

地震被害シミュレーションによる異なる想定地震動における広域道路ネットワークの被災度評価に関する検討

中村 真貴¹・馬越 一也¹・服部 匡洋²・大石 秀雄³・篠原 聖二⁴・
高田 佳彦⁴・西岡 勉⁴

¹正会員 博（工） 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）

²正会員 博（工） 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）

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）

⁴正会員 博（工） 阪神高速道路株式会社（〒530-0005 大阪市北区中之島3-2-4）

1. はじめに

阪神高速道路株式会社（以下、阪神高速と称す）では阪神高速グループビジョン2030¹⁾に掲げる「最高の安全と安心を提供する阪神高速」の実現に向けての一環として、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検討を進めている。近年、南海トラフ地震に代表される海溝型地震や上町断層帯地震等の都市直下型地震などの発生が懸念されている。1995年兵庫県南部地震で一度大きな被災経験を持つ阪神高速においては兵庫県南部地震時に生じた落橋のような大きな損傷を生じさせないのはもちろんのこと、震災後に阪神高速道路ネットワークが緊急輸送路として機能できるように限られた損傷状態に留めるような構造性能を確保することが必要である。また、阪神高速では積極的に耐震補強対策を実施しており、現時点で想定される地震動に対しては十分な安全性能を有するまでに至っている。しかしながら、2011年東北地方太平洋沖地震での巨大津波や、2016年熊本地震での震度7クラスの地震連続発生など、従来の想定を超えるような事象が道路ネットワークへ与える影響は不明である。したがって、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なく、様々な震源断層や破壊パターンにおける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延長260kmに及ぶ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。さらに、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、相応の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。さらに、阪神高速道路湾岸線約55kmの区間を対象とした、南海トラフ地震および上町断層帯地震による広域道路ネットワークの地震動シミュレーションを実施し、被災度評価を行う検討を行った^{4),5)}。

本検討では湾岸線約55kmに、新たに3号神戸線、13号東大阪線、16号大阪港線を加えた区間を対象とする地震被害シミュレーションを実施する。さらに、新たに想定地震動として、過年度検討^{4),5)}とは断層の破壊開始点が異なる上町断層帯地震や有馬一高槻断層帯地震、1995年兵庫県南部地震の再現地震動による被災度評価の検討を行う。より広域の道路ネットワークを対象とし、様々な震源断層や破壊パターンにおける地震被害シミュレーションを実施するこ

とで、広域道路ネットワークの防災・減災対策を行う上で必要となる被災度評価の可能性を検討する。

2. 解析手法の概要

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。深層地盤応答解析は広帯域ハイブリッド法^{6)・8)}により計算を行う。広帯域ハイブリッド法では、工学的基盤波の長周期成分を剛性マトリックス法⁶⁾、短周期成分を統計的グリーン関数法^{7)・8)}によって求め、マッチングフィルター処理により波形合成を行う。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、三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、地盤構造の三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。現状では、レベル2の地震応答解析プログラムYUSAYUSA⁹⁾を用いて一次元逐次非線形解析を行っている。今後は、三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) 構造物地震応答解析

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二方向（NS・EW）と鉛直一方向の計三方向の地震波を、各橋脚位置にそれぞれ位相差を考慮して入力す

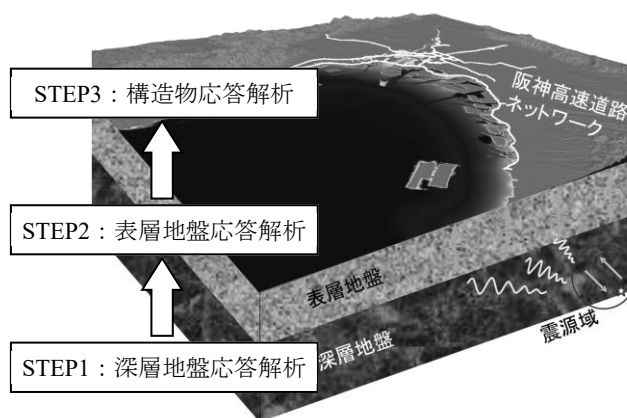


図-1 地震応答シミュレーションの方法

表-1 深層地盤応答の方法

フェーズ	解析方法と特徴	適用
F1-4	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	
F1-3	ハイブリッド法 (統計的グリーン関数法+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。	○
F1-2	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	
F1-1	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	

