

道路橋におけるPRC構造について

水口 和之*

1. PRC の定義

プレストレストコンクリートの考え方は、その初期においては E. Freyssinet が提案した「作用するすべての荷重に対し部材断面に引張応力を生じさせない構造（フルプレストレス：引張応力発生を制限した PC）」が主であった。しかし、まれにしか生じない荷重に対してもフルプレストレスで設計することは、破壊に対して必要以上の安全性を有し経済性を欠くばかりでなく、死荷重状態での余分なプレストレスにより大きなクリープ変形が生じるなど、構造物の使用状態に問題が生じることもあった。

このような問題に対してドイツの Abeles は、設計荷重時においてある程度のひびわれを許容するパーシャルプレストレストコンクリート (PPC) の考え方を提案した。この研究は、PC 部材のひびわれ分散性の悪さや第二次世界大戦による中断などで実用化には至らなかったが、後にスイスの H. Bachmann に受け継がれて、スイスの設計規準 SIA 162 にパーシャルプレストレッシング（曲げひびわれ幅を制限した PC）として紹介され、今日のひびわれ幅を制限した PC の考え方の基礎となった。

一方、我が国においては、1961 年に横道博士が、破壊に対して十分な安全度を持つように設計された鉄筋コンクリート (RC) に比較的低いレベルのプレストレス（フルプレストレスの 1/5 程度）を導入してひびわれを

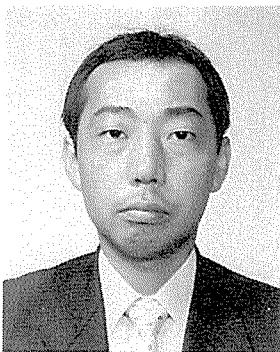
制限するプレストレスト鉄筋コンクリート (PRC) を提案した。

Abeles らの PPC の考え方が PC から発生しているのに対し、横道博士の PRC 構造は RC からのアプローチと言えるが、両者の間には与えるプレストレス量の大小の差こそあれ、プレストレスを与えられた鉄筋コンクリート部材という点では広い意味で同一の考え方であり、本文ではこれらすべてを含んだ広い範囲のパーシャルプレストレストコンクリートという意味で“PRC”という用語を使用している（道路橋示方書における PC の考え方は、若干の引張力の発生を許したパーシャルプレストレス（従来のⅡ種 PC）であるが、本文ではこれをフルプレストレスと同様に扱う）。

2. 現行の諸規準にみる PRC の現状

従来、コンクリート構造物は一般に弾性理論に基づく許容応力度法で設計されてきたが、弾性領域を大きくはずれた断面破壊に対する安全度や、使用状態におけるひびわれ幅の性状のように、素材の応力度だけでなく他の要因の影響も大きいものでは、単に許容応力度だけで安全度を保証する方法は合理的とは言えない。このような観点からコンクリート構造物の合理的な設計手法の再検討が行われ、特に 1964 年 CEB（ヨーロッパコンクリート委員会）により審議・提案された限界状態設計法の概念は、さらに CEB と FIP（プレストレストコンクリート国際連盟）の合同会議で検討され、1970 年 CEB-FIP 国際指針としてまとめられ、現在各国の示方書等に反映されている。

限界状態設計法は、「種々の限界状態について、それぞれの限界状態にとって最も適切な方法で個々に安全性を検討するための合理的な設計体系¹⁾」であり、一般的には終局限界状態・使用限界状態・疲労限界状態のそれぞれについての安全率を確認することにより、構造物の安全性を検証する。限界状態設計法を採用することにより、鉄筋と PC 鋼材をそれぞれ有効に使う設計が可能となり、一般的にパーシャルプレストレス部材となるため、PRC の考え方は限界状態設計法の概念とともに発展してきた。しかし、限界状態設計法はコンクリート構



* Kazuyuki MIZUGUCHI
日本道路公団
技術部構造技術課

造物全体を RC・PC および PRC の区分なく、統一的・合理的に設計できる設計体系であり、限界状態設計法を採用している規準においては PRC も許容されているというだけであり、PRC=限界状態設計法ではないのである。

