

特別講演Ⅱ

今後のPC橋の将来展望＝波形鋼板ウェブPC箱桁橋への展開＝

The prospect of PC bridges—The developing of PC bridges with corrugated steel web—

日本道路公団 技術部 構造技術課長 角谷 務

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6,666km（平成12年7月28日現在）となっており、そのうち橋梁延長が約915km、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37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2,398kmであり、今後開通する道路は、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るため建設費が増大することになる。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ことから採算性を悪化させないように、橋梁の建設費の削減を図っていく必要がある。

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、今後も増大して行くものと思われる。さらに第二東名・名神高速道路が供用した後を考慮した場合、その費用は現在に大幅に上回ることが予想される。従って、如何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。

また、近年、コンクリート橋の耐久性に関してマスコミ等で話題にあがることが多くなっている。昨年来のトンネル覆工コンクリートの落下やコンクリート橋のかぶりコンクリートの落下事故などはまだ記憶に新しく、緊急点検を実施して再発防止に努めているところである。さらにPC橋においても、1992年の英国のポストテンション禁止令や、1998年の独の外ケーブルに関する通達など、取巻く環境は世界的に厳しいものがある。さらに、道路橋示方書の改訂が今年度予定されており、今後建設された橋梁の維持管理費が増加する中で、新設される橋梁においてはライフサイクルコストの重視や設計耐用年数100年が議論にあがっている。

そのため、橋梁の耐久性向上と工費削減を目指して、新技術開発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、PC橋に関しても「PRC構造の採用」、「外ケーブル構造の採用」、「プレキャストセグメント工法の適用」、「複合構造の開発・採用」などの新技術・新工法について、ここ数年、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・耐久性向上を目指して、現在検討を進めている波形鋼板を使用したPC箱桁橋についての現在の取組み状況について紹介するものである。

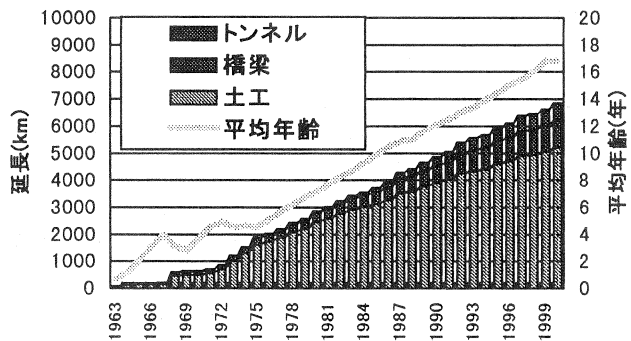


図1 高速道路の延長の推移(構造物別)

2. 波形鋼板ウェブPC橋の利点

波形鋼板ウェブPC箱桁橋は、PC箱桁橋の自重の2～3割を占めていた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る。鋼橋に比べ安価なPC橋において、できうる限りの最小限を鋼構造に置き換えたもので、かつ波形の製作にプレス加工を採用することで製作が容易で安価な鋼構造採用することが可能となっている。下記に特徴をまとめ列挙してみる。

①鋼板を波形にすることにより、高いせん断座屈強度が得られ、軸力に抵抗しない波形鋼板のアコーディオン効果により、コンクリートの上下床版に効率よくプレストレスを導入できる。

②主桁自重の2～3割を占めるウェブに軽量の波形鋼板を用いることにより主桁自重を軽減できる。本谷橋による試算結果を表1に示すが、約21.5%の重量軽減を可能としている⁴⁾。これにより、より長支間化が可能となるばかりでなく、建設費節減を可能とする。また、張出し架設工法においては、張出し1ブロック

表1 本谷橋における上部構造の主要数量比較

	従来型	波形鋼板	増減率
コンクリート	2,150 m ³	1,630 m ³	▲25%
PC鋼材	125 t	110 t	▲15%
鉄筋	290 t	220 t	▲25%
波形鋼板	—	130 t	—

当たりの重量が軽減できるため、架設ブロック長を大きくでき、架設工期の短縮をも可能とする。

③コンクリートウェブが不要となるため、コンクリートウェブの鉄筋組立て、ケーブル配置、コンクリート打設が省略でき、施工の省力化・品質向上・耐久性向上が期待できる。これまで、鋼橋の床版においては、床版が劣化した際に床版打ち替えが行われている。しかし、PC橋においては、高いプレストレスが導入されていることや、内ケーブルが配置されているため、大規模なコンクリート打ち替えは実施されていない。この波形鋼板ウェブPC橋は、将来損傷が懸念される床版の打ち替えが現在のPC橋より容易となるばかりでなく、補修が困難なウェブ部分を鋼板に置き換えているため耐久性が飛躍的に向上するものと思われる。

