

2018 年大阪府北部地震の観測記録を用いた 開削トンネルの地震時応答評価

西村 学¹・田中 裕隆²・松浦 功³・服部 匡洋⁴・篠原 聖二⁵

¹正会員 パシフィックコンサルタンツ株式会社 大阪本社（〒530-0004 大阪市北区堂島浜1-2-1）
E-mail: manabu.nishimura@os.pacific.co.jp

²正会員 パシフィックコンサルタンツ株式会社 大阪本社（〒530-0004 大阪市北区堂島浜1-2-1）
E-mail: hirotaka.tanaka@tk.pacific.co.jp

³正会員 パシフィックコンサルタンツ株式会社 大阪本社（〒530-0004 大阪市北区堂島浜1-2-1）
E-mail: isao.matsuura@os.pacific.co.jp

⁴正会員 一般財団法人阪神高速道路技術センター 調査研究部（〒541-0054 大阪市中央区南本町4-5-7）
E-mail: hattori_m@tech-center.or.jp

⁵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）
E-mail: masatsugu-shinohara@hanshin-exp.co.jp

阪神高速道路では、兵庫県南部地震以前から地震計を設置し地震観測システムを整備しており、2018 年大阪府北部地震でも地震動のデータを観測した。開削トンネルである大開トンネルにおいても、トンネルダクト内と近傍の地表面で地震動データを観測している。本稿は、地表面の観測データを用いて一次元地震応答解析により工学的基盤面の地震動を推定し、開削トンネル横断面を対象とした二次元 FEM 解析により開削トンネルの地震時挙動を把握し、実際の観測データと比較することにより二次元 FEM 解析における躯体及び地盤モデルの妥当性の評価を行ったものである。

Key Words: 2018 Osaka Hokubu Earthquake ,earthquake motion data ,seismic response analysis, two-dimensional FEM analysis, cut-and-cover tunnel

1. はじめに

阪神高速道路では、地震発生時の迅速な交通管制対応や構造物の地震挙動の把握の観点から、1995 年兵庫県南部地震以前より構造物等の地震観測システムを順次整備し、現在では、供用延長 260km の道路ネットワークにおいて 22 箇所の地点の構造物、地表面、地中部において、加速度、速度、変位等、合計 400 成分以上の地震観測データが得られるシステムを構築している¹⁾。

また、2018 年 6 月 18 日に発生した大阪府北部地震（気象庁マグニチュード 6.1）では、複数の観測局で地震観測データを記録し、阪神高速では、地震観測データを基に、構造解析モデルの妥当性検証を目的とした再現解析が実施されている^{2)~6)}。