表-2 表層地盤応答の方法

フェーズ	解析方法と特徴	適用
F2-3	有限要素法（DACSAR, FLIP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	
F2-2	逐次非線形解析（YUSAYUSA等） ・大ひずみでも適用可能 (全応力解析では液状化は考慮不可) ・周波数特性の考慮が複雑 ・1次元モデル	○
F2-1	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	

表-3 構造物モデルへの地震動入力方法

フェーズ	解析方法と特徴	適用
F3-3	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	○
F3-2	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	
F3-1	代表同一波形を一様に入力	

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、水平二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^{10)・11)}を適用する。

3. 想定地震動と解析モデル構築の概要

(1) 想定地震動の概要

過年度検討⁵⁾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想定地震動としている。さらに本検討では上記2つの地震動に加え、破壊パターンが異なる上町断層帯地震を1ケース、有馬－高槻断層帯による内陸活断層型地震を1ケース、1995年兵庫県南部地震の再現地震動を1ケースの合計5ケースの地震動と対象とした。過年度検討⁵⁾で想定した上町断層帯は断層の北側から破壊が始まるケースであったため、本検討では断層の南側から破壊が始めるケースを追加した（以下、北側から破壊が始まるケースを北側ケース、南側から破壊が始まるケースを南側ケースと称す）。

図-2に上町断層帯、有馬－高槻断層帯、1995年兵庫県南部地震再現の震源域分布を、図-3に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、上町断層帯と有馬－高槻断層帯は大阪府自然災害総合防災対策検討¹²⁾を基に、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。また1995年兵庫県南部地震の再現には、山田¹⁴⁾の強震動シミュレーションでのパラメータを参考に設定した。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」¹⁵⁾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年版のJ-SHIS情報¹⁶⁾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、上町断層帯と有馬－高槻断層帯、1995年兵庫県南部地震再現は400km×400kmを100mメッシュで設定した。表-6に本検討で想定する地震動の一覧を示す。前述したように、上町断層帯地震（北側ケース）と南海トラフ地震は過年度検討⁵⁾で想定した地震動である。

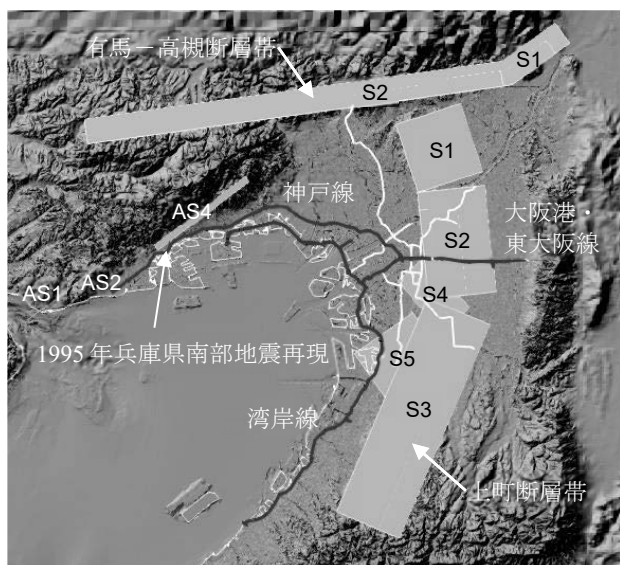


図-2 対象路線と内陸直下型地震の震源域分布

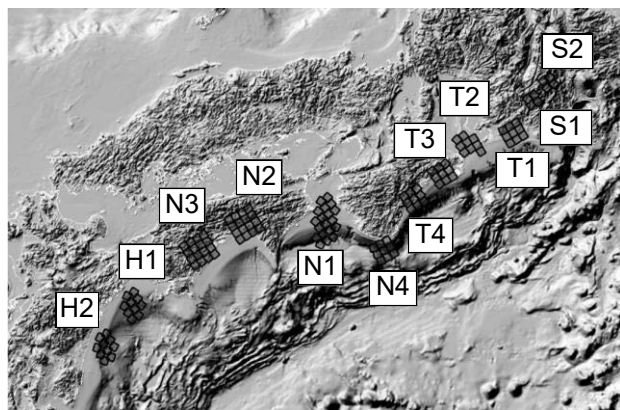


図-3 南海トラフ地震の震源域分布

表-4 有馬－高槻断層帯の断層諸元

項目	単位	有馬－高槻断層帯	
		S1	S2
		天王山断層	有馬－高槻構造線・有野－淡河断層
地震モーメント M_0	($N \cdot m$)	9.11E+17	3.28E+19
モーメントマグニチュード M_w		5.9	6.9
断層長 L	(km)	8	48
断層幅 W	(km)	16	16
走向角 θ	(°)	N234E	N262E
傾斜角 δ	(°)	80	80
すべり角 λ	(°)	0	0
平均すべり量 D	(m)	0.2	1.2

