




第12回

写真提供：阪神高速道路(株)


阪神・淡路大震災 阪神高速復旧の軌跡 ～未曾有の被災経験、 その後に繋がる様々な教訓～

1. 阪神高速道路の概要と
阪神・淡路大震災での被災概要
2. 阪神高速の復旧に向けて
3. 復旧に向けた技術的アプローチ
4. 基礎の被災メカニズムの究明
5. 震災で学んだ教訓と将来に向けて


講演者略歴




幸 和範
阪神高速道路(株)
代表取締役社長




関本 宏
阪神高速道路(株)
取締役兼常務執行役員



出口 正義
元阪神高速道路公団
神戸線復旧建設部長



上平 悟
エム・エムブリッジ(株)
執行役員生産・技術部長



中平 明憲
(株)建設技術研究所
大阪本社顧問

1995年1月17日に発生した阪神・淡路大震災では、いわゆる戦後最大級の都市直下型地震により阪神高速道路は甚大な被害を受けた。高速道路の被災状況から「安全神話」の崩壊とも言われ、我が国の防災対策、耐震対策の大きなターニングポイントとなった震災であった。震災発生直後の状況から、復旧工事への道筋づくりに向け手探りでこれらの業務に携わった関係者による振り返りと、構造物の被災メカニズムの解明に向けた技術的アプローチやその後の基準見直しの礎にもなった技術的知見、そして震災後の様々な活動を通じ、震災で学んだ教訓と今後に向けてなすべきことについて記録する。

1. 阪神高速道路の概要と阪神・淡路大震災での被災概要

－阪神高速道路(株) 関本宏取締役兼常務執行役員より阪神高速道路の概要、及び阪神・淡路大震災での被災概況について紹介－

阪神高速道路は約72万台/日が通行する阪神都市圏における交通の大動脈であり、2019(令和元)年8月時点で供用延長は250.4km、建設路線の延長は34.2kmとなっている。

1970(昭和45)年の大阪万博の開催に向け、大阪都心部における環状線を整備、さらに環状線を起点とする放射路線を整備し、阪神・淡路大震災発生前年の1994(平成6)年には、関西国際空港開港に向け整備した湾岸線の開通により供用延長は約200kmに達していた。

大阪－神戸の阪神間は海と山に挟まれた細長い地域に都市機能が集中しており、阪神高速3号神戸線、5号湾岸線に加え、国道2号、国道43号といった幹線道路も並行している。また、現在、3号神戸線の交通量は多い断面で約9.3万台/日と、全国の都市高速道路の渋滞ランキングでワーストとなっている重交通路線である。

1995(平成7)年1月17日、午前5時46分に淡路島北部を震源とする直下型の兵庫県南部地震が発生。地震の規模はマグニチュード7.3、神戸海洋気象台では最大加速度818galが観測され、本震発生から約1カ月間、震度7の地域を震央と

したマグニチュード2以上の余震が頻発していた。阪神高速道路では、3号神戸線の兵庫県西宮市から神戸市までの約28km、5号湾岸線の同じく西宮市から神戸市の六甲アイランドまでの約10km区間が特に大きな被害を受けた。

阪神高速道路の主な被災状況としては、震災の象徴的映像にもなった3号神戸線のピルツ構造区間が倒壊。また、鉄筋コンクリート橋脚のせん断破壊や単純桁の落橋、さらにラーメン橋脚の中間橋脚が崩壊し橋梁が垂れ下がった状態になったものもあった。5号湾岸線では西宮浜と甲子園浜を跨ぐ西宮港大橋の側径間が落橋。六甲アイランド大橋では橋体が約3m横移動するとともに、支承周りに大きな損傷が発生するなどした。



図1 震度7地域の観測場所



写真1 ピルツ構造区間の倒壊の状況

地震発生後、3号神戸線では、半月後には倒壊したピルツ構造区間の瓦礫の撤去が完了し、段階的な部分開通を経て、地震発生から623日後、約1年8カ月の期間で全線開通した。一方、5号湾岸線は、ひと足早く地震発生年の秋に全線通行止めを解除した。

