

第3章 地表面地震動の推定

本章では、新幹線車両の脱線を引き起こした平成28年4月14日21時26分に発生した熊本地震の前震（1章で「前震」と表記することとした地震で、以降ではこれを対象地震と呼ぶ）の脱線地点における地表面地震動を推定する。

3.1 地表面地震動の推定手順の整理

本検討で用いる地表面地震動の推定手順について整理を行う。脱線地点周辺には、いくつかの地震観測点が設置されており、対象地震以外にも、4月16日1時25分に発生した熊本地震の本震（気象庁マグニチュード $M_j7.3$ 、モーメントマグニチュード $M_w7.0$ ）やその他の余震による地震動が複数観測されている。一方で、脱線地点においては、対象地震における地震記録は得られていないが、その後発生した地震による複数の記録が観測されている。そこで、これらの地震記録を用いて、脱線地点における対象地震の地震動を推定することとした。このような場合に、地震動を推定する主な手法として、以下の3通りが考えられる。

○手法①：周辺観測点の記録をそのまま使用（図3-1）

周辺で観測された地震記録をそのまま用いる。ただし、線路方向、線路直角方向への角度補正は実施する。

○手法②：地表面で補正を実施（図3-1）

(2-1) 脱線地点と周辺観測点で観測された同一地震の

記録（地表面位置）をフーリエ変換し、両地点のフーリエ振幅スペクトルの比率を算出する。複数の地震記録が得られている場合には、すべての地震に対して同作業を実施し、得られた結果を平均する。これを両観測点間の補正係数（地表面位置）とする。

(2-2) 周辺観測点における対象地震の記録をフーリエ変換し、上記(2-1)で得られた補正係数（地表面位置）をフーリエ振幅スペクトルに乗ずる。これをフーリエ逆変換することで、脱線地点における推定地表面地震動を算定する。

○手法③：耐震設計上の基盤面位置で補正（図3-2）

(3-1) 脱線地点と周辺観測点で観測されたすべての地震記録（地表面位置）を重複反射理論により基盤面まで引き戻して、基盤面での地震動を算定する。ここでの基盤とは、せん断弾性波速度 V_s が700m/s程度の工学的基盤が望ましいが、このような地盤までの調査が実施されていない場合は、 N 値50程度（ $V_s=400\text{m/s}$ 程度）の地層（耐震設計上の基盤面）を基盤として代用することも可能である。

(3-2) 上記(3-1)で評価した複数の地震記録（基盤面位置）のうち、脱線地点と周辺観測点で同時に観測された記録をフーリエ変換するとともに、両地点のフーリエ振幅スペクトルの比率を算出する。複数の地震記録が得られている場合には、すべての地震に対して同作業を実施し、得られた結果を平均する。これを両観測点間の補正係数（基盤面位置）とする。

(3-3) 上記(3-1)で評価した地震記録のうち、周辺観測

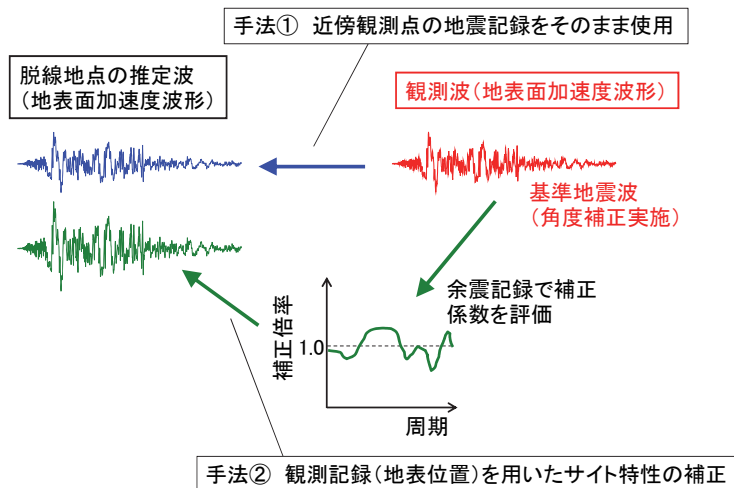


図3-1 地震動の推定手法（手法①、手法②）

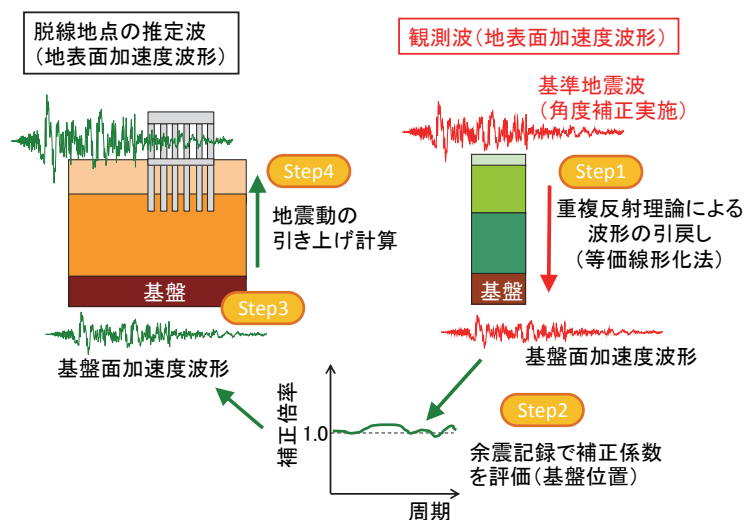


図3-2 地震動の推定手法（手法③）

点での対象地震の記録（基盤面位置）をフーリエ変換し、上記(3-2)で得られた補正係数（基盤面位置）をフーリエ振幅スペクトルに乗ずる。これをフーリエ逆変換することで、脱線地点における推定基盤面地震動を算定する。

(3-4) 上記(3-3)で得られた基盤面位置の地震動を入力として、脱線地点における表層地盤データを用いた地盤応答解析を実施することで、脱線地点における推定地表面地震動を算定する。

ここで、各手法の違いについて簡単に整理を行う。まず手法①は、近傍の地震記録をそのまま用いる方法であり、検討対象の地点と地震観測点がよく近傍に位置しており、かつ表層地盤の特性が同一であると考えられる場合に有効であると考えられる。今回は、脱線地点と周辺観測点の両地点で、同じ地震で観測された記録が存在するため、この記録を比較することで、両地点で観測された地震動が同一とみなせるかを確認できる。

近傍の観測点の地震記録が脱線地点と同一とみなせない場合には、両地点の表層地盤の特性が異なっている可能性が高い。また、今回対象とするような比較的振幅レベルの大きな地震動を対象とする場合、これらの特性に、表層地盤の非線形挙動の違いによる影響が顕著にあらわれる可能性がある。この非線形挙動の影響は、表層地盤の特性や基盤に入射される地震動の振幅レベルによっても変化する。そのため、周辺観測点と脱線地点間の補正係数を算出する際には、この影響を除去したものであることが望ましい。そのため、理想的には、地盤の非線形挙動の影響を除去可能な手法③を用いることで、信頼性の高い結果が得られると考えられる。なお、2004年新

潟県中越地震、2011年東北地方太平洋沖地震における脱線メカニズム解明のための検討では、いずれも手法③を用いている。

一方で、表層地盤の非線形挙動の影響を適切に評価し、これを取り除くためには、各地点における地盤の詳細な特性を予め把握しておく必要がある。地盤特性の具体的な設定方法については後述するが、今回対象とする地域においては、地盤の非線形挙動時の特性が詳細に把握されておらず、必ずしも手法③を用いることが適切な結果になるとは限らない。また、脱線地点の近傍に地震観測点が存在しており、かつ対象地震後に得られた地震記録の振幅レベルも大きなものであったため、各地震、各観測点の非線形挙動の影響が同程度であった可能性もある。さらに、地表面で得られた地震記録を引き戻す際に用いる重複反射理論は、鉛直下方からの波動伝播を仮定しているものの、震源近傍で得られた記録では、斜め入射の影響を無視することができず、こういった場合には重複反射理論の適用は困難である。以上の理由から、本検討においては、表層地盤の非線形挙動の影響の変化を無視した補正として、手法②についても実施することとした。

