

# 広域道路ネットワークの地震被害シミュレーションによる 地震発生後の走行性評価に関する検討

(一財)阪神高速道路技術センター調査研究部調査研究第一課 服部 匡洋  
(一財)阪神高速道路技術センター調査研究部調査研究第一課 大石 秀雄  
阪神高速道路(株)技術部技術推進室 篠原 聖二

## 要 旨

本検討では、広域道路ネットワークの地震被害シミュレーションの実現に向けた検討として、阪神高速道路湾岸線の約 55km の区間を対象に、上町断層を震源域とする内陸直下型地震発生時と南海トラフを震源域とする海溝型地震発生時における地震応答解析を実施した。その結果、様々な震源域を想定した地震応答シミュレーションを実施することにより、損傷確率の高い区間を予測できる可能性を示した。また、支承の最大水平反力から伸縮継手部における段差量を算出し、この段差量から地震発生後の路線単位の走行性を評価できる可能性を示した。

**キーワード:** 高速道路ネットワーク、地震応答解析、危険度評価、走行性評価

## はじめに

阪神高速道路では、1995 年 1 月 17 日に発生した兵庫県南部地震により甚大な被害を受けて以降、橋梁の下部構造の耐震補強や上部構造の落橋防止対策等、構造物の被害を最小に留めるよう対策を行っている。また、災害時にも関西圏のライフラインとして機能することを目指した防災・減災対策にも積極的に取り組んでいる。その取り組みの 1 つとして、今後発生が予想される内陸直下型地震や南海トラフ地震のような様々な震源域を想定した広域道路ネットワークの地震応答シミュレーションに関する研究を進めている。これは、一般的な橋梁の設計に用いられる数径間程度の橋梁単位の地震応答解析ではなく、阪神高速道路全路線を対象とした広域

の地震応答シミュレーションを行うことで、地震による構造物の損傷程度を路線単位やランプ間の区間単位で評価するものである。シミュレーション上では、海溝型地震や内陸直下型地震の震源域の違い、震源域の断層のすべり量による地震規模の違い等、あらゆる条件を考慮した解析を行うことができる。このため、多数のシミュレーションを実施し、それらの結果から損傷の生じやすい路線及び区間を明らかにすることで、優先的に耐震補強工事を実施すべき路線・区間が明らかになると考えられる。また、地震直後に高速道路の路面上に生じうる段差量を評価することができれば、出入口・ジャンクション区間単位での緊急車両の通行可否を予測することができ、災害時の緊急輸送計画の立案にも役立つと考えられる。

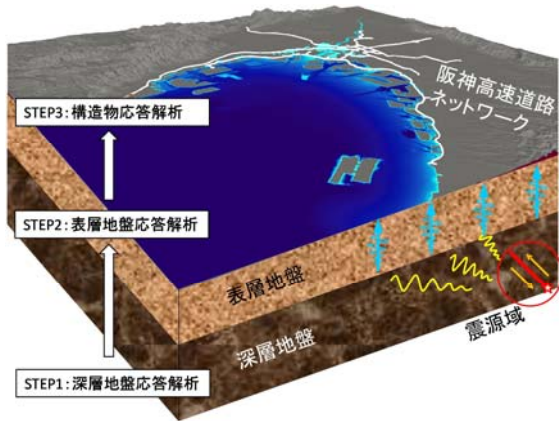


図-1 地震応答シミュレーションの方法

このような大規模な地震応答シミュレーションを行うためには、大規模な計算資源が必要となるが、近年、国立研究開発法人理化学研究所のスーパーコンピュータ「京」をはじめとする大規模計算機が国内の研究機関や大学に整備され、大規模な解析を容易に行うことができる環境が整いつつある。阪神高速道路では、2014年より「京」を用いた基礎研究として、仮想の延長20kmの連続高架橋を対象とした解析<sup>1)</sup>や1995年兵庫県南部地震で被害を受けた東神戸大橋の損傷過程の再現解析<sup>2)</sup>を実施し橋梁構造物の地震応答シミュレーションの実現に向けて取り組んできた。本稿では、広域道路ネットワークの地震被害シミュレーションの実務への実装に向けた検討の一例として、阪神高速道路湾岸線の約55kmの区間を対象に、上町断層及び南海トラフを震源域とする地震応答シミュレーションを行い、地震発生後の走行性評価の可能性について検討した事例について報告する。

## 1. 地震応答シミュレーションの方法

広域道路ネットワークの地震応答シミュレーションは、図-1に示すようにSTEP 1: 震源域から工学的基盤までの深層地盤応答解析、STEP 2: 工学的基盤から地表面までの表層地盤応答解析、STEP 3: 構造物の基礎から上部構造までの構造物応答解析の3段階で実施する。それぞれの地震応答解析において、順次、解析結果を受け渡すことにより、道路ネットワーク上の各構造物の応答や損傷を評価する。