震災発生後大幅に減少した阪神間の交通量は、5号湾岸線の開通と3号神戸線の段階的開通によって順次回復していったが、3号神戸線の長期間にわたる通行止めを早期開通した5号湾岸線が補完する形でネットワークのリダンダンシー機能が発揮された。

2. 阪神高速の復旧に向けて

震災後に組織された神戸線復旧建設部長の立場で、被災した3号神戸線の復旧に尽力した元阪神高速道路公団の出口正義氏より、当時の緊迫した震災復旧での経験、及び復旧に向けた強い思いを紹介―

自身は震災発生後大阪の本社に真っ先に駆け付け、まずは被災地にある神戸管理部との連絡を確保することを急いだ。一般の電話回線が次第に通じなくなる状態下において、何とか通じた電話の受話器を手放さずに現地との連絡を継続した。

また、神戸の被災現場に向かうべく、午前10時頃に大阪を出発したものの、国道43号が大渋滞のため神戸に到着したのは午後4時頃になったように、極めて異例の交通状況であった。

震災直後から2次災害防止の工事を急ピッチで進め、支保工として使用できる鋼材を全力で集めるなど、橋桁や崩れかかった橋脚に対する支保工の設置を大至急で実施。震度4以下の余震が度々発生するなか、その都度支保工のボルトを締め直すなど緊張感のある対応を約3週間で終えた。

地震発生約2か月後の3月16日に、「平成8年末に復旧工事を完成させる」との記者発表がなされたが、自身の当時の想いとしては「とてもじゃないけどできないだろう」というのが実感であった。その後、1995（平成7）年4月に3号神戸線復旧建設部が発足し、約100人の陣容でスタートした。体制として十分でないと言えば切りがなかったが、他の地域での事業継続の必要性からも、それ以上多くの人間を割けないという現実もあった。そうした中、何としても決められたことをやり通すとの覚悟を部長自ら示すべく、「天命を知って人事を尽くせ」との言葉を所属部員に対して発信し意気込みを伝

えた。さらに、復旧後の新しい高速道路は、21世紀にふさわしい道路を目指していこうという意気込みで阪神高速道路の復旧に全力で取り組んだ。

約束した工程を何が何でも達成。この大命題に応えるためにクリアすべき課題は多岐にわたった。新たな耐震基準に基づく復旧、快適性の追求、そして最大限の環境保全対策の実施。折しも阪神高速道路、国道43号に対する道路環境裁判の最高裁判決が1995（平成7）年7月にあり、供用時の環境対策・騒音対策は当然ながら、復旧工事施工時における環境対策にも心を配った。

さらに工事契約後の詳細調査により、工事が当初の5割増になるなど、当初は完成までの工程をどんなに頑張っても引けないのが実情であったが、その後、工事会社の方々から様々な知恵や工夫を出して頂くなどした結果、大幅に工程短縮が可能となり何とか工期内に完了する目途がたつた。

そうした工程短縮に寄与した要因の一つに、積極的な新技術の採用があった。ワイヤーソーイング工法の採用



写真2 2次災害防止のための支保工設置状況



写真3 19径間連続ラーメン橋構造（弁天工区）

により被災した梁や桁を撤去する際、現地で大割に切断し、それを近傍の埋立地に運搬しそこで小割にすることで工程を短縮したのもその一つである。

さらに神戸市中央区弁天町付近では、全長565m、19径間連続の立体鋼ラーメン構造を採用。路下の道路条件が厳しく、増し杭や橋脚幅を広げることは物理的に不可能な状況であったため、橋脚の基部に免震支承を配置する構造の採用によりそうした課題を解決した。当時としては海外の鉄道橋で一基実績があった程度であり、そこからヒントを得た大胆な発想で適用を決断。これも大きな工期短縮につながった。

さらに複合橋脚（橋脚柱部：コンクリート構造、橋脚梁部分：鋼製構造）の採用。実橋への適用は難しいと多くの方々から忠告を受けたものの、工期短縮に大きく寄与する技術として見事に完成させることができた。

