

広域道路ネットワーク地震応答解析における 地震被災危険度評価に関する検討

服部 匡洋¹・安藤 高士¹・大石 秀雄¹・馬越 一也²・
中村 真貴²・篠原 聖二³・高田 佳彦³・西岡 勉³

¹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）

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

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においては、大規模な地震が発生して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る。したがって、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」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、著者らが過年度に構築した解析モデル⁴⁾では、線形梁要素でモデル化した橋脚を、材料非線形性が考慮可能なファイバーモデルに置き換え精度レベルの向上を図った。本モデルを用い、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都市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、損傷確率の高い区間の予測、地震発生後の路線単位の走行性評価の可能性について検討した。

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

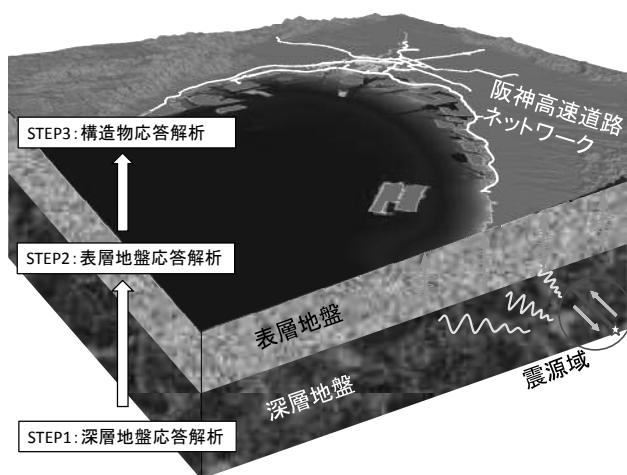


図-1 地震応答シミュレーションの方法

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) 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^{5),6),7)}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。

(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YUSAYUSA⁸⁾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。

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	

(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^{9), 10)}を適用する。

3. 解析モデルの構築方法

(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は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。本研究では橋梁等で構成された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、効率的な解析モデル構築を試みた。解析モデルはこの解析台帳によって作成され、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設計した。解析台帳は、阪神高速地理空間情報システム(COSMOS)¹¹⁾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、本研究では図-2に示すように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、路線1として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) 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-3に対象とする上町断層の位置を、図-4に対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¹²⁾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）¹³⁾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。

