

第3章 脱線箇所における地震動の推定

3.1 推定手順

脱線現場付近の地表面で観測された地震波を、基盤面まで引き戻して、基盤面での入射波（2E成分：以後、基盤波と呼ぶ）を算定する。本検討で言う基盤とは、せん断弾性波速度Vsが700m/s程度の工学的基盤とする。次にこの基盤波を用いて、脱線箇所周辺の表層地盤の動的解析を行い、脱線箇所における地震動を推定する。その手順を、図3.1に示す。なお、地震観測地点および脱線箇所周辺地盤のモデル化にあたっては、建設当時の土質調査結果および、地震発生後に行われた土質調査の結果を用いた。

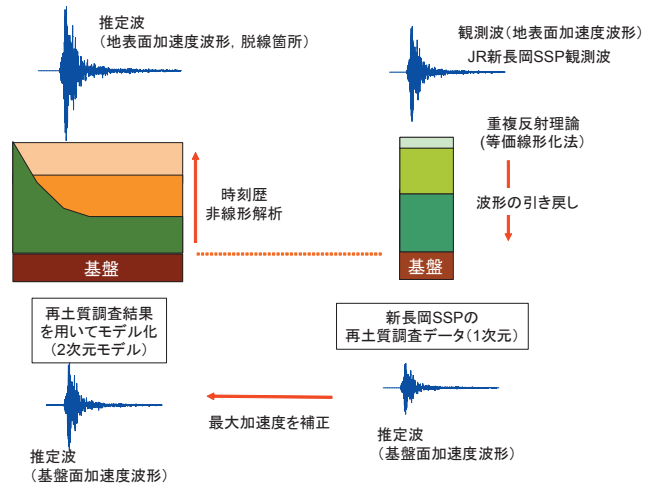


図3.1 地震波設定の概念図

3.2 基盤波の推定

(1) 基準地震波の選定

地震波の引き戻しを行い、基盤波を推定するためには、基準となる地震波（地表面で観測された実際の記録、以後基準地震波と呼ぶ）を適切に選定する必要がある。そのためには、

