

PCプレキャストセグメント橋梁の現況と研究の動向

出雲 淳一*

1. はじめに

PCプレキャストセグメント工法は、あらかじめセグメントに分割して製作されたコンクリート製部材を現場で組み立てて、プレストレスを与えて一体化して構造物を構築する工法である（この工法をプレキャストブロック工法と呼ぶ場合もある）。この工法は、施工技術の合理化などの観点から、海外では1950年代頃から橋梁工事などに採用され始め、その施工実績もかなりの数に達している。

一方、我が国では、プレキャストセグメント工法による橋梁の歴史は、1966年の首都高速道路公団による目黒高架橋工事¹⁾に始まり、これまで道路橋、鉄道橋などに利用されてきているが、その施工実績が海外と比べると非常に少ないのが実状である²⁾。

しかし、最近我が国においても、工事環境の変化に伴い、施工時の制約条件がこれまで以上に厳しくなるなど、急速施工の必要性、将来にわたって予測される労働者不足を補うための施工技術の合理化、構造部材の高品質化などが一層要求されるようになってきた。このような背景から、最近ではPCプレキャストセグメント工法を積極的に採用する工事例が増え始めている。例えば、東名足柄東橋³⁾などは、主に急速施工の必要性からPCプレキャストセグメント工法が採用された一例と言える。

また、外ケーブル方式を用いた構造形式の新しい展開は、重信川高架橋工事⁴⁾などに見られるように、PCプ

レキャストセグメント構造形式にも影響を与え始めている。このような状況下において、PCプレキャストセグメント工法は、新しい発展段階を迎えてようとしている。

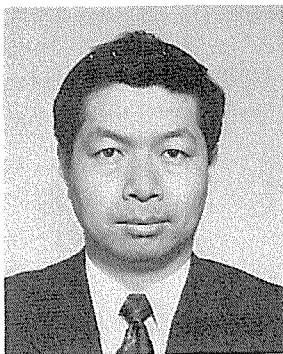
このような理由から、本稿では、PCプレキャストセグメント橋梁に関する現状と問題点を、特に設計および研究の立場から取り上げ、今後の解決すべき課題について解説することにした。PCプレキャスト部材は、現在橋梁をはじめとして耐震壁、タンク、ロックシェッドなどの様々な土木建築構造物に適用されている。そのすべてのPCプレキャストセグメント構造を限られた紙面で扱うのは難しく、また、プレキャスト部材に関する特集号（Vol. 33, 特別号, 1991）が以前に企画されていることから、本稿では橋梁構造に焦点をあて、主として長スパン化への発展が期待される箱形断面を有するポストテンション方式のプレキャストセグメント構造を扱うことにする。ただし、プレストレスコンクリートに関わる基礎的実験および研究などは必ずしも橋梁構造の範疇に入るとは限らないが、PCプレキャストセグメント構造と関連があると判断される場合には、その内容も適宜、紹介することにした。

2. PCプレキャストセグメント橋梁の現状

2.1 PCプレキャストセグメント橋梁工事の推移

我が国におけるPCプレキャストセグメント工法による橋梁の施工状況^{2),5)}を整理した結果を図-1に示している。図-1では、これまで建設されたPCプレキャストセグメント橋梁の単年度ごとの橋長（セグメント部のみ）の累計を示している。調査の対象となった橋梁は28件で、1966年に我が国でPCプレキャストセグメント工法が橋梁工事に採用されて以来、1970年代までほぼ毎年PCプレキャストセグメント橋梁が建設されてきている。

しかし、1980年代にはいると一時期PCプレキャストセグメント橋梁があまり採用されなくなるが、1990年代にはいると再びその建設が増える傾向がみられる。過去約30年余りにおけるその工事件数の頻度は毎年1～



