

地震被害シミュレーションによる兵庫県南部地震における 構造物応答の再現と耐震補強効果に関する検討

服部 匡洋¹・大石 秀雄¹・中村 真貴²・馬越 一也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（〒530-0005 大阪市北区中之島3-2-4）

1. 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うとともに、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南海トラフ地震や都市直下型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^{1)~3)}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出入口・ジャンクション間の区間単位で評価するものである。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することで、様々な震源域を想定した地震動に対し、予め路線単位または橋梁単位の損傷状況を把握でき、耐震補強の優先度の高い部材や橋梁、路線を抽出することができるとともに、地震直後に実施する緊急点検においても、地震応答シミュレーションにより得られた被災度判定分布を踏まえ、重点的に着目すべき路線、橋梁を明らかにできるなど、耐震対策や緊急点検計画の合理化に役立てられる。また、地震応答シミュレーションの結果に基づき、地震後につけ違い部で生じる段差量を推定することで、土嚢や敷鉄板などの資機材配置の最適化に繋がると考えられる。

このような背景から、著者らは、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第一段階として、図-1に示す通り阪神高速道路湾岸線の約55 kmの区間を対象に上町断層を震源域とする地震応答シミュレーションを行い、地震発生後の橋脚の耐荷力評価、支承部の段差量に基づいた走行性評価の可能性を示した²⁾。一方で、橋脚の被災度判定には軸方向鉄筋ひずみを、支承部の段差量推定には支承耐力を閾値として判定を行っているが、レベル2地震動を設計地震動として鋼板巻立て補強や支承取替などの耐震補強が実施されている区間であるにも関わらず、一部ではレベル2地震動よりも小さな入力地震動で橋脚や支承に損傷が生じる結果となるなど、耐震補強設計で想定する損傷程度と乖離が見られたことから、シミュレーションにおける閾値の設定等に課題を残していた。

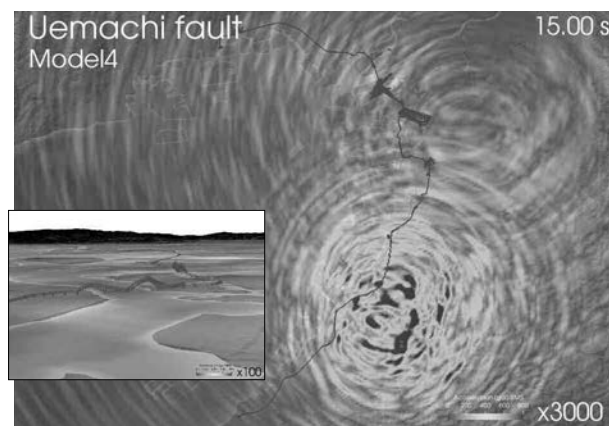


図-1 阪神高速湾岸線55kmを対象とした
地震被害シミュレーション

そこで、本稿で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精度検証に向けた取り組み^{4)~8)}の一環として、1995年兵庫県南部地震の地震動の作成及び構造物応答解析を実施し、兵庫県南部地震における構造物被害の再現を試みた。兵庫県南部地震の再現にあたっては、より広域の地震応答シミュレーションが実施可能となるように湾岸線に加え、神戸線、東大阪線、大阪港線のモデルの広域化を図った。

また、阪神高速では兵庫県南部地震以降RC橋脚の鋼板巻立て補強をはじめとする耐震補強が実施されている。このような耐震補強を考慮した構造、すなわち現況の構造に対し兵庫県南部地震の地震動を作用させたときの下部構造の被災度の低減効果に関する検証を行った。

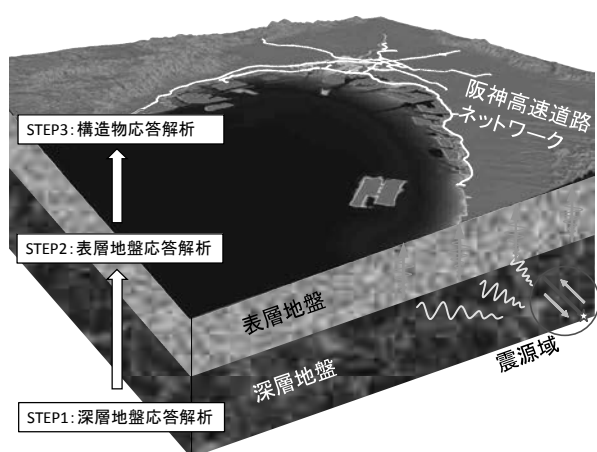


図-2 地震被害シミュレーションの方法

表-1 各ステップの解析手法及び解析モデル

(a) 解析手法

構造物 応答解析	各基礎位置へそれぞれの波形を入力する地動解析
表層地盤 応答解析	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
深層地盤 応答解析	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

