

特別講演Ⅱ

PC 橋の新たな構造を目指して

～第二東名・名神高速道路における取組み～

Toward Advanced Structure for Prestressed Concrete Bridges

～Technological Adoption in The New Tomei and Meishin Expressway～

日本道路公団 中部支社 構造技術課 池田 博之

1. はじめに

現在建設中の第二東名・名神高速道路は、第二東名（東京～名古屋）約 320km、第二名神（名古屋～神戸）約 170km の合計約 490km からなる我が国の経済の大黒柱である太平洋メガロポリスにダブルハイウェイを構築すべく計画されたものであり、都市部を 100km/h、都市周辺部を 120km/h、都市間を 140km/h の走行が可能となるように、平面・縦断線形や幅員を大きく定め、基本的に 6 車線で構成されている。この結果、全線にわたり構造物比率が高くなり、橋梁の延長比率では約 4 割とこれまで供用している高速道路に比べると高い割合を占めている。

また、現在供用している高速道路の橋梁の維持補修費は約 800 億円/年にも達し、今後も増大して行くと思われ、第二東名・名神高速道路が供用した後を考慮した場合、その費用は現在の費用を上回ることが予想される。従って、いかに初期コストを安く抑えるかとともに、補修に手のかからない構造物にするかが大きな命題である。供用経過年数の増加につれて老朽化が進行する高速道路ストックに対し、更なる効率的・経済的な建設技術・管理技術の開発が望まれている。

ここでは現在、第二東名・名神高速道路において行われている、PC 橋の新技術・新工法、および品質向上・耐久性向上を目指した取組みを紹介する

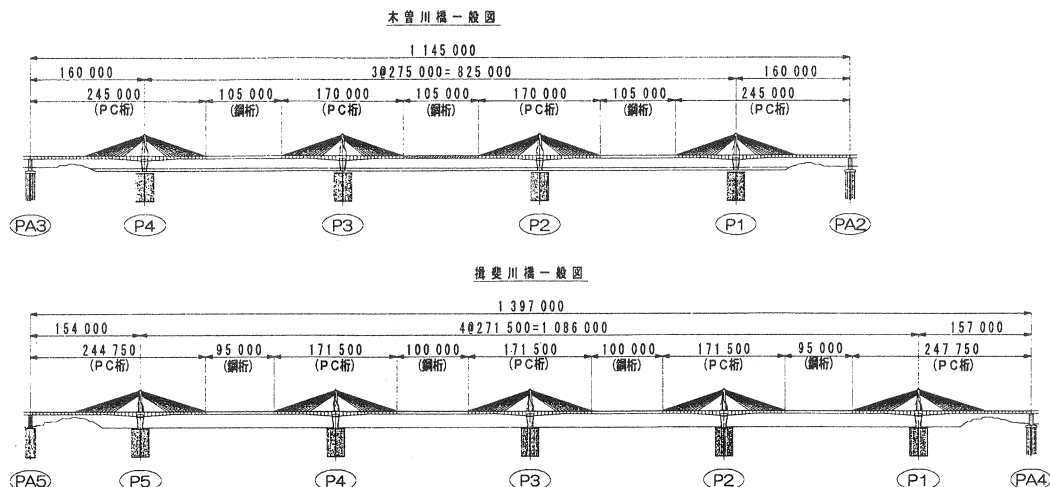
2. 木曽川橋・揖斐川橋

第二名神高速道路の木曽川橋・揖斐川橋は、日本有数の大河川である木曽川および揖斐川の河口部を横過する橋である。このため 1km を超える橋長を有し、また河川条件等より 160m 以上の径間長が必要となるが、こうした長大径間長を確保できる橋梁形式としては、鋼または PC 箱桁橋、鋼トラス橋、鋼または PC 斜張橋、PC エクストラードード橋が考えられる。形式選定にあたっては、経済性の追求および河川というロケーションとの調和に配慮し、死荷重軽減のために径間中央部に鋼箱桁を用いた世界初の PC・鋼複合連続エクストラードード橋を採用した（図—1）。以下にその特徴を述べる。