そうした新技術の活用のみならず、工事を順調に進めるためには沿道の方々に対する丁寧な対応も重要であった。沿道環境を専断的に担当する部署を設け、沿道の方々への徹底した説明を実施した。さらに、1回/月程度の頻度で「復旧ニュース」を発行し、時々の工事内容を地元の方や運輸関係を始めとするご利用団体の方々に広く配布するなど、復旧工事への理解を求めた。そうした様々な工夫・取り組みが、大幅な工期短縮につながったとされる。

知恵を絞り切ったはずの工程であったが、各方面からの強い要望によりさらなる工程短縮が求められることとなった。その実現のために、気象条件に恵まれることと、桁の架設時に路下の国道43号をそれまでの昼間2車線確保から昼間1車線通行に規制変更し工事敷を拡張させてもらうことを条件に取り組み、最終的には1996（平成8）年9月末に全線復旧の運びとなった。

工期短縮はその一言で片づけられるものではなく、約束した工期を守るため様々な人の知恵・努力があったからこそ実現したと考えている。

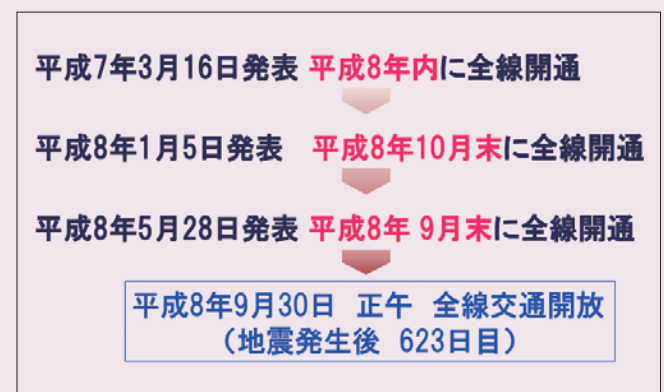


図2 全線開通目途の変遷

3. 復旧に向けた技術的アプローチ

～西宮港大橋の復旧～

―橋梁メーカーの立場として、5号湾岸線の西宮港大橋新設時の設計を担当し、震災発生後は当該橋梁の復旧と併せて3号神戸線ピルツ区間の再構築にも従事したエム・エムブリッジ（株）執行役員の上平悟氏より講演―

西宮港大橋は兵庫県西宮市の甲子園浜と西宮浜を結ぶ橋長252mのニールセンローゼ桁橋で、自身は全長604mの工区の5社JVの設計部会長として工事に参画。工事竣工は1994（平成6）年2月で開通後1年もたたないうちに兵庫県南部地震が発生した。

震災時の被災状況としては、甲子園浜側（大阪側）の橋脚が水路側に移動、これに伴い隣接高架橋が落橋し、さらに西宮浜側（神戸側）の北側の固定支承が真つ二つに壊れた。落橋原因としては若齢埋立地における地盤の側方流動であり設計値の約2.5倍という想定外の地震力が作用したことが原因と考えられ、震災後、設計基準の見直しの契機のひとつとなった。

3号神戸線の通行止めにより、5号湾岸線を緊急ルートとして使用する必要があったが、支承が半分に割れていたためまずは緊急で仮受けすることとなった。緊急対応として、1,200トンジャッキを6台大至急搬入し、とにかく敷鉄板を集めるだけ集めて仮受けして、1月26日には緊急車両を対象とした交通開放が可能となった。

本格復旧に向けた壊れた支承の撤去に際して大きな課題があった。橋脚が水路側に移動し、支承が完全に競っている状況であったため、橋脚が上部工を押し出しており、ジャッキアップすると大きな水平力がかかり支承が逆に吹き飛ばされるのではないかと懸念されたが、2月上旬の夜明け前、現地調査を行った結果、隙間を有することを確認、本復旧に向けた作業への着手が可能となった。