(b) 解析モデル

上部構造	線形はりモデル
支承	鋼製支承: 固定・可動の支持条件 分散ゴム, 免震支承: グルーピングした等価剛性
橋脚	ファイバーモデル(グルーピング)
基礎ばね	S-Rモデル
基礎-地盤系	直近のボーリング位置と同じ値をそのまま使う

2. 地震被害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-2に示す通り、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。今後順次解析手法や解析モデルの精度レベルを向上させていく。



図-3 兵庫県南部地震震源モデル

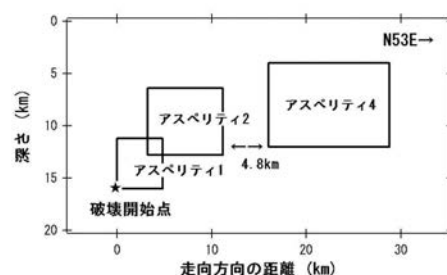


図-4 想定する破壊開始点及びアスベリティ

表-2 震源モデルの詳細パラメータ

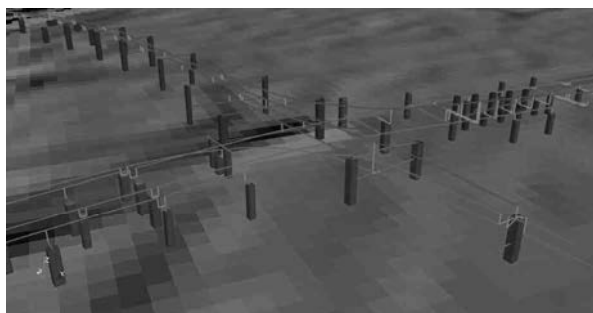
震源モデルの詳細パラメータ (野津(2007))			
断層名	アスベリティ1	アスベリティ2	アスベリティ4
南西端位置	34.616700 135.029400	34.635673 135.059231	34.688183 135.188025
平均走向角 $\theta(^{\circ})$	N53E	N53E	N233E
平均傾斜角 $\delta(^{\circ})$	90	90	85
平均すべり角 $\lambda(^{\circ})$	0	0	0
断層長 L(km)	4.8	8	12.8
断層幅 W(km)	4.8	6.4	8
断層面積 S(km ²)	23	51	102
断層上端深さ Z0(km)	3.0	3.0	3.0
地震モーメント(N・m)	3.40E+17	1.30E+18	2.30E+18
マグニチュードMw	5.6	6.0	6.2
平均すべり量(m)	0.4	0.7	0.7

3. 解析モデルの構築

現段階の解析手法及び解析モデルを表-1に示す。

(1) 深層地盤応答解析モデル

1995年兵庫県南部地震の再現にあたり，図-3，図-4に示す深層地盤応答解析は野津の再現解析⁹⁾で用いた山田の特性化震源モデル(神戸側部分)¹⁰⁾を用いた。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



(a) 阿波座カーブ付近



(b) 天保山JCT付近

図-5 構造物モデルの一例

表-3 橋脚断面グルーピング

断面	材質	形状	橋脚幅	モデル化	
グループ					
グループ①	鋼材	矩形	3m	ファイバー 断面	
グループ②			4m		
グループ③			5m		
グループ④		円形	—		
グループ⑤	コンクリート	矩形	2m		ファイバー 断面
グループ⑥			3m		
グループ⑦			4m		
グループ⑧			5m		
グループ⑨			6m		
グループ⑩		円形	3m		
グループ⑪			4m		
グループ⑫			6m		
グループ⑬	橋台			線形はり	

した。表-2にパラメータの詳細を示す。計算には統計的グリーン関数法を用いた。

(2) 表層地盤応答解析モデル

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¹¹⁾に基づき地盤定数を設定した。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，文献12)の比較検討の結果をもとに，「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²⁾。

(3) 構造物応答解析モデル

図-5に解析モデルの一例を示す。昨年度作成した湾岸線に加え，神戸線，北神戸線，大阪港線，東大阪線の構造物モデルの作成を行った。構造物モデルの総延長は約120kmとなり，総延長の約60%のモデル構築が完了している。