3.2 基準地震動の選定

脱線地点周辺の地震観測点の中から、対象地震の地震記録（これを「基準地震動」と呼ぶ）として使用する記録を選定する。基準地震動は、以下のような条件を満たしていることが望ましい。

- (a) 対象地震（平成28年4月14日21時26分の地震）による記録が得られている
- (b) 脱線地点からの距離が近い

- (c) 地震記録に液状化や局所的な地形効果などの特異な特性が含まれていない
 - (d) 観測地点近傍の土質調査結果（N 値，PS 検層等）が存在する
 - (e) 対象地震以外にも複数の地震記録が観測されている
- 脱線地点周辺における地震観測点の位置を図 3-3 にまとめて示す。各地点では、それぞれ地震計設置位置の近傍で標準貫入試験等の地盤調査が実施されている。これらの結果から、地点毎に地盤条件の硬軟はあるものの、いずれの地点も局所的な地震増幅や液状化が発生するような特殊な地盤ではないことを確認している。また、対象地震以外にも比較的規模の大きな地震による記録を取得している。そのため、図 3-3 で示した全ての観測点において、上記(a), (c), (d), (e)の条件を満足している。そこで本検討では、上記(b)の脱線地点からの距離を指標として、基準地震動を絞ることとする。このような観点で図 3-3 を見ると、青丸で示した脱線地点の近傍には、九州旅客鉄道株式会社が管理する在来線地震計（熊本駅）と気象庁が管理する地震計（熊本合同庁舎）が存在する。そこで、暫定的に基準点としてこの 2 地点を選定し、それぞれの記録を用いて対象地点の地震動を推定する。最終的には、地震動の補正係数や地盤条件、対象地点まで

の距離等を総合的に考慮することで、基準点を 1 つに絞ることとする。

選定した基準点（在来線熊本駅，気象庁熊本合同庁舎）における対象地震の観測記録，フーリエ振幅スペクトルを図 3-4，図 3-5 に示す。なお，それぞれの地震計は基本的に東西方向，南北方向，鉛直方向の記録を取得しているが，最終的に構造物，車両挙動の評価を行うことを踏まえて，この段階で水平 2 方向の記録を線路直角方向，線路方向に補正している。具体的には，線路直角方向のプラスを北から時計回りに 167 度であると考え，東西方向，南北方向の記録を回転させるとともに，ベクトル合成している。以降の時刻歴波形においても水平方向の記録は同様の補正を実施している。なお，図 3-4，図 3-5 における 0 秒の絶対時刻は，21 時 26 分 34 秒である。

3. 3 地表面位置で得られた地震観測記録

前節で整理を行った各観測点における地震記録の取得状況を表 3-1 に示す。なお，表中の「在来線」は九州旅客鉄道株式会社による地震観測記録，「気象庁」とは気象庁による地震観測記録，「脱線地点」とは鉄道総研が 4 月 14 日の前震発生後に臨時で実施した脱線地点での観



図 3-3 脱線地点と周辺の地震観測点の位置関係（Google map に加筆）

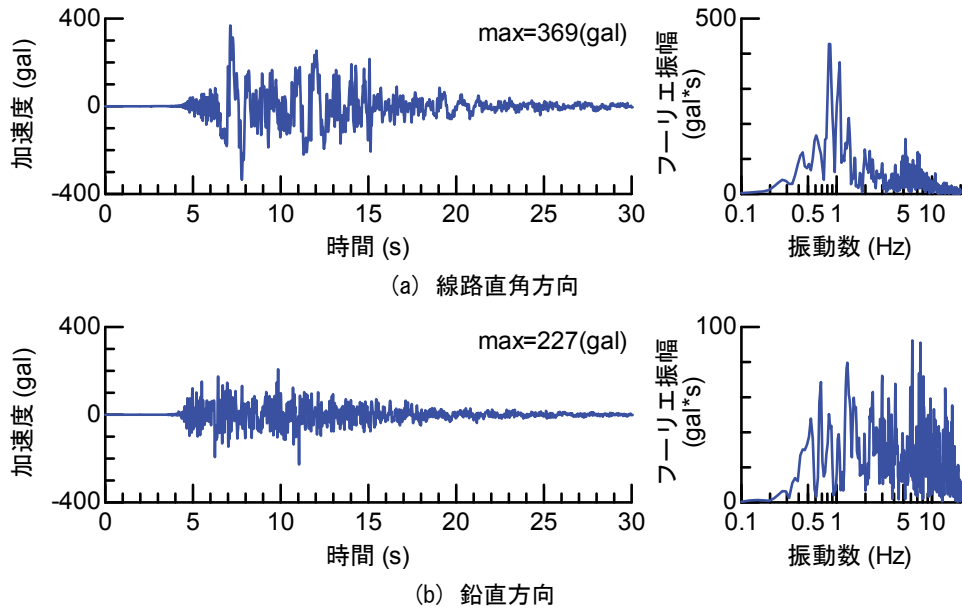


図 3-4 地表面位置での観測記録(対象地震 (4/14 前震), 観測点: 在来線地震計)

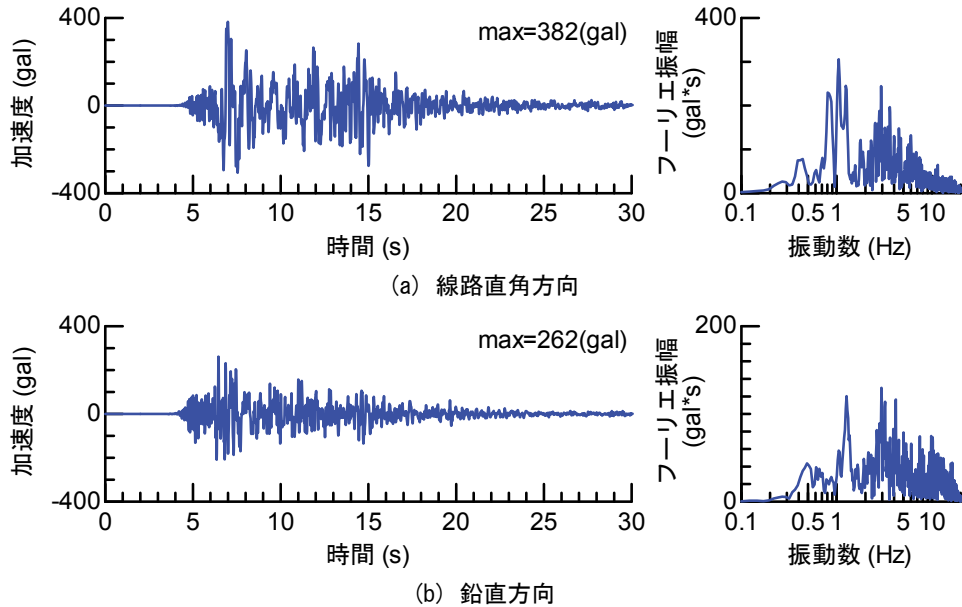


図 3-5 地表面位置での観測記録(対象地震 (4/14 前震), 観測点: 気象庁地震計)

表 3-1 地震記録の取得状況

発生日時	地震規模 M_j	震源位置			記録の有無			備考
		緯度	経度	深さ (km)	脱線 地点	在来 線	気象 庁	
4/14 21:26	6.5	32.742	130.808	11	—	○	○	4/14 前震 (対象地震)
4/16 01:25	7.3	32.753	130.762	12	○	○	○	4/16 本震
4/16 01:44	5.4	32.752	130.760	15	○	○	—	余震 1
4/16 01:45	5.9	32.862	130.898	11	○	○	○	余震 2
4/16 09:48	5.4	32.847	130.835	16	○	—	○	余震 3

※○は記録あり，—は記録なし

測記録である。これらの記録のうち、4月14日の対象地震以降に、脱線地点で観測された地震記録の時刻歴加速度波形、フーリエ振幅スペクトルをまとめて図 3-6～図

3-9 に示す。また、在来線地震計、気象庁地震計で観測された記録を、付属資料 1 にまとめて示す。ここで、図 3-6 で示した記録の 0 秒における絶対時刻は、21 時 26 分