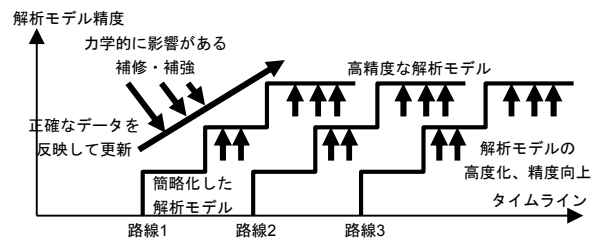


図-2 大規模・高精度解析モデル構築のための手順

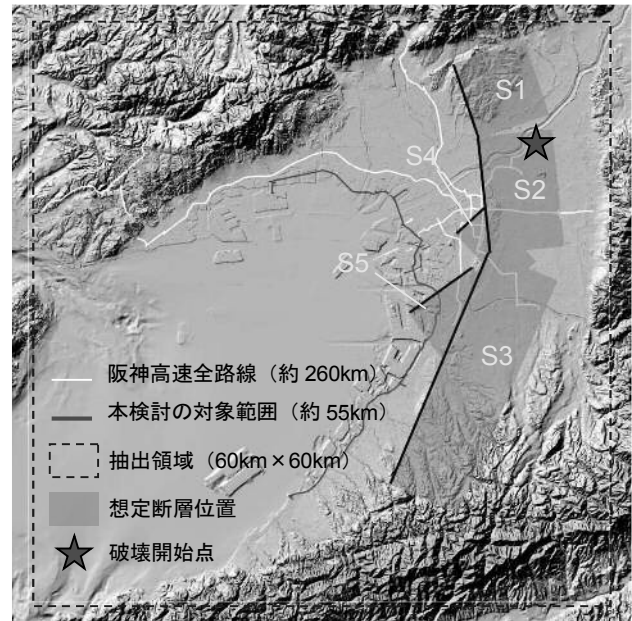


図-3 上町断層の位置

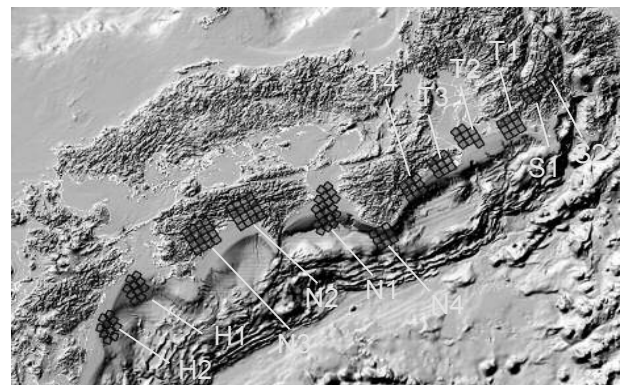


図-4 南海トラフ地震の震源域の分布

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。

(3) 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-5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¹⁴⁾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、

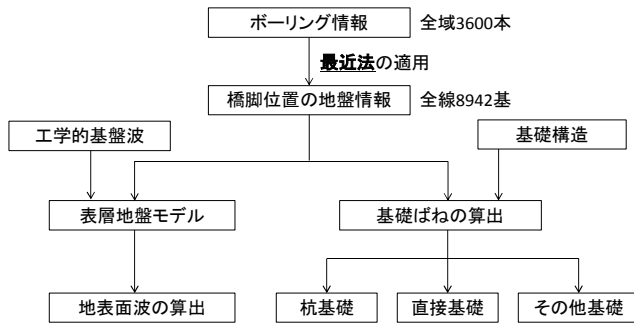


図-5 表層地盤モデルと基礎ばねの算出方法

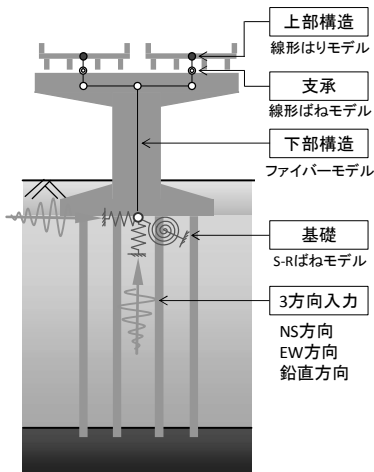


図-6 構造物モデルの構築方法

表-4 構造物モデルの構築方法

対象	フェーズ	解析方法	備考
上部構造	F4	シェル・ソリッドモデル	目標
	F3	ファイバーモデル	
	F2	ファイバーモデル(グルーピング)	
下部構造	F1	線形梁モデル	現状
	F4	シェル・ソリッドモデル	目標
	F3	ファイバーモデル	
支承	F2	ファイバーモデル(グルーピング)	現状
	F1	線形梁モデル	
	F3	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	F2	鋼製支承: 固定・可動の支持条件 分散支承: 等価剛性	現状
	F1	鋼製支承: 固定・可動の支持条件 分散支承: 免震支承: グルーピングした等価剛性	現状
	F3	基礎構造+分散ばねモデル	目標
	F2	S-Rモデル(線形ばね)	現状
	F1	固定	

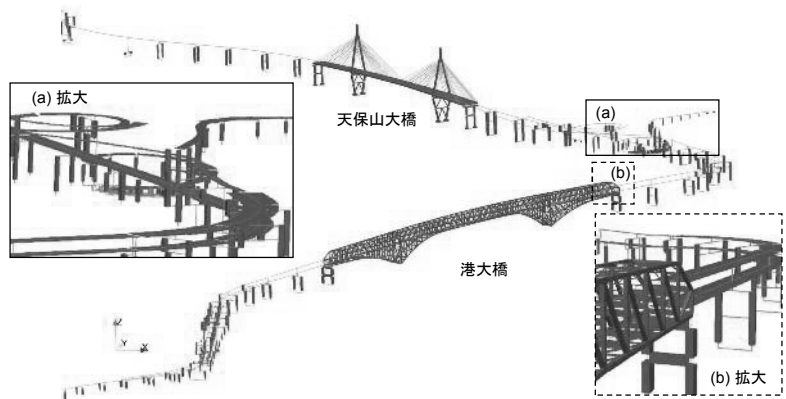


図-7 構造解析モデル例（港大橋付近）

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。文献15)の比較検討の結果をもとに、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。

