

特別講演

日本道路公団における最近の複合構造事例

Introduction of composite structures by Japan Highway Public Corporation

角 昌隆*、水口和之**

Masataka Sumi, Kazuyuki Mizuguchi

* 日本道路公団 技術部 構造技術課長 (〒100-8979 東京都千代田区霞ヶ関 3-3-2)

** 日本道路公団 技術部 構造技術課長代理 (同上)

Japan Highway Public Corporation (JH) has been developing several bridge technologies for cutting construction cost, saving labor and improving durability of bridges. Especially, new types of composite structures and hybrid ones have been adopted for new expressways because of their structural rationality. This paper introduces some examples of composite structures by JH.

1. はじめに

我が国の高速道路の建設は、1963年の名神高速道路の開通（栗東～尼崎）を皮切りとして、現在までに供用延長は7,000kmを超えており、そのうち橋梁延長は約1,000km弱、比率では約14%を占めるに至っている。また、高速道路の平均経過年数は図1に示すとおり約17年であるが、そのうち最も経過年数の多い道路は名神高速道路で約39年となっており、これから更に老朽化が進んでいくことになる。

一方、現在建設中の高速道路は約2,000kmであり、今後開通予定の道路は、建設を進めている第二東名・名神高速道路に代表されるように、山岳地を通過することが多く、平野部であっても市街化された地域であり、厳しい条件の中で建設されることを余儀なくされている。さらに地方部の高速道路では多くの交通量が見込めない等、経済性・採算性に考慮した道路建設が必要となり、橋梁においても建設費の削減を図っていくことは必要不可欠である。

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、今後も供用延長の拡大とともにその重要性はますます高まるものと予想されるが、昨今の情勢から維持管理予算の大幅な増加は期待できない。従って、如何に初期コストを安く抑えるかとともに、維持補修の手間をいかに軽減し維持管理コストを抑制するかが大きな命題であるといえる。

このような状況の中で、橋梁の耐久性向上と工費削減を目指して、JHにおいては新技術や新工法の開発に全

面的に取り組んでいるところであり、特に最近では構造の合理性やコスト削減効果に期待した複合構造の開発に、積極的に取り組んできているところである。

本文では、更なる品質向上・耐久性向上、建設費節減を目指して、現在検討を進めている複合構造について、波形鋼板ウェブPC箱桁橋、鋼トラスウェブ橋、等の事例を紹介ものである。

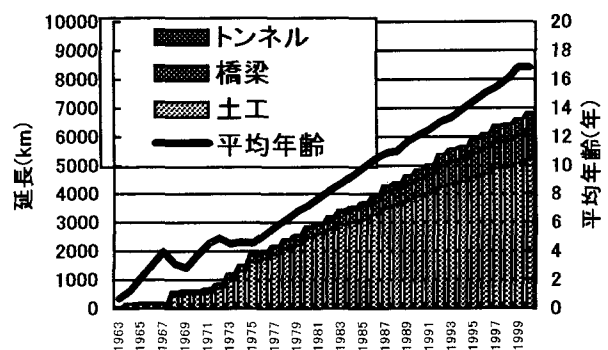


図1 高速道路の延長の推移（構造物別）

2. 複合構造事例の紹介

複合構造とは、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たもので、大別すると合成構造と混合構造に分けられる。断面レベルで異種材料を組合せて用いる構造を合成構造、部材レベルで異種材料を組合せて用いるものを混合構造と呼んでおり、JHではこれらを総じて複合構造として

扱っている。

異種材料を合成して使用することは単一の材料で得られない力学的特性を作り出すことであるが、鉄筋コンクリート構造やプレストレストコンクリート構造、鋼橋における合成けたもこの範疇にあり、複合構造は決して最近採用され始めた構造形式ではない。また、混合構造においても、フーリエ橋のように18世紀から採用され始めており、この構造も決して新しいものではない。

しかし、本格的に複合構造として橋梁へ採用され始めたのは近年であり、特に最近施工事例が増加している波形鋼板ウェブPC箱桁橋が採用され始めたのは、フランスのコニャック橋の1986年完成が最初であり、世界的にも近年その発展には目を見張るものがある¹⁾。

本節では、JHにおける波形鋼板ウェブ橋、鋼トラスウェブ橋等の複合構造、さらには現在施工中である第二東名高速道路の富士川橋（鋼とコンクリートの複合アーチ橋）について述べることにする。

2.1 波形鋼板ウェブPC箱桁橋の概念

波形鋼板ウェブPC箱桁橋は、図2に示すような形式であり、コンクリート床版へのプレストレスの導入効率がよいこと、ウェブ鋼板のせん断座屈耐力が高いこと、自重の軽減、施工の省力化が図れることなどから、合理的な複合構造形式として注目されている。

波形鋼板ウェブPC箱桁橋の特徴は以下のようなものが挙げられる。

- 1) 波形鋼板は軸方向剛性がほとんどなく、アコーディオンのように伸縮する性質があるため、プレストレスの導入効率が向上する（図3(a)参照）。
- 2) 高いせん断抵抗性を有し、波形鋼板ウェブのみで十分にせん断力を負担できる（図3(b)参照）
- 3) 波形鋼板は、せん断変形に敏感であるので、たわみの管理、付加曲げの影響に留意する必要がある。また、この影響は、波形鋼板のせん断分担率により左右される。