各STEPにおける解析手法や解析モデルの構築

表-1 深層地盤応答解析の方法

フェーズ	モデル化方法	備考
F4	差分法・有限要素法 ・長周期成分・不整形地盤が考慮できる ・解析モデルが膨大 ・理論上は短周期成分も考慮できるが、現実的でない	目標
F3	ハイブリッド法(統計的グリーン関数+波数積分法) ・短周期成分の計算が容易な統計的グリーン関数法と、長周期成分が考慮できる波数積分法を合成させる	現状
F2	波数積分法(SeanSGM) ・長周期成分も考慮できる ・水平成層地盤を対象 ・理論上は短周期成分も考慮できるが、現実的でない	
F1	統計的グリーン関数法 ・短周期成分の計算が容易 ・長周期成分が考慮できない	

表-2 表層地盤応答解析の方法

フェーズ	モデル化方法	備考
F3	有限要素法(DACSAR, FLIP等) ・不整形な地盤構造も考慮できる ・解析モデルが膨大 ・3次元モデル	目標
F2	逐次非線形解析(YUSAYUSA等) ・大ひずみでも適用可能 (ただし、全応力解析では液化化は考慮できない) ・周波数特性の考慮が複雑 ・1次元モデル	現状
F1	等価線形解析(SHAKE等) ・周波数特性の考慮が容易 ・大ひずみ時には適用できない	

表-3 構造物モデルへの地震動の入力方法

フェーズ	解析方法	備考
F3	各基礎位置へ位相差を考慮した3方向(NS・EW・鉛直)波形を入力	現状=目標
F2	地域、路線、地盤種別ごとにグルーピングした波形を各基礎に入力	
F1	代表同一波形を一様に入力	

方法については複数の方法が考えられ、その方法毎に精度のレベルが異なる。ここでは、解析手法や解析モデルの構築方法の精度レベル一覧を示すとともに、現段階におけるレベル及び今後目標とするレベルを示す。

### 1-1 深層地盤応答解析

震源断層から工学的基盤までの深層地盤応答解析の方法を表-1に示す。現段階では、フェーズ3の短周期成分の計算が容易な統計的グリーン関数法と長周期成分が考慮できる剛性行列法(離散化波数積分法)を合成させたハイブリッド法<sup>3), 4), 5)</sup>により計算を行っている。ただし、これらの計算法は水平成層地盤を対象としているため、3次元的变化に富む地盤構造を考慮することはできない。今後は、地盤構造の3次元的变化を考慮できるフェーズ4の解析手法の研究開発を進める。

### 1-2 表層地盤応答解析

前述の深層地盤応答解析で得られた工学的基盤の地震波から、各橋脚位置の地表面の地震波を求めるための表層地震応答解析の方法を表-2に示す。現状では、フェーズ2の地震応答解析

プログラム YUSAYUSA<sup>6)</sup> を用いて 1 次元逐次非線形解析を行っている。今後は、3 次元モデルでの解析が可能なフェーズ 3 の解析手法の研究開発を進める。

### 1-3 構造物応答解析

表-3 に示すように前述の表層地盤応答解析で得られた地表面の水平 2 方向 (NS・EW)・鉛直 1 方向の計 3 方向の地震波を、各橋脚位置にそれぞれ位相差を考慮して入力する方法により、構造物応答解析を行う。減衰については、水平 2 方向と鉛直方向のモード寄与率のベクトル和を重み係数として、最小二乗法で決定するレイリー減衰モデル<sup>7),8)</sup>を適用する。

## 2. 解析モデルの構築方法

### 2-1 大規模解析モデル構築の方針

一般に、耐震解析で構築する橋梁単位のほり要素を用いた全体系解析モデルは、竣工図面や設計計算書、ボーリングデータ等の情報を元にして、解析モデルに必要な上下部構造の節点座標と剛性、支承条件、基礎-地盤系ばね、死荷重、質量といった入力データを作成する。しかし、阪神高速道路全路線の地震応答を一体として評価するために解析モデルを一般的な方法で構築していくことは、多大な時間と費用が必要になり現実的ではない。また、本研究における全路線を対象とした解析モデルは大規模であり、また既存の橋梁に対して現在までに行われてきた耐震補強や補修工事に加え、今後の維持管理に対する工事、路線延伸等の将来の構造的変化に対する解析モデル変更にも対応できる必要がある。そこで本研究では解析データ管理用データベースの「解析台帳」を作成し、今後の解析対象路線の拡大や解析モデル高精度化によるモデル入れ替え、進捗によって段階的になる解析モデルの煩雑なバージョン管理を一元的に管理できるよう構成した。解析台帳は、阪神高速地理空間情報システム (COSMOS)<sup>9)</sup>の既存のデジタルデータベースを活用して構造物の剛性や重量、支承条件等の情報を取得し、データ入力の効率化を図った。なお、COSMOS は、GIS を活用して阪神高速道路に関連するビッグデータを集約・統合し、災害対応活動の支援、道路構造物の効

