

広域道路ネットワークにおける 地震被害シミュレーションの実現可能性

篠原 聖二¹・金治 英貞¹・馬越 一也²・中村 真貴²・
本橋 英樹²・服部 匡洋³・安藤 高士³・大石 秀雄³

¹正会員 阪神高速道路株式会社 技術部（〒541-0056大阪市中央区久太郎町4-1-3）

²正会員 株式会社地震工学研究開発センター（〒880-0902宮崎県宮崎市大淀 3-5-13）

³正会員 一般財団法人阪神高速道路技術センター（〒541-0054大阪市中央区南本町4-5-7）

1. はじめに

1995年の兵庫県南部地震において、阪神高速道路は建設当時の耐震設計基準を満たしていたにも関わらず、設計上の想定を超える地震動により甚大な被害を受けた。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も、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、数多くの構造物が甚大な被害を受けた。我が国の耐震設計基準は、大規模な地震が発生し、甚大な被害を受ける度に、設計地震動が繰返し引き上げられてきた。阪神高速グループビジョン2030¹⁾に掲げられている「最高の安全と安心を提供する阪神高速」の実現に向けて、今後、発生が予想される南海トラフ地震や都市直下型地震に備えるためには、これまでのような既往の発生地震と地震被害に基づく一義的な設計地震動の設定では限界があると考えられ、様々な破壊パターンの地震動シミュレーションにより被害程度を想定しておくことが重要である。

また、阪神高速道路のような広域道路ネットワークの防災・減災対策を検討するにあたっては、設計実務で用いられている橋梁単位の地震応答解析ではなく、広域の地震応答シミュレーションを行い、路線単位やランプ間の区間単位の損傷程度を評価することが有効と考えられる。また過去の被害事例より、橋梁の被害は、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生じる場合がある。連続する橋梁の弱点部を明確にするためには、橋梁単位ではなく路線単位のモデルを用いた評価が求められる。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」（以下、「京」と称す）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。著者らは、2014年より、京コンピュータ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²⁾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³⁾を実施してきた。

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30kmの区間を対象に、上町断層を震源域とする都市直下型地震が発生した際の地震応答解析を実施した。

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30kmの区間を対象に、上町断層を震源域とする都市直下型地震が発生した際の地震応答解析を実施した。

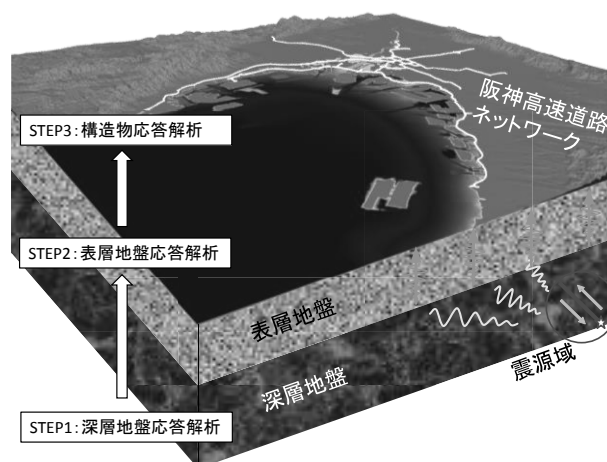


図-1 地震応答シミュレーションの方法

2. 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STEP1：震源域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。

なお、各STEPにおける解析手法や解析モデルの構築方法については、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の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) 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震応答解析の方法を表-1に示す。現段階ではレベル2の波動解析プログラムScanSGM⁴⁾を用いて波数積分法により

表-1 深層地盤応答解析の方法

精度レベル	解析方法と特徴	備考
レベル1	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	
レベル2	波数積分法 (ScanSGM) ・長周期成分が考慮できる ・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	現状
レベル3	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	目標

表-2 表層地盤応答解析の方法

精度レベル	解析方法と特徴	備考
レベル1	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	
レベル2	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
レベル3	有限要素法 (DACSAR等) ・不整形な地盤構造も考慮できる ・3次元モデル ・解析モデルが大規模になる ・解析に必要な地盤パラメータ数が増加	目標