本稿では、震源から約 16km 離れた開削トンネル区間である大開観測局を対象に、地表面の観測データを用いて一次元地震応答解析により工学的基盤面の地震動を推

定し、二次元 FEM 解析によりダクト内部の地震動の再現を試みたものである。

また、構造物モデルの有無をパラメータとし、地中構造物の地震時の影響を確認した。

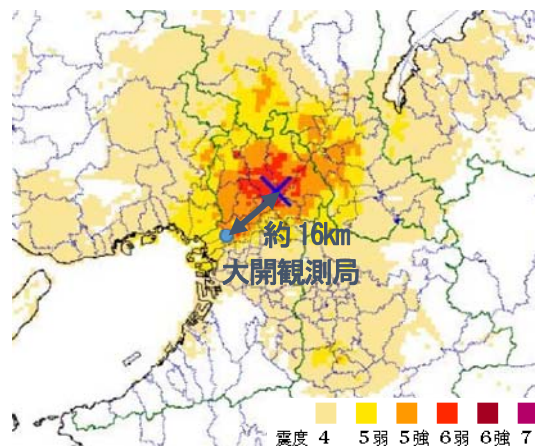


図-1 推計震度分布図（「気象庁」に加筆）

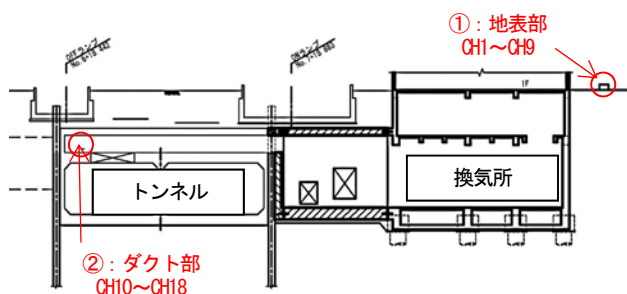


図-2 観測局断面図

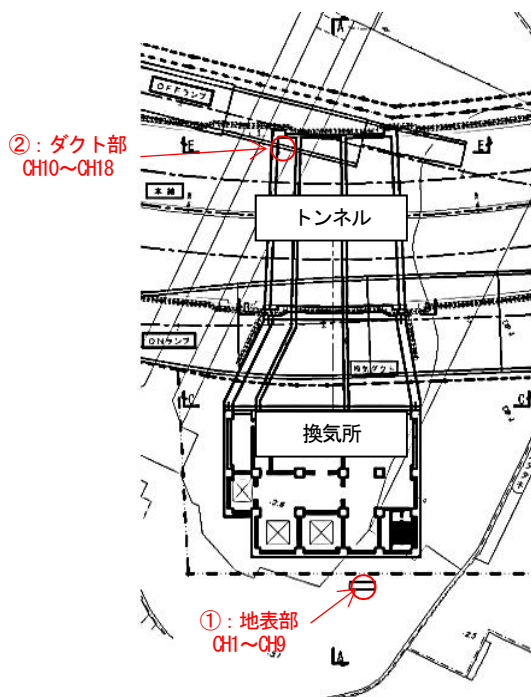


図-3 観測局平面図

表-1 地震計仕様

仕 様			設置番号		①	②
計測方向 ① X: 南北 Y: 東西 Z: 鉛直 ② X: 道路 Y: 道直 Z: 鉛直	加速度	X	CH1	CH10		
		Y	CH2	CH11		
		Z	CH3	CH12		
	速度	X	CH4	CH13		
		Y	CH5	CH14		
		Z	CH6	CH15		
	変位	X	CH7	CH16		
		Y	CH8	CH17		
		Z	CH9	CH18		
	入力CH数			18		
計測 センサー	速度計	①～②	(株)東京測振 地中設置型 VSE-355JE			
	測定範囲	加速度	±2000Gal			
計測 地震計	測定範囲	速度	±200cm/s			
		加速度	±2000Gal			
		速度	±200cm/s			
	サンプリング周波数	変位	±1000mm			
				100Hz (10ms)		
		出力単位	加速度	Gal (0.01Gal単位)		
	速度		cm/s (0.001cm/s単位)			
変位	mm (0.01mm単位)					



①地表部 (遠景)



①地表部 (近景)



②ダクト部 (遠景)



②ダクト部 (近景)

図-4 地震計の設置状況

2. 観測記録

(1) 地震計の概要

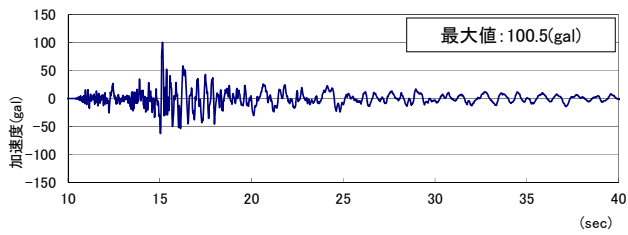
本検討では、淀川左岸線大開観測局を対象とした。地盤種別はⅢ種地盤である。大開観測局の断面図及び平面図を図-2、図-3に、地震計の設置状況を図-4に、地震計の仕様を表-1に示す。地震計はサーボ型速度計でサンプリング周波数は100Hzである。

地表部で観測された地震記録の方向は、NS方向（南北方向）、EW方向（東西方向）、UD方向（鉛直方向）の3方向である。一方、ダクト部は、トンネル軸方向、トンネル軸直角方向、鉛直方向の3方向である。ここで、トンネル軸方向は北から時計回りに39°の方向であるため、観測波形の分析においては、地表部で観測された記録に対して角度補正を行い、ダクト部の記録と比較した。

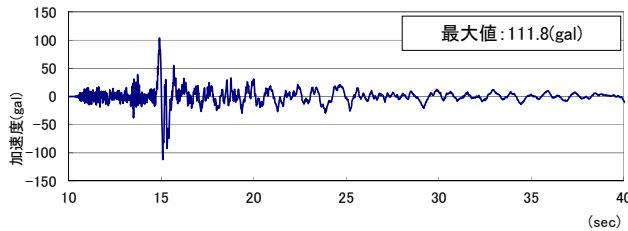
(2) 観測記録

地表部とダクト部の観測記録の絶対加速度を図-5～図-6に示す。地震動はトンネル軸直角方向に揺れが大きく、地表部の絶対加速度の最大値は111.8galである。加速度フーリエスペクトルを図-7に示す。フーリエスペクトルは、水平2成分の2乗和平方根に対して示している。当該地点の卓越周波数は0.8Hz付近である。

H/Vスペクトルを図-8に示す。H/Vスペクトルは、フーリエスペクトルに対しParzenウィンドウ（バンド幅0.05Hz）を用いて平滑化を行い、水平成分と鉛直成分のスペクトルの比をとったものである。H/Vスペクトルは低周波数領域で大きくなっており、ノイズの影響が懸念される。そのため、加速度波形に対してバンドパスフィルター処理（低域遷移帯幅：0.1Hz～0.5Hz、高域遷移帯幅：10Hz～50Hz）を行い、解析に使用することとした。