その後、破壊支承の破壊メカニズムの検討に向け支承破壊ロジックの推定を行った。冶金学的アプローチと破壊力学からのアプローチにより、どの程度ひずみが発生



写真4 西宮港大橋の隣接桁の落橋



写真5 西宮港大橋の支承破壊

すれば壊れるかということ弾塑性FEMによって破壊荷重を逆算し、この推定値と非線形応答解析による地震荷重を算出し両アプローチで行った計算結果がほぼ一致したことから、大凡7,000トン程度の力がかかったということが判明した。

なお、落橋した西宮港大橋の隣接桁は単純合成箱桁の3主桁で、撤去に際してはRC床版を撤去した後、フローティングクレーン（FC）で1主桁ずつ撤去。新設桁は当時施工中の本四公団様の多々羅大橋の材料を転用させて頂くなど、わずか2カ月で製作を完了し、3月18日夜間に4,100トン吊FCで一括架設を実施した。

その後、西宮港大橋の復旧作業はまだ続いていたが、引き続き3号神戸線のピルツ区間の復旧工事に従事。3カ月半で5,400トンの鋼桁を架設するなど極めて厳しい工程であったが、9月30日の3号神戸線全線開通に何とか間に合わせる事ができた。

様々な関係者の連携やチームワークの賜物と考えており、その重要性を痛感した。今後も大規模な地震が想定される状況下において、技術者は常日ごろからこういう不測の事態に即応できる心がけを持つことと、即応体制の準備が必要だと考えている。

4. 基礎の被災メカニズムの究明

～5号湾岸線の基礎構造物被害を対象に～

ー建設コンサルタントとして震災復旧の一端にかかわった経験について、(株)建設技術研究所の中平明憲氏より紹介ー

5号湾岸線は、震源から20～30kmに位置する大阪湾臨海部の若齢埋立地盤に建設されており基礎周辺地盤の変状が顕在化していた。これに対し、目に見えない地中内の基礎は大丈夫かという疑問に迅速かつ的確に答える必要があった。基礎と地盤の被災状況の調査に際し、対象となったのは杭基礎だけでも5,000本以上と膨大で、

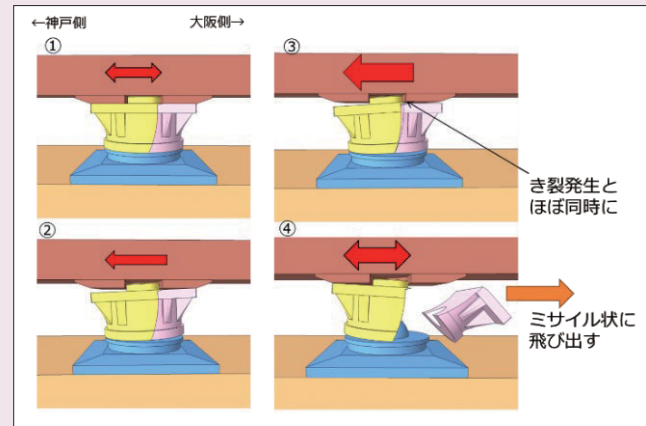


図3 支承の破壊ロジック



写真6 ピルツ区間の復旧状況

地中内深くの杭体内部の損傷有無の確認や断層活動による測量基準点の移動の影響が課題となる中、復旧を急ぐ上でも効率的な調査が求められた。そこで、ポアホールカメラ調査と衝撃弾性波による非破壊調査を相互補完するなど各種調査法を組合せることで、短期間で杭先端までの損傷の全貌が把握された。

また、GPS測量などから断層活動に伴う深層基盤の移動を補正して基礎及び周辺地盤の残留水平変位が求められた。いずれの残留水平変位も護岸からの距離で整理したところ、護岸から100m以上離れると急速に収束するということが明らかとなった。

このことは、その後の道示の改定で、護岸から100mの範囲では橋に影響を与える流動化の影響を考慮することが規定される根拠とされた。

これらの調査の結果、復旧対象となった基礎が4割、復旧不要と判断されたものが6割となり、護岸近傍の一部を除き、上部構造に比べて基礎の被害は比較的小さかったことが明らかとなった。

