

日本道路公団における橋梁の最新技術

Recent Bridge Technology of Japan Highway Public Corporation

猪熊 康夫*

INOKUMA Yasuo

*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）

ABSTRACT: Japan Highway Public Corporation (JH) has been developing several bridge technologies for cutting construction cost, saving labor and improving durability of bridges. Evaluation of competitive edges of bridges and adoption of these new technologies are the most important issues when basic plan of bridges are determined. This paper introduces some examples of bridge planning process and recent bridge technology of JH.

KEYWORDS: 橋梁形式選定、競争力、新形式

1. はじめに

我が国の高速道路の供用延長は、1963年の名神高速道路の開通（栗東～尼崎）を皮切りに、現在までに7,000kmを超えており、そのうち橋梁延長は全体の約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、橋梁においても大胆な建設費の縮減を迫られている。

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、一方で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縮減を目指して、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きたところであり、構造の合理性やコスト縮減効果に期待した新しい構造形式を数多く採用してきた。このような新技術をいかに組み合わせ、またその競争力をどう評価し現地に適合した橋を造っていくかが、今後の橋梁計画の最重要課題である。

本文では、JHにおける新形式橋梁を紹介するとともに、橋梁形式ごとにどのようにその競争力を評価し、形式選定を行っているかについて概説する。

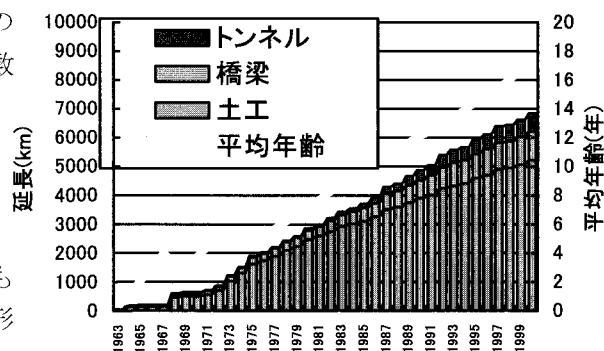


図1 高速道路の延長の推移（構造物別）

2. 橋梁形式選定の流れ

2.1 橋梁形式選定の基本

はじめに、JHにおける既設橋梁の形式別比率(図2 供用延長別比率)をご覧ください。平成9年以前に開通した橋の比率では、大まかに分けてコンクリート橋が60%、鋼橋が40%となっている。鋼・コンクリートの比率は、平成9年以前も最近のデータもほとんど差がないが、コンクリート橋の中で見ると、最近のコンクリート橋ではRC橋がほとんど使われていないということがわかる。

この点は、橋梁の形式選定のうえでは非常に重要な変化を示している。すなわち、名神・東名の時代には橋脚高さの低い高架区間では最も経済的であったRC中空床版橋が、経済性だけでは採用されなくなってきたのである。この間に、ひび割れ制御のできないRC構造の維持管理上の問題が形式選定の上で大きな比重を占めてきたことと、RC構造に代わるものとしてひび割れ制御が可能なPRC構造が開発され、JHの技術基準に標準化されたという大きな変化がある。維持管理の経験のなかった時代には初期コストの節減が最優先事項であったが、供用年数とともに維持管理のデータが蓄積され、維持管理の軽減も橋梁形式選定で考慮すべき重要なアイテムになってきたという例である。橋梁の形式選定では、建設コストというのは非常に重要な要素であるが、社会のニーズの変化とともに考慮すべき事項は複雑・多岐に渡るようになってきており、また各項目の評価手法についてもより定量的な手法が求められるようになってきた。

図3は、JHにおける橋梁形式決定の流れと検討すべき項目を表している。この図では、道路線形の決定の後に交差条件が決定されているが、実際の道路線形の決定に当たっては、長大河川や鉄道・道路などの交差部での橋梁架設条件などが全体コストに影響を与えることから、道路線形の決定時に長大構造物に関する概略検討が行われる。また、交差条件の決定に当たっても、交差する構造物の施工方法や将来の維持管理をどのように行うかが協議要件となることから、実際の形式決定に当たっては、河川・鉄道・道路など交差物の管理者と協議を行いながら、並行してその他の事項についても検討を行うのが一般的である。

橋梁形式の検討にあたって考慮すべき事項は、図3に示すように多岐に渡っているが、これらの条件をどのように形式決定に組み込んでいくかは、その橋の架設される地域条件や地形条件等によって定まるので一律に決まるものではない。つまり、交差物件との建築限界から将来の維持管理を最小にすべき橋、国立公園内にあり周辺景観とのバランスを最優先に考えるべき橋など、優先的に考慮すべき条件が変わることから、現地条件に併せて総合的に検討することが重要である。また、橋梁形式決定は、機械的に行える作業ではなく、豊富な知識・経験・データに基づいた複雑な作業であるうえ、プロ