表-5 1995年兵庫県南部地震再現の断層諸元¹⁶⁾

項目	単位	1995年兵庫県南部地震再現		
		AS1 73°N 114°E	AS2 73°N 112°E	AS4 73°N 114°E
地震モーメント M_0	($N \cdot m$)	3.40E+17	1.30E+18	2.30E+18
モーメントマグニチュード M_w		5.6	6.0	6.2
断層長 L	(km)	4.8	8	12.8
断層幅 W	(km)	4.8	6.4	8
走向角 θ	(°)	N53E	N53E	N223E
傾斜角 δ	(°)	90	90	85
すべり角 λ	(°)	0	0	0
平均すべり量 D	(m)	0.2	1.2	1.2

表-6 想定地震動一覧

解析ケース	対象地震動	実施
No.1	1995年兵庫県南部地震再現	本検討
No.2	上町断層帯地震（北側ケース）	過年度 ⁵⁾
No.3	上町断層帯地震（南側ケース）	本検討
No.4	有馬－高槻断層帯地震	本検討
No.5	南海トラフ地震	過年度 ⁵⁾

(2) 解析モデル構築概要とモデル化範囲

阪神高速道路を対象とした広域道路ネットワークの構造物モデルは大規模になるため、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）¹⁷⁾や関西圏地盤情報データベース¹⁸⁾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。

本検討では、阪神高速道路全線約260km（約9000基の橋脚）のうち、湾岸線約55km（約1800基の橋

脚），神戸線約40km（約1400基の橋脚），大阪港・東大阪線約20km（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，支承，基礎の解析モデルの構築方法を表-7に示す。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

表-7 構造物モデルの構築方法

対象	フェーズ	モデル化の方法	備考
上部構造	F-a-4	シェル・ソリッドモデル	目標
	F-a-3	ファイバーモデル	
	F-a-2	ファイバーモデル（グルーピング）	
	F-a-1	線形梁モデル	現状
下部構造	F-b-4	シェル・ソリッドモデル	目標
	F-b-3	ファイバーモデル	
	F-b-2	ファイバーモデル（グルーピング）	現状
	F-b-1	線形梁モデル	
支承	F-c-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
	F-c-2	鋼製支承：固定・可動の支持条件 分散支承・免震支承：等価剛性	
	F-c-1	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
基礎・地盤系	F-d-3	基礎構造＋分散ばねモデル	目標
	F-d-2	S-Rモデル（線形ばね）	現状
	F-d-1	固定	