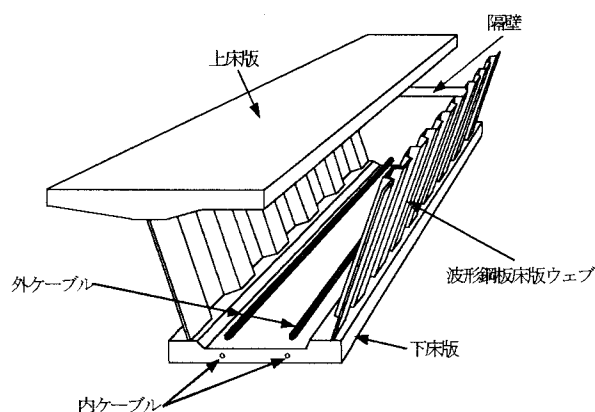


図2 波形鋼板ウェブ橋の概念図

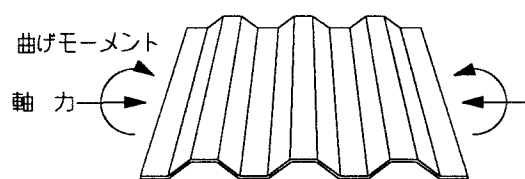


図3(a) アコーディオン効果概念図

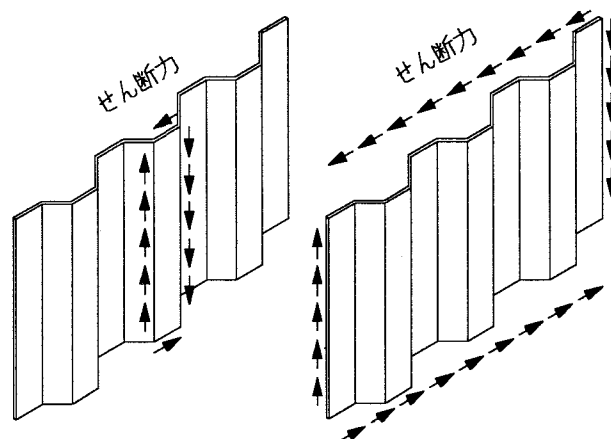


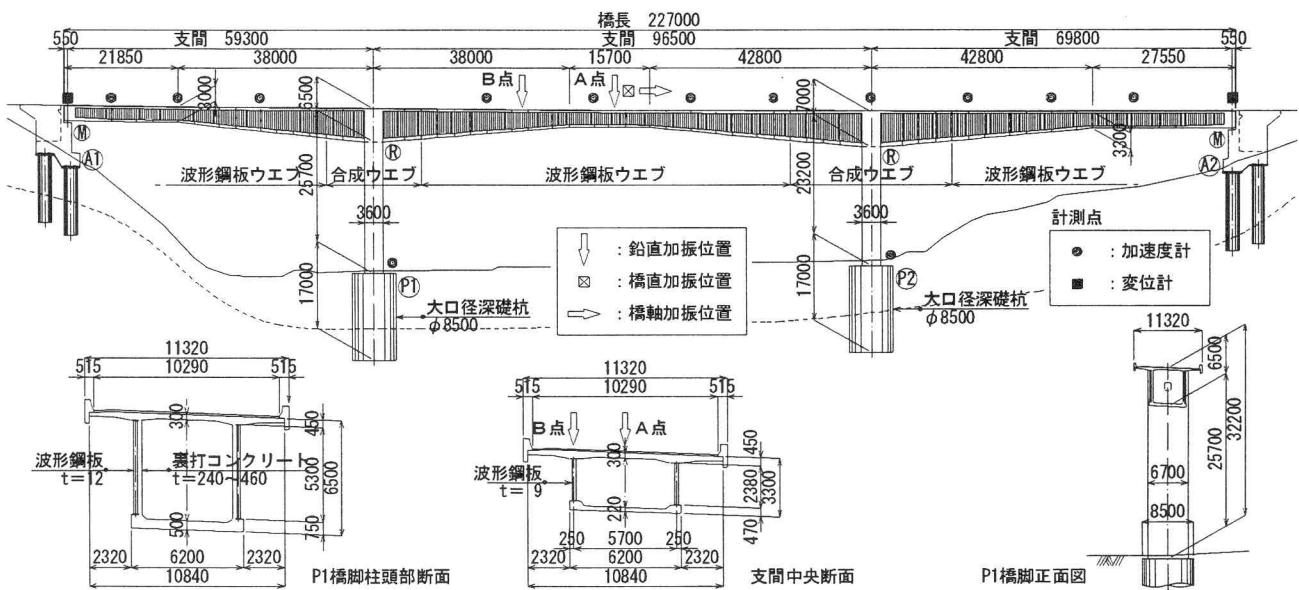
図3(b) 波形ウェブ橋のせん断抵抗概念図

波形鋼板をPC橋に初めて採用したのはフランス^{2) 3)}である。国内では、1994年に初めて新開橋⁴⁾が2主箱桁の単純橋として、次いで、1995年に銀山御幸橋⁵⁾が5径間連続橋として建設されている。その後、日本道路公団による3径間連続ラーメン形式の本谷橋⁶⁾が建設されて以来、現在までに、海外を上回る数の波形鋼板ウェブPC箱桁橋が施工されている。

波形鋼板ウェブPC箱桁は、その優れた構造特性から、斜張橋やエクストラードボード橋形式への適用により、更なる支間の長大化が可能であると思われる。しかし、我が国は世界でも第一級の地震国であり、風条件も厳しいことから、波形鋼板ウェブPC箱桁橋の長大化においては、耐震・耐風性の確保が重要な課題である。

長大橋の耐震・耐風設計における動的解析では、入力地震動や風荷重などの荷重の設定を除けば、一般に、構造物のモデル化と減衰定数の設定の二つが重要となる。橋梁の動的解析を行なう場合は、通常、上部構造は多質点-フレーム系にモデル化される。これまでのPC箱桁橋での振動実験から、こうした解析による構造物の振動特性は、実験結果と良く一致することが確かめられている。しかし、波形鋼板ウェブPC箱桁橋のせん断およびねじり剛性は、従来のPC箱桁橋に比べ小さく、動的な変形挙動が従来のPC箱桁橋と異なることも予想され、動的特性が十分に確認されているとはいえない。

一方、構造物の減衰特性は、内部減衰、構造減衰、逸散減衰からなるが、これら各要因の影響を分離して評価することは困難であることから、新しい構造形式においては、構造物としての減衰定数を振動実験などにより求め、その結果を整理考察することが重要である。



図ー４ 勝手川橋の一般図および振動実験概要

そこで、JHにおいては、日本海沿岸東北道の勝手川橋および東九州道の小河内川橋において振動実験を行い、検証を行っている^{7) 8) 9)}。

2.2 勝手川橋・小河内川橋における振動実験

勝手川橋は、日本海沿岸東北自動車道に建設された橋梁であり、橋長227m、中央径間96.5mの3径間連続ラーメン橋波形鋼板ウェブPC箱桁橋である¹⁰⁾。勝手川橋の一般図および写真を図4、写真1に示す。本橋は、張出し架設工法によって施工されており、また、架設時の主方向の鋼材も含めた本橋の主方向のPC鋼材は、全外ケーブル方式を採用している。また、橋脚付近のウェブは、断面急変の緩和、ねじれ剛性の向上、波形鋼板の座屈防止等から波形鋼板とコンクリートとの合成ウェブ構造としている。

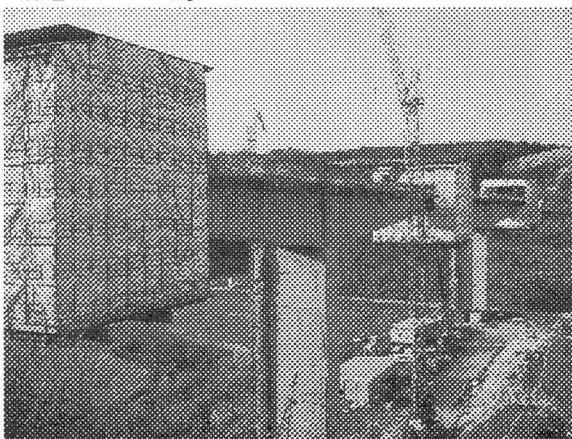


写真1 勝手川橋施工状況

小河内川橋¹¹⁾は、東九州自動車道の臼杵ICから津久見IC間に建設された橋梁である。A1～P3径間は、3径間連結合成桁橋であり、P3～A2径間は橋長157.0m、

有効幅員9.81mの2径間連続ラーメン波形鋼板ウェブPC箱桁橋である(図5)。

実験は、起振機実験(共振実験、自由減衰実験)、常時微動実験および衝撃加振実験を行い、固有振動数、振動モード、減衰定数を測定した。起振機実験には、最大加振力30kNの油圧サーボ式起振機を使用し、加振振動数0.0～8.0Hzの範囲において0.001～0.1Hz程度のピッチで振動数を変化させ、共振曲線を作成し共振振動数の特定を行なった。