① なるべく脱線現場（解析対象地点）に近いこと

- ② 地震記録に地形効果など特異な特性が含まれていないこと
- ③ 観測地点のジャストポイントでの土質調査結果（PS検層）があること

等が選定条件となる。脱線現場周辺では、JR東日本の沿

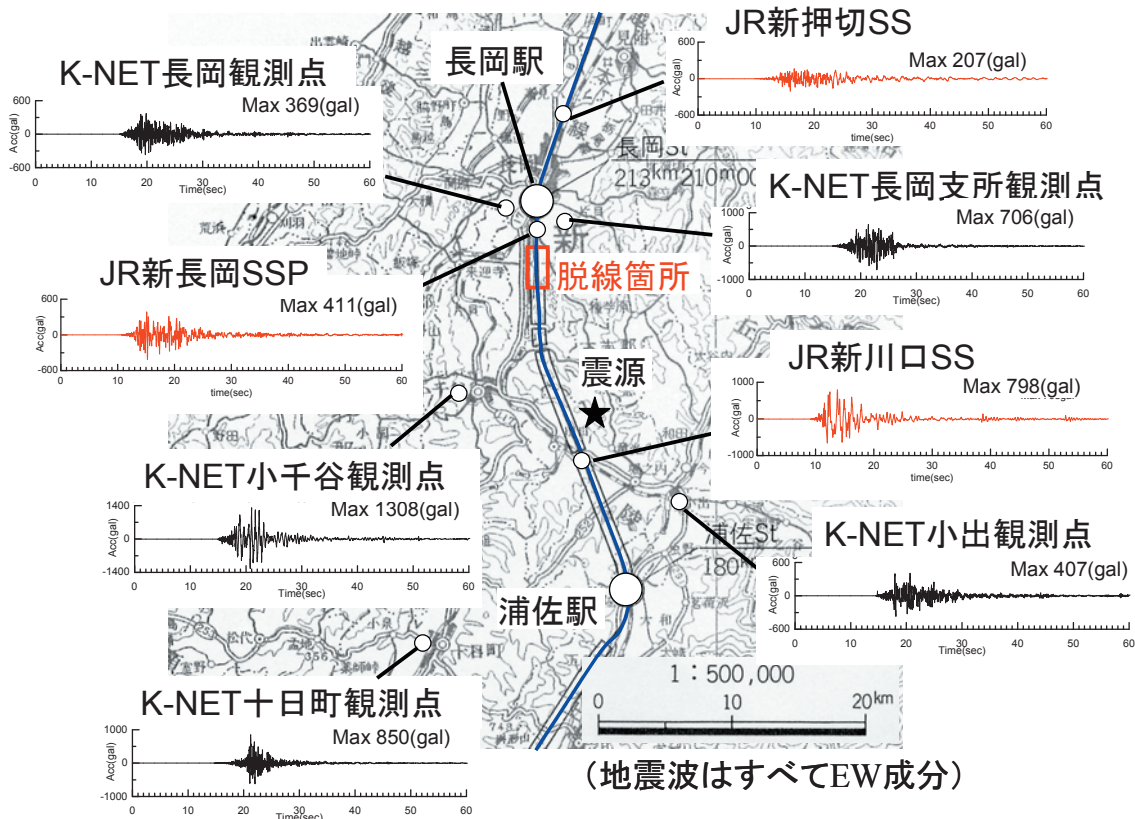


図3.2 脱線地点周辺の観測記録と位置

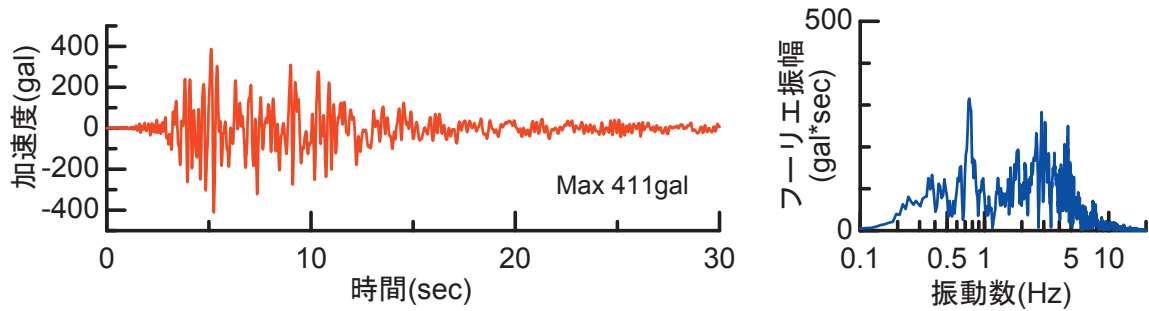


図3.3 新長岡SSPでの観測記録の時刻歴波形とフーリエスペクトル

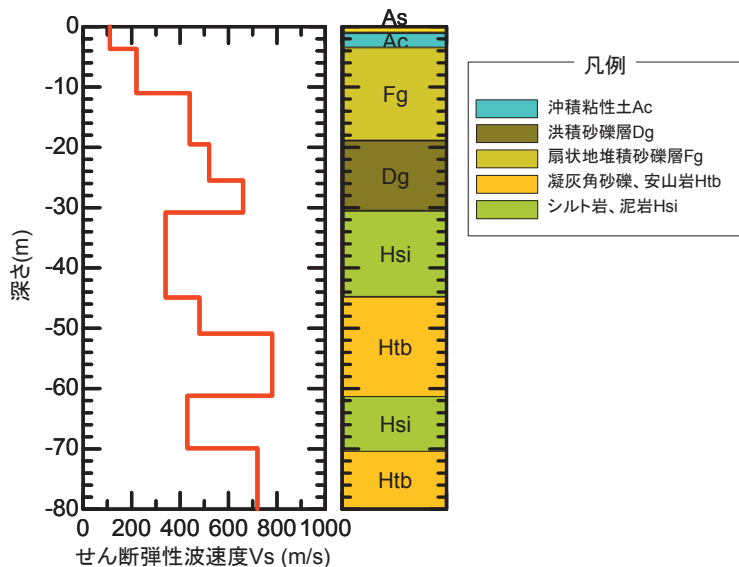


図3.4 新長岡SSPの地盤条件

線の地震計ならびに防災科学技術研究所強震ネットワークK-NET¹⁾より、図3.2に示すような地震記録が観測されている。これらの地震波のうち、上記の観点から検討した結果、脱線地点に最も近い観測点である、新長岡補助き電区分所（以下、新長岡SSP）で記録された地震波を基準地震波として用いることとした。なお、線路がほぼ南北方向であることから、EW成分とUD成分を検討対象とする

図3.3に新長岡SSPで観測された地震波（EW成分）の時刻歴波形とフーリエ振幅スペクトルを示す。最大加速度は411galで、0.7Hz付近および3~5Hz付近に卓越したピークを持っている。

(2) 地震波の引き戻し

重複反射理論により、基準地震波を工学的基盤面まで引き戻す。また、土は塑性化し易い材料であり、地震波の引き戻しを行う際にも、土の非線形性の影響を考慮する必要がある。重複反射理論は、周波数領域の計算手法なので、土の非線形性は等価線形化法により評価した。なお、等価線形化法には幾つかの手法が提案されている

が、本検討ではFDEL（改良型SHAKE）²⁾を用いた。

(3) 新長岡地点の地盤条件

新長岡SSPでは、地震発生後、2度にわたり土質調査が行われているが（3.3節参照）、本検討では2回目の土質調査で得られた調査結果を用いて、地表面から工学的基盤面までの地盤構造のモデル化を行った。図3.4に解析で用いた地盤構造モデルを示す。

また、土の非線形特性を示す「せん断弾性係数 G ～せん断ひずみ γ 関係」、 「履歴減衰 h ～せん断ひずみ γ 関係」は、砂質土や粘性土については、土質調査の結果得られたもの（3.3節参照）をそのまま用いた。また、岩については、塑性化し難いと考えて、線形材料として扱った。

(4) 最大値の補正

震源から観測点（新長岡SSP）までの距離と、震源から脱線地点までの距離が異なる。一般に、地震波の振幅は距離とともに低減するので、新長岡SSPで推定された基盤波よりも、脱線地点の基盤波の方が振幅が大きいと考えられる。また、両地点における工学的基盤よりさらに深い地盤構造の違いによる影響も考えられる。

上記の距離の違いによる影響を勘案するために、何らかの方法を用いて、新長岡SSP地点で引き戻して得られた基盤波の振幅を補正する必要がある。

本検討では、地震後に脱線地点で余震観測が実施されており、幾つかの余震で、新長岡SSPおよび脱線地点で同時に地震波が観測されている。そこで、以下の方法により振幅を補正した。