率的な維持管理、道路交通管理の高度化など、幅広い分野における情報共有を行うためのシステムである。

また、広域道路ネットワークとして路線単位やランプ間の区間単位での損傷度を評価するためには、解析モデルの精度やシミュレーションの信頼性が求められる。これら課題を解決するため、本研究では阪神高速道路全路線を幾つかの区間に分け、それぞれの区間で段階的に解析モデルの精度向上を目指すものとした。本検討では、阪神高速道路湾岸線 (約 55km) を選定し、先行してモデル構築を行った。今後は湾岸線のモデル精度を高めるとともに、湾岸線以外の路線についても順次モデル構築を行う。

### 2-2 深層地盤モデル

本検討では、路線全体への影響が大きいと考えられる上町断層帯による内陸活断層型地震と南海トラフによる海溝型地震を対象地震とした。図-2 に対象とする上町断層の位置を、図-3 に対

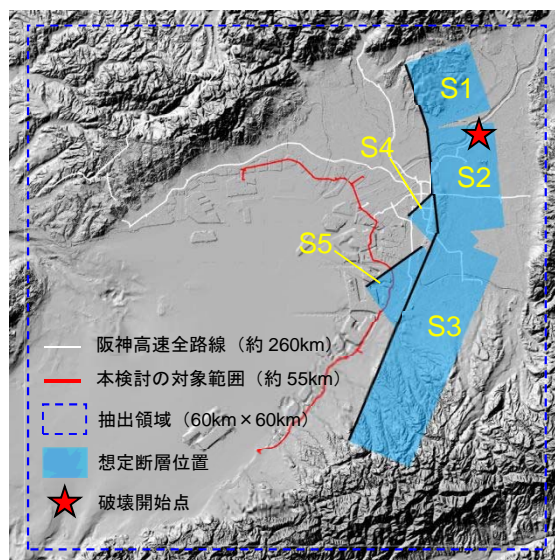


図-2 上町断層の位置

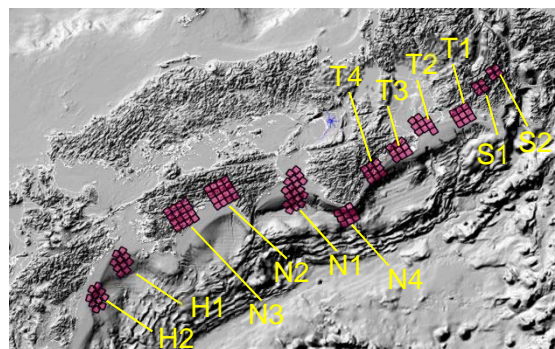


図-3 南海トラフ地震の震源域の分布

象とする南海トラフ地震の震源域の分布を示す。対象地震の震源域と震源断層パラメータは、上町断層帯は大阪府自然災害総合防災対策検討<sup>10)</sup>を、南海トラフ地震は内閣府 南海トラフの巨大地震モデル検討会の公表データ（陸側ケース<sup>11)</sup>）を基に設定した。なお、公開資料に示されていないパラメータについては、地震調査研究推進本部地震調査委員会(2016)が規定した「震源断層を特性した地震の強震度予測手法（「レシピ」）修正版」に準拠して決定した。また、地震基盤から工学的基盤までの深部情報は、2017 版の J-SHIS 情報を用いて、深部地盤モデルを構築している。解析領域は各 SMGA 破壊点を中心に、南海トラフは 500km×500km、上町断層帯は 400km×400km を 100m メッシュで設定した。

### 2-3 表層地盤モデル

表層地盤のモデル化にあたっては、関西圏地盤情報データベースのボーリングデータ<sup>12)</sup>に基づき地盤定数を設定した。また、基礎ばねの算出においても、表層地盤のモデル化同様、関西圏地盤情報データベースのボーリングデータから各橋脚のばね定数を算出する。ボーリングデータについては、必ずしも橋脚位置ごとに存在していない。既存のボーリングデータが存在しない橋脚位置の表層地盤のモデル化や基礎ばねの設定方法については、距離による重み付けにより地層境界を補間する「逆距離荷重法」、対象地点から最も近いボーリング情報の地層境界をそのまま用いて補間する「最近法」がある。既往の比較検討<sup>13)</sup>の結果をもとに、本検討では一定の精度が確保できる「最近法」を適用した。また、表層地盤の非線形特性は、関西圏地盤情