上記実験結果および解析結果から得られた減衰定数について、加藤・島田¹²⁾の研究で示されている各主桁材料分類別の減衰定数と支間長の平均値に今回の実験からの知見をプロットしたものを図6に示す。さらに、今回比較を行っている波形鋼板ウェブPC箱桁橋の減衰定数と支間長の平均値も同時にプロットしている。表1にはこれら平均値の一覧を示す。加藤・島田の研究では、主桁材料分類は減衰定数との相関性が高く、鋼橋、PC橋、RC橋の順に大きくなると報告されているが、今回の比較においては、鋼橋、波形鋼板ウェブPC箱桁橋、PC橋、RC橋の順に減衰定数は大きくなっていることがわかる。また、減衰定数は比較的鋼橋に近い値を得た。波形鋼板ウェブ橋は、その軽量となる特性から、更なる長支間化が可能であると思われるが、過去に振動実験の行なわれた波形鋼板ウェブPC箱桁橋は数橋であり、また、エクストラドーズド橋や斜張橋においては、未経験な分野である。今後、これら振動特性の実測データの蓄積が重要であろう。

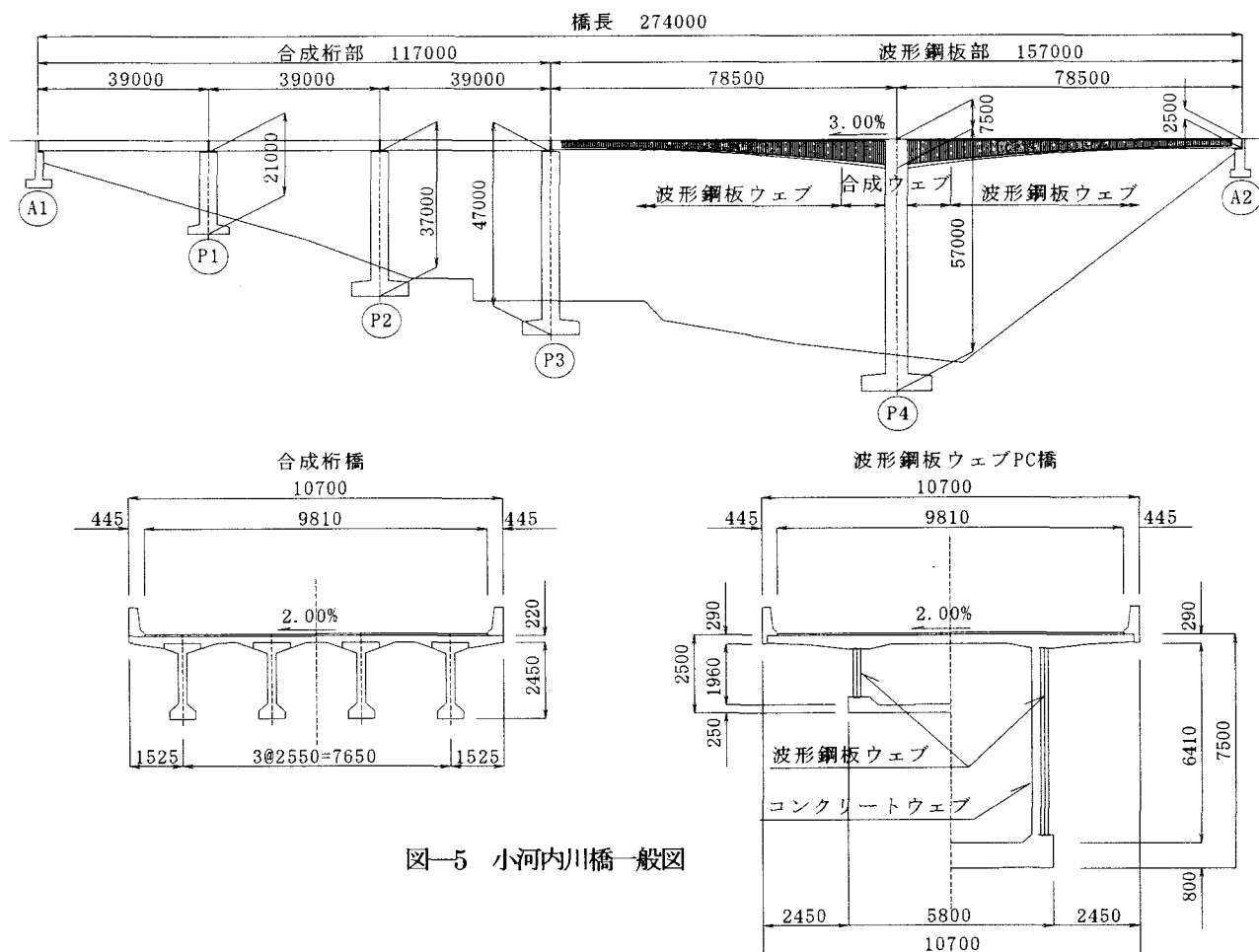


図-5 小河内川橋一般図

主桁材料分類	平均支間長 (m)	平均減衰定数
鋼橋	95.0	0.0170
RC橋	40.0	0.0389
PC橋	79.8	0.0237
波形鋼板ウェブPC橋	69.7	0.0176

表-1 各主材料の平均減衰定数

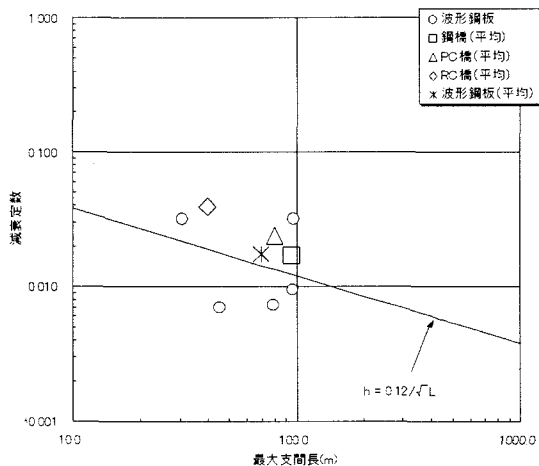


図6 各主部材の減衰定数と最大支間の関係

JHでは、波形鋼板の座屈実験や上記の振動特性等の把握を検証しつつ、その軽量となる特性等から、波形鋼板ウェブを用いた長支間化へ向けて検討を行っており、長崎道の日見橋、第二名神高速道の栗東橋をエクストラードーズド橋で、第二東名高速の矢作川橋を斜張橋で施工中である。

2.3 日見橋

日見橋は、長崎道長崎大分線に計画され、JR長崎駅から東へ5km、起点長崎ICから約3.7kmのところ建設される180mの橋梁である(図7、8)。架橋最大支間地点は、一般国道34号と日見バイパスを跨ぐ地形条件にあり、まさに長崎への玄関口としてのランドマークとなる。

また、本橋では、耐久性・維持管理に着目し、全て外ケーブルとする全外ケーブル方式を採用している。これによって、全ての主方向ケーブルを点検することができ、必要であれば交換も可能になる。さらに、軽量化をさらに進めるために、波形鋼板ウェブを採用しており、波形鋼板ウェブを用いたエクストラードーズド橋というこれまでに例を見ない形式を採用している。