このことにより、多くの基礎の当初設計が適切になさ

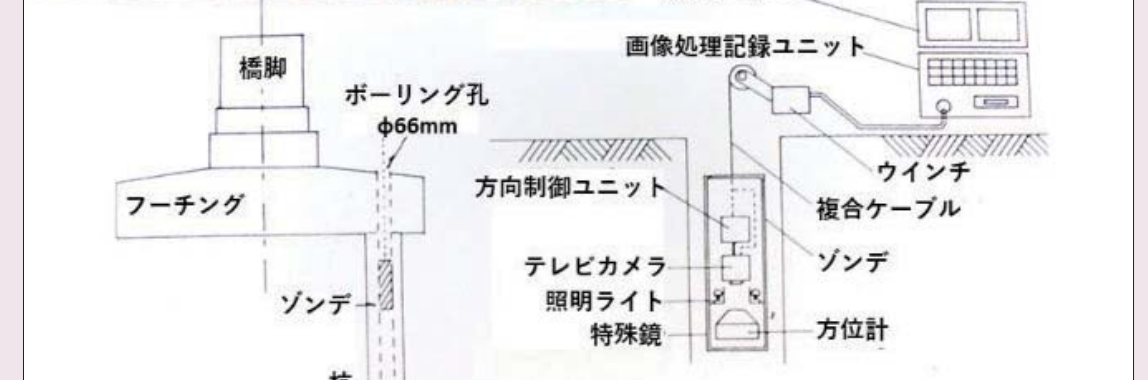


写真7 ポアホールカメラでの基礎杭調査状況

れ、安全余裕があったことが確認され、再利用可能性を含めた適切な復旧方針と迅速な復旧支援につながった。

さらに、液状化した地点の土は、その粒度分布から礫分を多く含んでおり、旧道示（H2年道示）の水平震度0.15で液状化対象となる土の範囲を大きく外れるものが多いことがわかり、大地震時には礫質土も液状化対象とすべきことが示唆された。その後の道示の改定では、この粒度分布がほぼ包含されるように見直された。

次に、南芦屋浜の橋梁基礎近傍に設置された挿入傾斜計により地震前後の地中内水平変位が計測された結果が世界的にも類例が無いこともあり、解析的に再現することを試みた。ステップ1「液状化解析」として動的有効応力解析で過剰間隙水圧比を算出し、ステップ2「側方流動解析」として過剰間隙水圧比に応じて剛性を低減させる静的自重解析で地盤変形を算出する方法により、実測値をほぼ再現できることを確認した。

同じ解析方法により、杭体や周辺地盤の被災状況が詳しく調査された新夙川橋の基礎の被災メカニズムについて検討した。杭の損傷の多くが液状化現象を含む初期の主要動時に発生し、その後、液状化に伴う側方流動による地盤変位が杭に強制的に作用することで杭の損傷度が進行し、結果的に杭に大きな残留変位が発生したということを解析的に確認した。この検証を踏まえ、地盤・構造物系の地震時挙動を扱う先駆的な解析法として、段落とし配筋を無くすことや地盤改良といった復旧・補強方