(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。上部構造、下部構造、支承、基礎の解析モデルの構築方法を表-4に示す。図-6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SeanFEM¹⁶⁾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-7に示す。

4. 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ョンは現時点

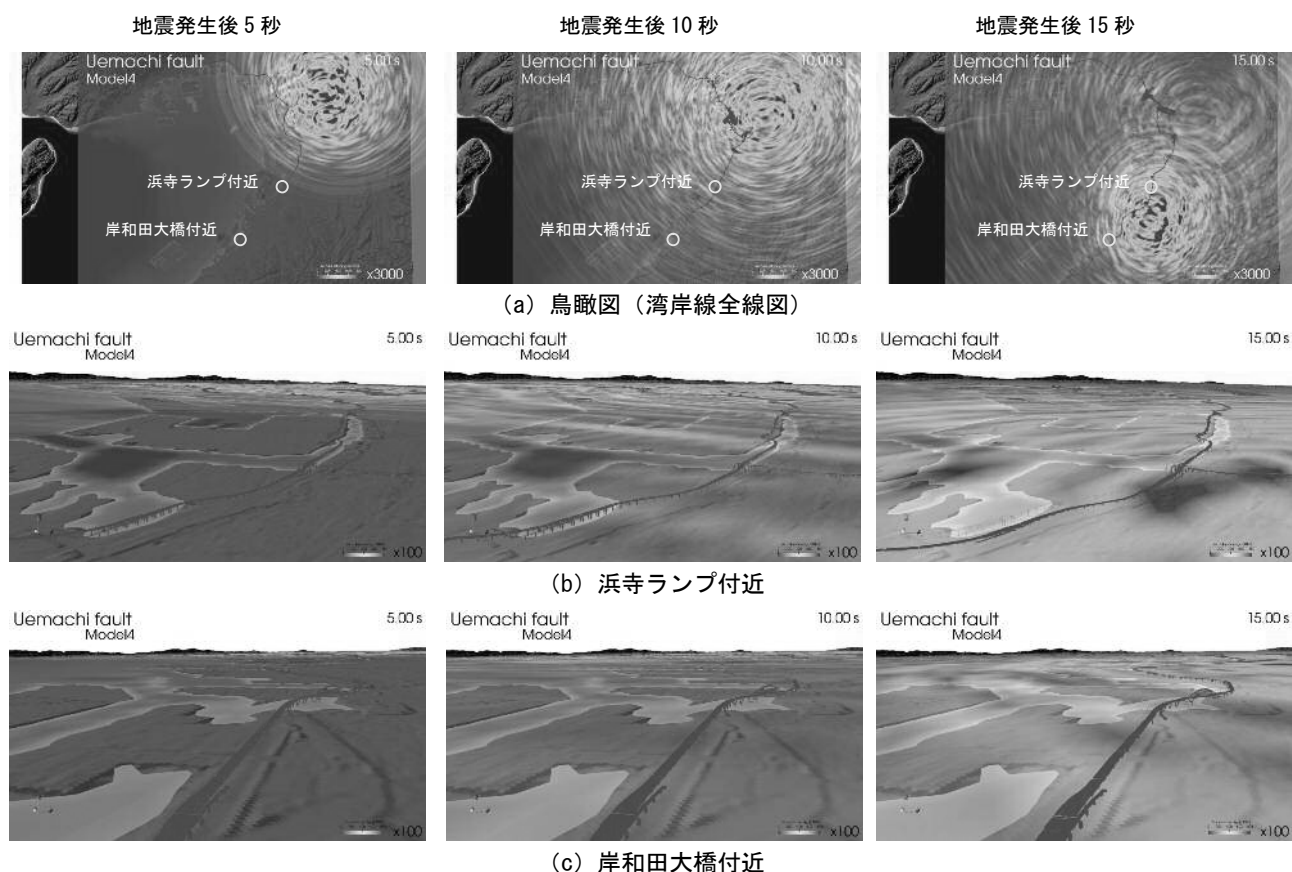


図-8 加速度の伝播状況及び構造物の応答変位（Case_1 上町断層地震）