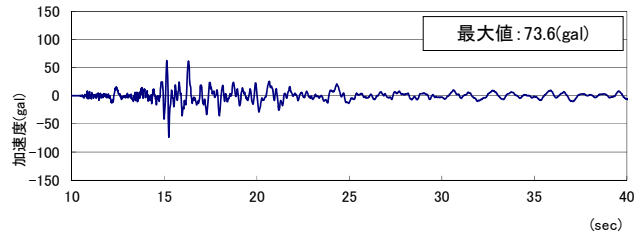


(a)トンネル軸方向成分

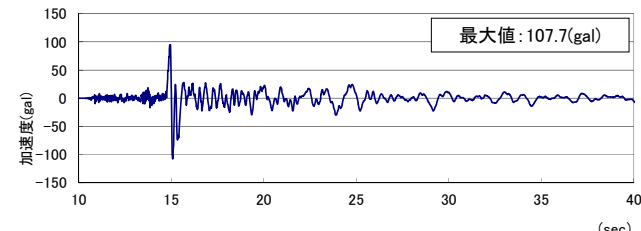


(b)トンネル軸直角方向成分

図-5 観測地震動加速度波形（地表部）



(a)トンネル軸方向成分



(b)トンネル軸直角方向成分

図-6 観測地震動加速度波形（ダクト部）

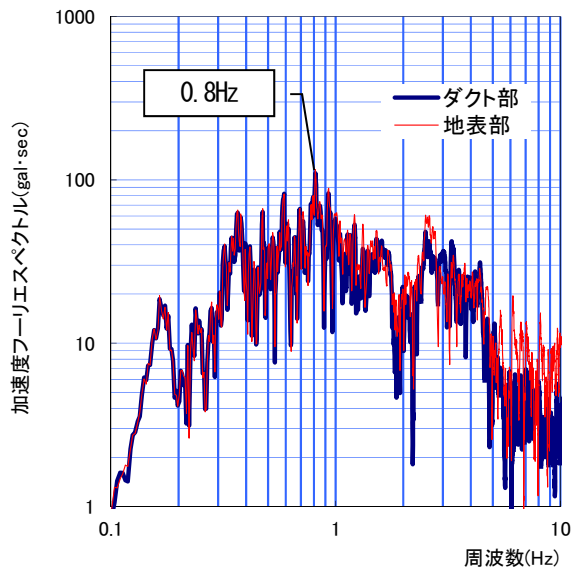


図-7 加速度フーリエスペクトル

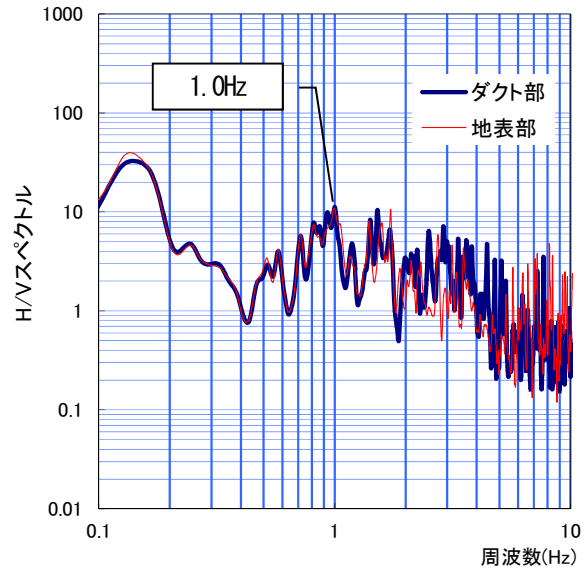


図-8 H/Vスペクトル

フィルター処理後の観測波形及び加速度フーリエスペクトルを図-9～図-12に示す。低周波数側のフーリエスペクトルが低減できていることが確認できる。なお、グラフには表示していないが50Hz以上の成分はカットしている。

地表部とダクト部の時刻歴加速度波形について、トンネル軸方向は違いが確認できるが、トンネル軸直角方向の波形は非常によく似ていることから、トンネル構造物の軸直角方向は、周辺地盤と同様の挙動を示しているものと考えられる。

地表部の加速度応答スペクトルを図-13に示す。最大応答加速度 ($\eta=5\%$) は300gal程度であり、短周期側は「道路橋示方書・同解説Ⅴ耐震設計編」に示されるレベル1地震動⁷⁾と同等である。また、長周期側はレベル1地震動よりも小さいレベルの地震動であるといえる。