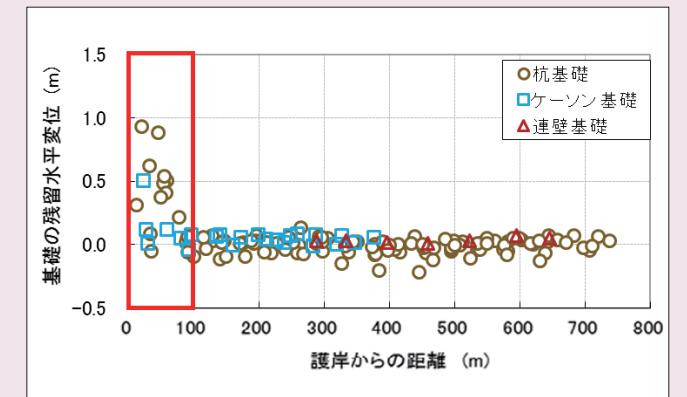


図4 護岸からの距離と基礎の残留水平変位

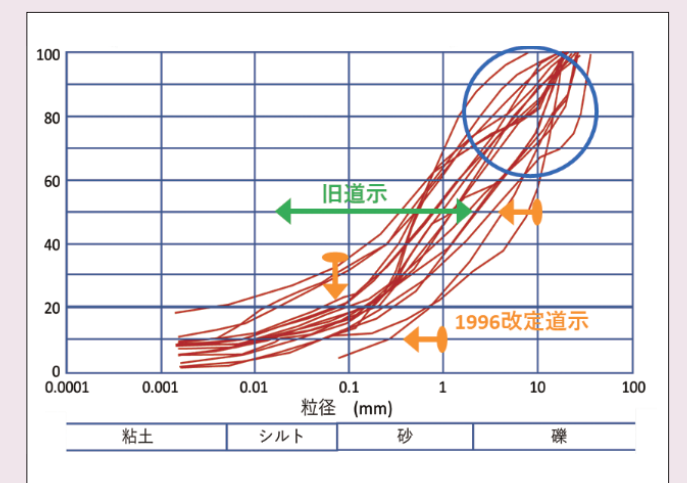


図5 湾岸線の液状化地点の粒度分布 (松尾2004に道示の範囲を加筆)

法の効果検証にも適用した。

なお、簡易な被災データベースを用いた統計的分析によっても損傷要因を把握したが、その後、開発初期のGPSを用いた「湾岸線基礎被災データベース」へ拡張され、道路管理へ活用された。

このように、阪神高速を中心に専門分野や会社の壁を越えたチームで多くの仲間と協力して、基礎と地盤の被災メカニズムの解明に取り組み、復旧の一端を担うことができた。建設コンサルタントとして、技術的な領域の広がり、人的ネットワークを拡大できたことも大きな財産となった。

5. 震災で学んだ教訓と将来に向けて

―神戸線復旧建設部において工事課長の立場で復旧工事に従事した、阪神高速道路(株)代表取締役社長の幸和範氏より講演―

約25年前の1995(平成7)年1月17日、インターネットや携帯電話も普及していない中、かつ、大混乱の中で状況の全貌がなかなか掴めないため、自ら現場を歩いてみようということで神戸に向かって歩いた。平時ではコンクリートに1mmのクラックがあれば大騒ぎになるが、それが10cm、20cmの単位になり、橋脚はせん断破壊を起こしたり座屈したりしている。何が起きているのか、という感じで何回か現場に足を運んだ。1週間ほど経過し、2次災害防止のための工事に参加。事実上不眠不休で橋桁、橋脚の倒壊防止や、橋脚の損傷部分の応急補修を実施し、震災から約3週間で完了させた。その後、復旧建設部の発足とともに出口部長の部隊に工事課長として参画。そうした初動時点から、被災地以外の関係機関から資機材や物資、人的支援を含め非常に多くの支援をいただいた。大混乱している中で、被災状況の調査や対応策の提案など、専門家集団からの連携した支援に勇気づけられた。建設・橋梁業界の底力というものそのときに実感し、こうした官民総合した力のすごさ、これが国力ではないかな、というのを思った記憶が残る。

震災発生までの耐震設計は関東大震災規模の地震に耐え得るから大丈夫だ、と自らも信じていた。しかも地震の静穏期であり、それが検証されることもあまりなかったのではと思う。

震災からの復旧では、震度法の時代から地震時の保有耐力法の時代へ変わっていく最初の適用例となった。一方、地震に関する研究は進んでいるものの、予知は依然として難しい状況であり、いつ地震が発生するかはわからない。ある意味出たところ勝負という側面が残されており、平時からいかに様々な課題に取り組んできたか、知