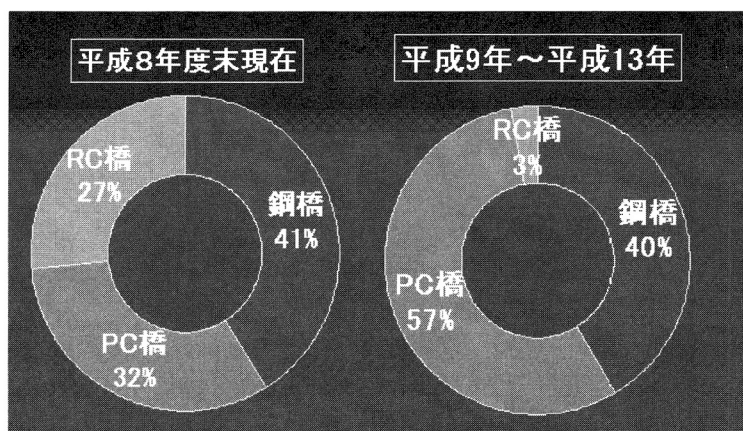


図2 橋種の供用延長別比率(H9以前と以降)

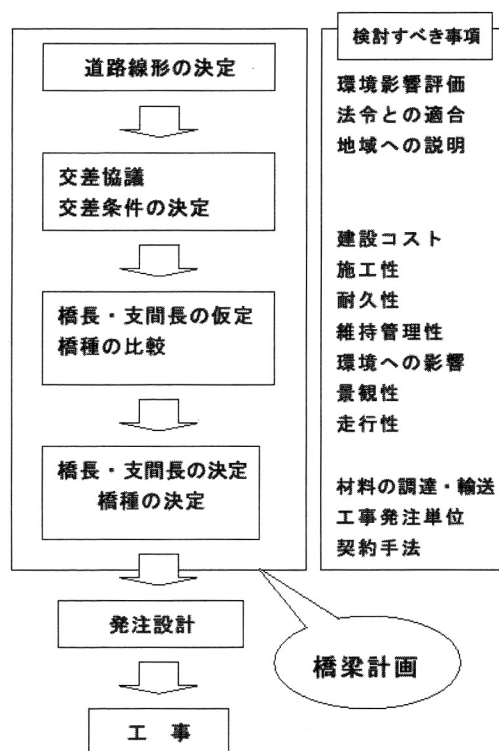


図3 橋梁形式決定の流れと検討項目

プロジェクトの上流側の作業である橋梁形式選定が、そのプロジェクトの成否を握ると言っても過言ではない。以下に、橋梁形式選定時に検討すべき項目について概説する。

2.2 橋梁計画における経済性評価

JHにおける橋梁形式決定の最大要件は、建設コストの最小化である。この点については、時代が変わろうとも、JH設立当初から変わっていない。ただし、新形式橋梁や施工技術の開発、人件費・材料費のバランスなどにより、橋の建設費は変化するため、最も経済的な橋が何であるかは時代の変化とともに変わっていく。また、JHのような有料道路事業では、建設費を借入金で賄い通行料金で返済するため、初期コストを最小に抑えることが総支出額の最小化に繋がることから、橋梁の建設費の評価はより重要である。ただし、注意しなければいけないことは、橋の建設費は同じ形式の橋でも架設条件により大きく変わるため、架設費の算定に当たっては架設条件を十分に把握しておく必要があることと、橋梁形式検討時に積み上げる工事費はある程度の誤差を含んでいるということを理解しておくことである。精度の低い評価方法で算出した建設費にこだわって橋梁形式を選定すると、工事段階で後悔することにもなりかねない。

2.3 維持管理の容易さとLCC評価

高速道路の供用延長も7000kmを超え、橋梁の管理延長も1000kmに達している。高速道路ネットワーク整備がまだ未熟だった頃は、「早く・安く」作ることが、高速道路建設の最大の目標であったが、供用延長の増大や老朽化路線の増加とともに維持管理費も増加し、維持管理費を抑制することも同時に考えなければならなくなっている。当然のことながら、橋梁形式選定においても、環境条件に応じて維持管理費を最小にするような配慮が必要になっているし、特に最近はコンクリートの中性化や塩害など耐久性に関する性能の予測手法も確立されるようになってきており、維持管理費をより定量的に評価することが求められるようになってきた。JHにおいても、橋梁の維持管理費の最小化を目指しBMS（Bridge Management System）の確立に向け技術開発を行ってきており、科学的分析と既設橋の点検データに基づいた劣化予測とLCC評価を行うことを目指している。しかしながら、50年以上に渡る維持管理費を正確に予測することは難しく、建設費と同じ精度で評価することに無理がある。橋梁をどのように維持管理していくかを明確にイメージし、橋梁計画に反映していくことは重要であり、LCCの最小化を目指した技術開発は最優先事項であるが、橋梁計画段階でのLCC評価は、現時点ではあくまでも概念的な目標値として扱うのがよいと思われる。