構造物応答解析では下部構造の橋脚材種，寸法に応じて表-3に示す13の断面グループに分類し，各グループの代表断面をファイバー要素に割り当てモ

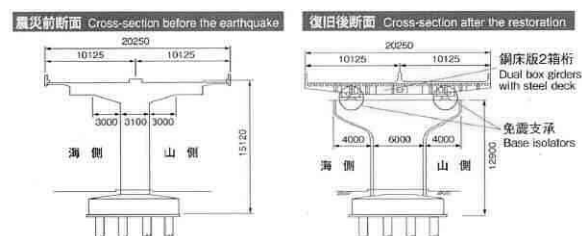


図-6 被災したピルツ橋脚と現況構造

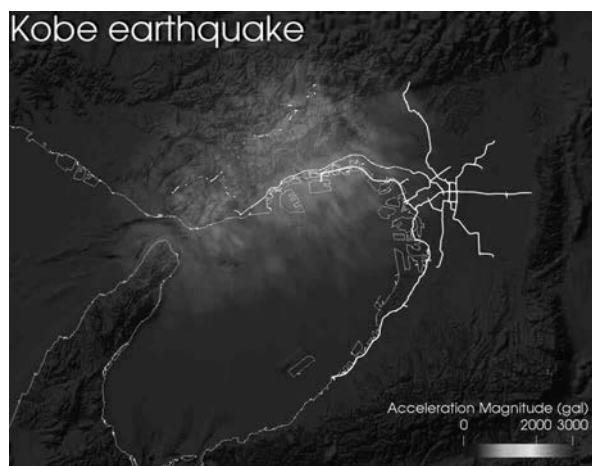


図-7 兵庫県南部地震再現での基盤波最大加速度

デル化している。兵庫県南部地震の再現を実施するにあたっては、兵庫県南部地震当時の実構造物に近い断面とするため、13の断面グループ(橋脚12種+橋台1種)から鋼製橋脚は充填コンクリートを、RC橋脚は補強巻立て部分を削除してモデル化した。また、図-6に示す通り、倒壊したピルツ式橋脚の区間については、図面を基に被災当時の精緻なファイバー断面を作成し、モデルに組み込むこととした。

4. 兵庫県南部地震の再現シミュレーション

兵庫県南部地震の再現シミュレーション結果について以降に示す。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) 深層地盤応答解析

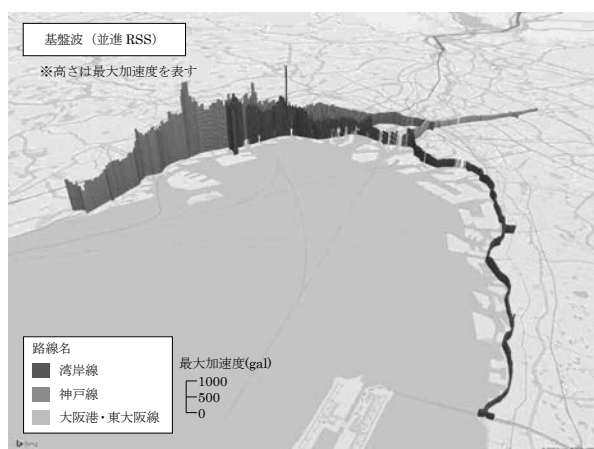
図-7に再現解析より得られた基盤波の最大加速度分布を示す。兵庫県南部地震の震源域に近い神戸線や湾岸線近傍で最大加速度が発生していることが確

認される。

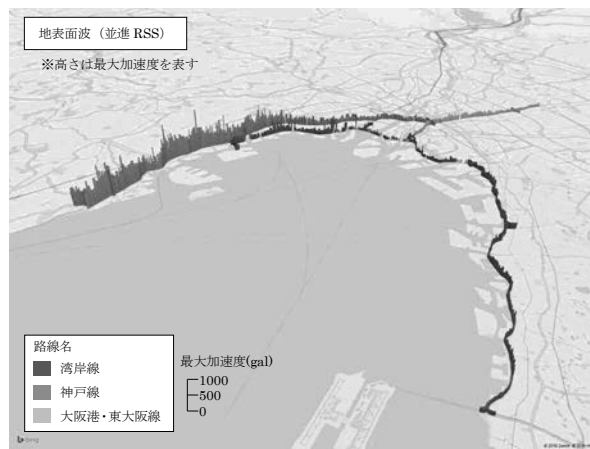
(2) 表層地盤応答解析

図-8に各橋脚位置における地表面波の最大加速度分布を、図-9には路線毎の基盤波及び地表面波分布を示す。神戸線では全域に渡り大きな地表面加速度が発生しており、構造物の被災状況を踏まえた兵庫県南部地震の全体的な特徴は捉えられた。生田川ランプ付近、摩耶ランプ～魚崎ランプでは1000galを超えるような大きな地表面加速度が生じた。また、湾岸線でも中島ランプより西側で最大600gal程度の地表面波が生じる箇所が複数あった。

