

「阪神高速道路の建設技術とその展望」

1. はじめに

阪神高速道路公団では、昭和39年6月28日に大阪中心部において土佐堀～湊町間2.3kmを開通させて以来、交通渋滞の解消による経済の活性化や国家的プロジェクト関連事業として、路線整備を進めてきており、現在供用延長は221.2kmとなっている。この間、都市部においては神戸線、空港線、守口線とネットワークを拡げ、さらに大阪ベイエリアにおいても湾岸線を順次開通させていった。一方、神戸山岳部においても災害に強いラダーネットワークとして、北神戸線と神戸山手線の整備を進めている。現在、一日の平均利用台数は約90万台以上にのぼり、阪神都市圏の生活物資の約4割が阪神高速道路によって運ばれるなど、市民生活を支える交通大動脈として関西都市圏の発展に大きく寄与している。

このように、阪神高速道路公団では都市中心部における高架道路の建設だけでなく、湾岸域における数々の長大橋を架設を始めとして、山岳部のトンネル、盛土、橋梁構造さらには都市部の開削トンネルなどの様々な構造形式を対象として建設を進めてきた。都市中心部の建設においては、線形・用地・施工上の制約条件が厳しく、湾岸地域においては、架設条件により様々なタイプの長大橋の建設・架設検討が必要とされ、さらに地下構造物でも、地盤変状が問題とされる都市NATMや破碎帯を通過するシールドトンネルなどの検討が必要となった。また、平成7年1月の兵庫県南部地震では、都市高速道路としてこれまで例のない被災を受けたが、種々の建設・施工技術を適用することにより復旧工事を予定より早く無事完了することができた。このように阪神高速道路公団では、計画・設計・建設における様々な問題に対処するため、多くの技術検討を重ね建設技術を発展させてきている。

2. 阪神高速道路公団における建設技術

2-1 橋梁技術の進歩

近年、わが国では、本州四国連絡橋をはじめとして各種の長大橋梁が海峡部や湾岸部に建設され、また中小規模の橋梁でも優れた技術的特色を有するものが多く見られるようになってきた。阪神高速道路においても、橋梁技術の進歩・向上をうけて、湾岸線を中心に、長大支間を有する大規模橋梁が種々建設されている。これらの橋梁には、地形・地質、河川あるいは航路等の架設地点の条件から、トラス橋、斜張橋、アーチ橋、ラーメン橋もしくは長大支間を有する箱桁橋などが採用され、架設方法においてもフローティングクレーンを用いた一括架設や潮位差を利用したポンツーン架設など現地条件を生かした特徴のある工法が用いられている。このように種々の構造形式を有し、技術的、景観的特色を備えた阪神高速道路公団の橋梁は、安全性、供用性、耐久性といった機能性のみならず、景観面からも地域に調和しており、その技術は世界的レベルに達しているといえる。以下に、各タイプ別に主な橋梁について概要を説明する。

(1) トラス橋

大阪港に架けられた港大橋（全長980m、中央径間長510m）は、トラス橋としては世界3位を誇るゲルバートラス橋である。本橋の最大の特徴は、我が国の橋梁としてはじめて鋼張力鋼（HT690、HT780）

の極厚板(最大100mm)を大量に使用したことである。また、架設においても、中間橋脚部の架設に3000ton吊りのフローティングクレーンを使用したり、中央吊り径間部を工場で地組して一括吊り上げにより架設するなど特徴のある工法を採用した。湾岸線建設の第一歩といえる港大橋の建設は、当時、長大橋の建設実績の少ない時代に、材料から設計、施工に至るまで日本の土木技術の粋を結集したものであると言っても過言ではない。本橋の建設技術は、本四連絡橋をはじめとするその後に展開される長大橋梁群の建設に生かされるものとなった。(写真-1)



写真-1 港大橋中央桁部の一括架設(ゲルバートラス橋)

(2) 斜張橋

大和川橋梁は、一級河川大和川を横断する、全長653m、中央支間長355mの3径間連続鋼斜張橋である。斜張橋は近年我が国においても数多く建設されているが、本橋の中央支間長355mは、斜張橋としては当時我が国最大であり、近年に見られる長大斜張橋の先駆けとも言える。そのため、橋の設計、施工にあたっては、構造形式、設計方法、製作、架設方法などについて詳細に検討が行われた。本橋の主塔は、立地条件上河川を約25度の斜角で横断する影響を考慮し、また1面ケーブルとすることで主桁でのケーブル定着構造が簡略化できることから、独立1本柱とした。ケーブルは、力学特性、施工性、外観、実施例などを総合的に判断してハープ形とし、ケーブル段数は、定着構造や外観を考慮して4段とした。また、ケーブルには、平行線ケーブルを使用しているが、最上段ケーブルはPWS-217・19本の構成となり、斜張橋としては最大級の断面となっている。主桁は耐風安定性が良いと言われる扁平逆台形箱桁を採用し、風洞試験により耐風安定性を確認した。大きな圧縮力を受ける主桁と塔については弾塑性解析、有限要素法解析を用いて耐荷力や結合部応力集中の安全性を照査した。なお、堺側の側径間の一部に平面曲線が入っており応力的に厳しくなるため、主桁の一部にHT80鋼材を用いている。

天保山大橋は、安治川河口部を横断する中央径間350mの斜張橋であり、安治川を航行する大型船舶の航行を考慮し、桁下高52mを確保している。阪神高速道路としては2番目に完成した長大斜張橋であり、設計施工にあたっては、様々な技術的検討がなされた。本橋のケーブルは、主桁の架設が張出し工法であること、道路幅員が広い(6車線~8車線)こと、桁下空間が高いため耐風安定性を向上する必要の

あることなどの理由により、2面マルチケーブル形式とし、主塔は、2面ケーブルと一体的に協力して橋全体のねじり剛性を高められることや景観的にも優れていることなどからA型形式とした。また、各ケーブルの配置は基本的にはファン形式であるが、両側径間が非対称なため橋端部でケーブル間隔を変化させている。本橋のケーブルにおいては、建設途中にレインバイブレーションが観測されたため、ケーブルの下部定着点付近に油圧ダンパーを用いた制振装置を取り付けて、振動を抑制している。主桁は、耐風安定性に関して風洞試験を含む検討を行い、フラッター及び渦励振に効果のあるフェアリングを付加した扁平六角形箱桁としている。