* Jun-ichi IZUMO
関東学院大学
工学部
助教授

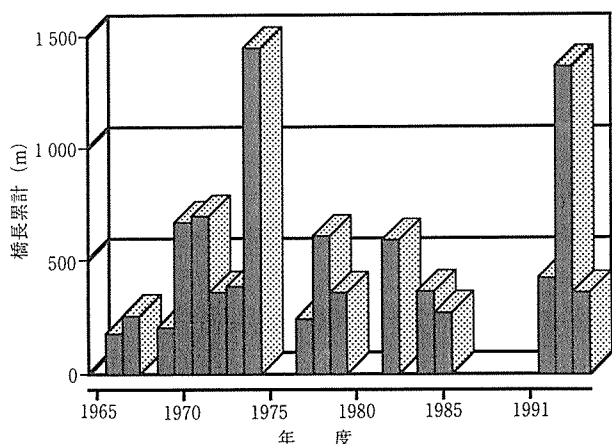


図-1 PCプレキャストセグメント（橋梁）の建設の推移

2件、施工された橋長は年平均で230m程度となっており、橋梁工事全体から見た場合、その工事量は非常に少ない。しかし、PCプレキャストセグメント工法が橋梁に採用された理由⁵⁾の大半が、急速施工および工期の短縮によるものであることを考え合わせると、このような施工条件は今後も増え続けることが予想され、PCプレキャストセグメント橋梁に対する需要も増えていくのではないかと考えられる。

2.2 PCプレキャストセグメント構造の特徴

PCプレキャストセグメント橋梁の構造パラメーターとしては、構造形式、断面形状、および継ぎ目構造などが挙げられる。これまで採用されたPCプレキャストセグメント橋梁のこれらのパラメータについて調べてみると、以下のようにまとめることができる。

(1) 構造形式

国内でこれまでに建設されたPCプレキャストセグメント橋梁の構造形式は、箱桁橋を採用する 경우가多く、その大半が連続箱桁橋である。一方、外国でも連続箱桁

橋を採用する機会が多いようであるが、連続トラス橋、斜張橋およびアーチ橋などの例もある。特に、海外では斜張橋を採用する事例も多い。図-2は、国内外で建設されたPCプレキャストセグメント橋梁の構造形式の件数と最大スパンとの関係を示している。図-2に示されるように、我が国ではPCプレキャストセグメントが採用される橋梁の最大スパン長のほとんどが100m以下であるのに対し、海外の例では100mを超える場合にもPCプレキャストセグメントが採用されている。さらに、図-2はスパン長が100mを超える橋梁に対しては、構造上有利な斜張橋が選ばれる可能性が高いことを示している。

最近では、我が国でも大芝大橋⁶⁾および平羅橋⁷⁾などのPC斜張橋にプレキャストセグメント工法が採用される例もあり、PCプレキャストセグメント工法においても様々な構造形式の選択の可能性が出始めている。しかし、国内でのこれまでの実績では、橋長およびスパンに関しては、そのほとんどが橋長1000m以下、スパン40~60mが大半を占める結果となっている。橋梁の長スパン化に伴い、今後は、構造形式においてこれまでとは異なる構造形式も採用されることが期待される。

(2) 断面形状

図-3には、構造形式別のスパン長に対して考えられる一般的な主桁の断面形状が示されている。断面形状に関しては、断面の軽量化を図るために1室箱桁断面を採用する例が多い。しかも、広幅員断面に対してもウェブを配置することをやめて、斜めストラットを代わりに採用した断面も見られる。また、景観に対する配慮からウェブを傾斜させた断面形状の例も見受けられる。断面の軽量化は、製作設備、架設設備などの施工条件に深く関係するばかりでなく、橋梁の長大化のためにも重要な