④上述したように、主桁自重が軽減されるため下部構造の荷重負担が軽減され、また、慣性力が小さくなるため耐震上優れた構造となる。

以上のような利点を有している波形鋼板ウェブPC箱桁橋は、今後適用がより広がっていくものと思われる。特に長大支間を有する橋梁にとって革命的な構造であると言える。しかし、長支間化には検討課題も多く、更なる設計の合理化、安全性の照査を行う必要がある。

3. 波形鋼板ウェブPC箱桁橋の歴史

波形鋼板ウェブについては、我が国においては1960年代に鉄鋼メーカーにおいて開発され、工場のクレーン走行用鋼ガーターのウェブとして延長10km以上が建設され、現在においても使用されている。¹⁾ また、ヨーロッパでは飛行機の機体に波形材が用いられたこともある。さらに、コンテナや飛行場のボーディングブリッジなどにも波形鋼板は使用されており、決して波形材料自体は新しいものではなく、古くから用いられているものである。しかし、コンクリートとの複合構造は、フランスにおいて初めて登場し、我が国においては、1993年の新開橋が最初の橋である。

コンクリートウェブに鋼板を置き換えた複合橋は、FougerolleによってLa ferte Saint-Aubin橋に採用された(1983年)。この橋は、1982年以来フランスにより提案された形式で、重量低減のためウェブを鋼板(フ

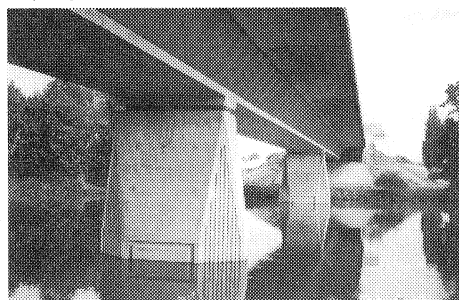


写真1 コニャック橋

ラット) に置換したものである。しかし、プレストレスはコンクリートではなく鋼板部分へ流れるため、鋼板の補強が必要となり、現在この種の構造は採用されていない。続いて、Campenon Bernard 社の Pierre Thivans、Jacques Combault、Marcel cheyreyzi は、波形鋼板を用いたPC橋を考え出し、Charente 川に架かる3径間のCognac 橋を建設した(写真1)。本橋は、直線橋でスパン中心と横方向に関して全く対象であり、支保工施工で実施された試験橋梁であり1986年に完成している。

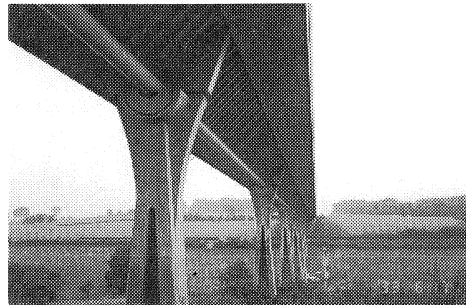


写真2 モーブレ橋

最初の波形鋼板ウェブを用いた橋梁であるため、建築家のミカエリアンによりコンクリート橋脚の表面、ウェブの色、連結板や防護柵の色が互いに合致するように配慮されている²⁾。この橋よりさらに独性的なものが、Val de Maupre 高架橋(写真2)であり、1987年に完成している。本橋は、設計コンペにおいてCampenon Bernard 社から出された橋梁であり、コンクリート上床版、45°に傾斜した波形鋼板ウェブ、コンクリートを充填した径60cmの鋼管からなる三角形断面を有しており、架設工法は、送り出し工法により架設されている。その後、同様の形式がAsterix Park 跨道橋(写真3)で1989年に施工され、1994年にDoubs 川に架かるDole 橋(写真4)が施工されている。Dole 橋は、最大支間長80mの7径間連続桁であり、断面形状はCognac 橋と同様であるが、支点上がコンクリート断面であること、張出し施工で架設されていること、内外併用ケーブル構造が採用されていることなどが特徴的である。³⁾