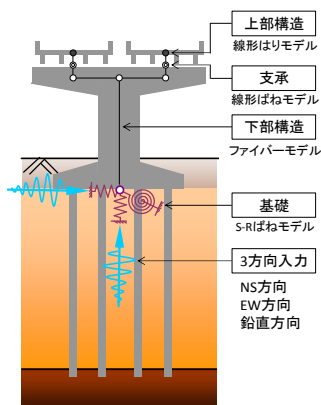


図-4 構造物モデルの構築方法

報データベースの三軸試験結果に基づき、沖積層 (As, Ac) と洪積層 (Ds, Dc) の 4 種類の双曲線モデルを設定した。

### 2-4 構造物モデル

本検討では、阪神高速道路全線約 260 km（約 9000 基の橋脚）のうち、湾岸線約 55 km（約 1800 基の橋脚）の範囲のモデル化を行った。図-4 に示すように、本検討では、上部構造を線形梁モデルとした。下部構造は材料非線形性を考慮できるファイバーモデルとした。下部構造の断面については、断面形状（矩形、円形）、材質（鋼製、コンクリート製）、断面幅の使用頻度から 12 グループに分類し、代表橋脚断面を各グループに設定した。支承は線形ばねモデルとした。また、基礎は S-R ばねとし、そのばね値は土木建築施設図と各下部構造近辺のボーリングデータから算定した。なお、表層地盤応答解析に用いる各基礎位置の表層地盤条件にも同一のボーリングデータを共有しているため、解析全体の統一性についても保たれている。剛性、質量、幾何形状等の数値情報については、COSMOS のデータベースから構造物情報台帳を CSV 形式のファイルで作成した上で、地震応答解析プログラム SeanFEM<sup>14)</sup>用モデルを自動構築した。以上の方法により構築したモデルの例として、港大橋付近の構造物モデルの一例を図-5 に示す。