東神戸大橋は、湾岸線が東神戸水路を渡る区間に位置する斜張橋である。本橋が横断する東神戸水路は、フェリー発着のための回頭水域になっているため、水路幅として455mを確保するために側方余裕をふくめて中央支間長を485mとし、地盤条件・経済性・施工性から有利な斜張橋を採用した。中央支間長500m級の斜張橋は、本橋の建設時には我が国にほとんど例がなく、さらに六甲山系を後ろにひかえて大きな迎角の風が予想されることから耐風安定性に慎重に対応する必要がある。また、取り付け道路部の狭い空間を効率的に使用する必要があったことなどから、主桁はダブルデッキトラス形式が選定された。斜張橋の象徴ともなる主塔としては、従来にない斬新な形状のH形塔を採用し、景観を考慮して上横梁を比較的低い位置に取りつけた円弧の形状としている。ケーブルはハープ形状の2面配置としているが、レインバイブレーション対策として実物大模型による風洞試験を実施し、世界ではじめて歯車状の平行突起を設けたケーブルを採用し振動を抑制している。主桁は前述のようにダブルデッキのトラス形式としているが、シンプルな側面形状のワーレン・トラスとするとともに弦材を床組と合成させることで、合理的で経済的な構造としている。耐震設計においては塔・橋脚の全ての支点で可動とするいわゆるオールフリー構造系とし、ステイクブルの弾性拘束効果を利用して耐震上問題となる橋軸方向へのスウェイの固有周期を4秒強と比較的長くした柔構造とし、変位抑制のためのベーン型オイルダンパーを設置している。(写真-2)

「ビッグハープ」の愛称がつけられた新猪名川大橋は、池田線(延伸部)が猪名川をほぼ24度の斜角で渡河する部分に位置する橋長400m、主塔高90mの2径間連続PC斜張橋であり、この形式としては日本最大級の規模となっている。本橋については、河川内の橋脚を1基に制限され、端橋脚位置について



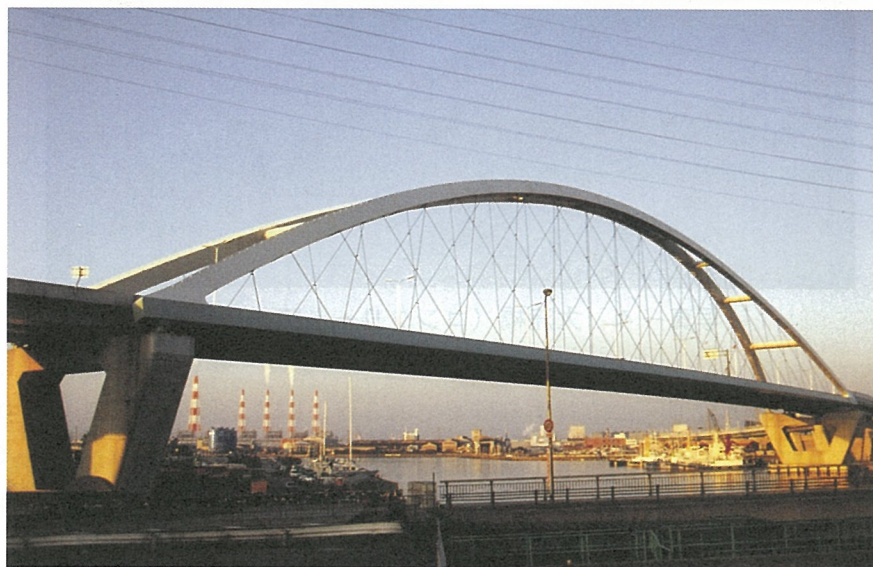
写真-2 東神戸大橋(鋼斜張橋)

も制約を受けたため、支間200m×2径間の橋梁となり、適用可能な案（鋼斜張橋案，鋼アーチ橋案，鋼床版箱桁案，PC斜張橋案）について比較検討した結果，経済性，維持管理の容易さ，環境，景観等を総合的に判断して2径間連続PC斜張橋を採用した．主桁を支える主塔受梁部のコーベルの架設においては，非出水期間内という限られた期間に確実に施工するために鉄骨ブロックをつなぎ合わせて組み上げコンクリートを連続的打設する新技術を適用した．また，主桁張出し架設においてもシステム化によりサイクルタイムの短縮化を図るなど，数々の工事技術を適用した．

（3）アーチ橋

南港水路橋は南港水路の上に架設された複床式の単弦ローゼ橋である．単弦ローゼ桁橋は，世界的にも珍しい橋梁形式であるが，さらに本橋においては，新交通システム（通称ニュートラム）が湾岸線と同一ルートで計画されていたため，新交通システム部分を吊材を延長して吊り下げるダブルデッキ構造となり，世界で唯一のダブルデッキ構造単弦ローゼ桁橋となった．

新浜寺大橋は，湾岸線が堺市の浜寺水路を横断する部分にかけられた橋梁で，支間長254mのバスケットハンドル型ニールセンローゼ橋である．本橋はニールセンローゼ桁としては，世界的な規模を誇る橋梁である．本橋の主構造は，ローゼ桁であるが，アーチ部材を内側に傾斜させたバスケットハンドル型とすることにより，主構の面外剛性を高め安定性を向上させている．本橋の上部工の架設は，潮位差を利用した台船によるユニークな一括架設を行った．（写真－3）



写真－3 新浜寺大橋（ニールセンローゼ橋）

六甲アイランド大橋は，湾岸線が六甲アイランドに渡る部分にかけられた，支間長217mのローゼアーチ橋であるが，ダブルデッキ構造となっている．本橋の架設はフローティングクレーンを用いた一括架設により行われたが，吊り重量が約7,000tonと大きくなったため，大型フローティングクレーン3隻による相吊りにより架設された．

岸和田大橋は，岸和田旧港地区の再開発地域を横断する橋梁であり，景観への配慮が重要であったため，上部工形式として，3径間連続中路式アーチを採用した．また，近景で視覚されることが多いので，部材の煩雑感を避けるために吊り材にケーブルを用い，鉛直吊りするとともに，上横構を設けずに支材とアーチリブで構成されるラーメン構造として横荷重に抵抗するようにしている．脚部にはV脚を有するバランストアーチ形式を採用し，アーチ支点に生じる水平反力を橋体が受け持つ構造としている．

V脚は景観的なポイントとなるとともに、アーチおよび補剛桁の実質的な支間を短くできる利点を有しており、本橋における特徴ともなっている。

(4) 上路式RCアーチ橋

大滝橋は、北神戸線が神戸市北西に位置する総合福祉ゾーン「しあわせの村」を通過する部分に位置し、公園施設内の谷間に架けられた橋梁である。本橋はこうした周辺環境との調和を考慮して安定感のある形式としてコンクリートアーチ橋が採用された。本橋は橋長174m、アーチ支間長100m、ライズ25mのRC固定アーチ橋であり、阪神高速道路公団としては初めてのRCアーチ橋である。本橋のアーチリブは充実断面として厚さを押さえるとともに、厚さ、幅ともに基部から頂部に向けて絞り込んである。また、景観に配慮してリブ側面にスリットを設けるとともに支柱についても本数を少なくかつ薄くしている。(写真-4)