表-3 構造物モデルへの地震動の入力方法

精度レベル	解析方法	備考
レベル1	代表同一波形を一様に入力	
レベル2	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	
レベル3	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

計算を行う。波数積分法は主に長周期成分が考慮でき、理論上は短周期成分も考慮できる。ただし、波数積分法は水平成層地盤を対象としているため、3次元的な変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次元的な変化を考慮できるレベル3の解析手法の研究開発を進める。

(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。検討対象となる大阪平野は沖積層堆積地域であり、埋立地のような軟弱地盤も対象とすることから、レベル1の等価線形解析ではなく、レベル2の地震応答解析プログラムYUSAYUSA⁵⁾を用いて1次元逐次非線形解析を行うこととした。今後は、3次元モデルの解析を行うことができるレベル3の解析手法の研究開発を進める。

(3) 構造物応答解析

構造物モデルへの地震動の入力方法を表-3に示す。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レベル3の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ーリー減衰モデル^{6), 7)}を適用する。

3. 解析モデルの構築計画

広域道路ネットワークの解析モデルの構築にあたっては、解析モデルが大規模になることから、効率よく構築していく必要がある。そこで本検討では、阪神高速地理空間情報システム (New Communication Systems for road Maintenance and Operations, 以下、COSMOSと称す)⁸⁾や関西圏地盤情報データベース⁹⁾など既存のデータベースを活用していく計画とした。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。

表-4 上町断層の断層諸元

項目	単位	断層帯				
		S1 佛念寺 断層	S2 上町断層 北部	S3 上町断層 南部	S4 桜川 撓曲	S5 住之江 撓曲
地震モーメント M_0	[N・m]	1.15E+18	2.60E+18	1.22E+19	2.88E+17	1.15E+18
モーメントマグニチュード M_w		6.0	6.2	6.7	5.6	6.0
断層長さ L	[km]	8	12	26	4	8
断層幅 W	[km]	18	18	18	18	18
断層の走行角 ϕ	[°]	N341.250E	N354.029E	N22.982E	N47.277E	N54.343E
断層の傾斜角 δ	[°]	65	65	65	65	65
すべり角 λ	[°]	90	90	90	90	90
平均すべり量 D	[m]	0.2	0.4	0.8	0.1	0.2

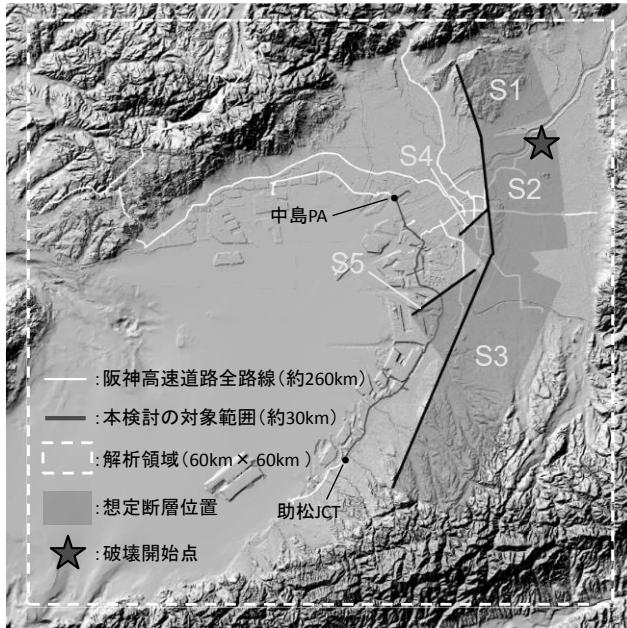


図-2 地震応答シミュレーションの解析範囲

(1) 深層地盤モデル

本解析では、大阪平野を南北に貫く上町断層を震源域とした深層地盤応答解析を行う。上町断層は、大阪府が公開している文献(10)に基づき、断層諸元を表-4のように設定した。深層地盤のモデル化の範囲は、図-2に示す60km×60kmの領域を対象とし、計算格子メッシュは200m×200mとした。

(2) 表層地盤モデル

表層地盤のモデル化と基礎ばねの算出方法のフローチャートを図-3に示す。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設定した。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