恵を出してきたかが試される。技術者としての全てを掛けた勝負がこうしたところで発揮されると考える。

震災からの学びとして、自然に対する「畏敬の念」の大切さ、そして「絶対」という言葉のおこがましさを痛感した。人知を超えた自然に対する畏れを持つべきであり、自然を征服したとか、絶対大丈夫とかといった考えはとんでもないことだと思う。震災で高速道路は何故壊れたのかと時々問われた際、想定の外力を超えたため、と当然の如く答えていた。しかしながら、東日本大震災の後、想定外ということで単純に片づけていいのかという議論が沸き起こり、土木学会、地盤工学会、日本都市計画学会の3学会の会長より「自然の脅威に畏れの念を持ち、ハードのみならずソフトも組み合わせた対応が重要である」との共同緊急声明が出された。技術者は社会通念上のあるべき姿というものを想定し、一定の想定のもとにインフラ整備をせざるを得ない。しかしながら、災害はその想定を超えることが必ずあり得る。それに対し、ソフトあるいは減災で対応していく必要があるということをこの緊急声明は意図しているのではと思う。技術の限界というものをしっかりと受け入れ、ソフト施策と併せた対応が必要であることを確認していくことが重要だと考えている。

自然の猛威に対し真正面から抵抗できるものではない、との震災での教訓を踏まえた対策の一例として、長大橋の代表格である港大橋の耐震補強がある。主要部材でない部材を計画的に損傷させる、それにより地震エネルギーを吸収させようという発想であり、地震から上手に逃げる、あるいはかしく負けるという考えにもとづく対策である。

震災発生時、地震直後には社員が直接現場に出向き被害状況を確認したが、全容を把握するのに相当の時間を要した。地震による構造物の損傷の程度や路面の段差などを事前に推測することができれば、初動活動やその後の復旧活動をより効率的に進めることができるのではないかとこの発想で、南海トラフ地震や大阪上町断層地震を対象にした構造物の被災度、交通への影響のシミュレーションなども進めている。将来的には緊急輸送計画や復旧計画などにも反映し、より充実したBCPになることも期待している。

また、震災以前から社会基盤の強靱化のためにもネットワークのリダンダンシー向上の必要性が指摘されていた。阪神・淡路大震災から約25年を経て、ミッシングリンク解消に向けた新規路線の建設事業がスタート。ネットワーク効果による渋滞緩和や環境負荷軽減に加え、災害時等におけるリダンダンシー向上にも資する取



図6 震災資料保管庫の概要

り組みが現在進行している。

さらに、震災での被災経験、復旧経験を次の世代に確実に継承していくための施設として、震災資料保管庫を整備した。当時、現場が非常に錯綜した状況の中、典型的な壊れ方をした被災構造物を選定し、保管・収納している。さまざまな貴重な記録が国内外で広く役立てられ、震災被害の軽減につながればという思いがある。実際に見て、聞いて、触って、そしてその場で様々な思いを巡らせる中で、いろんな気づきがあるのではないかと考えており、今後も安全・安心を見つめ続ける原点として活用していきたい。

阪神高速道路のネットワークが災害時にこそ「安全・安心な高速道路」であり続けられるよう、そうした思いも込め、震災で阪神高速道路に関連してお亡くなりになられた方々の慰霊の思いを刻んだ慰霊碑を建立している。毎年1月17日、震災の記念に役員をはじめ幹部が訪れ、震災を振り返り我々のなすべきことに思いを巡らせる場所でもある。

阪神・淡路大震災で被災した阪神高速道路を623日で復旧することができた。早期に復旧を終えることができたのは、復旧に携わった方々全員の熱く強い思い、責任



写真8 慰霊碑の建立

感の賜物であったと思う。阪神高速社員の6割以上が復旧経験を有していない状況となっており、こうした震災の経験や教訓をしっかりと次世代に引き継いでいく努力を今後とも続けていきたい。

< 図・写真の提供・出典 >

図1、2、6	阪神高速道路(株)
図3	エム・エムブリッジ(株)
図4、5	(株)建設技術研究所
写真1、2、3、4、7、8	阪神高速道路(株)
写真5、6	エム・エムブリッジ(株)