- ① 斜ケーブルの主桁定着付近までは PC 箱桁、径間中央部は死荷重軽減のため鋼床版箱桁である。
- ② 斜ケーブルは、6 車線断面の中央分離帯位置に配置される 1 面吊り構造である。
- ③ 斜ケーブルに生じる応力変動は、斜張橋に比べ桁剛性が大きいいため小さくなる。従って、現場製作ケーブルの使用も可能となり、経済性が期待できる。
- ④ コンクリート桁部には、高強度コンクリート ($\sigma_{ck}=60\text{N/mm}^2$) を用いる他、内ケーブルおよび外ケーブルを併用することにより PC 箱桁部の軽量化を図るとともに、プレキャストセグメント工法を採用することで低コストおよび工期短縮を図っている。
- ⑤ PC 箱桁と鋼箱桁との接合部は、剛結構造とし、PC 鋼材で補強するとともに、鋼箱桁内部にも PC 箱桁と連続して外ケーブルを下フランジ側に配置する。

本橋は種々の最新技術を組み合わせることによって、経済性、耐久性、耐震性の向上を図り、景観にも配慮した世界的にも類のない長大橋である。そのため設計にあたっては現行の規定を吟味し、新工法、新技術の採用を制限しないよう柔軟な発想をもって技術動向を先取りし、十分検討を行って実施した。道路橋示方書に準拠することを基本としたが、構造上必要な性能を保持するために各部材に適切な限界状態を設定した

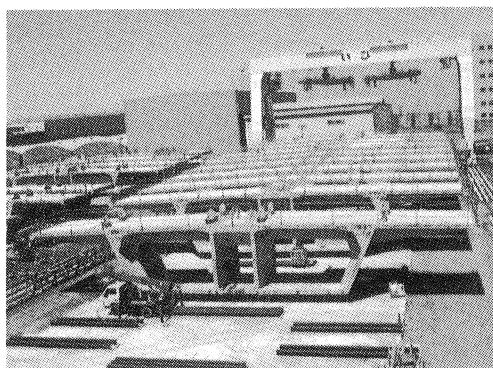
照査方法を取り入れている。以下に本橋における特徴的な構造や施工方法を述べる。



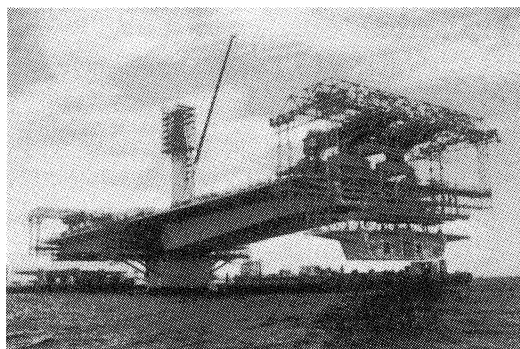
図ー1 第二名神高速道路 木曾川橋・揖斐川橋 一般図

(1) プレキャストセグメント

両橋のPC桁部は、ショートラインマッチキャスト方式により現場製作ヤードで製作(写真ー1)されるプレキャストセグメントで構成されており、セグメントは最大重量約400t/個、幅員約33m、橋軸方向長5m、桁高7~4mと、これまで日本で施工されたセグメントの約5倍の重量となっている。セグメントは台船により架設地点まで海上運搬した後、エレクションノーズによりカンチレバー架設を行う(写真ー2)。接合部にはエポキシ樹脂接着剤を塗布し、使用限界状態および施工中において引張応力発生限界以内としている。また、上床版継目部には過載荷重対応として、活荷重および衝撃以外の主荷重による桁としての曲げ応力に対し、活荷重および衝撃による床版としての曲げ応力度の1.7倍を加えた応力度がひび割れ発生限界に収まるようにしている。また、運搬・仮置き時の支持方法および架設時の吊方法に応じた検討を行ない、各々において限界状態以内となるようにしている。



