

## 観測記録における基盤地震動の斜め入射の影響を把握するための基礎的検討

(公財) 鉄道総合技術研究所 正会員 ○杉山佑樹, 田中浩平, 坂井公俊

### 1. はじめに

地震基盤以浅の堆積層の地震動伝播において、波線は屈折を繰り返すことで徐々に垂直となるため、工学的基盤面位置の地震動は鉛直下方入射を仮定することが一般的である。しかしながら、震源深さが浅い内陸活断層型の地震などでは、工学的基盤面でも鉛直下方入射とならない場合が考えられる。そのため、観測記録を工学的基盤面まで引き戻すようなときには、地震動の斜め入射の影響が無視できない可能性がある。

そこで、観測記録における地震動の斜め入射の影響を把握するための基礎的検討を行った。はじめに、過去の大規模地震を観測した公的観測点直下の工学的基盤位置の基盤入射角を評価した。続いて、モデル地盤に対して基盤入射角を変化させた地盤応答解析を実施し、基盤入射角が地表面地震動に与える影響を評価した。最後にこれらの結果を総括することで、観測記録における基盤入射角の影響について整理を行う。

### 2. 公的観測点における入射角の評価

基盤入射角は震源から全方向に波動が伝播すると仮定し、Snellの法則にしたがって算定する。まず、深部地盤構造データベース<sup>1)</sup>から、観測点直下の地盤構造(地震基盤～工学的基盤)を把握する。次に、工学的基盤面において任意の入射角を与えた場合に、Snellの法則に従って評価された各層の入射角と層厚から、震央距離を計算する。このとき、実際の震央距離と一致する入射角を解として求めた。図1に新潟県中越地震と東北地方太平洋沖地震を観測した公的観測点(K-NET十日町, K-NET仙台)直下の基盤入射角を評価した結果を示す。地震基盤面への入射角は71.2°, 83.9°と大きな角度となるものの、工学的基盤面においては6.2°, 6.5°と小さな角度となる。なお、この入射角は地震基盤面( $V_s=3500\text{m/s}$ 程度)と工学的基盤面( $V_s=400\text{m/s}$ 程度)のインピーダンス比と地震基盤位置の入射角のみから決定するもので、高々6.6°(地震基盤位置の入射角が90°の場合)程度である。

### 3. 地震動の斜め入射が地表面地震動に与える影響の評価

#### 3.1 解析方法と解析結果

地震動の斜め入射が地表面地震動に与える影響を評価するため、有限要素法による2次元地盤応答解析を行った。解析モデルのイメージ図とS波速度構造を図2に示す。本検討では工学的基盤面までの深さ約20mの多層地盤を対象とした。解析モデル側方には、自由地盤を粘性ダンパーで接続した粘性境界を設定した。モデル下方は、 $V_s=400\text{m/s}$ の工学的基盤を想定した自由地盤を粘性ダンパーで接続した粘性境界とした。また、減衰は地盤のS波速度、土質分類をパラメータとしたQ値の提案式<sup>2)</sup>に一致するようなレイリー減衰を設定した。入力地震動は中心周波数が4Hzのリック波(最大加速度200gal)とし、各基盤位置の地震動に入射角に応じた時間差を与えることで波線の角度を表現した。基盤入射角を0~30°に変化させた4ケースの線形解析を行った(表1)。

解析結果について説明する。各ケースにおいて、 $X=1000\text{m}$ 地点の地表面地震動と入力地震動のフーリエスペクトルの比から伝達関数を評価した(図3)。地震動の入射角が20°程度以上のとき、伝達関数に明瞭な変化が見られている。また、入射角が大きいくほど伝達関数の1次ピーク周波数(3Hz付近)が高周波数側に推移する。一方で、2次ピーク周波数(7Hz付近)に注目すると、地震動の入射角が大きいくほど低周波数側に推移している。