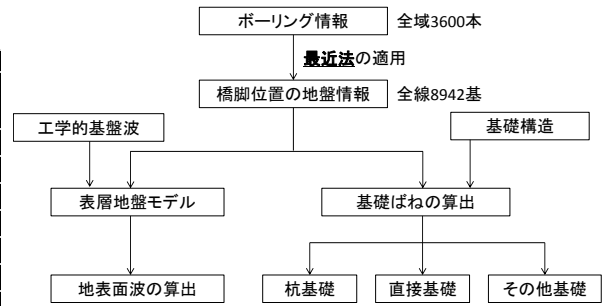


図-3 表層地盤モデルと基礎ばねの算出方法

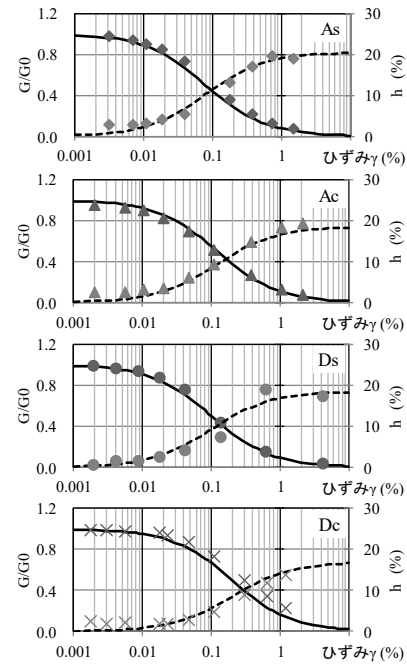


図-4 3軸試験結果から設定した G/G_0 - γ 曲線・ h - γ 曲線

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。本検討では、文献(11)の比較検討の結果をもとに、一定の精度が確保できる「最近法」を適用することとした。

また、表層地盤の材料特性 (G/G_0 - 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 (As, Ac) と洪積層 (Ds, Dc) の4種類の双曲線モデルを図-4に示すように設定した。

(3) 構造物モデル

本検討では、阪神高速道路全線約260km (約9000基の橋脚) のうち、図-2に示す湾岸線の中島PA付近から助松JCTに至る約30km (約1000基の橋脚) の範囲のモデル化を行った。上部構造、下部構造、支

表-5 構造物モデルの構築方法

対象	精度レベル	モデル化方法	備考
上部構造	レベル1	はりモデル(線形)	現状
	レベル2	ファイバーモデル(非線形)	
	レベル3	シェル・ソリッドモデル(非線形)	目標
下部構造	レベル1	はりモデル(線形)	現状
	レベル2	ファイバーモデル(非線形)	
	レベル3	シェル・ソリッドモデル(非線形)	目標
支承	レベル1	鋼製支承: 固定・可動の支持条件 分散支承: グルーピングした等価剛性 免震支承: グルーピングした等価剛性	現状
	レベル2	鋼製支承: 固定・可動の支持条件 分散支承: 等価剛性 免震支承: 等価剛性	
	レベル3	鋼製支承: 固定・可動の支持条件 分散支承: 等価剛性 免震支承: 非線形	目標
基礎	レベル1	固定	現状
	レベル2	S-Rモデル(線形ばね)	
	レベル3	動的相互作用考慮モデル	目標

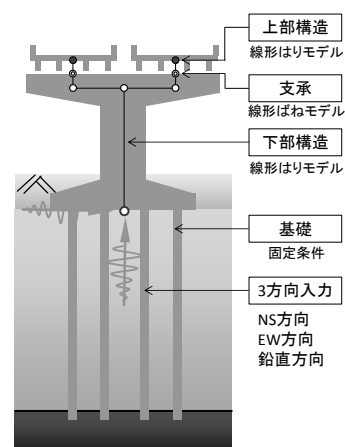
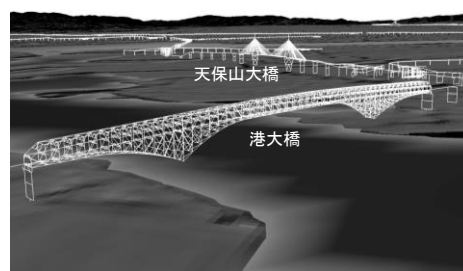
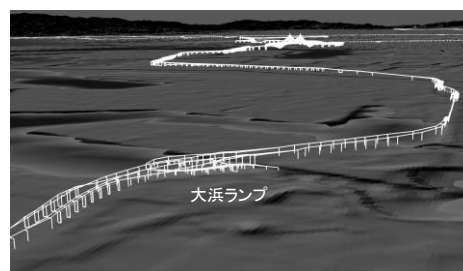