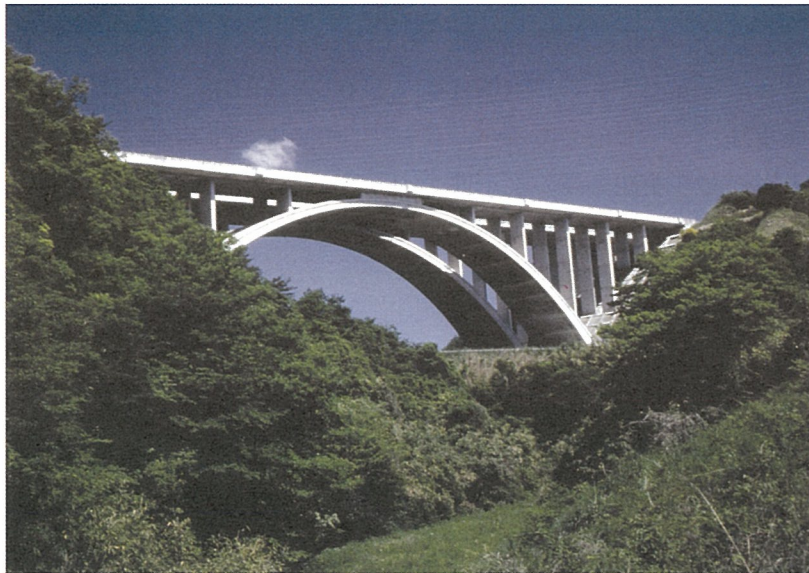


写真-4 大滝橋（コンクリートアーチ橋）

水晶山大橋は北神戸線の唐櫃地区に位置する橋梁であるが、国立公園内にある2つの砂防指定河川を、できるだけ橋脚数を少なくして渡るために、2径間連続コンクリートアーチ橋が採用されている。本橋のアーチ支間は150m×2径間であり、2径間コンクリートアーチとしては世界的な規模である。

(5) PC橋

船場高架橋は1970年に完成した大阪市を中心部のビルの屋上を走る珍しい高架橋であり、道路とビルが一体となる立体道路の先駆をなす構造である。商業地域としての機能と都市高速道路を両立させるために、各種店舗を収容できるビルを建設して、その屋上に6車線の高速道路と片側3車線ずつの2方向の高架街路を走らせている。高速道路は、地上4階、地下2階の鉄筋コンクリート造りのビルの柱上に設けられた受け梁で支持された橋梁構造であり、走行車両による振動への配慮からプレテンションPC桁が用いられた。なお、ビルの下を地下鉄が走っており、構造物が幾層にも重なった特徴ある都市空間を形成している。

堺線が大和川を渡河する地点に1970年に架けられた大和川PCゲルバー橋は、河川と約30°の斜角で交差することや鉄道橋を跨ぐ条件から最大支間約120mの長径間橋梁となり、さらに橋梁の一部が半径206mの平面曲線区間内に含まれ6径間すべてが不等径間となることから、構造的な複雑さに対応しやすく施工でも有利なディビダーク工法が採用された。当時まだ施工実績が十分でなかったため、設計・施

工上のいろいろな点において注意が払われた。設計上は、上部工が斜橋となることを避けるため橋脚躯体を計画洪水高より上の部分で上下線分離したり、鉄道と交差する箇所にはヒンジを配置して桁高を抑えるなどしており、施工においても300を超える施工ブロックがすべて不等形状であることから、入念な施工精度の管理がなされた。

唐櫃新橋は、唐櫃トンネル北坑口に隣りあう高架橋であり、斜面の崩壊地を避けた形で支間を決定したため、この支間長に適した構造形式として景観的にも1つのシンボルとなるPCエクストラード橋が阪神高速道路で初めて選定された。斜張り外ケーブルを有するPC橋であるエクストラード橋は、桁形式のPC橋に比べ、負のモーメントに対するPC鋼材量が低減されるとともに主桁重量も小さくなるため、本橋のようなカンチレバー架設では特に経済性に優れている。(写真-5)



写真-5 唐櫃新橋 (エクストラード橋)

中野高架橋は、阪神高速道路北神戸線の一部を構成し、兵庫県西宮市の北部に位置する土工部に挟まれた約500mの曲線区間に建設された橋梁であるが、建設コストの縮減と施工の合理化を目的として、鋼とコンクリートの複合構造からなる波形鋼板ウェブPC箱桁橋を全面的に採用した。本橋は、波形鋼板ウェブPC箱桁橋としての、はじめての本格的な曲線橋 ($R=440\text{m}$) であるとともに、波形鋼板とコンクリート床版の接合部に、パーフォボンドリブとスタッドを併用した新しい接合形式を開発する等の技術的特徴を有している。本形式の採用にあたっては、各種の載荷実験、解析に加え、今回特に曲線区間へ適用範囲を拡大したことから、現場計測も実施して今後の設計の参考になるようにした。

(6) 鋼床版箱桁橋

都市内の高速道路は、既設のビルなどが存在することから、これらを避ける複雑な曲線となることも多いが、その代表が中之島の“S字橋”である。本橋の建設は1964年と比較的古く、設計にあたっては曲げねじれを考慮した薄肉箱桁断面の解析理論を用い、併せて模型実験や実橋載荷実験により妥当性の確認を行うなど、コンピューターによる構造計算の発達していない当時としては画期的な設計であった。現在ではこのような曲線橋は、都市部などでいくつか建設されているが、その先駆けとして重要な役割を果たした。(写真-6)



写真-6 中之島の“S字橋”

阪神高速道路には、日本でも5指に入る長大鋼床版箱桁が、湾岸線に3橋（正蓮寺川大橋、尼崎港大橋および春木川大橋）架かっている。なかでも正蓮寺川大橋は、河川内の航路幅を確保するために中央支間長235m、総鋼重12,700tonの3径間連続箱桁橋となり、阪神高速道路公団随一の規模を誇っている。中間支点上の桁高が9.5mにもなり、中央支間も長いため、腹板の座屈に対する補剛方法や風の影響が問題とされ、検討のために種々の実験を実施して設計に反映させた。架設においては、架設位置が河口部ということもあり、全体を3ブロックに分割し、各々2隻の大型フローティングクレーンの相吊りによる大ブロッカー括架設工法により架設した。

(7) 多径間連続桁

走行性や耐震性の向上、ジョイント騒音の低減のため、多径間連続桁について積極的に取り組んでいる。多径間連続化においては、温度変化による桁の伸縮と地震水平力の分散が課題となるが、様々な方法で問題を解決している。まず最初に、大阪西宮線吉野玉川高架橋において粘性せん断型ダンパーを用いて7径間連続桁（276m）を完成させ、続いて湾岸線新淀川橋では6径間（567m）を連続化した。粘性ダンパーは、常時温度応力は解放し、地震時には水平力の分散とダンパーの減衰効果による地震力の低減を期待するもので、耐震上有利な構造形式が可能となるが、初めての適用であったことから実橋による振動実験でも性能を確認した。その後も検討を進め、構造のより簡単な反力分散支承を適用して橋脚寸法の統一や断面の縮小を図った。更に湾岸線松の浜高架橋では耐震性向上のため4径間連続鋼箱桁に免震支承を採用したが、全国的にも適用例が少ないことから実橋での加振実験により効果を確認した。