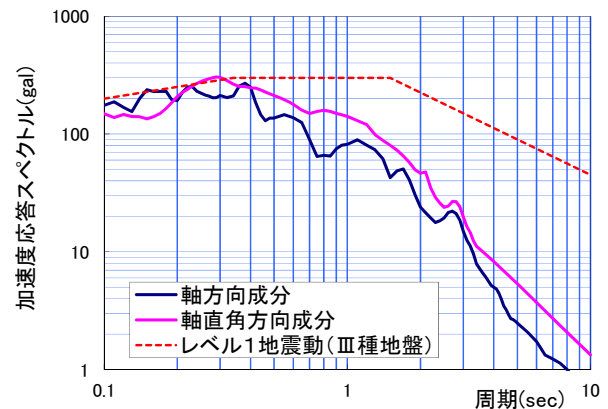
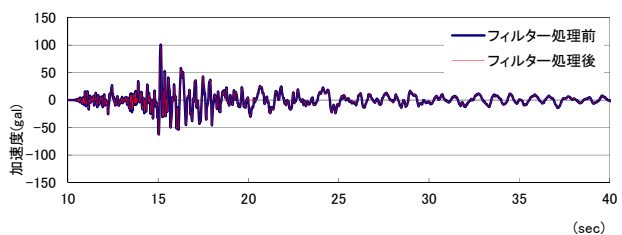
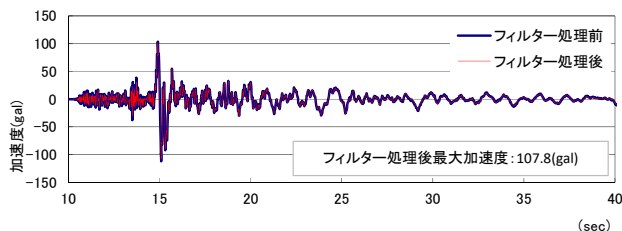


図-13 加速度応答スペクトル ($\eta=5\%$, 地表部)

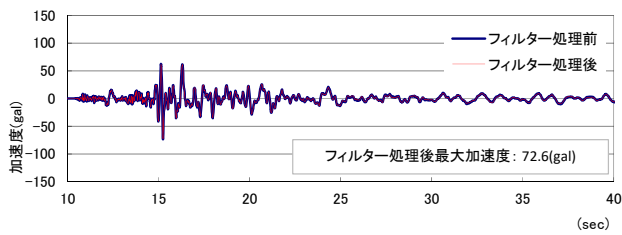


(a)トンネル軸方向成分

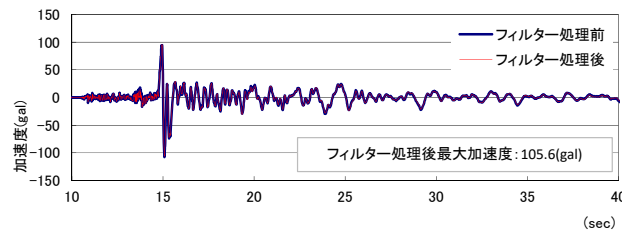


(b)トンネル軸直角方向成分

図-9 観測地震動加速度波形（地表部）



(a)トンネル軸方向成分



(b)トンネル軸直角方向成分

図-10 観測地震動加速度波形（ダクト部）

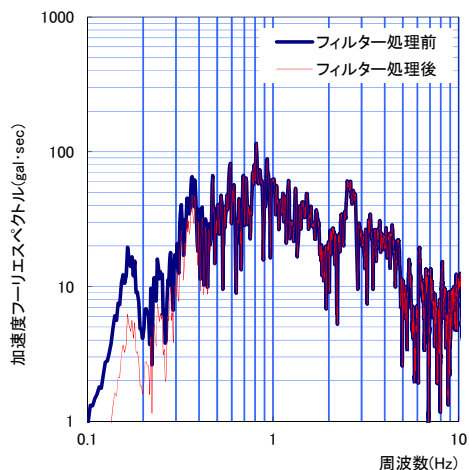


図-11 加速度フーリエスペクトル（地表部）

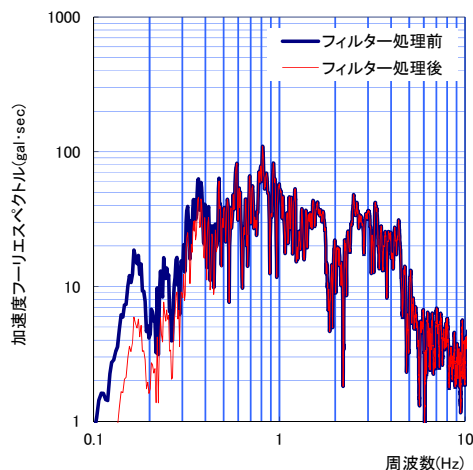


図-12 加速度フーリエスペクトル（ダクト部）

3. 検討フロー

大開観測局で観測された地表部地震動を用いてダクト部地震動を算定する手順を図-14に示す。本検討では、地表部で観測された地震動を入力加速度として①一次元地震応答解析（等価線形解析）を行い、工学的基盤面の地震動を算定し、②地盤、トンネル構造物をモデル化した2次元FEM解析を行い、ダクト内部の地震動を算定することとした。