写真ー1 セグメントのストック状況



写真ー2 セグメントの架設状況

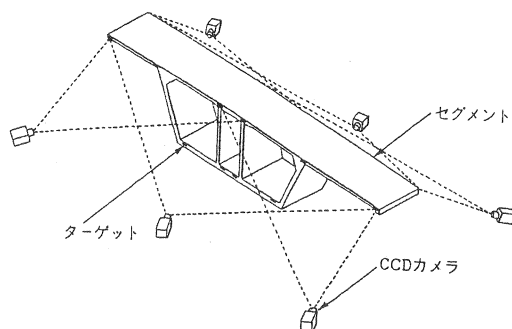
このような、高強度コンクリートを使用し、かつ限界状態設計法の適用により通常のものより部材厚が薄くなっている巨大なセグメントを製作、架設するにあたっては、その変形を精度よく把握し、つぎの製作ステップに反映することが重要となる。そこで、両橋ではコンクリート橋としては初めて、鋼橋にはよく用いられるCCDカメラを使った3次元形状管理システム(図ー2)を導入して製作した。これは、ストックヤードにいく直前と浜出しする直前に計測を行ない、架設状態のシミュレーションを行うとともに、可能な限り

そのデータを製作にフィードバックするためのものである。

(2) 側径間および鋼桁の施工

側径間は、かけ違い部から橋脚に向かって仮斜材を用いながら、逆方向に架設を行った。木曽川橋と揖斐川橋の西側は、セグメントが堤防を超えることができるため、大型のガーダーを使用したプレキャスト工法により施工を行うことができたが(写真—3)、揖斐川橋東側は地形条件よりセグメントが堤防を超えることができなかったため、架設作業車による場所打ち工法により架設した。このとき、全断面を架設する作業車では堤防上の道路の建築限界をクリアできなかったため、断面をコア部とサイド部の3つに分割し、最初にコア部を連結した後、架設作業車の方向を転換して側径間の架設を完了した。

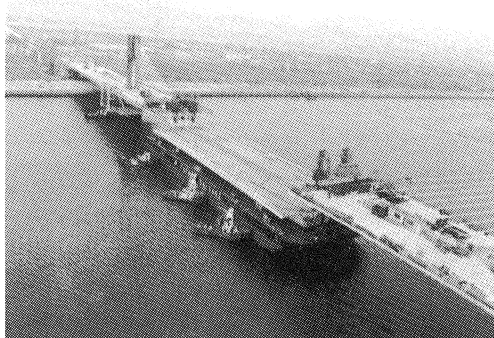
また、鋼桁部は桁長 100m、重量約 2,000 t であり、コンクリート桁架設完了後、台船により海上輸送を行ない、コンクリート桁から吊り上げて所定の位置に架設した(写真—4)。鋼桁はコンクリート桁の先端に予め設置された接合桁とボルトにより接合することとし、このときの施工誤差は、鋼桁と接合桁の間に設けられた片側 100mm の隙間で吸収した。



図—2 3次元形状管理システム



写真—3 側径間架設状況



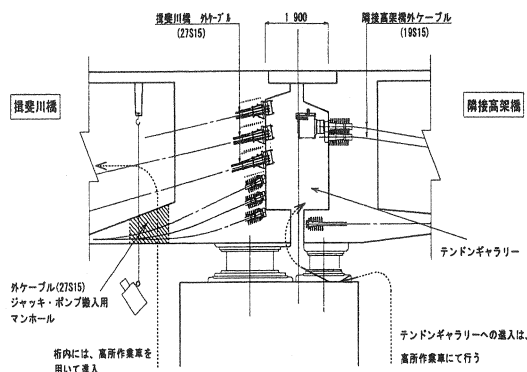
写真—4 鋼桁部架設状況

(3) 接合部構造

両橋は特徴的な構造を多く有していることもあり、供用後においても‘容易に維持管理ができる’ことを念頭に置き、桁内および桁端部の点検通路の設置、斜ケーブルの点検方法や地震後の点検項目等、設計段階から十分な検討を行っている。その幾つかを述べる。また、こうした維持管理設備を有効に利用できるよう、「維持管理マニュアル」を作成し、具体的な点検項目、構造物の機能低下や損傷の判断基準などの整備を行っている。

① 桁端部の点検通路 (テンドンギャラリー)