2-2 鋼構造物その他

(1) 剛性に優れたコンクリート充填合成柱

出島工区においては、街路の幅員構成との関係で柱断面を大きくすることができないことから、長い梁を有する鋼製単柱橋脚5基について合成柱を採用し、柱部と隅角部にコンクリートを充填して剛性を増大させたわみを減少させるとともにじん性と耐荷力の向上を図った。試算により、合成柱にすると鋼製柱に比べ、死荷重の増加により杭反力は若干増加するものの、活荷重たわみや鋼重を減らせることがわかったが、さらに多くの模型載荷実験や現地載荷試験を実施し、耐荷力照査結果も踏まえて指針を策

定した。施工においては充填コンクリートを十分締め固めるとともに、横梁上フランジ部などに空気抜き孔を設け肌すきが生じやすい箇所には無収縮モルタルを用いるなど、コンクリートがすみずみまで空隙無く充填されるように工夫した。

(2) 現場溶接及び超音波自動探傷検査

鋼構造物の現場での接合に、美観や鋼重の軽減そして維持管理の面から、「現場溶接」が採用される例が増えており、平成3年度には鋼床板のデッキ面、鋼製橋脚の梁部および柱部を対象にした「現場溶接施工マニュアル」を策定し、施工の標準化を図った。

現場溶接部の検査についても、安全な超音波を用いた検査手法の開発を進め、記録性を有する自動走行機能付きの超音波自動探傷装置を利用した合理的な検査手法を完成させた。その後も、溶接欠陥の検出精度やその信頼性について各種の検討を重ね、平成5年度に「超音波自動探傷検査要領」を策定した。超音波自動探傷検査の導入により、溶接部の検査手法や作業環境が改善され、溶接作業の効率化にも貢献している。

(3) 省力化床版

コンクリート床版を取り巻く環境の変化に加え、施工上の制約条件や維持管理上の理由から、通常の場合打ちRC床版に加え、各種の特殊床版について検討を進めている。高石工区においては工期短縮と将来の維持管理を考え、床版の型枠としてPC版を用い、後打ちの床版コンクリートと合成させるPC合成床版工法を採用した。幅員変化にも対応できるようにPC版の製作を工夫した他、鋼桁の製作においてもPC版の敷設が可能になるように上フランジを工夫した。また、高石入路の鋼I桁部分においては、現場作業の軽減や信頼性などの点で優れるプレキャスト床版を採用した。適用にあたっては各種実験を実施してプレキャスト床版相互の連結法、床版と桁の結合方法等に検討を加え、設計に反映させた。さらに脇浜工区では、施工の急速化と耐久性向上の観点から、鋼板を型枠として利用すると同時にコンクリートと合成させる鋼製型枠合成床版を採用した。鋼板とコンクリートとの一体化のためにトラス型ジベルを用いた構造とし、適用にあたっては、合成床版の強度、施工性を確認するため押し抜き、曲げ、疲労などの各種の実験を行い設計に反映させた。

2-3 基礎構造

阪神高速道路の構造物の基礎は、従来はその大半が杭基礎であったが、近年では現場条件に適した、種々の工法が採用されている。特に、湾岸線では、海上部や埋立地を通過するとともにや長大橋も多く、杭基礎、ケーソン基礎、鋼管矢板基礎等の多彩な基礎形式が採用されている。

阪神高速道路で採用されている基礎形式のうち特徴のあるものを以下に挙げる。

(1) 連続地中壁基礎の本体利用

連続地中壁は、低騒音・低振動の工法であり、近接構造物への影響が少ないなどの長所を有することから構造物本体基礎として用いられるようになったが、阪神高速道路では、荒本ジャンクションの渡り線で道路橋としては西日本で最初となる連続地中壁基礎を採用した。本基礎においては、施工後に水平方向の静的載荷試験並びに振動試験を実施し、設計方法の検証を行っている。また、魚崎工区では、現地での制約条件により、施工可能な最小寸法である4.0m×5.0mの小断面連続地中壁基礎が施工された。

(2) 多柱式基礎

湾岸線の中島地区では、支持層まで根入れした杭群の頂部をコンクリートスラブで連結する多柱式基礎が採用されている。また、フーチングと一体になった施工枠を、杭打設完了後一括架設することで、工期の短縮を図っていることも、本工区の特徴である。

なお、鋼管杭の防食方法として、流電陽極方式の電気防食が採用されている。

(3) 鋼管矢板基礎

鋼管矢板基礎は、水中で基礎を施工するに際して、縮め切りと本体とを兼用することができるほか、水平力に対する横抵抗が大きい、工事占用面積、工期、工事費の低減が可能であるなどの特徴がある。そのため、長大橋から一般橋梁まで、その水中部における基礎として広く採用されている。

鋼管矢板基礎の頂版と鋼管矢板との結合部の構造としては、従来は異形鉄筋を溶接した鋼板を鋼管矢板に現場溶接で取り付ける構造が使われていたが、施工性向上の観点から異形鉄筋スタッド溶接技術を用いた結合方式を独自に開発した。

(4) 鋼製仮締切枠の海中基礎

岸和田大橋の海中基礎は、水深15mの海中部に位置する場所打ち杭基礎であり、工事占用面積が小さく、工期短縮が図れ、かつドライワークでの杭頭処理、コンクリート打設が可能な鋼製締切枠を用いた水中基礎工法が採用された。鋼製締切枠は、仮締め切り、施工栈台、フーチング型枠を兼ねた仮設構造物であるが、この施工法の特徴は、締切枠底版とスタンドパイプ（杭施工用鋼管）の止水であり、特殊な止水ゴムパッキングを用いた構造としている。

(5) 圧入式オープンケーソン基礎

この工法は、地中に設置したアンカーの引き抜き抵抗力を利用して、油圧ジャッキによりオープンケーソンを圧入するものであるが、周辺地盤を乱さない基礎であり、近接施工の際に採用される事例が多い。本基礎は、湾岸線及び都市内の入出路新設工事等において、多数採用されている。