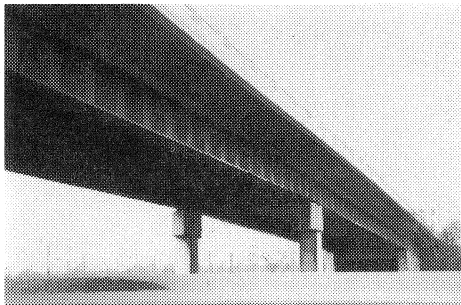


写真3 アステリクス橋

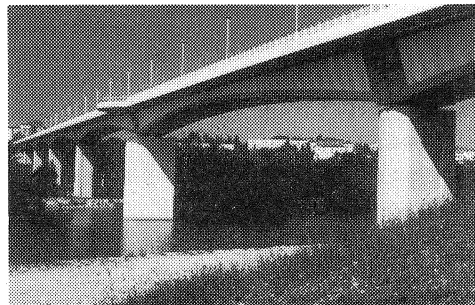


写真4 ドール橋

表2 フランスにおける波形鋼板ウェブPC箱桁橋の施工実績

橋 梁 名	形 式	支 間 構 成 (m)	幅 員	完成年
コニヤック橋	3径間連続	32.455+42.91+32.455	12.10	1986
モーブレ橋	7径間連続	40.95+44.1+47.25+50.4+53.55+47.25+40.95	10.75	1987
アステリクス橋	2径間	2×37.0	13.00	1989
ドール橋	7径間連続	48.0+5@80.0+48.0	14.50	1994

表3 日本における波形鋼板ウェブPC箱桁橋の施工実績

橋 梁 名	形 式	支 間 構 成 (m)	幅 員	完成年
新開橋	単純桁	30.0	14.80	1993
銀山御幸橋	5径間連続	27.4+3@45.5+44.9	9.70	1995
本谷橋	3径間連続	44.013+97.202+55.978	10.49	1998

我が国においては、これまで新潟県の新開橋や秋田県の銀山御幸橋、東海北陸自動車道の本谷橋が完成している。新開橋(写真5)は、一般国道116号の新潟西バイパス高山ICと現道とをアクセスする主要地

方道に架かる橋で、橋長31.0mの単純桁橋である。架橋条件は、河川上に位置し、支持地盤が軟弱であるうえ桁下空間が狭いため、現場制作ヤードで桁を製作し、架設桁により架設する施工法（写真6）を採用している。

銀山御幸橋（写真7）は、橋長210mの5径間連続PC箱桁橋で、架橋位置が沢沿いの片斜面上で桁下空間の利用が厳しいこと、冬季雪崩等を考慮し、押出し工法が採用されている。いずれの橋もコンクリート上下床版と波形鋼板は、鋼板上下に取り付けたフランジプレートとスタッドジベルによって結合される構造（写真8）である。波形鋼板のどうしの継手は、新開橋は現場での突き合わせ溶接、銀山御幸橋は高力ボルトによる摩擦接合方式が採用されている。また、防食方法は、新開橋が塗装、銀山御幸橋は耐候性鋼材によっている。

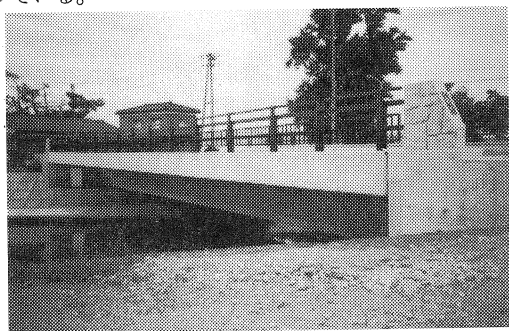


写真5 新川橋

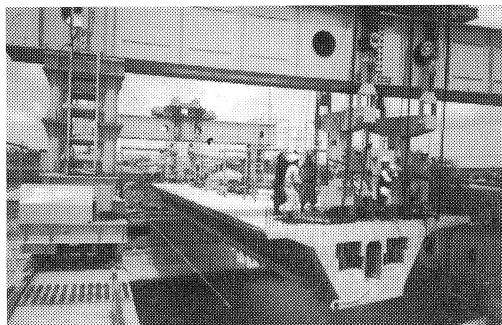


写真6 新川橋施工状況



写真7 銀山御幸橋

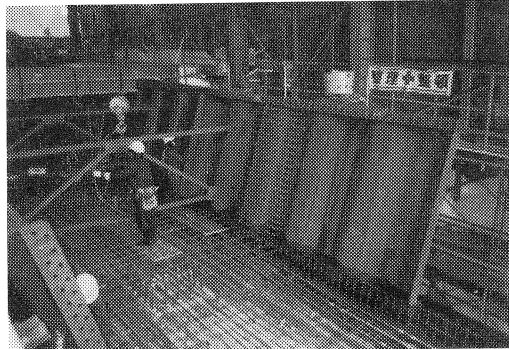


写真8 銀山御幸橋波形鋼板詳細

本谷橋（写真9）は、我が国で初めてラーメン構造の採用、張出し架設工法によって施工された橋梁である。本橋は、主径間9.7mの3径間連続ラーメン橋である。柱頭部と波形ウェブの接合は、波形鋼板を1.2m埋め込み、橋脚からの帯鉄筋を貫通させる構造としている。帯鉄筋は4分割し波形鋼板を貫通させた後、カップラーにより機械的に接続している。また、ワーゲンは200tf・mの中型ワーゲンで、波形鋼板が鉛直な状態で吊り上げられる様一般のワーゲンより高く設計されている。波形鋼板の橋軸方向の接続は、高力ボルトにより接続されている。