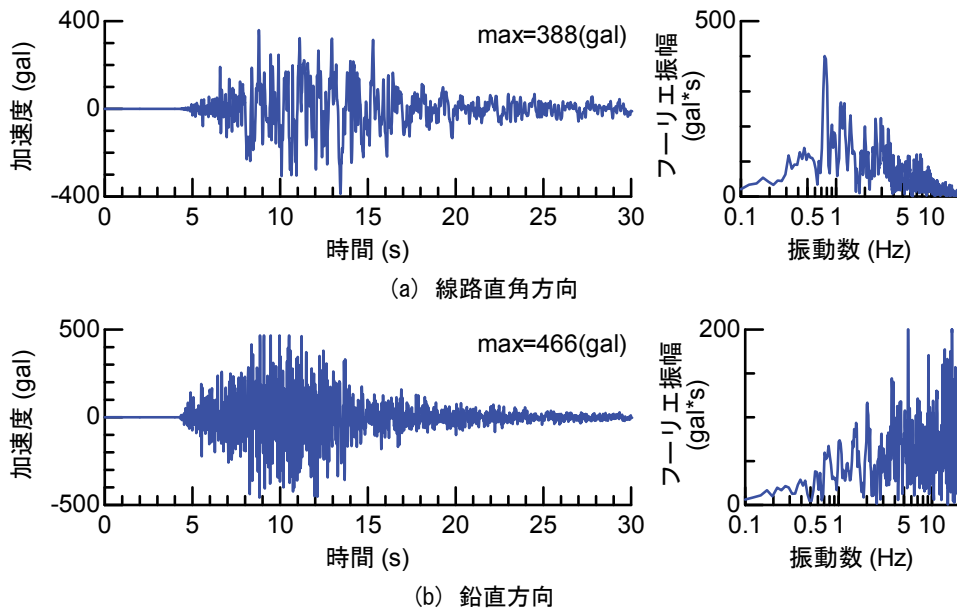


図 3-6 地表面位置での観測記録(4/16 本震, 観測点: 脱線地点 (鉄道総研観測))

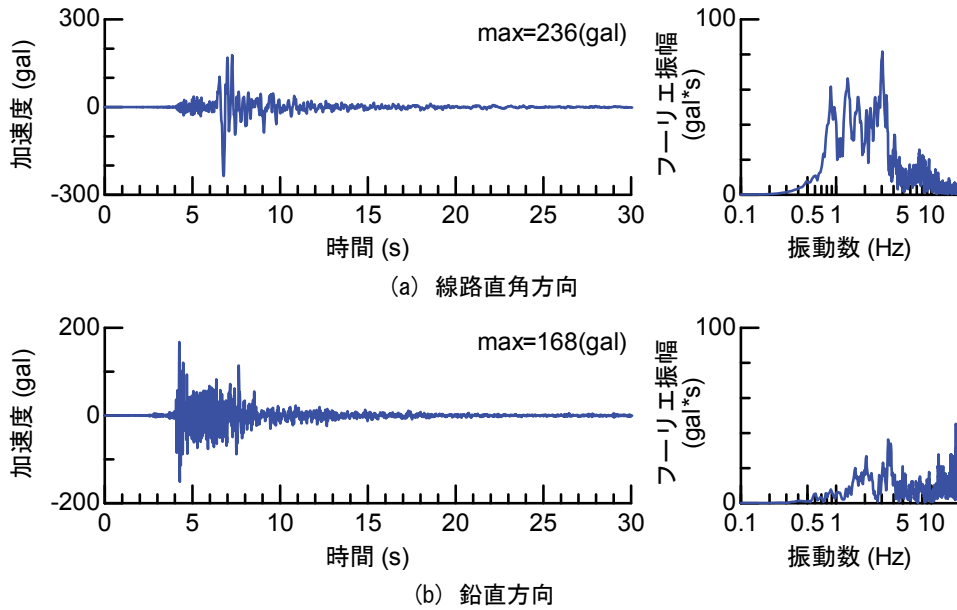


図 3-7 地表面位置での観測記録(余震 1, 観測点: 脱線地点 (鉄道総研観測))

34 秒となっている。

なお、脱線地点における地震計の設定は最大レンジが 466gal 程度であったため、4/16 本震の鉛直方向成分はレンジオーバーとなっており、取り扱いに注意を要する。次節以降では、これらの観測記録を用いて、脱線地点における対象地震の地震動を推定する。

3. 4 各手法を用いた地表面地震動の推定

本節では、3.2 節、3.3 節で整理した地震観測記録を用いて、3.1 節で示した手法①～手法③の各手法によって地表面地震動を推定する。

3. 4. 1 手法① 周辺観測点の記録をそのまま使用する 方法

手法①は、3.2 節で選定した基準地震動をそのまま用いる方法である。基準点を在来線地震計とした場合の結果を図 3-10 に、気象庁地震計を基準点とした場合の結果を図 3-11 に示す。

3. 4. 2 手法② 地表面で補正を実施する方法

脱線地点と周辺観測点で同時に観測された地震記録のフーリエ振幅比(脱線地点/周辺観測点)を算出し、得られた結果の平均値を地表面位置での補正係数とする。

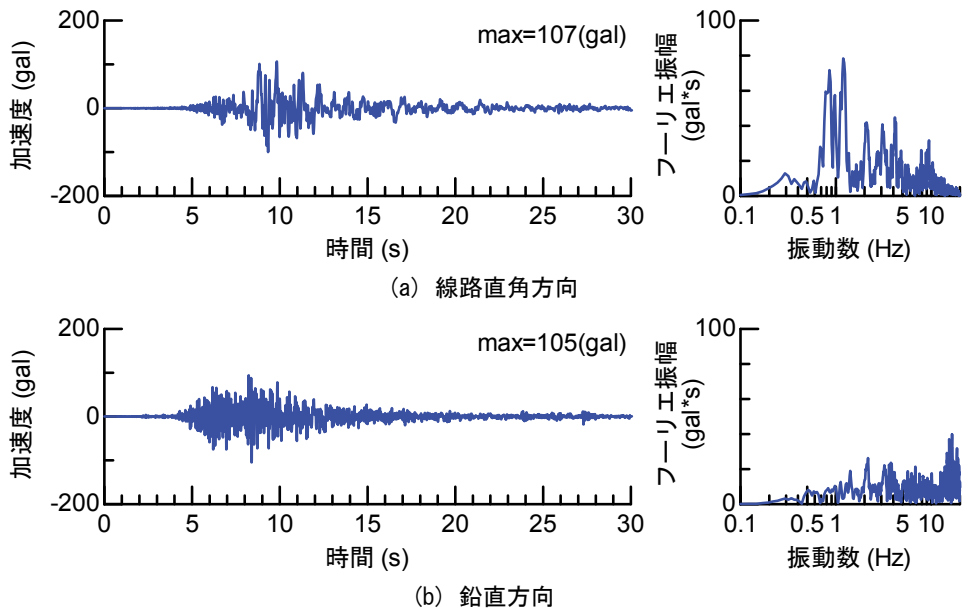


図 3-8 地表面位置での観測記録(余震 2, 観測点: 脱線地点 (鉄道総研観測))

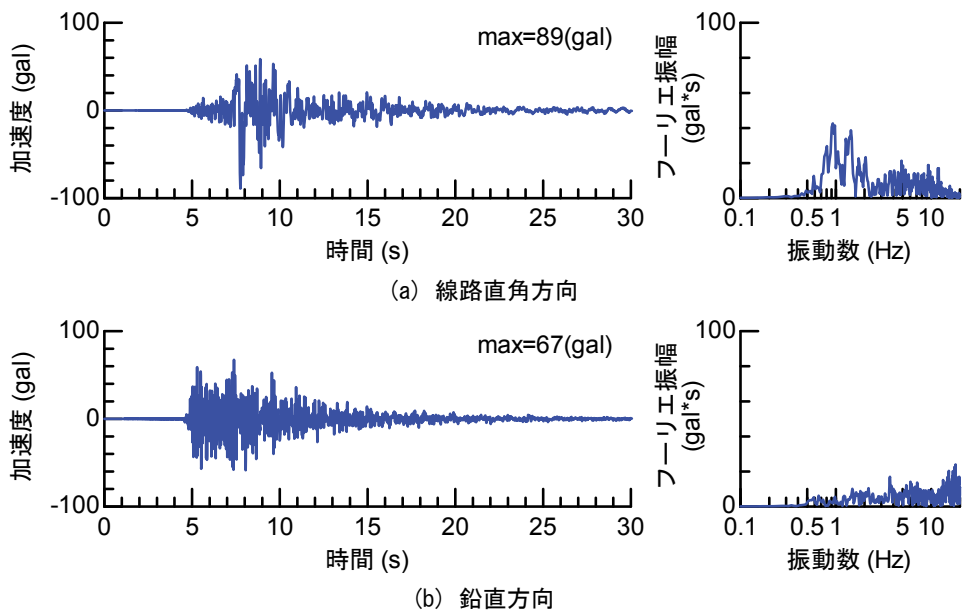


図 3-9 地表面位置での観測記録(余震 3, 観測点: 脱線地点 (鉄道総研観測))

