

不整形地盤における基盤傾斜直角方向の地表面地震動の簡易な補正方法

(独) 鉄道建設・運輸施設整備支援機構 正会員 ○阪田暁, 川中島寛幸, 千代啓三
(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

工学的基盤面が傾斜した不整形地盤において二次的に発生する表面波等の影響で、地表面地震動が局所的に増幅する影響を評価するため、例えば鉄道構造物の耐震設計標準（以下、耐震標準）¹⁾では、基盤傾斜方向の地表面設計地震動の簡易な補正方法が提案されている。基盤傾斜方向と基盤傾斜直角方向では発生する表面波の特性が異なることが知られているが、これに対する手法は存在しないため、基盤傾斜直角方向の地表面設計地震動を補正する場合でも、この補正方法が用いられることが多いと考えられる。そこで、本論文では、基盤傾斜直角方向の地表面設計地震動を簡易に補正する手法について検討を行った。

2. 地表面設計地震動の補正方法

まず、耐震標準における地表面設計地震動の補正方法について紹介する。耐震標準では、不整形地盤で二次的に発生する表面波等を水平方向伝播波と呼び、直達波だけでなくその影響を考慮して地表面地震動を評価する（図1）。耐震標準の式(1)~(4)にしたがい、水平成層地盤の地表面地震動のフーリエスペクトル $F_I(\omega)$ に対して、振幅 $\alpha(x)$ 、直達波との到達時間差 Δt （図2）の水平方向伝播波を考慮するための補正係数 $\eta(\omega, x)$ を乗じて、不整形地盤の地表面地震動のフーリエスペクトル $F_{II}(\omega, x)$ を計算し、フーリエ逆変換によって地表面地震動波形を評価する。式(3)、(4)の各係数はパラメータ解析の結果から決定しており、振幅 $\alpha(x)$ は傾斜角 θ 、インピーダンス比 κ 、水平距離 x 、層厚 H 、基盤傾斜部の長さ L_B を用いて計算し、到達時間差 Δt は工学的基盤の V_s 、水平方向伝播波の基盤傾斜部における位相速度 $C_1 = 1.5 \times V_s$ 表層、水平方向伝播波の水平成層部における位相速度 $C_2(\omega)$ 、表層地盤の V_s を用いて計算する²⁾。なお、式(2)の β は低周波数に対する振幅の補正係数である。

これらの式は、基盤傾斜方向（面内方向）の地表面地震動の分析結果を踏まえており、水平方向伝播波はレイリー波の影響が支配的であると考えられるため、振幅 $\alpha(x)$ にはレイリー波の振幅特性が反映されており、到達時間差 Δt の計算ではレイリー波の位相速度を考慮することとされている。一方で、基盤傾斜直角方向（面外方向）の地震動を考える場合は、ラブ波の影響が支配的になることから、ラブ波の振幅特性と位相速度を考慮する必要があると考えられる。

3. 解析概要

$$\Delta t = t_1 + t_2 + t_3 - t_4 = H/V_s \text{ 基盤} + L_B/C_1 + x/C_2(\omega) - H/(\alpha_g \cdot V_s \text{ 表層}) \quad (4)$$

続いて、図3のような表層地盤と基盤からなる不整形地盤を対象に、傾斜角、表層地盤の V_s 、層厚を変化させた二次元有限要素解析を実施した（表1）。解析モデルのメッシュは $x:1\text{m} \times z:1\text{m}$ のソリッド要素で、基盤傾斜部は要素を階段状に配置して表現した。モデル側方は自由地盤を粘性ダンパーで接続した粘性境界とし、モデル下方は粘性ダンパーを接続した吸収境界とした。また、減衰は1Hzと5Hzで15%となるレイリー減衰を設定した。このような条件で、最大加速度400galのホワイトノイズ（継続時間40.96秒）を x 方向（面内方向）、 y 方向（面外方向）にそれぞれ入力し、線形時刻歴解析を実施した。積分時間間隔は0.01秒である。また、 $x=10\text{m}$ ごとに直下の地盤構造に基づく一次元地盤の地震応答解析を行った。解析結果から加振方向に応じた表面波の差異を把握することで、耐震標準の考え方(式(1))に則って基盤傾斜直角方向の地表面地震動を補正する手法について検討した。