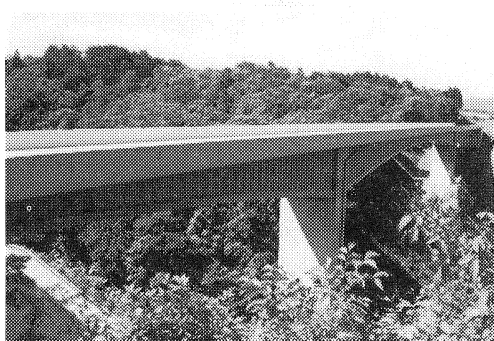


写真9 本谷橋

4. 波形鋼板ウェブ構造の課題

波形鋼板ウェブPC橋の大きな設計上の課題は、その特徴である面外方向変位（図2）に関する事項、例えば波形鋼板の座屈安全性、波形鋼板の軸方向の接合方法や波形鋼板と上下床版の接合法である。

1) 座屈に対する検討

波形鋼板の座屈に対しては、国内3橋の実績では、局部座屈および全体座屈を個別に取り扱い、弾性座屈強度によりその安全性を照査している。また、全体座屈については、Easleyの式による弾性座屈強度に対して、非弾性域を考慮した算定式も提案されているが、連成座屈強度に関しては研究段階である。

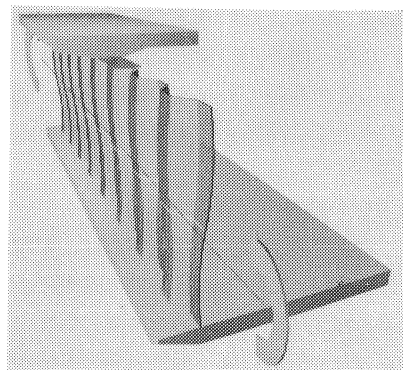


図2 波形鋼板の変形イメージ

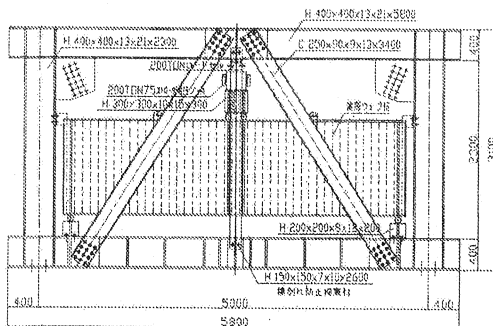


図3 実験状況概要

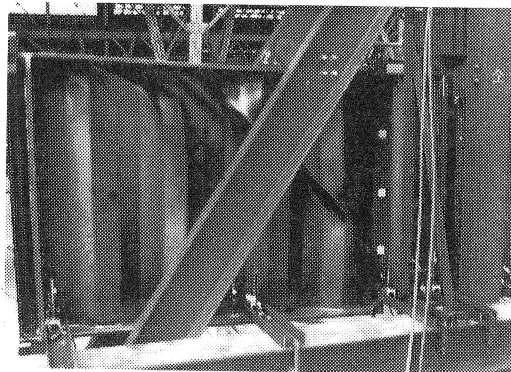


写真10 座屈状況 $t=3.2\text{mm}$ 、波高=60mm

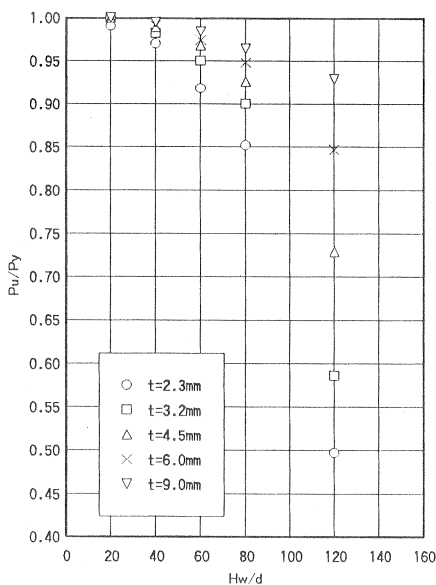


図4 P_u/P_y と桁高波高比との解析結果

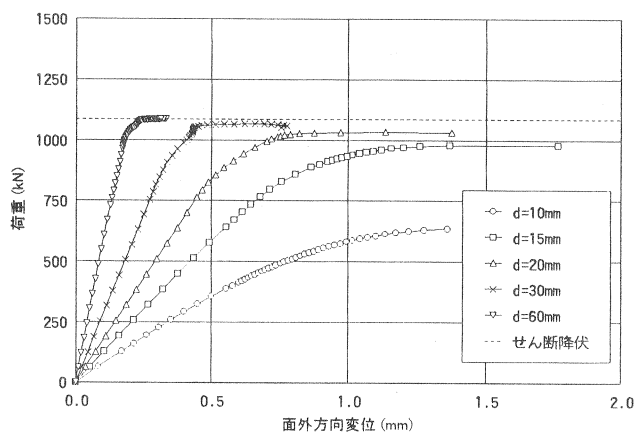


図5 波高差による面外変位解析結果