一次元地震応答解析は等価線形解析（解析コード：SHAKE）とし、地盤のひずみ依存特性は文献⁸⁾を参考に設定した。ここで、地盤モデルは、大開換気所に直近のボーリング調査結果を用いている。なお、一次元地震応答解析の結果を用いて液状化判定を行った結果、対象地震動に対し液状化は発生しない結果であった。

2次元FEM解析は、非線形動的解析（解析コード：FLIP⁹⁾）とし、地盤の非線形特性は双曲線モデルとした。

なお、液状化は生じていないと考えられることから、過剰間隙水圧の上昇は考慮していない。

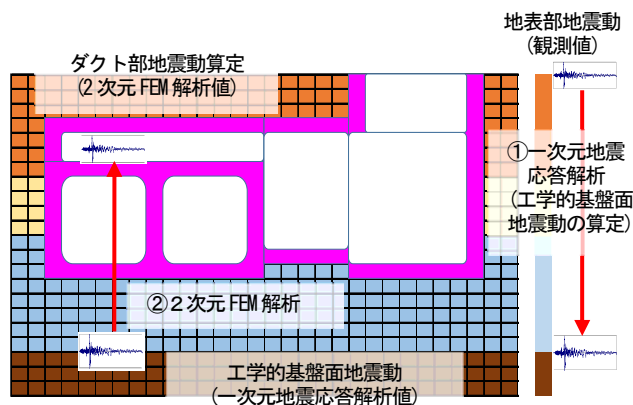


図-14 ダクト部地震動算定手順

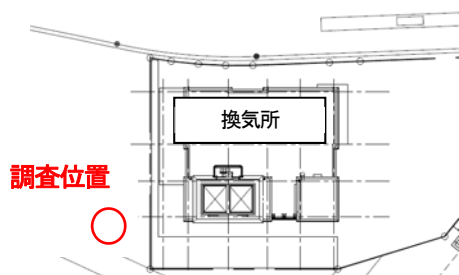


図-15 ボーリング調査位置図

4. 一次元地震応答解析 (工学的基盤面の地震動算定)

地表面の観測地震動（トンネル軸直角方向成分）を入力地震動として、一次元地震応答解析により工学的基盤面の地震動を算定した。地盤モデルの概要を表-2に、算定した地震動（2E）を図-16に示す。地盤の最大せん断ひずみは、沖積粘性土層(Ac-U)で生じており、そのひずみは0.08%であった。このとき、地盤のひずみ依存曲線に基づく剛性低下率は80%程度であり、地盤の非線形性の影響は小さいものと考ええる。

ここで、工学的基盤面の加速度が非常に大きくなっている。これは、当該地盤は比較的軟弱で高周波数成分を伝達しにくい構造であるため、地表面地震動から基盤面地震動を求めると、逆に高周波数成分が増幅されることによるものである。当該地盤の伝達関数を図-17に示す。当該地盤では、20Hz以上の波はほとんど伝達しないことがわかる。

表-2 地盤モデル概要

地層区分	標高 (m)	層厚 (m)	湿潤単位 体積重量 γ_t (kN/m ³)	飽和単位 体積重量 γ_{sat} (kN/m ³)	せん断波 速度 V_{so} (m/sec)
埋立土 B	3.600	8.25	19.0	20.0	144
砂質土 As	-4.650	3.00	19.0	20.0	166
粘性土 Ac-U	-7.650	10.20	17.0	17.0	142
粘性土 Ac-L	-17.850	8.30	17.0	17.0	171
砂混粘土 Asc	-26.150	3.70	19.0	20.0	204
砂礫 Dg	-29.850	6.00	20.0	21.0	308
粘性土 Dc	-35.850	8.27	18.0	18.0	208
基盤	-44.120	—	20.0	21.0	305

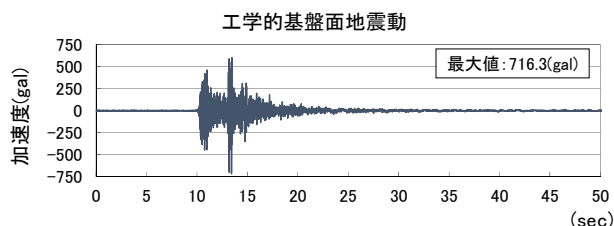


図-16 工学的基盤面地震動 (2E)