4. 解析結果

まず、 x 方向（面内方向）と y 方向（面外方向）にそれぞれ加振した場合の、二次元解析と一次元解析の地表面地震動の差分を水平方向伝播波として評価した結果の一例（ケース4、 $x=0\text{m}$ 地点）を図4に示す。両者を比較すると、加振方向によって水平方向伝播波の波形や最大加速度に差異が見られ、これはレイリー波とラブ波の振幅、位相速度の違いによるものである。そこで、まず表面波の種類に応じた水平方向伝播波の振幅特性の違いを把握するため、 $x=10\text{m}$ ごとに水平方向伝播波と一次元解析の地表面地震動の最大加速度の比率 α_R 、 α_L （レイリー波、ラブ波/1D）および α_L/α_R （ラブ波/レイリー波）を評価した（図5）。 α_R 、 α_L の評価結果を見ると、 $x=0\text{m}$ の基盤傾斜端部で表面波の影響が最も大きくなり、基盤傾斜から離れるほど振幅が減少している。 α_L/α_R の評価結果を見ると、ばらつきはあるものの各ケースで同様の傾向を示しており、全体的に1.0を下回っている。なお、傾斜角が急な場合（ケース7~9）では、 α_R と α_L それぞれの値が小さく、わずかな値の差の影響で α_L/α_R の値が大きくなっている。この結果から、水平方向伝播波の振幅 $\alpha(x)$ に関しては、変換係数 α_L/α_R を乗じることでラブ波の振幅特性を簡易的に表現できると考えられる。本検討では、変換係数 α_L/α_R の平均的な値として $\alpha_L/\alpha_R = 0.8$ と設定した。次に、表面波

キーワード 不整形地盤、地表面地震動、地震応答解析、表面波

連絡先 〒231-8315 横浜市中区本町 6-50-1 (独) 鉄道・運輸機構 TEL 045-222-9083

の水平成層部分における位相速度を確認すると、当然ながらラブ波とレイリー波の位相速度³⁾が異なっており(図6)、水平方向伝播波の時間遅れ Δt の計算における $C_1, C_2(\omega)$ は、発生する表面波に応じた位相速度を考慮することで、地表面地震動の補正がより適切に実施できると考えられる。

そこで、基盤傾斜直角方向の地表面地震動の補正係数として、式(1)、変換係数 α_L/α_R 、ラブ波の位相速度を考慮した補正係数 η (提案法)を評価し、y方向加振時の二次元解析と一次元解析の地表面地震動から評価したフーリエ振幅比(2D/1D)と比較した(図7)。ここでは、例として解析ケース4の $x=-20m, 0m, 20m$ (図3)における比較結果を示している。また、提案法における基盤傾斜部における位相速度 C_1 は、解析結果を良く表現する係数を設定し、 $C_1 = 1.3 \times V_{s表層}$ とした。参考として、基盤傾斜方向の地表面地震動の補正係数(従来法、式(1))を準用した場合の評価結果も従来法として示している。まず、解析結果(2D/1D)と従来法を比較すると、振幅比の最大値は同程度であるもののピーク周期がずれており、基盤傾斜直角方向の表面波の影響を表現しきれないことが分かる。次に解析結果と提案法を比較すると、振幅比の最大値、ピーク周期ともに提案法の方が解析結果に近い値を示していることから、今回設定した変換係数 α_L/α_R や位相速度 C_1 の値は概ね妥当であり、従来法と比べ基盤傾斜直角方向の地表面設計地震動をより適切に評価できると考えられる。

5. まとめ

耐震標準に示される基盤傾斜方向の地表面設計地震動の簡易な補正方法をもとに、基盤傾斜直角方向の地表面設計地震動を補正する方法を提案し、有効性の確認を行った。ただし、現状の補正係数の計算方法は、周波数 3.0Hz以上で解析結果を表現しきれていない部分があることから、今後の課題として、低周波数に対する補正係数 β や到達時間差 Δt の計算における基盤傾斜部の表面波の位相速度を高度化することや、不整形地盤における地表面地震動の補正の考え方を再検討すること等が挙げられる。

参考文献

- 1) (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.
- 2) 室野剛隆，西村明彦，室谷耕輔：地震動に与える表層地盤の局所の変化の影響と耐震設計への適用性に関する提案，土木学会 ローカルサイト・エフェクト・シンポジウム論文集，pp.183-188，1998.
- 3) Haskell.N.A.：The Dispersion of Surface Waves on Multi-layered Media, Bulletin of Seismological Society of America, Vol.43, pp.17-347, 1953.

