列挙してあとがきとしたい。

- ・限界状態設計法の適用上の問題点の抽出と合理的設計法の開発。
- ・自重の軽量化（軽量骨材コンクリート、高強度コンクリート、鋼との合成構造など）。
- ・施工管理の合理化（桁の上げ越し— 温度補正、コンクリートの弾性係数の正確な推定；橋体応力度；斜張ケーブルの張力—測定法、調整法。
- ・維持・管理を考慮した細部構造（耐久性設計の適用；点検・補修、ケーブルの取替えが容易な構造など）。

なお、本稿作成上多くの有用な資料の提供を頂いたコンクリート斜張橋研究委員会の委員各位、とりわけ田中茂義委員に深謝の意を表します。

参考文献

- 1) コンクリート斜張橋研究委員会・建設コンサルタンツ協会近畿支部：コンクリート斜張橋の設計の手引，資料513-87，1984-8。
- 2) 成井，渡部：PC斜張橋の現況，橋梁と基礎，Vol.19、No. 8，pp.65～74，1985-8。
- 3) W. Zellner, R. Sanl & H. Svensson, "Recent Trend in the Design and Construction of Cable Stayed Bridges", IABSE, Final Report, Canada, 1984。
- 4) PC斜張橋に関する調査研究委員会・海洋架橋調査会：PC斜張橋上部工設計指針（案），PC斜張橋に関する調査研究報告書，1981-3。
- 5) 例えば，宮本，菅原，斉藤：PC斜張橋の一試算設計について，プレストレストコンクリート，Vol.20，No. 4，pp.24～36，1987-8。
- 6) 星埜，佐伯：コンクリート斜張橋のクリープ解析，土木学会論文報告集，No. 295，pp.103～113，1980。
- 7) 本間，森田：不静定PC構造物のクリープによる影響，プレストレストコンクリート，Vol. 19，No. 4，pp.24～35，1977-8。
- 8) 佐藤，渡辺，佐藤：変位法によるコンクリート構造物のクリープ乾燥収縮解析の基礎理論，プレストレストコンクリート，Vol.22，No. 2，pp.59～66，1980-3。
- 9) 山田，古川，江草，井上：斜張橋ケーブルの最適プレストレス量決定に関する研究，土木学会論文集，第356号/I-3，1985-4。
- 10) 古川，角谷，熊谷，新井：プレストレストコンクリート斜張橋の最適斜材張力決定法に関する研究，土木学会論文集，第374号/I-6，1986-10。
- 11) 古川，角谷，新井，春日：コスト最小基準によるPC斜張橋の最適斜材張力決定法に関する研究，土木学会論文集，第392号/I-9，1988-4。
- 12) 小深田，宮本，藤井，玉置：PC斜張橋の斜材張力及び主桁プレストレスの最適化，土木学会第43回年講，V，1988-10，（投稿中）。
- 13) 白石：PC斜張橋（新丹波大橋）の風洞実験，プレストレストコンクリート，Vol.27，No. 1，pp.29～38，1985-1。
- 14) 林，今井，田中：PC斜張橋“EIMEIKAN BRIDGE”の設計，プレストレストコンクリート，Vol.27，No. 5，pp.7～17，1985-9。
- 15) 曾川，渡辺：PC斜張橋の構造特性に関する一研究，プレストレストコンクリート，Vol.26，No. 5，pp.51～63，1984-9。
- 16) 例えば，高部，今井，横山，田中：PC斜張橋の弾塑性地震応答解析—衝原大橋をモデルとして，—橋梁と基礎，Vol.20，No. 11，1986-11。
- 17) コンクリート斜張橋研究委員会・建設コンサルタンツ協会近畿支部：コンクリート斜張橋の設計上の諸問題に関する検討，第2次報告書，1987-8，（同付属資料：「PC斜張橋橋梁調査，1987,8」に内外のPC斜張橋，88橋の台帳・文献が収録されている）。
- 18) 石原，今井，熊谷：PC斜張橋の架設，橋梁と基礎，Vol.19，No. 8，pp.113～119，1985-8。
- 19) 佐藤・本間：PC斜張橋の計画，設計，施工，橋梁，Vol.13，No. 3，pp.21～35，1977-3。
- 20) F.Leonhardt 著，成井訳：斜張橋（特別寄稿），土木施工，Vol.29，No. 5，1988-5。