さて、PRC=限界状態設計法ではないものの、限界状態設計法を採用している各国では、SIA 162 (スイス、1968 年)、CEB-FIP 国際指針 (1970 年) をはじめとし、おのずと PRC の考え方も受け入れられている。イギリスでは、1978 年に発行された BS 5400 ではほぼ完全な形で限界状態設計法を採用しており、その中で使用限界状態における引張応力度のカテゴリーの一つとして曲げひびわれ幅を制限した PC を許容している。

西ドイツの DIN 4227 は、CEB-FIP 国際指針発表以後も長い間 PRC を認めなかったが、1980 年にプレストレス導入レベルの最小値を 0.2 に制限して PRC の考え方を導入した。

また、アメリカでは 1963 年の ACI 318 の改訂により極限強度理論が従来の許容応力度法と併記して本文に採用され、その後、終局強度設計法を中心とした内容に改められた。

以上のように、欧米各国では限界状態設計法が基本的な設計手法として採用され、その中で環境条件に応じてひびわれを許容し、曲げひびわれ幅を制限した PC を認めている。ちなみに、一般的な環境で使用される道路橋は、すべて曲げひびわれ幅を制限した PC に分類されており、日本だけがひびわれを許容しない PC 部材で設計しているのが現状である。

3. 我が国における PRC 道路橋の現状

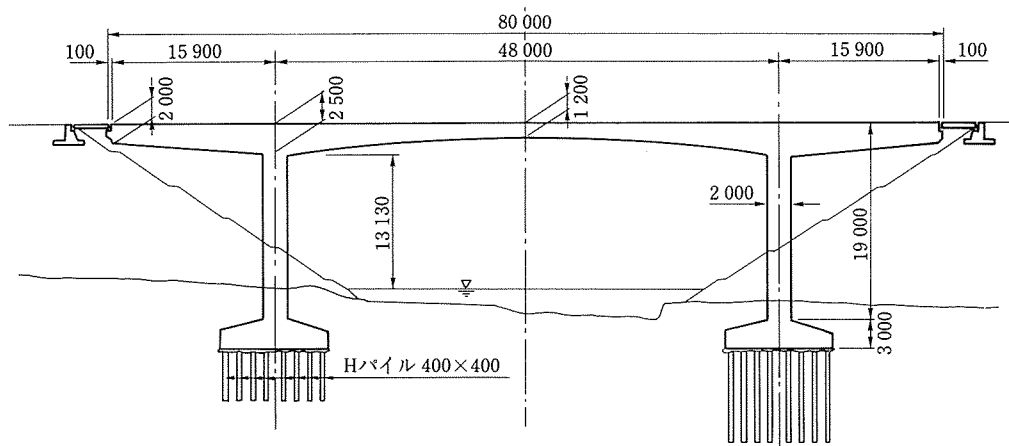
我が国のコンクリート橋に関する基準は、土木学会から「鉄筋コンクリート標準示方書」が 1931 年に制定さ

れたのが始まりである。また、プレストレストコンクリートについては、1961 年「プレストレストコンクリート設計施工指針」として同じく土木学会から基準化されたのが最初で、許容応力度によるフルプレストレスのみの記述であった。しかし、CEB-FIP 国際指針などの流れを受け、1978 年「プレストレストコンクリート示方書」において曲げひびわれ幅を制限した PC の考え方を許容した。また、その後「コンクリート標準示方書」の改訂 (1986 年) において、設計手法が許容応力度法から限界状態設計法に根本的に改められ現在に至っている。

さて、道路橋に限って見てみると、道路橋の設計実務書である道路橋示方書 (以下「道示」) は 1978 年の改訂により終局耐力の照査が導入され、ある意味で限界状態設計法の考え方を取り入れているといえるが、設計の基本は許容応力度法であり曲げひびわれの発生する PC を許容していない。そのため、土木学会基準で認められている曲げひびわれ幅を制限した PC で設計された道路橋は少なく、横道博士の提案した PRC の概念に基づいて設計された上姫川橋 (1965 年、北海道開発局、図-1) をはじめ、北海道内に 3 橋建設されただけであった。