#### 3.2 解析結果に対する考察

基盤入射角を与えた場合に伝達関数の1次ピーク周波数が高周波数側に推移する理由として、平面波の水平成分が評価地点に向かってくることによる、ドップラー効果のような影響が考えられる。この効果について確認することを目的とした検討を行う。線形解析では相反定理が成り立つため、基盤面の節点Aに地震動を入力したときの節点Bにおける地震動は、節点Cに地震動を入力したときの節点Dにおける地震動と同じになる(図4上)。したがって、評価地点直下の基盤面の1節点にのみ地震動を入力したときに評価地点より左側で得られる地表面地震動は、評価地点より左側の基盤位置に入力された地震動による評価地点の地表面地震動を表しており、逆も然りである(図4下)。つまり評価地点の左右で評価される地震動の特徴を比較することで、評価地点に向かってくる水平成分を有する入力地震動(左側)と離れていく水平成分を有する入力地震動(右側)が伝達関数に与える影響を把握できる。

そこで、評価地点( $X=1000\text{m}$ )直下の基盤位置のみにリック波を入力して解析を行った(Case5)。はじめに、得られた地表面地震動に3.1節で設定した地震動の入力時間差を考慮して足し合わせることで、Case4における $X=1000\text{m}$ 地点における地表面地震動を再現できることを確認した(図5)。

続いて、Case5で得られる地表面地震動を、モデル左側と右側で地震動の入力時間差を考慮してそれぞれ集計し、フーリエ振幅スペクトルを評価した(図6)。比較として、同図には入射角0°(Case1)と入射角30°(Case4)の

キーワード 地震動, 斜め入射, 伝達関数, ドップラー効果

連絡先 〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38 (公財) 鉄道総合技術研究所 TEL 042-573-7394

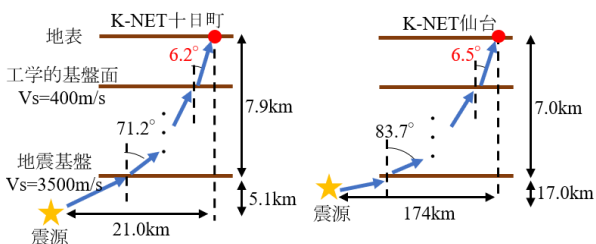
結果も示している。モデル左側のスペクトル（青線）の1次ピーク周波数（3Hz付近）やその大きさは、入射角 30° の場合と概ね一致している。一方で、モデル右側のスペクトル（赤線）は1次ピーク周波数付近ではスペクトルの値が相対的に小さく、寄与が小さいことがわかる。よって、1次ピーク周波数が高周波数側に推移するのは、評価地点に向かっていく水平成分を有する入力地震動の影響が大きく、ドップラー効果のような現象が起きているためであることがわかる。また、2次ピーク周波数（7Hz付近）については、モデル右側のスペクトルの寄与が大きくなっており、このピーク周波数も Case4 の結果に概ね一致している。このことから、評価地点より右側の基盤から入力される、評価地点から離れていく水平成分を有する入力地震動により、ドップラー効果のような現象が起きているために2次ピーク振動数が変化したと考えられる。これは Case4 の2次ピーク周波数が低周波数側に推移することとも調和的である。

4. まとめ・今後の検討

2章において、過去の大規模地震を観測した公的観測点直下の基盤入射角を評価すると、地震基盤面における入射角が90°に近い場合でも、工学的基盤面においては6.5°程度の小さな値となることがわかった。また、3章において、地震動の斜め入射によって、地盤の伝達関数のピーク周波数が推移しており、明瞭な変化が見られるのは20°程度以上であることがわかった。これらのことから、過去の観測地震記録に、地震動の斜め入射が与えた影響は小さいことが推察される。なお、本検討では、地震動の斜め入射が与える影響について、1つの地盤構造モデルを用いた検討に留まっており、必要に応じて他の地盤構造を用いて基盤入射角の影響を評価する必要がある。