- ① まず、新長岡地点での余震記録を、図3.4に示す地盤構造モデルを用いて、工学的基盤面まで引き戻す。

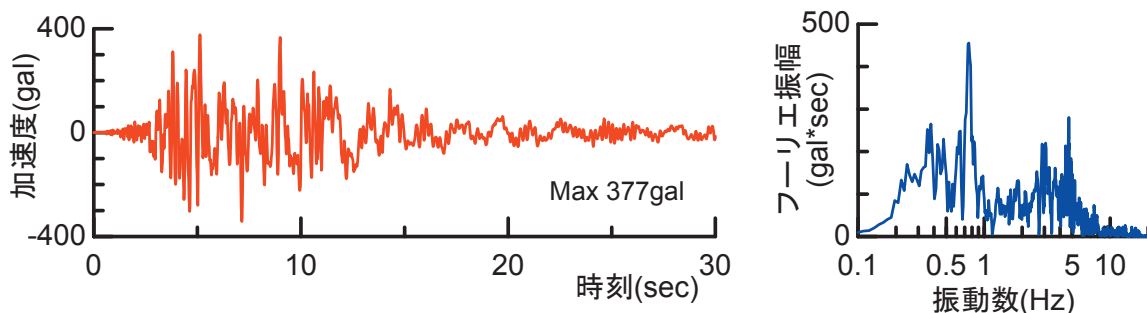


図3.5 推定された基盤波の時刻歴波形とフーリエ振幅スペクトル (Vs=720m/s位置)

- ② 次に、新長岡での基盤波の最大加速度を α 倍した波形を、脱線地点における基盤波として、当該地域の地震応答解析を実施し、十日町 R3 高架橋位置での地表面波形を算出する。
- ③ 十日町 R3 高架橋位置の地表面で観測された余震記録の最大値と比較する。
- ④ 両者の最大値が概ね一致するまで、②～③の作業を繰り返し行い、補正係数 α を算出する。具体的には、2.16 倍であった。

(5) 基盤波の推定結果

上記の方法により得られた基盤波の加速度波形(2E : Eは入射波)の時刻歴とフーリエ振幅スペクトルを図3.5に示す。最大加速度は377galで、0.7～0.8Hz付近と3～5Hz付近に卓越ピークが見られる。

3.3 脱線現場周辺の地盤調査

脱線現場周辺においては、脱線現場周辺の地震動を推定するために必要な種々の土質調査が、JR東日本により実施されている。ボーリング位置、試験項目ならびに調査目的を表3.1に示す。

標準貫入試験およびPS検層では、地層構成やせん断弾性波速度Vsを測定し、各地点において、図3.6に示すような地盤構造が得られた。起点方の表層地盤においては礫層(Atg層)が支配的であり、終点方では粘性土(Atc層)が支配的になっている。

また、土の物理試験では、土の密度や粒度などの基本的な特性のほか、三軸試験により内部摩擦角と粘着力度を調査した。動的変形試験では、ねじりせん断試験により土の動的変形特性(せん断弾性係数G～せん断ひずみ γ 関係、履歴減衰h～せん断ひずみ γ 関係)を調査した。

3.4 脱線地点周辺の表層地盤構造のモデル化

滝谷トンネル～十日町BLR7付近までの約800m区間を解析対象とし、2次元有限要素法(FEM)により地盤全体の動的解析を行うこととした。

まずは、3.3節に示した地震後に実施された土質調査の結果と、建設当時の土質調査結果を用いて、当該地点を図3.7に示すような地盤構造にモデル化した。

次に、地盤は2次元の平面ひずみ要素でモデル化した。

表3.1 土質調査結果一覧

	調査地点	標準貫入試験	PS検層 Vs値	物理試験	動的変形試験	液状化試験	記事
①	滝谷T出口～浄土川B間1/4点	○	○	—	—	—	脱線現場周辺地盤のモデル化のための調査
②	滝谷T出口～浄土川B間2/4点	○	○	○	○	○	
③	滝谷T出口～浄土川B間3/4点	○	○	○	○	○	
④	浄土川B 2P	○	○	○	○	—	
⑤	十日町BI 1P	○	○	○	○	○	
⑥	十日町BI R3 No.3柱	○	○	○	○	○	
⑦	十日町BI R4	○	○	—	—	—	
⑧	十日町BI R5	○	○	—	—	—	
⑨	新長岡補助き電区分所(SSP)	○	○	—	—	—	基盤波推定のための調査

そのメッシュ分割については、解析対象振動数を考慮して、1要素あたり2mの正方形メッシュを基本とした。また、数値計算の安定化を図る目的で、三角形要素については、極力避けるように配慮した。要素数は約9000要素となり、大規模な計算領域となっている。