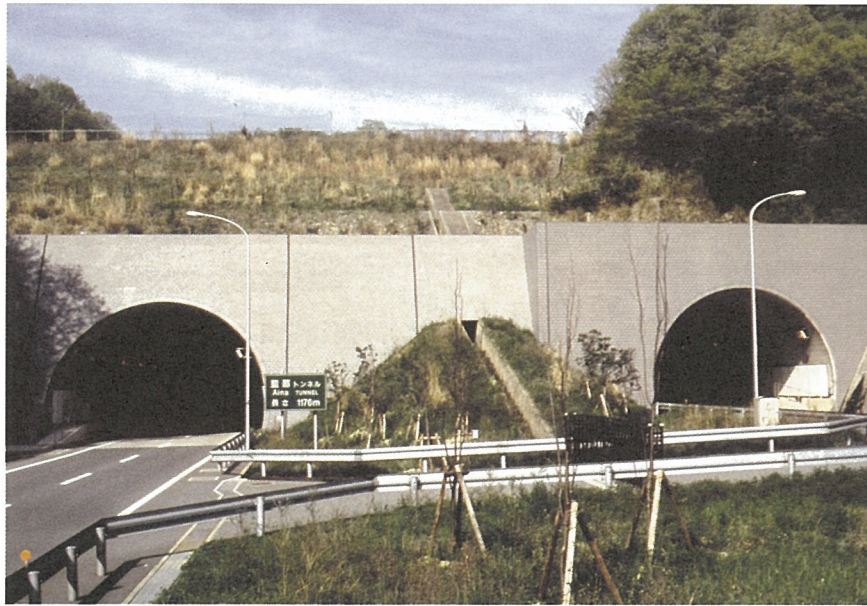
2-4 トンネル構造

新しい住宅地として開発が進む神戸市丘陵部を通過する北神戸線や山手線ではその地形上の理由から主として山岳トンネルが採用されている。一方、都市部においても土地の立体的な活用や環境を考慮して地下化が進められている路線があり、大規模な掘削による開削トンネルが用いられている。また、市街地等で沈下などの変位が問題になる場合は都市NATMや条件によってはシールドトンネルも用いられるようになっている。このように地山の岩質のみならず環境条件も多種にわたるため、様々な工法や技術的工夫がなされている。

(1) 山岳トンネル

阪神高速道路公団で最初に本格的な山岳トンネルが施工されたのは、北神戸線の藍那トンネルである。北神戸線は六甲山の北側を縦走して神戸市の東西を結ぶ高速道路であり、山岳丘陵地域を通過するため、自然環境や地形との調和を図りつつ道路線形確保のため幾つかの本格的なトンネルが計画され、施工されている。

山岳トンネルの施工法としては、従来は、導坑先進工法、半断面工法または全断面工法が多く採用されていたが、1980年代に入ると、これらの工法に代ってNATMによるトンネル施工が各地で導入された。阪神高速道路の山岳トンネル施工においても、最初の藍那トンネルにおいては、軟弱な偏圧地形と地盤支持力不足に適応させるため、底設導坑先進上部半断面工法を主に一部坑口付近では側面導坑が採用された。NATM工法については、長坂山トンネルで初めて採用され、その後の太山寺トンネル、妙法寺トンネルなどにおいてもNATMで施工されている。また、白川ジャンクションと白川出入路を南北に結ぶ北須磨トンネルでは、延長約1kmのめがね型トンネルで、上下線の中央壁を共有させ用地幅を最小にする工夫をしているほか、地山データを用いた特性曲線法などの活用により合理的な支保工選定を試みた。（写真-7）



写真－7 藍那トンネル（山岳トンネル）

（2）都市トンネル

近年、大都市における都市高速道路は、地下構造とすることが多くなっており、地下空間の積極的利用、および用地の有効利用のため、限られた用地内で既施設に近接して地中深く構築される傾向にある。開削工法は、地表面を掘り下げ、掘削坑の中にトンネルを構築した後、トンネルの上部や側部を土砂で埋め戻す工法であり、土留めを用いて掘削範囲を最小限にし、さらに覆工を行って地表面を開放する覆工式開削工法が用いられることが多い。

神戸山手線においては、ほとんどが住宅地や山岳部を通過するので大半がトンネル構造となるが、住宅地や地下鉄に近接する区間も多く、機械掘削工法を採用するなど地域環境への配慮もなされている。特に、高取山～長田区間は高取山トンネル、長田トンネル、開削トンネルと連続しており、総延長4.5kmの長大トンネルとなる。長田トンネルにおいては、都市NATMから開削トンネルに移行し、一部区間では神戸高速鉄道と一体構造となるため同時施工を行っている。また、道路を挟んで体育館が近接する箇所もあり、掘削規模も幅45m、深さ12m～27mと大規模になるため施工にあたっては各種変状観測による情報化施工を実施している。

阪神高速道路の開削トンネルとしては、神戸山手線長田地区において、一部ランプを含む二層式カルバートボックス構造の開削トンネルが採用されたのが最初であり、その後、伊丹トンネル、神戸山手線の湊川地区、淀川左岸線において、開削トンネルの施工が進められている。さらに、新十条通トンネルは、京都市伏見区と山科区を結ぶ約2.5kmのトンネルで、地盤条件等から開削、シールド、山岳の各トンネルから成るが、約850mのシールドトンネル区間についてはコスト縮減の観点から二次覆工を省略して耐火被覆材で対応するとともに、道路トンネルで初めて立坑を使わずにシールドマシンのトンネル内でUターンさせ、効率的な運用を図るなどの工夫をしている。また、山科側のトンネル坑口付近の明り巻部においては、工期や作業性に優れたプレキャストアーチカルバート構造とし、水平荷重に比較的強いモジュラー工法を採用した。（写真－8）

2-5 ジャンクション、パーキングエリア

湾岸線と舞洲地区および淀川左岸線との接点となる北港ジャンクションでは、都市内の限られた面積の中で4層からなる立体ラーメン構造を採用して、全方向への立体交差を可能とした。このため高さが



写真－8 新十条通トンネル（シールドマシーン転回部）

40mにもなり、架設方法も複雑で各層と桁を順番に重ねるように工夫しながら施工した。

安全で快適な走行のためにパーキングエリアを計画的に配置しているが、都市内パーキングエリアとしてユニークなものが多い。中でも中島パーキングは我が国で最初の海上パーキングであり鋼管矢板基礎及び多柱式基礎を用いることにより、海上部に幅115mもの広い空間を確保した。また、走行車両による振動の影響を防ぐため本線とパーキングエリアの桁を分離するなどの工夫もしており、神崎川橋と中島橋の2つのバスケットハンドル型ニールセンローゼ橋に挟まれたこのパーキングは、大阪湾と淡路島が眺望できる名所の1つとなっている。（写真－9）



写真－9 中島パーキング

2-6 震災復旧

平成7年1月17日午前5時46分に発生した兵庫県南部地震は、兵庫県淡路島北部を震源とする、マグニチュード7.3の内陸直下型地震で、それまでに想定されていた地震レベルをはるかに上回る規模の地震であったため、神戸市をはじめ、広い範囲に大規模な被害をもたらした。阪神高速道路においても、全路線にわたって被災し、震源に近い地域を貫く3号神戸線で一部区間が壊滅的被害を受けたほか、5号湾岸線の1箇所を含めて5箇所で落橋するなど、大きな被害を受けた。阪神高速道路公団では、地震発生直後より全力で復旧にあたり、平成8年9月30日に、当初の予定を大幅に短縮して、全線復旧を果たした。

