

土の非線形を考慮した不整形地盤における波動伝播特性に関する一考察

(財)鉄道総合技術研究所 正会員 室野剛隆 畠中仁 棚村史郎

中央復建コンサルタンツ(株) 正会員 ○今村年成 室谷耕輔

1. はじめに

不整形地盤では地震動が局所的に増幅することが知られており、構造物の耐震設計を行う際には、この影響を適切に評価する必要がある。しかしながら、不整形地盤での地震応答に関するこれまでの研究では、線形領域内での挙動に関する検討例が多く、L2 地震動のような大規模地震動を念頭に置いた非線形領域での地盤の挙動は、未だ不明な部分が多いのが現状である。本研究では、片側不整形地盤（表層厚 20m、基盤の傾斜角 1:5）を対象に、表層地盤を非線形材料（土の構成則は RO モデル）と線形材料（解析パラメータは非線形解析結果から等価線形的に設定）の 2 種類で評価した 2 次元地震応答解析を実施し、不整形地盤での地震応答特性について検討した。

2. 検討条件

表-1 解析ケース

解析ケース	解析次元	構成則	解析パラメータ			
			密度 (t/m^3)	V_s (m/sec)	基準ひずみ γ_r	減衰定数 h_{max}
Case1	2D	RO モデル	1.6	100	0.001	0.20
Case2	1D	RO モデル	1.6	100	0.001	0.20
Case3	2D	線形モデル	1.6	42 ~ 77	—	0.164 ~ 0.080
Case4	1D	線形モデル	1.6	42 ~ 77	—	0.164 ~ 0.080

解析ケースを表-1 に示す。

Case1, 3 では、図-1 に示すような表層地盤と基盤層の 2 層からなる片側不整形地盤を対象に解析を行った（以下“2D 解析”と呼ぶ）。表層厚は 20m、基盤の傾斜角は 1:5 とした。

下層境界は粘性境界とし、側方境界はローラー境界としたが、側方からの反射波が解析結果に影響を与えないように解析領域を十分に広く設定した。Case2, 4 では、不整形地盤での地震応答が成層地盤に比べてどの程度増幅するのかを把握するために 2D 解析の成層部分を 1 次元でモデル化した解析を行った（以下“1D 解析”と呼ぶ）。表層地盤の構成則は、Case1, 2 では RO モデル（ $\gamma_r = 0.001$, $h_{max} = 0.20$ ）を、Case3, 4 では線形モデルを用いた。なお、線形モデルでは、Case1, 2 の解析で得られた最大せん断ひずみをもとに、鉛直深さ毎に、等価線形的にせん断剛性と減衰定数を設定した。



図-1 地盤モデル(2D 解析)

基盤は密度 $\rho = 20kN/m^3$ 、せん断弾性波速度 $V_s = 400m/sec$ 、内部減衰定数 $h=2\%$ とした。入力地震動は、表層地盤の卓越周期 ($T_g=0.80sec$) を中心周期に持つ加速度振幅 500gal の Ricker 波とした。

3. 解析結果および考察

非線形解析と線形解析で、不整形地盤における地震動の増幅率がどの程度異なるかを比較する。横軸に基盤傾斜部からの距離を、縦軸に地表面での最大応答加速度の倍率（2D 解析 / 1D 解析）をとったグラフを図-2 に示す。同図では、基盤傾斜部（図-2 の横座標 $x=-40m$ ）～平坦部（ $x=80m$ ）付近の区間で、地盤の不整形性の影響を受けて、地震動が大きく増幅していることが確認できる。その割合は、非線形解析では 1.9 倍程度であるのに対し、線形解析では 1.3 倍程度であり、増幅率が大きく異なることが確認された。

次に、地表面応答加速度の鉛直成分について、その時刻歴波形を図-3 に示す。同図では、既往の研究¹⁾でも指摘されているように、基盤傾斜部で鉛直成分が生成され、それが水平方向に伝播してゆく様子が確認できる。また、非線形解析では、線形解析に比べ、表面波が遠方まで伝播していることが確認できる。

表面波の鉛直成分（水平方向伝播波）と重複反射波の水平成分（鉛直方向伝播波、1D 解析より算定）の時刻歴応答加速度波形を図-4 に示す。同図は、左側に非線形解析の結果を、右側に線形解析の結果を示し、図中の矢印はそれぞれの波形のピークを指している。太線は表面波、細線は重複反射波を示す。

キーワード：不整形地盤，非線形解析，2 次元 FEM

連絡先：(財)鉄道総合技術研究所 〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38, Tel 042-573-7262, fax 042-573-7248

$x=0\text{m}$ の地点での応答に着目すると、非線形解析では重複反射波のピーク時刻に表面波のピークが伝播してきており2つの波のピークがほぼ同じ時刻で重なり合っている。一方、線形解析では重複反射波のピーク時刻にはまだ表面波のピークが伝播してきておらず、2つの波のピークは時刻的なずれが生じている。 $x=20\sim 80\text{m}$ での応答に着目すると、非線形解析では基盤傾斜部から離れるにつれ、表面波のピーク時刻は重複反射波のピーク時刻と徐々にずれてきている。一方、線形解析では、ピーク時刻がずれることに加え、表面波の振幅も急速に減衰している。

これらの結果と図-2 に示す地震動の増幅率の対応を考えると、 $x=0\text{m}$ での非線形解析と線形解析での地震動の増幅率の差は、重複反射波と表面波の時刻的な重なり方の違いによって説明できるものと考えられる。また、 $x=20\sim 80\text{m}$ での増幅率の差は、重複反射波と表面波の時刻的なずれに加え、線形解析で表面波の振幅が急速に減速しているためであると考えられる。