一方、鉄道橋においては、上姫川橋の建設に前後して PRC の検討がすすめられ、鉄道橋としての初めての実橋であるポケラ B 橋が 1983 年に建設された。それ以来、60 橋を越す PRC 鉄道橋が建設され、1987 年には財団法人鉄道総合技術研究所から「PRC けた設計施工指針 (案)」が発行されて現在に至っている。

以上のように、鉄道橋 (および建築) の分野では PRC 構造がかなり普及しているのに対し、道路橋の分野では、上姫川橋の建設からかなり遅れ、1985 年に高速道路調査会が日本道路公団の委託を受けた「PRC 道路橋設計要領 (案)」がまとめられ、これに基づき試験



主桁に導入されるプレストレスは、一般の PC 橋の 1/5 の程度、破壊に対しては鉄筋コンクリート構造として設計している。

図-1 上姫川橋一般図

表-1 これまでに架設された PRC 道路橋

橋 梁 名	支間割り・形式	完成年	所在地
上 姫 川 橋	3 径間連続ラーメン箱桁橋 15.9+48.0+15.9 m	1966 年	北海道
上 鳥 崎 橋	6 径間連続桁橋 10.0+4@ 28.75+10.0 m	1972 年	北海道
紋 別 大 橋	(3 径間+単純) 桁橋 27.8 m (PRC 部)	1967 年	北海道
中郷 SA ランプ橋	単純箱桁橋 30.5 m	1986 年	茨木県
観音寺高架橋	(3+4) 径間連続 2 主版桁橋 19.0~30.0 m	1991 年	京都府

的に常磐自動車道中郷サービスエリア内のランプ橋が 1986 年に、また、近畿自動車道観音寺高架橋が 1990 年に建設されただけである。これまでに建設された PRC 道路橋の実績を表-1 に示すが、このように道路橋の分野へ PRC 構造が導入されにくい背景には、設計上の問題点がいくつかあり、以下にその点について述べる。

4. PRC 道路橋設計上の問題点

4.1 荷重とひびわれ幅の算定方法

道路橋を PRC 構造として設計する場合、最も大きな問題は設計活荷重の考え方である。鉄道橋の場合、設計荷重に占める活荷重の比率が大きい反面、載荷荷重の大きさと載荷回数が路線によって決定されているので、使用限界状態でのひびわれ幅や疲労限界状態での鋼材の応力振幅が比較的簡単に算出できる。その点、道路橋においては、想定する路線によって交通量や大型車の混入比率がまちまちであり、かつ将来の交通量の変化や車両の大型化による荷重の増大の予測が難しく、ひびわれ幅の算定方法を一義的に決定するのが困難である。

例えば、コンクリート標準示方書では、使用限界状態における曲げひびわれ幅の算定式は次のように表される。

$$W = k_1 \{4c + 0.7(C_0 - \phi)\} \times (\sigma_{se} / E_s + \epsilon_y) \dots (1)$$

ここに、

k_1 : 鉄筋の付着性状の影響を表す定数 (異形棒鋼 = 1.0)

C_0 : 鉄筋の中心間隔

c : 鉄筋のかぶり

E_s : 鉄筋のヤング係数

ϕ : 鉄筋の径

σ_{se} : 鉄筋の増加応力度

ϵ_y : クリープによるひびわれ幅の増加を考慮する係数

曲げひびわれ幅は式 (1) からわかるように、鋼材の径・かぶり・間隔と応力度との関数で表され、このときの鋼材の増加応力度の算定に用いる設計断面力 M_e は式 (2) のとおりである。