2.4 環境への配慮

道路建設は、少なからず自然環境の改変を伴うため、環境負荷をいかに最小に抑えるかを考えなければならないが、一方で人工環境の創造という視点もある。特に橋梁のような道路構造物は、一般的には、自然環境に溶け込むように目立たせなくする工夫が必要とされるが、状況によっては地域のランドマークとして積極的な意匠検討を行う場合もある。橋梁計画において景観が形式決定の最優先事項になることはないが、常に周辺環境とのマッチングは考えなければいけないし、景観処理を施す場合でも、過度な工事費の増加を招かないような配慮が必要である。

また橋梁計画における環境負荷の軽減としては、騒音・振動の発生要因となる伸縮装置をいかに減らすかが、現在の重要課題であり、JHの技術開発においても、免震技術の応用による連続化や、延長床版構造などによるジョイント騒音の低減などに取り組んでいる。

2.5 工事発注単位と契約方式

橋梁の形式選定では、経済性や維持管理性などの橋梁の性能に直接関わる事項の他に、その橋梁を建設する際の発注方式や発注単位なども考慮する必要がある。例えば、個々の橋について最も経済的な形式を選定するよりも、ある範囲内にある橋梁群をひとつの発注単位として捉え、形式を統一した

方が工事が効率化しより経済的になる場合や、将来の維持管理が容易になるなどのメリットがある。工事発注単位は、基本的にはより大規模なほうが、仮設機械や支保工の転用などにより共通的な経費が節減できることから、プレキャストセグメント工法などには特に有利となる。しかし、むやみに工事規模を大きくしすぎても、逆に工期が長くなりすぎて非効率となる場合もあるので注意が必要である。

3. 橋梁形式決定の事例

前述したように、橋梁の形式決定は架設条件や自然環境に応じて様々な検討が必要な複雑な作業であるが、「特殊な架設条件が伴わない場合であれば経済性ではこの形式が最も有利」という橋があり、通常はそういう標準的な橋を中心に、支間長を変えたり、他の形式と比較したりして、ひとつの案に絞り込んでいく。「標準的な橋」は、技術の進展とともに経済的な優位性や耐久性の評価が変わっていくことから、普遍的なものではないが、現状でのJHの標準構造を示すと表1のようになる。

表1 適用支間長と主たる上部工形式

適用支間長	20m～40m	40m～70m	70m～120m	120m～
鋼 橋	少主桁橋	少主桁橋	狭小箱桁橋 開断面箱桁橋	トラス橋 鋼床版箱桁橋
コンクリート橋	PRC2主版桁 工場製作セグメント PC箱桁橋	PC箱桁橋 (固定支保工・ セグメント橋)	PC箱桁橋 波形ウェブ橋 (カンチレバー 架設)	波形ウェブ橋 複合トラス橋 エクストラードズド橋

また、図3.1は、橋の形式決定の事例として、最大支間約90mを有する河川を横過する橋梁を示している。図3.2は形式決定の際の比較案である。この橋梁は、表2に示すように経済性、施工性から①のPC5径間連続箱桁橋（波形鋼板ウェブ）に決定している。交差条件により支間長が90m程度になり、また河川部や道路上にベントが立てられない場合は、一般にカンチレバー架設によるPC箱桁橋が経済性・施工性の面で有利になる。また、最近ではPC箱桁のウェブを波型鋼板に置き換えた波型ウェブPC箱桁橋が開発され、死荷重軽減効果によりさらに経済性を発揮できる場合も多い。