桁端部の点検通路の一例として揖斐川橋東側桁端部の構造を図—3に示す。桁端部には揖斐川橋の外ケ



図—3 桁端部の点検通路の例

ケーブル及び隣接高架橋の外ケーブルが定着されており、定着具の点検及び取替えを考慮し、テンドンギャラリーの橋軸方向幅は1.9m程度として桁端部における外ケーブル取替え時の緊張作業が可能なスペースを確保している。ただし揖斐川橋側外ケーブルは、上述の下床版マンホールからジャッキ・ポンプを搬入することにより桁内での緊張作業も可能である。テンドンギャラリーへの経路は、高所作業車等を利用し橋脚天端から進入することとしている。

②斜ケーブルの点検

斜ケーブルについては、定着部の腐食、ポリエチレン保護管の劣化など目視による点検はもとより、地震後など異常時における張力変動を容易に確認できる手段を講じている。これは軽量かつ測定作業が簡便なハンディタイプの加速度計を選定し、施工完了後の初期値測定を行ったあと、データとともに計測器も管理へ引き渡すものである。図-4に張力計測の手順を示す。

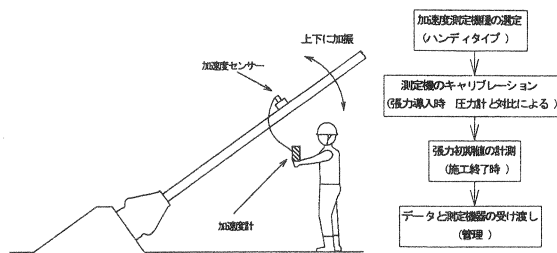


図-4 斜ケーブルの張力測定

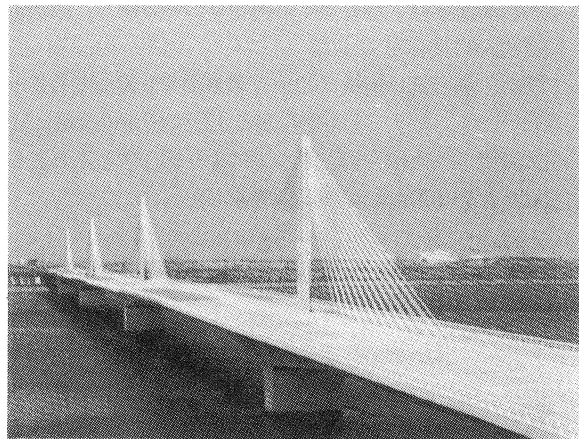


写真-5 揖斐川橋完成状況

ここでは紙面に限りがあるため割愛するが、耐風安定や耐震安全性、コンクリート桁と鋼桁の接合部構造、大容量ケーブルの適用性など、設計・施工に関する多くの検討を行ないながら、木曽川橋・揖斐川橋は平成13年7月に竣工を迎えている（写真-5）。

3. 工場製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工期短縮と品質向上を意図したものであり、主にスパンバイスパン架設や張出し架設に用いられ、わが国でも実績が増えてきている。セグメント重量は、前述した木曽川橋・揖斐川橋のように400tになる場合もあるが、第二東名・名神高速道路の標準幅員(w=16m)の橋において、効率的に架設しようとするすると80t（セグメント長：3m）程度となる。一般公道を用いてセグメントを運搬する場合の重量は30t程度が最大であるため、製作ヤードは架橋地点近隣に設ける必要が生じ、その面積も広大となる。このようにプレキャストセグメント工法を採用するには、架橋地点近傍における製作ヤードの確保が必要条件となり、平地が少ないわが国にとって大きな制約となっている。そこでプレキャストセグメント工法を、製作ヤードが近隣に確保できない都市内高架橋や山岳橋梁にも適用するために考え出されたのが、工場プレキャストセグメント工法である。