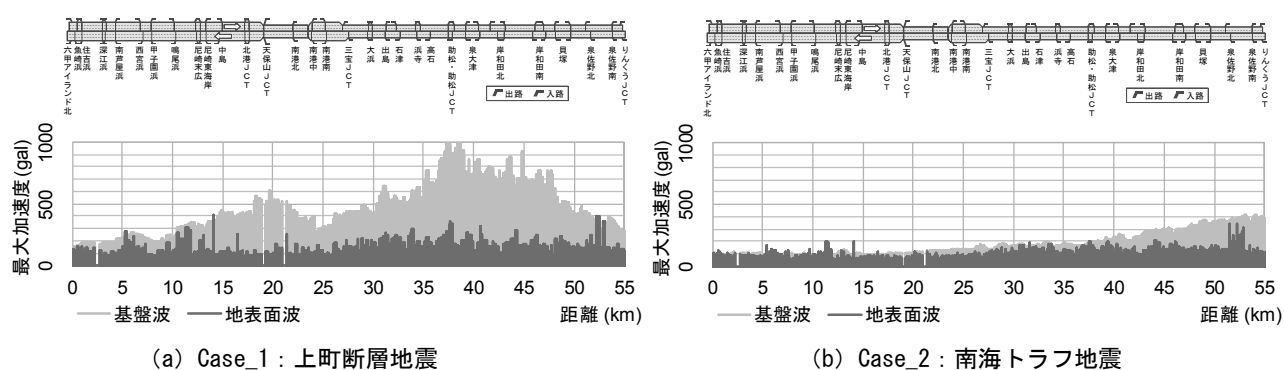


図-9 基盤及び地表面での最大加速度分布の比較

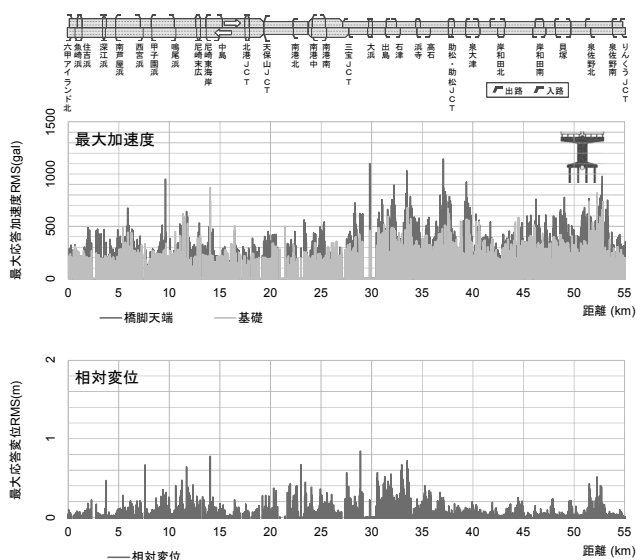
で研究段階にあり、今後解析モデルの広域化・高精度化とともに、解析結果の精度検証を行っていくものである。

(1) 加速度の伝播状況と橋梁の応答変位

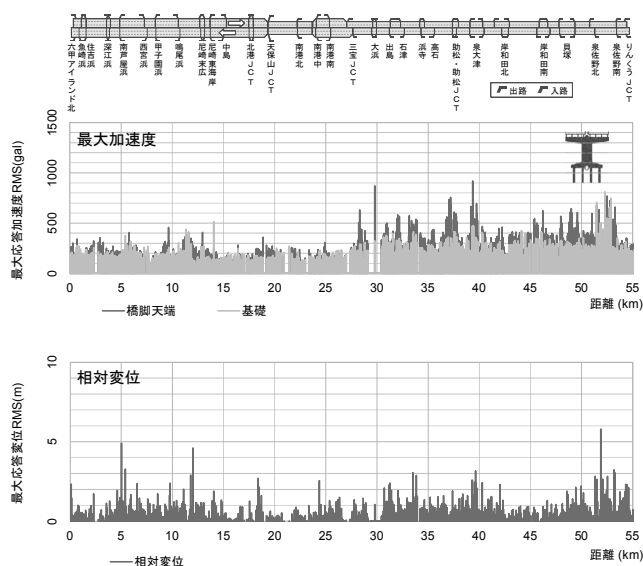
図-8に加速度の伝播状況と橋梁の応答変位の一例として、上町断層の破壊に伴う加速度の伝播状況と構造物の応答変位を示す。上町断層北部に設定した破壊開始点から南方向に地震動が伝播していき、地震動の伝播に伴い橋梁の応答変位が増大している状況が確認できる。