参考文献

- 1) 藤原広行, 河合伸一, 青井真, 先名重樹, 大井昌弘, 松山尚典, 岩本鋼司, 鈴木晴彦, 早川譲: 強震動評価のための深部地盤構造初期モデル, 第12回日本地震工学シンポジウム論文集, No.0340, pp.1466-1469, 2006.
- 2) 福島美光, 翠川三郎: 周波数依存性を考慮した表層地盤の平均的なQ<sup>-1</sup>値とそれに基づく地盤増幅率の評価, 日本建築学会構造系論文集, 第460号, pp.37-46, 1994.



(a) 新潟県中越地震 (b) 東北地方太平洋沖地震

図1 波線理論に基づく公的観測点における基盤入射角の評価

表1 解析ケース

ケース名	入射角	地震動の入力
Case1	0度	基盤全面
Case2	10度	基盤全面
Case3	20度	基盤全面
Case4	30度	基盤全面
Case5	30度	基盤1点

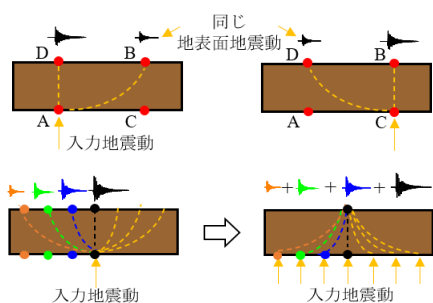


図4 基盤1節点に地震動を入力した場合の解析イメージ

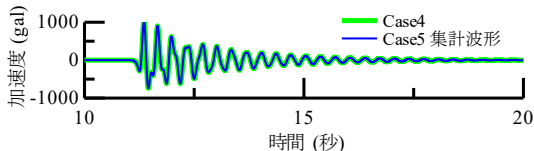


図5 X=1000mにおける地表面地震動 (Case4, Case5)

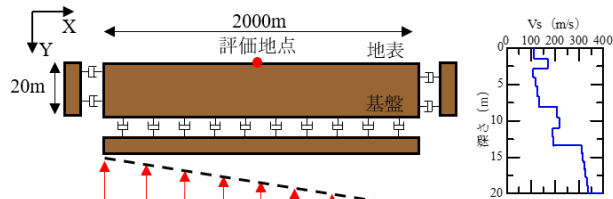


図2 解析モデルのイメージ図とS波速度構造

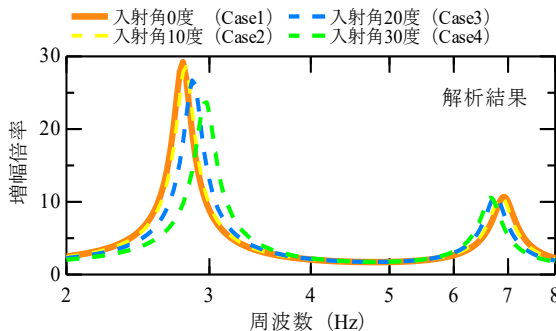


図3 解析結果から評価した伝達関数

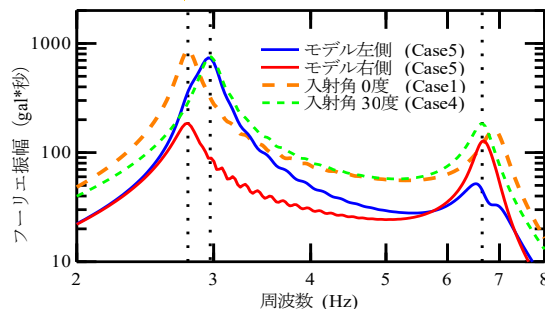
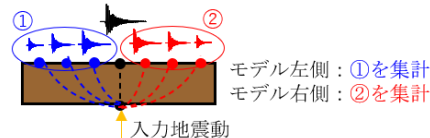


図6 地表面地震動のフーリエ振幅スペクトル