

スーパーコンピュータ「京」を使った広域道路ネットワークの地震応答シミュレーション

高田佳彦・篠原聖二・松下麗菜

1. はじめに

1995年の兵庫県南部地震では阪神高速道路は甚大な被害を受け、その復旧や全線にわたる耐震補強が同クラスの地震に耐えられるように実施されている。2011年の東北地方太平洋沖地震や2016年の熊本地震においては、巨大津波や震度7クラスの地震の連続発生など、設計上の想定を超える事象が発生し甚大な被害を受けた。我が国の耐震設計基準は、大規模な地震による被災に対応して設計地震動が引上げられてきた。今後、高い確率で予想される南海トラフ地震や、想定される活断層を震源とする都市直下型地震に対しても、阪神高速道路の安全性確保が求められる。

そのためには、地域の活断層の知見と断層モデルにより想定される地震発生シナリオに基づき、多様な破壊パターンの地震動シミュレーションを実施し耐震性を評価し、道路付属物も含めた耐震補強計画、被害想定、費用や人材および機材配置を含めた応急措置および復旧計画に反映しておく必要がある。加えて、阪神高速道路の広域道路ネットワークの防災・減災計画においては、ネットワーク全体をモデル化した地震応答シミュレーションにより、路線単位やランプ間単位の耐震性を評価し、通行障害のレベルと復旧性、代替ルートを含めた交通機能や地域の社会経済に与える影響を評価する必要がある。さらに、過去の橋梁の被災事例では、橋梁振動単位の境界部や単柱式やラーメン形式などの橋脚形式の変化点等で被災が生じており、弱点部を明確にし、その被害レベルや被災後点検の優先度を立案するには、ネットワーク一連の構造モデルによる評価が求められる。

このような大がかりな地震応答シミュレーションを行うには、大規模な計算資源が必要となる。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」（以下「京」という。）をはじめとする大規模計算機が国内の研究機関や大学

で整備され、大がかりな解析を行うことができる環境が整いつつある。阪神高速道路株式会社では、2014年より「京」を用いた基礎研究として、仮定の延長20kmの連続高架橋を対象とした解析¹⁾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²⁾を実施してきた。

それらの知見を踏まえ、阪神高速全線 260kmのネットワークの地震応答シミュレーションに着手しており、本稿ではそれらの研究の概要および、最新の成果である阪神高速道路湾岸線を対象にした地震応答シミュレーション結果を紹介する。

2. 地震応答シミュレーションの方法

2.1 解析方針

本シミュレーションは、大阪平野を南北に貫く上町断層を震源域とする都市直下型地震発生時（以下「Case1」という。）、南海トラフを震源域とする海溝型地震発生時（以下「Case2」という。）を対象とする。解析手順は図-1に示すように、STEP1：断層から工学的基盤までの深層地盤応答解析、STEP2：工学的基盤から地表面までの表層地盤応答解析、STEP3：構造物の基礎から上部構造までの構造物応答解析、の3ステップで構成する。

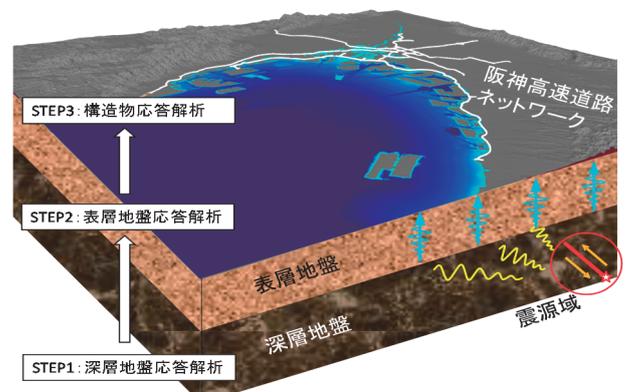


図-1 地震応答シミュレーションのステップ

2.2 地盤モデル

STEP1の深層地盤応答解析の地盤モデルにおいて、Case1では、文献3)に基づき上町断層の断層諸元を設定した。モデルの範囲は断層破壊点を

中心に400km×400kmと広域で、図-2はその中央に位置する60km×60kmの領域を示し、計算格子メッシュは100m×100mとした。Case2の南海トラフ地震は、内閣府が公開している文献4)の陸側ケースに基づき、図-3に示すように震源域を想定した。