(2) 基盤及び地表面での最大応答加速度

図-9に基盤及び地表面での最大加速度分布の比較を示す。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

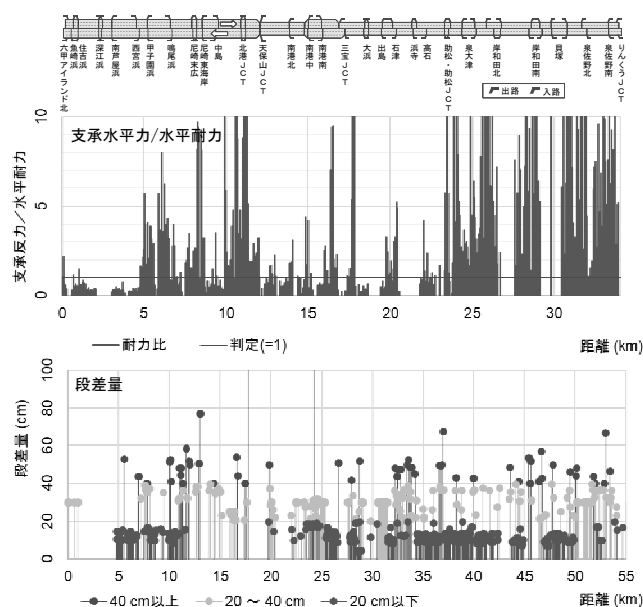


(a) Case_1：上町断層地震

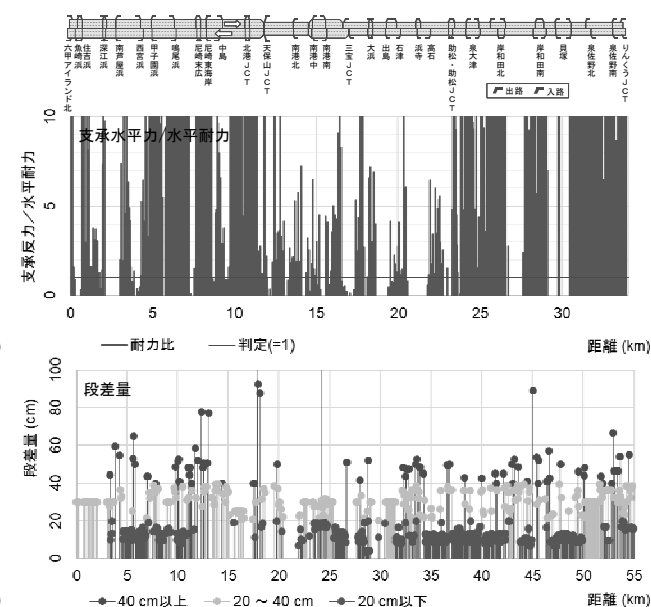


(b) Case_2：南海トラフ地震

図-10 基礎及び橋脚天端での最大加速度分布，相対変位分布の比較



(a) Case_1：上町断層地震



(b) Case_2：南海トラフ地震

図-11 支承の最大水平力及び伸縮継手部の段差量の比較

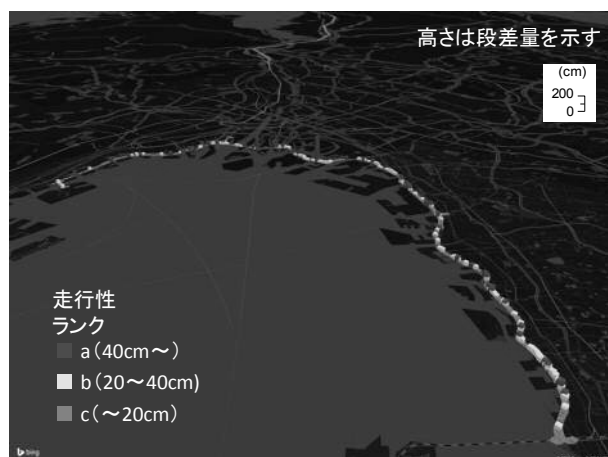
400gal程度と大きな差は生じなかった。

(3) 橋脚天端及び基礎位置での最大応答加速度

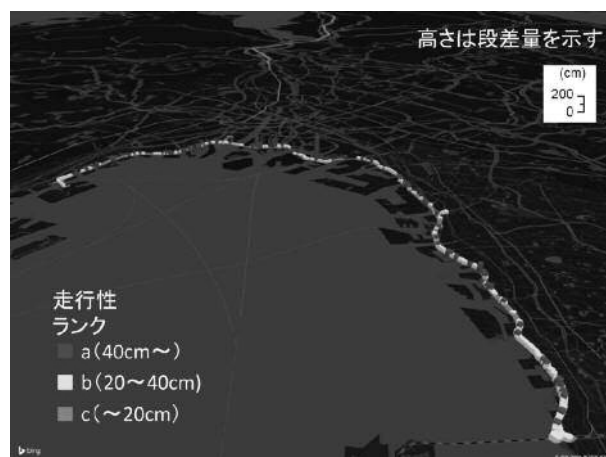
橋脚天端と基礎の最大応答加速度，橋脚天端と基礎の最大相対変位の分布図（水平2成分の自乗和平方根）を図-10に示す。上町断層地震では，最大応答加速度は南側でより大きな加速度となる傾向が見られる。大浜や泉大津付近で橋脚天端の加速度が1000gal程度となっていることがわかる。一方，最大相対変位は，相対変位0.5mを超えるような箇所が路線全体に分布しており，大浜付近で0.8m程度の相対変位が生じている。

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が，天保山JCT付近で1.4m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



(a) Case_1：上町断層地震



(b) Case_2：南海トラフ地震

図-12 走行性判定結果の比較

に基づく危険度評価ができる可能性を示した。

(4) 伸縮継手部の段差量

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図-11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¹⁷⁾。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-11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-12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した。

5. まとめ

本研究では、上町断層を震源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。

- (1) 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。

表-5 被災度評価判定表¹⁸⁾

被災度判定区分	ランク		定義
耐荷力	As	落橋	落橋した場合
	As	大被害	耐荷力の低下に著しい影響のある損傷を生じており、落橋など致命的な被害の可能性がある場合
	B	中被害	耐荷力の低下に影響のある損傷であるが、余震・活荷重などによる被害の進行がなければ、当面の利用が可能な場合
	C	小被害	短期間には耐荷力低下に影響のない場合
	D	被害なし	耐荷力に関して特に異常が認められない場合
走行性	a	通行不可	走行できない場合
	b	通行注意	異常は認められるが、走行できる場合
	c	被害なし	走行性に関して特に異常が認められない場合