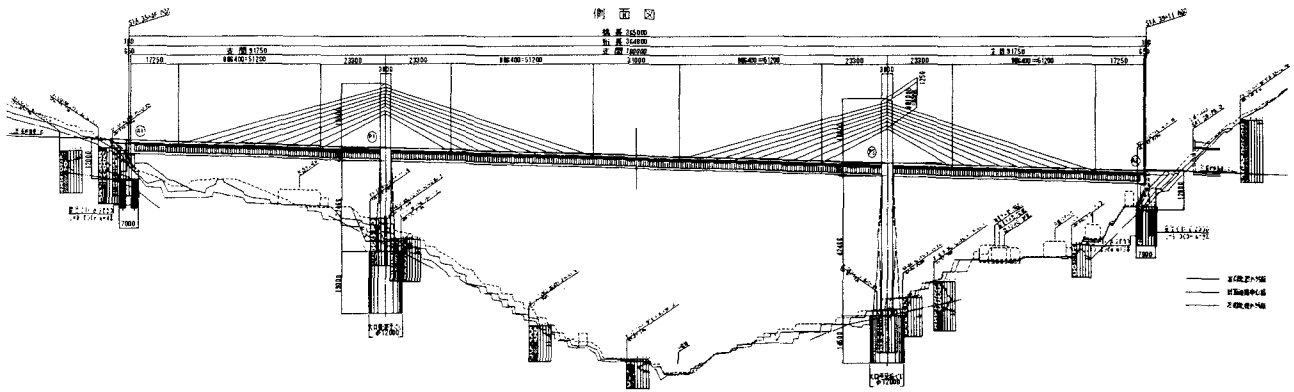
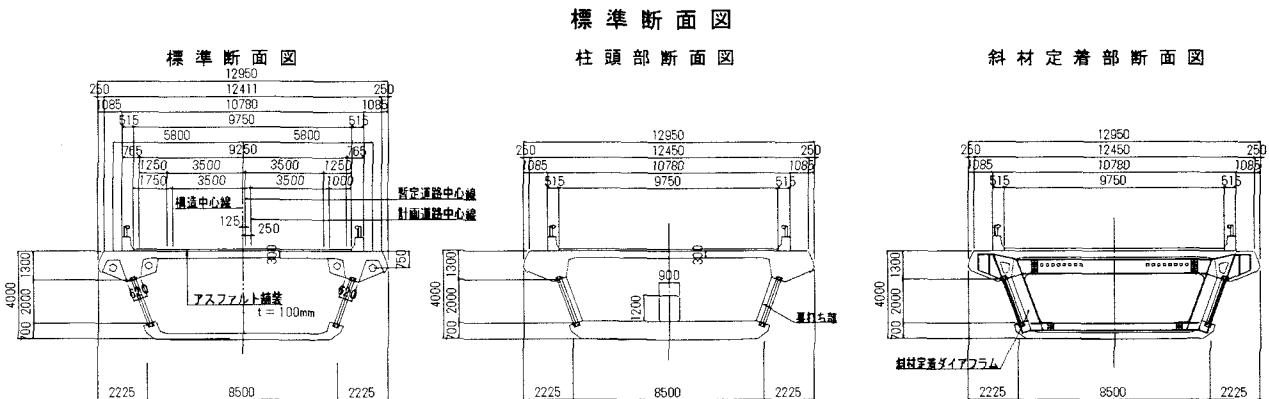


図7 日見橋一般図



下部工断面図

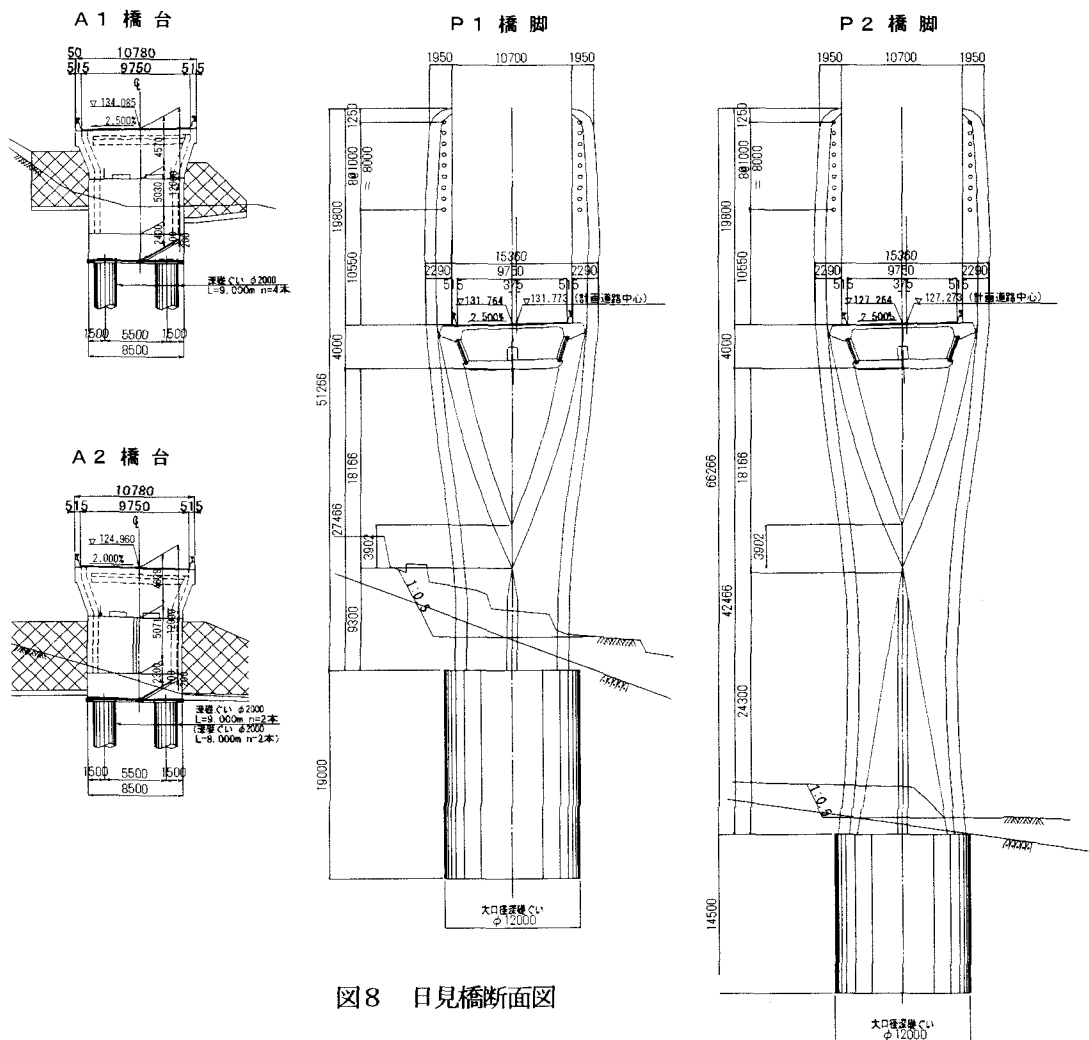
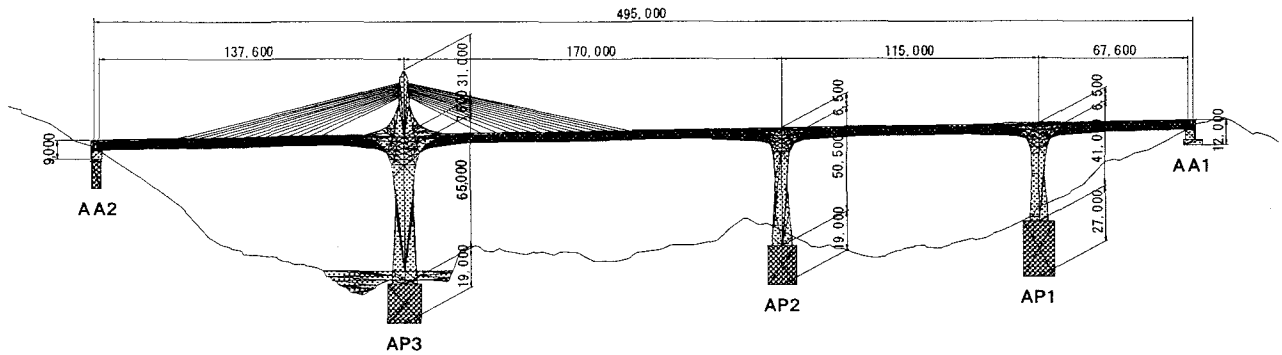
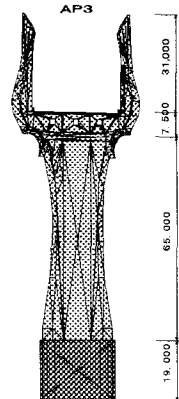