STEP2における表層地盤応答解析では、表層地盤のモデル化や基礎ばねの算出に、関西圏地盤情報データベース⁵⁾のボーリングデータを用いた。表層地盤の材料特性である G/ρ - γ 曲線、 h - γ 曲線 (G :せん断剛性、 h :減衰定数、 γ :せん断ひずみ)は、対象地域で実施された三軸試験データに基づき沖積層と洪積層の4種類(砂質土、粘性土)の双曲線モデルを設定した。本区間はほとんどが3種地盤である。

2.3 地盤解析手法

STEP1においては、広域帯地震動を作成するハイブリッド法^{6),7)}を用いて、工学的基盤波を算出する。ハイブリッド法では、長周期帯に対しては剛性マトリクス法⁸⁾による波形計算を行い、短周期帯に対しては統計的グリーン関数法を用いて波形合成を行う。算出された長周期成分と短周期成分の地震動波形に対して、 1 ± 0.3 秒の周期帯でマッチングフィルター処理を施して重ね合わせるにより、全周期帯域の地震動を計算する。さらにSTEP2においては、STEP1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、地震応答解析プログラムYUSAYUSA⁹⁾を用いて1次元逐次非線形全応力解析を行った。

2.4 構造物モデル

構造物モデルは大規模かつ複雑であり、効率よく構築するため、既存の阪神高速地理空間情報システム(COSMOS)等を活用して作成している。

表-1に構造物モデルを示す。その構築にステップを踏んでおり、まず対象区間全線をModel2に示すように上下部工を線形はりモデルを構築後、高度化の一環でModel1は下部工を非線形ファイバーモデルに更新を行っている。COSMOSより、剛性、質量、幾何形状等の数値情報に関する構造物情報台帳を作成し、地震応答解析プログラムSeanFEM¹⁰⁾用モデルを自動構築した。

構造物モデルの例として、港大橋付近及び大浜ランプ付近の構造を図-4に示す。

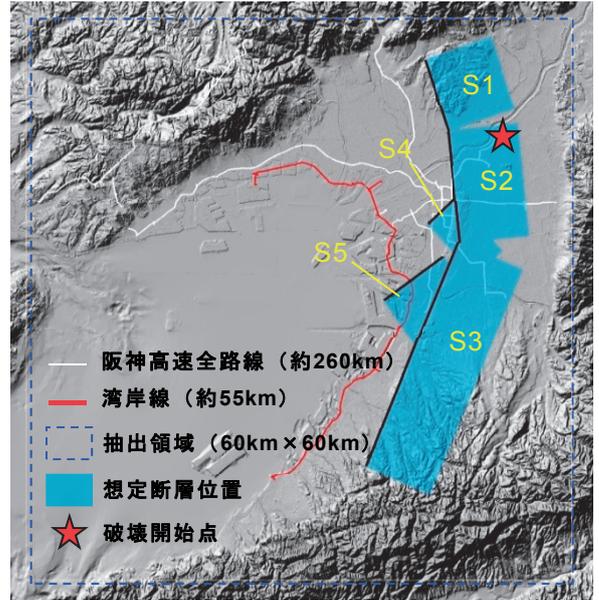


図-2 地震応答シミュレーションの解析範囲

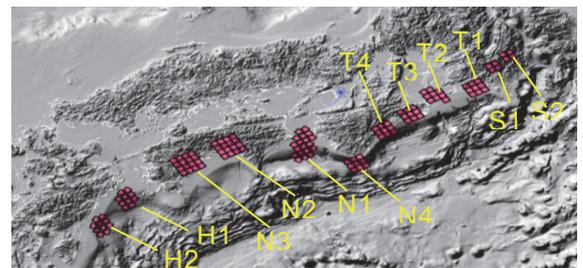
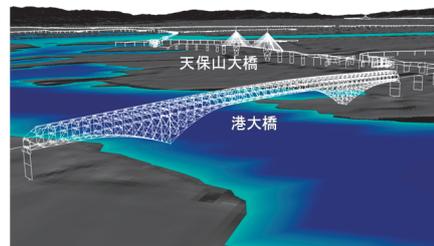