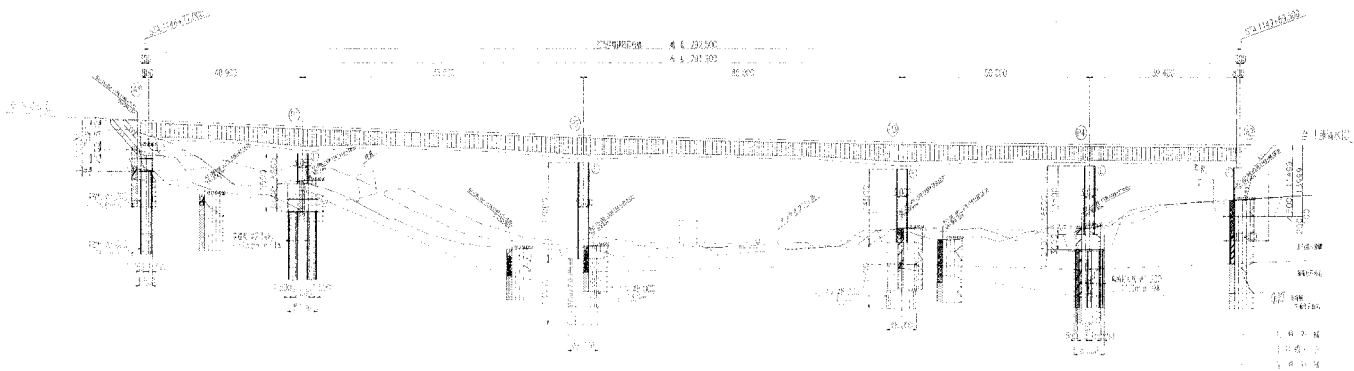
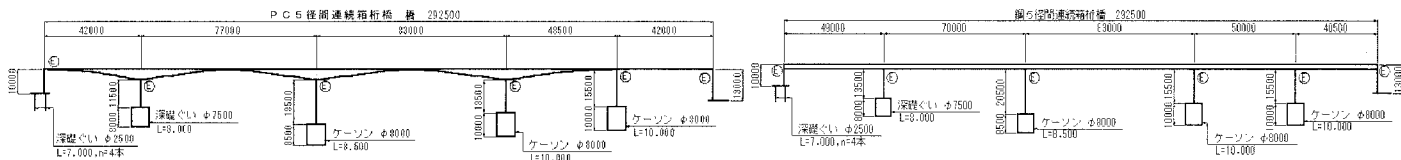


図 3.1 決定後の橋梁一般図の例



① PC 5 径間連続箱桁橋（波形鋼板ウェブ）

② 鋼 5 径間連続箱桁橋

図 3.2 橋梁形式比較

表 2 経済性・施工性の比較

	① P C 5 径間連続箱桁橋		② 鋼 5 径間連続箱桁橋	
概算 工費	上部工	1.0	上部工	1.13 ※
	下部工	1.0	下部工	0.86 ※
	基礎工	1.0	基礎工	0.96 ※
	全 体	1.0	全 体	1.06 ※
施工	張出し架設 ＋固定支保工＋吊支保工		送出し架設 ＋トラッククレーン架設	

※ ①の形式を 1.0 とした時の比率

4. 田中章受賞橋梁にみる新形式橋梁の競争力評価

JHでは、建設コストの縮減と維持管理費の軽減を目指した橋梁計画を進めており、そのために常に最新の技術を取り入れ、新形式橋梁を開発している。JHが、どのような視点で橋梁の技術開発を行っているかを、最近の田中章受賞橋梁をモデルケースに紹介する。

4.1 藁科川橋

藁科川橋は一級河川藁科川橋を跨ぐ全長 1,055m の第二東名高速道路の連続高架橋である。主桁の支間長 40m 程度の部分は鋼 2 主桁橋、同 70m 程度の部分は鋼 2 主開断面箱桁橋を採用した。上下線は分離構造であるが、藁科川渡河部には栓抜き型の橋脚を採用して上層を第二東名高速道路、下層を一般市道とする二層構造を採用した。

JHでは、鋼 I 桁橋のコスト縮減を目指し、平成 5 年より P C 床版 I 桁橋の開発を行ってきた。そのプロトタイプは、道央自動車道ホロナイ川橋であり、その後名古屋地区での第二東名神で大々的に採用された。名古屋市周辺では、都市部を通過することからプレキャスト部材の搬入が可能であり、また工期短縮効果が求められる地域でもあったことから、床版支間長を 6m 程度にした 3 主桁構造とプレキャスト P C との組み合わせを採用したが、静岡地区の第二東名では路線が山岳部を通過することからプレキャスト部材の搬入が難しい。そのため、藁品川橋を始めとする静岡地区の山岳橋梁では、床版を場所打ち構造とし、主桁構造はより力学的合理性を追求した 2 主桁構造とした。

第二東名の幅員で 2 主桁構造を採用すると、床版支間は 10m を超えるが、このような長支間 P C 床版を鋼橋に採用した例は日本にはないことから、床版形状、床版厚、床版の設計曲げモーメントなどについて立体 F E M 解析などに基づく検討を行い、押抜きせん断などに対する疲労照査に加え、実物大模型を製作した実験検証によりプレストレス導入度やクリープ、乾燥収縮に着目した長期計測、ならびに静的荷重載荷試験を行って構造の妥当性等を確認した。