そこで、波形鋼板ウェブを対象に有限変位解析プログラムによるパラメトリック解析および実験（図3）による検証を行い安全性の検証を実施している。解析および実験は、波形鋼板の板厚および波高をそれぞれ 2.3mm から 9.0mm、10mm から 60mm と変化させ行っている。実験および解析結果を写真1

0および図4、5に示すが、 H_w/d (桁高波高比) が2.0を超える範囲では、座屈荷重が降伏荷重を下回り、また、面外方向変位は波高の小さいものにおいては荷重の低い部分で非線型性が現れ、変形量が大きくなることが判明した。この結果から、支間長がこれまでの実績を超える場合においては、振動問題も含め波高の選定には注意を要する必要がある。

2) 波形の橋軸方向接合

これまで波形鋼板の接合方法は、新開橋が突き合わせ溶接、銀山御幸橋と本谷橋が高力ボルトによる摩擦接合を採用している。本谷橋の摩擦接合には、一面重ね摩擦接合を採用しているが、張出し架設における上げ越し管理や施工誤差のため高力ボルト孔の合致に困難を要している。また、波形鋼板ウェブには、プレストレス力や荷重による面外方向の変形が懸念されることや、フランスにおいては維持管理の観点からボルト接合は避けられている現状から、重ね合わせによるすみ肉溶接が採用されている(図5)。これらより、より合理的で安全な接合形式が望まれる。このため、張出し架設における施工性を考慮し、一面重ねすみ肉溶接における最適な構造詳細を検討する必要がある。また、すみ肉溶接の品質管理方法も検討する必要がある。そこで、4種類程度の接合部構造について、縮小モデル(図7)、1/2モデル(図8)実験により最適な一面接合によるすみ肉溶接方法を決定する予定である(写真11)。