図-10には、兵庫県南部地震発生時の観測記録と地震応答シミュレーションによる再現解析より得られた地表面加速度の比較を示す。ここで、観測記録には、阪神高速道路神戸線に最も近いと考えられる港湾地域強震観測観測¹³⁾の神戸事-S観測局で計測された観測記録を示す。また、再現解析結果として、神戸事-S観測局に近接する橋脚位置での地表面加速度を抽出した。神戸事-S観測局と再現解析における地表面加速度の抽出箇所は約330m離れている。また、図-11には観測記録と再現解析より得られた地

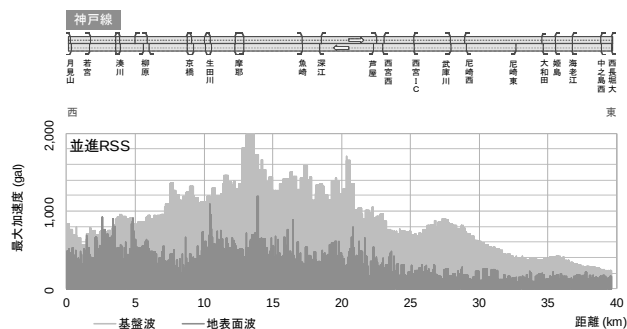


(a) 基盤波

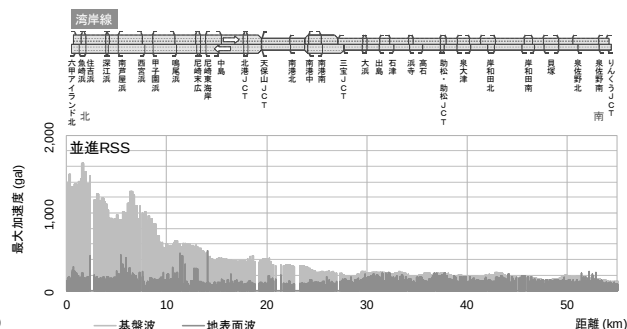


(b) 地表面波

図-8 橋脚位置における地表面波の最大加速度分布



(a) 神戸線



(b) 湾岸線

図-9 橋脚位置における地表面波の最大加速度分布

表面加速度のフーリエスペクトルを示す。図-11より、観測記録のうち、NS成分およびEW成分では周期1.5秒程度で卓越が見られる。再現解析では周期0.2秒前後での卓越があるものの、観測記録と同様に周期1.5秒程度での卓越が見られ、表層地盤の地震時の周期特性を比較的再現することができたといえる。しかし、図-10に示すように、観測記録のNS成分およびEW成分では、観測地点に地震動が到達してから5秒程度主要動が継続するが、再現解析では主要動が15秒程度継続しており、再現解析は観測記録に比べ地震動の継続時間を長く評価する結果となった。地震動の継続時間は深層地盤応答解析における震源モデルのパラメータ設定に起因すると考え

られ、地震動の更なる精度向上のため、異なるパラメータを設定した深層地盤応答解析を実施するなど、引き続き検討を進める予定である。

(3) 構造物応答解析

図-12に神戸線における下部構造の被災度分布の比較を示す。ここで、被害調査結果は1995年兵庫県南部地震直後に外観損傷から判定区分された結果を示す。また、被災再現解析では表-4に示す被災度判定方針に基づき外観損傷に対応する閾値を設定し、構造物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判定区分した結果を示している。被災度は文献14)を参考に5ランク(As:倒壊, A:大被害, B:

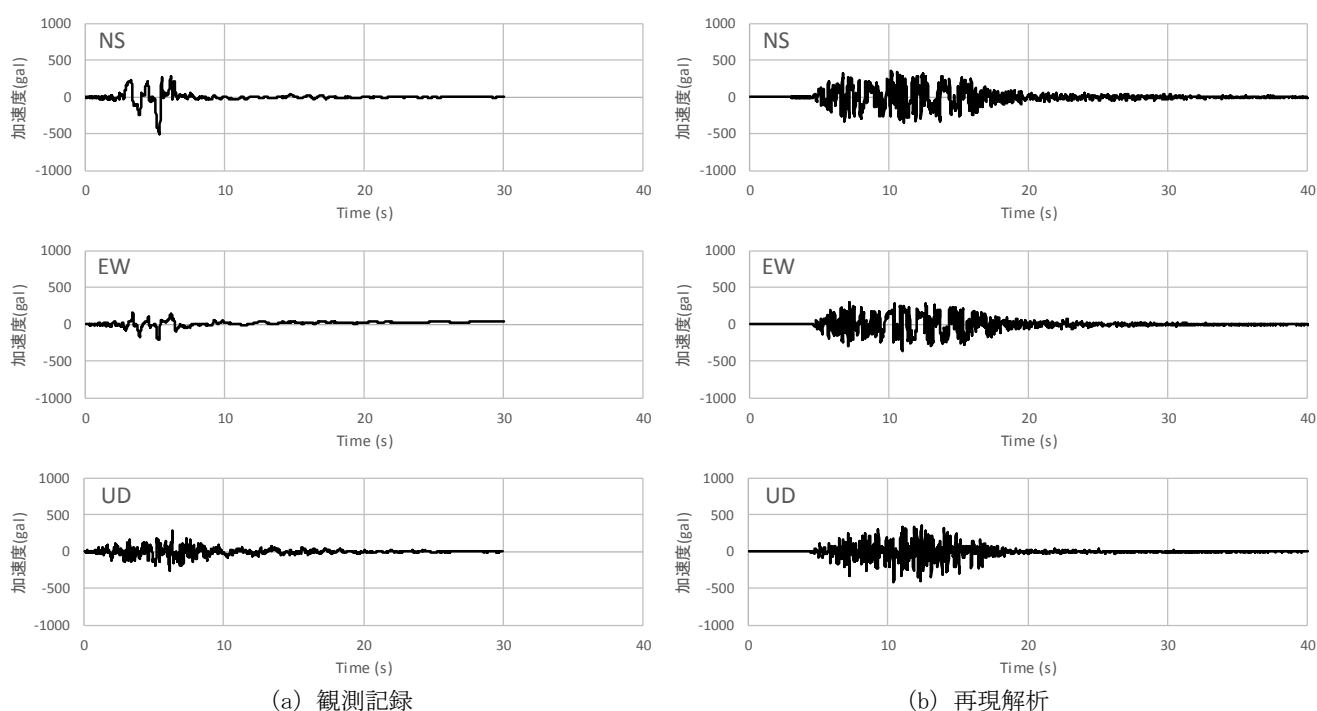


図-10 神戸事-Sでの観測記録と再現解析の地表面加速度の比較

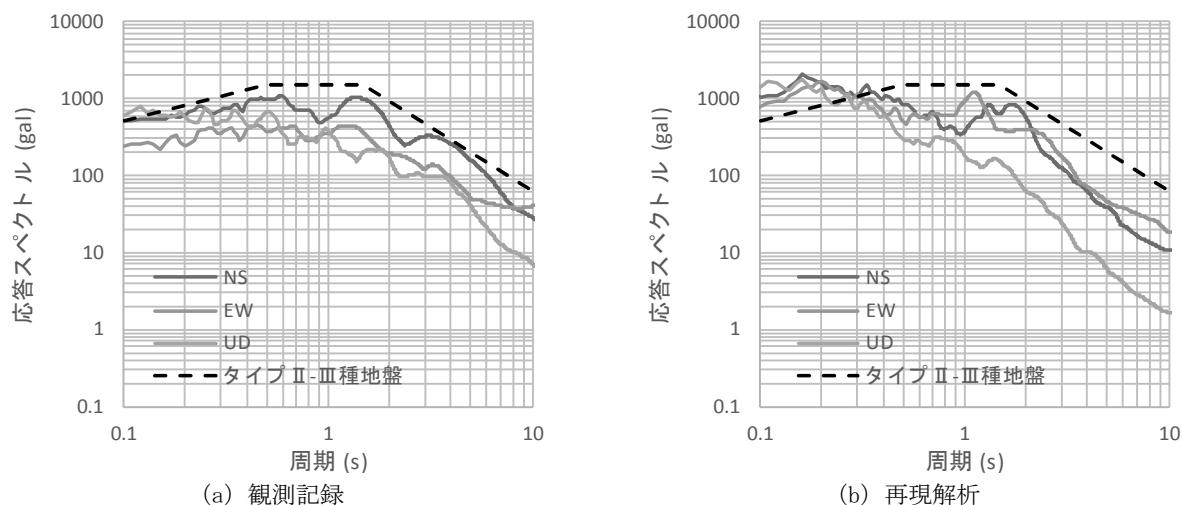


図-11 神戸事-Sでの観測記録と再現解析のフーリエスペクトルの比較

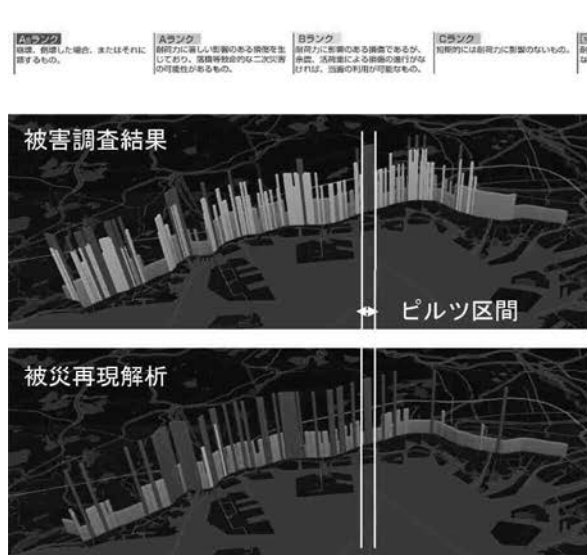


図-12 神戸線における被災度分布の比較
(下部構造)

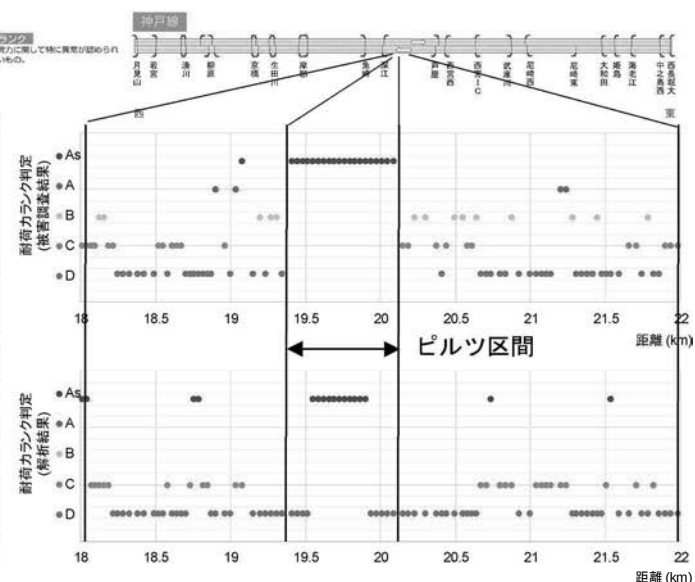


図-13 ピルツ区間周辺における被災度分布の比較

表-4 地震被害シミュレーションでの耐荷力被災度判定方針

被災度	定義	評価方針	応答(解析)
As	倒壊したものの 損傷変形が著しく大きなもの	—	—
A	きれつ、座屈、鉄筋の破断等の損傷、または変形が大きなもの	軸方向鉄筋が破断するかどうか 柱がせん断耐力を超えるかどうか	軸方向鉄筋引張りずみ最大値 せん断力最大値
B	鋼材の座屈や部材の変形が部分的に見られるもの 鉄筋の一部の破断やはらみ出しおよび部分的なコンクリートの剥離や きれつがみられるもの	軸方向鉄筋がはらみ出すかどうか かぶりコンクリートが剥落するかどうか	軸方向鉄筋引張りずみ最大値 かぶりCon.圧縮ひずみ最大値