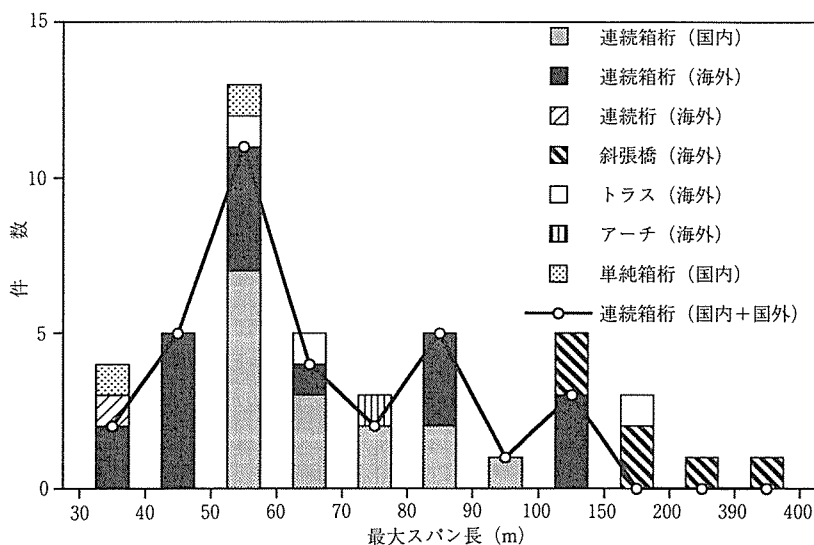


図-2 最大支間長と構造形式との関係

構造形式	支間長 (m)	断面形状	主桁の断面形状			備考
			上床版の全幅 7~12m	上床版の全幅 10~15m	上床版の全幅 13m~	
単純桁橋	20~50	版桁				支保工架設
		等断面箱桁				支保工架設
連続桁橋 連続ラーメン	30~60	等断面箱桁				支保工架設 工片持ち張出し 押出し 移動支保工
	50~120	変断面箱桁				支保工架設 工片持ち張出し
斜張橋	50~	変断面箱桁				支保工架設 工片持ち張出し
		端桁				支保工架設 工片持ち張出し
		翼桁				支保工架設 工片持ち張出し

図-3 構造形式と断面形状⁵⁾

要因となっている。桁高を含めたPCプレキャストセグメントの最適な断面形状の決定は、試行錯誤で行われている場合が多く、最適設計などの手法を用いて定量的に評価するための研究が今後必要になってくると考えられる。さらに、断面の軽量化を図るために高強度コンクリートをプレキャストセグメント構造に適用することも検討していく必要があると考えられる。

(3) 継ぎ目構造

プレキャストセグメント工法は、分割されたコンクリート部材を一体化して構造物を製作するために隣接するセグメント間で継ぎ目を有する構造となっている。セグメント相互の位置を正しく固定すると同時に、継ぎ目部でせん断力を伝達するために、セグメントは接合キーを有する構造となっている。接合キーは、コンクリートに凹凸を設けた構造のコンクリート製キーと鋼製キー(図-4参照)とに分けることができ、また、接合キーの配置数の違いによって、シングルキーとマルチキーとに分類することができる。コンクリート製のマルチキーの場合、多段配置接合キーと波形接合キー(図-5参照)