図-5 構造物モデルの構築方法



(a)港大橋付近



(b)大浜ランプ付近

図-6 湾岸線約30kmの構造物モデル

表-6 構造物モデル構築のために必要な数値情報

数値情報	内容	参照元	数値情報を用いた作業
座標情報	上部構造	平面線形	COSMOS モデル節点位置の座標を取得
		高さ・標高	"
	下部構造	支承	— 上部構造と橋脚の座標から算出
		柱位置・高さ	土木建築施設図 直交座標系への変換
		基礎ばね	関西地盤情報DB ・ボーリングデータ入手 ・基礎ばねの算出
	橋脚	COSMOS	断面定数の算出
荷重情報	上部構造	"	—
	橋脚	"	—
	基礎	"	—
境界情報	支承	"	
	基礎ばね	関西地盤情報DB	基礎ばねの算出

承、基礎の解析モデルの構築方法を表-5に示す。本検討では、図-5に示すように上部構造、下部構造は線形はりモデル、支承は線形ばねモデル、基礎は固定条件とした。なお、構造物モデルの部材の非線形特性は考慮せず、線形モデルとした。今後は、部材の非線形特性も考慮できるように解析モデルを精緻化していく。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SeanFEM¹²⁾用モデルを自動構築した。構造物のモデル化に用いた数値情報とその参照元を表-6に示す。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及び大浜ランプ付近の構造物モデルを図-6に示す。

4. 湾岸線約30kmを対象とした地震応答シミュレーション

湾岸線約30kmを対象とした地震応答シミュレーションの結果について示す。なお、本検討は広域道路ネットワークの地震応答シミュレーションの実現可能性の評価のための基本検討と位置付け、図-1のSTEP2の表層地盤応答解析は実施せず、STEP1の深層地盤応答解析結果をそのまま構造物モデルへの入力地震動として地震応答解析を行った。

(1) 地震応答シミュレーション

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図-7に示す。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た。