また、河川横過部では、河川の交差条件より 70m 以上の支間が必要となることから、鋼箱桁形式を採用しているが、箱桁断面には橋軸直角方向プレストレスの導入効率のよい開断面箱桁を採用した。さらに、開断面箱桁直上の場所打ち P C 床版施工の合理化、省力化を図るため、ハーフプレキャスト合成床版工法的一种となるトラス鉄筋付 P C F 版合成床版を開発し、輪荷重走行疲労試験などの検証を行った後、採用した。

藁科川橋は静岡地区における第二東名高速道路の鋼橋パイロット工事であり、鋼上部工の標準構造としている「長支間場所打ち P C 床版を有する鋼 2 主

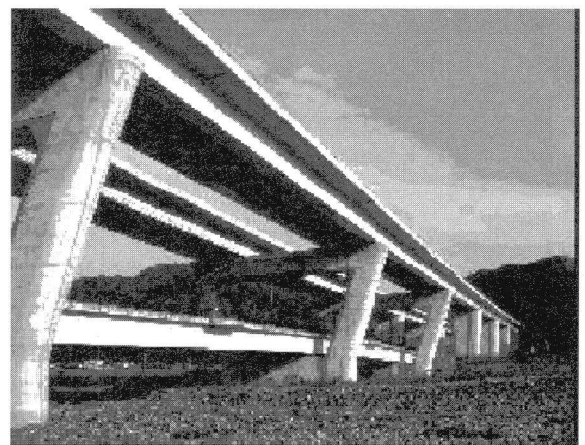


写真 1 藁科川橋

桁橋」に関する技術開発や、PCF床版などの新技術を積極的に採用し、実物大模型を製作した実験検証などを踏まえて実橋施工に臨んだ。ここで開発した技術を応用して、現在第二東名高速道路の建設が進められている。

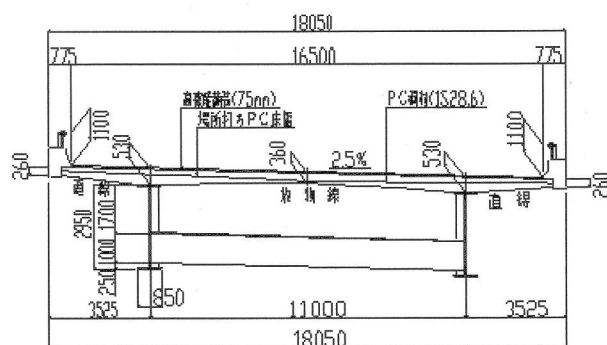


図 5.1 葦科川橋 I 桁部横断図

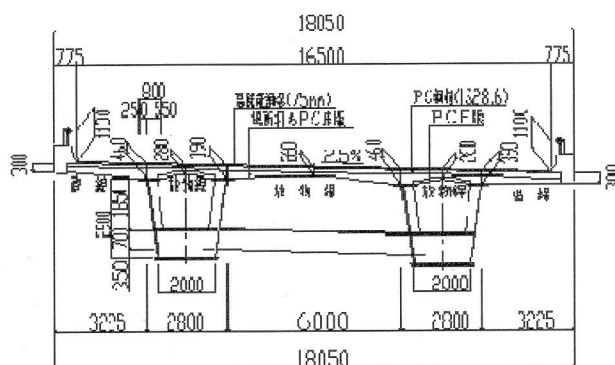


図 5.2 葦科川橋箱桁部横断図

4.2 芝川高架橋

芝川高架橋は、第二東名高速道路の中で最も急峻な地形に計画されており、最大橋脚高さ 83m を有する山岳橋梁である。また、周辺の地山の平均斜度は 45° の急傾斜地であり、一般的な PC 多室箱桁橋で施工した場合、橋脚基礎寸法が大きく、多額の費用を要し、地山への影響も大きくなることが予想された。コスト削減と環境への配慮から、芝川高架橋では、基礎及び橋脚構造を小さくし、構造物掘削による地山への影響を極力小さくすることとした。橋脚断面積を縮小するため、上部工の箱幅を小さくする必要がある。箱幅を小さくすると、張出床版支間が長くなることから、ストラットと呼ばれる部材により張出床版を支持する構造（PC ストラット付箱桁橋）として計画した。PC ストラット付箱桁橋の採用により、従来の構造に対し、基礎工・下部工は約半分の断面積で構成でき、上部工も約 80% の断面積で構成することが可能となった。これらの結果、従来の構造に比べ約 20% の工事費削減が可能となった。このような、ストラットで支持された床版の設計方法や構造詳細の決定方法は技術的に確立されていないことから、立体 FEM 解析と模型実験により床版とストラットの接合部の耐力および耐久性に関する検討を行い、ストラットと上床版の接合部の発生曲げモーメントが小さくなる、剛性の高い連続した梁（エッジビーム）を設ける構造とした。またエッジビームは構造上の重量な部位となる接合部であることから、ひび割れを発生させない性能とした。