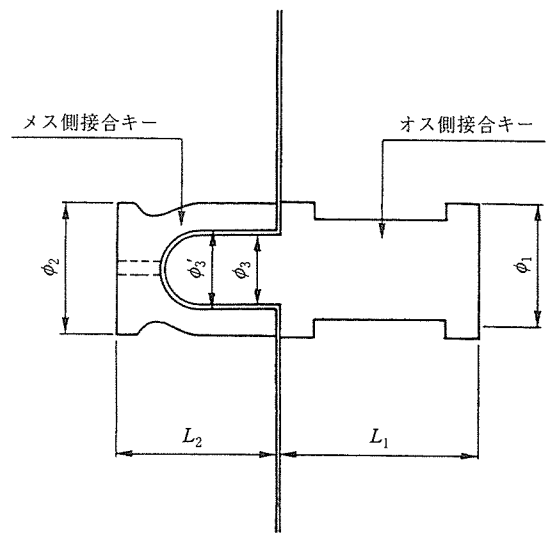


図-4 鋼製接合キーの一般的構造²⁴⁾

とがある。

接合キーの選択は、PCケーブルの配置方法にも関係し、国内では内ケーブル方式が主流となっているので、接合キーには大型のシングルキーを用いる場合が大半を

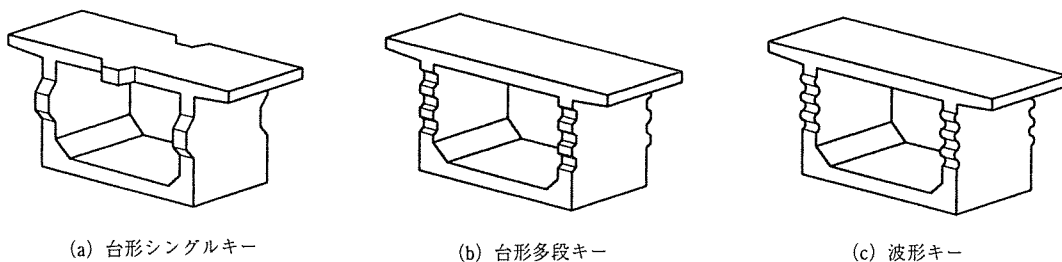


図-5 コンクリート製接合キーの一般的構造

占めている。しかし、海外ではマルチキーが主流となってきたており、また最近ではケーブル配置として外ケーブル方式を採用する工事例も見受けられるようになり、重信川高架橋⁴⁾のようにマルチキーを採用する例もある。

また、目地にはドライ目地、ウェット目地（モルタル目地、コンクリート目地、エポキシ目地）などがある。目地の種類は、終局時の耐力にはあまり影響を及ぼさないが、ドライ目地の場合、使用時に引張応力が断面内に発生すると目地部にひびわれが集中すること、あるいは防錆上の配慮、施工の急速化などの理由から、目地部にエポキシ樹脂を用いる場合が多い。

接合キーと目地部の処理は、プレキャストセグメントの一体化を確実にするために、設計上の配慮が必要であるが、現行のコンクリート標準示方書では、それに対する明確な設計法が示されていないのが現状である。

3. 設計上の問題点と今後の課題

PCプレキャストセグメント橋梁の工事量は、前述のようにそれほど多くないのが現状である。これは、プレキャストセグメント構造を積極的に採用するという理由よりはむしろ、社会的な制約条件、施工環境などの外的な要因から、プレキャストセグメント工法が取り入れられてきたためと考えられる。そのため、PCプレキャストセグメント構造の設計において、その利点が現行設計方法に反映されていないと筆者は感じている。

例えば、PCプレキャストセグメント構造の一般的な長所の一例として、①品質管理が容易で、品質の高い部材を製作することができる、②製作された部材は、架設までの間、ストックヤードで保管されるために架設後の乾燥収縮やクリープ量が少ない、などが挙げられる。しかし、これらの要因が材料係数などの部分安全係数や設計条件に必ずしも反映されているとは言い難い。

また、接合部の設計に関して、コンクリート標準示方書では現在のところ具体的な設計方法が示されていない。一方、道路橋示方書においては、PCプレキャストセグメント構造の設計は、継ぎ目のない一体構造として設計を行うことを前提としており、接合面において使用限界状態でフルプレストレスとするほかに、割増し荷重組合せに対して許容値を満足させる規定となっている。さらに、接合部に配置した接合キーの照査を架設時および終局限界状態時のせん断力に対して行うことが必要とされている。しかし、一方では設計を行うに十分な規定がなされておらず、不明確な部分もあると指摘されている⁸⁾。

プレキャストセグメント構造の設計に関しては、接合面での制限値が厳しく、PPC構造が一つの構造形式として普及しつつあるにもかかわらず、ひびわれ幅を許容

する設計法は現在のところ認めがたいことになる。

現行設計では、軸方向鉄筋が接合面で不連続となる構造部材に対しても、一体構造と同等レベルの性能を要求している。しかし、このことは換言すると、コンクリートセグメント構造の限界状態が明確にされていないからとも言える。広義の意味において、鋼構造はプレキャストセグメント構造と言え、それを前提とした設計方法が既に確立している。にもかかわらず、PCプレキャストセグメントの場合には、継ぎ目のない一体構造を前提とした設計方法に基づいて設計がなされているのである。PCプレキャストセグメント構造が今後普及するためには、PCプレキャストセグメント構造の限界状態に基づく設計法の確立が必要ではないかと考えられる。