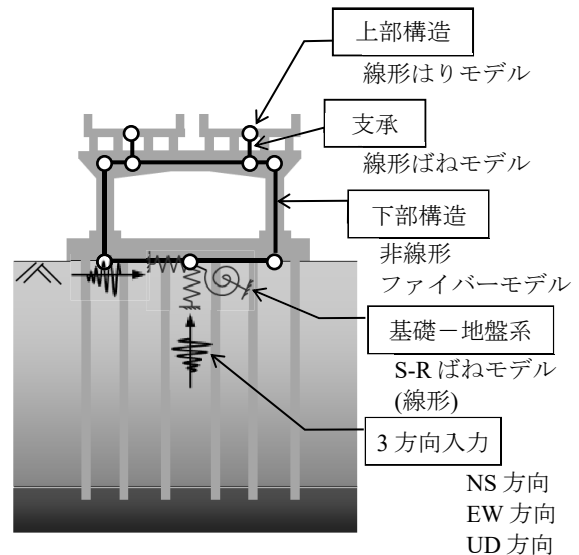


図-4 構造物モデルの構築方法

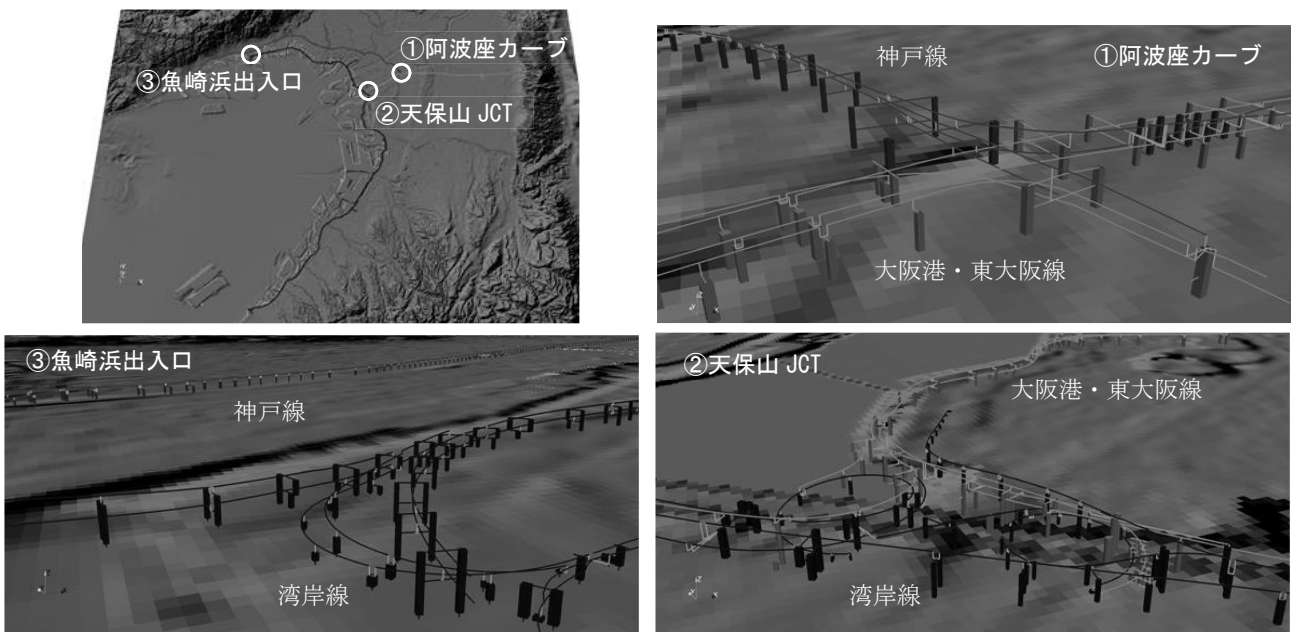


図-5 構造物モデルの例

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SeanFEM¹⁹⁾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，構造物モデルの一例を図-5に示す。

4. シミュレーション結果

阪神高速道路湾岸線約55km，神戸線約40km，大阪港・東大阪線約20kmを対象とした地震応答シミュレーションの結果を示す。また，本検討では南海トラフ地震の地震応答シミュレーションは湾岸線のみを対象とした。

(1) 地震応答シミュレーションの結果

図-6に各想定地震の地震応答シミュレーションにより得られた橋脚天端と基礎の相対変位の三次元分布を示す。ここで示す兵庫県南部地震再現は，再現した波形を入力地震動とした結果であり，被災当時の地震被害の再現ではない。兵庫県南部地震再現や有馬一高槻断層帯は震源に近い神戸線や湾岸線の北西側の路線での相対変位が大きい。それに対し，上