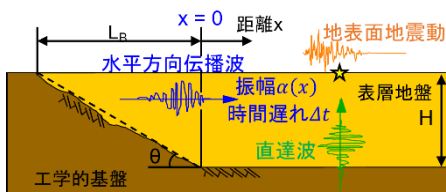


図1 不整形地盤の地表面設計地震動の補正イメージ

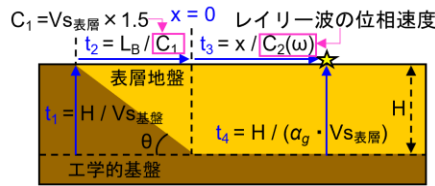


図2 直達波との到達時間差 Δt の考え方 (式(4))

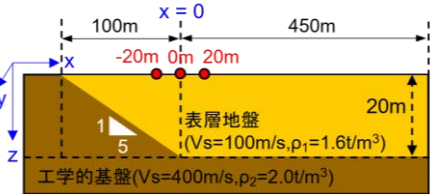


図3 解析モデルのイメージ (ケース4)

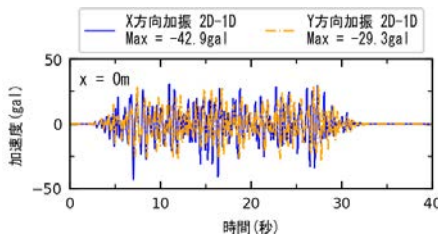


図4 x方向とy方向加振時の水平方向伝播波(x=0m)

表1 解析ケース

解析ケース	傾斜角(z:x)	表層地盤の物性値			基盤の物性値	
		Vs (m/s)	層厚 H(m)	密度 rho1 (t/m^3)	Vs (m/s)	密度 rho2 (t/m^3)
1	1:10	100	20	1.6	400	2.0
2	1:5	100	10			
3		50				
4(図3)	1:5	100	20			
5		200				
6	1:5	100	40			
7		50				
8	1:2	100	20			
9		200				

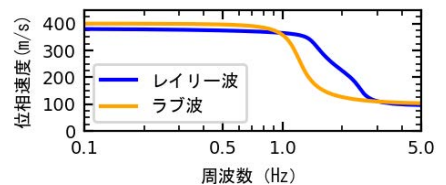


図6 水平成層における表面波の位相速度 (ケース4)

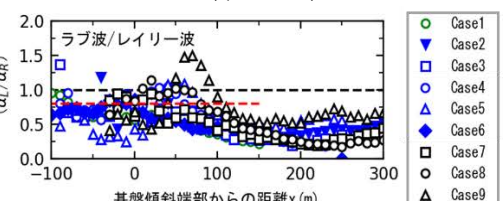
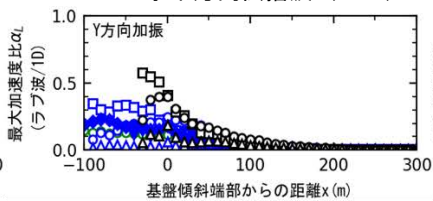
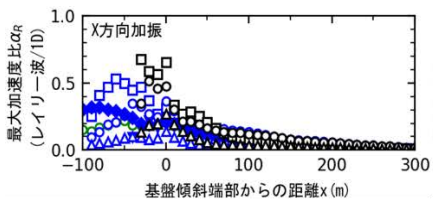


図5 水平方向伝播波と一次元解析の地表面地震動の最大加速度比 α_R, α_L および α_L/α_R

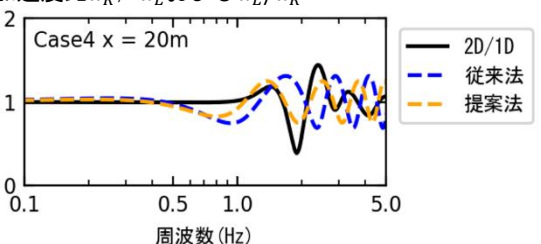
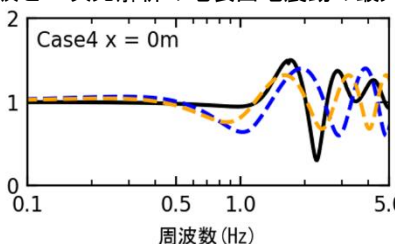
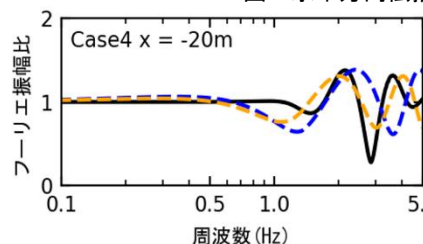


図7 基盤傾斜直角方向の地表面設計地震動の補正係数 η と解析結果より評価したフーリエ振幅比 (y方向加振, 2D/1D)