プレキャストセグメント構造の設計法を確立するための課題としては、以下の点が挙げられよう。

- 1) 内ケーブル方式および外ケーブル方式のPCプレキャストセグメント構造の挙動を定量的に評価する手法を確立し、その限界状態の設定を明確にする。
- 2) 継ぎ目部での接合キーの形状、数およびプレストレスの導入量などの要因が、せん断抵抗に及ぼす影響を定量化する。
- 3) プレキャストセグメント構造の特徴である良好な品質管理、施工の合理化などが部分安全係数などに反映されるためのデータの蓄積を行う。
- 4) 軽量化を図るための高強度コンクリートを用いた構造物の設計方法を確立する。

これらの課題を解決することにより、一体打ち構造と同じようなレベルの設計が、プレキャスト構造においても可能になると考えられる。

4. 最近の研究の動向

前節で述べたPCプレキャストセグメント構造の設計上の問題点を解決する方向にある研究、ならびに最近の研究を動向を以下に紹介することにする。

4.1 新しい構造に関する研究

コンクリート橋の課題である橋体重量を低減するために、①ウェブ重量が軽減できる外ケーブルを採用する、②ウェブをコンクリートから鋼板に変更する、③床版厚を軽減するなどの方策が考えられている⁹⁾。橋梁上部工の軽量化は、今後のコンクリート橋の新しい構造形式の発展に深く関わりがあり、このことはPCプレキャストセグメント橋梁にもあてはまると考えられる。

プレキャストセグメント構造の重量を軽減するために、則武ら¹⁰⁾は、従来の構造(PC箱桁構造、ウェブを鋼にした合成構造、およびPCトラス構造)に高強度コンクリートを用いて部材の軽量化を図った場合の問題点を指摘し、図-6に示すような上下床版部材とトラス

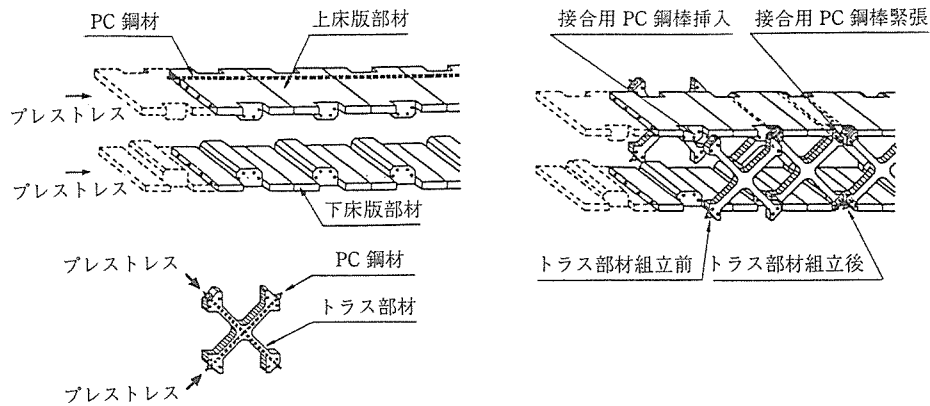


図-6 スラプトラス構造¹⁰⁾

斜材とから成る新しいプレキャストセグメント構造を提案している。

一方、跡部¹¹⁾は、橋脚のプレキャストセグメント化に着目して、新しい橋脚構造を提案している。図-7は、橋脚の断面構造の概念図を示したもので、橋脚は鋼管、プレキャストセグメントおよび中詰めコンクリートから構成されている。橋脚外周に配置されたプレキャストセグメントは、荷重作用時には、圧縮部材として作用するとともに、施工時には中詰めコンクリートの外型枠として利用される。