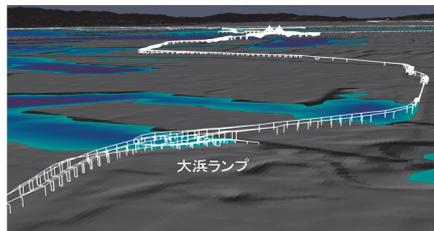
図-3 南海トラフ地震の震源域の分布

表-1 構造物モデルとその対象区間

モデル名	Model1	Model2
解析Case	Case1	Case2
上部構造	線形はりモデル	線形はりモデル
下部構造	非線形ファイバーモデル	線形はりモデル
基礎	S-Rモデル(線形バネ)	S-Rモデル(線形バネ)
対象区間	約55km(湾岸線全線)	
橋脚基数	約1800基	

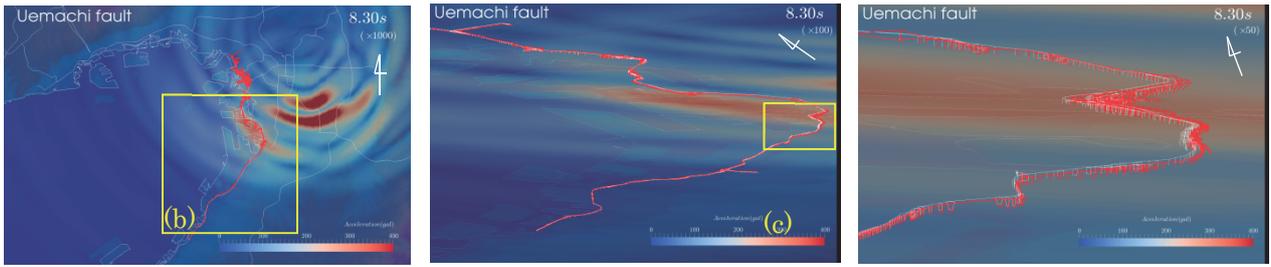


(a)港大橋付近



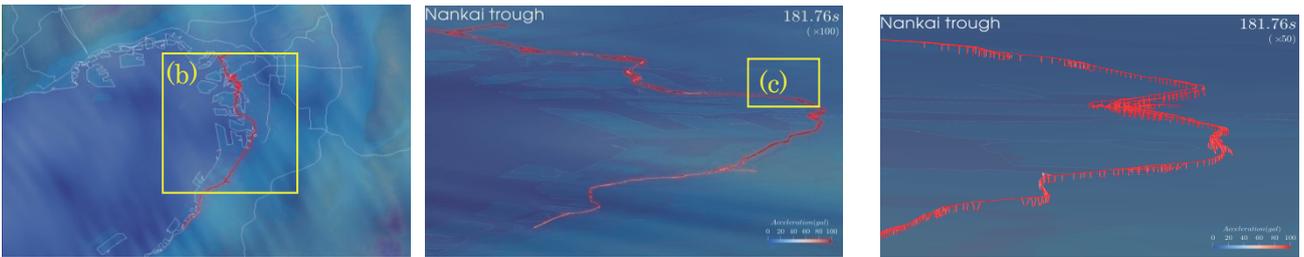
(b)大浜ランプ付近

図-4 湾岸線における構造物モデルの例



(a) 解析範囲全体 (変形倍率1000倍) (b) 拡大図 (変形倍率100倍) (c) 拡大図 (変形倍率50倍)

図-5 Case1における加速度の伝播状況及び構造物の応答変位 (上町断層)