図8 日見橋断面図

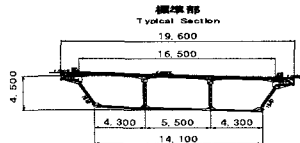
側面図（上り線）
Side View(Tokyo bound)



橋脚正面図
Pier Front View



主桁断面図
Girder Cross Section



橋脚断面図
Pier Cross Section

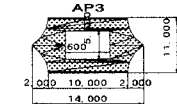


図-10 栗東橋主塔断面図

図-9 栗東橋一般図

標準部

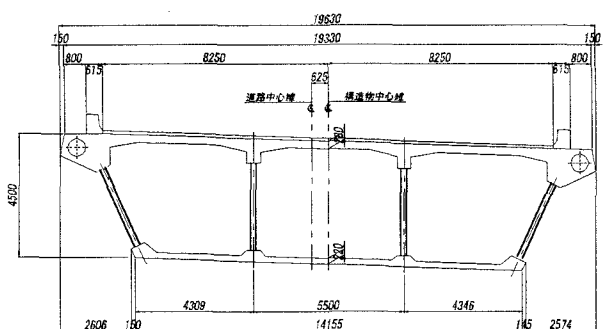


図-11 栗東橋標準断面図

2.4 栗東橋

栗東橋は、第二名神高速道路の信楽 I C（仮称）から大津 J C T（仮称）の間、日本の六古窯の一つで、1250年にもおよぶ信楽焼の里として著名な甲賀郡信楽町と、草津と石部の間の宿として栄え、現在は J R A 栗東トーレーニングセンターで有名な栗太郡栗東町の行政境に架橋される橋で、かわせみの生息地や三上・田上・信楽県立自然公園に指定された緑豊かな地域を横過する。さらに、架橋地点は大戸川ダムの建設が予定されており、急峻な地形のため最大支間長が170mにおよぶ規模である（図9、10）。

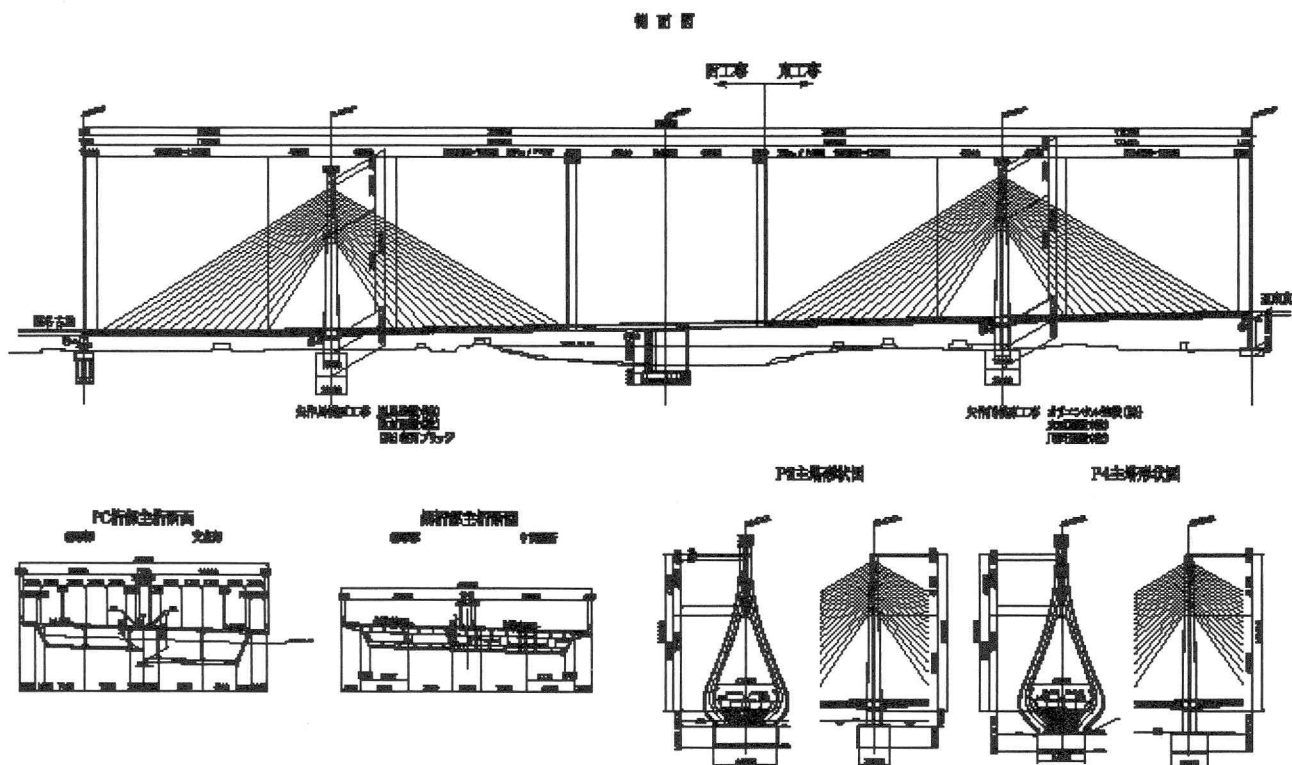
栗東橋では、上部構造重量の軽減や基礎構造の縮小化、ウェブ施工の省力化、品質および耐久性の向上を目指し、世界初となるウェブに波形鋼板ウェブを用いたエクストラードード橋とし、さらに、幅員が16.5mあるため、3室箱桁構造を採用しており、波形鋼板ウェブ橋のマルチセル構造の採用も世界初となる。さらに横方向剛性や斜材ケーブル定着による剛性を確保するためエッジ形式を採用している（図11）。