プレキャストセグメントの新しい構造に関する研究は、現在のところ少ないものの、今後このような提案や研究が増え、既存の構造形式にとらわれない新しい構造がプレキャストセグメント構造に適用されることを期待したい。

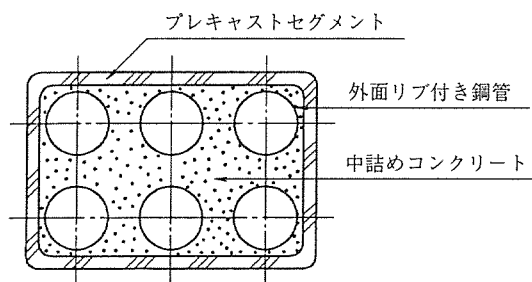


図-7 合成構造柱断面の概念図¹¹⁾

4.2 プレキャストセグメント構造の挙動解明に関する研究

最近のプレストレストコンクリートに関する研究の傾向として、外ケーブルを用いたプレストレストコンクリートの挙動に関する研究が増えており、研究調査も盛んに行われている^{12), 13)}。これは、橋梁上部構造の軽量化を図る一つの方策として、外ケーブル方式を採用する構造形式が再び注目されているためと考えられる。プレキャストセグメント構造に外ケーブル方式を用いた場合の挙動について研究した例は数少ないが、最近見受けら

れるようになってきている。

山口¹⁴⁾らは、プレキャストセグメントに外ケーブルを用いた梁の曲げ試験を行い、その挙動を報告している。彼らが行った実験によると、ドライ目地、エポキシ目地および一体打ちの場合、ひびわれ発生位置、ひびわれの進展状況はそれぞれ異なるが、最大曲げ耐力は目地の条件にはあまり左右されないでほぼ同じ程度であったことが報告されている。また、外ケーブル方式を用いた場合、一体構造はプレキャストセグメントに比べ約2割程度耐力が高い傾向が認められたこと、および精算法を用いた場合最大耐力を精度良く求めることができることを示している。

また、外ケーブル方式と内ケーブル方式との分担率をどのように設定するかという問題は、設計上の課題であり、実橋の1/3の大きさの模型供試体を用いて、内ケーブル方式と外ケーブル方式とを併用したPCプレキャストセグメントによる連続箱桁橋の挙動を調べた実験的研究もある¹⁵⁾。この研究では、非線形解析手法による解析が行われ、実験結果との比較検討が行われている。解析結果は実験から得られた変形性状をある程度予測できるものの、破壊時の挙動を十分に推定するには至っていないことが今後の課題として報告されている。

外ケーブル方式の梁の構造解析は、梁断面内での平面保持の仮定が適用できないために、梁とケーブルとの変形の適合条件と力の釣り合い条件からその挙動を求める必要がある。現在、外ケーブル方式の構造解析に関して、様々な解析手法が開発され、その評価が行われている¹³⁾。

新井¹⁶⁾は、ファイバーモデルによる非線形解析手法を提案し、その解析手法を外ケーブルを用いたプレキャストセグメント梁の解析にも適用することを試みている。さらに、内ケーブル方式と外ケーブル方式の比率が、終局耐力に及ぼす影響について数値シミュレーションを行い、解析結果からは内ケーブル方式の比率が約50%程度が一応の判断の目安であることを示してい

る。

PCプレキャストセグメント梁の曲げせん断挙動に関しては、伊藤ら^{17),18)}は、アンボンドタイプとボンドタイプの一体構造の梁とプレキャストセグメント梁とを製作して、そのせん断試験を行っている。アンボンド梁とボンド梁では、一体構造の場合には、ひびわれ発生、せん断耐力に対してあまり差が認められなかったこと、および軸方向鉄筋が不連続となるプレキャストセグメント梁では、アンボンドタイプおよびボンドタイプのいずれの場合にも一体構造に比べてせん断耐力は約2割程度低下することが報告されている