(a) 解析範囲全体 (変形倍率1000倍) (b) 拡大図 (変形倍率100倍) (c) 拡大図 (変形倍率50倍)

図-6 Case 2における加速度の伝播状況及び構造物の応答変位 (南海トラフ)

3. 地震応答シミュレーション結果

3.1 基礎ステップのシミュレーション結果

京による地震応答シミュレーションの基礎ステップとして、図-1の地盤応答解析でSTEP2をスキップし、表-1の上下部工に線形はりを用いた構造物モデル (Model2) の基礎を固定条件としたモデルで解析した。その結果として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プロセスの可視化を図-5、6に示す。

図-5のCase1は、図-2に示す上町断層北の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。Case2は、震源域から構造物までの距離が大きいため、広い範囲で一定の加速度が発生している。

3.2 Case1の地震応答シミュレーション結果

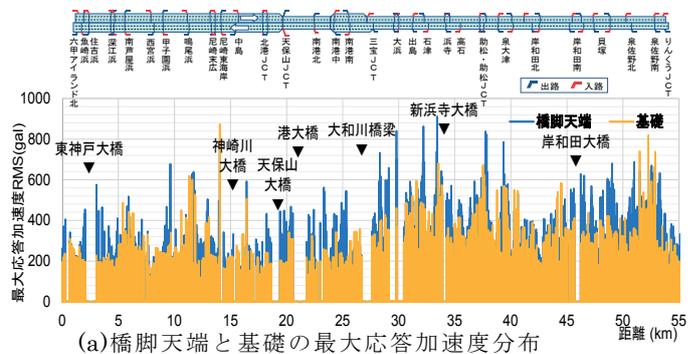
上町断層の破壊に伴う地震動の橋脚天端および基礎の最大応答加速度の分布を図-7に示す。橋梁名を表示している長大橋付近の応答が相対的に高い傾向が伺える。距離30~40kmで800galを超えており、これは図-2に示す推定断層がこの付近で重なっており、応答に影響を与えたと推察される。

橋脚天端と基礎の相対変位の最大値分布を図-8に示す。橋脚が高い長大橋で応答が大きい傾向があるが地盤の影響もあり明確でない。橋脚の非線形性は考慮されているため、塑性率から橋脚の損傷ランクを定量的に評価することも可能である。

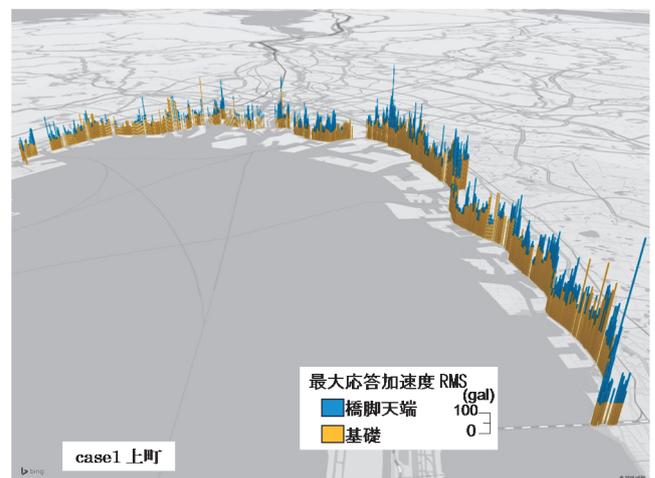
3.3 Case2の地震応答シミュレーション結果

南海トラフを震源域とする地震動の地盤のNS

方向の最大応答加速度の分布を図-9に示す。震源に近い終点側で深層地盤波の応答が顕著に高い。橋脚天端と基礎の最大応答加速度の分布を図-10に示す。地盤の応答に対応して橋脚天端および基礎とも震源に近い終点側で応答が高い傾向が伺える。また、橋脚の天端応答変位は構造物の特性の影響も受けており、ネットワーク上の応答特性の俯瞰を可能にしている。