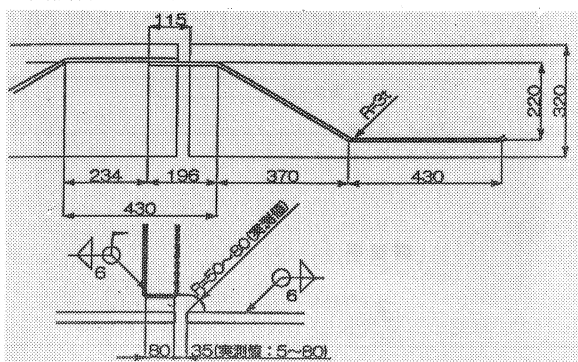


図6 ドール橋の接合部構造詳細

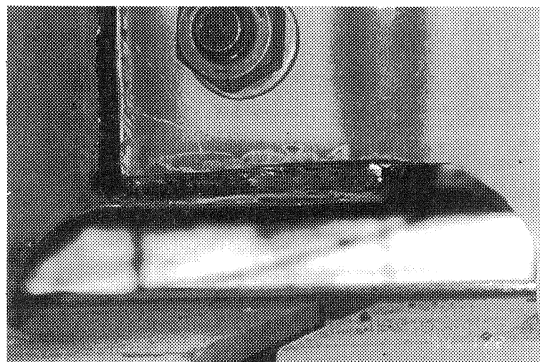


写真11 接合部スカラップ構造の一例

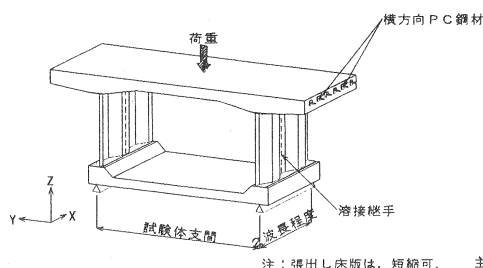


図7 波形鋼板継手縮小モデル試験概要

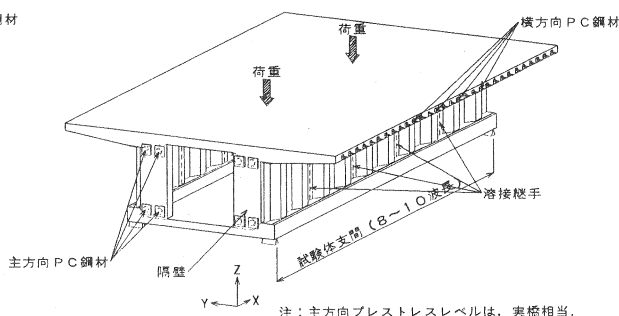


図8 波形鋼板継手1/2モデル試験概要

3) コンクリートと波形鋼板の接合

コンクリート上下床版と波形鋼板の接合部は最も重要な構成要素であり、軸方向の水平せん断力を確実に伝達するとともに、直角方向の箱断面を確実に構成するよう十分な耐力が必要となる。さらに、接合部は鋼とコンクリートとの異種部材の組合せのため適切な防食が必要であり、活荷重等による疲労等による耐久性

も要求される部位である。

我が国の新開橋や銀山御幸橋では図6に示す波形鋼板の上下に溶接されたフランジプレートにスタッドを養殖し、これによって接合する方法を採用している。この方法は、鋼橋のコンクリート床版との接合に一般的に用いられており実績が多い方法である。

本谷橋では、図9に示す波形鋼板の上・下端に軸方向の鉄筋を溶接し、さらに波形鋼板に孔を開け、そこに橋軸直角方向の鉄筋を通し、コンクリート床版に埋め込む方法である。これは、コンクリートに埋め込まれた波形鋼板の斜め方向パネル、溶接された軸方法鉄筋、鋼板孔に充填したコンクリートがずれ止めとして作用するものである。

一方、フランスにおいては図10に示すアングルを溶接した接合方法を採用しており、耐久性の観点では、最も古いコニャック橋が約14年経過した現在においても損傷等は発見されてい

ないと Canpenon Bernard 社から報告を受けている。フランスにおけるアングルジベルの設計は、我が国の道路橋示方書にはほぼ合致した設計が実施されており、また、フランスにおいて実物大の疲労試験により検証が実施されているため、当面JHにおいては、アングルジベル方式による接合方法を採用していく方針である。

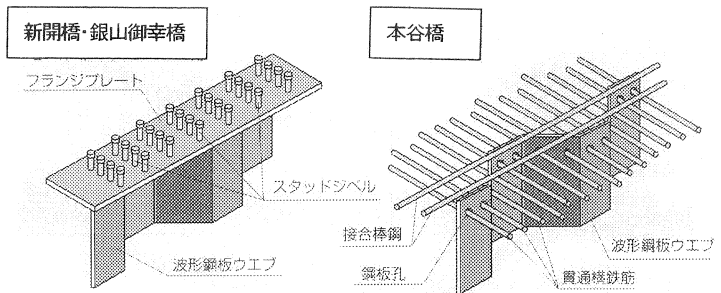


図9 我が国における接合部構造

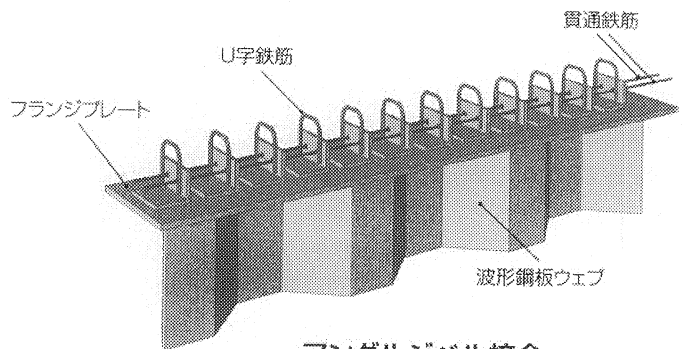


図10 フランスにおける接合部構造

5. 波形鋼板ウェブを用いたPC構造の今後の展開

本構造は、前述したとおり死荷重の軽減やコンクリートウェブの省略等による施工性改善、品質向上、維持管理の容易さから全国的に適用が広がっている。現在、JHにおける波形鋼板ウェブPC箱桁橋の施工中橋梁は表4に示すとおりであるが、計画中の橋梁も含めると現在30橋程度が波形鋼板ウェブPC箱桁構造となる予定である。