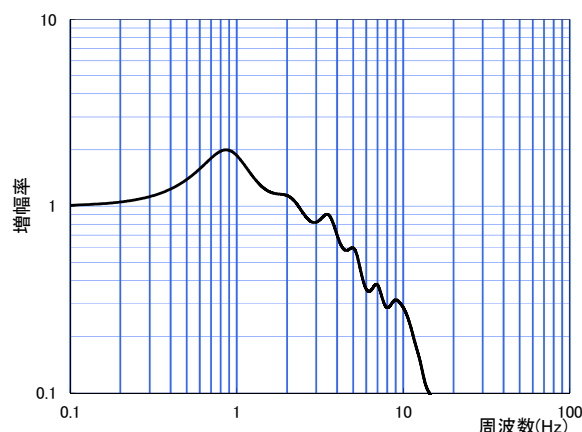


図-17 伝達関数 (地表面/基盤面)

5. 2次元FEM解析結果 (ダクト部の地震動の再現)

(1) 解析モデル概要

前述の工学的基盤面の地震動を入力地震動として、2次元FEM解析を実施し、ダクト部の地震動を算定した。なお、トンネル構造物の影響を評価するために、トンネル構造物をモデル化した場合とモデル化をしない場合（地盤要素のみ）について解析を実施した。

2次元FEM解析モデル図を図-18に示す。地盤は平面ひずみ要素とし、変形特性は双曲線モデルである。トンネル、連絡路、換気所は、コンクリートの線形弾性体要素とし、奥行き方向の壁量に応じて単位体積重量を調整している。連続壁（SMW）は、線形梁要素とした。地盤と構造物の接触面は、地震動が比較的小さいことから、特にジョイント要素は用いていない。レーリー減衰の剛性に比例する係数は、十分小さい値として $\beta=0.001$ とした。

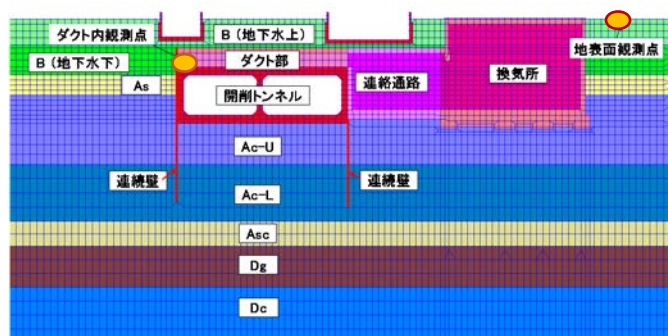


図-18 2次元FEM解析モデル図

(2) 解析結果

ひずみ依存曲線の比較図を図-19に、解析結果の時刻歴加速度図を図-20～図-25に、フーリエスペクトル図を図-26～図-29に示す。

(a) 解析モデルの再現性

構造物をFEMでモデル化した場合の最大加速度を表-3 (a) に示す。地表部、ダクト部ともに解析値と観測値の最大加速度の比は90%以上である。また、時刻歴図から位相もほぼ再現できている。

本解析では、地盤のせん断弾性波速度Vsを「道路橋示方書・同解説V耐震設計編」に示されるN値からの換算式で求め、地盤の非線形特性も一般的な特性を用いているが、精度良く再現できている。これは、地盤の剛性は、N値を用いても設計に十分な範囲でモデル化できているものとする。また、地震動が比較的小さい場合は、地盤のひずみが小さく剛性低下の影響が小さいため、地盤の非線形モデルによる影響が目立たなかったものと考えている。

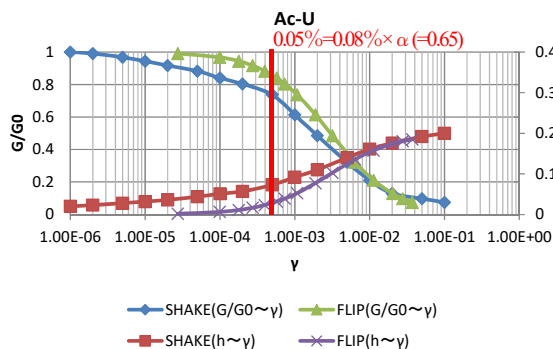


図-19 非線形特性の比較 (Ac-U層)

(b) 構造物モデルの有無の影響

構造物をモデル化した場合としない場合の最大加速度を表-3 (b) に示す。

地表部は、構造物のモデル化の有無にかかわらず、最大加速度や波形はよく一致している。これは、地表部の観測点は換気所から5.2m離れていることや、地震動が小さかったために構造物との反射の影響が目立たなかったものと考えている。

ダクト部は、構造物をモデル化しない場合は、最大加速度が小さい。構造物をモデル化した場合は、高周波成分が増幅し最大加速度が大きくなっている。これは、構造物の剛性の影響であると考えている。