(a) 橋脚天端と基礎の最大応答加速度分布



(b) 最大応答加速度分布の可視化

図-7 Case1の橋脚天端と基礎の最大応答加速度分布

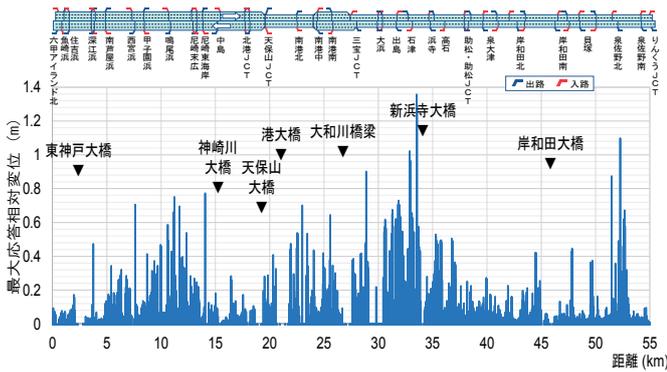


図-8 橋脚天端と基礎の最大応答相対変位の最大値分布

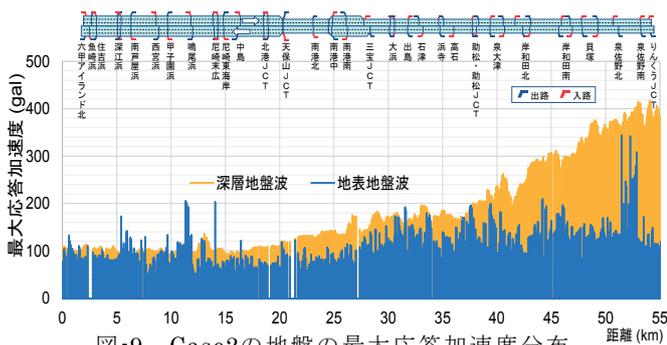


図-9 Case2の地盤の最大応答加速度分布

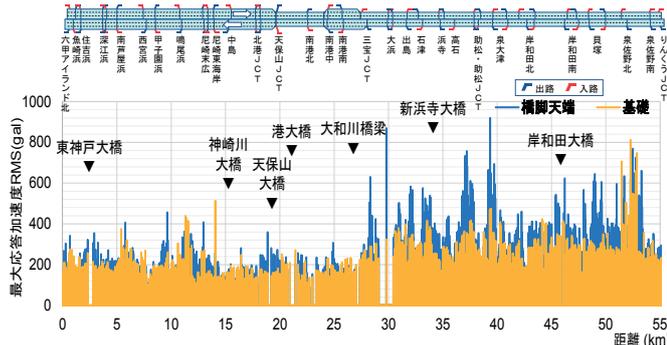


図-10 Case2の橋脚天端と基礎の最大応答加速度分布

4. おわりに

本稿では京を用いて、上町断層を震源域とする都市直下型地震および南海トラフを震源とする海溝型地震に対する広域道路ネットワークの地震応答シミュレーションを検討した。

今後、解析モデルの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、構

造モデルの非線形特性の考慮や地盤モデルの3次元化など解析手法や解析モデルを進展させ、区間単位での被害確率から危険度評価を行っていく。

なお、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。

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) 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/higaisoutei/>、2007
- 4) 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
- 5) 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、<http://www.kg-net2005.jp/db01.html>
- 6) 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
- 7) 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一、地震 第2輯、Vol.50、No.1、日本地震学会、pp.129~150、1999
- 8) 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
- 9) 吉田望、東畑郁生: YUSAYUSA-2・SIMMDL-2理論と使用方法、佐藤工業・東京大学、1995
- 10) 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

高田佳彦



阪神高速道路(株)技術部技術推進室技術開発チームマネージャ、博士(工学)
Dr.Yoshihiko TAKADA

篠原聖二



阪神高速道路(株)技術部技術推進室課長代理、博士(工学)
Dr.Masatsugu SHINOHARA

松下麗菜



阪神高速道路(株)技術部技術推進室
Reina MATSUSHITA