復旧性	α	残留変形大	残留変形が大きく、下部構造の撤去・再構築も含めた本復旧の検討が望ましい。例えば橋脚の残留傾斜としては1/100(rad)程度が目安となる。
	β	残留変形小	補修・補強による本復旧が可能な残留変位に収まっている

築した。

- (2) 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。
- (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。
- (4) 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結果から、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。

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、表-5

に示すような被災度判定表¹⁸⁾を参考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おり、各橋脚断面の応答ひずみ値等を抽出することで橋脚の損傷程度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) 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。
- 2) 吉野 廣一、野中 哲也、本橋 英樹、金治 英貞、鈴木 威、ハツ元 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) ハツ元仁、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) 松下麗菜、篠原聖二、馬越一也、中村真貴、本橋英樹、服部匡洋：広域道路ネットワークにおける地震応答シミュレーションの実現可能性に関する検討、地震工学研究発表会、2017。
- 5) 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。
- 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－、地震 第2輯、VOL.50, No.1, 日本地震学会, pp.129-150, 1999。
- 8) 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。
- 9) 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。
- 10) 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。
- 11) 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。
- 12) 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。
- 13) 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。
- 14) 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>
- 15) 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。
- 16) 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。
- 17) 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。
- 18) 日本道路協会：道路震災対策便覧(震災復旧編), 2004。