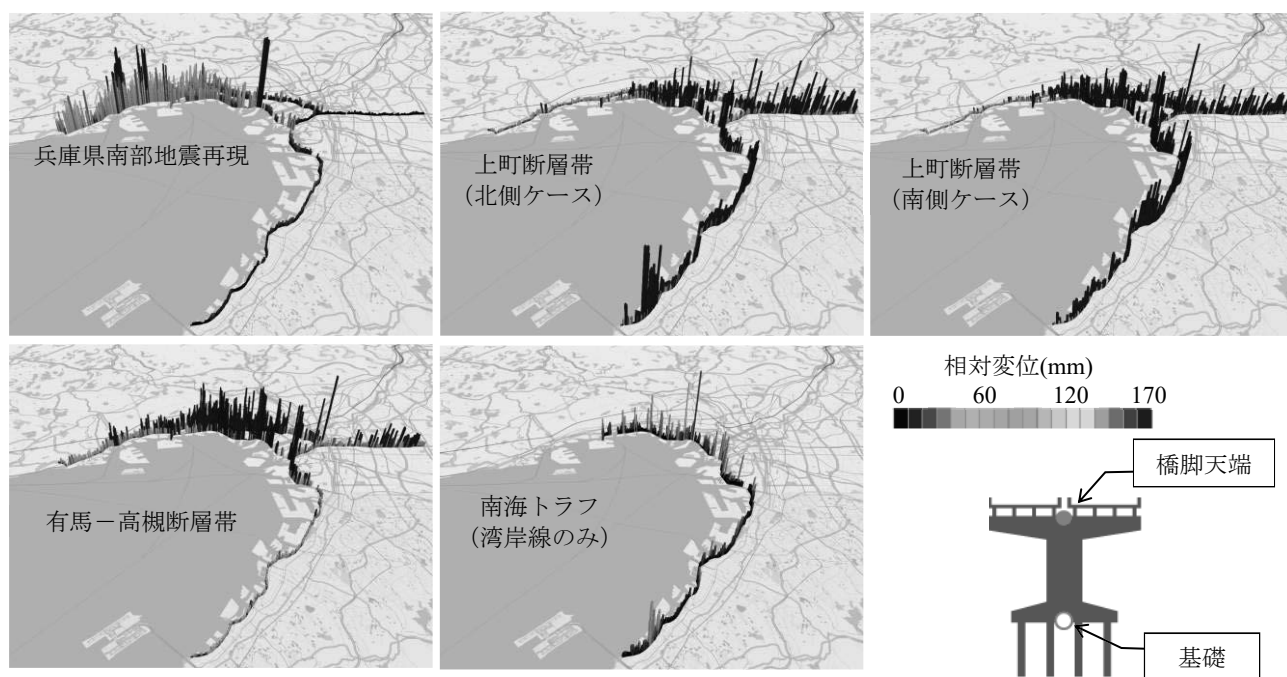


図-6 橋脚天端と基礎の相対変位（三次元分布）

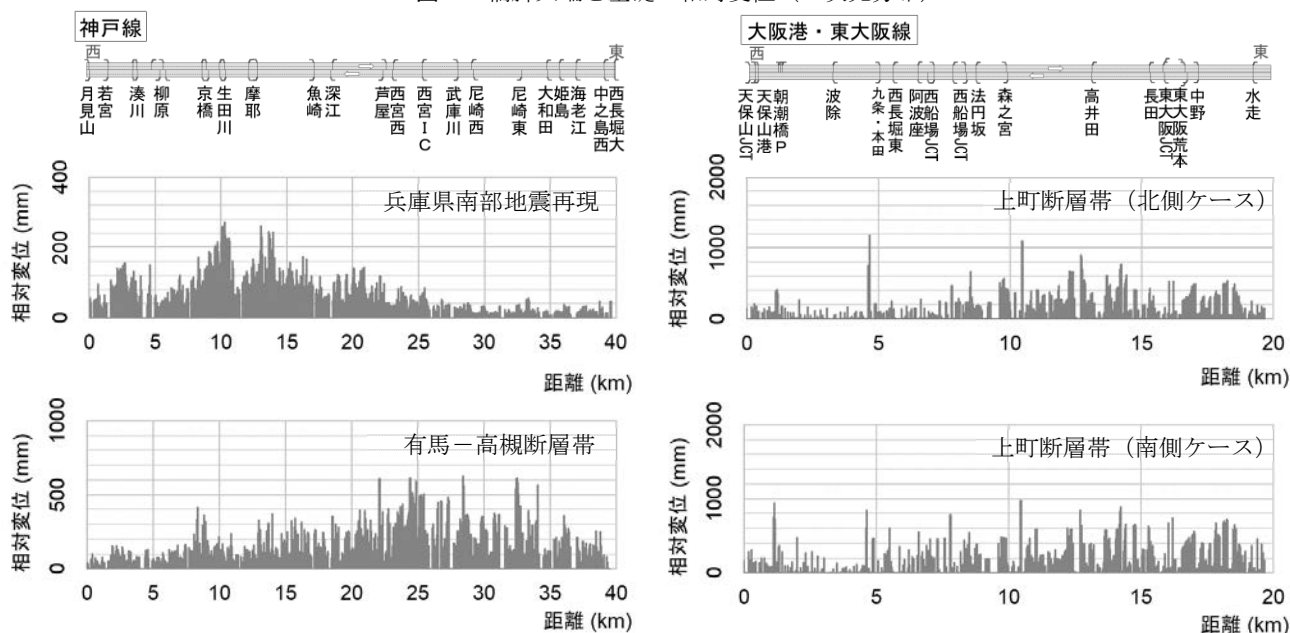


図-7 橋脚天端と基礎の相対変位（路線単位分布）

町断層帯では断層と並行する湾岸線や、神戸線の東側（大阪側）、断層を横断する大阪港・東大阪線の相対変位が大きい。南海トラフ地震の相対変位は、他の内陸活断層型地震と比較して小さい。また図-7に1995年兵庫県南部地震再現再現と有馬－高槻断層帯の神戸線の相対変位と、上町断層帯の北側ケースと南側ケースの大阪港・東大阪線の相対変位を示す。神戸線約40kmの区間では、1995年兵庫県南部地震再現再現は震源断層に近い西側の相対変位が大きく、有馬－高槻断層帯は東側の相対変位が大きいことがわかる。また、大阪港・東大阪線約20kmの区間では、上町断層帯の北側ケースと南側ケースで相対変位に大きな差異はないことがわかる。