境界条件は、底面を粘性境界、側方を等変位境界とした。

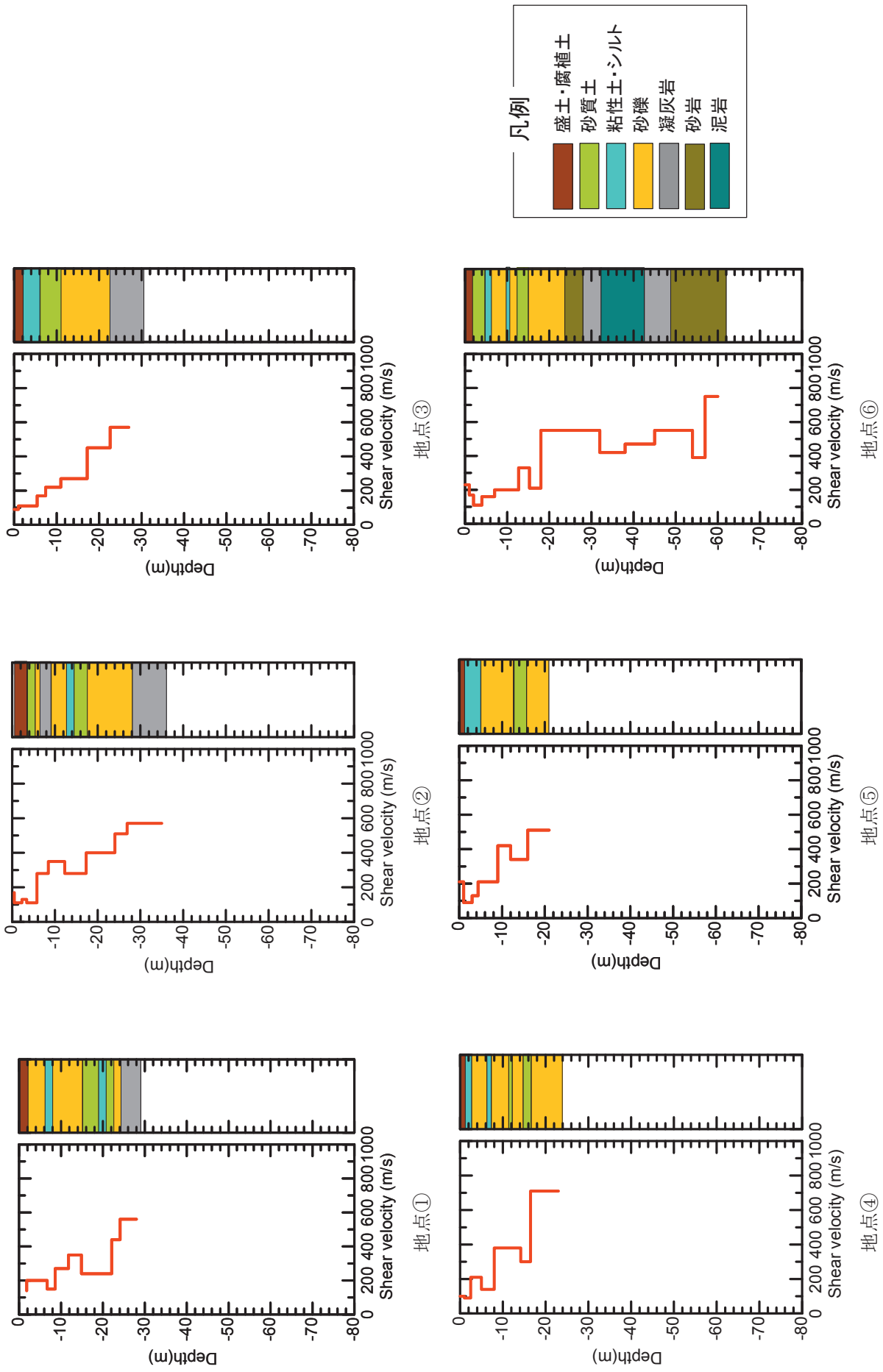


図3.6 土質調査の結果得られた地盤構造 (調査位置は図3.7の▼印参照)