復旧にあたっては、「兵庫県南部地震により被災した道路橋の復旧に係る仕様」に基づくとともに、公団内部に設けた委員会において、復旧工事の設計・施工法等を検討し、復旧工事を実施した。また、3号神戸線の復旧にあたっては、安全かつ効率的な、種々の最新技術及び新工法を、設計・施工の両面から積極的に採用するとともに、全工程にわたり可能な限りの工夫を重ね、工期の短縮を図ると同時に、国道および高架下の安全面、周辺環境へも十分な配慮を施した。

早期復旧の実現のため、被災した構造物の撤去においては、橋桁上に設置したクレーンを使いジョイント部の隙間を利用して切断した梁や柱を吊り下げて撤去するテルファー工法やパワーリフトを用いて切断した橋脚や梁をブロックごと撤去したり、自走台車を用いて大きなブロックのまま運び出すなどの工法により現場作業性を改善して工期を短縮させるとともに安全性の向上も図った。

また、橋脚の再構築においても、鉄筋コンクリート柱と鋼製梁の複合構造を採用することにより軽量化と現場での施工時間の短縮化を図るとともに、桁を可能な限り連結化し免震支承を採用することで耐震性を向上させた。特に、弁天地区においては、延長686mの区間を連続して再構築したが、この区間は国道2号線上に位置し平面街路からの制約も多く既存の基礎を活用するため、19径間(565m)を桁と梁を一体化した鋼床版立体ラーメン形式の橋梁とした。鋼製橋脚の下端に免震支承を設けて、耐震性を向上させるとともに基礎に作用する外力を軽減させるなど、道路橋では世界初の特異な構造となっている。このように様々な工夫と新技術の導入により、早期復旧だけでなく地震に対してより強くより安全な高速道路へと再構築した。(写真-10)



写真-10 弁天高架橋

2-7 交通管制

阪神高速道路公団においては、円滑な交通流を維持して道路機能を最大限に発揮させるとともに、安全で快適な走行を確保することを目的として、昭和42年から交通管制に関する調査・研究を開始し、昭和44年には世界に先駆けて交通管制システムを導入した。その後も、路線延長の増大と交通技術の開発に伴い整備拡張を続け、平成2年に現在の交通管制システムを稼働させた。現在のシステムは、日本で初めて所要時間を提供するなど画期的なシステムとして、平成4年には土木学会技術賞を、平成6年には交通管制の理念と実践およびその効果の定量的評価に対して、米国経営工学会およびOR学会共催からフランツ・イーデルマン賞を受賞するなど、国内外から高い評価を受けている。ネットワークが形成され交通量が増加した現在では、交通管制システムは都市高速道路の機能の一部として必要不可欠なものとなっており、利用者への情報提供のみにとどまらず、最新のITS(高度道路交通システム)技術を駆使した交通安全支援や道路管理支援業務に加えて、道路交通環境の改善等への応用も検討している。なお、阪神高速道路では1974年から光ファイバーケーブルを用いた光通信方式を採用して、光ネットワークシステムを構築している。このシステムにより、信頼性の高い多量の情報の伝達が可能になり、従来のデータ情報だけでなく、音声・文字・映像等のマルチメディア伝送が可能になった。(写真-11)



写真-11 朝潮橋交通管制センター

3. 現在開発中の新技術

新技術は適用効果の観点から分類すると、合理的な設計や新技術の導入によるコスト縮減、環境対策や建設副産物のリサイクルによる環境負荷の低減、耐震補強等による安全性の向上、材料や構造の改善による耐久性の向上、ITS等を活用した快適性の向上などに大きく分けられる。阪神高速道路公団において現在開発中の新技術の代表的な例について、分野別に幾つか紹介する。

3-1 設計における新技術の導入

現在、LCC(ライフサイクルコスト)を考慮した建設コスト縮減を目標に、合理的な設計・施工、耐久性向上、安全性の向上等を目指して、新技術の導入が積極的に行われている。以下にその主なものを示す。

(1) 鋼橋等の合理化構造

近年、鋼橋は建設コスト縮減と耐久性向上の観点から設計・施工の合理化が求められており、直線橋や曲率の小さい曲線橋においては、少数主桁橋、開断面合成箱桁橋等の合理化構造が積極的に採用されている。省力化桁の採用により工事コストの低減、工期の短縮が期待され、阪神高速道路においても、現在施工中の神戸山手線及び北神戸線東進部において、少数主桁橋及び開断面合成箱桁橋を試験的に採用し、設計・施工等についての検討を実施している。また、工事費縮減の観点から、P C鋼材と鉄筋により補強されたコンクリート構造であるP R C構造が採用されるようになってきているが、このような構造形式の特性を活用した合理的な設計法についても、ひび割れ制御方法や部材照査などの課題を整理しながら基準化を進めている。

(2) 機能分離型支承

近年、支承に関してはゴム支承を用いることが多いが、常時の鉛直荷重と地震時の水平荷重を1つの支承で支持しようとした場合、支承の規模が大きくなり、橋脚寸法もしくは桁下空間に制約のある場合、支承の設計が困難となる場合がある。これらの問題を解決するために、常時と地震時の機能を分離した機能分離型支承が採用される例が増えているが、阪神高速道路においても、東大阪線の上部工耐震補強工事において、機能分離型支承を採用するとともに、現在施工中の油小路線の高架橋に対しても設計上有利な機能分離型支承の適用拡大を検討の上、実施中である。

(3) 鋼製橋脚基部の合理化構造

鋼製橋脚基部には、従来、応力伝達を確実にする目的で、強度、剛性確保のためにリブが格子状に配置されている。一方、耐震性、衝突荷重に対する余裕あるいは維持管理上の観点から、橋脚基部には、中詰めコンクリートが施工されるのが原則であるが、橋脚基部の設計にあたっては、この中詰めコンクリートを無視してリブを設計している。この中詰めコンクリートを設計に考慮することで、リブを省略しても橋脚基部での応力伝達に支障がない可能性が高いことから、F E M解析等を用いた検討を実施し、リブを省略できる設計とした。

また、アンカーボルトの定着については、従来は梁構造のアンカービームにより力を伝達していたが、種々の実験や解析により、アンカービームのアンカーボルトの周辺部だけが有効に作用していることが認識されてきた。そこで、アンカービーム構造を省略し支圧板のみで応力を伝達するプレート板構造を提案した。設計法を確立するために、3次元F E M解析による検討を実施するとともに、実際の応力伝達状態確認のための模型実験を計画中である。