桁を工場で作製して架橋現場に運搬するというのは、鋼橋においては一般に行われているが、自重が大きなコンクリートのプレキャスト部材を工場あるいは離れた場所で製作し、一般公道を用いて運搬する場合、前述した運搬時の重量（30t）の他、トレーラーに載せたときの幅(3m)、高さ(4.5m)、長さ(20m)の制約をうける。セグメント重量を30tとして運ぶとすると、セグメント長は1.1mとなり、セグメント数の倍増により、運搬回数やセグメント接着回数が増え、コストアップにつながる。また、幅員とセグメント長の比が6以上となると、製作時にセグメントが平面的に見てバナナのように変形するといわれており、その対策も必要になる。

これらのことをうけて、従来の全断面プレキャストを改良して考え出されたのが、U型コア断面+リブとしたコアセグメントと床版を分割した構造である(図-5)。リブあるいはストラットで支持された上床版を現場打ち施工とすることで、セグメント重量30tの場合でもその長さを2.6mとすることができ、トレーラーに載せたときの制約条件も満足できる。

三重県北部の川越町・朝日町を通過する第二名神高速道路古川高架橋で、周囲にセグメント製作ヤードを確保することが困難なことから、U形コア断面の工場プレキャストセグメント工法を初めて採用した。本橋は標準支間長35m、橋長1475m、最小半径700mを有する曲線橋で、架設はスパンバイスパン架設により行う。施工要領を図-6に示すが、約60kmはなれた滋賀県と三重県のPC工場内で製作されたセグメントをトレーラーで現場に搬入し、架設ガーダーでU形コア断面のみを最初に架設する(写真-6)。その後、後方から場所打ち床版の施工を連続的に行ない、一径間を5~6日で完了することができている(写真-7)。またU形コア断面の重量は10t程度となり、架設ガーダーの軽量化を図ることができている。

U形コア断面は、運搬時のセグメント高さ制限によって桁高が最大で3.2mになり、古川高架橋と同規模の連続桁であれば最大支間長が50m程度までの高架橋に適用可能であろう。

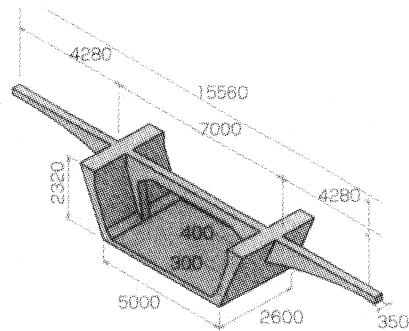


図-5 U型コア断面+リブ形状

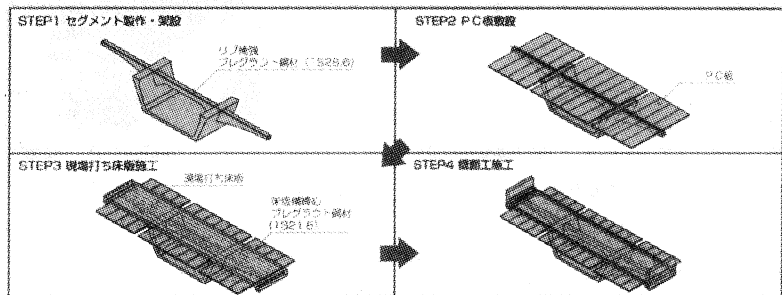


図-6 施工要領

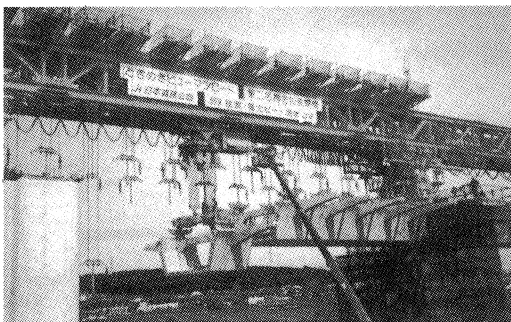


写真-6 架設状況

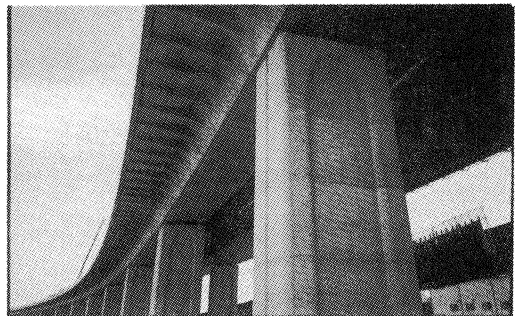


写真-7 架設完了状況

このように工場製プレキャストセグメント工法は、U形コア断面にすることによって経済的に建設することができ、日本の国土事情にあった工法であり、プレキャストセグメント工法の適用拡大につながるものと考えられる。