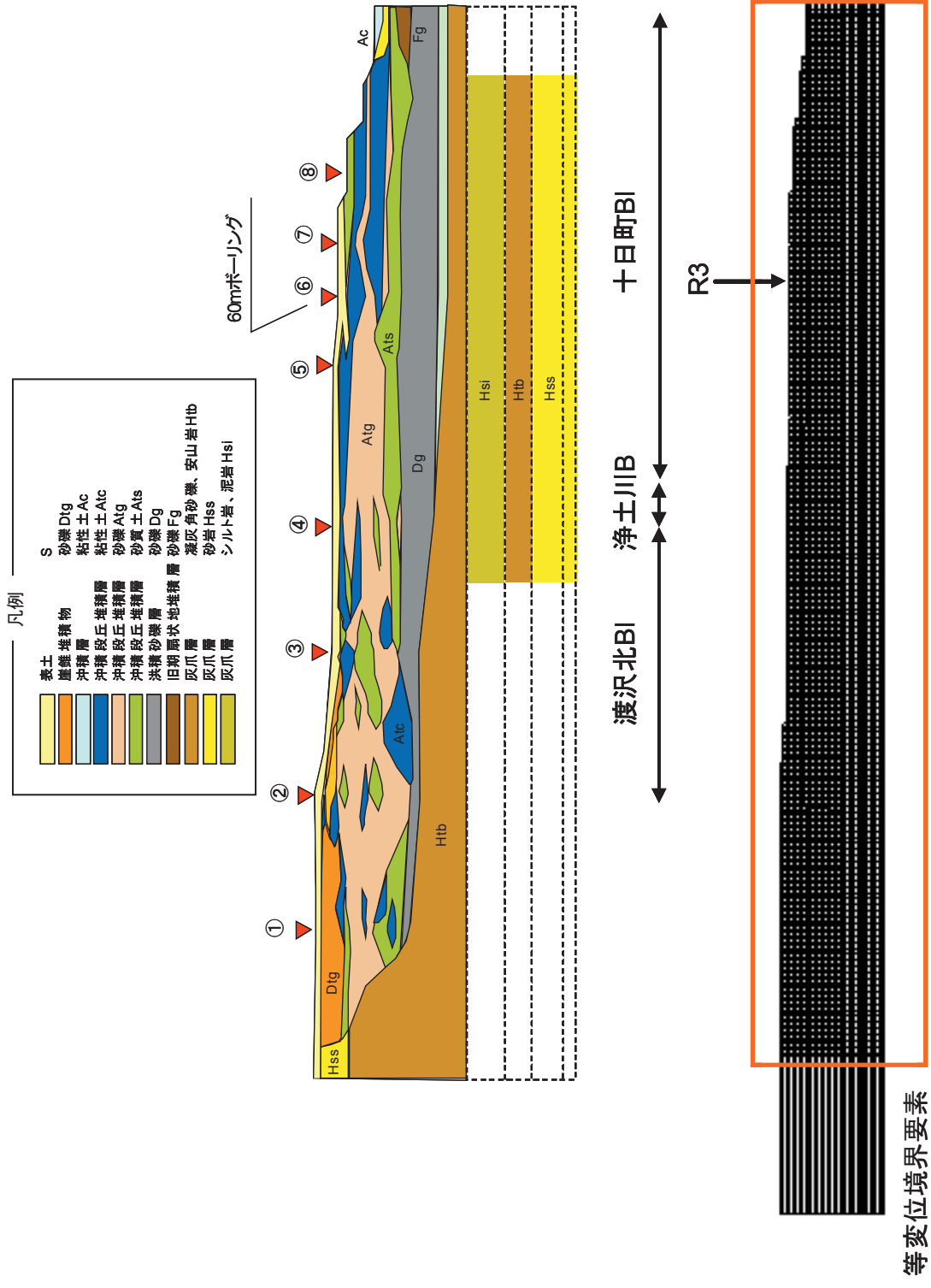


図3.7 表層地盤構造モデルと解析モデル図（図中①～⑧の番号は表3.1と対応）

3.5 土の物性値の設定

(1) 単位体積重量

3.3節で示したように、各層からサンプリングされた土の供試体に対して、土の密度試験を実施しているため、その値を採用した。

(2) せん断波速度 V_s

3.3節で示したように、PS検層を実施しており、せん断弾性波速度 V_s を測定しているため、その値を用いた。ただし、一つの連続した地層であっても、詳細には土の不均質性があり、ボーリングポイント毎に V_s が異なっている。これを表現するのは困難なので、平均的な V_s 値でその層を代表させている。

層厚が厚い段丘堆積層 (Ag層, Ac層) については、拘束圧依存性を導入し、同一の層内であっても、深さに応じて V_s の値を補正している。その他の層については、層厚もそれほど厚くないので、拘束圧依存性は導入せず、同一層内であれば同一の値とした。

(3) 土の非線形構成則

土の非線形構成則については、鉄道総研で開発した修正GHEモデル (Modified general hyperbolic model) ³⁾ を採用した。修正GHEモデルは、小～大ひずみ領域において、土の要素試験で得られた動的変形特性を完全に満足することが可能であり、精度が高い解析が可能となる。

修正GHEモデルでは、応力 τ ～ ひずみ γ 関係は次式で与えられる。

$$\frac{\tau}{\tau_f} = \frac{\frac{\gamma}{\gamma_r}}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \left(\frac{\gamma}{\gamma_r} \right)} \quad (3.1)$$

ここに、

$$C_1(x) = \frac{C_1(0) + C_1(\infty)}{2} + \frac{C_1(0) - C_1(\infty)}{2} \cdot \cos \left\{ \frac{\pi}{\alpha/x + 1} \right\}$$

$$C_2(x) = \frac{C_2(0) + C_2(\infty)}{2} + \frac{C_2(0) - C_2(\infty)}{2} \cdot \cos \left\{ \frac{\pi}{\beta/x + 1} \right\}$$

である。また、 G_{\max} は初期せん断弾性係数で、原位置でのPS検層結果から得られた V_s 値より算定する。 τ_f は土のせん断強度、 γ_r は規準ひずみで、次式で算定される。

$$\tau_f = G_{\max} \cdot \gamma_r \quad (3.2)$$

また、 $C_1(0)$ 、 $C_2(0)$ 、 $C_1(\infty)$ 、 $C_2(\infty)$ 、 α 、 β という6個のパラメータが存在するが、これらは、動的変形試験から得られる動的変形特性により決定される。パラメー

タの決定方法の詳細は文献エラー! 参照元が見つかりません。を参照のこと。一例に、今回の調査地点における試験値に対する要素シミュレーション結果を図3.8に示す。良好に試験結果を評価できていることが分かる。

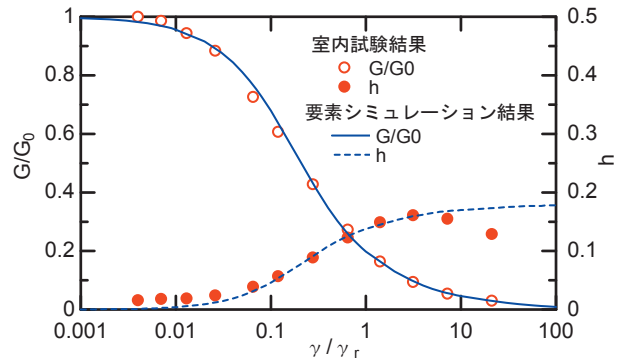


図3.8 修正GHEモデルによる動的変形特性のシミュレーション結果の例

3.6 脱線現場周辺の表層地盤の地震応答解析結果

3.4節および3.5節で示した表層地盤モデルに対して、3.2節で示した基盤波を入力して、時刻歴非線形動的解析法により地盤の地震応答を算定した。なお、付属資料3に示すように、脱線現場周辺の地盤に対して液化化判定を行った結果、その影響は小さいことが確認されているので、本検討では過剰間隙水圧の影響は考慮せず、全応力解析とした。

加振方向は、面外方向加振とした。また、数値積分はNewmark- β 法 ($\beta=1/4$) を用いている。また、減衰はRayleigh減衰として与え、その値は、地震応答に影響のある周波数帯域で概ね1%になるように設定した。