表 3-1 にあるように、基準点を在来線地震計とした場合に用いることのできる地震記録は、4/16 本震、余震 1、余震 2 であり、基準地点を気象庁地震計とした場合には、4/16 本震、余震 2、余震 3 である。これらの地震記録から評価した補正係数を図 3-12 (基準点: 在来線地震計)、図 3-13 (基準点: 気象庁地震計) に示す。なお、フーリエ振幅比を算出する際には、それぞれのフーリエ振幅スペクトルに対してバンド幅 0.2Hz の Parzen window を乗じることで平滑化を行っている。

補正係数は、いずれの観測点を基準とした場合にもフーリエ振幅比が 1.0 周辺で変動している。また、それぞれの地震による振幅比は概ね類似した傾向を示している。

これらの結果から、今回選定した各地点の地震動特性は概ね類似しているが、地点直下の地盤特性の違いによって、増幅特性が多少変化すること、この変動は地震によらず概ね一定であることが確認できる。これらの結果から、脱線地点の地震動特性は周辺とは多少異なることが考えられるため、得られた補正係数を用いることで、手法①と比較して地震動の推定精度が向上することが期待される。

続いてこの補正係数を各観測点の対象地震記録に乗ずることで、脱線地点の地震動を推定した。基準点を在来線地震計とした場合の結果を図 3-14 に、気象庁地震計とした場合の結果を図 3-15 に示す。

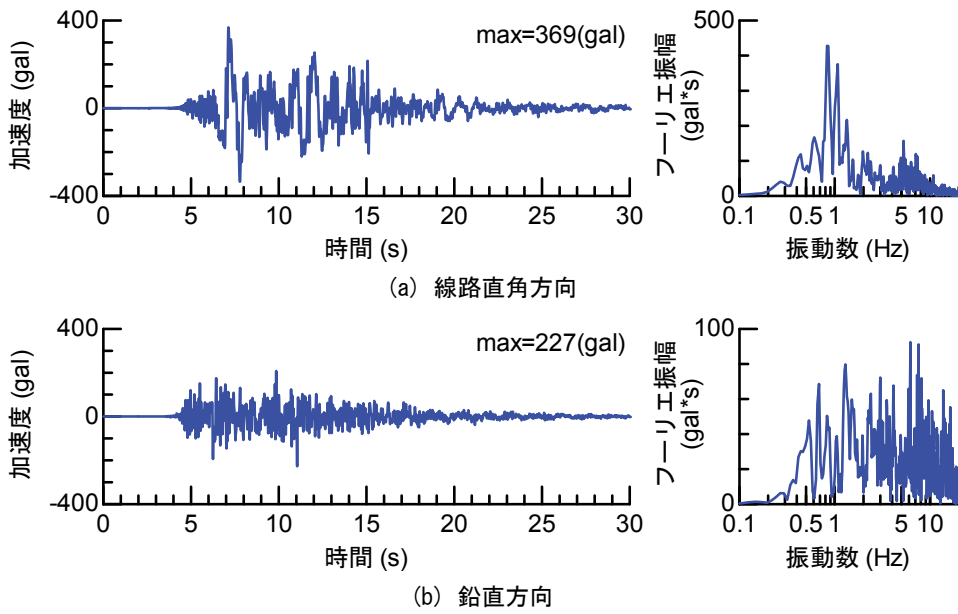


図 3-10 地表面地震動の推定結果(手法①, 基準点: 在来線地震計)

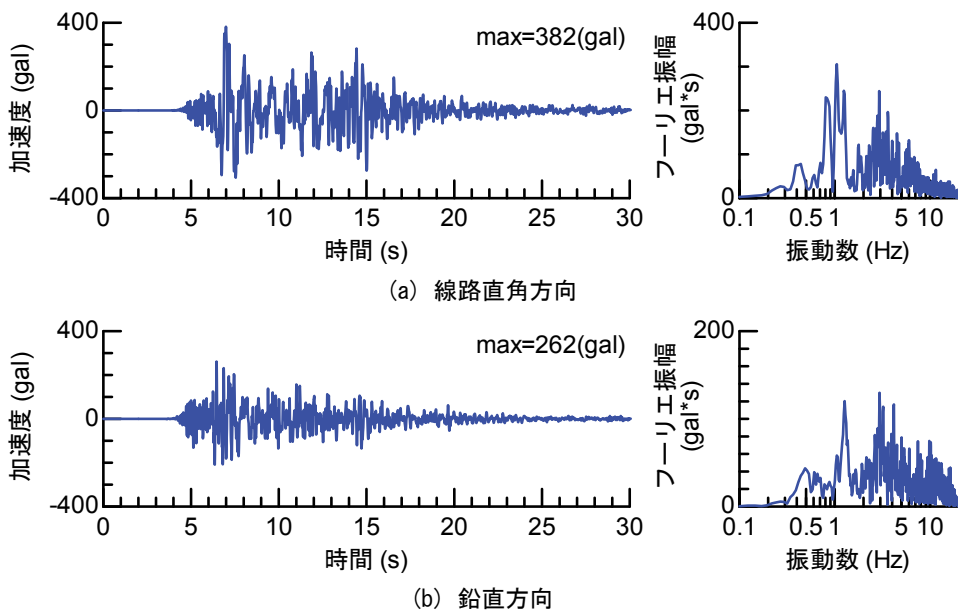


図 3-11 地表面地震動の推定結果(手法①, 基準点: 気象庁地震計)

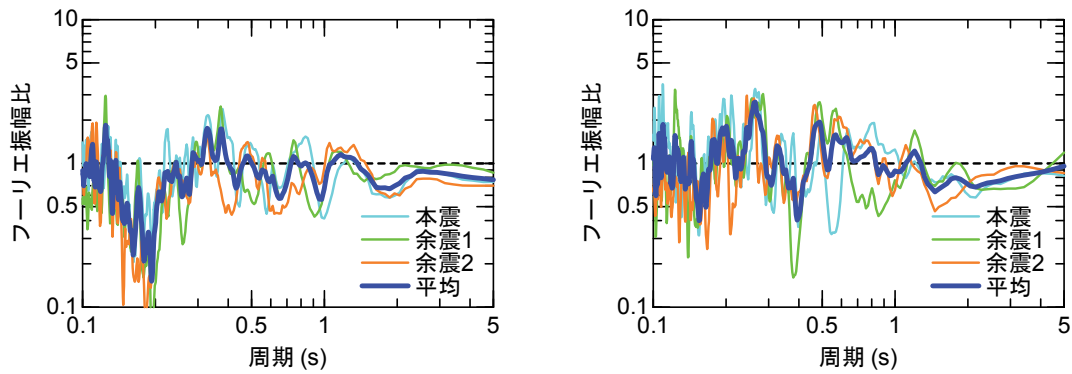
なお、前述したように、脱線地点における本震時の鉛直方向記録には、レンジオーバーが生じている。しかしながら、今回対象とした周期成分において地震毎の振幅比の違いはそれほど大きくなく、レンジオーバーの影響は見られない。そのため、以降の検討においては、この地震記録についても他の記録と同列に整理することとした。