本橋では、世界初となる波形鋼板を用いたマルチセル構造とエクストラードード形式の併用から、1/2 模型供試体におけるプレストレスの有効伝達長とその分布の状況、構造体の破壊安全性について検証を行い、現在、張出し架設を行っている。

2.5 矢作川橋

矢作川橋は、第二東名高速道路と東海環状自動車道の共有区間となる豊田 J C T（仮称）と豊田東 J C T（仮称）間の一級河川矢作川渡河部に架橋される4径間連続複合斜張橋である。本橋は、最大支間長が235.0mになることから斜張橋形式を採用し、さらに、軽量化による工費節減を目指して、世界初となる斜張橋への波形鋼板ウェブを採用（斜吊区間）している。また、第二名神高速道路の木曽川橋・揖斐川橋でも採用している鋼床版箱桁（河川部）との混合構造も本橋において採用している。さらに109.6mにおよぶ主塔を本橋では工費節減からコンクリート製としており、コンクリート製の主塔としては我が国最大規模となり、主桁および主塔のコンクリートには、設計基準強度 60N/mm² の高強度・高性能コンクリートを採用している。

また、本橋では、上下線8車線一体で標準幅員43.8mにもおよぶ広幅員であり、これを一面吊りで設計を行っている。また、5室箱桁への波形鋼板ウェブの採用など、本橋では、これまでに類をみない形式であり、現在、実験・解析を進めながら上部構造の詳細な設計を進めている。（図12、13）



図—12 矢作川橋一般図

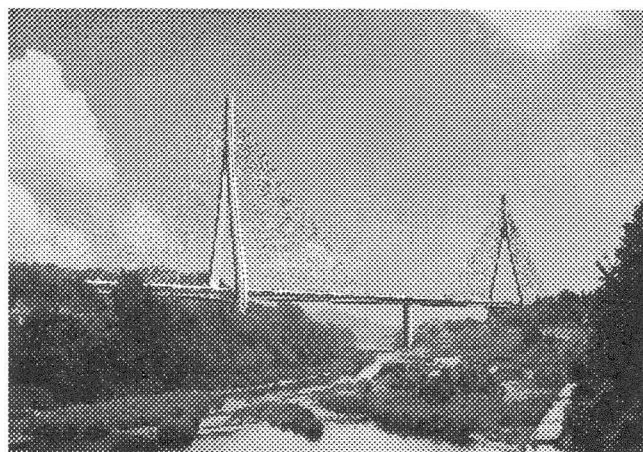


図-13 矢作川橋 完成予想図

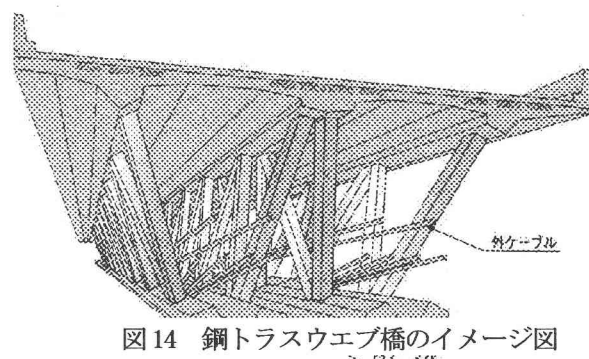


図 14 鋼トラスウェブ橋のイメージ図

2.5 PC複合トラス橋

第二東名では、その大半が急峻山岳地を通過することから、工費節減を積極的に押し進めており、従来のPC箱桁橋のウェブを鋼トラスへ置き換えたPC複合トラス橋についても、積極的に検討を進めている。

PC複合トラス橋は、海外ではブローネ高架橋（1997年完成；フランス）、ブラ・ド・ラ・ブレン橋（2002年完成；フランス領レユニオン島）、我が国では木ノ川高架橋（施工中；和歌山）で実績がある。

鋼トラスウェブを用いることにより、波形鋼板ウェブと同様に上部構造の軽量化が可能となり、下部構造を含めた橋梁全体の建設コスト縮減に寄与でき、さらに、施

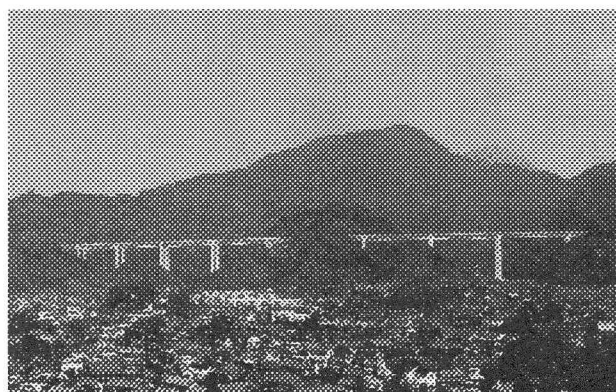


図 15 猿田川橋・巴川橋完成予想図

工の合理化・省力化、透過性の高いトラス構造により景観性の向上が期待できる（図 14）。そこで、JHでは、現在、第二東名高速道路の猿田川橋・巴川橋（図 15）においてPC複合トラス橋を採用し、現在、詳細な設計を実施中である。

しかし、本橋で最大の課題となるのは、格点部の構造であり、現在、下記の格点構造について実験を実施している。

- ① 二重管方式格点構造（図 16①）：ブローネ高架橋等の実績のあるアンカー方式と同様な付着定着型であるが、付着性能の高いリブ付鋼管を使用して格点構造の合理化を図った構造である。連結プレートにより接合された内外リブ付孔あき鋼管がトラス材端部を包み込み、付着性能を改善するとともに、連結プレートが格点のせん断力を改善。

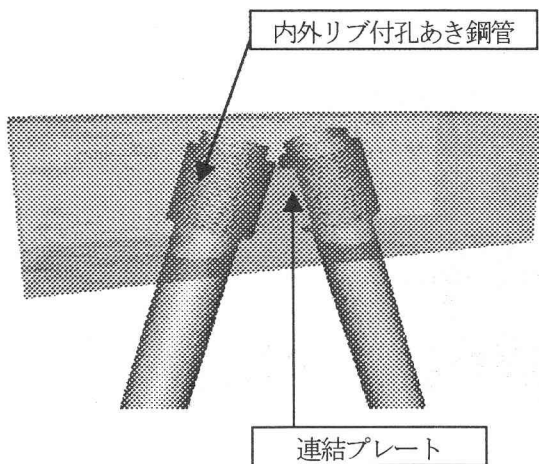


図-16① 格点部構造（二重管方式）

- ② 二面ガセット構造（図 16②）：2面摩擦による効力ボルト接合で、かつ、コンクリートの内部に埋込むことにより格点の合理化を図った構造。トラス材と溶接したガセットプレートの孔をあけ、貫通鉄筋とPBLによりコンクリートへ力を伝達する。