さらに、掘削工法には竹割型構造物掘削を採用することにより、地山に対する影響を最小限とすることが可能となり、将来的な法面の維持に関するメンテナンス費も削減でき、環境に配慮した構造となっている。また、高橋脚部には鋼管・コンクリート複合構造を採用し、施工性の向上も図った構造とした。

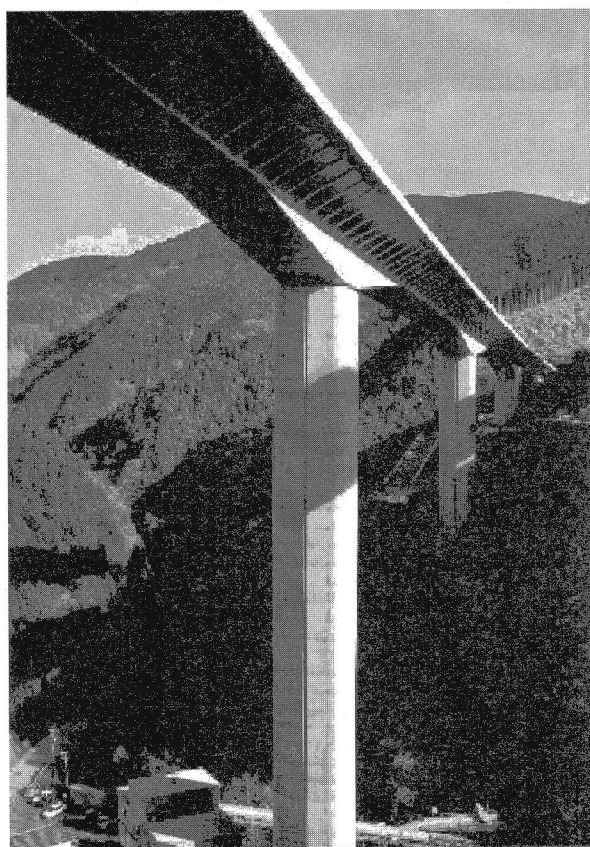


写真 2 芝川高架橋

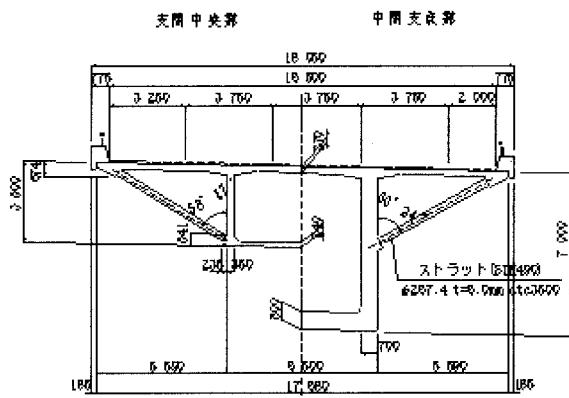


図6 芝川高架橋横断面図

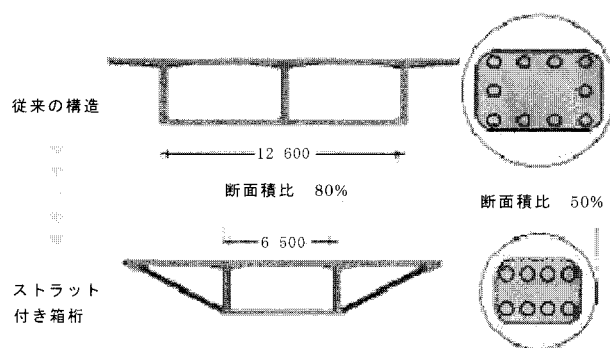


図7 ストラットの効果

4.3 今別府川橋

今別府川橋は、東九州自動車道末吉ICと国分IC間に位置する橋長188.5m、最大支間長81.5mの鋼2主桁3径間連続複合ラーメン橋である。「3. 橋梁形式決定の事例」でも述べたように、支間長80mを超える山岳橋梁では、一般的にカンチレバー工法で架設するPC箱桁橋が経済性・施工性の点で優れている。長支間の鋼箱桁橋は一般に製作コストが高く、またベントの設置位置が限定される山岳部では、経済的なトラッククレーンベント架設を選定できないことから、建設コストの面で鋼橋を選定することは難しい。