次に、表面波の伝播速度（ピーク値の 20m あたりの平均伝播速度）を比較したものを表-2 に、地盤剛性の時刻的な変化の様子を図-5 に示す。表-2 から、表面波の伝播速度は、非線形解析の方が線形解析よりも速いことが分かる。これは、図-5 に示すように、非線形解析では、地盤剛性が時々刻々と変化しており、剛性が大きく低下するのは大きなせん断ひずみが発生する時刻だけであり、その他の時刻ではせん断剛性の回復しているのに対し、線形解析では、全時間に渡り地盤剛性が一定（非線形解析で得られた最大せん断ひずみ時の剛性で設定）であることが原因であると考えられる。この伝播速度の差が線形解析と非線形解析での重複反射波の重なり方に影響を与えていると考えられる。

また、減衰定数についても、せん断剛性と同様、非線形解析では時々刻々と変化しておりせん断ひずみが小さな時刻では減衰定数が小さくなるのに対し、線形解析では全時間に渡り大きな一定の値となっている。この影響が $x=20\sim 80\text{m}$ 付近での非線形解析と線形解析での表面波の振幅の差となって現れていると考えられる。

4. まとめ

本検討より、次のことが確認できた。(1)不整形地盤での加速度応答倍率は、非線形解析と線形解析で大きく異なる。(2)(1)の現象は、重複反射波と表面波の時刻的なずれにより説明できる。(3)表面波の伝播速度は、時刻的な地盤剛性の変化の影響を受け、線形解析<非線形解析となるが、これが重複反射波と表面波の重なり方に大きな影響を与えている。

以上のことから、不整形地盤での地震応答を考えた場合、表層地盤の時刻的な剛性変化は解析結果に大きな影響を及ぼすので、時々刻々の剛性変化を考慮できる逐次の地盤応答解析を行うことが重要であると考えられる。

- 参考文献 - 1) 室野剛隆, 西村昭彦, 室谷耕輔: 地震動に与える表層地盤の局所的変化の影響と耐震設計への適用に関する提案, 加計・エクト・シボ 論文集, 183-188, 1998.

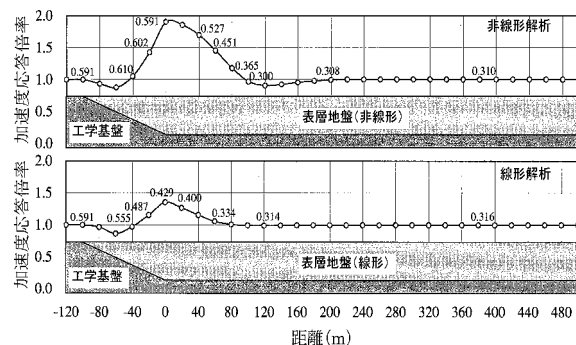


図-2 地表面最大応答加速度の比率(2D/1D)

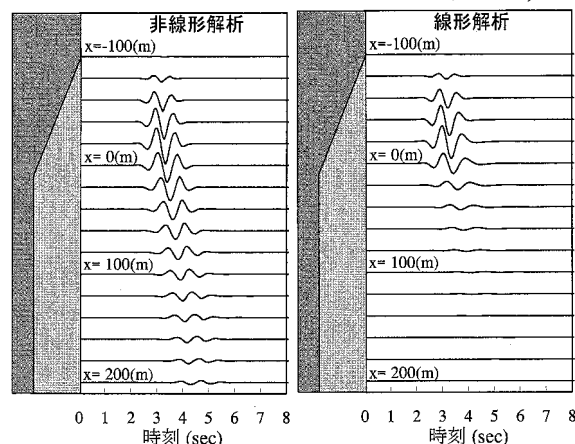


図-3 地表面応答加速度(鉛直成分)

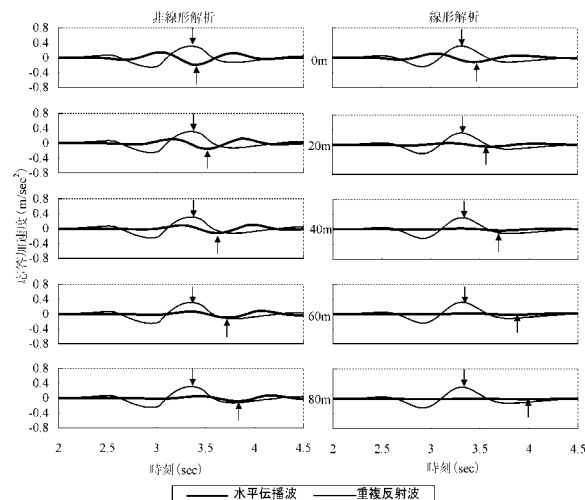


図-4 表面波と重複反射波の時刻的關係

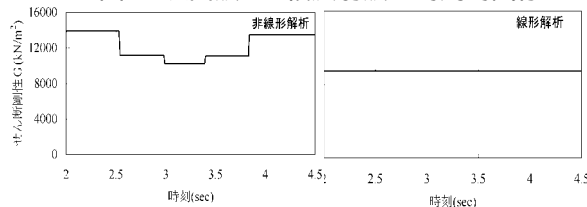


図-5 地盤剛性の時刻的变化

表-2 表面波の伝播速度

	表面波の伝播速度(m/sec)	
	基盤傾斜部	成層部
非線形解析	714	232
線形解析	588	185