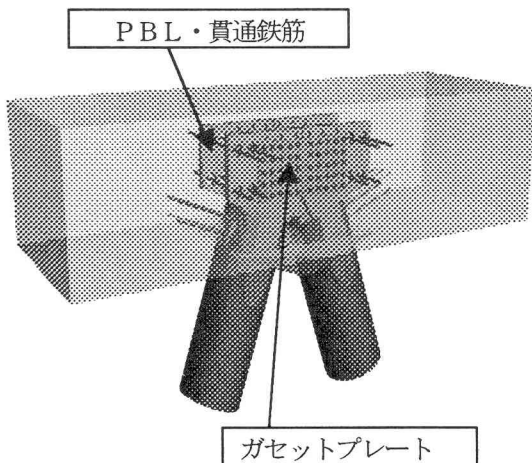


図-16② 格点部構造（二面ガセット方式）

一方、通常の鋼トラス橋においても合理化を積極的に図っており、東海北陸道の椿原橋（写真 2）等において採用している。これまでの鋼トラス橋は、RC床版と鋼トラス主構から構成されていたが、本橋では、トラス上弦材とPC床版とを合成しPC床版に主構としての機能を持たせた複合トラスとしている。床版に2方向のPC鋼材を配置することにより床版の剛性・耐力を向上させ、従来のトラス橋で一般的に採用されていた上横構、床組構造を省略している（図 17）。

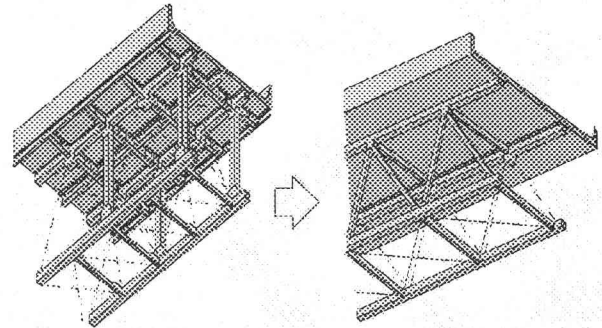


図 17 従来トラス橋と複合トラス橋の概要図

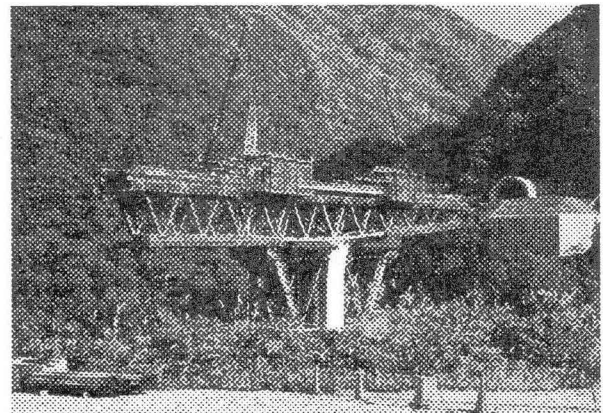


写真 2 椿原橋施工状況

2.6 富士川橋

第二東名の富士川橋は、急流富士川を一跨ぎするアーチ橋で、高速道路路面を支える桁が鋼製、アーチ本体をコンクリート製とした我が国初となる鋼・コンクリート複合アーチ橋であり（図18, 19）、コンクリートアーチスパン26.5mは我が国最大となる。平成10年10月より施工を開始し、現在、上り線のアーチクラウン部のコンクリートを打設し、アーチリブが無事閉合している（写真3）。

富士川橋では、補剛桁にPC床版鋼2主鈑桁を採用、アーチに高強度コンクリート（50N/mm²）を用いて、橋梁全体を軽量化することにより経済性を追求している。また、クラウン部・橋脚・脚高の高い鉛直材においては鋼桁との剛結構造を採用し、耐震性を高めるとともにメンテナンスを要する支承を削減している。

また、本橋架橋位置は、富士川河口断層帯と呼ばれる活断層群の中にあり、想定される活断層の地盤変動を考慮した耐震設計を実施し、大規模な地震が発生しても橋

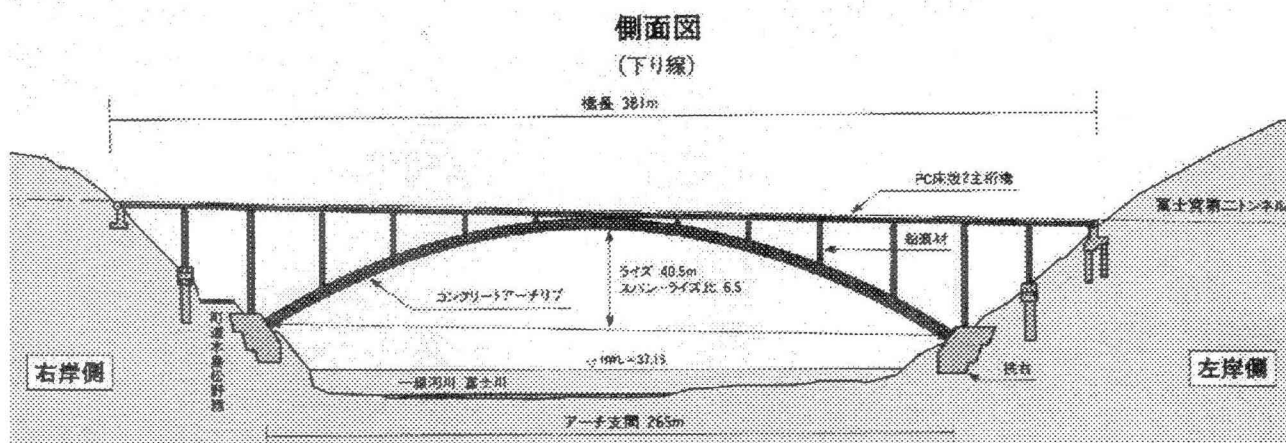


図18 富士川橋一般図

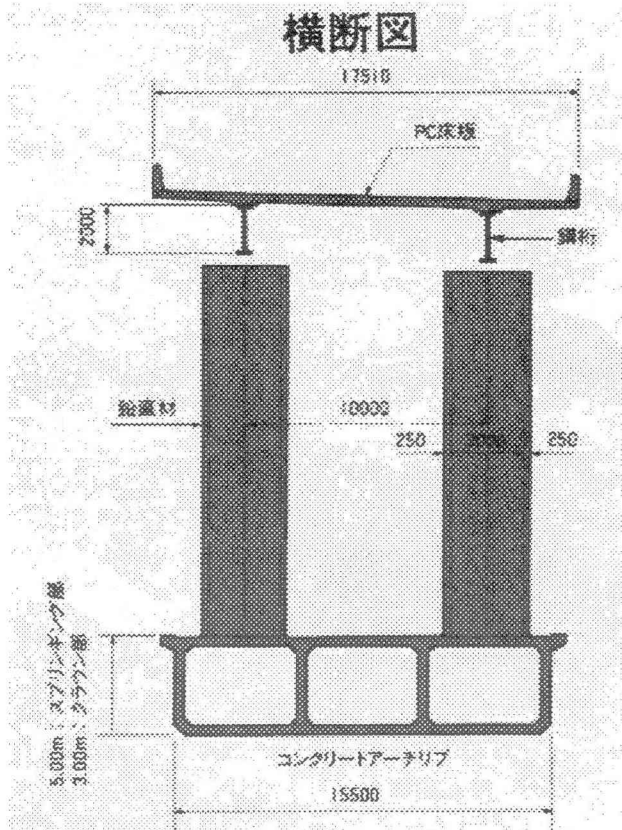


図-19 富士川橋断面図

さらに、1回のコンクリートを打設によって約30cmの変動がある。このため、レーザー光線による自動測量システムに、斜吊材温度の自動補正を組合せて、逐次設計データと比較することにより、高精度な施工を実現している。