表-3 解析結果 最大加速度の比較
(a) 解析モデルの再現性に着目

地震動位置	最大加速度(gal)		比率 ①/②
	①構造物有	②観測値	
地表部	104.0	107.8	0.96
ダクト部	96.5	105.6	0.91

(b) 構造物モデルの影響に着目

地震動位置	最大加速度(gal)		比率 ①/②
	①構造物有	②構造物無	
地表部	104.0	110.5	0.94
ダクト部	96.5	75.5	1.28

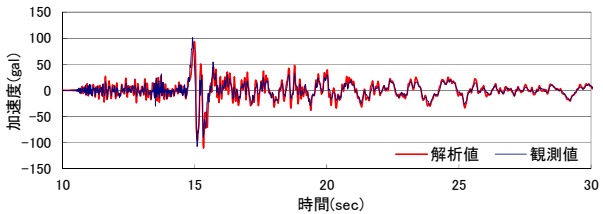


図-20 地表部地震動の比較 (構造物モデル無)

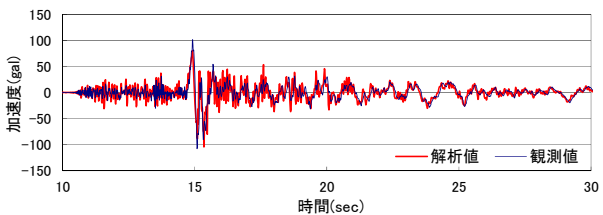


図-21 地表部地震動の比較 (構造物モデル有)

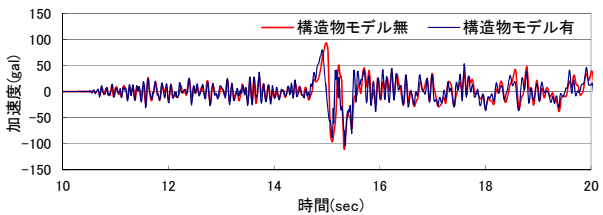


図-22 地表部地震動の比較 (構造物モデル有無)

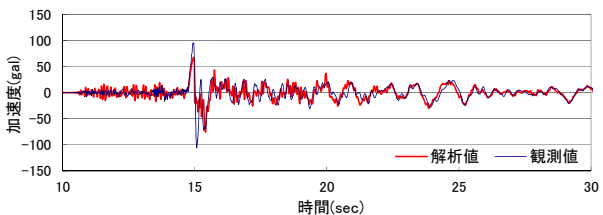


図-23 ダクト部地震動の比較 (構造物モデル無)

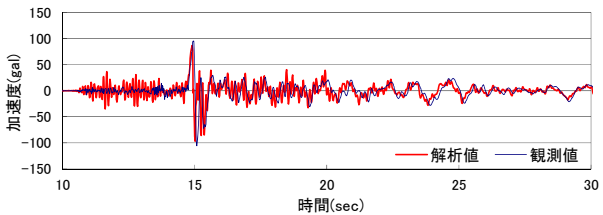


図-24 ダクト部地震動の比較 (構造物モデル有)