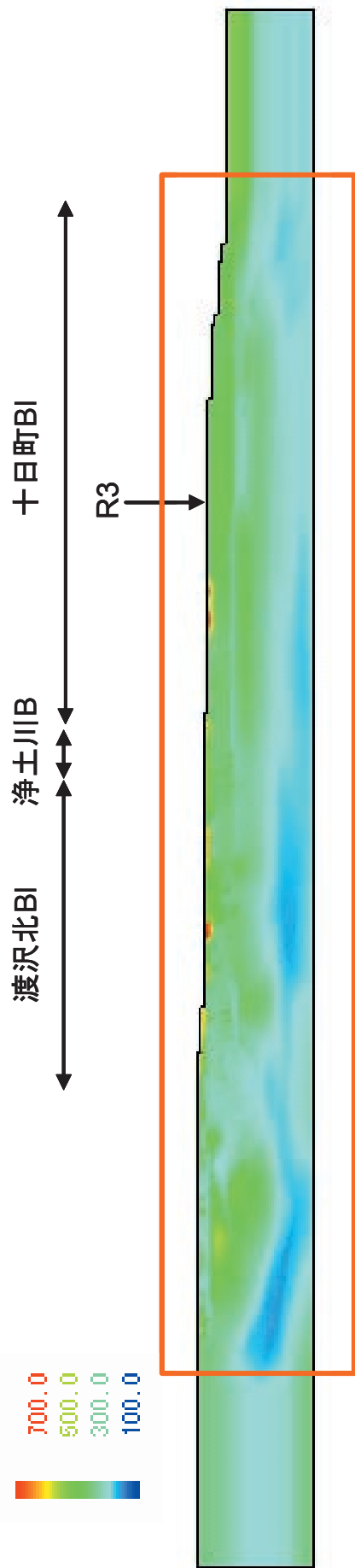
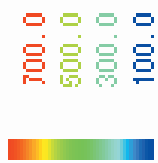
(1) 加速度コンター図

最大加速度コンターを図3.9(a)に示す。地表面では350～400gal前後の加速度が発生しているが、局所的に700gal程度の大きな加速度が発生している箇所が見られる。脱線開始地点の十日町BLR3付近では、概ね390gal程度の加速度が発生している。

(2) 最大せん断ひずみコンター図

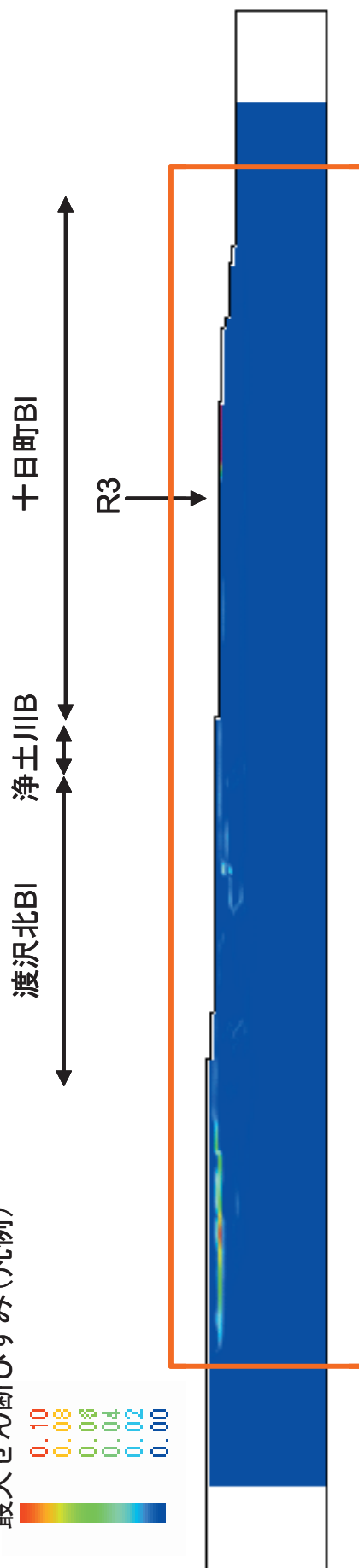
最大せん断ひずみコンターを図3.9(b)に示す。解析領域の左端部で大きなせん断ひずみが発生しているが、これは、トンネル出口から岩盤層が傾斜していることによる地震動の増幅の影響と思われる。その他、渡沢北終点方～浄土川にかけても比較的大きなせん断ひずみが発生しており、地盤の非線形化が大きかったと推測される。それ以外の地点では、概ね 10^{-3} のオーダーとなっており、それほど大きなせん断ひずみは発生していない。

最大加速度(凡例)



(a) 最大加速度コンター図

最大せん断ひずみ(凡例)



(b) 最大せん断ひずみのコンター図
図3.9 解析結果(最大値コンター図)

(3) フーチング下面位置での加速度時刻歴波形

各高架橋・橋梁位置での加速度波形とそのフーリエ振幅スペクトルを図3.10に示す。なお、一般には、構造物への入力地震動としては地表面加速度波形ではなく、フーチング位置での加速度波形を用いることが多いので、その位置での加速度を図3.10には示してある。

0.8Hz付近に見られるピークは、基盤波自身が持っている特性である。2~3Hz付近のピークがその地点の固有の堆積構造に起因して増幅されたピークである。

文献

- 1) 防災科学技術研究所 強震ネットワーク K-NET <http://www.k-net.bosai.go.jp/k-net/>
- 2) 杉戸真太, 合田尚義, 増田民夫: 周波数特性を考慮した等価ひずみによる地盤の地震応答解析法に関する一考察, 土木学会論文集, No.493/III-27, pp.49-58, 1994.
- 3) 西村昭彦, 室野剛隆: GHEモデルと簡易な履歴則を用いた土の非線形モデルの提案と実験的検証, 第25回地震工学研究発表会, pp.309-312, 1999.