3. 4. 3 手法③ 耐震設計上の基盤面位置で補正を実施する方法

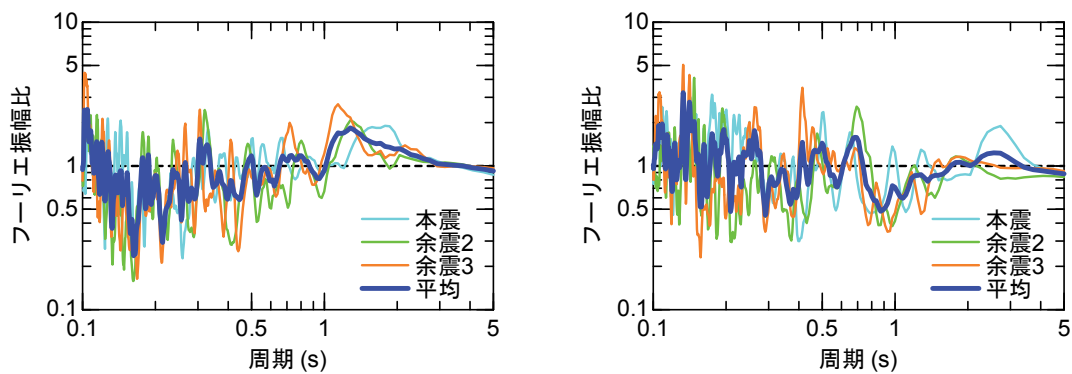
(1) 地盤条件の設定

地表面位置の地震動は、表層地盤の影響によってその

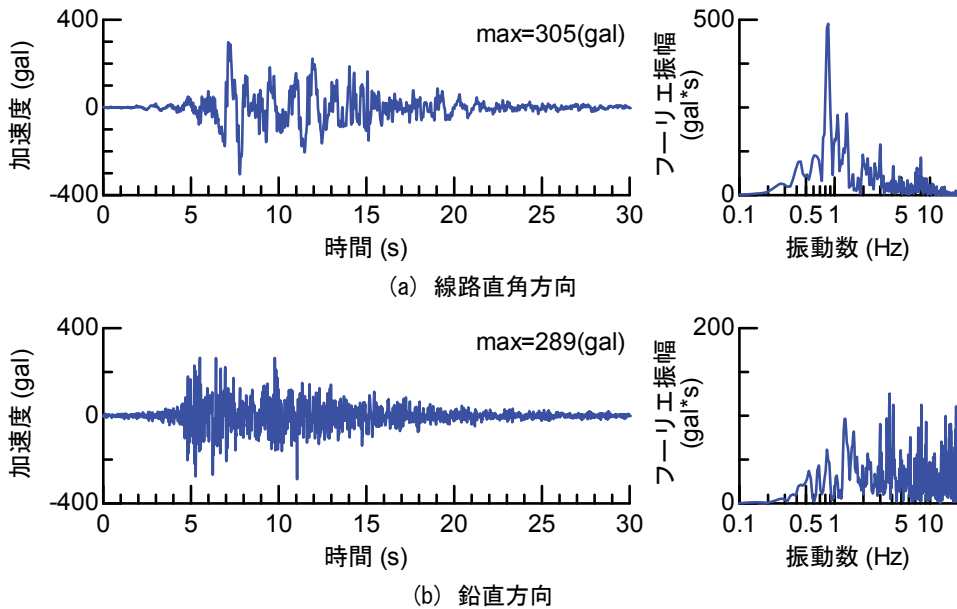
特性が著しく変化する。特に振幅レベルが大きい地震動の場合には、表層地盤の非線形性の影響が地震動に含まれる可能性がある。そこで手法③ではまず、観測された地震動から表層地盤の影響を剥ぎ取ることにより、基盤位置での地震動を算出する。この時、せん断弾性波速度 $V_s=700\text{m/s}$ の工学的基盤位置まで基準地震波を引戻すことが望ましいが、本検討で対象とした地点においては、 $V_s=400\text{m/s}$ 程度の地盤を基盤面として設定した。これを満足する深度までの情報が得られていないため、地震動の引戻しは、重複反射理論により行う。重複反射理論は周波数領域で定式化を行ったものであるため、地盤の非線形性の影響を直接的に評価することはできず、等価



(a) 線路直角方向 (b) 鉛直方向
 図 3-12 地表位置での補正係数(基準点：在来線地震計)



(a) 線路直角方向 (b) 鉛直方向
 図 3-13 地表位置での補正係数(基準点：気象庁地震計)



(a) 線路直角方向 (b) 鉛直方向
 図 3-14 地表面地震動の推定結果(手法②, 基準点：在来線地震計)

線形化法によって考慮することとする。なお、等価線形化法を用いる際の具体的な手法としては、周波数依存型の減衰、剛性を用いる手法¹⁾を採用する。この手法は鉛直下方からの波動伝播を仮定したものである。なお、引戻し計算は線路直角方向の波形のみを対象として実施す

ることとし、鉛直方向については、表層地盤による増幅の影響を無視することとした。

図 3-16 に基準点と近傍ボーリング調査地点の位置関係を示すとともに、これらのボーリング調査結果から設定した地盤条件を図 3-17、表 3-2 (在来線地震計)、表

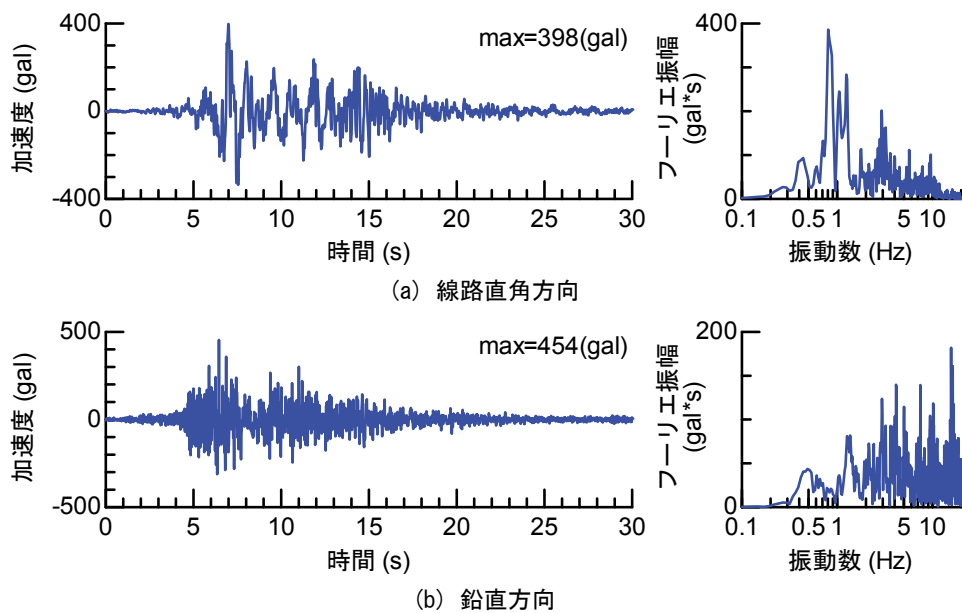


図 3-15 地表面地震動の推定結果(手法②, 基準点: 気象庁地震計)

3-3 (気象庁地震計) に示す。まず図 3-16 より, 気象庁地震計地点ではごく近傍で地盤調査が実施されており, この結果は地震計位置での地盤情報を表現していると考えられる。一方で, 在来線地震計位置では同一箇所での地盤調査結果は存在しないため, 300m 程度離れた地点において実施された PS 検層の結果を用いることとした。そのため, 在来線地震計位置における地盤物性値の設定精度としては多少低くなっている可能性がある。

ここで, 地震動の引き戻し計算を実施する際は, 土のせん断弾性波速度Vsだけでなく土の動的変形特性が最終的な結果に大きな影響を与える。そのため, 前者は PS 検層等の原位置試験, 後者は繰返し三軸試験等の室内試験により求めるのが基本である。しかし, 今回の地点においては, 繰返し三軸試験が実施されていないため, この地点における動的変形特性が不明である。そこで, 動的変形特性については, GHE-Sモデル²⁾の標準的なパラメータ設定手法³⁾により設定したものをを用いることとした。最終的に解析に用いた動的変形特性は, 付属資料 2 にまとめて示している。

4 章で後述するように, 脱線地点の近傍では複数地点で地盤調査が実施されている。しかしながら, 近傍の地盤調査地点では標準貫入試験に基づく N 値と土質区分のみが得られているだけである。そこで, せん断弾性波速度, 単位体積重量等の情報は, N 値から鉄道構造物の設計標準⁵⁾に従って設定することとした。また, 動的変形特性については, 基準点と同様の方針で設定している。最終的に脱線地点近傍の地震観測点で設定した地盤物性値を表 3-4 に示すとともに, 最終的に各層で設定した動的変形特性を付属資料 2 にまとめて示す。