一方、接合キーを有しないプレキャストセグメント梁のねじり挙動に関して、山村¹⁹⁾らは箱形断面を有する梁を製作し、軸方向プレストレス量、および壁厚を実験パラメータとして純ねじり試験を行っている。また、有限要素法による解析も行い、実験結果との比較検討を行っている²⁰⁾。破壊時の挙動は、接合キーを有さないために接合面でのすべりによる破壊と斜めひびわれの増大に伴うスターラップの降伏による破壊に大別することができ、プレストレス量が小さい場合や壁厚が小さい場合には、接合部でのせん断抵抗力が不足し一体構造に比べてねじり耐力が低下する結果となっている。

ここで紹介した研究などは、PCプレキャストセグメント構造の終局限界状態を明確にするための有益な情報を提供しており、今後更にこれらの研究が進展することを期待したい。

PCプレキャストセグメントにおける継ぎ目構造の挙動に関しては、建設省土木研究所と(社)プレストレス・コンクリート建設業協会とで3年間にわたり、継ぎ目部での接合キーの設計法の確立のための実験を行ってきた^{21),22),23)}。実験は、鋼製接合キーおよびコンクリート製接合キーの接合部をモデル化して、静的荷重によるせん断およびねじり試験を行い、接合部での挙動を明らかにしている。プレテンション方式のプレキャストセグメントを対象にした鋼製キーのみならずコンクリート製の接合キーについても検討を行ってきており、ポストテンション方式のプレキャストセグメント構造の接合キーの設計に対しても重要な資料を提供している。これらの研究成果により、鋼製キーを用いた場合には、プレストレスによる軸方向力の30%までをせん断抵抗力として考慮することが可能となっているのである²⁴⁾。

コンクリート製の接合キーの場合にも、接着剤が完全に硬化していれば、軸方向プレストレス力の90%ほどのせん断抵抗力を期待することができ、今後ポストテンション方式のプレキャストセグメント構造の接合部の設計に反映されるものと考えられる。

5. おわりに

PCプレキャストセグメント橋梁の歴史は比較的古いものの、我が国では大型の橋梁に適用される例は少なかった。しかし、工事環境の変化に伴い、施工の省力化、急速化に対する要求が高まりつつあり、PCプレキャストセグメント構造の需要は今後増えていくものと考えられる。そのような期待感から、最近のPCプレキャストセグメント橋梁構造の現状と問題点について概観してみた。

海外では、PCプレキャストセグメント橋梁が長大橋梁にも適用され、その実績も多い。著者の力量不足で、海外の研究・調査まで言及するに至らなかったことを反省するとともに、今後の課題としたい。

昨今の技術革新はめざましく、来る21世紀にPCプレキャストセグメント構造がどのような発展を遂げるかは想像し難い。この原稿も10年後には全く役に立たない記事になっていることを期待したい。

参 考 文 献

- 1) プレキャストブロックを用いたPC箱桁橋の施工について首都高速道路2号線(214工区)、プレストレスコンクリート, Vol. 8, No. 3, Aug. 1966
- 2) プレキャストブロック工法、プレストレスコンクリート構造の現況と設計方法の動向、コンクリート技術シリーズ, 土木学会, pp. 59-68
- 3) 木村秀夫, 中尾信裕, 尾島孝幸, 清水真典, 久保田和伸: 東名高速道路(改築)東名足柄(PCプレキャストカンチレバー橋)の設計と施工, 橋梁と基礎, 91-7
- 4) 長谷俊彦, 馬場照幸, 岡田稔規, 吉松慎哉: 重信川高架橋の設計報告, プレストレスコンクリートの発展に関するシンポジウム 論文集, プレストレスコンクリート技術協会, 平成7年10月, pp. 397-400
- 5) 平成5年度PC橋の新しい構造事例に関する調査研究—PCプレキャストセグメント橋の構造の単純化に関する調査検討—, 財団法人 高速道路調査会
- 6) 岩崎常雄, 山崎 明, 山脇正史, 有角 明: 大芝大橋の計画と設計, プレストレスコンクリートの発展に関するシンポジウム 論文集, プレストレスコンクリート技術協会, 平成7年10月, pp. 391-396
- 7) 坂下俊明, 梶山浩一, 木本敏郎, 胡 信弘: 平羅橋(PC斜張橋)のプレキャストセグメント張り出し施工, プレストレスコンクリートの発展に関するシンポジウム 論文集, プレストレスコンクリート技術協会, 平成7年10月, pp. 465-470
- 8) プレキャストブロック構造の設計方法の確立, プレストレスコンクリート構造の現況と設計方法の動向, コンクリート技術シリーズ, 土木学会, pp. 138-143
- 9) 小村 敏, 宮地 清, 野村貞広: PC橋の新しい構造事例, 第19回PC技術講習会, プレストレスコンクリート技術協会, 平成3年2月, pp. 55-86
- 10) 則武邦具, 島 弘, 河野 清: 高強度コンクリートを有効利用してPC橋を軽量化する新構造の提案, 土木学会論文集 No. 490/V-23, pp. 21-30, 1994. 5
- 11) 跡部俊郎, 田村多佳志, 岡本 隆, 水谷慎吾: プレキャ