表4 JHにおいて施工中の波形鋼板ウェブを使用したPC箱桁橋

橋 梁 名	形 式	支 間 構 成 (m)	備 考
前谷橋	2径間連続ラーメン	75.3+83.3	張出し架設
勝手川橋	3径間連続ラーメン	59.3+96.5+69.8	張出し架設
鍋田高架橋	3径間連続	47.0+91.5+47.0	場所打ち構造
興津川橋	4径間連続ラーメン	69.1+112.0+142.0+130.6	側径間部のみ使用
下田橋	4径間連続ラーメン	44.25+136.5+48.5+38.75	張出し架設
大内山第二橋	7径間連続ラーメン	49.0+66.0+120.0+57.0+43.0+34.0	張出し架設
鍋田西高架橋	3径間連続	60.0+125.0+60	張出し架設
小犬丸川橋	6径間連続ラーメン	50.9+4@81.0+55.0	張出し架設
小川内川橋	2径間連続ラーメン	2@77.75	張出し架設

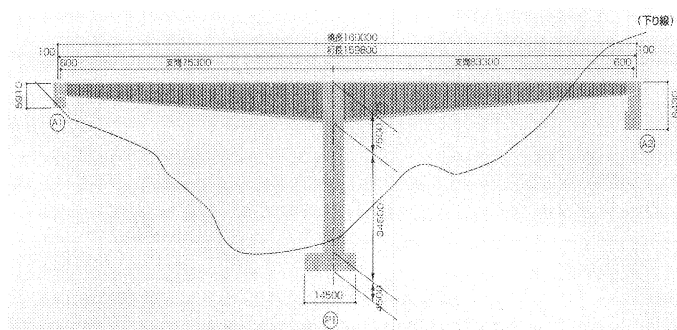


図9 前谷橋一般図

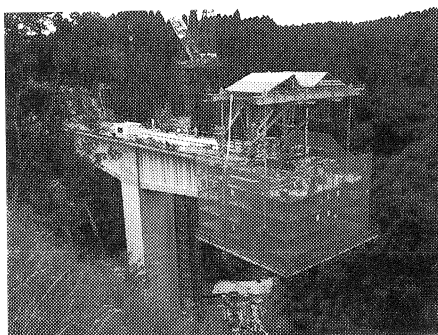


写真12 前谷橋施工状況

また、波形鋼板ウェブPC箱桁橋は、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。特に、PC構造においてはPC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主流となるであろう。この点で、PCエクストラード橋やPC斜張橋における波形鋼板ウェブ構造の採用は、今後のPC橋を更なる長支間化、高耐久性化へと導くものと思われる。

JHでは、波形鋼板を使用したエクストラード橋を第二名神高速道路の栗東橋(図10、11)において施工予定であり、現在、下部構造を施工中である。栗東橋は、第二名神高速道路 信楽IC(仮称)から大津JCT(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」として栄へJRA栗東ト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かる橋で、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橋梁である。架橋地点には、大戸川ダムの建設が予定されており、また急峻な地形を横過するため、最大支間長

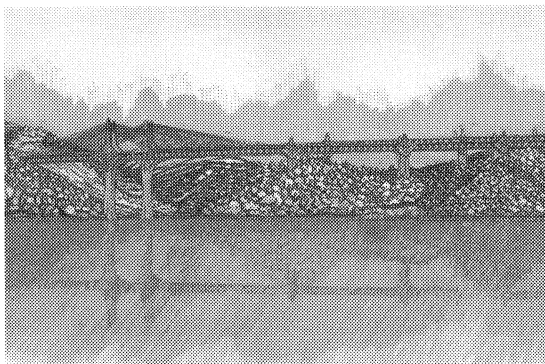


図10 栗東橋のデザイン(側面)

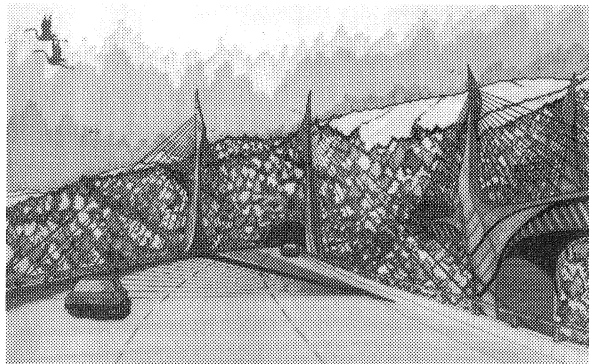


図11 栗東橋のデザイン(正面)