C	鋼材の座屈や変形が局部的な軽微なもの ひび割れの発生や局所的なコンクリートの剥離がみられるもの	軸方向鉄筋がはらみ出すかどうか かぶりコンクリートが剥落するかどうか	軸方向鉄筋引張りずみ最大値 かぶりCon.圧縮ひずみ最大値
D	損傷がないか、あっても耐荷力に影響のない軽微なもの	軸方向鉄筋が許容ひずみを満足するかどうか	軸方向鉄筋引張りずみ最大値

中被害, C:小被害, D:被害なし)に分類した。

図-12に示した被害調査結果および再現解析結果のうち、兵庫県南部地震で倒壊したピルツ橋脚区間に着目する。図-13にピルツ区間周辺における下部構造の被災度分布の比較を示す。ピルツ区間は兵庫県南部地震で倒壊したことから、被害調査ではAs判定に区分されている。再現解析結果における同一区間に着目すると、全区間ではないもののAs判定に区分されることから、下部構造の耐荷力判定については一定の再現性があることを確認した。

また、図-14には神戸線における支承の被災度分布を示す。本検討では、4ランク(A:大被害, B:中被害, C:小被害, D:被害なし)に分類した。ここでは、便宜上支承の水平耐力の2倍以上の水平力が生じる場合をA、1～2倍程度の水平力が生じる場合をB、1～0.5倍程度の水平力が生じる場合をC、0.5倍以下の水平力が生じる場合をDと判定することとした。このとき、支承の水平耐力は、文献15)、文献16)を参考に鋼製支承とゴム支承の破壊震度の平均値から、鋼製支承は1.54Rd(Rd：死荷重)、ゴム支承は1.0Rd相