今後、下り線側のアーチ施工を行いながら、上り線側では鉛直材の施工、鋼桁・床版の架設と順次施工を進め、上下線の完成は平成16年度末を予定している。

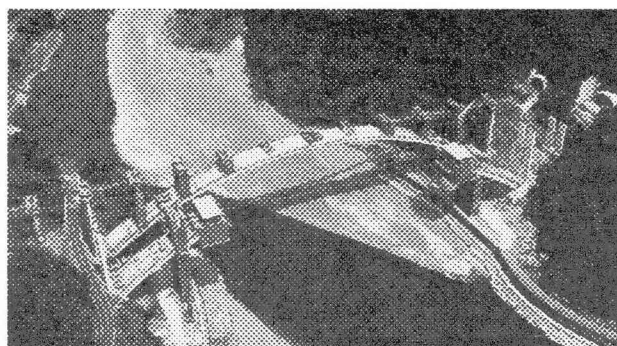


写真3 富士川橋施工状況

梁の各部位が粘り強く挙動することにより十分な耐震性能を確保するよう対応している。

アーチリブの架設は、ピロンを併用した斜吊材による片持ち張出し工法で、アーチを全体で55のブロックに分割し、両岸から張出しを行なう架設工法である。

ピロンの建造は、仮支柱を築造し、アーチリブを下から支え、そして河床より90mの高さとなるピロンをこの上に立て、斜吊材により前後バランスを取りながら、アーチを張出していく。ピロン位置を河川側に出したことにより、前側に倒れようとするピロンを支えるバックステー材の反力を、1基6千 m^3 となるアーチアバットに取ることができ、仮設材を大幅に削減している。また、アーチリブは鉄筋コンクリート構造であるが、斜吊材の温度変化により伸び縮みし、1日最大約10cmの上下変動、

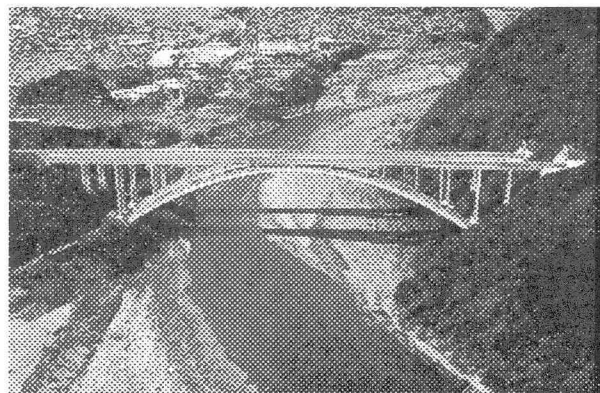


図20 富士川橋完成予想図

3. 結 語

最近の世界的なトレンドが複合構造であることは、多くの橋梁エンジニアが感じていることと思う。鋼・コンクリート・ケーブルなどをうまく組み合わせ、構造の合理性を迫及した構造は、国境を越えて受け入れられるし、我が国もこの潮流に乗り遅れてはならない。これらの技術を活用することにより、橋の設計の自由度が増し、かつ、高品質・低価格なものが得られるようになる。しかし、新技術の発展・活用には、既往の技術力だけではなく、解析技術・施工技術の更なる高度化が要求されるし、何よりも新しいものに挑戦する信念と情熱が技術者には必要である。

JHではこれまで、少主桁構造、プレキャストセグメント、外ケーブル構造等の新技術・新工法を採用し、さらに、下部工・基礎工や維持管理技術の開発を進めてきた。昨今の情勢は新たな道路整備に厳しいものであるが、今後も情熱を持ちながら積極的な技術開発を行い、初期コストの低減と維持管理の低減を目指していきたい。

本報告が複合構造の設計・施工に携わるエンジニアに、少しでも参考になれば幸いである。

[参考文献]

- 1) 波形鋼板ウェブ合成構造研究会：波形鋼板ウェブPC橋計画マニュアル（案）、平成10年2月
- 2) Combault, J, et al : Box-Girders Using Corrugated Steel Webs and Balanced Cantilever Construction, FIP Symposium Kyoto, 1993年10月
- 3) Combault, J. ; シャロール近くのモープレ高架橋, プレストレストコンクリート, プレストレストコンクリート技術協会, Vol. 34, No. 1, 1992年1月
- 4) 近藤昌泰, 清水洋一, 大浦 隆, 服部政昭 : 波形鋼板ウェブを有するPC橋—新開橋—, プレストレストコンクリート, プレストレストコンクリート技術協会, Vol. 37, No. 2, 1995年3月
- 5) 石黒 互, 村田嘉宏, 須合孝雄 : 松の木7号橋（銀山御幸橋）の設計と施工, プレストレストコンクリート, プレストレストコンクリート技術協会, Vol. 38, No. 5, 1996年
- 6) 水口和之, 芦塚憲一郎, 古田公夫, 大浦 隆, 滝 憲司, 加藤卓也 : 本谷橋の設計と施工, 橋梁と基礎, Vol. 32, No. 9, 1998年9月
- 7) 青木圭一, 木水隆夫, 黒田健二, 吉川卓, 丸山正志, 浦川洋介, 勝手川橋（波形鋼板ウェブPC橋）の振動実験について（面内振動）, 土木学会第57回年次学術講演会概要集, 2002年9月
- 8) 青木圭一, 木水隆夫, 黒田健二, 吉川卓, 丸山正志, 浦川洋介, 勝手川橋（波形鋼板ウェブPC橋）の振動実験について（面外振動）, 土木学会第57回年次学術講演会概要集, 2002年9月
- 9) 前田良文, 今泉安雄, 今村壮宏, 上平謙二, 津田敏行, 和田教志 : 波形鋼板ウェブPC箱桁橋（東九州自動車道・小河内川橋）の振動特性, 土木学会第57回年次学術講演会概要集, 2002年9月
- 10) 木水隆夫, 新井恵一, 神山正成, 奥山元 : 全外ケーブルを採用した波形鋼板ウェブ箱げた橋（日本海東北自動車道 勝手川橋）の設計・施工について, コンクリート工学, Vol. 39, No. 10, 2001年10月
- 11) 前田良文, 津田敏行, 和田教志, 足立大介 : 東九州自動車道小河内川橋（波形鋼板ウェブPC橋）の設計について, 第10回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, 2000年10月
- 12) 加藤雅史, 島田静雄 : 橋梁実測振動特性の統計解析, 土木学会論文報告集, No. 311, 1981年7月