4. 波形鋼板ウェブ橋

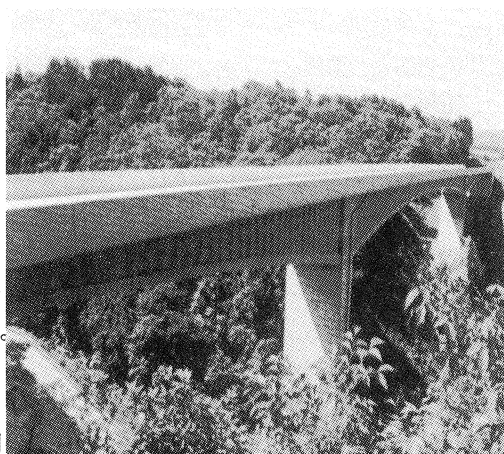
従来、鋼またはコンクリート単独で断面構成されていたものを、鋼とコンクリートを組合せて合成構造と

したもので、フランジにコンクリート部材を、ウェブに鋼部材を用いる形式である。

波形鋼板ウェブPC箱桁橋は、PC箱桁橋のコンクリートウェブを軽量の波形鋼板に置き換えたもので、コンクリートの上・下床版と波形鋼板ウェブを組合せた複合構造は、鋼とコンクリートの特性を生かしたPC橋の新しい構造形式であり、日本道路公団では東海北陸自動車道本谷橋(写真—8)におい最初に採用した。本構造の主な特徴は、

- ① PC橋の20%程度を占めるウェブを軽量の波形鋼板にする事により、自重の大幅な軽減が図られ、スパンの長大化と施工の省力化が可能となる
- ② 鋼板を波形にすることにより高いせん断座屈体力が得られ、板厚を薄くでき補剛材を必要としない
- ③ 軸力に抵抗しない波形鋼板のアコーディオン効果によって、コンクリート床版のみに効率よくプレストレスを導入できる

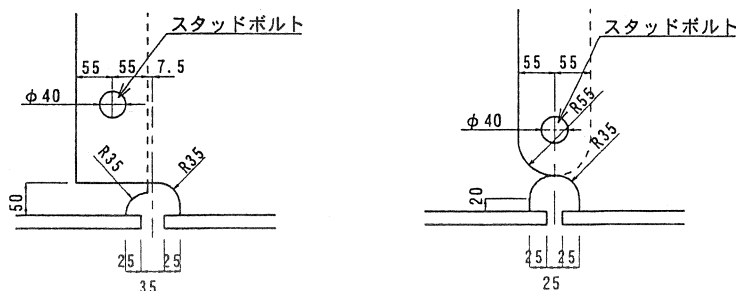
ことなどがあげられる。しかし、一方でアコーディオン効果によって面外方向にもウェブが変形し、せん断座屈耐力に対してはこの影響を受ける可能性がある。また、本構造はまだ歴史が浅く、長支間化にあたっては、こうした波形鋼板のせん断座屈をはじめとした力学的特性の評価や、耐久性や施工性を考慮した波形鋼板同士の接合方法など、検討課題も多い。



写真—8 東海北陸自動車道 本谷橋

波形鋼板のせん断座屈に関しては、波形鋼板単独のものと、コンクリート床版との接合を考慮した波形鋼板の条件下でせん断座屈実験を行ない、この結果を検証した上で有限変位解析の妥当性を確認している。

波形鋼板同士の接合方法は、わが国では高力ボルトによる摩擦接合を採用した事例もあるが、上げ越し管理を行う張出し架設工法の場合や、施工誤差を調整する場合においてはボルト孔を合致させることが難しく、また、波形鋼板にはプレストレス力や荷重による面外変形が生じることを考慮して、一面重ねすみ肉溶接を基本とし、大型モデルによる疲労試験やFEM解析を行ない、接合部構造の検討を行っている。第二名神高速道路鍋田高架橋西工事において採用した、現場溶接部に応力集中が少なく、施工性のよいスカーラップ形状2例を、図—7に示す。