今別府川橋では、このような山岳部での鋼橋の弱点を克服するため、JHがこれまで開発してきたPC床版2主I桁橋や複合ラーメン構造などの技術と、鋼桁をベントを用いないカンチレバーで架設する方法とを組み合わせた新形式橋梁を開発した。PC床版2主I桁橋は、支間長60m程度まではコスト競争力に優れた構造であるが、構造を極力シンプルにしていることから、支間長が長くなると風・地震などによる振動による障害が懸念されることから、一般的には長支間の橋では採用していない。しかし、今別府川橋では支点上の桁高を高くし桁の剛度を高めることと、RC橋脚との剛結構造を組み合わせることで、2主I桁の支間長を80mまで延ばすことを可能にした。また、風による振動特性を把握するために風洞実験を行い、ねじれフラッターなどの発散振動が起らないことを確認するとともに、実橋でも減衰定数の確認試験を行った。

また、桁架設では新たに開発したトラベリング・エレクション・ガントリークレーン（以下TEGクレーン）を用いて、カンチレバー架設を行った。このTEGクレーンの採用により、PC箱桁橋と同様に、荷揚設備を橋脚部1箇所集約し、山岳部での架設に対応できるようになったことに加え、PC床版もプレキャスト化し同じクレーンで架設したことで、架設工期をPC箱桁橋に比べ大幅に低減することができた。

本橋の設計・施工に当たっては、この他にも架設サイクルを短縮し厚板フランジに対応できる溶接・ボルトの混合継ぎ手や、複合構造の重要部位である剛結部の構造などについて技術検討を行っている。



写真 4 今別府川橋架設中

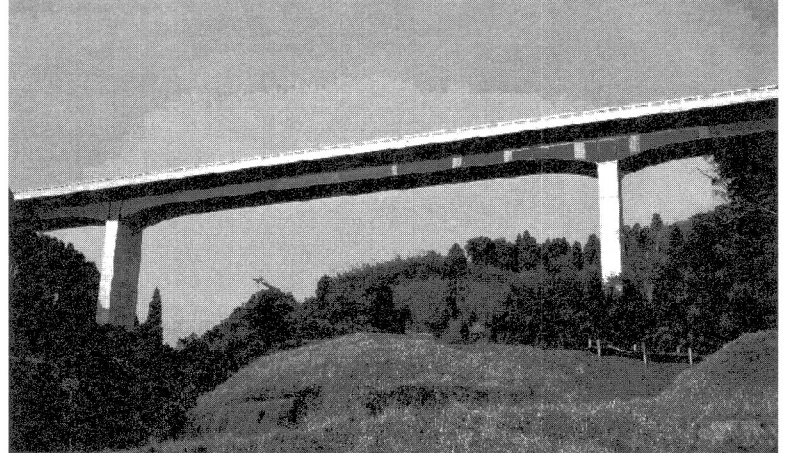


写真 3 今別府川橋

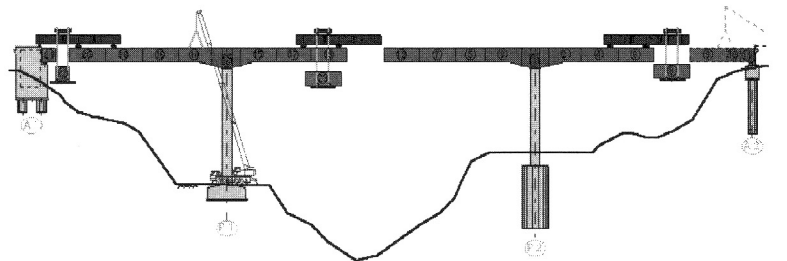


図 8 架設イメージ図

5. 今後求められる視点

高速道路建設は、昨今の道路関係四公団の民営化議論に見られるように、厳しいコスト縮減が要求されているが、一方で道路構造物が地域社会の優良な資産として長期間活躍していくためには、経済性以外の付加価値についても橋の性能のひとつとして積極的に取り入れていく必要がある。橋の競争力を語るうえで、今後ますます重要となるとと思われる橋の性能について、以下に概説する。