$$M_e = M_p + k_2 \cdot M_r \dots (2)$$

ここで、 M_p は持続荷重 (一般的には全死荷重)、 M_r は変動荷重 (活荷重) による断面力であり、 k_2 は変動荷重係数として変動荷重の頻度 (交通量) の小さいものや変動荷重の影響の少ない構造では 1.0 より小さく設定できるとしている。いま、設計活荷重に TL-20 を用いたとして、大型車混入率 40 %、支間 60 m、供用期間 50 年の場合、L-20 と同等の載荷状態が生じる頻度は 1~3 % であり、平均的な載荷状態は L-20 の 1/2 程度であると報告されている²⁾が、このような路線に架かる道路橋の設計活荷重をどう設定するか (k_2 の取扱い) は、大きな問題である。すなわち $k_2 = 1.0$ とすると、使用状態において十分安全な設計となるが、PRC 構造の利点の一つである経済性が損なわれる可能性もあるのである。

なお、中郷ランプ橋および観音寺高架橋では、高速道路という路線の重要性を考慮して $k_2 = 1.0$ としている。

4.2 許容ひびわれ幅

PRC 橋の設計上の問題点の大きなものに許容ひびわれ幅の設定法がある。コンクリート標準示方書では許容ひびわれ幅を、主鉄筋からのかぶり c を用いて $0.005c$ 以下としていて、特に厳しい環境では $0.0035c$ としているが、中間支点付近の曲げひびわれ幅をどの程度まで許容するか (またはひびわれの発生を許容しないか)、現在のところ議論の分かれるところである。

道示では、支間中央部下縁の応力度を設計荷重作用時で -13.5 kgf/cm^2 ($\sigma_{ck} = 350 \text{ kgf/cm}^2$ の場合) 以上、中間支点付近上縁の応力度を 0 kgf/cm^2 以上 (引張応力を発生させない) と規定している。中間支点では PC ケーブルが上縁付近に配置され、ひびわれが発生した場合、水や凍結防止剤の浸入により鋼材が腐蝕する危険性を考慮した規定であるが、この考え方がそのまま PRC 構造に適用できるであろうか?

使用時において連続桁の中間支点にひびわれを発生させず、支間中央部のみひびわれの発生を許容するような設計方法を取った場合、中間支点付近と支間中央部の必要プレストレス量が大幅に異なり PC 鋼材配置が極端に不経済になるばかりか、桁内応力の線形性の前提が失われ曲げモーメントの再分配を考えなければならなくなる。また、ひびわれの発生を許したとして、支点部と支間部の許容ひびわれ幅の制限値を大きく変えてしまうと結局同じようなことが問題となる。

一方、 $0.0035c$ と $0.005c$ のひびわれ幅の違いが鋼材腐蝕に与える影響を考えると、はなはだ不明確である。確かに、鉄道橋と違い、路面の凍結防止に大量の薬剤を散布する道路橋では、ひびわれからの水の浸入により鋼材になんらかの影響を与えるであろうが、それとて防水工がしっかり施工されていれば問題とならないと思われ

るし、ましてや PC 鋼材のかぶりは鉄筋よりも大きく PC 鋼材が腐蝕により破断する可能性は（施工不良がなければ）ほとんどないだろう。とはいえ、コンクリート橋へひびわれの発生を許すということは「品質の低下」ととらえられることが多く、現在のところ道路橋には受け入れられていないため、曲げひびわれ幅について具体的に規定した基準はなく、今後の整理が期待される。

4.3 鋼材疲労の影響

従来の PC 構造では設計荷重作用時は常に部材を圧縮部材として使用するため、鋼材の応力変動も片振りであり疲労の照査については行う必要がなかった。しかし、PRC 構造とすると設計荷重作用時において部材に引張力が働くため、鋼材の疲労に関する照査を行う必要が出てくる（ここでは鋼材とは鉄筋と PC 鋼材の両方を指す）。

一般に、疲労状態の照査は以下のごとくなる。

- ① 橋梁の設計耐用年数を決定する。
- ② 設計耐用期間中に現れる設計活荷重 (TL-20 あるいは TT-43) の等価繰返し回数を算出する。
- ③ 実験で求めた $S-N$ 曲線から設計耐用年数に相当する設計疲労強度を求める。
- ④ 設計活荷重による応力振幅が③で求めた設計疲労強度よりも十分小さいことを確認する。