(4) 開削トンネル土留め壁一体構造

開削工法で矩形ボックスのトンネルを施工する場合、山留壁としては工費が安く、短い工期で施工可能なソイルセメント柱列壁が多く採用されている。このソイルセメント柱列壁の鋼材を開削トンネルの鉄筋コンクリート側壁と合成構造とすることで、仮設材として用いられている土留壁の鋼材を有効に利用することができ、同時に開削の施工幅、掘削土量、鉄筋コンクリート量を削減することができるものと期待される。

阪神高速道路公団では淀川左岸線の開削トンネル区間を対象に同構造の適用について検討し、同構造の試設計、確認実験、山留め壁の芯材の立て込み試験、接合部の強度試験等を実施し、設計法の確立を図るとともに、特に用地が狭隘な一部区間での採用に向けて検討を実施している。

(5) 土留め壁を活用した液状化対策

淀川左岸線および大和川線においては、掘削深の浅い開削トンネルが計画されているが、掘削底面地盤に緩い砂層が存在する場合があります。この場合液状化による浮き上がりが問題になる。対策工法として

は、従来地盤改良などの処置がとられてきたが、存置した土留め壁を非液状化層にとどめることにより開削トンネル底部の土砂を閉塞させ、液状化した場合の土砂のトンネル底部への流動・進入を阻止することによって、浮き上がり量を限定したものととどめるという工法を検討している。検討にあたっては実構造物をモデル化したFEM解析のみでなく、遠心力載荷実験により対策工の有効性を確認して簡易設計手法を提案する予定であるが、工費の面からも地盤改良に比べて大きな縮減ができるものと期待される。

(6) 長大橋梁の耐震補強

阪神高速道路公団では、一般橋梁の耐震補強に加えて長大橋梁の耐震補強に取り組んでおり、港大橋の耐震補強工事を進めている。港大橋の耐震性向上策としては、トラス構造のため主構部材によるじん性が確保できないため、機能分離型支承を用いた床組免震により地震力を低減させる方法を基本にして、二次部材のダンパーブレース化やストラット追加など複数の方法で対応する予定である。耐震補強における設計用入力地震動としては、現地特性を反映させ上町断層系により生じる地震動を用いることにしているが、入力地震動の設定においては3次元ハイブリッド解析を行い、さらにケーソンを考慮した有効入力動を用いている。また、機能分離型支承の適用に当たっては、支承の反力変動や摩擦係数のばらつきが問題となるため、モデル実験と解析により信頼性を確認することになっている。なお、断層のほぼ把握できる京都地域においても同様に現地での地震動を反映させた地震動を作成して設計に反映させるなど安全性の向上に努めている。

(7) LCC（ライフサイクルコスト）を考慮した防食方法

将来の維持管理の低減をめざして、耐候性鋼材の使用を進めているが、環境条件のより厳しい条件においても使用可能な耐候性鋼材が開発されつつあることから、湾岸域においても無塗装仕様が適用できるか検討中のところである。また、桁端部などの腐食環境においては防食金属溶射などの重防食塗装を部分的に適用して、桁全体の耐久性を向上させる検討も試験施工を含めて実施中であり、材料の面からLCCの低減を目指している。

3-2 環境負荷の低減

現在、全国的に注目されているのが窒素酸化物等の分解機能を有する光触媒塗料の道路構造物への適用である。阪神高速道路公団においても高速道路沿道の大気汚染対策を更に推進するため、「光触媒塗料による大気浄化」について調査・検討を行っており、平成10～12年度に3号神戸線、11号池田線、平成13年度に17号西大阪線において、常温乾燥型光触媒塗料の現地試験施工を実施したほか、平成11年度には現地暴露した試験片により浄化性能等について調査・検討を行っている。調査の結果、浄化性能としてはある程度の効果はあるものの、劣化性能、費用対効果等に課題が残っており、平成14年度以降についても実用化に向けて調査・検討を行う予定である。

一方、道路騒音に対しては騒音低減効果のある高機能舗装の適用により、自動車騒音の低減を図るとともに、排水性の向上により走行性、視認性を向上させている。また、必要に応じて改良型吸音板によりさらなる騒音低減を図っているほか、維持管理上からも桁のノージョイント化を進めており、ジョイント音の発生をできるだけ少なくするよう工夫している。

3-3 快適性の向上（交通管制技術）

阪神高速道路においては、高速道路モニター制度やユーザーズフォーラムさらに最近ではインターネットを活用したユーザーズネットワーククラブなどから広く意見を取り入れて、利用者のニーズに対応すべく

努力しているところであるが、正確で迅速な情報提供とさらにはきめ細かな情報サービスが求められている。このような利用者のニーズにできるだけ対応するために、交通管制システムにおける技術的な課題を克服しながら提供情報の多様化・高度化を進めている。現在、中央処理装置を更新中(平成14年度末に稼働予定)であり、迅速で正確な交通情報の提供のみならず、利用者のニーズに合わせた情報提供手段の多様化や情報提供内容の高度化に対応可能になるものと期待される。

新しい技術として、ハード面では画像センサーを用いた情報収集装置を、ソフト面では動的予測情報の提供などの検討を進めている。画像処理技術については、安全走行支援としての突発事象検出システムを既に実用化しているが、事故等の交通障害の検知精度を今以上に向上させ、高速道路上での危険予防・回避のための適切な情報を提供することにより、トンネル内や事故多発地点での安全性を向上させる検討を進めている。動的予測情報の提供は、時々刻々変化する交通流をもとに交通シミュレーションを用いて予測情報を提供するものであり、出発時刻の調整や経路選択に利用して渋滞を回避することにより、道路網全体の交通処理能力を向上させることができる。

4. 今後の展望

今後の建設技術の動向については、今後のネットワーク整備にも関連するが、新しい構造形式に関するもの、設計・施工に関連した新技術の導入、環境に関する技術、耐久性向上やLCCに関するものなどが必要になると予測される。阪神高速道路について言えば、近年道路環境に対する配慮や過密都市での土地の高度利用等から、都市部の構造形式については地下トンネル構造が主流になっているが、長大橋梁を含む湾岸線9期も計画されており、様々なタイプの構造物に対してライフサイクル全般にわたるコスト縮減、アセットマネジメント手法の必要性が問われている。このような状況の中で、平成14年3月に改訂された道路橋示方書においても、性能規定による設計が取り入れられ自由度の高い合理的な設計が可能になり、またライフサイクルコストでの評価などの新たな試みも求められている。今後の建設技術の展望を主な項目について述べると以下ようになる。