が170mに及ぶ規模となり、また、地震国である我が国の特徴を鑑み上部工重量の軽減や、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エクストラード構造を採用することとしている。第二名神高速道路は十分な車線数を確保するため片側3車線、幅員16.5mを有するため、本橋では波形鋼板ウェブ構造としては世界初となる3室箱桁構造を採用し、さらに、横方向剛性や斜材定着による剛性確保のためにエッジ型構造を採用し、さらに、これまでコンクリートの断面内に配置されていた全ケーブルを断面外に配置する全外ケーブル構造を採用し維持管理のし易さを向上させる試みを採用している。また、本橋は、県立自然公園に架橋されることや、第二名神高速道路の関西地区への入口としてのランドマークを考慮して意匠設計を行っており、また世界初となる技術を採用することを考慮し、Tanja Wilcox 女史(米BRENNAN ASSOCIATES社)によってデザインされている。

栗東橋以外にも、長大支間へ波形鋼板ウェブを採用する試みを検討しており、現在、PC斜張橋での

適用を検討中（図12、13）である。本来、波形鋼板を使用する場合は、波形鋼板の製作、架設から等断面が望ましいが、支間長が大きい場合は経済性を追求し変断面を採用している。しかし、エクストラードーズ形式や斜張橋を採用することにより、等断面形状とすることが可能となり波形鋼板ウェブ橋の更なる施工性向上が期待できる。更にこのような大偏心外ケーブル構造や斜張橋への適用においては、鋼構造に比べ剛性が高く、PC構造と同様な張出し架設が適用可能であること、PC斜材の変動応力が小さく安価な現場制作ケーブルや一般のPC定着構造も採用可能であること、PC構造に比べ死荷重が軽減されることから下部構造の規模が縮小されるとともに、慣性力も小さくなることから耐震性能の向上が期待でき、今後、PC構造の主流となるとともに、鋼構造の適用支間において本構造が広く適用されていくことが期待できる。

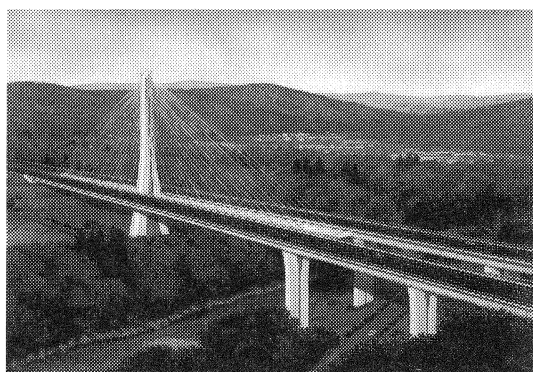


図12 波形鋼板を使用した斜張橋の例

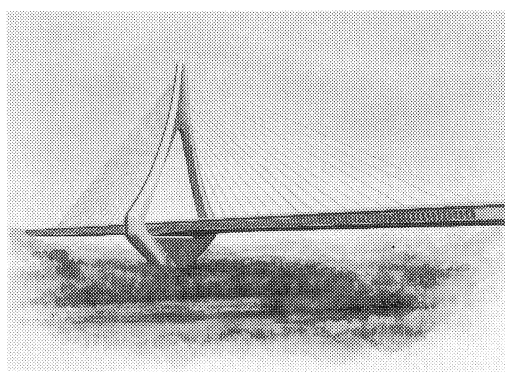


図13 波形鋼板を使用した斜張橋の例

6. おわりに

上述してきた波形鋼板ウェブPC橋の採用により、PC分野の選択肢が広がり、より経済的に、より耐久になるであろう。しかし、コンクリート構造の基本である十分耐久的なかぶりを確保する、品質の良いコンクリートを打設することは言うまでもなく、また、特にPC橋にとっては、プレストレスの確実な導入、PC鋼材の確実な防食を施すことは必要不可欠である。今後も、新構造の技術開発を推し進めるとともに、100年間またはそれ以上の耐久性を有するプレストレストコンクリート橋の建設のため基本を忘れてはならないことを最後に申し添えたい。

また、波形鋼板ウェブPC箱桁構造の検討に際しては、波形鋼板ウェブを有する複合構造の長大支間化に伴う技術検討委員会（京都大学教授 渡邊英一 委員長）、PC構造の耐久性向上に関する技術検討委員会（横浜国立大学教授 池田尚治 委員長）において技術検討を進めており、関係者各位に深く感謝の意を表する次第である。

[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) Jacques Combaut : The Maupre viaduct near Charolles, FRANCE、プレストレストコンクリート Vol134.No.1. Jan. 1994
- 3) Michel Virlogeux : Composite Bridges, from classical to innovative designs、橋梁と基礎 97-8
- 4) 小川他：高速道路および都市高速道路におけるPC橋の動向と事例、第26回PC技術講習会、平成10年