以上のことを厳密に求めるのは非常に困難である。例えば、橋梁の耐用年数は一口に何年と言えるものではないし、耐用年数期間中の TL-20 の等価繰返し回数は交通量・支間など路線によってまちまちだからである。ただし、「PRC 道路橋設計要領（案）」では、設計耐用年数を諸外国の例を参考にして 50 年とし、疲労試験から求めた $S-N$ 曲線および高速道路での交通量測定結果から 50 年間の等価繰返し回数を推定したデータを示してあり、一応の疲労の照査を行えるようにしている。なお、箱桁や中空床版橋のような引張フランジの大きな構造物は、変動荷重の影響が比較的小さく、疲労で問題となることは少ないことが報告されている³⁾。

4.4 許容応力度法との関係

先に述べたとおり、PRC=限界状態設計法ではないが、PRC 構造は使用状態でのひびわれ幅の照査や疲労の照査が必要になってくるため、限界状態設計法にて設計すると非常に都合がよい。しかし、道示での設計に慣れた設計担当者には限界状態設計法での表現は理解しづらく、容易には受け入れられないと思われる。ところで、ひびわれ幅の算出方法は、式 (1) により鉄筋の増加応力度で算出できるし、疲労に関しても一般的な構造物の場合既往のデータを用いて安全側に照査できるので、PRC の設計方法を従来の設計法に準じた表現で表すことも可能である。PRC を道路橋の分野に積極的に導入

するためには、上記のように従来の道示の表現でひびわれ幅や疲労の照査を行える設計基準の整備が必要となってくる。

5. PRC のメリットと今後の適用性

設計上の問題点であるひびわれ幅の照査方法と疲労の問題が解決されたとして、PRC 構造を実際の橋梁にどのように適用していくべきであろうか。以下に、PRC 構造の利点と今後の展望について記述する。

5.1 RC 構造物の耐久性の向上

RC 構造物はコンクリートにて圧縮力を負担し、引張は鉄筋のみで受け持つ。設計上引張側のコンクリートを無視してひびわれ幅の直接制御ができないため、耐久性に問題が生じることもある。日本道路公団における高架橋の標準形式である RC 中空床版橋を例にとると、PC 橋に比べ安価な形式であり、特に橋脚高が低く地盤が良好な時には最も経済的な形式であるが、RC 構造であるためその適用支間は限られる。すなわち、RC 構造物はひびわれ幅の直接的な制御方法を持たないため、ひびわれの制御は鉄筋を多く入れたり、桁高を上げたりすることにより鉄筋の応力度を抑える間接的な方法しかない。そのため、設計荷重作用時における許容応力度を満足してもひびわれの発生により構造物の耐久性の点で劣るため、適用支間は 18 m 以下程度に限られてしまう。

RC に対し PRC は、終局耐力の向上ばかりでなく設計荷重作用時のひびわれ幅をプレストレスにより直接制御することが可能となる。また、支間 15 m の RC 中空床版橋と PRC 中空床版橋では鋼材配置が表-2 のようになり、コンクリートの打設性能が向上し、耐久性ポイントの比較においても、水セメント比に係わる堅硬性、永久荷重による曲げひびわれ、コンクリートの打設性能に係わる鉄筋の段数およびあきにて PRC が有利となる（耐久性ポイントの算定には土木学会の「コンクリート構造物の耐久性設計指針（試案）」⁴⁾を用い、RC・PRC に共通の項目は「その他」に計上した）。

このように、PRC は従来の RC の限界を超えた構造物を十分な耐久性を確保しつつ設計することが可能となる。この考え方は RC 上部工のみではなく、大きな張出しを持つ RC 橋脚などにも適用できる。

5.2 施工性と経済性

PRC のメリットは鋼材配置の施工性の向上についても言える。PRC の設計を取り入れることにより、鉄筋と PC 鋼材を各限界状態を満足する範囲で最も効率の良い組合せとすることが可能となる。図-2 において中空床版橋における PC と PRC の鋼材配置を比較すると、鋼材の配置段数や鋼材間隔、コンクリートの打設性において PRC が有利となる。