5.1 環境への対応

環境負荷の軽減は、道路建設における大きなテーマであるが、橋梁の場合は特に伸縮装置部から発生する騒音・振動や、床版を透過してくる高架騒音などが、環境に負荷を与える要因として考えられる。環境問題は、これまでも環境アセスメントに見られるように、より定量化した指標で、より多くの人に分かりやすく伝えることが求められてきたが、今後もますますその要請は強まってくると思われる。例えば、橋梁から発生する騒音については、すでに高架構造物音として環境アセスメントにおける騒音予測に取り入れられ、走行車両の速度や車種に依存するものとして取り扱われてきたが平成 16 年 4 月には新たに橋梁の構造形式にも依存するものとして(社)日本音響学会提案の道路交通騒音の予測モデル「ASJ RTN-Model 2003」で次式のように定式化された。

$$L_{WA, str} = a + 30 \log_{10} V \quad (\text{式 1})$$

上式は大型車類による高架構造物音のパワーレベル（橋梁が放射する音のエネルギー量）[dB] を評価する式であり、ここで、 V は走行速度 [km/h] を、 a は橋梁種別ごとに示す定数である。なお、 a に対する橋種は、音響的特徴を重視した 5 分類と、実用性を考慮した 3 分類の 2 パターンで設定されており、鋼橋が大きく、コンクリート橋が小さく設定されている。騒音予測における構造物音の占める比重は決して大きくなく、予測騒音レベルはその他の要因で決定されることが多いが、環境条件に

よっては騒音レベルにより構造形式が決定される場合もあることから、今後は騒音レベルを低減する効果を新たな橋の性能と考え技術開発を進めていく必要がある。また、騒音以外の地盤振動や低周波振動などについても、今後定量評価することが求められてくると思われる。

5.2 耐久性の定量的評価

現状でのLCC評価については、将来の維持管理技術の開発や社会構造の変化などに予測不可能なことも多いことから、あくまでも期待値として、橋の形式決定では参考程度に扱うのがよいと思われるが、一方で橋の維持管理においては各機関でBMSの開発が進められており、橋梁の耐久性や維持管理費用に関してより精度の高い予測を行うことを目指している。現在のところ、構造物の劣化要因と環境条件を結び付けた劣化モデルが確立されているものは少なく、さらに補修補強シナリオを描くためには維持管理に関する経験とデータの蓄積が必要であるため、BMSは発展途上の技術であると言えるが、橋の性能を定量的に評価することは、説明責任を果たすためにも重要であり、今後ますます求められる視点である。BMSを中心とした橋の劣化予測手法の研究開発により、橋梁形式選定においてもLCC評価を取り入れるべき時代がいずれ来るものと予想される。

5.3 新たな契約制度の導入

これまでの橋梁形式選定の流れでは、プロジェクトの上流側でインハウスエンジニアが橋梁形式を決定し、その後発注設計を行い工事を発注する、というのが一般的であった。しかし、昨今、民間技術の活用を図り、より競争性を発揮させる契約形式として、設計施工一括型契約方式（以下、デザインビルド：DB）が採用される例もある。このDB方式では、入札者が橋梁形式の変更を含めた提案を行うことを可能にしており、より競争力のある新たな橋梁形式が開発されることが期待されている。発注者側が行う橋梁形式選定では、ある一定の技術力を有する会社であれば工事が可能な標準的な形式を選定することから、特殊な特許を用いた工法などを前提にした形式選定などは行いづらいが、DB方式の導入により工事入札時に幅広い提案を受け入れることが可能となり、橋梁技術の発展にも有効であると思われるが、一方で橋梁形式の変更を受け入れるにあたり、橋の要求性能の適合性審査では発注者側の技術力も要求されることになる。当初の橋梁形式選定時に、橋の要求性能を明確化しておくことがますます重要になってくると思われる。

6. まとめ

JHでは、コスト縮減と耐久性の向上の両立を目指し、橋梁の技術開発を行ってきた。今後は、経済性・維持管理性に加え、環境負荷の軽減や景観への配慮、高速道路としてのサービスの向上など、幅広い社会の要求に応えられるように、多様な視点から技術開発を行っていく所存である。関係の皆様のご協力をお願いしたい。

参考文献

- 1) 角、水口：日本道路公団における最近の複合構造事例、第5回複合構造の活用に関するシンポジウム講演論文集、土木学会、2003年11月
- 2) 中村、今泉、兼重、中東、佐々木、小川：今別府川橋の設計・施工、橋梁と基礎、2000年12月
- 3) 本間、長谷、榊原、中村、上原、河西：長支間場所打ちPC床版の設計と施工ー第二東名高速道路藁科川橋一、橋梁と基礎、2002年10月
- 4) 寺田、福永、三浦、中島：芝川高架橋の設計と施工ーストラットを有するPC箱桁橋の一、橋梁と基礎、2003年9月
- 5) 三百田、榊原：環境と橋梁、橋梁と基礎、2004年8月