(2) 被災度評価概要

地震応答解析結果をもとに各橋脚に対して、表-8に示す耐荷力、走行性、復旧性の項目についてランクをつけ、その被災度ランクのマッピングを行った。

耐荷力の被災度評価はAsからDまでの4つのランクを設ける。外観損傷に対応するように設定した最大ひずみ、最大せん断力を閾値として、地震応答解析で得られた最大応答ひずみ、最大せん断力によりランクを付ける。

走行性の被災度評価はaからcまでの3つのランクを設け（a：通行不可，b：通行注意，c：被害なし）、伸縮継手部に発生する段差量によりランクを付ける。段差量が40cmより大きい場合はa，20～40cmはb，20cm未満はcとした。伸縮継手部に発生する段差量については、支承タイプ毎に水平耐力を設定し、耐力に達する場合に支承が破壊すると判定

表-8 被災度評価の判定

被災度判定区分	ランク	定義
耐荷力	As	落橋
	A	大被害
	B	中被害
	C	小被害
	D	被害なし
走行性	a	通行不可
	b	通行注意
	c	被害なし
復旧性	α	残留変形大
	β	残留変形小

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。支承タイプ毎の水平耐力は既往の水平耐荷力実験の結果^{20),21)}より設定することとし、実験結果の平均値を鋼製支承，ゴム支承の水平耐力とした。鋼製支承の水平耐力は1.54Rd，ゴム支承の水平耐力は1.0Rdとした（Rd：死荷重反力）。

復旧性の被災度評価はα，βの2つのランクを設け、残留変位によりランクを付ける。残留変位算出は代表橋脚のプッシュオーバー解析から算出した降伏変位を用いて行うこととする。

(3) 想定断層ごとの被災度評価比較

前述の被災度評価に基づき、得られた地震応答シミュレーション結果から各想定地震動の被災度評価を行う。図-8に耐荷力ランク，図-9に走行性ランク，図-10に復旧性ランクの三次元分布を図示する。各被災度ランクを俯瞰すると、1995年兵庫県南部地震