図3-16 基準観測点と地盤調査箇所の位置関係

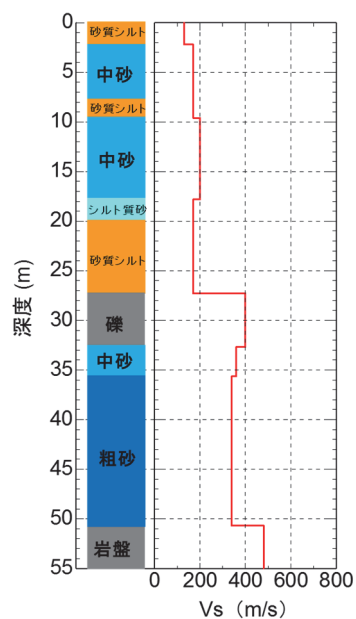
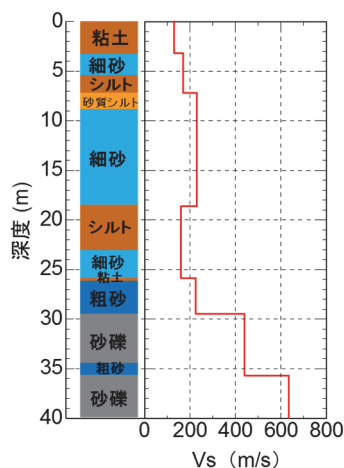
(2) 地震動の引き戻し

上記(1)で設定した地盤条件を用いて, 各観測記録を基盤位置まで引き戻した。脱線地点における基盤面位置に引き戻した時刻歴波形, フーリエ振幅スペクトルをまとめて図 3-18~図 3-21 に示す。また, 在来線地震計, 気象庁地震計の記録については, 付属資料 3 に示す。

これらの結果を見ると, 今回対象とした地震動はいずれも振幅レベルが比較的大きいため, 地盤の非線形挙動の影響が顕著になっており, 結果として基盤面位置の最大加速度が地表面位置よりも大きな地震動として推定されていることが分かる。

(3) 補正係数の評価, 基盤地震動の推定

上記(2)で評価したそれぞれの基盤波形を用いて, 脱線



(a) 在来線地震計 (A0687)

(b) 気象庁地震計 (Bor. No2)

図 3-17 地震観測地点近傍のPS 検層結果

表 3-2 地震観測点位置での地盤モデル化結果 (在来線地震計)

No.	深さ (m)	土質	N 値	せん断 弾性波速度 Vs(m/s)	単位体積 重量 γ (kN/m ³)	D ₅₀ (mm)	基準ひずみ $\gamma_{0.5}$
1	0.0~3.2	粘土	6	130	16.0	0.020	0.000884
2	3.2~5.3	細砂	18	170	19.0	0.150	0.000495
3	5.3~7.2	シルト	2	170	16.0	0.025	0.001011
4	7.2~8.8	砂質シルト	2	230	16.0	0.040	0.000895
5	8.8~18.6	細砂	32	230	19.0	0.150	0.000759
6	18.6~23.0	シルト	4	160	16.0	0.025	0.001284
7	23.0~25.9	細砂	7	160	19.0	0.150	0.000945
8	25.9~26.1	粘土	31	225	17.0	0.020	0.001388
9	26.1~29.5	粗砂	31	225	19.0	0.600	0.000807
10	29.5~34.6	礫	44	440	19.0	2.000	0.000743
11	34.6~35.7	粗砂	33	440	19.0	0.600	0.000922
基盤	35.7~						

表 3-3 地震観測点位置での地盤モデル化結果 (気象庁地震計)

No.	深さ (m)	土質	N 値	せん断 弾性波速度 Vs(m/s)	単位体積 重量 γ (kN/m ³)	D ₅₀ (mm)	基準ひずみ $\gamma_{0.5}$
1	0.0~2.2	砂質シルト	6	130	16.0	0.040	0.000574
2	2.2~7.8	中砂	18	170	19.0	0.380	0.000423
3	7.8~9.6	砂質シルト	2	170	16.0	0.128	0.000686
4	9.6~17.8	中砂	31	200	19.0	0.336	0.000661
5	17.8~20.0	シルト質砂	2	170	19.0	0.245	0.000811
6	20.0~27.3	砂質シルト	4	170	16.0	0.065	0.001111
7	27.3~32.7	礫	50	400	20.0	2.000	0.000717
8	32.7~35.6	中砂	30	360	19.0	0.350	0.000985
9	35.6~50.7	粗砂	16	340	19.0	0.600	0.001049
基盤	50.7~	岩盤					

表 3-4 地震観測点位置での地盤モデル化結果（脱線地点）

No.	深さ (m)	土質	N 値	せん断 弾性波速度 Vs(m/s)	単位体積 重量 γ (kN/m ³)	D ₅₀ (mm)	基準ひずみ $\gamma_{0.5}$
1	0.0~2.5	粘土	6	191	16.0	0.020	0.000855
2	2.5~8.3	細砂	17	206	19.0	0.150	0.000555
3	8.3~10.4	砂質シルト	1	100	16.0	0.040	0.000960
4	10.4~18.5	細砂	35	262	19.0	0.150	0.000792
5	18.5~24.5	シルト	1	100	16.0	0.025	0.001298
6	24.5~27.5	シルト質砂	10	172	19.0	0.070	0.001118
7	27.5~28.0	シルト	6	182	16.0	0.025	0.001355
8	28.0~28.8	シルト質砂	23	228	19.0	0.070	0.001153
基盤	28.8~	岩盤					