図—7 スカーラップ形状

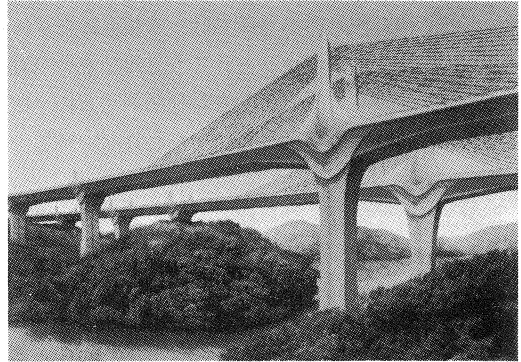
溶接接合部の疲労照査手法の提案や、波形ウェブ構造の曲げ耐力および振動特性を実験的に把握し、本構造の更なる合理的な設計手法の確立により、より広い範囲での適用が可能となるものとする。また、PC構造においてはグラウトの充填性が大きな課題であり、外ケーブル構造と組合せた波形鋼板ウェブ橋が今後発展してゆくものと考えられる。

5. エクストラードーズド橋、PC斜張橋

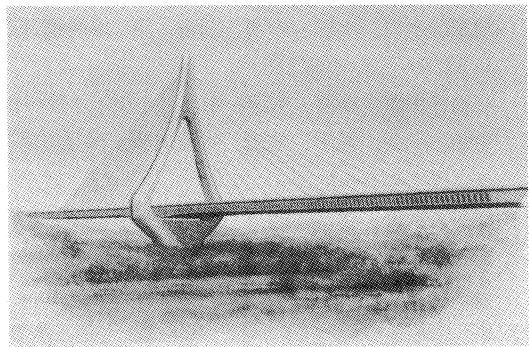
前述した波形鋼板ウェブ橋は、死荷重の軽減等から更なる長支間化が可能となる構造であるが、波形鋼板を使用したエクストラードーズド橋として第二名神高速道路の栗東橋（図—8）の建設工事を現在、行っている。栗東橋は、琵琶湖の南端から東南東に約10km、第二名神高速道路の大津JCTと信楽ICの中間付近に計画された橋長上り線495m、下り線555m、橋脚高さ65mの長大橋である。急峻な地形を横過するため、最大支間長が170mに及ぶ規模となっており、上部構造重量の軽減や、基礎構造の縮小化、ウェブ部分の施工省力化等による建設費節減や品質向上・耐久性向上を目指し、世界初となるウェブに波形鋼板を使用したPCエクストラードーズド構造を採用している。また、三上・田上・信楽県立自然公園内を通過し、第二名神高速道路のランドマークとすることから、景観設計を実施し、自然景観に配慮したデザインを採用している。

第二東名高速道路矢作川橋（図—9）は、1級河川矢作川に架かる橋で、河川条件等より中央支間を235m以上確保すること、および斜角約47度で横過するため、周囲環境に対して圧迫感を与えないよう河川内橋脚寸法を極力小さくする必要がある。また、幅員は付加車線を含む上下8車線一体で43.8mとなっている。形式選定にはエクストラードーズド橋や斜張橋などが考えられるが、これまで、エクストラードーズド橋と斜張橋は、構造的には分類に属するものの、変動応力の大小により斜材張力の制限を異なる値とした設計体系が取られてきた。