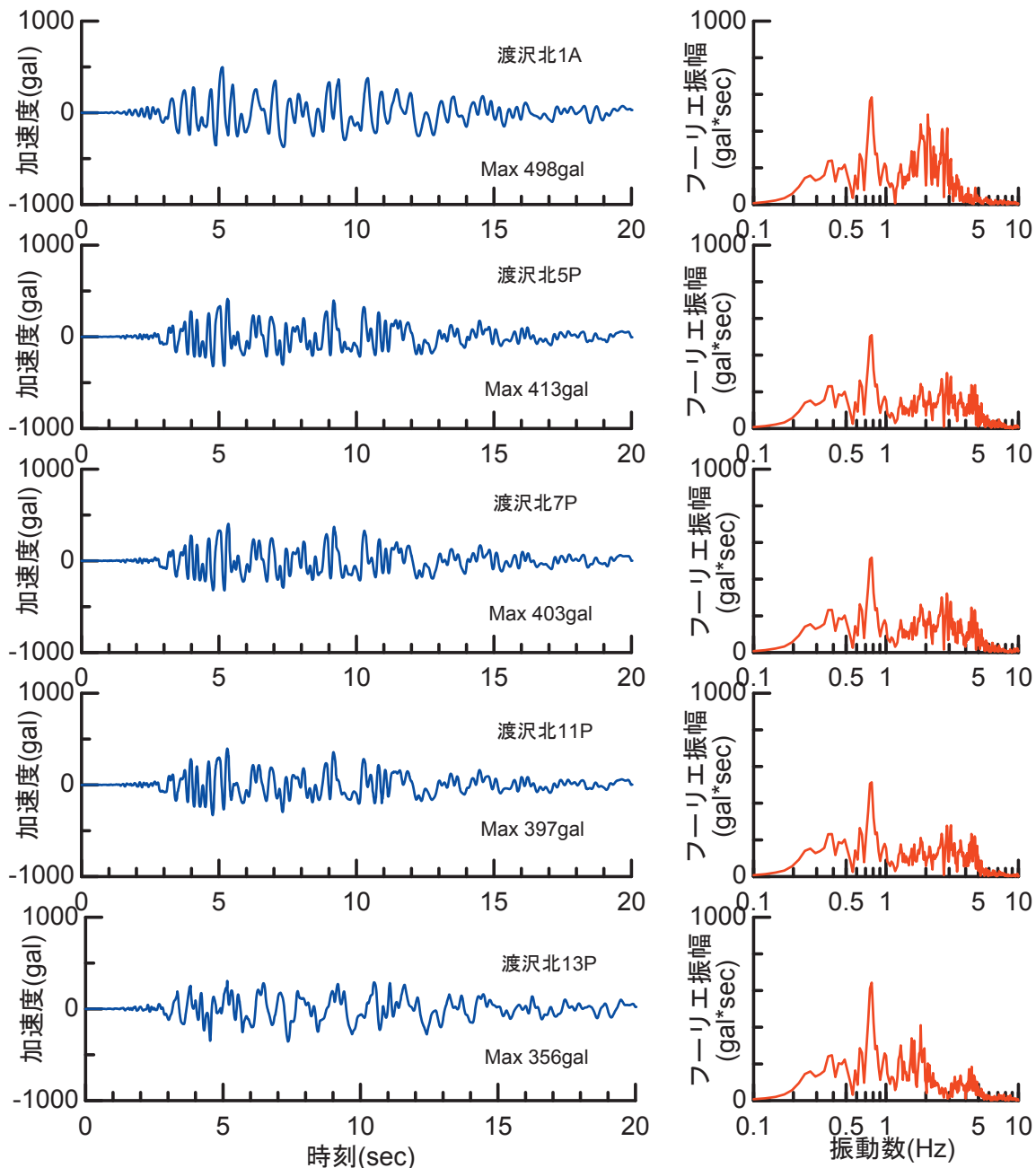


図 3.10 フーチング下面位置での地震動（構造物への入力地震動）のシミュレーション結果（加速度波形とフーリエスペクトル）（その1）

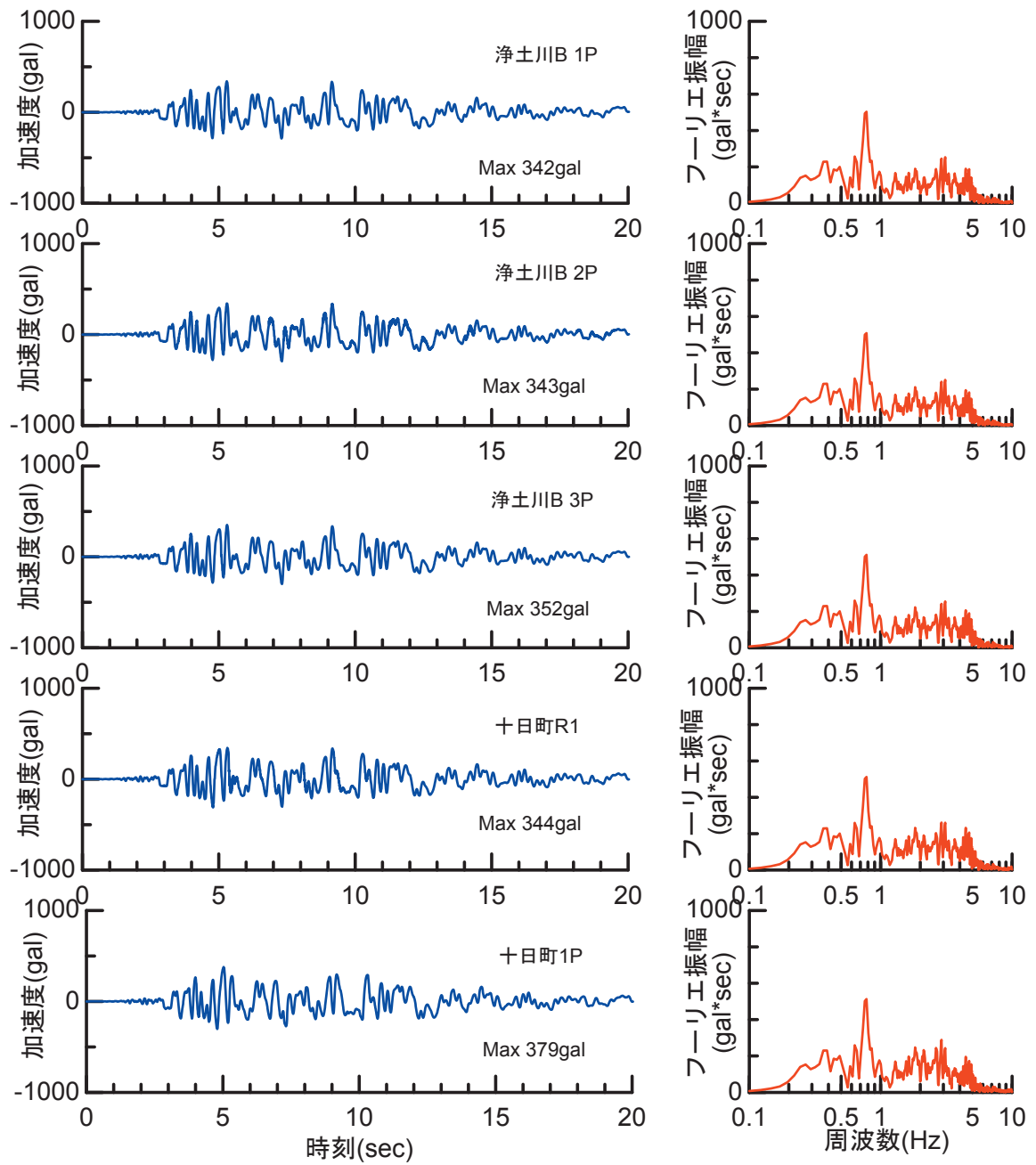