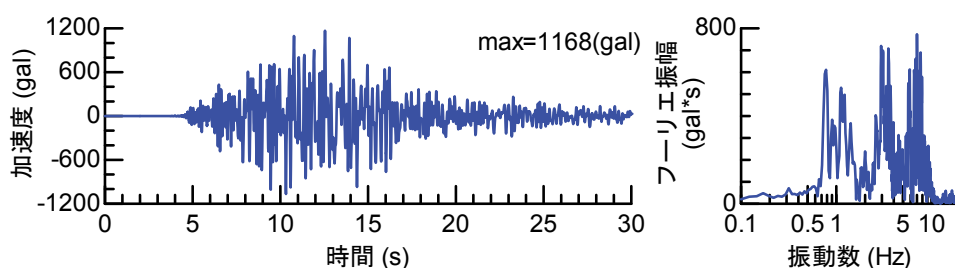


図 3-18 基盤波形（線路直角方向，4/16 本震，脱線地点）

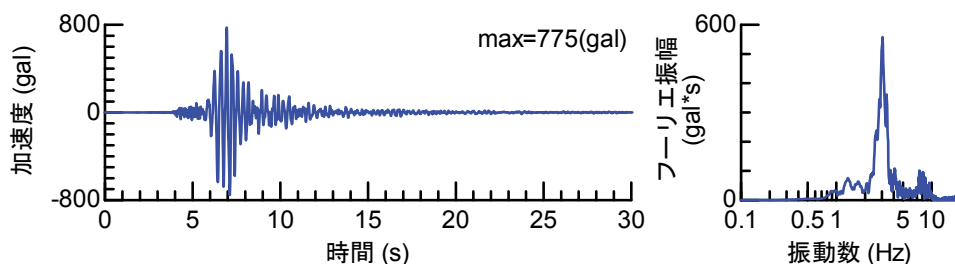


図 3-19 基盤波形（線路直角方向，余震 1，脱線地点）

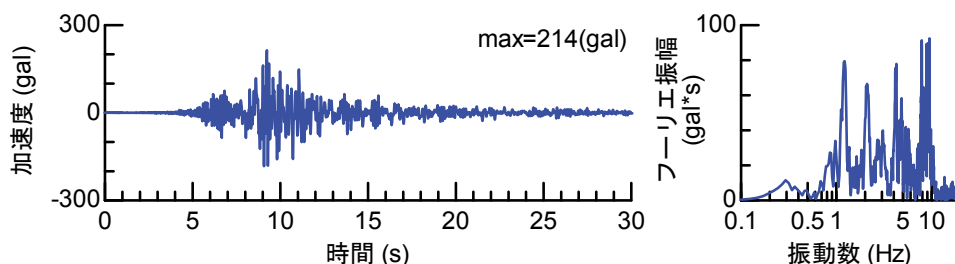


図 3-20 基盤波形（線路直角方向，余震 2，脱線地点）

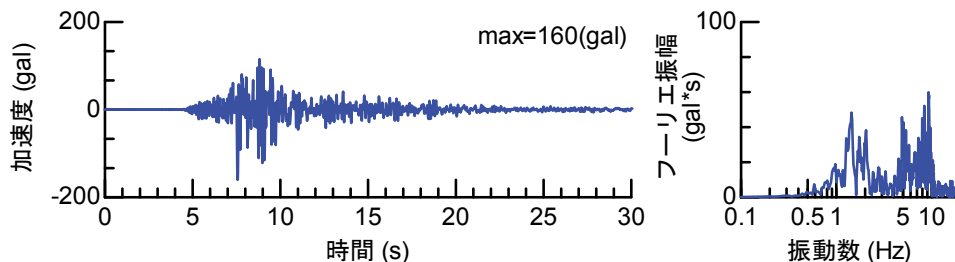
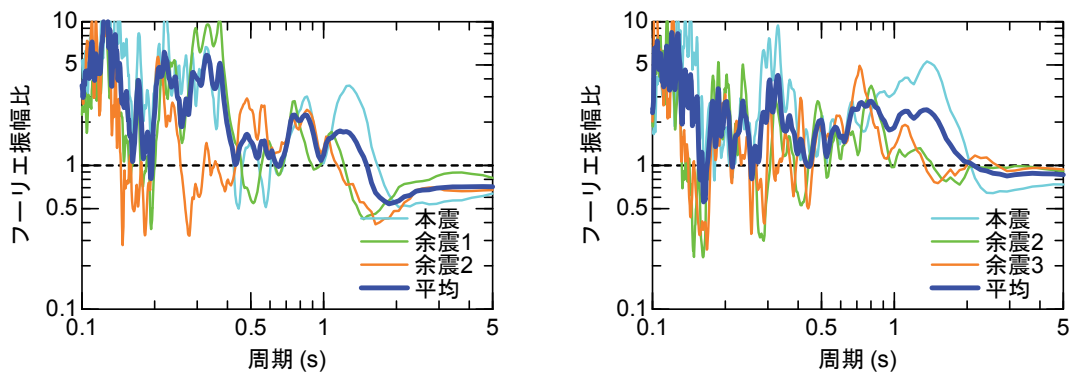


図 3-21 基盤波形（線路直角方向，余震 3，脱線地点）

地点と周辺観測点におけるフーリエ振幅比（脱線地点／周辺観測点）を算出し、得られた結果の平均値を基盤面位置での補正係数とする。この際に使用した地震の情報や振幅比の算定条件等は全



(a) 基準点：在来線地震計

(b) 基準点：気象庁地震計

図 3-22 基盤面位置での補正係数(線路直角方向)

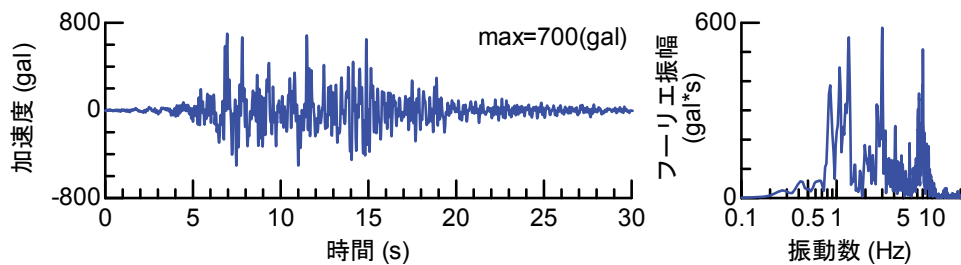


図 3-23 基盤面位置での地震動の推定結果

(線路直角方向, 手法③, 基準点：在来線地震計)

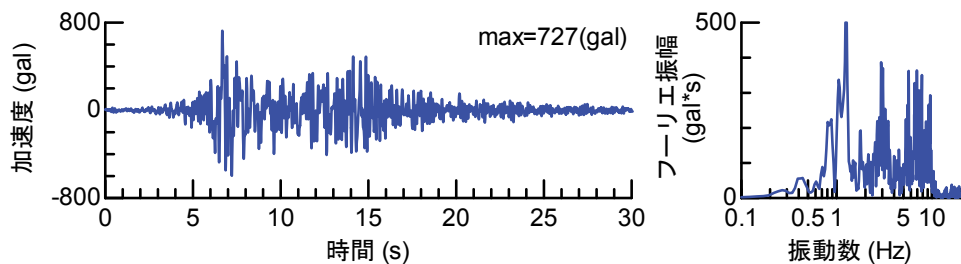


図 3-24 基盤面位置での地震動の推定結果

(線路直角方向, 手法③, 基準点：気象庁地震計)

て 3.4.2 項に示した地表面位置での補正係数を算定した際の条件と同一である。最終的に得られた基盤面位置での補正係数を図 3-22 に示す。

この基盤面位置での補正係数を各観測点の対象地震記録に乗じることで、脱線地点の基盤面位置での地震動波形を推定した。基準とする地点を在来線地震計とした場合の結果を図 3-23 に、気象庁地震計とした場合の結果を図 3-24 に示す。

(4) 地表面地震動の推定

続いて、(3)で得られた基盤地震動と脱線地点での地盤条件を用いた地盤応答解析を実施することで、地表面位置での地震動を算定する。この際の地盤物性値や非線形特性は、引戻し計算を実施した際と同一の条件で設定した。以上の条件に基づいて算出された地表面地震動波形を図 3-25 (基準点を在来線地震計とした場合)、図 3-

26 (基準点を気象庁地震計とした場合) に示す。これらの結果を見ると、対象とする入力地震動の振幅が大きく、地盤の非線形挙動の影響が顕著になるために、結果として地表面地震動の最大加速度は 300gal 前後の値となっていることが分かる。

3.5 考察

ここでは、手法①～手法③によって得られたそれぞれの地震動推定結果を総括することで、以降の検討で用いる地表面地震動波形を選定する。

まず、手法①と手法②の結果について考察を行う。両手法の相違は、地表面位置での地震増幅特性の違いに対する補正の有無(手法①：補正なし, 手法②：補正あり)である。各手法によって得られた地震動波形のうち、線路直角方向の最大加速度は、いずれの手法、基準点を用

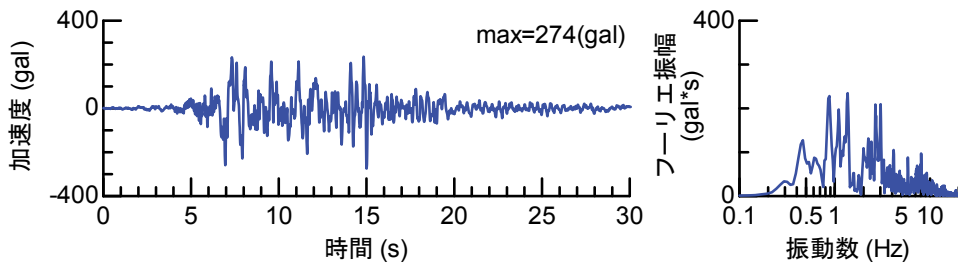


図 3-25 地表面位置での地震動の推定結果
(線路直角方向, 手法③, 基準点: 在来線地震計)

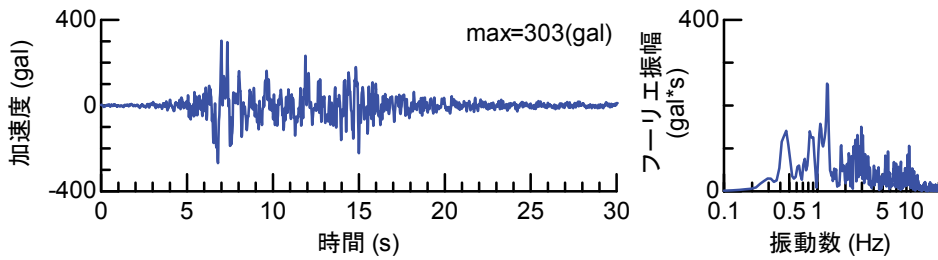


図 3-26 地表面位置での地震動の推定結果
(線路直角方向, 手法③, 基準点: 気象庁地震計)