- ストセグメントと鋼管からなる合成構造橋脚の力学特性に関する研究, コンクリート工学論文集, 第6巻第2号, 1995年7月, pp. 107-115
- 12) PC 橋梁の新しい構造事例に関する報告書(外ケーブルの有用性に関する調査検討), (財) 高速道路調査会, 平成5年3月
 - 13) 外ケーブル方式プレストレスング, プレストレストコンクリート構造の現況と設計方法の動向, コンクリート技術シリーズ, 土木学会, pp. 69-89
 - 14) 山口統央, 睦好宏史, Matupayont Songkiat, 徳山清治: プレキャストブロックと外ケーブルを用いた PC 部材の曲げ性状, プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム 論文集, プレストレストコンクリート技術協会, 平成6年10月, pp. 25-30
 - 15) 中村克彦, 紫桃孝一郎, 河村直彦, 井谷計男: 内外ケーブル併用プレキャストセグメント連続箱桁橋の模型実験, プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム 論文集, プレストレストコンクリート技術協会, 平成7年10月, pp. 321-326
 - 16) 新井崇裕, 日紫喜剛啓, 夏目忠彦, 相沢 旬: 外ケーブル方式プレキャストブロック PC 橋の非線形解析について, プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム 論文集, プレストレストコンクリート技術協会, 平成7年10月, pp. 293-298
 - 17) 伊藤忠彦, 山口隆裕, 池田尚治: プレキャストセグメント PC はりの曲げせん断挙動, コンクリート工学年次論文報告集, 日本コンクリート工学協会, Vol. 16-2, 1994, pp. 967-972
 - 18) 伊藤忠彦, 山口隆裕, 池田尚治: プレキャストセグメント構造の終局せん断耐力について, プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム 論文集, プレストレストコンクリート技術協会, 平成6年10月, pp. 45-50
 - 19) 山村 清, 藤井 学, 宮本文穂, 天野周治: ねじりを受ける PC 箱桁ブロック接合部の破壊挙動, 土木学会第43回年次講演概要集, 1988年, 10月, pp. 678-679
 - 20) 宮本文穂, 山村 清, 藤井 学: PC 箱桁ブロック接合部のねじり挙動解析, 土木学会論文集, No. 414, 1990-2, pp. 225-228
 - 21) プレキャストブロック橋の設計法に関する共同研究報告書(1), 土木研究所, 平成4年3月
 - 22) プレキャストブロック橋の設計法に関する共同研究報告書(11), 土木研究所, 平成5年3月
 - 23) プレキャストブロック橋の設計法に関する共同研究報告書(111), 土木研究所, 平成6年3月
 - 24) プレキャストブロック工法によるプレレストレストコンクリート T げた道路橋設計施工指針, 日本道路協会, 平成4年10月

【1996年1月8日受付】