(1) 性能設計の導入

平成14年3月に改訂された道路橋示方書においても、性能規定による設計が取り入れられ自由度の高い合理的な設計が可能になった。性能をどのようにして適正に評価・確認するかなどに課題は残るが、例えば湾岸線の海上基礎構造においてジャケットタイプの基礎を導入して、従来必要とされたフーチング・脚柱をなくし基礎を簡略化することにより、大幅なコスト縮減につなげることなどが考えられる。上部工においても、走行性の改善や維持管理の低減、耐震性の向上といった観点から、多径間連続桁が用いられる傾向にあるが、適切な機能を組み合わせることにより必要な性能を満たせば、超多径間連続桁の実現も可能となる。また、舗装マネジメントにおいては、既にライフサイクルコストを算定して比較する最適設計の導入や完成時と性能保持期間終了後の性能を規定・評価する性能規定工事の試みもなされつつあり、本体構造においても今後このような試みがなされていくものと考えられる。

また、PC橋梁の分野においても、高強度コンクリートの使用により支間長を長くし桁高を低く抑えることができると同時に耐久性も向上し、より経済的な構造物を作ることができることから、このような高強度コンクリートを適用する試みにも取り組んでいる。今後さらに強度のみでなく耐久性や軽量化など必要とする要求性能を満たすハイパフォーマンスコンクリートを開発することにより、コンクリート構造物の自由度を高め、より合理的で美しい構造物の設計が可能になるものと期待される。また、このような材料の進歩に加えて、PC橋梁の省力化・低コスト化を目的としたプレキャスト部材を用いた

新形式橋梁の適用検討も行っており、設計・施工を含めてより合理的な構造物を目指している。

(2) 技術開発の推進

現在、大断面トンネルの掘削にトンネルボーリングマシンを活用して、工事コスト低減を図っているが、同じように建設工事に効率的な大型システム機械を開発導入することにより省力化だけでなく、より安全で正確な工事が期待できる。またこういったハード面に加えて、情報化施工を推進することにより、建設の施工段階で扱う情報を設計から維持管理に至るまでの全プロセスで活用して、全体的な生産プロセスを合理化する技術も促進されつつある。このような建設施工分野のIT化により、コスト縮減や工期短縮だけでなく、安全性の向上や情報技術に関する新たなアプリケーションの開発など多くのメリットが生じてくる。

都市再生プロジェクト構想からも地下空間の更なる活用が求められており、「大深度法」の制定により一定条件下での地下空間の利用が可能になることから、大都市圏での大深度地下空間の有効活用も注目されている。未知の分野であることから、地上とのアクセス方法、トンネル分岐部の構築技術、施設の維持管理、防災システムなどの技術面での課題も多いが、各課題の検討や大深度シールド工法などの地下トンネル構築技術の検討などもなされつつある。

また、海上部の橋梁形式の一つとして、近年浮体橋が注目されており、土木学会においても「浮体橋の設計指針(案)」を作成している。波浪や航路確保の問題はあるが死荷重や地震荷重が低減できることから、条件さえ満たせば経済的な橋梁として今後適用できるものと期待できる。

(3) 耐久性の向上

平成14年3月に改訂された道路橋示方書においては、設計耐用期間を百年程度に設定して、耐久性の検討を行う条項が盛り込まれており、百年先にも周囲環境にマッチしながら健全に機能する耐久性の高い構造物にしていく努力が必要となる。このように耐久性の向上を図ることにより、長期間にわたり安全な構造物を提供できるとともに、耐用年数を伸ばし維持管理費を低減してライフサイクルを通じたコスト縮減を図ることができる。このように耐久性の向上はLCCと密接に関連しており、性能規定で設計することにより、高品質を確保しつつコスト縮減を図ることが可能となる。耐久性の向上については既に様々な技術的検討がなされているが、材料面からの劣化防止に加えて、設計・構造面からの疲労強度の向上が今後の課題になるものと考えられる。

(4) 環境対策

阪神高速道路公団をはじめとした道路管理者は、従来から道路交通環境の改善に関する各種の対策を実施してきたが、今後とも環境に対するより一層の配慮が求められる。その中でも、対策が遅れている大気汚染については、重要かつ緊急の課題になるものと思われる。大気汚染については、本来、その排出源である自動車エンジンの改良が基本であり、今後の技術革新により低公害車が急速に普及するものと期待されるが、道路サイドとしても、汚染物質の排出量を極力抑えることが環境面からも必要となる。局地汚染対策として、土壌中のバクテリアや吸着剤などを利用してNO_xを分解する技術を開発中であり、また健康被害との因果関係が指摘されているSPMについても、新しく開発された電気的な除塵装置を試験的に導入し、その効果を検証中であり、これについても実用化が期待されている。

また、大型消費型社会から環境循環型社会へ世の中が大きく変化しつつあり、環境負荷の軽減といった観点からも建設副産物のリサイクルのさらなる推進を進めゼロエミッションを目指したいところである。

(5) 交通管制技術

国家プロジェクトとして推進されているITS(高度道路交通システム)の活用を進めており、安全

性、快適性や利便性を向上させるとともに、交通流を積極的に制御することで環境改善を図ることができるものと期待される。

阪神高速道路公団では次世代の情報収集手段として、最近注目されつつある画像センサーなどの新技術の開発にも取り組んでいる。現段階では、画像処理により交通量、速度について概ね把握が可能であり、今後はデータの処理と提供のための検討が必要となる。

高速道路を利用する前の情報については、自動電話案内やFAX情報あるいはインターネットなどで既に提供中であるが、今後はITSの技術を活用して、適切な情報提供手段により利用者のニーズに応じた最適情報を提供することにより、利用者サービスを向上させるとともに、利用者の自主的選択により高速道路の有効利用をさらに推進できるものと期待される。また、利用者に交通情報を提供するだけでなく、交通流シミュレーションを活用した交通管制により積極的に最適交通を誘導して高速道路網全体の交通処理能力を向上させる技術も考えられる。

このように、ITSの技術を活用して高速道路を活性化を図り渋滞を解消することにより環境負荷を低減させ、環境に優しい高速道路を目指しつつある。

5. おわりに

今後の高速道路は、社会資本として時代が変わっても末永く利用できる耐久性のある道路であるとともに、時代の変化に対応する道路という2つの側面が要求される。言い換えれば、単に道路としての機能を有するのみでなく、道路利用者のニーズに合ったより快適で安全な道路、環境に優しい道路の提供が望まれると言える。道路を造る立場からは、道路規格を満たす便利で安全な高速道路に加えて、高付加価値を有する道路を適切なコストで建設していく必要があるとも言え、このためにも今後とも高速道路の建設技術をさらに向上させて対応していく必要がある。

阪神高速道路に照らし合わせて見れば、まだネットワークが十分とは言えず、関西都市圏の混雑緩和と道路利用者の利便向上のため、今後も淀川左岸線、大和川線、湾岸線8、9期を整備していく計画であり、京都地区においても新十条通、油小路線で工事を進めているところである。今後の阪神高速道路建設においても建設技術の向上により、高品質を確保しながらなお一層の経費縮減を進めるとともに、地域に根ざした道路作りに努めたい。