当の水平耐力を有するものとして、これを閾値に設定した。図-14より、被害調査結果では、神戸線全域に渡ってA判定が生じているが、東側ではA判定が生じず被害が小さい傾向が見られる。被災再現解析でも神戸線の東側ではそれほど支承の被害が生じていないことから、被災再現解析によりその傾向を捉えられていると考えられる。

図-15には神戸線の全区間の下部構造および支承を対象とし被災度判定を行ったときの各判定区分に分類された下部構造の基数を示している。As判定された橋脚基数は、被害調査では72基であったのに対し、被災再現解析では96基と被災再現解析が被害調査に比べわずかに多く評価される結果となったが、その他の損傷ランクも含めた橋脚基数の分布は概ね整合していることがわかる。また、支承についても被害調査と被災再現解析の各判定に区分される基数の分布が整合することから、地震応答シミュレーションの解析方法および判定方法により一定の再現性が確保されることを確認した。

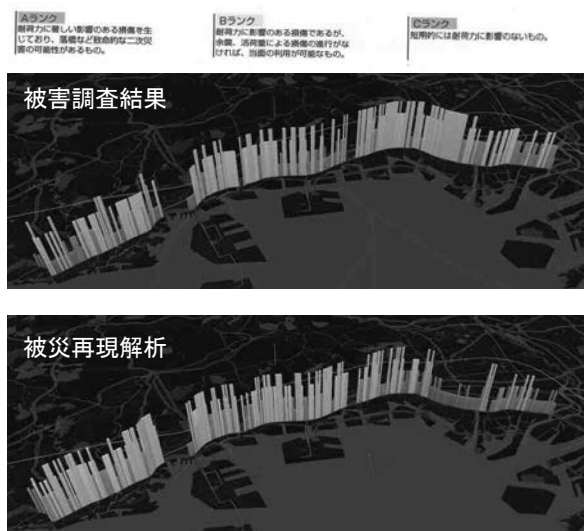


図-14 神戸線における被災度分布の比較
(支承)

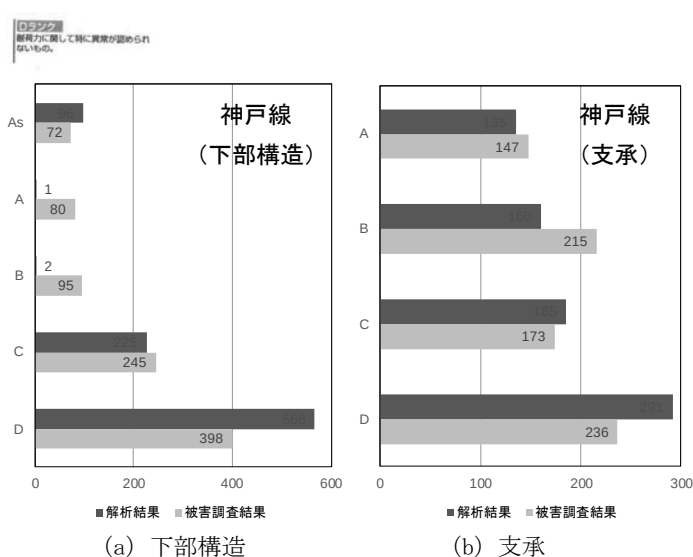
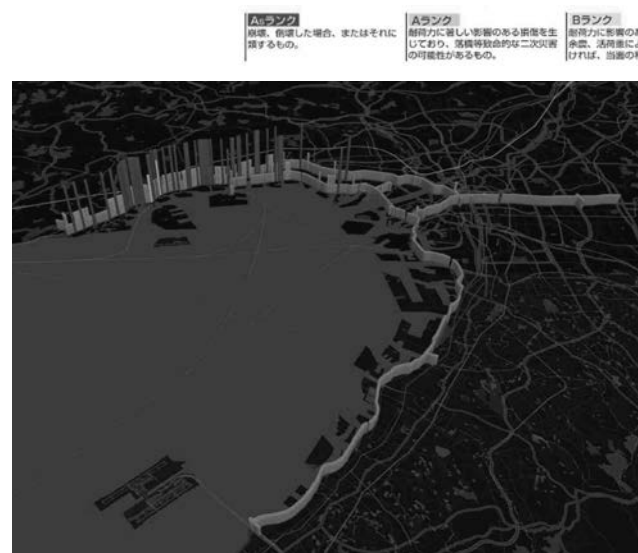


図-15 被災度評価結果 (基数分布)