表-2 RC と PRC の鋼材配置および耐久性ポイントの比較

鋼材配置図	RC (支間 15 m)		PRC (支間 15 m)	
耐久性指数	項目	点数	項目	点数
	ワーカビリティ	-4	ワーカビリティ	-5
	堅硬性	5	堅硬性	12
	単位水量	10	単位水量	7
	温度ひびわれ	3	温度ひびわれ	3
	曲げひびわれ	1	曲げひびわれ	10
	かぶり	10	かぶり	12
	鉄筋の段数およびあき	4	鉄筋の段数およびあき	10
	その他	41	その他	41
合計	119	合計	140	

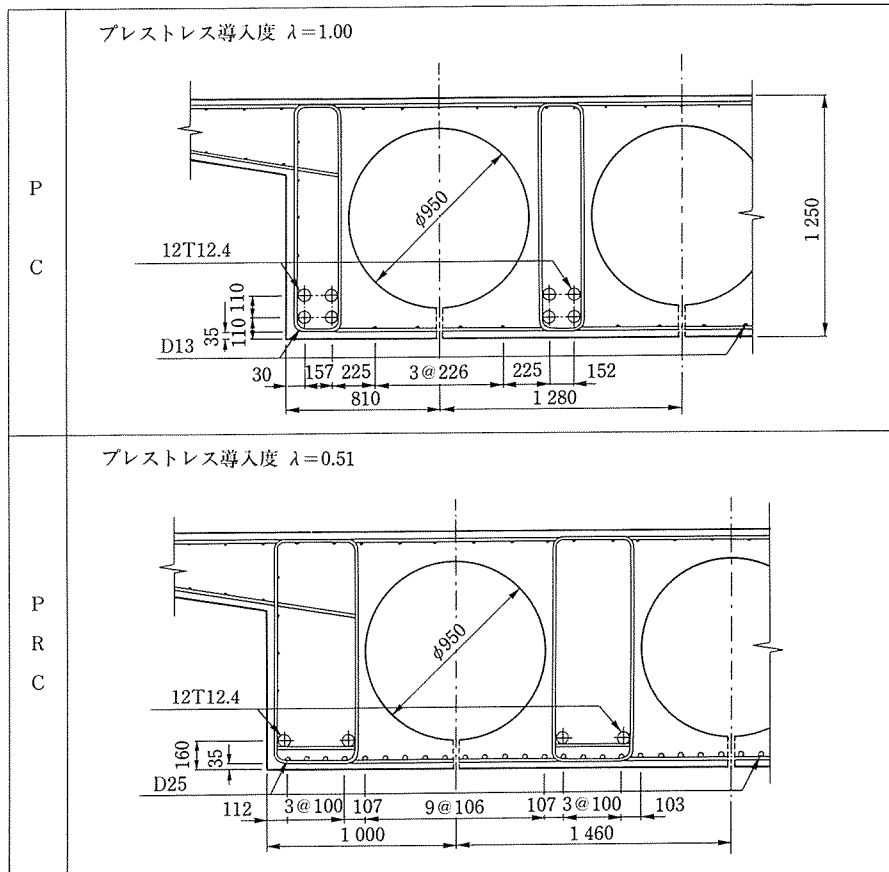


図-2 支間 25 m の中空床版橋における鋼材配置

PCにおいては、設計荷重作用時においてフルプレストレスとなるようなPC鋼材量を定めるためPC鋼材量・鉄筋量は一義的に決定されるが、PRCにおいては設計荷重時のひびわれ幅その他を満足する範囲でプレストレス導入度を任意に設定できるため、設計者が施工性を考慮した鋼材配置を行えばよい。中空床版橋におけるPC鋼材と鉄筋の組合せによる経済性は、プレストレス導入度0.4~0.6程度であれば大差がないため、このような施工性を重視した設計が可能となるのである。