図 3.10 フーチング下面位置での地震動（構造物への入力地震動）のシミュレーション結果（加速度波形とフーリエスペクトル）（その2）

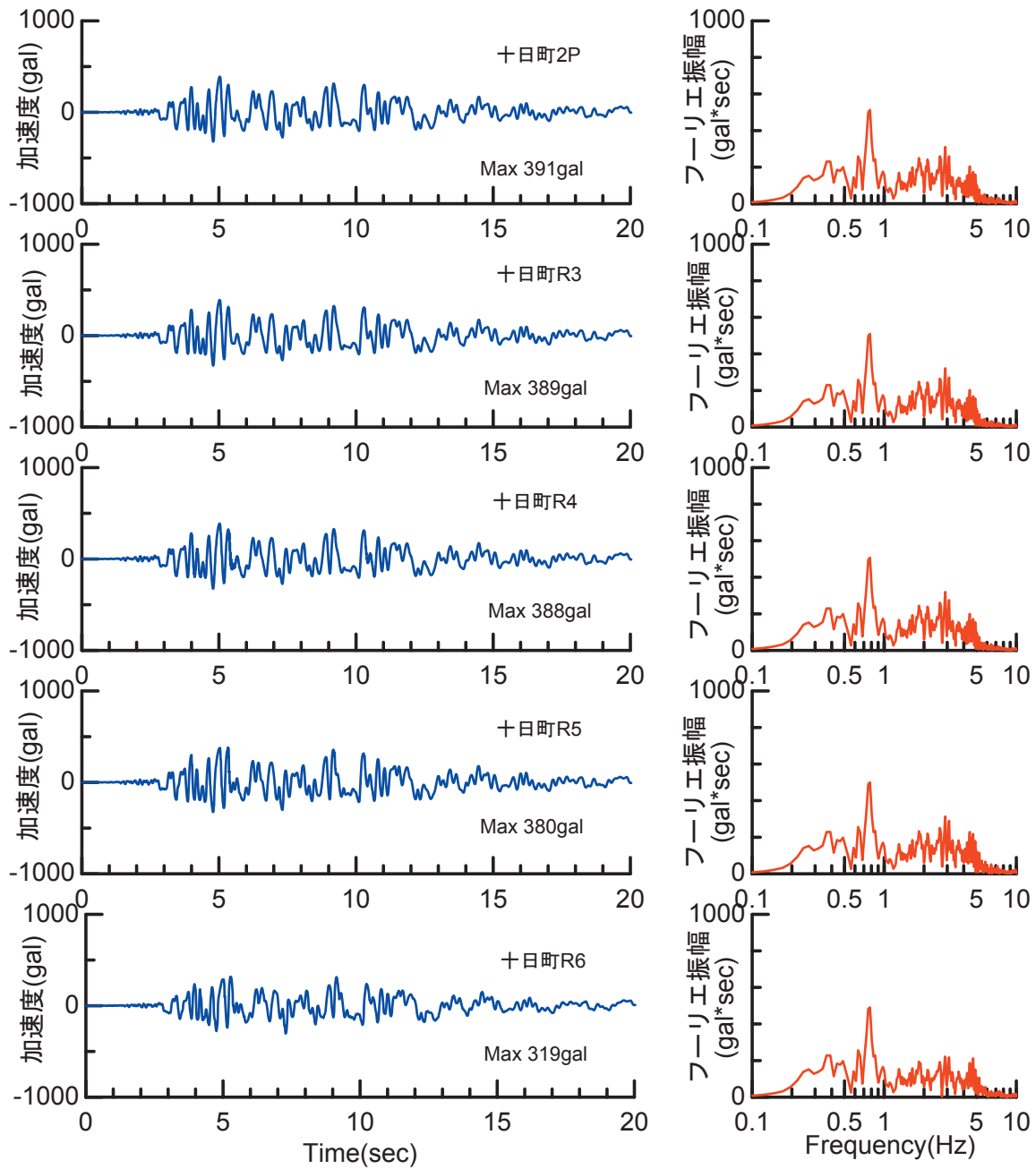


図 3.10 フーチング下面位置での地震動（構造物への入力地震動）のシミュレーション結果（加速度波形とフーリエスペクトル）（その3）