(a) 耐震補強前



(b) 耐震補強後

図-16 神戸線における被災度分布の比較 (下部構造)

5. 耐震補強効果の検証

(1) 構造物のモデル化

阪神高速では兵庫県南部地震以降、様々な耐震補強を実施しているが、今回の検討ではその耐震補強のうち下部構造の耐震補強に着目し、RC橋脚に対する鋼板巻立て補強、鋼製橋脚に対する鋼板巻立て補強を考慮した構造、すなわち現況の構造に対し兵庫県南部地震の地震動を作用させた。

(2) 耐震補強効果の確認

図-16に耐震補強前後の耐荷力被災度判定の比較を示す。耐震補強前では神戸線を中心に多くのAs判定が生じているのに対し、耐震補強後ではAs判定される下部構造はほとんどなく、ほぼ全ての下部構造

がC判定またはD判定の軽微な損傷に留まる結果となり、耐震補強による被災度の低減効果が確認された。ここで、神戸線においてAs判定された橋脚は、橋脚に生じる最大せん断力が最大せん断耐力を上回り、せん断破壊と判定されたものである。ランプが接続するなど、幅員が部分的に広がる箇所では、地震時の上部構造慣性力が増大するため、標準的なRC橋脚に比べ鉄筋を密に配置させる場合があり、表-3に示す標準的な橋脚を想定して作成したグループング断面を適用すると耐荷力を小さく評価すると予想される。今後は各橋脚をそれぞれ精緻にモデル化するなど、橋脚のモデル化の高精度化を図る予定である。

6. まとめ

広域道路ネットワークの地震応答シミュレーションにより兵庫県南部地震の再現解析を試みた。本検討により得られた知見を以下にまとめる。

- ・構造物に作用する地震動の継続時間の再現性には課題が残るが、周期特性については概ね再現した。また、下部構造および支承の被災度評価について、一定の再現性を確認することができた。
- ・兵庫県南部地震の地震動を耐震補強前後のそれぞれの構造に対し作用させた構造物応答解析を実施し、耐震補強による下部構造の被災度の低減効果について確認した。
- ・今後さらに高い精度で再現するためには、解析モデル精度、被災度判定方法、地震動のそれぞれの再現性を高めていく必要がある。まずは、地震動の再現性向上を目的とし、統計的グリーン関数法と剛性行列法を剛性させたハイブリッド法を用いるとともに、震源モデルの異なるパラメータを用いた地震動作成を行う予定である。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) 篠原聖二, 馬越一也, 中村真貴, 本橋英樹, 服部匡洋, 大石秀雄: スーパーコンピュータを用いた橋梁ネットワークモデルの地震応答シミュレーション, 第15回日本地震工学シンポジウム, 2018.
- 4) 富健一, 許佳奕, 服部匡洋, 馬越一也, 篠原聖二: ケーソン基礎を有する鋼単純合成鈹桁における2018年大阪府北部地震の地震観測記録と応答特性の評価, 第38回地震工学研究発表会, 2018.
- 5) 松本崇志, 光川直宏, 服部匡洋, 馬越一也, 篠原聖二: 免震支承を有する4径間連続鋼箱桁橋における2018年大阪府北部地震の地震観測記録と応答特性の評価, 第38回地震工学研究発表会, 2018.
- 6) 佐々木達生, 徳橋亮治, 服部匡洋, 馬越一也, 篠原聖二: 10径間連続PC箱桁橋における2018年大阪府北部地震の地震観測記録と応答特性の評価, 第38回地震工学研究発表会, 2018.
- 7) 馬越一也, 中村真貴, 服部匡洋, 大石秀雄, 篠原聖二: 長大斜張橋における2018年大阪府北部地震の地震観測記録と応答特性の評価, 第38回地震工学研究発表会, 2018.
- 8) 服部匡洋, 大石秀雄, 加藤祥久, 中村真貴, 馬越一也, 篠原聖二: 長大トラス橋における2018年大阪府北部地震の地震観測記録と応答特性の評価, 第38回地震工学研究発表会, 2018.
- 9) 野津厚, 長尾毅, 山田雅行: スペクトルインバージョンに基づく全国の強震観測地点におけるサイト増幅特性とこれを利用した強震動評価事例, 日本地震工学会論文集 第7巻, 第2号(特集号), 2007.
- 10) 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.
- 11) 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>
- 12) 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.
- 13) 国土交通省港湾局: 港湾地域強震観測, <http://www.mlit.go.jp/kowan/kyosin/eq.htm>
- 14) 日本道路協会: 道路震災対策便覧(震災復旧編), 2004.
- 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.
- 16) 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.