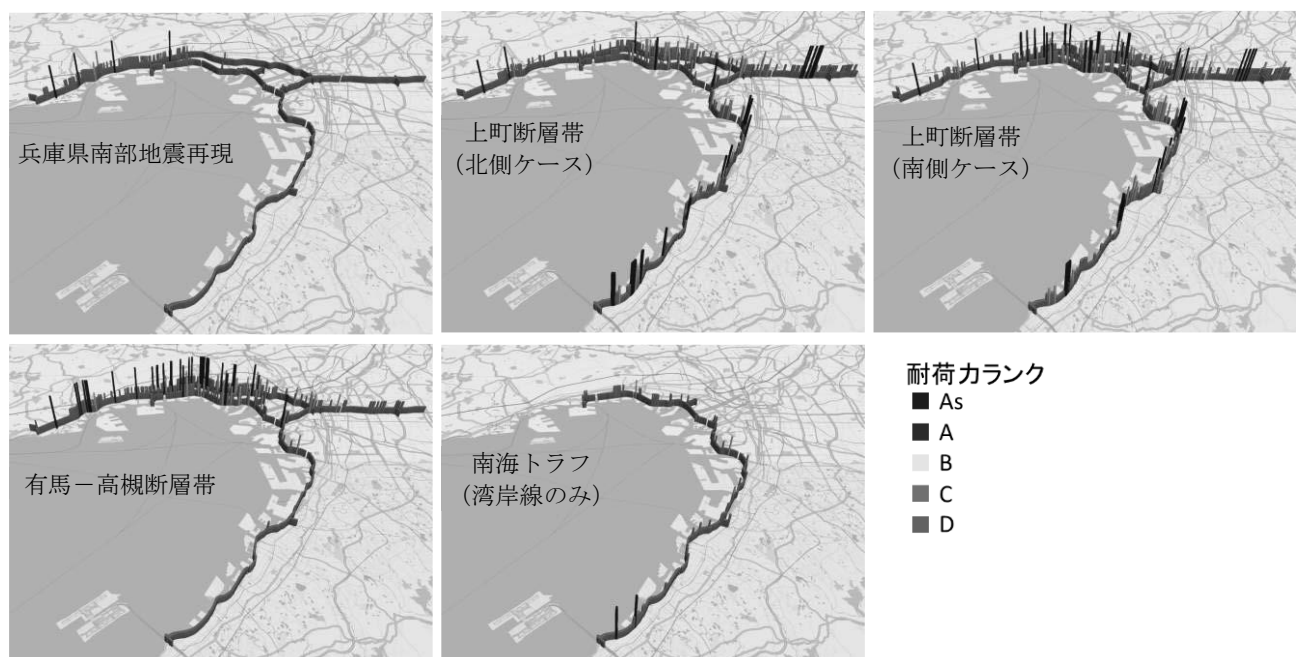


図-8 耐荷力ランク

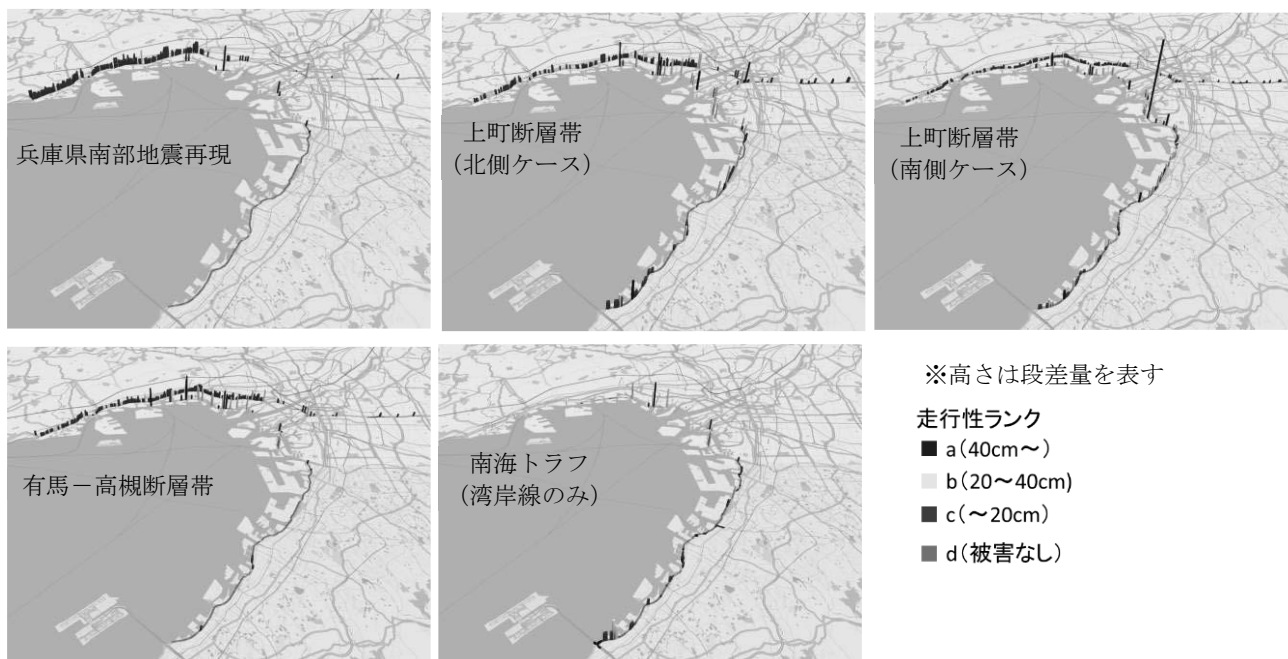


図-9 走行性ランク

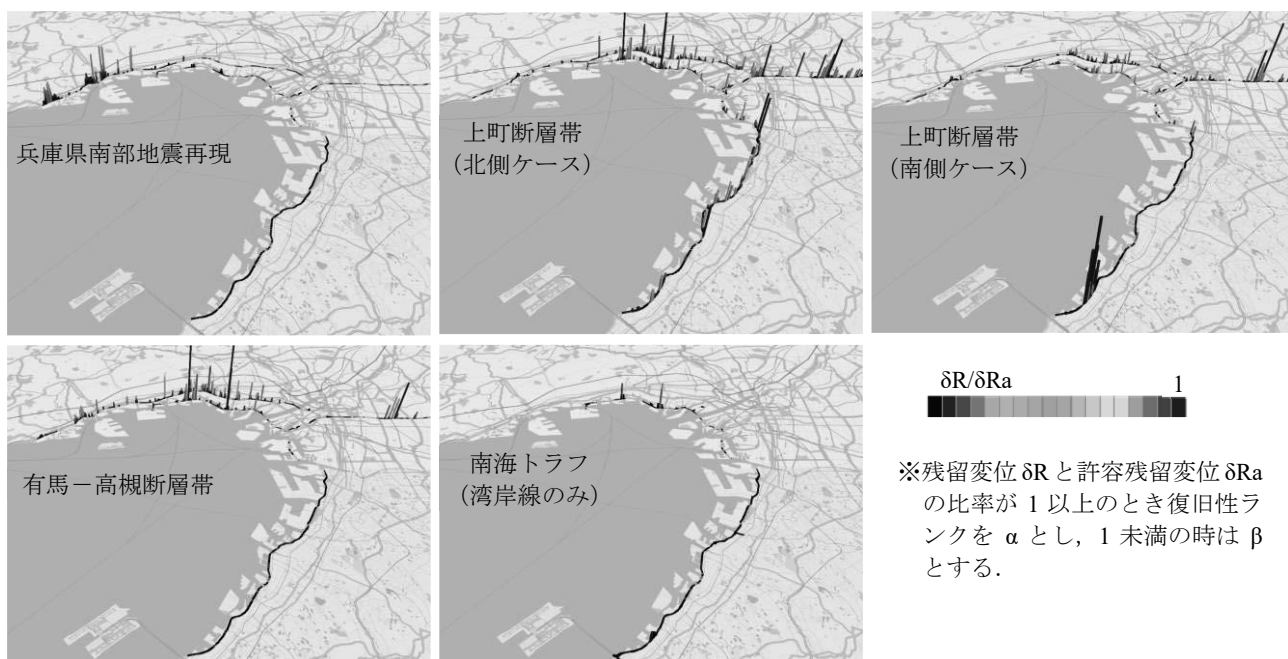


図-10 復旧性ランク

再現や有馬-高槻断層は被災度が高い箇所が、湾岸線北側や神戸線などの北西部に集中している。一方、上町断層帯の北側ケースと南側ケースでは、耐荷力ランクや走行性ランクの被災度の高い箇所が解析対象範囲の全体に分布していることがわかる。さらに復旧性ランクでは南側ケースでは湾岸線南側と大阪港・東大阪線東側の一部に被災度が高い箇所が見られるのに対し、北側ケースでは湾岸線全体、神戸線東側、大阪港・東大阪線全体に被災度が高い箇所が分布している。南海トラフ地震の被災度は他の内陸活断層型地震と比較して小さい。

以上のように、本検討で実施した地震応答シミュレーションでは、対象となる広域道路ネットワーク全体の地震時挙動や地震による被災度を3Dマップ等に表示することで俯瞰的に見ることができる。

5. まとめ

本検討では過年度実施した湾岸線約55kmに、新たに3号神戸線、13号東大阪線、16号大阪港線を加えた区間を対象と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実施した。さらに、想定地震動のバリエーションを追加し、その地震時挙動や被災度評価について比較した。これにより、異なる震源断層や断層破壊のパターンが違う地震動に対して俯瞰的に評価できるという、広域道路ネットワークの全体解析をメリットを示唆できた。

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で研究段階にあり、今後も引き続き、構造物モデルの広域化・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。

謝辞：本研究は、阪神高速道路株式会社と株式会社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道路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。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，第37回地震工学研究発表会，土木学会地震工学委員会，2017。
- 5) 服部匡洋，安藤高士，大石秀雄，馬越一也，中村真貴，篠原聖二，高田佳彦，西岡勉：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，第21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，2018。
- 6) 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。
- 7) 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。
- 8) 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。
- 9) 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。
- 10) 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。
- 11) 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。
- 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) 山田雅行，平井俊之，岩下友也，釜江克宏，入倉孝次郎：兵庫県南部地震の震源モデルの再検討，日本地震学会講演予稿集，A14，1999。
- 15) 地震調査研究推進本部地震調査委員会：震源断層を特定した地震の強震動予測手法（「レシピ」），平成28年12月修正版，2016。
- 16) 国立研究開発法人防災科学技術研究所：J-SHIS 地震ハザードドステーション，<http://www.j-shis.bosai.go.jp/>，2017。
- 17) 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。
- 18) 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>
- 19) 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。
- 20) 阿部雅人，吉田純司，藤野陽三，森重行雄，鶴野禎史，宇佐美哲：金属支承の水平終局挙動，土木学会論文集No. 773/1-69，土木学会，pp.63-78，2004。
- 21) 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。