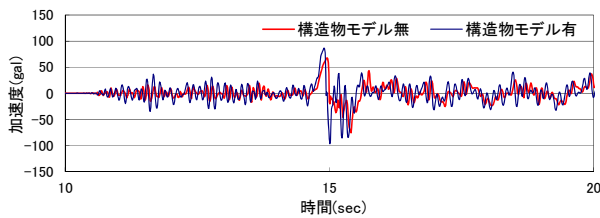


図-25 ダクト部地震動の比較（構造物モデル有無）

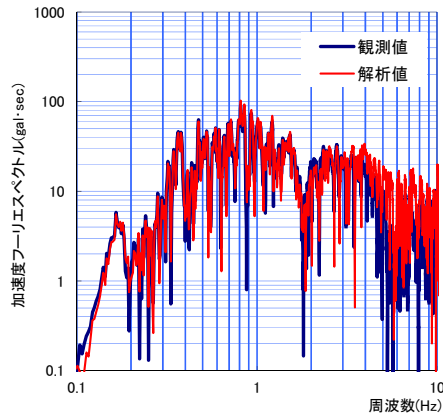


図-26 地表部フーリエS Pの比較（構造物モデル無）

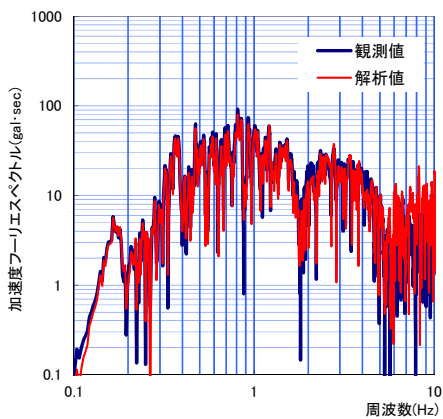


図-27 地表部フーリエS Pの比較（構造物モデル有）

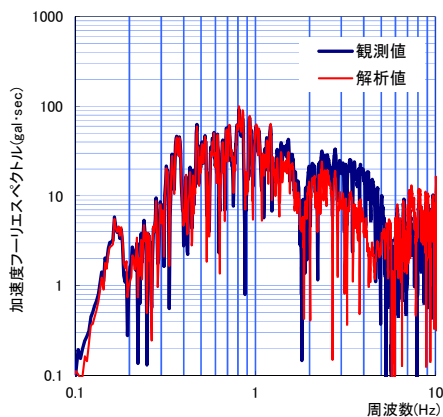


図-28 ダクト部フーリエS Pの比較（構造物モデル有）

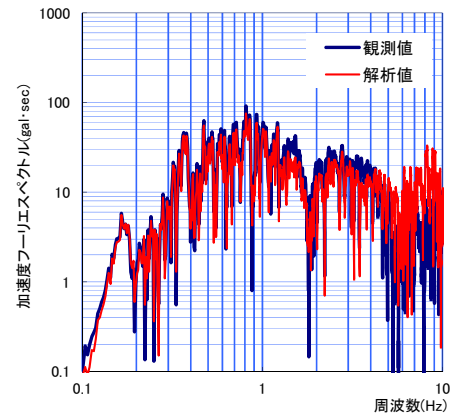


図-29 ダクト部フーリエS Pの比較（構造物モデル有）

6. まとめ

本検討により得られた知見を以下にまとめる。

(1) 観測記録

- ・大開観測局で観測した地震記録は、トンネル軸直角方向に卓越しており、最大加速度は110gal程度で、卓越周波数は0.8Hz～1.0Hzである。
- ・地表部とダクト部のトンネル軸直角方向の観測記録はよく似ていることから、トンネル軸直角方向は周辺地盤の挙動に追随しているものと考えられる。

(2) 解析モデルの再現性

- ・一次元解析に用いた地盤モデルは、標準的な土木研究所のひずみ依存特性を用いている。また、2次元FEM解析に用いた地盤モデルは、双曲線モデルを用いている。本検討では、このように地盤の非線形特性として一般的な特性を用いているが、地震動の再現性はよい結果が得られた。これは、対象とする地震動がレベル1地震動よりも小さいレベルであり、地盤の剛性低下が比較的小さい範囲であったためであると考えている。
- ・トンネル構造物をモデル化することで、ダクト部は高周波数成分の影響まで再現できた。

(3) 構造物モデルの有無の影響

- ・トンネル構造物をモデル化した場合とモデル化しない場合について地表部の地震動を算定した結果、構造物をモデル化した場合は高周波成分が増幅するものの、両者は概ね一致した。
- ・これは、地表部の観測点は大開換気所から5.2m離れていることと、地震動のレベルが小さかったため、構造物の影響は小さかったものと考えている。
- ・ダクト部の地震動について、トンネル構造物をモデル化しない場合は、観測値に比べて最大加速度は小さ

いが、位相は概ね再現できた。

- ・トンネル構造物をモデル化した場合は、高周波成分が増幅し、観測値に近い結果が得られた。これは、構造物の剛性の影響により、高周波成分が増幅したためであると考ええる。

参考文献

- 1) 篠原聖二, 中村雄基, 玉置脩人, 高橋良和: 阪神高速道路ネットワークにおける地震観測データの活用, 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, pp.23-30, 2018年7月.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 社団法人日本道路協会: 道路橋示方書・同解説V耐震設計編, 丸善, 2017年11月.
- 8) 建設省土木研究所: 地盤地震時応答特性の数値解析法—SHAKE: DESRA—, 土研資料第1778号, 1982年.
- 9) 運輸省港湾技術研究所: 液状化による構造物被害予測プログラムFLIPにおいて必要な各種パラメタの簡易設定法, 港湾技研資料No.869, 1997年.

DYNAMIC RESPONSE EVALUATION OF OBIRAKI CUT-AND-COVER TUNNEL UNDER THE 2018 NORTHERN OSAKA-FU EARTHQUAKE GROUND MOTION

Manabu NISHIMURA, Hirotaka TANAKA, Isao MATSUURA,
Masahiro HATTORI and Masatsugu SHINOHARA

The seismometers on the Hanshin Expressway were installed before the 1995 South Hyogo Prefecture Earthquake and had acquired the earthquake motion data when the 2018 Osaka Hokubu Earthquake was generated. This well-developed Seismic observation system even observes the earthquake motion in and near the ducts of the Obiraki cut-and-cover tunnel. Using these earthquake motion data, and by conducting a one-dimensional seismic response analysis, this paper had estimated the earthquake motion of the engineering foundation surface. By comparing the seismic behavior grasped from the two-dimensional FEM analysis on the cross section of the cut-and-cover tunnel with the data collected from actual observation, this paper evaluates the validity of the frame and ground model.