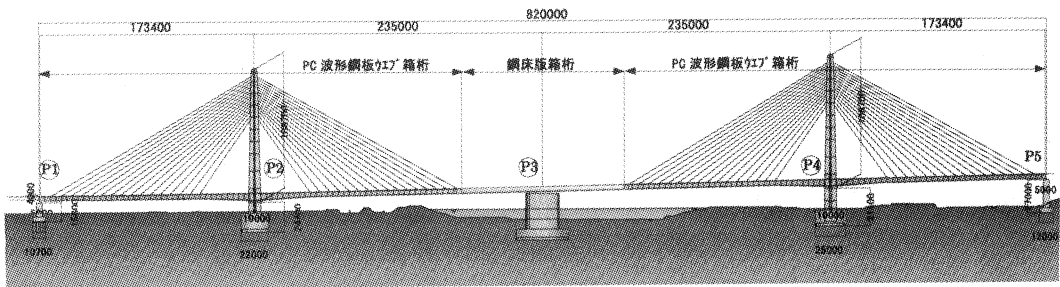
しかし、PC・鋼複合エクストラードーズド橋など、斜張橋と比べて変動応力値に差がないものや、斜材の変動応力が小さく安価な現場制作ケーブルおよびPC定着構造の開発等により、両者を統一した手法による設計法が確立されてきている。そのため、本橋は波形鋼板ウェブを採用したPC斜張橋とし、河川内橋脚に作用する荷重を軽減することより、木曽川橋・揖斐川橋と同様、中央径間部に鋼床版箱桁を用いて軽量化を図った複合構造としている（図—10）。



図—8 栗東橋完成図



図—9 矢作川橋完成図



図—10 矢作川橋 一般図

本橋においては、風洞実験による耐風安定性、構造や地盤特性を考慮した上部構造の耐震設計の他、斜材ケーブルおよび定着体の構造、橋全体系の耐荷力特性を考慮した複合非線形解析等を詳細設計において行ない、施工に反映することを考えている。

6. おわりに

第二東名・名神高速道路におけるプレストレストコンクリート橋の新たな構造を紹介したが、単に新しい形式や施工方法の開発に主眼を置くのではなく、今後ますます老朽化が進行し、補修・補強、さらには更新が必要となる高速道路ストックを考慮し、建設段階から「供用後において、点検が可能で維持管理のしやすい構造」であることを念頭におき、技術の開発に取り組んでいくことが必要である。

数理解析や施工技術の向上、さらには木曽川橋・揖斐川橋をはじめとしたコンクリート長大橋の建設で培った経験により、構造設計に関する技術は蓄積されてきている。一方で、コンクリート橋は鋼橋と比較して補修・補強が困難な場合が多く、また支間長や橋長の長大化に伴い、特に道路橋においては床版の平坦性の確保や出来形管理に対し、より高い精度が必要となる。しかし、セグメント構造をはじめ、コンクリート床版の不陸や接合部の微妙な段差は、床版上に施される防水層、強いては舗装の耐久性に影響しかねない。道路としての耐久性を考えると、こうしたことへの対応を、設計・施工段階で十分検討していくことも必要である。また、限りある資源の有効利用が望まれ、さらには道路建設のあり方が問われている昨今、従来の既成概念やこれまでの専門分野にとらわれない発想や技術力を駆使し、更なる検討を実施していくことが重要である。

なお、ここで紹介した取組みには、学識経験者や専門技術者からなる各種委員会などを設けて技術検討を進めたものが多く、関係者各位に深く感謝申し上げる次第である。

【参考文献】

- 1) 角谷、酒井：木曽川橋・揖斐川橋の計画 —第二名神高速道路—, プレストレストコンクリート, Vol.39, No.2
- 2) 池田、水口、小松、中須、前田：第二名神高速道路木曽川橋・揖斐川橋上部工の設計, 橋梁と基礎, 1999年11月
- 3) 小松、中須、高宮、中道、中上、小川：木曽川橋・揖斐川橋上部工の施工, 橋梁と基礎, 2000年1月
- 4) 中須、伊藤、谷中、前田：木曽川橋・揖斐川橋複合構造接合部の設計と施工, プレストレストコンクリート, Vol.42, No.1
- 5) 池田、水口、春日、室田：古川高架橋の設計と施工, 橋梁と基礎, 2001年2月
- 6) 角谷：今後のPC橋の展望 = 波形鋼板ウエブPC箱桁橋への展望 =, プレストレストコンクリート技術協会第10回シンポジウム論文集, 特別講演Ⅱ
- 7) PC斜張橋・エクストラードズ橋設計施工基準(案), (社)プレストレストコンクリート技術協会, 平成12年11月