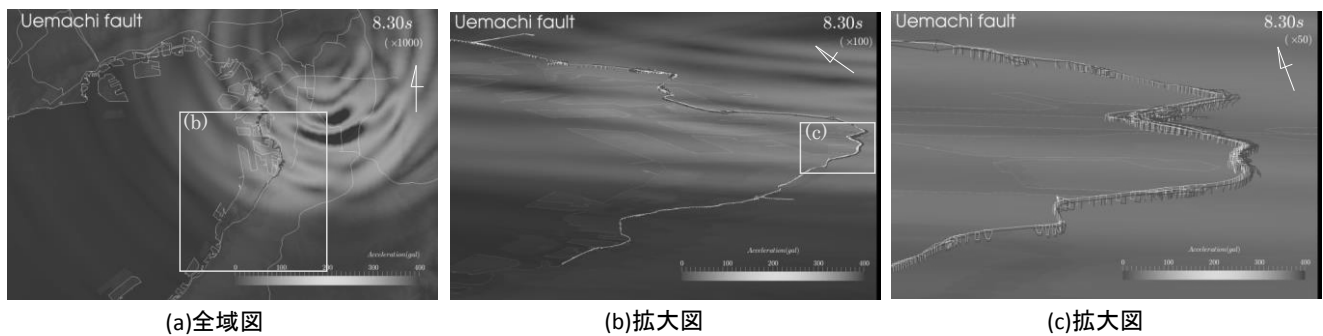


図-7 加速度の伝播状況と構造物の応答変位（開始後 8.3s 経過時）

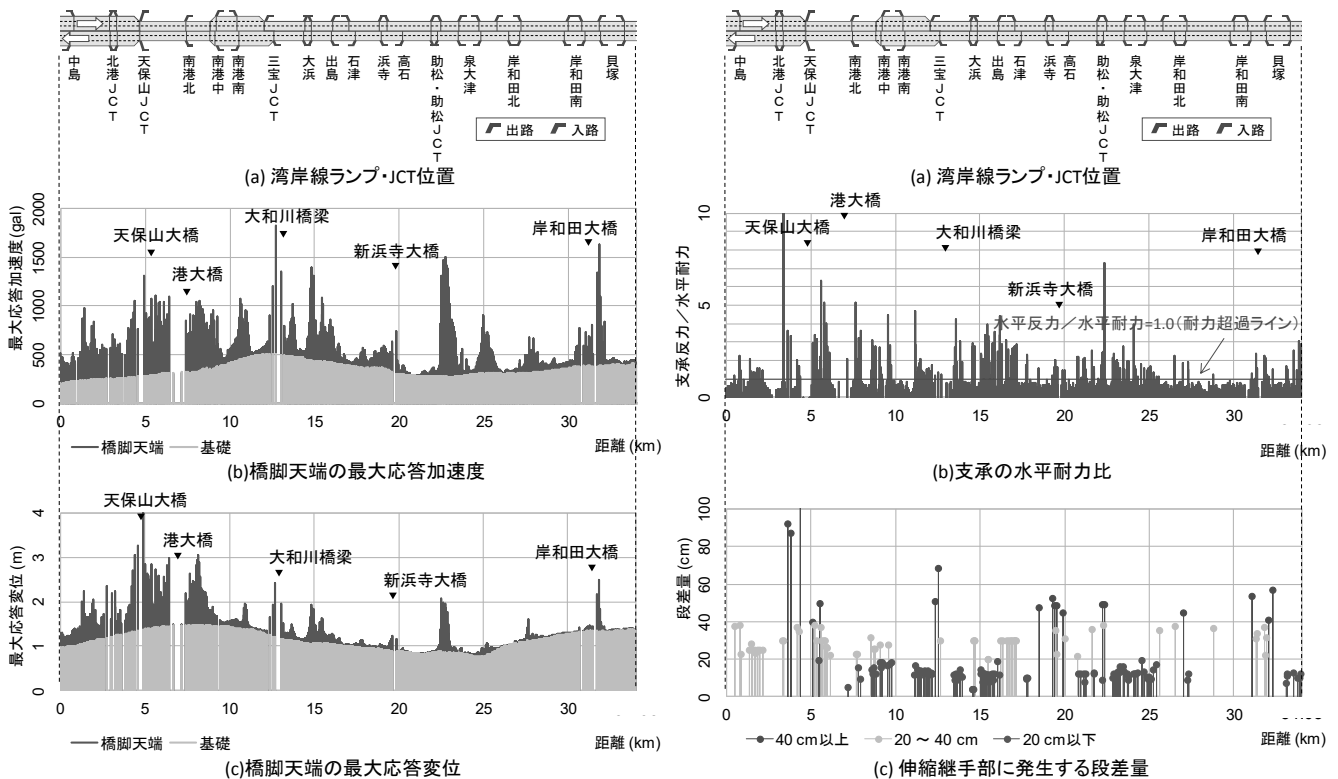


図-8 橋脚の最大応答加速度及び最大応答変位

(2) 橋脚天端の最大応答加速度及び最大応答変位

湾岸線のランプ・JCT位置を図-8(a)に、橋脚天端の最大応答加速度分布を図-8(b)に、橋脚天端の最大応答変位分布を図-8(c)に示す。図-8(c)には地盤応答に伴う基礎位置の変位も示している。北港JCTから南港北付近の最大応答変位が大きくなっていることがわかる。これは、この区間の地盤変位が大きく、かつ橋脚高さが他の区間と比べて大きいことが要因と考えられる。今後、橋脚の非線形性を考慮すれば、塑性率を算出し、橋脚の損傷程度を定量的に評価することが可能となる。