5.3 緊張管理の簡略化

PRC部材はPC部材ほど導入されるプレストレスの変動に対し鋭敏ではない。PCはなんらかの障害によりプレストレスが減少すると部材にひびわれが生じ設計上の前提条件が成り立たなくなるが、鉄筋で十分に補強されたPRC部材では、プレストレスの20%程度の減少であれば終局耐力でなく使用状態の許容ひびわれ幅も満足する設計が可能である。このことは、PRCの採用により、PC鋼材の緊張管理を簡略化し現場作業の省力化を図ることができることを意味する。

5.4 PRCの採用によるPC部材の改善

自重に対し完成後に作用する活荷重が大きく、導入すべきプレストレスが大きい部材は、導入直後のコンクリートの圧縮で断面寸法が決定されることがしばしば生ずる。このような部材にあってはPRCとして設計することにより、導入プレストレスが減少し、本来の使用状態における必要断面で設計することが可能となる。したがって、一般にプレテンション部材や桁高制限を受けるような部材はPRCとして設計したほうが合理的である。

また、PC連続ラーメン橋においてはコンクリートのクリープにより連続径間数が制限されることが生じるが、PRCとしてプレストレスの導入力が減少すればクリープによる拘束力も減少し、連続ラーメン橋の多スパン化が可能となる。

5.5 PRCの採用によるRC部材の改善

若材令のRC橋に荷重を載荷させると、ひびわれが発生しそのひびわれがコンクリートのクリープ・乾燥収縮により部材の耐久性を損ねるほどに拡大する恐れがあるため、RC橋は接地式支保工以外の方法で施工されることは極めて稀であった。しかしながら、この初期ひびわれをプレストレスの導入により制御すれば、接地式支

保工以外の工法（移動支保工、押し出し工法、カンチレバー工法等）により施工することが可能となり、中小スパンの橋梁の適用範囲が拡大する。

6. ま と め

道路橋にPRC構造を用いる場合に問題となるのは、先に述べたようにひびわれ幅の照査と鋼材の疲労強度であり、現行の許容応力度設計法の表現を変えずに設計することは十分可能と思われる。また、PRCの考え方は、諸外国での事例に見られるように、多種多様な構造物の設計に対応しやすい合理的な設計方法であり、今後の道路橋に要求される多くの課題（省力化・高耐久性）に対するひとつの方向性を見いだすものと考えられる。

なお本文は、道路橋にPRCを導入した場合の問題点や将来性についての一考察であり、PRC構造の設計細部については「PRC 観音寺高架橋の設計・施工」および「PRC 昭和橋の設計・施工」を参照していただきたい。

さらに、PRC構造採用に当たっては「コンクリート橋にひびわれを許すべきか否か」という大問題があり、これまでも多くの議論がなされてきたが、いまだに結論は得られていない。今後、より一層議論が進み、PRC構造に関する理解が深まることにより、多くの道路橋に適用できるような諸基準の整備が進むことを期待する。

参 考 資 料

- 1) 岡村 甫：コンクリート構造の限界状態設計法，共立出版(株)1988年2月
- 2) 建設省土木研究所資料：限界状態設計における設計荷重に関する検討
- 3) PRC道路橋の実用的設計法に関する調査検討報告書，(財)高速道路技術センター，平成4年3月
- 4) 土木学会：コンクリート構造物の耐久性設計指針（試案），コンクリートライブラリー第65号，平成元年8月
- 5) (財)日本道路協会：道路橋示方書，平成2年2月
- 6) (財)土木学会：コンクリート標準示方書，昭和61年10月
- 7) (財)高速道路調査会：プレストレストコンクリート部材の設計法に関する調査研究報告書（その1）～（その3），昭和59年2月～61年2月
- 8) (財)高速道路調査会：コンクリート道路橋の限界状態設計法に関する調査研究報告書（その1）～（その3），昭和63年2月～平成2年2月
- 9) 横道英雄：コンクリート橋，技報堂出版，1982年8月
【1992年8月19日受付】