### 3. 地震応答シミュレーションの結果

阪神高速道路湾岸線約 55 km を対象とした地震応答シミュレーションの結果を示す。なお、本稿に示す広域道路ネットワークシミュレーシ

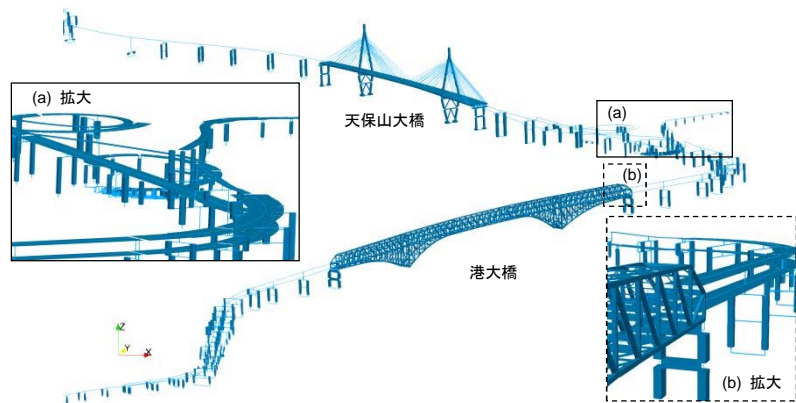


図-5 構造解析モデル例（港大橋付近）

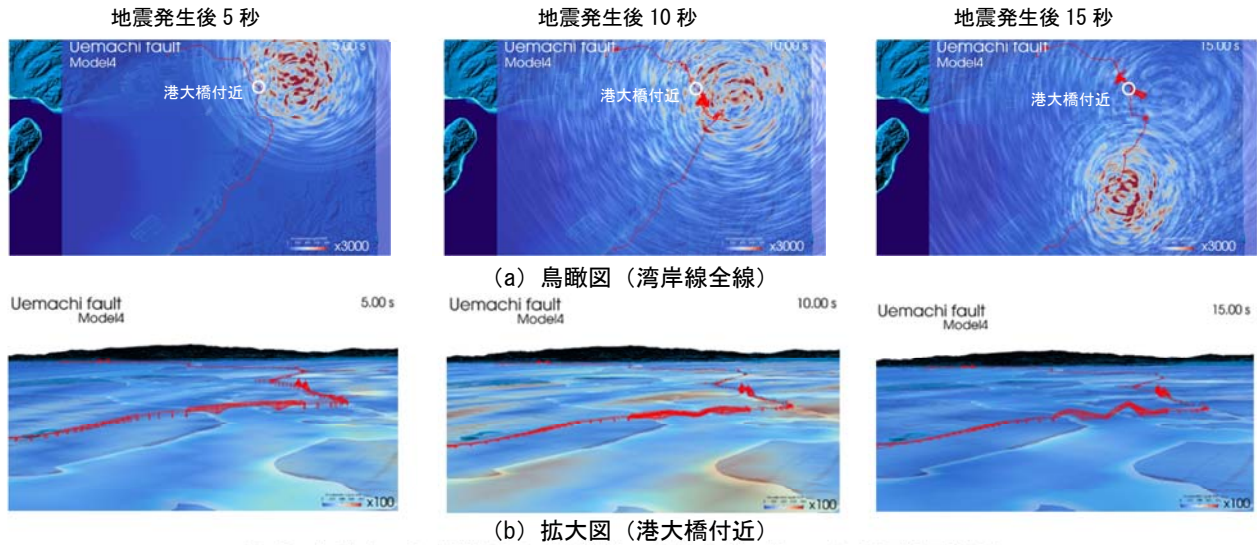


図-6 加速度の伝播状況及び構造物の応答変位 (Case\_1 上町断層地震)

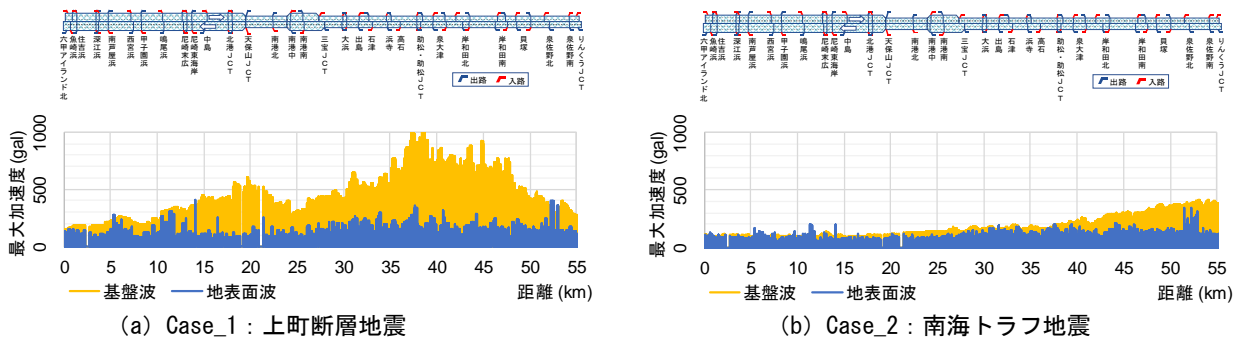


図-7 基盤及び地表面での最大加速度分布の比較

ンは現時点で研究段階にあり、今後解析モデルの広域化・高精度化とともに、解析結果の精度検証を行っていくものである。

### 3-1 加速度の伝播状況と橋梁の応答変位

図-6 に加速度の伝播状況と橋梁の応答変位の一例として、上町断層の破壊に伴う加速度の伝播状況と構造物の応答変位を示す。上町断層北部に設定した破壊開始点から南方向に地震動が伝播していき、地震動の伝播に伴い橋梁の応答変位が増大している状況が確認できる。

### 3-2 基盤及び地表面での最大応答加速度

図-7 に深層地盤応答解析により得られた工学的基盤における最大加速度とその深層地盤応答解析結果を入力波とした表層地盤応答解析により得られた地表面における最大加速度の比較を示す。Case\_1：上町断層を震源域とする解析とCase\_2：南海トラフを震源域とする解析の最大加速度分布を比較すると、上町断層地震では南

海トラフ地震に比べ、震源域から湾岸線の橋梁構造物までの距離が短いため、基盤で全体的に大きな加速度が発生している。特に助松 JCT 付近から貝塚付近では基盤波の加速度が大きく、最大で 1000gal を超える大きな加速度が発生する。一方で、地表面加速度に着目すると、上町断層地震と南海トラフ地震で最大加速度分布の違いは見られるものの、最大加速度は 400gal 程度と大きな差は生じなかった。

### 3-3 橋脚天端及び基礎位置での最大応答加速度

橋脚天端と基礎の最大応答加速度、橋脚天端と基礎の最大相対変位の分布図（水平 2 成分の自乗和平方根）を図-8 に示す。上町断層地震では、最大応答加速度は南側でより大きな加速度となる傾向が見られる。大浜や泉大津付近で橋脚天端の加速度が 1000gal 程度となっていることがわかる。一方、最大相対変位は、相対変位 0.5m を超えるような箇所が路線全体に分布しており、大浜付近で 0.8m 程度の相対変位が生じて