(3) 支承の最大水平反力及び伸縮継手部の段差

湾岸線のランプ・JCT位置を図-9(a)に、支承の最大水平反力を水平耐力で除した応答耐力比分布を図

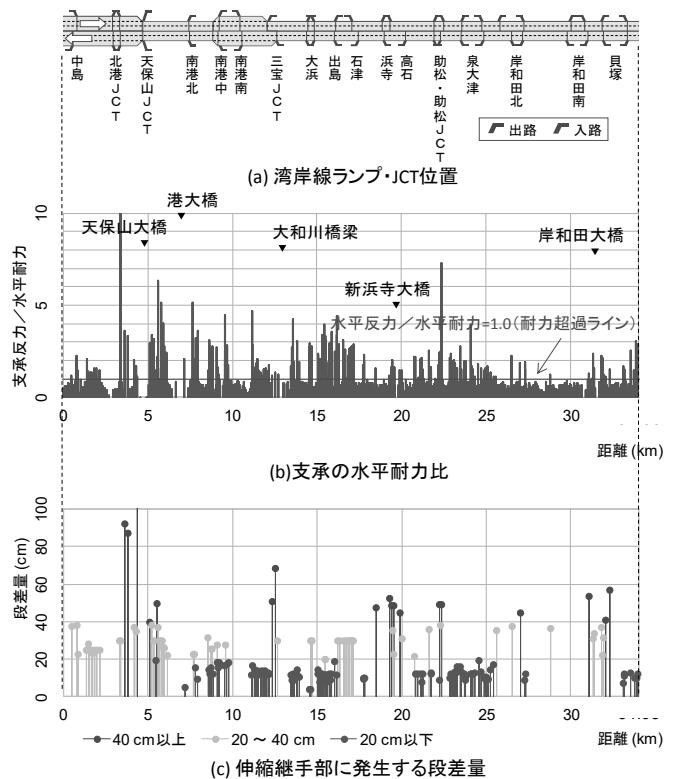


図-9 支承の最大水平力及び伸縮継手部の段差量



(a) ゴム支承の破断

(b) ゴム支承の破断箇所に発生した伸縮継手部の段差

写真-1 2011年東北地方太平洋沖地震における
仙台東部道路の被災状況¹³⁾

図-9(b)に、支承の破壊に伴い伸縮継手部に発生する段差量の分布を図-9(c)に示す。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のゴム支承の破断状況、及び同箇所の伸縮継手部に発生した段差の状況を写真-1¹³⁾に示す。写真-1に示

すように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ることがわかる。

そこで本検討では、伸縮継手部に発生する段差量については、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、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-9(c)より、段差量についても北港JCTから天保山JCT付近で大きくなっており、支承に発生する水平反力が大きく、支承高さも大きいため段差量が大きくなっている。

5. まとめ

本検討では、上町断層を震源とする都市直下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の実現可能性について検討を行った。本検討で得られた知見を以下に示す。

- (1) 阪神高速湾岸線約30kmの大規模な解析モデルを構築し、震源域から地表面の構造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。
- (2) 地震応答シミュレーションにより、約1000基の橋脚のそれぞれの応答加速度や応答変位を算出することができた。これにより、橋脚の損傷程度を推定できる可能性を示した。
- (3) 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、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の精度レベルを向上させていく。

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」の成果の一部である。また、「京」を

用いた研究は、国立大学法人神戸大学及び国立研究開発法人理化学研究所計算科学研究機構とも推進している。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 阪神高速グループ：阪神高速グループビジョン 2030～未来への道，私たちの挑戦～，2016.4.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 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57巻，日本地震学会，pp.387-392，2005.6
- 5) 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.
- 6) 臺原直，大月哲，矢部正明：非線形動的解析に用いる Rayleigh 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.
- 7) 山本 泰幹，藤野 陽三，矢部 正明：地震観測された長大吊橋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.
- 8) 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.
- 9) 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>
- 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/higaisoutei/>，2007.
- 11) 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-pp.750，2014.
- 12) 株式会社耐震解析研究所：ScanFEM ver.1.22 理論マニュアルと検証，2007.11.
- 13) 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.