いた場合にも概ね一致しており、300~400gal 程度の値となっている。しかし、手法②において算出した地表面位置での補正係数(図 3-12, 図 3-13)を見ると、基準点、方向を固定した場合には使用する地震によらず概ね同一の周波数特性、振幅比を示していることが分かる。これは、脱線地点と基準観測点の深部地盤、表層地盤を含む地震増幅特性の相違を表しているものと考えられ、この結果を用いることで、対象地点の違いによる地震増幅特性を適切に補正できるものと考えられる。よって、手法②の結果を用いることで、より精度の高い地震動となっていることが期待される。

続いて、手法②と手法③の結果について考察を行う。両手法の相違は、補正係数を算出する位置の違い(手法②: 地表面位置, 手法③: 基盤面位置)である。各手法による補正係数の算出結果を比較すると、手法③の結果の方がフーリエ振幅比の値が大きくなっていることが分かる。また用いる地震の違いによるフーリエ振幅比の変化も地表位置で評価した結果より大きくなっている。理想的には、基盤面位置で補正係数を算出することで、表層地盤の非線形挙動の違いを除去できるため、振幅比の値が手法②よりも 1.0 に近い結果となると考えられるが、今回の結果はこれとは異なる傾向を示している。この原因として、今回検討を行った地点では動的変形特性試験等による十分な地盤特性が得られておらず、各地点の非線形特性として標準的なパラメータを用いていることが挙げられる。また、地震記録を使用した地震観測点はいずれも震源近傍に位置しているため、地震動が基盤に斜め入射した可能性があるが、本検討における解析では鉛

直下方入射の SH 波を仮定している。これらの原因により、基盤面位置まで戻しを行う際の地盤増幅特性の推定誤差が大きくなり、結果として手法③を用いた場合に補正係数が適切に評価できなかった可能性がある。そのため、手法①~③の中では手法②を用いることが最も信頼性が高いと結論付けることができる。

なお、2004 年新潟県中越地震と 2011 年東北地方太平洋沖地震における脱線メカニズムの解明を行う際には、いずれも手法③を用いていた。新潟県中越地震では、脱線地点において詳細な地盤調査が実施されたため、地震動を引き戻す際のパラメータ設定の信頼性が確保されていた。東北地方太平洋沖地震では震源位置と脱線地点の距離が離れていた上に、脱線地点の地盤が非常に良好であり、戻し計算において地盤の顕著な非線形挙動を考慮する必要がなかった。そのため、これらの地震では手法③を用いることで精度の高い地震動推定が実現できたと考えられる。

続いて、基準観測点として在来線地震計と気象庁地震計のいずれが適切であるかについて考察を行う。まず、基準観測点と脱線地点の位置関係(図 3-16)を再度確認すると、気象庁地震計の方が脱線地点に距離が近い(在来線地震計: 800m 程度, 気象庁地震計: 400m 程度)。また、手法②を用いた場合の線路直角方向での補正係数を比較すると、基準を在来線地震計とした場合(図 3-12)では周期 0.2 秒前後で振幅比が 0.2 を下回る値となっている一方で、基準を気象庁地震計とした場合(図 3-13)では、周期によらず比較的安定した振幅比を示している。以上より、脱線地点の地震動は、気象庁

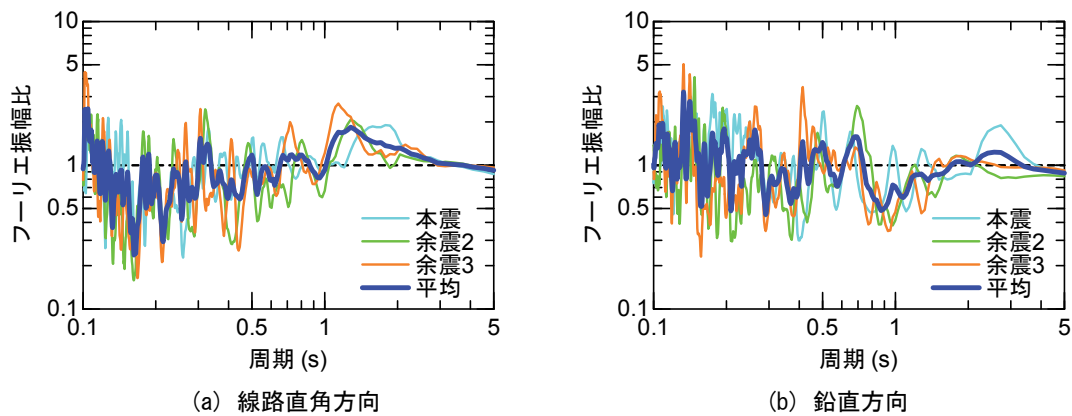


図 3-27 地表位置での補正係数(基準：気象庁地震計) (図 3-13 の再掲)

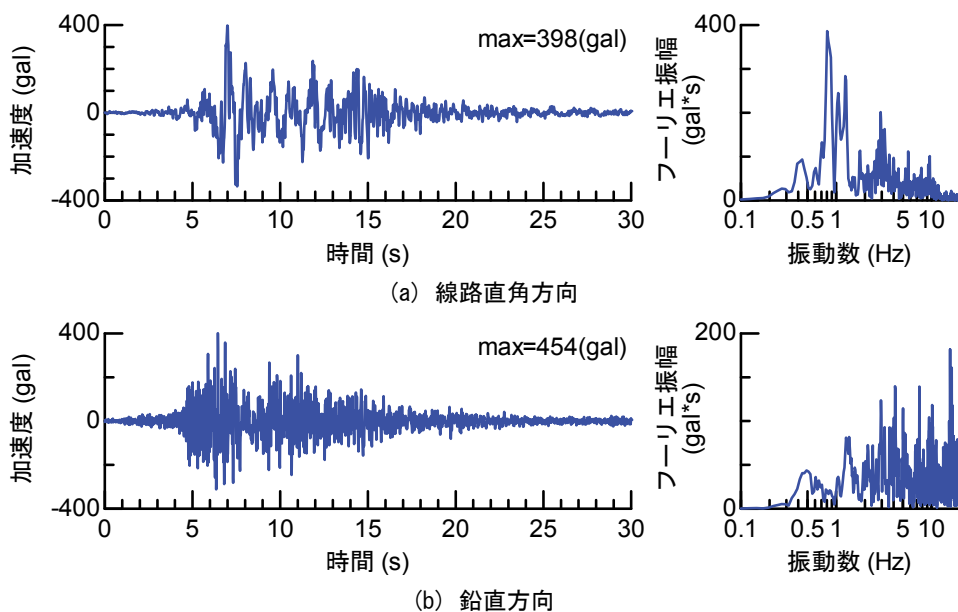


図 3-28 地表面地震動の推定結果(手法②, 基準：気象庁地震計) (図 3-15 の再掲)

地震計の地震記録に類似している可能性が高いと考えられ、これを基準点として用いることが望ましいといえる。

以上の結果を総括すると、構造物、車両の挙動評価には、基準点を気象庁地震計とした手法②により評価された地震動波形を用いることが適切であると考えられる。図 3-27、図 3-28 にこの場合の補正係数、地表面地震動波形を再掲する。

文献 (3章)

- 1) 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, No493/III-27, pp.49-58, 1994
- 2) 室野剛隆, 野上雄太: S字型の履歴曲線の形状を考慮した土の応力～ひずみ関係, 第12回日本地震工学シンポジウム論文集, pp.494-497, 2006
- 3) 安田進, 山口勇: 種々の不攪乱土における動的変形

特性, 第20回土質工学研究発表会, pp.539-542, 1985

- 4) 野上雄太, 室野剛隆: S字型履歴曲線を有する土の非線形モデルとその標準パラメータの設定, 第30回土木学会地震工学研究発表会論文集, No.2-0014, 2009
- 5) (公財) 鉄道総合技術研究所: 鉄道構造物等設計標準・同解説(耐震設計), 丸善出版, 2012