いる。

南海トラフ地震も上町断層地震と同様に、最大応答加速度は南側でより大きな加速度が生じており、大浜や泉大津付近で橋脚天端の加速度が 900gal 程度となっていることがわかる。一方、最大相対変位は、最大応答加速度と同様に、全体的には南側が大きな傾向にある。また、天保山 JCT 付近で 1.4m 程度、泉佐野南で 1.2m 程度の大きな相対変位が生じている。

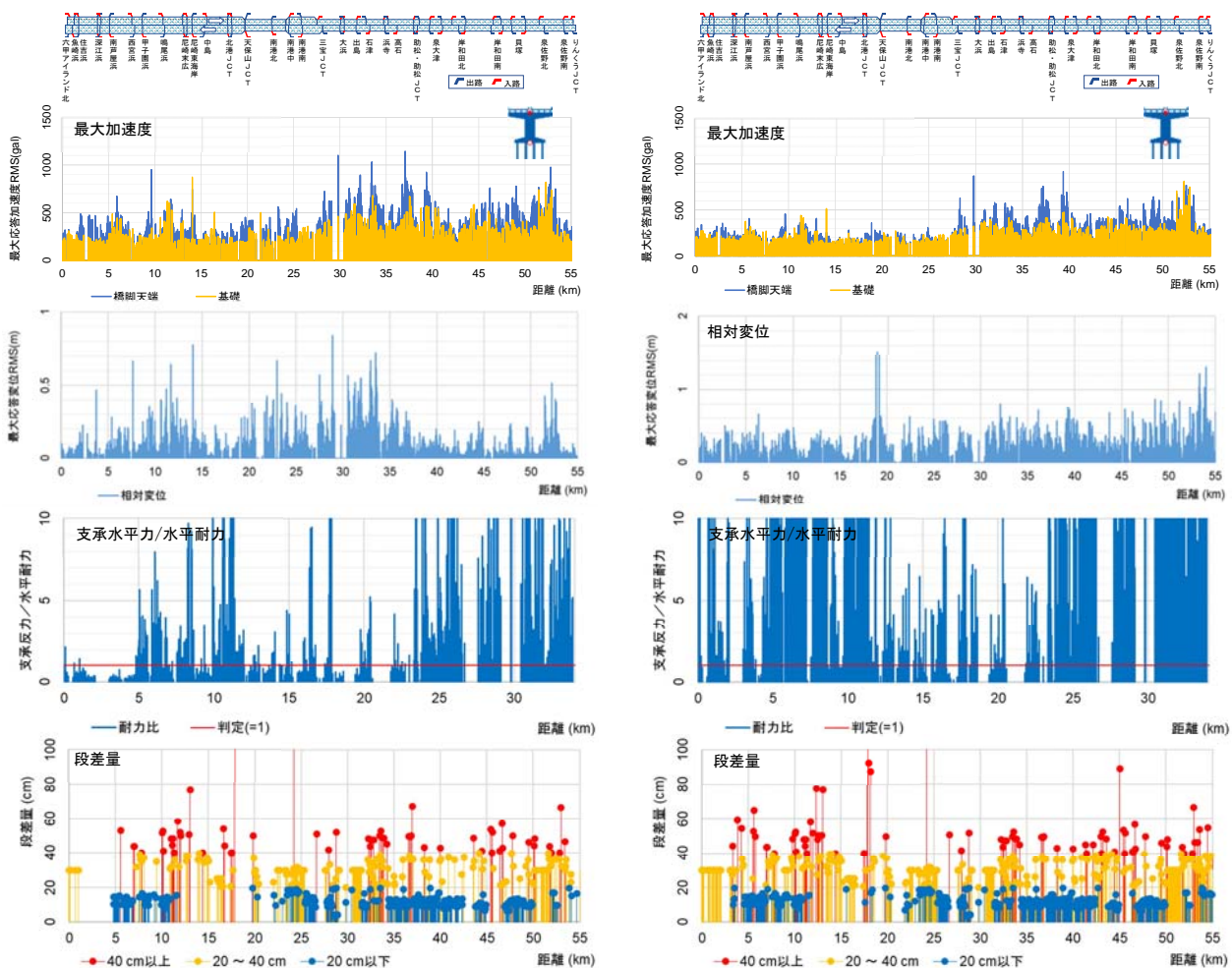
このように、上町断層地震と南海トラフ地震を想定した地震応答シミュレーションにより得られた基礎及び橋脚天端の加速度応答分布や相対変位分布の傾向に違いが確認されたことから、様々な震源域を想定した地震応答シミュレーションによる被害確率に基づく危険度評価ができる可能性を示した。

### 3-4 伸縮継手部の段差量

図-8 には支承の最大水平反力を水平耐力で除

した応答耐力比と伸縮継手部における段差量の分布を併せて示している。ここで、2011 年東北地方太平洋沖地震において発生した仙台東部道路では、支承が水平方向に完全に破断しても、支承高さ（台座高さを含む）分の段差が生じるのではなく、一定の高さは確保されていた<sup>15)</sup>。そこで本検討では、支承の最大水平反力が耐力を超えている場合に支承が破壊すると判定し、伸縮継手部に発生する段差量については、対象支承の支承高さの 1/2 の段差が発生するものと仮定して算出した。図-8 より、南海トラフ地震では上町断層地震に比べ多数の支承が破壊し、段差量が 20cm を超える箇所も多くなっていることがわかる。

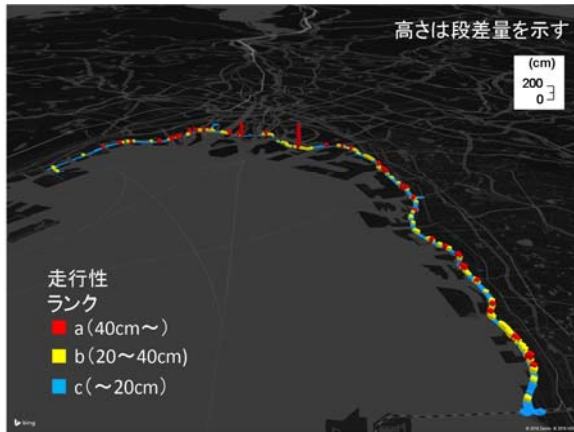
また、図-9 に走行性判定結果を示す。本検討では、3 ランク (a: 通行不可, b: 通行注意, c: 被害なし) に分類し、支承高さに基づき走行性判定を試みた結果、閾値の設定等に課題は残るものの地震発生後の走行性評価ができる可能性を示



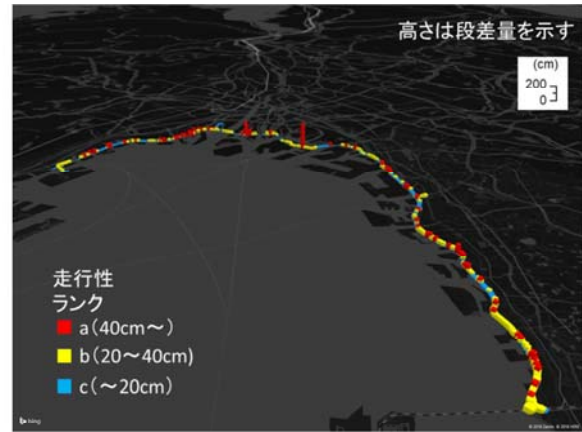
(a) Case\_1 : 上町断層地震

(b) Case\_2 : 南海トラフ地震

図-8 支承の最大水平力及び伸縮継手部の段差量の比較



(a) Case\_1 : 上町断層地震



(b) Case\_2 : 南海トラフ地震

図-9 走行性判定結果の比較

した。

#### 4. まとめ

本研究では、上町断層を震源とする内陸直下型地震および南海トラフを震源とする海溝型地震が発生した際の広域道路ネットワークの地震応答シミュレーションについて検討した。本検討で得られた知見を以下に示す。

- ・阪神高速湾岸線約 55km の大規模な解析モデルを自動構築し、震源域から構造物モデルまでの地震応答シミュレーションを実施する仕組みを構築した。

- ・広域地震応答シミュレーションにより、約 1800 基の橋脚それぞれの応答加速度や応答変位を算出した。これにより、橋脚単体のみならず、区間単位での損傷程度を推定できる可能性を示した。

- ・本検討では、上町断層を震源域とする場合と南海トラフを震源域とする場合で応答変位や段差量の分布の違いが確認されたことから、様々な震源域を想定した地震応答シミュレーションを実施することにより、被害程度を評価できる可能性を示した。

- ・地震応答シミュレーションにより得られた支承の最大水平反力から、一定の仮定の下、伸縮継手部における段差量を算出した。この段差量から、地震発生後の路線単位の走行性を評価することができる可能性を示した。

今後、解析モデルの構築範囲を阪神高速全路線の橋梁やトンネル構造物に展開していくとともに、地盤モデルの 3 次元化など、解析手法や

解析モデルの精度レベルを向上させていく。また、複数の震源モデルを用いたシミュレーションにより、区間単位での被害確率から危険度評価を行うとともに、被災度判定評価を実施するための閾値の適切な設定を行う。現段階で橋脚の非線形性を考慮した解析を実施していることから、各橋脚断面の応答ひずみ値や残留変位等の抽出が可能であるため、これらの応答を用いた橋脚の「耐荷力」、「復旧性」を定量的に評価することが可能となると考えている。

**謝辞：**本研究は、阪神高速道路(株)と(株)地震工学研究開発センターとの「巨大地震発生時における阪神高速湾岸線の全体系応答シミュレーションに関する共同研究」の成果の一部であり、国立研究開発法人理化学研究所のスーパーコンピュータ「京」を利用して得られたものである(課題番号：hp170089)。ここに記して関係各位に謝意を表する。

#### 参考文献

- 1) 吉野 廣一, 野中 哲也, 本橋 英樹, 金治 英貞, 鈴木 威, 八ツ元 仁, 中村 良平: 京コンピュータによる高架橋の広域 3 次元地震応答シミュレーション, 第 17 回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, 2014.
- 2) 八ツ元仁, 金治英貞, 馬越一也, 野中哲也: 大規模計算における長大斜張橋地震応答解析の構造要素モデルの改良, 第 18 回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, 2015.
- 3) 原田隆典, 王宏沢: 剛性マトリックスによる水平成層地盤の波動解析, 地震 第 2 輯, VOL. 57, No. 3, 日本地震学会, pp. 387-392, 2005.
- 4) 佐藤智美, 川瀬博, 松島信一: 1996 年 8 月秋田・宮城県境付近の地震群の K-NET 強震記録から推定した震源・伝播・サイト特性, 地震 第 2 輯, VOL. 50, No. 4, 日本地震学会, pp. 415-419, 1998.

- 5) 入倉孝次郎, 釜江克宏: 1948年福井地震の強震動-ハイブリッド法による広周期帯域強震動の再現-, 地震 第2輯, VOL. 50, No. 1, 日本地震学会, pp. 129-150, 1999.
- 6) 吉田望, 東畑郁生: YUSAYUSA-2・SIMMDL-2 理論と使用法, 佐藤工業・東京大学, 1995.
- 7) 臺原直, 大月哲, 矢部正明: 非線形動的解析に用いる Reyleigh 減衰のモデル化に関する提案, 第2回地震時保有耐力法に基づく橋梁の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, pp. 371-378, 1998.
- 8) 山本泰幹, 藤野陽三, 矢部正明: 地震観測された長大吊構造系橋梁の動的特性と動的解析モデルによる再現性, 土木学会論文集 A, VOL. 65, No. 3, pp. 738-757, 2009.
- 9) 岡山真人, 後昌樹, 荒川貴之: 情報共有基盤(COSMOS)のあり方と今後について, 阪神高速道路第48回技術研究発表会論文集, 2016.
- 10) 大阪府: 大阪府地震被害想定調査(大阪府自然災害総合防災対策検討(地震被害想定)報告書), <http://www.pref.osaka.lg.jp/kikikanri/higaiso utei/>, 2007.
- 11) 内閣府: 南海トラフの巨大地震モデル検討会, <http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/model/>, 2012.
- 12) 関西圏地盤情報ネットワーク: 関西圏地盤情報データベース, <https://www.kg-net2005.jp/index/db01.html>
- 13) 桐生郷史, 野上雄太, 坂井公俊, 室野剛隆: 広域構造物の地震応答概略評価のための地盤モデル簡易構築手法, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学) Vol. 70, No. 4 (地震工学論文集第33巻), pp. 742-750, 2014.
- 14) 株式会社耐震解析研究所: SeanFEM ver. 1.22 理論マニュアルと検証, 2007. 11.
- 15) 曾田信雄, 山田金喜, 木水隆夫, 広瀬剛, 鈴木基行: 東北地方太平洋沖地震により破断した積層ゴム支承の性能試験, 構造工学論文集, (公社)土木学会, Vol. 59A, pp. 516-526, 2013.

## A STUDY ON POST-EVENT ROAD USABILITY EVALUATION BASED ON EARTHQUAKE DAMAGE SIMULATION OVER A WIDE AREA EXPRESSWAY NETWORK

Masahiro HATTORI, Hideo OISHI and Masatsugu SHINOHARA

To build an earthquake damage simulation system for a wide area expressway network, seismic response analyses were conducted for the Hanshin Expressway Wangan Route, assuming exposure to an inland earthquake associated with the Uemachi Fault or an offshore earthquake originating in the Nankai Trough. The analysis results showed that zones with high damage risk could be predicted by this method. It was also found that it would be possible to evaluate usability of roads after the event from the amount of bumps calculated based on the maximum bearing reaction force.

服部 匡洋



(一財)阪神高速道路技術センター  
調査研究部 調査研究第一課  
Masahiro Hattori

大石 秀雄



(一財)阪神高速道路技術センター  
調査研究部 調査研究第一課  
Hideo Oishi

篠原 聖二



阪神高速道路株式会社  
技術部 技術推進室  
Masatsugu Shinohara